

LEO TIITTANEN

**VAIHTOSUUNTAAJAN TOIMINTA VERK-
KÖÖN KYTKETTYNÄ SEKÄ MIKROVER-
KOSSA**

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

LEO TIITTANEN: Vaihtosuuntaajan toiminta verkkoon kytkettynä sekä mikroverkossa
Engl. Inverter operation modes and functions in islanded microgrid and grid-connected applications

Kandidaatintyö, 33 sivua

Tampereen yliopisto

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2019

Pääaine: Tehoelektronikka

Tarkastaja: Tohtorikoulutettava Matias Berg

Vaihtosuuntaaja on tehoelektronikan laite, joka muuntaa tasasähköä vaihtosähköksi. Vaihtosuuntaajilla on tärkeä asema sähköverkkojen toiminnassa ja varsinkin mikroverkoissa. Sähköverkon päto- ja loistehon ohjaukseen voidaan vaikuttaa verkon suureilla ja näitä suureita pystytään ohjaamaan vaihtosuuntaajan avulla.

Työn tarkoituksena on perehtyä vaihtosuuntaajiin sekä vaihtosuuntaajien tehonohjaukseen keskittyen pääosin kolmivaiheisiin toteutuksiin. Työssä esitellään mikroverkoissa käytettäviä vaihtosuuntaajatyyppisiä, niiden ominaisuuksia sekä toteutukseen käytettäviä mahdollisia topologioita.

Tulevaisuudessa uusiutuvien energialähteiden käyttö tulee yleistymään energiantuotannossa merkittävästi ja mikroverkoista koostuvat älykkäät sähköverkot kehittyvät yhä pidemmälle. Mikroverkoissa käytetään erilaisia vaihtosuuntaajia haluttujen ominaisuuksien perusteella. Vaihtosuuntaajien rakenne määrää laitteen ominaisuudet ja eri tyyppisten sovelluksien hyödyntämiseksi mikroverkko vaatii erilaisia vaihtosuuntaaja topologioita. Samoja konvertterirakenteita pystytään kuitenkin käyttämään erilaisten vaihtosuuntaajien toteutukseen. Uusiutuvat energialähteet, energiavarastointijärjestelmät ja generaattorit toimivat sähköverkoissa vaihtosuuntaajien ja muiden muuntimien yhteistyöllä.

Avainsanat: vaihtosuuntaaja, invertteri, mikroverkko, tehonohjaus

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VAIHTOSUUNTAAJA	3
2.1 Kytkinmalli ja pulssinleveysmodulaatio.....	3
2.2 Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja.....	5
2.3 Vaihtosuuntaajan harmoniset komponentit.....	7
3. VAIHTOSUUNTAAJA VERKKOON KYTKETTYNÄ	10
3.1 Vaihtosuuntaajan toiminta ja merkitys verkon eri sovelluksissa	10
3.2 Tehonohjaus	11
4. VAIHTOSUUNTAAJA MIKROVERKOSSA	14
4.1 Älykäs sähköverkko	14
4.2 Mikroverkot	16
4.3 Vaihtosuuntaajatyypit mikroverkossa	18
4.3.1 Verkkoa muodostava invertteri.....	19
4.3.2 Verkkoa seuraava invertteri	21
4.3.3 Verkkoa tukeva invertteri.....	22
4.4 Mikroverkossa käytettyjä topologioita	23
4.4.1 Kaskadoitu H-silta monitaso-invertteri	24
4.4.2 Nelijalkainen jännitelähde invertteri	25
4.4.3 Matriisi-invertteri.....	25
4.4.4 Virtalähde invertteri	26
5. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. Alternatic Current, vaihtovirta
CHB	engl. Cascaded H-Bridge, kaskadiohjattu H-silta
CHBMLI	engl. CHB Multilevel Inverter, CHB monitaso-invertteri
CSI	engl. Current Source Inverter, virtalähde invertteri
DC	engl. Direct Current, tasavirta
DG	engl. Distributed Generation, hajautettu tuotanto
ESD	engl. Energy Storage Device, energian varastointilaite
FLVSI	engl. Four-Leg Voltage Source Inverter, Nelijalkainen jännitelähde invertteri
GFI	engl. Grid Forming Inverter, verkkoa muodostava vaihtosuuntaaja
GSI	engl. Grid Supporting Inverter, verkkoa tukeva vaihtosuuntaaja
IGBT	engl. Insulated-Gate Bipolar Transistor, bipolaaritransistori
MOSFET	engl. Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistor, eristehilatransistori
MPPT	engl. Maximum Power Point Tracking, maksimitehopisteen seuranta
PLL	engl. Phace-locked Loop, vaihelukittu silmukka
PV	engl. Photovoltaic, aurinkosähkö
PWM	engl. Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RES	engl. Renewable Energy Sources, uusiutuvat energianlähteet
THD	engl. Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
TLVSI	engl. Two-Level Voltage Source Inverter, kahden tason jännitelähdeinvertteri
UPS	engl. Uninterruptible Power Supply, keskeyttämätön virransyöttö
VSI	engl. Voltage Source Inverter, kuuden kytkimen vaihtosuuntaussilta
C_n	Kondensaattori n
Hz	Hertsi
i_n	Virta n
L	Käämi
m_a	Modulointikerroin, amplitudi
m_f	Modulointikerroin, taajuus
P	Pätöteho
Q	Loisteho
R_n	Resistanssi n
V	Voltti
V_{ab}	a- ja b-vaiheen välinen pääjännite
$V_{ag,bg}$	a-vaiheen ja maan välinen jännite
V_{bg}	b-vaiheen ja maan välinen jännite
$V_{control}$	Ohjausjännite
V_{DC}	Jännite (tasavirta)
V_{fund_rms}	Signaalin perustajuuden neliöllinen keskiarvo
$V_{IN,n}$	Sisäänmeno-jännite n
V_n	Jännite, nollajohdin
V_{n_rms}	Jännitesignaalin neliöllisen keskiarvon n harmoninen komponentti
$V_{triangle}$	Kolmioaaltojännite
Z_n	Impedanssi n

1. JOHDANTO

Älykkäät sähköverkot ja mikroverkot ovat olleet keskusteluissa mukana eri energiasektoreilla, sähköverkkotekniikan alalla sekä uusiutuvan energiatuotannon parissa viime vuosikymmenillä. Uusiutuvien energialähteiden (RES) käyttö on kasvanut viime vuosina voimakkaasti ja Suomesta on kehittynyt yksi EU-maiden johtavista uusiutuvan energian käyttävistä maista. Vuonna 2018 yli kolmasosa Suomen energian kokonaiskulutuksesta tuotettiin uusiutuvalla energialla [1].

Sähköverkon toiminta ja sähkön saatavuus on nyky-yhteiskunnassa välttämättömyys. Tulevaisuuden sähköverkon kehityssuunnitelmiin kuuluvat muun muassa saarekekäyttöön kykenevät mikroverkot. Mikroverkon peruskomponentteihin kuuluvat paikallisen sähköntuotannon lähteet, kuluttavat kuormat kuten esimerkiksi huoneiston lämmitys tai valaistus, energiavarastot ja vaihtelevasti yhteyspiste mikroverkon ja pääsähköverkon välillä. Saarekekäytössä toimiva mikroverkko on kytkettynä irti pääsähköverkosta ja toimii omien resurssiensa avulla omana sähköverkkonaan. Irtikytkentätilanne voi tapahtua, jos pääverkossa esiintyisi vika tai suoritettaisiin suunniteltu huoltotoimenpide. Yleisesti mikroverkot ovat matalajännitteisiä sähköverkostoja, mutta ne voivat kehittyä isommiksi rakennettaviksi sähköverkoiksi, jopa megavolttien jännitteisiksi verkoiksi tai osiksi tällaisia verkkoja. Mikroverkon säätö on keskitetty omaan keskusjärjestelmään, jonka avulla energiatasapaino pidetään kunnossa ja pystytään koordinoimaan resurssien käyttöä tehokkaasti. [2,3]

Vaihtosuuntaajilla on tärkeä tehtävä sähköverkossa. Niillä pystytään muuntamaan tasavirtalähteiden tasasähkö vaihtosähköksi. Sähköjakelujärjestelmän muuntajat muuttavat suurjännitteet pienemmäksi jännitteeksi kotitalouksia varten ja vaihtosuuntaajat ovat osa tätä prosessia. Tehonhallinta on tärkeää, sillä sähköverkko on pystyttävä pitämään toiminnassa oikealla taajuudella ja amplitudilla sekä normaaliolosuhteissa että vian aikana. Sähköntuotannon ja -kulutuksen on siis jatkuvasti oltava tasapainossa ja jännitetasojen on pysyttävä lain määäämissä rajoissa.

Suuret sähkökoneet tuottavat tehoa sähköverkkoon. Oikosulkumoottorit ovat teollisuudessa ylivoimaisesti käytetyin vaihtosähkömoottorityyppi ja tahtigeneraattorit toimivat

sähkötuotannon perustana. Tuotantoa pystytään hallitsemaan ohjaamalla pätö- ja loistehoa tilanteesta riippuen. Isojen tahtikoneiden pätö- ja loistehon säädöllä on keskeinen merkitys sähköverkon toimivuudelle. Pätötehon säätö tapahtuu muuttamalla voimakoneen tehoa, kun taas loistehoa säädetään muuttamalla generaattorin magnetointia [4]. Vaihtosuuntaajia käytetään näiden tehojen ohjauksessa.

Tässä työssä tehdään kirjallisuusselvitys vaihtosuuntaajan toiminnasta verkkoon kytke-tyissä sovelluksissa sekä mikroverkoissa. Työssä keskitytään kolmivaiheisiin vaihtosuuntaajiin ja tarkastellaan, mitä suureita vaihtosuuntaajan toimintaan liittyy ja miksi niitä ohjataan. Työssä pyritään esittämään vaihtosuuntaajan merkitys erilaisissa verkon sovelluksissa. Työn tavoitteena on myös selvittää, minkä tyyppisiä vaihtosuuntaajia käytetään mikroverkoissa ja millaisia mikroverkon vaihtosuuntaajien ominaisuudet sekä rakenteet voivat olla.

Luvussa 2 esitellään yksinkertaisen vaihtosuuntaajan rakennetta ja toimintaperiaatetta sekä käsitellään kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan ominaisuuksia ja harmonisia komponentteja. Luvussa 3 annetaan esimerkkejä verkon sovelluksista, joissa käytetään vaihtosuuntaajaa. Tämän lisäksi pyritään selvittämään pätö- ja loistehon merkitystä vaihtosuuntaajan ja sähköverkon toiminnassa. Luvussa 4 perehdytään älykkääseen sähköverkkoon ja tarkemmin katsoen mikroverkkoihin. Tarkastellaan erilaisia mikroverkoissa käytettyjä vaihtosuuntaajatyyppejä ja niiden toteutukseen soveltuvia mahdollisia vaihtosuuntaajatopologioita. Työn yhteenveto käsitellään luvussa 5.

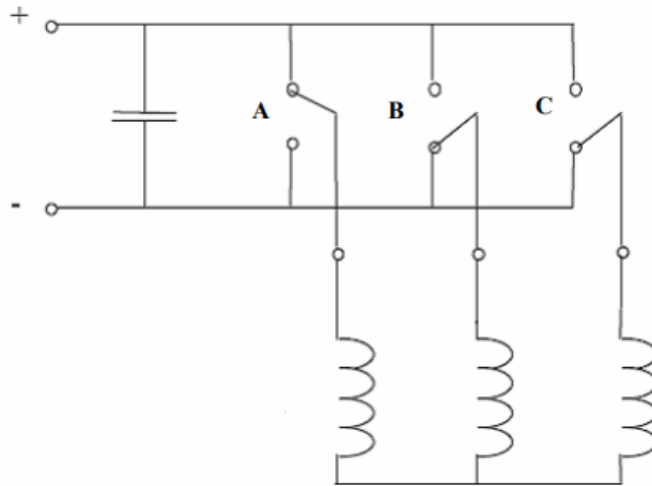
2. VAIHTOSUUNTAAJA

Vaihtosuuntaaja eli invertteri on tehoelektroniikan yksinkertainen muuntaja. Vaihtosuuntaaja on oikeastaan kytkentä, jolla pystytään muuttamaan tasajännitettä halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi [5]. Muunnetun vaihtojännitteen amplitudia voidaan myös muokata. Yksinkertainen vaihtosuuntaaja koostuu yleisimmin bipolaaritransistoreista (IGBT), joiden kytkentäasentoa voidaan ohjata jännitteen avulla. IGBT:tä käytettäessä tarvitaan lisäksi diodeja. Vaihtosuuntaajan toteuttamiseen voidaan myös käyttää muita puolijohdekomponentteja, kuten eristehilatransistoreja (MOSFET).

Vaihtosuuntaajat ovat sähköverkon toiminnalle välttämättömiä. Esimerkiksi aurinkopaneelin tuottama tasasähkö voidaan muuntaa verkon käytettäväksi vaihtosähköksi (verkoinvertteri). Toisena esimerkkinä vaihtosuuntaajilla voidaan ohjata verkkoon kytketyn vaihtovirtakoneen (AC-koneen) pyörimisnopeutta ja toimivuutta. Vaihtosuuntaaja ei siis itse tuota tehoa, vaan kaikki saatavilla oleva teho saadaan muualta, esimerkiksi tasavirtalähteestä. Vaihtosuuntaajaa voidaan käyttää myös tasasuuntaajana, kun tehon virtaussuunta käännetään päinvastaiseksi. Tällöin vaihtosähköä pystytään muuntamaan tasasähköksi.

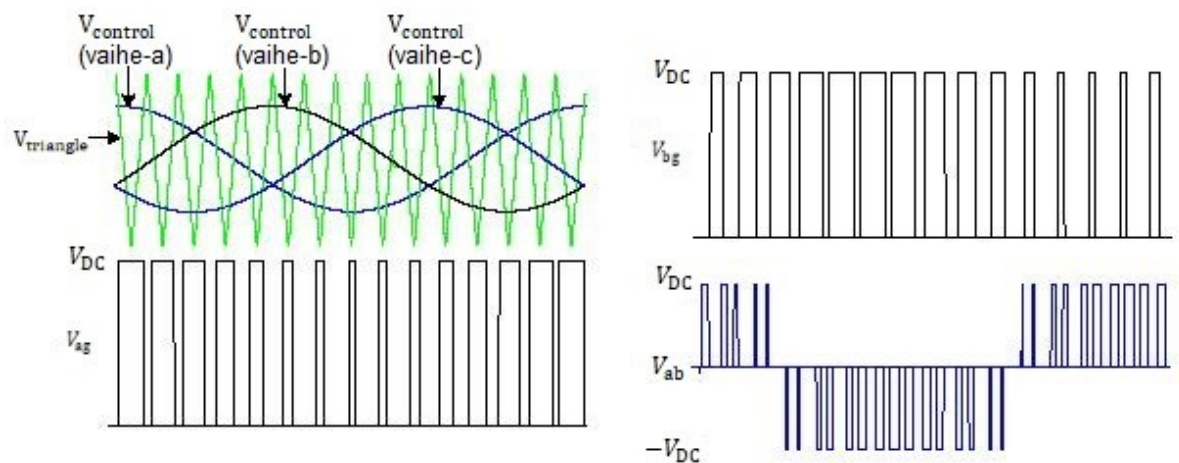
2.1 Kytkinmalli ja pulssinleveysmodulaatio

Vaihtosuuntaajan toimintaa voidaan havainnollistaa kuvan 1 kytkinmallilla. Mallissa olevat kytkimet **A**, **B** ja **C** ovat vaihtokytkimiä, jotka voidaan kytkeä joko positiivisen tai negatiivisen jännitteen kiskostoon. Vastaavasti kuvassa voitaisiin käyttää bipolaaritransistoreja. Kytkimillä on yhteensä 2^3 kombinaatiota ja kytkimien asento voidaan ilmaista numerosarjalla. Esimerkiksi kuvan 1 tapauksessa kytkimen **A** ollessa kytkettynä positiivisessä kiskossa ja **B**:n sekä **C**:n negatiivisessä kiskossa asentosarja voidaan merkitä ja ilmaista olevan 100 tai +--. Lähdön jännite on oikosuljettu kytkinten ollessa asennossa 111 (+++) tai 000 (---). Pääjännite muodostuu kahden ulostulojännitteen erotuksesta ja on aaltomuodoltaan kanttimainen. Teholähteestä saatu tasajännitteen suuruus määrää vaihtojännitteen amplitudin. [5] Amplitudia taas pystytään säätämään modulointikertomella (s. 5 kaava 2.1).



Kuva 1. Yksinkertaisen vaihtosuuntaajan kytkinmalli. [6]

Kuvan 1 ohjauksessa kytkinten pulssien välillä on 120 asteen vaihe-ero. Kytkinten ohjauksessa voidaan vaihtoehtoisesti käyttää sini-kolmiovertaajaan perustuvaa metodia. Sini-kolmiovertaajalla tarkastellaan aaltojen suhdetta. Aaltojen tarkastelussa verrataan, milloin siniaalto on suurempi tai pienempi kuin sahalaitainen kolmiosignaali. [5] Kuvassa 2 on esitetty kolmiojännite (V_{triangle}) ja ohjatut kolmivaiheisen jännitteen vaiheet a, b ja c (V_{control}).



Kuva 2. Sini-kolmioaalto ja pulssileveysmodulaatiosäätö esitys. Kolmivaiheisessa vaihesiirrossa olevalla siniaallolla saadaan kolmivaiheinen ohjaus. [7]

Pulssinleveysmodulaatio (PWM) on yleinen vaihtosuuntaajissa käytetty modulointitapa, jolla viitataan kytkentämuuttujan keskiarvon hallitsemiseen. PWM:n ideana on pätkeä syöttötasajännite erikokoisiksi pulsseiksi. Pulssien kestoajan (leveyden) perusteella saadaan luokiteltua ja integroitua ulostuloon siniaaltoa muistuttava syöttövaihtojännitteen aaltomuoto. Tuloksena syntyy kampamainen pääjännite, jossa taajuuden muuttuessa

kamman piikkien leveys ja määrä muuttuvat. Kuvassa 2 on kuvattu jännitteen muok-
kausta leveinä ja ohuina pätkinä. Kytkimet ovat suurimman osan ajasta johtavassa ti-
lassa tai estämässä virrankulkua, joten suuria tehohäviöitä ei tapahdu ja hyötysuhde py-
syy korkeana. PWM:n suurimpina etuina ovat ulostulojännitteen amplitudin sekä vaiheen
ohjaus samanaikaisesti. [5,8]

Modulointikertoimella voidaan kuvata sini-kolmiovertaajan ominaisuuksia. Amplitudin
modulointikerroin m_a ja taajuuden modulointikerroin m_f määritellään seuraavasti:

$$m_a = \frac{\hat{U}_{control}}{\hat{U}_{tri}} \quad (2.1)$$

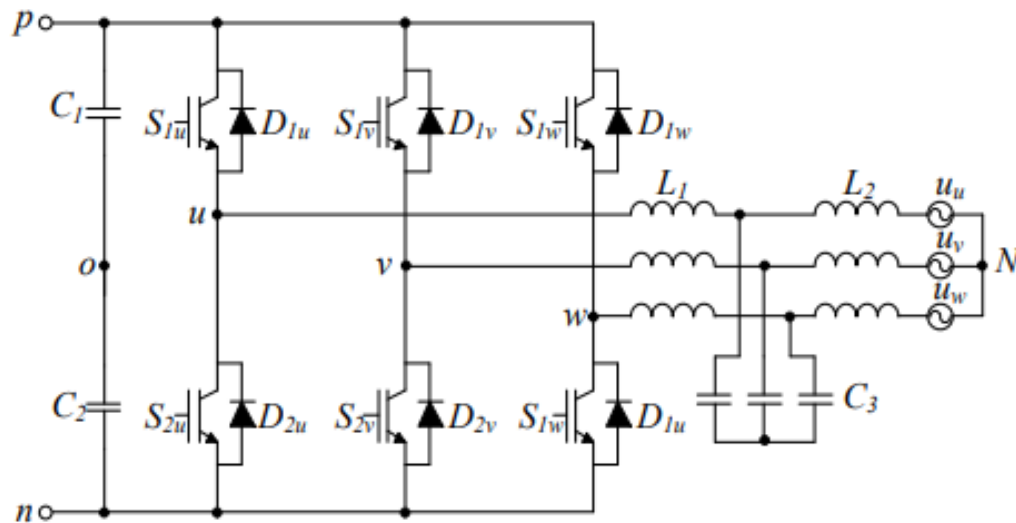
$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{control}} = \frac{f_s}{f_1}, \quad (2.2)$$

missä amplitudin modulointikertoimessa $\hat{U}_{control}$ on ohjausjännitteen huippuarvo ja \hat{U}_{tri}
kolmioaallon huippuarvo. Taajuuden modulointikertoimessa f_s on kanta-aaltotaajuus ja f_1
modulointitaajuus. [5]

Modulointikerroin m_a esittää siniaallon ja kolmiosignaalin huippuarvojen suhdetta. Ker-
toimen ollessa alle yhden kutsutaan tilannetta alimodulaatioksi. Yli yhden kerroin puo-
lestaan kuvaa ylimodulaatiota. Kertoimet vaikuttavat ulostulojännitteen pulssien yliaalto-
jakaumaan ja saadun jännitteen perusaallon suuruuteen suhteessa sisäänmenojännit-
teeseen. [5,8] Yliaallot ovat sähköverkolle haitallisia ja niiden määrää pyritään aina mini-
moimaan.

2.2 Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja

Yleisin keski- ja korkeantason sähkötehoilla käytetty kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja ny-
kyajan teollisuudessa on kuuden kytkimen vaihtosuuntaussilta (VSI) [9]. VSI:tä voidaan
kutsua myös jännitevälipiirimuuttajaksi, kun yhdistetään tasa- ja vaihtosuuntaussilta sa-
maan piiriin [5]. Kuvassa 3 on esitetty eräänlainen VSI.



Kuva 3. Kolmivaiheinen kahden tason VSI piiri kahden käämin ja yhden kondensaattorin suodatuksella. [9]

Kahden tason VSI (TLVSI) koostuu jännitelähteestä, normaalisti yhdestä tai kahdesta sarjaan kytketystä kondensaattorista sekä kuudesta kytkimestä. Kondensaattoreiden määrä voi vaihdella riippuen sovelluksesta sekä siitä, millaiseen käyttötarkoitukseen vaihtosuuntaajaa ollaan suunnittelemassa. [10] Kuvan 3 tapauksessa kolmivaiheiseen ulostuloon on lisäksi kytketty suodatus, joka koostuu kahdesta käämistä ja yhdestä kondensaattorista vaihetta kohden. Kahden tason vaihejännitteellä on korkea harmonisen taajuuden sisältö, joten ulostulojännitettä on suodatettava hyvän sähkölaadun takaamiseksi kuormalle tai sähköverkolle [10,11].

TLVSI:n päätehtävänä on muuntaa modifioitu tasajännite kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi halutuilla suuruuksilla ja taajuuksilla. Kuusi aktiivista kytkintä (kuva 3) sisältävät lisäksi rinnankytketyn vapaasti pyörivän diodin (free-wheeling diode). Kytkimien toiminta määritellään vertaamalla ohjaussignaalin modulaatioaaltoa kolmiosignaalin aaltomuotoon. Kun kuvassa 3 pisteen u jännite on suurempi kuin kolmiosignaalin jännite, kytkin S_{1u} kytkeytyy päälle ja alempi kytkin S_{2u} kytkeytyy pois päältä. Tuloksena syntyvä jännite (inverter terminal voltage) v_{un} on vaiheen u jännite negatiiviseen linjaan n verrattuna ja samansuuruinen kondensaattoreilta syötettävän tasajännitteen kanssa. Koska v_{un} saa joko kondensaattoreiden määrään jännitteen arvon tai arvon nolla, vaihtosuuntaaja tunnetaan kahden tason vaihtosuuntaajana. Vaihtosuuntaajan jalassa ylhäällä ja alhaalla olevien kytkinten vaihtuessa päälle ja pois päältä todella lyhyessä ajassa täytyy huomioida kytkentätransientin vaikutus. Tästä syystä tyhjennysaika (blanking time) on

lisättävä kytkimien toimintaan, jolloin molemmat kytkimet ovat pois päältä määrätyn ajan verran.

TLVSI:n vaiheiden väliset jännitteet saadaan helposti selvitettyä. Esimerkiksi vaiheiden u ja v välinen jännite saadaan laskettua $v_{uv} = v_{un} - v_{vn}$. Vaihtosuuntaajan kytkentätaajuus taas saadaan laskettua $f_{sw} = f_{tri} = f_{control} \cdot m_f$. On kuitenkin huomioitava, että laitteiston taajuus ei välttämättä aina ole sama verrattuna kytkimien taajuuksiin monitasoisissa vaihtosuuntaajissa. [12] Jokaista vaihetta voidaan moduloida oman sinimuotoisen referenssisignaalin perusteella ja näin saadaan muodostettua kuvassa 2 näkyvät sinimuotoiset kolmen vaiheen ulostulojännitteet. Kuvassa 2 vaiheiden välillä on 120 asteen vaihe-ero.

Kolmivaiheisilla vaihtosuuntaajilla on monia hyödyllisiä etuja. Ne ovat kuluttajan ja sähköverkon kannalta tehokkaampia verrattuna yksivaiheisiin vaihtosuuntaajiin. Ulostulojännitteen taajuus riippuu kytkimien nopeudesta, jolloin jännite on laajasti muokattavissa. Erilaisten verkkoon kytkettyjen tahti- ja epätahtimoottoreiden pyörimissuunta voidaan valita vaihtamalla vaihtosuuntaajan (taajuusmuuttaja) vaihejärjestystä kytkimillä. Kolmivaiheista ulostulovaihtojännitettä voidaan myös ohjata vaihtelemalla sisäänmenon tasajännitteen suuruutta. [13]

2.3 Vaihtosuuntaajan harmoniset komponentit

Vaihtosuuntaajissa ulostulevan jännitteen ja virran aaltomuodot ovat harvoin puhtaan sinisignaalin muotoisia. Vaihtosuuntaajan lähdön ei-sinimuotoinen (non-sinusoidal) aalto muodostuu lisäämällä yhteen siniaalto-sarjoja, joita kutsutaan harmonisiksi komponenteiksi (musiikin yhteydessä ylä-ääniksi). Termi on yleistynyt kuvaamaan sinimuotoisen aallon vääristymää, joka johtuu eri taajuuksien aaltomuotojen summasta. [14] Jos laitteen perustaajuus on esimerkiksi 50 hertsiä (Hz), toinen harmoninen taajuus tulee olemaan 100 Hz, kolmas 150 Hz ja niin edelleen. Harmoniset komponentit ovat siis perustaajuuden monikertoja.

Kuuden kytkimen vaihtosuuntaussillan ulostulojännite sisältää harmonisia komponentteja. Näillä ulostulon aaltomuodon komponenteilla on haitallinen vaikutus laitteiden toimintaan: Moduloinnissa sisään syötetty sinimuotoinen aalto ei pysy täysin puhtaan tullessaan ulos vaihtosuuntaajasta. Ulostulojännite vääristyy ja tehonlaatu kärsii, jolloin saatu teho alenee. Käytetyt elementit ja laitteistot voivat rikkoutua harmonisten kompo-

nenttien vuoksi. Moottorikäytöissä virran harmoniset vaikutukset synnyttävät pulssi- maista vääntöä moottoriin, jolloin moottorin toimivuus heikentyy. Moottorin häviöt kasvavat kaikilla nopeuksilla ja erityisesti matalilla nopeuksilla parillisista harmonisista komponenteista johtuva pulssimainen vääntö aiheuttaa nykivää liikettä. Myös ylikuumentamista tapahtuu moottoreissa harmonisten komponenttien vaikutuksesta. [15]

Harmonisia komponentteja pystytään vähentämään erilaisin keinoin. Matalantason komponentit ovat suuruudeltaan isompia suhteessa korkean tason komponentteihin, jolloin niiden vaikutus on myös vaarallisempi laitteistolle. Useimmissa moottorikäytöissä korkean tason komponentit suodattuvat pois kuorman induktiivisen luonteen kautta. Induktio moottoreita (joissa on vuotoinduktanssia) käytetään yleisesti VSI:n kanssa harmonisten komponenttien vähentämiseen. Korkeampi induktanssi vähentää haitoissa mainittuja pulssimaisia vääntömomentteja ja laitteen kulumista. Kuorman harmonisia komponentteja voidaan myös vähentää PWM:llä, suodattimilla tai pilkkomalla komponentteja osiin (selected harmonic-reduction chopping). [15]

Harmonisia komponentteja voidaan myös hyödyntää vaihtosuuntaajan toiminnassa. Kolmannen harmonisen komponentin injektio PWM (Third Harmonics Injection PWM) on käyttökelpoinen tekniikka vaihtosuuntaajan perusjännitteen kasvattamiseksi. Tämä komponentti pystytään lisäämään kolmivaiheiseen sinimuotoiseen modulaatioaaltoon aiheuttamatta ylimodulaatiota. [12] Ohjaussignaalin modulaatioaallon alue kasvaa injektion avulla. Lineaarista modulaatioaluetta pystytään kasvattamaan noin 15 % puhtaaseen sinimuotoiseen ohjausjännitteen aaltoon verrattuna. Kolmivaiheisissa vaihtosuuntaajissa injektioitu komponentti on kaikille vaiheille sama ilman ylimääräistä vaihesiirtoa. [11]

Harmoninen kokonaissärö (THD) eli särökerroin on signaalin kokonaisharmoninen vääristymä. Signaalin aallon harmoniset komponentit summataan yhteen ja saatua arvoa verrataan signaalin perustaajuuteen. Esimerkiksi jännitteen THD saadaan laskettua kaavalla

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}}{V_{fund,rms}} \cdot 100 \% , \quad (2.3)$$

missä $V_{n,rms}$ on jännitesignaalin neliöllisen keskiarvon n harmoninen komponentti ja $V_{fund,rms}$ on signaalin perustaajuuden neliöllinen keskiarvo. [16]

Jännitteen ja virran THD:tä käytetään sähköjärjestelmien tehon laadun kuvaamiseen. Korkean THD seurauksina ovat huippuvirtapiikkien lisääntyminen, korkeammat lämpötilat piireissä, ongelmia laitteen toimivuudelle ja radiotaajuushäiriöt. Moottoreiden, muuntajien ja kelojen magneettisissa sydämissä tapahtuu suuria energiahäviöitä huonon tehon laadun seurauksena. [11]

3. VAIHTOSUUNTAAJA VERKKOON KYTKETTYNÄ

Vaihtosuuntaajat ovat sähköverkon kannalta välttämättömiä ja niitä voidaan käyttää erilaisten verkon tehtävien toteutuksessa. Sähköverkkoon kytkettyjen energialähteiden tuottama tasajännite täytyy pystyä muuntamaan verkolle käyttökelpoiseksi kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi. Verkon jännitteen amplitudia ja taajuutta on kontrolloitava ja taajuuden tasapaino on pidettävä oikeaksi asetetussa arvossa luotettavan toiminnan varmistamiseksi.

3.1 Vaihtosuuntaajan toiminta ja merkitys verkon eri sovelluksissa

Sähköverkkoon kytkettyjä vaihtosuuntaajia voidaan käyttää moneen tarkoitukseen. Generaattorit, aurinkopaneeli-, tuulivoimajärjestelmät sekä itse verkko tarvitsevat sopivan muuntimen, jolla järjestelmät saadaan toteutettua ja toimimaan yhdessä. Turvallisen ja tehokkaan toiminnan edellytyksenä on, että vaihtosuuntaajien täytyy tuottaa tarkasti samansuuruisia jännitettä ja sinimuotoista aaltoa verkossa olevien vaiheiden siniaaltomuotoon verrattuna.

Vaihtosuuntaajaa käytetään paljon teollisuuden kolmivaiheisissa moottorikäytöissä. Epätahtimoottoreissa käämitys mahdollistaa induktiivisen loistehon ottamisen järjestelmästä magnetoimista varten. Induktanssi pyrkii tasoittamaan virtaa syöttöjännitteen pulssimaisesta muodosta huolimatta. [5] Taajuusmuuttajilla taas pystytään ohjaamaan epätahtimoottoreiden pyörimisnopeutta ja muita ominaisuuksia riippuen sovelluksen rakenteesta [4].

Aurinkosähköteknologian käyttö on kasvanut viime vuosikymmenien aikana suuresti ja aurinkosähköllä on mahdollisuus nousta yhdeksi käytetyimmistä uusiutuvan energian lähteistä. Aurinkoenergiajärjestelmässä vaihtosuuntaaja saa tasavirtansa sarjaan kytketyiltä aurinkopaneeleilta. Perinteisesti järjestelmät ovat kytketty kolmivaiheiseen talojen 400 V sähköjakeluverkkoon. Nykyään käytetään säie-inverttereitä (string-inverters), joissa yksi säiesarja aurinkopaneelimuoduleita kytketään omaan invertteriinsä. Jos mo-

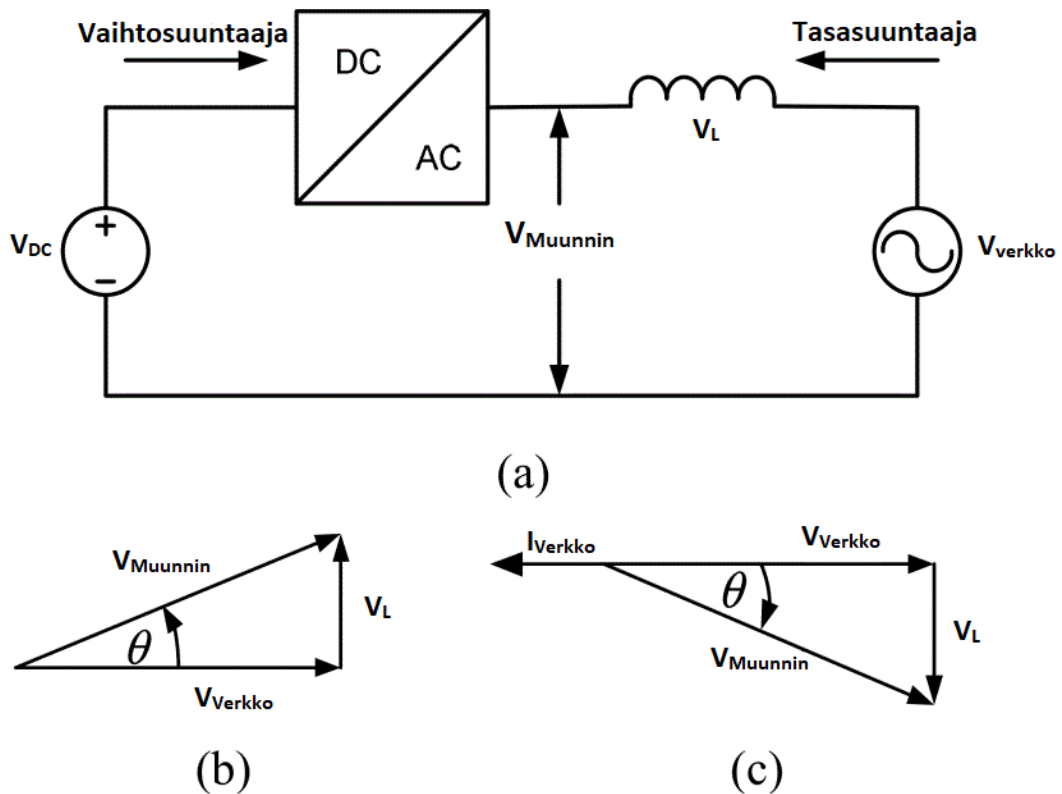
duuleita on kytkettynä vain muutama, saatetaan lisäksi tarvita jännitettä nostava piiri kytkentään maksimihyödyn saavuttamiseksi. Invertterin ulostulo pystytään modulaarisuuden ansiosta kytkemään suoraan talojen 230 V verkkovirtaan. Tulevaisuudessa pystytään käyttämään monisäie-inverttereitä, joissa säikeillä tulee olemaan liitännä omat tasajännite (DC/DC) -muuntimet vaihtosuuntaajien lisäksi. [17]

Tuulivoimalla pystytään tuottamaan puhdasta ja teoriassa loputonta energiaa ideaalisissa olosuhteissa alueille, joihin perinteinen sähköverkko ei pysty sähköä toimittamaan. Verkkoon sijoitetun vaihtosuuntaajan tehtävä tuulivoimajärjestelmässä on tuottaa hyvälaatuaista siniaaltoa verkkoon seuraten samanaikaisesti verkon jännitettä ja taajuutta. VSI:n tapauksessa piirin virtaa ohjataan siten, että virta on joko edellä tai samassa vaiheessa jännitettä. [18] Piiriin kytketyllä kondensaattorilla pyritään tasoittamaan sisääntulon virtaa, jolloin vältetään odottamattomilta virtapiikeiltä ja kytkinten vahingoittumiselta.

3.2 Tehonohjaus

Monimuotoiset sähköverkon sovellukset tarvitsevat siis vaihtosuuntaajaa toimiakseen. Sovelluksilla on erilaisia tarpeita tehon siirtämiselle ja käsittelemiselle, mutta yhteisenä kaikille ovat ohjattavat suureet. Tavoiteltu päto- ja loistehon ohjaus riippuvat vahvasti toiminnan ja kohteen piirteistä: halutaanko tehoa ottaa sähköverkosta laitteiston (kuorman) käytettäväksi, tuottaako laitteisto tehoa sähköverkolle tai onko teho varastoitu väliaikaiseen energiavarastoon, josta se halutaan syöttää sähköverkkoon. Tehon suunnanohjaukseen päästään käsiksi muokkaamalla virran ja jännitteen vaihe-eroa [18,19].

Hyvänä esimerkkinä ohjattavista suureista voidaan käyttää sähköverkon ja tuulivoimalan välissä yhdistettynä olevan vaihtosuuntaajan toimintaa. Kuvassa 4 on esitetty verkkoon kytketty muunnin, joka pystyy toimimaan joko vaihtosuuntaajana tai tasasuuntaajana riippuen tehon virtaussuunnasta.



Kuva 4. Verkkoon kytketyn muuntimen toimintaperiaate (a). Invertterin (b) ja tasasuuntaajan (c) toimintojen osoitindiagrammit. [18]

Kuten jo aikaisemmin käsiteltiin virranohjauksista tuulivoimalan sovelluksissa, kuvan 4 muuntimen virta on joko edellä tai samassa vaiheessa jännitteen kanssa, kun tehon virtaussuunta on tasajännitelähteestä verkkoon päin [18,19]. Muunnin toimii tällöin vaihtosuuntaajana. Osoitindiagrammi tilanteesta on piirretty kohtaan (b). Jos virta ohjataan olevan jännitettä jäljessä tai epätahdissa (out of phase), muunnin toimii tasasuuntaajana (kohta (c)). Tällöin teho virtaa sähköverkosta tasajännitelähteeseen päin. [18] Kuvassa 4 esitetyt osoitindiagrammit pätevät myös muille verkonsovelluksille. Invertteriä, jonka tehovirtaus voi olla molempiin suuntiin, kutsutaan kaksisuuntaiseksi invertteriksi (Bi-directional inverter) [19].

Toisena esimerkkinä suureiden ohjauksesta voidaan käyttää kolmivaiheista verkkoon kytkettyä aurinkosähköjärjestelmää. Vaihtosuuntaaja on aina pakollinen komponentti aurinkosähköjärjestelmissä (PV-järjestelmä). Tehokkain tapa käyttää aurinkovoimalla tuotettua tehoa on välttää väliaikaisia energiavaroja ja syöttää generoitu teho suoraan

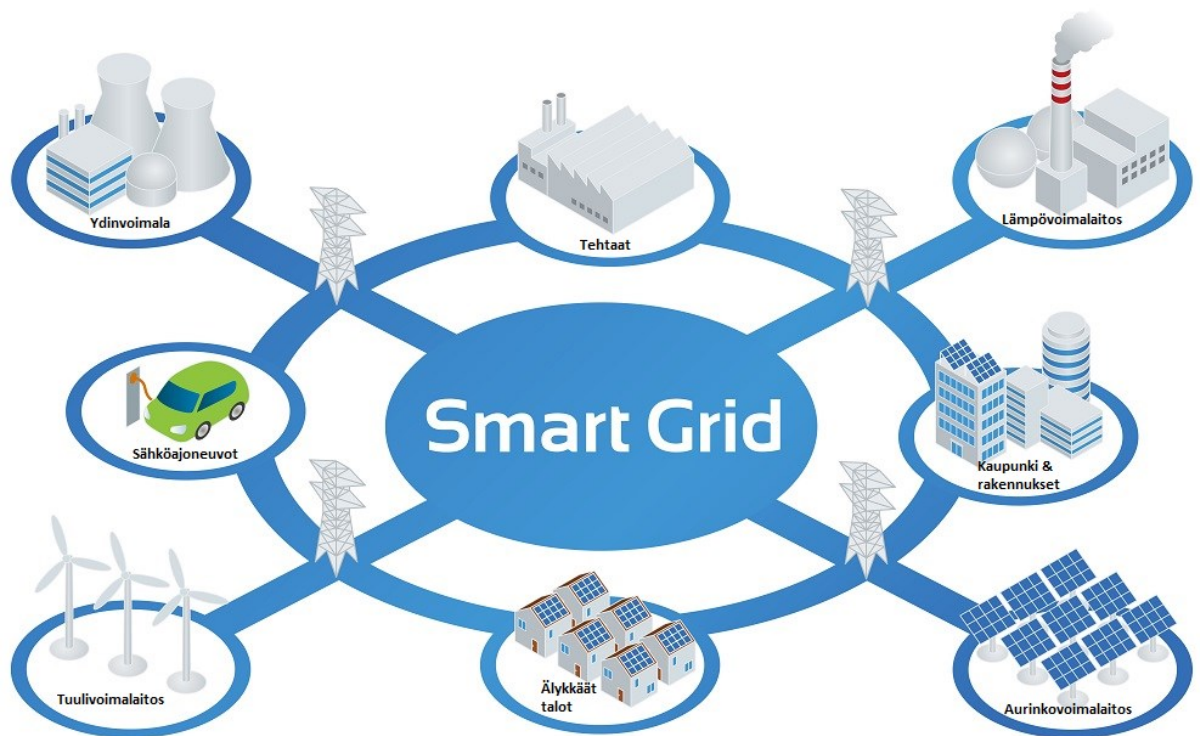
vaihtojännitteeseen pääsähköverkkoon. Nämä niin sanotut PV-invertterit ovat myös tärkeitä loistehon syöttämisessä verkkoon tehonlaadun parantamiseksi. Aurinkosähkölaitteistoilla tehonsäätöjärjestelmässä käytetään maksimitehopisteen seuranta (MPPT) -säätötekniikka. [20] Aurinkopaneelilta saatu teho vaihtelee kuormajännitteen kanssa. MPPT tunnistaa milloin aurinkopaneelista saadaan maksimiteho ja inverttereissä oleva ohjain pyrkii pitämään paneelin jännitteen maksimitehon aikana tietyissä rajoissa, jotta teho saadaan hyödynnettyä. Optimaalisten toimintaolosuhteiden arviointiin on useita menetelmiä. [21] MPPT-tekniikkaa siis tarvitaan, jotta aurinkosähköjärjestelmä pystyy toimimaan täydellä tehokkuudella. Kyseistä tekniikkaa käytetään myös tuuliturbiinijärjestelmissä.

Päto- ja loistehon ohjauksen saavuttamiseksi tarvitaan virtasäädin. Jotta sähköverkon jännite- ja virtatiedot saadaan järjestelmään, tarvitaan lisäksi vaihelukittu silmukka (PLL) kokonaisjärjestelmän ohjausta varten. Tiedot sisältävät eri suureiden arvoja kuten verkon taajuuden, vaihekulman ja amplitudin. Suureiden säätötavat on yleensä esitetty matriisimuodossa ja vektoriesitykset piirretään dq-tason kuvaajina (d-q vector control). [20] Säädon ominaisuuksia ja spesifejä parametrejä eri järjestelmille ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

4. VAIHTOSUUNTAAJA MIKROVERKOSSA

4.1 Älykäs sähköverkko

Monilla eri nimityksillä kutsuttu älykäs sähköverkko (Smart Grid) on moderni, paranneltu versio perinteisestä sähköverkosta. Perinteisiä sähköverkkoja käytetään pääasiassa tehonsiirtoon. Muutamista keskitetyistä generaattoreista saadaan siirrettyä tehoa isoille kuluttajamäärille ja loppukäyttäjille. Älykkäät sähköverkot taas käyttävät kaksisuuntaista tehon ja informaation kuljetustekniikkaa, mikä mahdollistaa automatisoidun ja kehittyneen hajautetun energian toimitusverkoston rakentamisen. [22] Kuvassa 5 on esitetty älykkään sähköverkon perusrakenne.



Kuva 5. Älykkään sähköverkon visuaalinen esitys. [23]

Nykypäivän informaatioteknologia on jo kehittynyt pitkälle. Käyttämällä hyväksi olemassa olevia teknologioita ja tekniikoita älykkäät sähköverkot pystyvät toimittamaan sähkötehoa entistä tehokkaammilla tavoilla käyttäjille ja reagoimaan laajasti sähköver-

kon vaihteleviin olosuhteisiin ja tapahtumiin. Yleistäen voisi sanoa, että älykäs sähköverkko pystyisi reagoimaan mihin tahansa sen omassa verkostossa syntyvään tapahtumaan. Esimerkiksi tehontuotantoon, tehon siirtämiseen ja jakeluun, kulutukseen tai viikaan älyverkot osaisivat vastata kuhunkin tapahtumaan oikealla käyttöstrategialla. Jos esimerkiksi keskitasojännitteiseen muuntajaan iskisi vikatilanne, älyverkko pystyisi automaattisesti muuttamaan tehonvirtausta ja palauttamaan tehonkuljetuksen takaisin käyttäjille. [22] Tehokkuuden lisääntymisen ja tapahtumien älykkään käsittelyn lisäksi älyverkot parantavat sähköverkon luotettavuutta, turvallisuutta sekä uusiutuvien ja vaihtoehtoisten energialähteiden integroitua käyttöä. Generaattorit, jotka toimivat uusiutuvan energian teknologioilla, vähentävät polttoaineen kulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Uusiutuvia energialähteitä tutkitaan laajasti monien tutkijoiden toimesta ja niiden integraatiolla on todistetusti positiivisia vaikutuksia järjestelmien toimintaan. [24] Negatiivisia vaikutuksia löytyy luonnollisesti myös (esimerkiksi ympäristövaikutukset, resurssien ylikuormitus) ja siksi sähköverkkoon tarvitaankin tarkkaa sekä monipuolista tehoelektronikan ohjausta ja säätöä.

Älyverkoja käyttämällä saavutetaan merkittäviä hyötyjä. Uusien syntyvien verkostojen hallintastrategioita voidaan hyödyntää eri sovelluksia varten. Älyverkkoon integroidun hajautetun tuotannon (DG) verkostoja täytyy kontrolloida tehokysynnän hallitsemiseksi ja energiavarastot DG:n kuorman tasapainotuksessa vaativat erilaisia strategioita. [24]

Kuva 5 demonstroi hyvin sitä, kuinka älyverkon jokainen sovellus on yhteydessä muihin sovelluksiin luoden yhtenäisen järjestelmän. Perinteisen sähköverkon infrastruktuuri on kommunikoinniltaan rajoittunut verrattuna älyverkkoon. Tietoliikenneyhteydet ja sensorisolmut mahdollistavat yhteen toimivuuden sovelluksien välillä kuten esimerkiksi sähköjakelukeskuksien, älytalojen ja erilaisten voimalaitosten kesken. Älykkäissä sähköverkoissa luotettava ja reaaliaikainen informaatio muodostuu kriittiseksi tekijäksi luotettavan tehon toimituksessa lähteiltä kuluttajille. Verkkojärjestelmän kunnonvalvonta, diagnostiikka ja suojaus ovat tärkeässä tehtävässä poikkeustilanteiden tapahtuessa. Laitteistoviat, kapasiteettirajoitukset, luonnon vahingot ja katastrofit aiheuttavat tehohäiriöitä ja sähkökatkoksia, jotka pystytään välttämään verkkojärjestelmän kehittyneillä ominaisuuksilla. Älykäsmonitorointi ja -ohjaus ovat täten tulleet pakollisiksi älykkään sähköverkon toteutuksessa. [24]

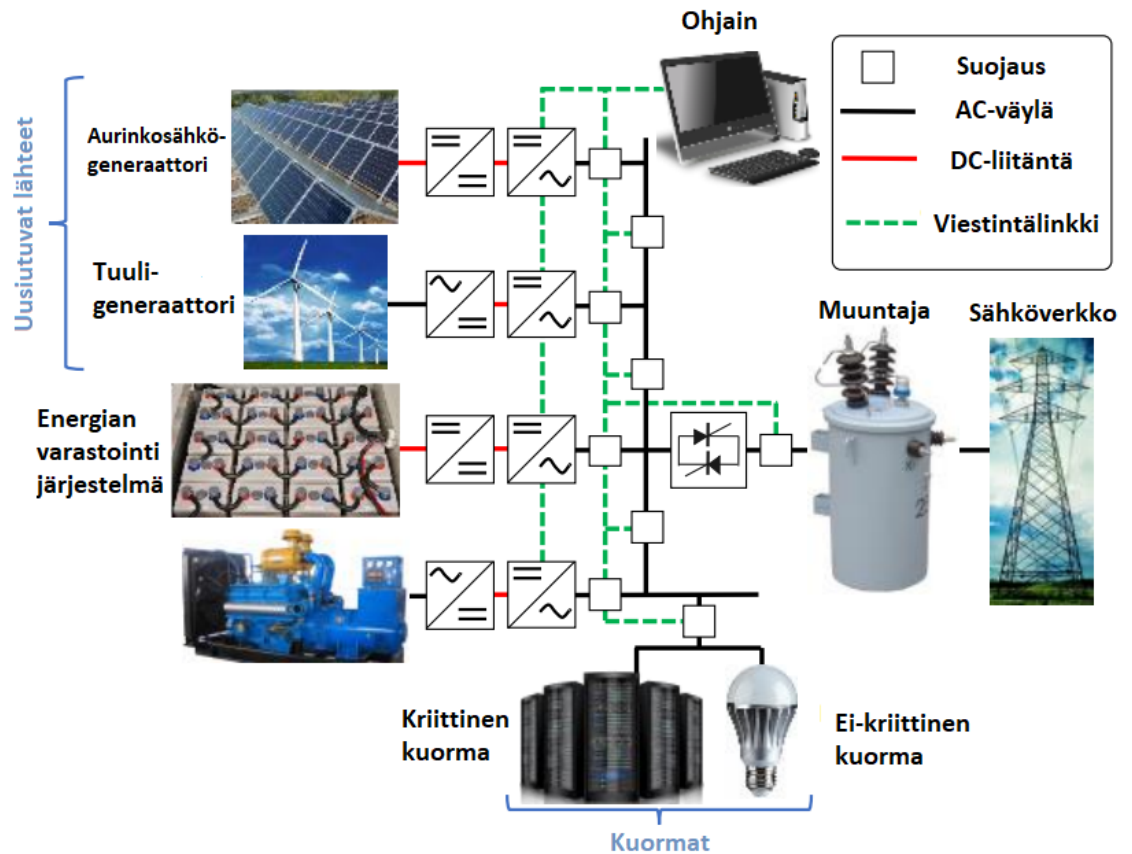
Tarkastellaan esimerkiksi tilannetta sähkötehon kysyntäprofiiliin muokkauksesta. Maksimitehotarpeen (peak demand) alentaminen ja kysyntäprofiiliin tasoitus satunnaisista te-

hopiikeistä tasaisemmiksi johtavat voimalaitosten kulujen ja pääomakustannuksien pienenemiseen. Tehopiikkien aikana sähköiset apuohjelmat voivat käyttää reaaliaikaista sähkön hinnoittelua vakuuttamaan joitakin käyttäjiä vähentämään omia tehotarpeitaan. Tämän tuloksena kokonaiskysyntäprofiili, joka on täynnä tehopiikkejä, pystytään muokkaamaan sileämmäksi. [22]

Älykästä sähköverkkoa voidaan siis pitää sähköisenä järjestelmänä, joka hyödyntää erilaisia nykyaikaisia teknologioita ja tekniikoita. Teknologioiden ja tekniikoiden integraatio sähköntuotannon, -siirtämisen, sähköasemien, jakelun sekä kulutuksen hallitsemiseksi tuottaa järjestelmän, joka on puhdas, turvallinen, luotettava, kimmoisa, tehokas ja kestävä. Kuitenkin lopulliseen ja täydelliseen järjestelmän toteutukseen pääseminen on vielä visio, joka riippuu monen eri järjestelmän näkökulmasta. Älyverkkoja koskeva tutkimus on laajaa ja moninäkökulmaista. Eri toimialoja edustavat tutkijat tuottavat erilaisia visioita älykkäistä sähköverkoista oman näkökulmansa ja keskittymisen kohteensa mukaisesti. [22]

4.2 Mikroverkot

Mikroverkko voidaan määritellä alustaksi, johon on integroitu hajautettuja energianlähteitä (generaattorit), energiavarastoja (akustot, superkondensaattorit) ja pienjännitejakeluverkkoon kytkettyjä joustavia kuormia [25]. Kuvassa 6 on visualisoitu näitä elementtejä ja niiden välisiä kommunikointiväyliä. Älykäs sähköverkko voi tulevaisuudessa koostua pienistä alueellisista osista, jotka ovat jaettu mikroverkoittain. Mikroverkko pystyy toimimaan joko saarekekäytössä itsenäisesti tai yhdistettynä ja synkronisoituna pää-älyverkon kanssa. Hajautetut energiaa tuottavat lähteet (tuuli-, aurinko-, akkuvarastot) saadaan yhdistettyä verkkoon verkkotason muuntimien kautta. Muuntimet toimivat rajapintana sekä hyödyllisenä hallintalaitteena mikroverkolle. [26]



Kuva 6. Vaihtojännitteisen mikroverkon yksinkertainen rakenne. [25]

Kuvassa 6 mikroverkon muuntimet sijoittuvat erilaisten energialähteiden ja vaihtovirtaväylän (AC-väylä) välimaastoon. Vaihtosuuntaaja on esitetty laatikkona, jossa vasemmassa yläkulmassa on yhtäsuuruusmerkki ja oikeassa alakulmassa aaltoviiva (tilde, mätomerkki).

Hallintajärjestelmä valvoo mikroverkon komponentteja. Tehoelektroniikan muuntimia tarvitaan muun muassa mikrogeneraattoreiden ja energiavarastojen yhdistämiseksi jakeluverkostoon. Kuormat ovat yhdistetty suoraan jakeluverkostoon ja näin mikroverkko voi toimia yhdistettynä tai irrotettuna pääverkosta kytkimien avulla. [25]

Generaattorit ja energianvarastointilaitteet (ESD) ovat yleensä kytketty AC-väylään kahden muuntimen kautta. Ensimmäinen muunnin on kytkettynä suoraan energialähteeseen ja mahdollistaa valvontatekniikoiden toteuttamisen, jotta energialähde pystyisi toimimaan optimaalisessa pisteessä mahdollisimman paljon. Tällainen muunnin on yleisesti DC/DC-muunnin tai tasasuuntaaja (AC/DC-muunnin) riippuen ulostulevasta jännitteestä. [25]

Ensimmäisen muuntimen jälkeen on kytkettynä toinen muunnin, vaihtosuuntaaja. Vaihtosuuntaajalla on kaksi päätehtävää verkon toiminnassa: säännellä tulevaa pätö- ja loistevoimaa, joka syötetään mikroverkon AC-väylään ja hallita energianlähteen yhteyttä väylään. Mikroverkon ohjausjärjestelmä ja -strategia määräävät kuinka paljon tulevaa tehoa syötetään AC-väylään. AC-väylä mahdollistaa mikroverkon komponenttien yhteistyön sekä yhteyden pääsähköverkkoon. Väylä on pienjännitetasoinen ja vaatii suojausjärjestelmän erisuuntaisten ja -suuruisten vikavirtojen vuoksi. Pääsähköverkkoon kytkettynä mikroverkon vikavirrat ovat suuria, kun taas saarekekäytössä vikavirrat ovat pieniä. Vikavirrat voivat liikkua molempiin suuntiin joissain AC-väylän osissa. [25]

Mikroverkkojen ja älykkäiden sähköverkkojen jatkuva kehitys ovat tuoneet merkittäviä hyötyjä sähköverkon ja automaation näkökulmista:

- turvallinen verkon komponenttien kommunikointi
- parannettu järjestelmän toimintavarmuus
- haluttujen säätötoimenpiteiden suorituksen mahdollistaminen
- sopeutumiskyky uusissa toimintaolosuhteissa
- omatoiminen parantuminen (self-healing)
- joustavuus ja kimmoisuus sähköverkossa
- ympäristöystävällisyys ja uusiutuvien energianlähteiden käytön edistäminen.
- huipputehon tarpeen väheneminen ja suurien sähköntuotantoyksiköiden investointien siirtäminen myöhemmäksi
- tehon toimittaminen sitä vaadittaessa (demand response)
- sähköjakelun älykkyys ja loppukäyttäjän mahdollisuus vaikuttaa miten käytetty sähkö on tuotettu. [27]

4.3 Vaihtosuuntaajatyypit mikroverkossa

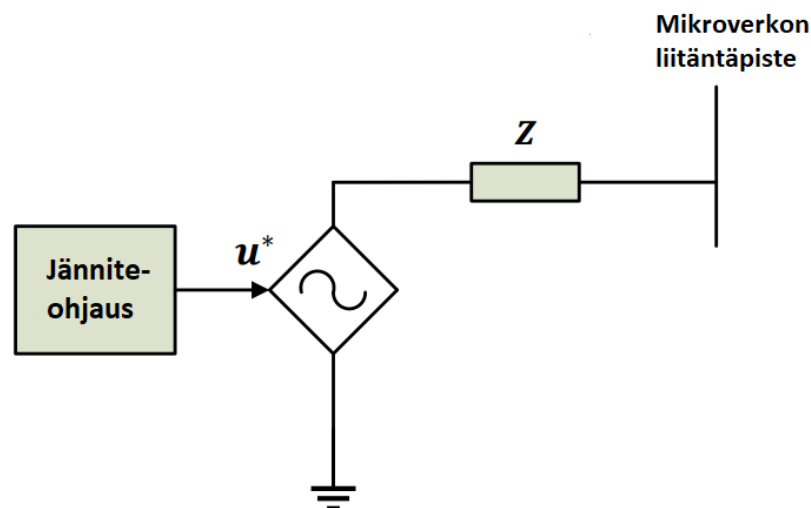
Älykkään sähköverkon hallintalaitteiden mukaan verkkoon kytketyt muuntimet voidaan erotella niiden ominaisuuksien ja tehtävien perusteella. Käytetyn teholähteen perusteella pystytään vielä aliluokittelemaan joitakin muuntimia. [26] Tässä luvussa käsitellään mikroverkon erityyppisiä vaihtosuuntaajia.

Vaihtojännitteisessä mikroverkossa on kolme erilaista päävaihtosuuntaajatyyppeä: verkkoa muodostava, verkkoa syöttävä ja verkkoa tukeva -invertteri. Verkkoa muodostava invertteri voidaan mallintaa dynaamisesti ideaaliseksi vaihtojännitelähteeksi, jolla on matala ulostulon impedanssi. Verkkoa syöttävän invertterin dynaaminen malli on taas ide-

aalinen virtalähde suurella rinnankytketyllä impedanssilla. Viimeisenä verkkoa tukeva invertteri voidaan mallintaa olevan joko ideaalinen vaihtojännitteellä ohjattava virtalähde tai jännitelähde. Verkkoa tukevaa invertteritä pystytään käyttämään järjestelmästä riippuen molempiin tarkoituksiin. [25,28] Aliluvuissa 4.3.1 - 4.3.3 on käsitelty tarkemmin edellä mainittuja vaihtosuuntaajia ja niiden tarkoituksia mikroverkossa.

4.3.1 Verkkoa muodostava invertteri

Verkkoa muodostavat invertterit (GFI) ovat yhdistettynä energiaa varastoihin laitteisiin mikroverkossa. GFI:llä on kaksi päätehtävää: pääsähköverkkoon yhdistettynä toimiminen ja saarekekäytössä toimiminen. Kun kyseinen invertteri on yhdistettynä sähköverkkoon, se säännöstelee AC-väylään syötettävää pätö- ja loistehon määrää. Tavoitteena on hallita energiavarastojen lataustasoa ja joissain tapauksissa parantaa sähkönlaatua. Saarekekäytössä taas sinimuotoisen jännitteen muodostaminen AC-väylään on välttämätöntä mikroverkon toiminnan kannalta. GFI:t suorittavat tämän, jolloin niitä voidaan kuvata ohjattavina jännitelähteinä. GFI:n dynaamisessa mallissa jännitelähteen kanssa on sarjassa pieni impedanssi, jonka vuoksi GFI tarvitsee erittäin tarkan synkronointijärjestelmän toimiakseen rinnakkain muiden verkon muuntimien kanssa. [25,28] Dynaamisella mallinnuksella ja simuloinnilla voidaan tutkia systeemin käyttäytymistä valitulla ohjausstrategialla. Systeemin fyysinen rakenne on usein erilainen dynaamiseen malliin verrattuna. [29] Kuvassa 7 on pelkistetty GFI:n dynaamisen mallin esitys.



Kuva 7. Verkkoa muodostavan invertterin dynaaminen malli. [26]

Kyseessä olevilla inverttereillä on tyypillisesti droop-ohjaus (droop (speed) control) käytössä ulostulosuureiden ohjausta varten. Ulostulojännitteen taajuutta ja amplitudia voidaan säädellä ja tämä vaikuttaa pätö- ja loistehoon. Droop-ohjausta kutsutaan myös P - f/Q - V droop-ohjaukseksi, joka jäljittelee perinteistä generaattorin ohjaus- ja hallintatapaa. [25] Droop-ohjaus on käytännössä taajuuden muutoksen suhde generoituun ulostulevaan tehon muutokseen. Generaattoriyksikön säätimen droop-ominaisuus annetaan yleensä prosentteina. [30]

Mikroverkon ohjausstrategioita pyritään käyttämään siten, että ne eivät kommunikoi ohjausstrategioina keskenään. Tämä johtuu mikroverkon laitteiden hajautuksesta. Vaikka mikroverkossa on toteutettu hierarkkinen ohjausrakenne ja verkossa tarvitaan myös toissijaista sekä tertiääristä ohjausta, mikroverkon perustoimintojen suorittaminen suositellaan toteutettavaksi ensisijaisessa ohjaustasossa ilman keskinäistä viestintää. Ylimääräiset väyläyhteydet tuovat lisää haavoittuvuutta laitteistoille vian tapahtuessa. Edellä mainittu droop-ohjaus on juurikin laajasti käytetty kommunikoimaton ohjausmetodi mikroverkoissa. Droop-ohjauksella verkon kuormituksen jakaminen voidaan suorittaa itsenäisesti hajautetulle tuotannolle. Sama idea tapahtuu rinnakkain kytkettyjen synkronisten generaattorien tehonjaossa. [31]

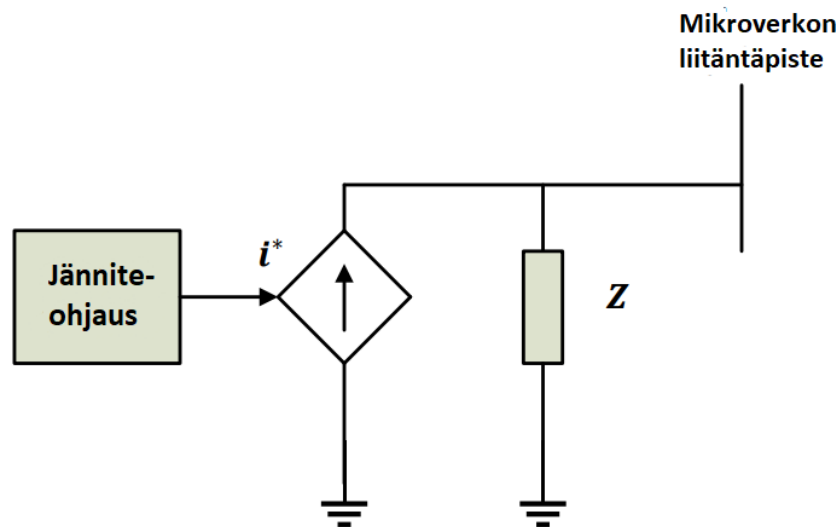
Saarekekäytössä verkon suureet ovat asetettu tietyn suuruisiksi (Suomessa taajuus 50 Hz, jännite 230 V) ja droop-ohjaus pitää huolen siitä, että sekä taajuus että jännite pysyvät sähkölaatustandardien mukaisissa rajoissa. Sähköverkkoon yhdistetyssä toiminnassa taas verkkoa muodostavan invertterin kautta syötettävä tai kulutettava pätö- ja loisteho määräytyy mikroverkon ohjauksen mukaan. [25]

Käytännön esimerkkinä GFI voi olla keskeyttämätön virransyöttöjärjestelmä (UPS). UPS-järjestelmä pysyy irrotettuna pääsähköverkosta normaalissa toiminnassa. Poikkeustilanteen tapahtuessa UPS muodostaa verkon jännitteen itse ja mikroverkoissa tätä muodostettua jännitettä käytetään referenssinä muille UPS:ään kytketyille verkkoa syötettäville tehomuuntimille. [28]

Kuvassa 6 nähtävä DC/DC muunnin täytyy kytkeä energiavaraston ja invertterin väliin, koska sekä saarekekäytössä että sähköverkkoon kytkettynä tehovirtaus on edestakaista. Energiavarastosta tuleva ja lähtevä teho aikaansaa invertterin latautumisen ja purkautumisen. [25] AC-väylään tulevaa ja lähtevää tehoa täytyy pystyä hallitsemaan ja sen jännitettä sekä virtaa voidaan muuttaa invertterin jälkeen DC/DC-muuntimella.

4.3.2 Verkkoa seuraava invertteri

Verkkoa seuraavat (Grid Following/Feeding) invertterit toimivat aurinkosähköjärjestelmiin ja tuulivoimaloihin yhdistettynä. Päätehtävänä tällä invertterityypillä on syöttää näistä mikrogeneraattoreista tuotettu teho sähköverkkoon yhtenäisellä tehokertoimella, toisin sanoen loisteho Q halutaan olevan nolla. Verkkoa seuraavaa invertteriä voidaan mallintaa ja ohjata virtalähteenä, jossa on suuri lähtöimpedanssi rinnan. Invertteri tarvitsee AC-väylän jännitearvon tietoonsa, jotta se pystyy seuraamaan sähköverkon jännitearvoa ja syöttämään virtaa verkkoon. Nämä invertterit eivät pysty toimimaan saarekekäytössä, jos sähköverkon amplitudia ja taajuutta ei voida informoida invertterille. Tieto on kuitenkin mahdollista tuottaa muilla mikroverkon inverttereillä tai paikallisella synkronisella generaattorilla. [25,28] Kuvassa 8 on esitetty dynaaminen malli verkkoa seuraavasta invertteristä.



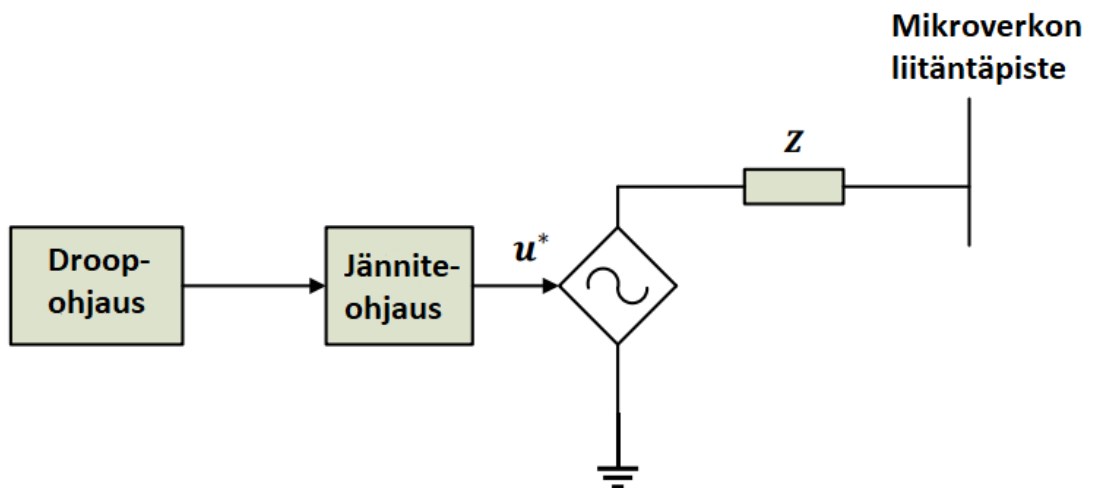
Kuva 8. Verkkoa seuraavan invertterin dynaaminen malli. [26]

Mikrogeneraattoreilta saatu teho kulkeutuu DC/DC- tai AC/DC-muuntajan kautta verkkoa seuraavalle invertterille. Muuntajat käyttävät usein MPPT-tekniikkaa tehon tuotannon maksimoimiseksi. Jotta verkkoa seuraava invertteri pystyisi syöttämään muuntajalta saadun tehon sähköverkkoon, invertteri ensimmäiseksi mittaa verkon jännitteen tunnistaakseen käytettävän taajuuden ja jännitepiikit. Tämän jälkeen invertteri synkronoi oman ulostulojännitteensä verkon kanssa samaan tahtiin. Verkkoa seuraava invertteri siis todella seuraa sähköverkkoa, jotta sinimuotoinen virta voidaan syöttää verkon jännitteen kanssa samaan vaiheeseen. Näin saadaan toteutettua yhtenäinen tehokerroin. [25] Verkkoa syöttävää (Grid Feeding) invertteri nimitystä käytetään myös kyseisestä vaihtosuuntaajatyypistä, koska tämäkin nimitys kuvaa hyvin laitteen toimintaa. [26]

Verkkoa seuraavan invertterin toimintaa säädetään yleensä korkean tason ohjaimella kuten MPPT-ohjauksella tai mahdollisen voimalaitoksen ohjaimella, joka asettaa referenssi arvot pätö- ja loisteholle. Tehojen ohjaamiseen tarvitaan erilaisten ohjaussilmukoiden rakenteita. [28]

4.3.3 Verkkoa tukeva invertteri

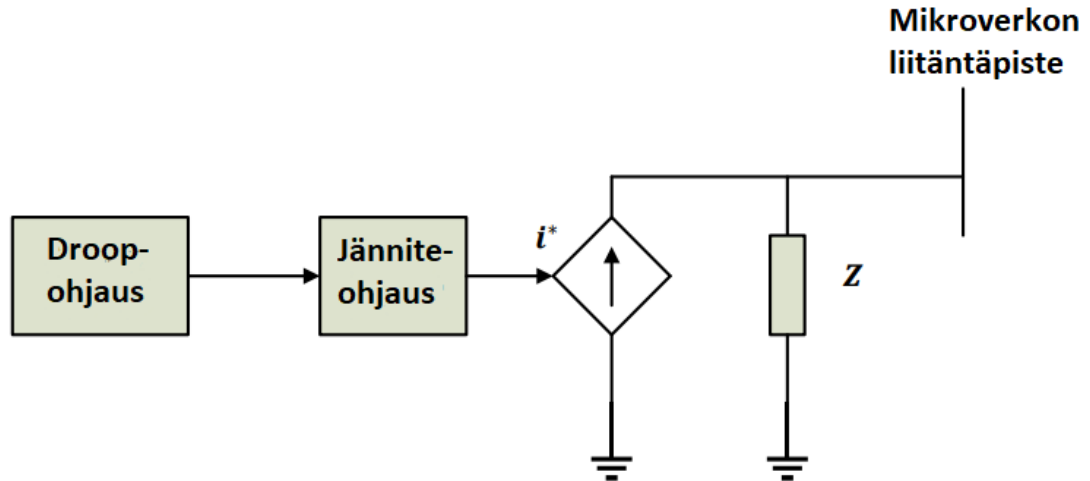
Mikroverkoilla on erilaisia ominaisuuksia keskenään. Näistä riippuen GFI ei aina pysty pitämään yllä AC-väylän taajuutta ja jännitetasoa haluttujen rajojen sisäpuolella. Tämä voi johtua ESD:n rajoittuvuudesta säilöä tai tuottaa energiaa. Tästä johtuen tehoa välittömästi tuottamaan pystyviä generaattoreita ja ylimääräisiä ESD:itä käytetään yhdessä tai erikseen tukemaan GFI:n toimintaa saarekekäytön aikana. Näihin generaattoreihin tai ylimääräisiin ESD:hin kytkettyjä vaihtosuuntaajia kutsutaan verkkoa tukeviksi invertteireiksi (GSI). [25] Päätehtävänä GSI:llä on säädellä AC-väylän jännitteen amplitudia ja taajuutta pätö- ja loistehon kautta [28]. Pätö- ja loistehoa säädetään taas laitteelle syötetyn jännitteen ja virran avulla. GSI voidaan jakaa kahteen alityyppiin riippuen käytetystä lähteestä: verkkoa tukeva-muodostava invertteri ja verkkoa tukeva-seuraava invertteri [26]. Kuva 9 esittää tukeva-muodostava alityypin dynaamista mallia.



Kuva 9. Verkkoa tukeva-muodostavan invertterin dynaaminen malli. [26]

Saarekekäytössä GSI tyypillisesti ohjataan toimimaan jännitelähteenä [25]. Verkkoa tukeva-muodostava invertterin tapauksessa tehoa ohjataan AC-väylästä saatujen tietojen perusteella. Tukeva-muodostava invertterin mallinnettu linkki-impedanssi voi olla yhdistettynä fyysisesti AC-väylän ja invertterin välissä tai virtuaalisesti emuloituna invertterin

virranohjaussilmukassa. [25,28] Tämä invertteri pystyy toimimaan sekä saarekekäytössä että sähköverkkoon yhdistettynä. Saarekekäytön tapauksessa verkkoa muodostavaa invertteriä ei tarvita lisäksi mikroverkkoon. [28]



Kuva 10. Verkkoa tukeva-seuraavan invertterin dynaaminen malli. [26]

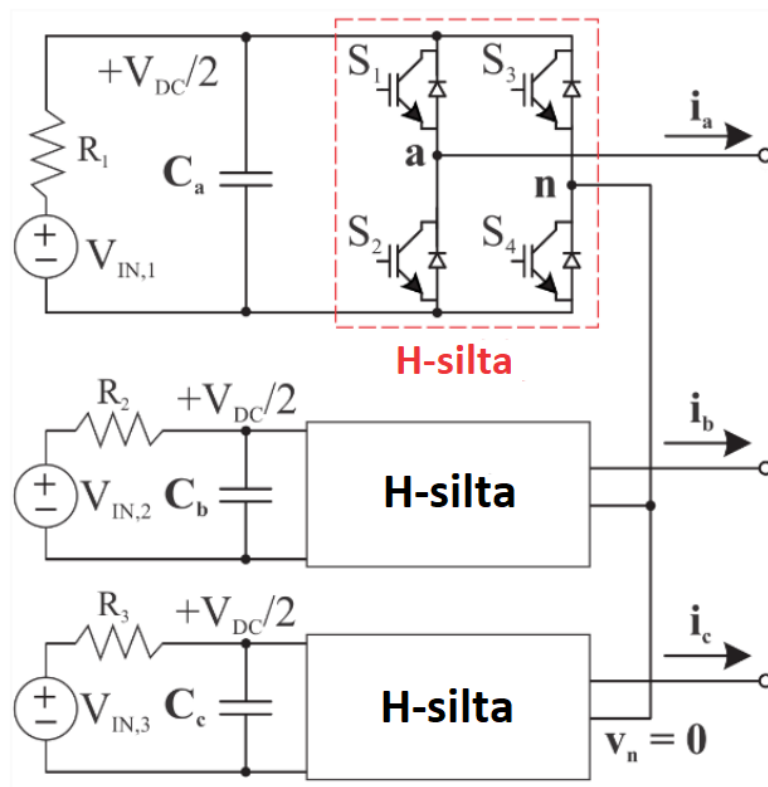
Toinen alityyppi GSI:stä on verkkoa tukeva-seuraava invertteri, jota ohjataan virtalähteenä. Kuva 10 esittää tämän alityypin dynaamista mallia. Saarekekäytössä näitä inverttereitä voidaan ohjata seuraamaan AC-väylää ja syöttämään virtaa väylään GFI:n toiminnan tukemiseksi. Sähköverkkoon yhdistetyssä toiminnassa verkkoa tukeva-seuraavat invertterit eivät operoi. Kyseisiä inverttereitä voidaan kuitenkin käyttää AC-väylän tehonlaadun parantamiseksi. [25] Esimerkiksi tuulivoimaloiden verkkoyhteyttä säätelevät verkkokoodit ovat määritellyt siten, että ne olisi suunniteltava antamaan vain tietyn määrän sähkötehoa muuntimille ja väylään säännöstelyä varten. [28]

4.4 Mikroverkossa käytettyjä topologioita

Edellä esiteltyt mikroverkon invertterit voidaan toteuttaa erilaisilla laitteistorakenteilla. Eri invertterityypit voidaan myös toteuttaa samoilla konvertterirakenteilla. Luvussa 2.2 käsitelty TLVSI on kuitenkin yleisimmin käytetty topologia. Invertterien tyyppi ja rakenne vaikuttavat niiden ohjausstrategian valintoihin. GFI käyttää yleisesti kaskadi- sekä droop-ohjausta. Verkkoa seuraavalla invertterillä on pätö- ja loistehon sääntelyvalvonta liitettyinä suureiden synkronointistrategiaan. GSI:n ohjausstrategia taas on samankaltainen GFI:n kanssa, mutta lisäksi myöskin näillä inverttereillä on droop-ohjaus jännitteen referenssiarvon laskemiseksi. [25]

4.4.1 Kaskadoitu H-silta monitaso-invertteri

TLVSI:n lisäksi toinen laajasti käytetty invertteri topologia on kaskadiohjattu H-silta (CHB) monitaso-invertteri [25]. Kaskadiohjauksessa käytetään kahta ohjainta (isäntä- ja orja-ohjain) kokonaisprosessin säätämiseen, jolloin pystytään saavuttamaan nopeampi ja luotettavampi prosessiohjaus [32]. Tämä kolmitasoinen invertteri (kuva 11) rakentuu kolmesta H-silta muuntajasta. Jokaisella muuntajalla on lisäksi DC-lähde vastuksella sekä rinnankytketty kondensaattori. Mikroverkossa tämä DC-lähde voi olla esimerkiksi generaattori tai ESD. Yhden H-sillan ulostulo muodostaa vaihejännitteen sekä yhteyden yhteiseen nollajohtimeen. Rakenteen ansiosta jokainen vaihe pystyy toimimaan kolmessa eri tilassa tuottaen erilaista jännitettä: Kuvan 11 mukaan kytkimien S_1 ja S_4 ollessa kiinni saadaan $+V_{DC}/2$ voltin (V) suuruisen jännite. Kytkimet S_1 ja S_3 tai S_2 ja S_4 suljettaessa 0 V jännite sekä S_3 ja S_2 suljettaessa $-V_{DC}/2$ V jännite. [25,33]



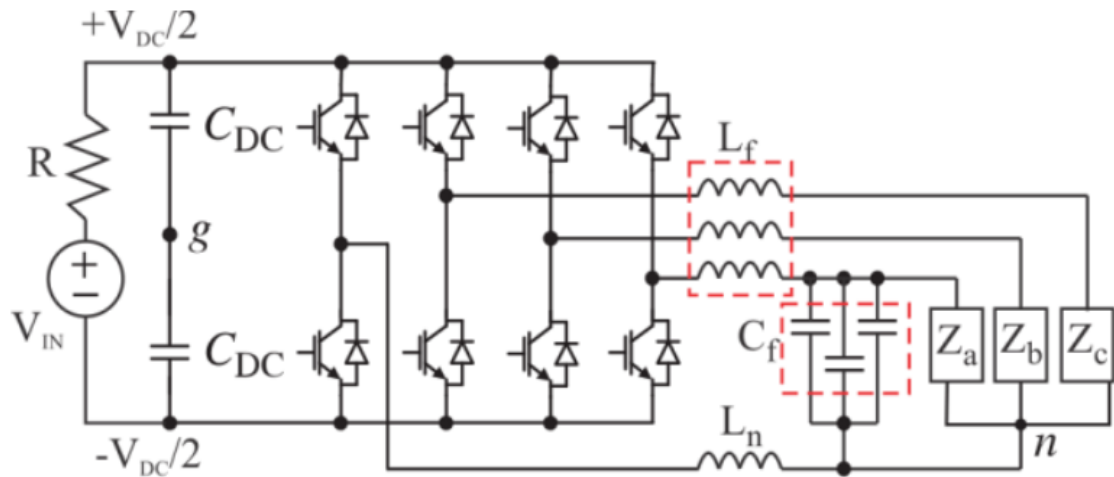
Kuva 11. Alkeellinen kaskadi H-silta invertterin topologia. [25]

CHB monitaso-inverttereillä pyritään korvaamaan isot muuntajat monivaiheisia invertteerejä tarvittaessa. CHB-invertterillä voidaan myös eliminoida tasolukkojen (clamping diode) ja kondensaattorien (flying capacitor) käyttö tietyissä vaihtosuuntaajarakenteissa. [34] Vaikka kuvassa 11 ei ole esitetty invertterin suodattimia tai ohjausjärjestelmää, ne ovat samankaltaisia TLVSI:n ja CHB-invertterin välillä. Modulaatiostrategiat eroavat

näissä inverttereissä kytkinten lukumäärän vuoksi. CHB-invertterin ominaisuuksia voidaan muokata lisäämällä H-sillan tasoja jokaisessa vaiheessa. Tämä auttaa vähentämään jännitteen ja virran harmonista säröä invertterin yhdistyspisteissä. Tasojen lisääminen kuitenkin vaikuttaa laiterakenteen sekä modulaatiostrategian monimutkaisuuteen. [25]

4.4.2 Nelijalkainen jännitelähde invertteri

Erilaisten vaihtosuuntaajien vahvuuksia ja toimintoja voidaan hyödyntää mikroverkon sovelluksissa. TLVSI:n ja CHB-invertterien lisäksi mikroverkossa voidaan käyttää muitakin invertteri topologioita. Nelijalkainen jännitelähde invertteri (FLVSI) on samankaltainen TLVSI verrattuna, mutta nyt invertterin rakenteessa on yksi lisäjalka, joka on kytketty kuorman nollajohtimeen käämin kanssa (kuva 12). Kuvassa 12 voidaan myös nähdä invertterin suodattimet kytkimien jälkeen. [25]



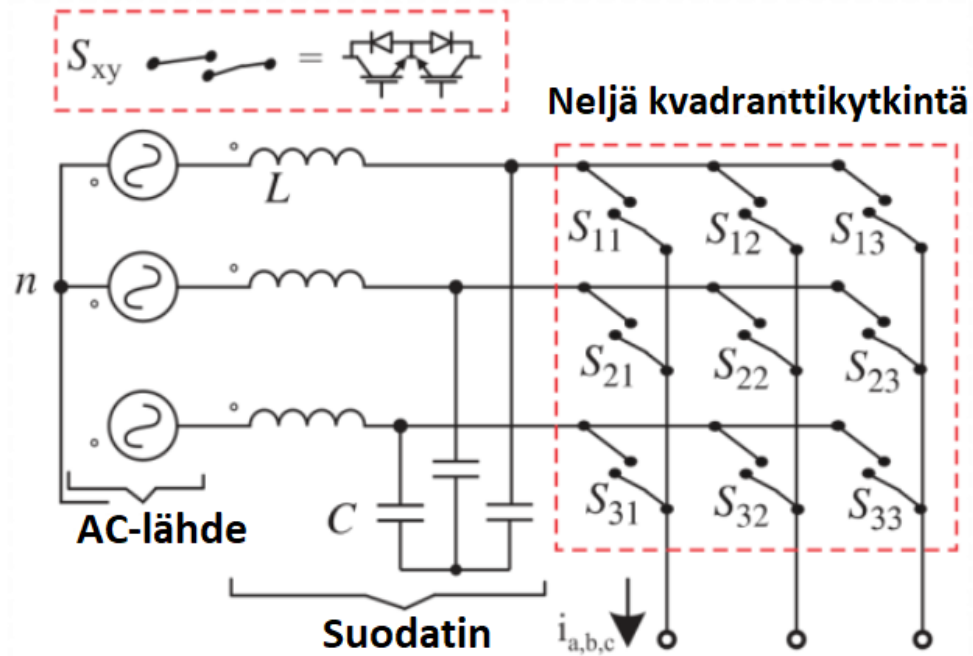
Kuva 12. Nelijalkainen jännitelähde invertterin topologia. [25]

Ylimääräisen jalan lisäksi myös ulostulon suodattimen kondensaattorit ovat yhdistetty nollajohtimeen. Lisäjalka mahdollistaa neutraalipisteen (neutral point) virranhallinnan. Tämän ansiosta epätasapainoisten ja -lineaaristen kuormien hallinta tulee mahdolliseksi ja DC-linkin kondensaattorien jännitevärähtely pystytään pitämään matalana. FLVSI:n rakenne johtaa kuitenkin rakennekustannuksien ja monimutkaisuuden lisääntymiseen, jolloin ohjausstrategiat ovat myös monimutkaisempia. [35]

4.4.3 Matriisi-invertteri

Toisin kuin tässä työssä aikaisemmin esitellyt invertterit, matriisi-invertteri (matriisi muunnaja) on AC/AC-muunnin, joka ei tarvitse ESD:tä (tasajännitelähdettä) toimiakseen. Mik-

roverkon sovellukset, jotka tuottavat AC-muotoista tehoa ovat erityisen kiinnostavia matriisi-invertteriä ajatellen. [36] Kuvassa 13 on esitetty matriisi-invertterin rakenne. Esimerkiksi tuulivoimalan tuottamaa vaihtojännitettä ei tarvitse muuntaa AC/DC-muuntimella tasamuotoiseksi, jotta invertteri pystyisi käsittelemään sitä.



Kuva 13. Matriisi-invertterin topologia. [25]

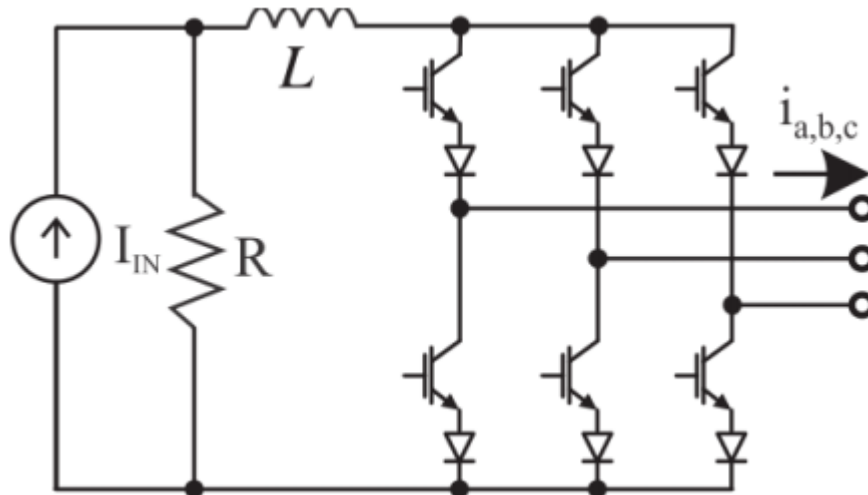
Matriisi-invertteri koostuu yhdeksästä neljä-kvadranttikytkimestä (four-quadrant switch), jotka ovat yhdistettyinä jokaisen vaiheen sisäänmenosta ulostuloon. Juuri näitä kytkimiä tarvitaan rakenteessa, koska kytkimien on pystyttävä käsittelemään kaksisuuntaista virtaa sekä bipolaarista jännitettä. Näin saadaan mahdollistettua kaksisuuntaisten tehovirtojen käsittely. [25]

Korkealaatuisten sisäänmeno ja ulostulo aaltomuotojen saavuttamiseksi tarvitaan sopiva modulaatiostrategia ja ohjausjärjestelmä. Oikeaa modulaatiostrategiaa ja ohjausjärjestelmää tarvitaan myös ulostulon jännitteen sekä virran taajuuden, vaiheen ja suuruuden säätämiseksi. Matriisi-invertterin rakenteen ja modulaatiostrategian hankaluuden vuoksi järjestelmien laatijat ehdottavat usein muunneltuja topologioita tästä invertteristä. [36]

4.4.4 Virtalähde invertteri

Kolmivaiheiset virtalähde invertterit (CSI) toimivat samankaltaisesti VSI:in verrattuna. CSI syöttää keskimääräisen sinimuotoisen virran jokaiseen vaiheeseen. [37,38] CSI:n energianlähde esitetään virtalähteenä, jonka kanssa rinnankytkettynä on vastus R (kuva

14). Energiaa varastoivana elementtinä toimii kytkimien ja lähteen väliin sijoitettu käämi L . VSI:n tavoin kuusi kytkintä muodostavat vaiheiden ulostulot. IGBT kytkimien kanssa sarjassa on yhdistettynä diodi, mutta kytkimet eivät sisällä vapaasti pyöriä diodeja. [25]



Kuva 14. Kahden-tason kolmivaiheinen virtalähde invertteri topologia. [25]

Sarjaankytketty diodi rajoittaa CSI:n toimintaa siten, että virta pystyy kulkemaan vain yhteen suuntaan. Tällä toteutuksella on toisaalta hyötyjä: kytkimen DC tasoittuu, energiaa varastoivalla käämillä on pidempi elinkaari (verrattuna kondensaattoriin) ja diodi pystyy nostamaan piirin jännitettä. Esimerkiksi aurinkovoimageneraattorit tuottavat matalaa jännitettä, joka on nostettava korkeammaksi tehokkuuden parantamista varten. [25]

5. YHTEENVETO

Vaihtosuuntaaja (invertteri) on yksi nykypäivän tehoelektroniikan kulmakiviä. Kandidaatintyössä tutustuttiin vaihtosuuntaajan toimintaan ja ominaisuuksiin. Tarkastelun painopisteenä olivat kolmivaiheiset vaihtosuuntaajat. Työssä pohdittiin päto- ja loistehon merkitystä sähköverkon toiminnan kannalta. Lyhyt katsaus tehtiin älykkäisiin sähköverkkoihin ja esiteltiin erilaisia mikroverkoissa käytettäviä vaihtosuuntaajatyyppejä ja -topologioita sekä niiden ominaisuuksia.

Vaihtosuuntaajat mahdollistavat tärkeiden sovelluksien toteutuksen ja käytön sähköverkossa. Tasasähkön muuttaminen vaihtosähköksi kasvattaa mahdollisuuksia erilaisten sovelluksien käytölle. Erilaisten vaihtosuuntaajien toimintaa yhdistää niissä toimivien kytkinten ohjaus. Pulssinleveysmodulaatiota eli PWM:ää käytetään yleisesti vaihtosuuntaajan kytkimien ohjaukseen. Ohjaus voidaan toteuttaa eri tavoilla ja tekniikoilla, mutta periaate pohjautuu sini- ja kolmioaaltojen vertailuun. Vaihtosuuntaajan haluttu ulostulo pystytään määrittämään siis PWM:än avulla.

Päto- ja loistehon käsittely ja ohjaus määräävät pitkälti sähköverkon toiminnallisuuden. Tehon siirtäminen, varastointi ja säännöstely verkostoissa ovat kriittisiä näkökohtia luotettavan toiminnan varmistamiseksi. Tehon käsittely onnistuu muokkaamalla virran ja jännitteen vaihe-eroa. Kaksisuuntaiset tehovirtaukset voivat joissain vaihtosuuntaajan rakenteissa muuttaa vaihtosuuntaajan toiminnan tasasuuntaajaksi, jolloin vaihtovirtaa muunnetaan tasavirraksi.

Älykkäät sähköverkot eli smart gridit ovat edelleen visio tulevaisuuden sähköverkosta, jossa verkon sovellukset ovat yhteydessä keskenään. Tehovirtojen ja informaation kaksisuuntainen liike sähkönkuluttajien ja -tuottajien välillä mahdollistaisi erittäin laaja-alaisen sähköverkon toiminnan hallitsemisen ja toiminnallisuuden. Erityisen kiinnostavia ovat mahdolliset saarekekäyttöön kykenevät älyverkon osa-alueet, jotka pystyisivät toimimaan itsenäisinä alueina omien laitteistojen ja järjestelmien avulla. Vaihtosuuntaajien implementointi näihin mikroverkkoihin on pakollista: Vaihtosuuntaajat kykenevät ohjaamaan uusiutuvista energianlähteistä saadun tehon mikroverkon omaan verkostoon tai pääsähköverkkoon. Mikroverkoissa käytetyt energian varastointilaitteet eli ESD:t tarvitsevat muun muassa vaihtosuuntaajaa. Suuret tehoa tuottavat generaattorit käyttävät vaihtosuuntaajia. Mikroverkon järjestelmät vaativat tehon käsittelyn ja ohjauksen vuoksi vaihtosuuntaajaa.

Mikroverkon järjestelmien erilaisten tehtävien mukaisesti mikroverkon vaihtosuuntaajat voidaan jaotella erityyppisiin vaihtosuuntaajiin. Näitä vaihtosuuntaajatyyppejä on pääosin kolme: On olemassa vaihtosuuntaajia (GFI), jotka pyrkivät säännöstelemään sähköverkon päto- ja loistehoa, kun mikroverkko on yhteydessä pääsähköverkkoon. Saarekekäytössä nämä vaihtosuuntaajat taas muodostavat mikroverkolle oman sähköverkon tehotason ESD:n tuottaman tehon avulla.

Aurinko- ja tuulivoimalaitoksista saatu teho taas tarvitsee omantyyppisen vaihtosuuntaajansa, joka syöttää tätä tehoa mikroverkon omaan verkostoon. Kolmantena ovat vaihtosuuntaajat (GSI), jotka tukevat edellä mainittujen kahden vaihtosuuntaajan toimintaa. Tulevaisuudessa muun muassa uusiutuvien energianlähteiden järjestelmien käyttö ja rakenne tulevat kasvamaan sekä kehittymään, jolloin uusia vaihtosuuntaajatyyppejä ja ratkaisuja saatetaan kehittää tehokkuuden parantamiseksi.

Mikroverkkojen vaihtosuuntaajissa käytetään laajasti TLVSI- sekä CHBMLI-piirejä. Nämä rakenteet tarjoavat tarpeelliset ominaisuudet mikroverkon vaihtosuuntaajille. Yhdellä rakenteella pystytään toteuttamaan erilaisia vaihtosuuntaajia. Maininnan arvoisia vaihtosuuntaaja topologioita ovat myös matriisi-invertterit sekä virtalähde invertterit. Rakenteiden päivittäminen ja modifiointi parantavat vaihtosuuntaajien toimivuutta monimutkaisissa järjestelmissä.

LÄHTEET

- [1] Energian hankinta ja kulutus, Tilastokeskus, 2018, viitattu 28.3.2019, saatavilla: https://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_fi.pdf
- [2] J. B. Ekanayake, N. Jenkins, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, Smart Grid: Technology and Applications, John Wiley & Sons, 2012, pp. 1-14, 83-186.
- [3] S. Valkealahti, Introduction to Smart Grids and Renewable Energy -kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018.
- [4] J. Bastman, Sähkökoneet-opintomoniste sekä -luentodiat, Sähkökoneet-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, 172 s.
- [5] L. Hietalahti, Tehoelektroniikan perusteet, kirja, Tammertekniikka, Tammikuu 2011, s. 87-101.
- [6] T. Virtanen, Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentällä, Tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2005. Viitattu 28.3.2019, saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9894/TMP_objres.159.pdf?sequence=2
- [7] IEEE Education Society arkistosta, PWM Inverters, kuva. Viitattu 22.3.2019. Saatavilla: <https://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1998/08/PWMINV.HTM>
- [8] D. G. Holmes, T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice, John Wiley & Sons, 2003, 744 s. Saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://iee-explore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/book/5264450>
- [9] J. Hämäläinen, Comparison of Output Harmonics Between Two- and Three-Level Three-Phase Space Vector PWM Inverters, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, 53 s., viitattu 28.3.2019, saatavilla: <https://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23428/hamalainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins Power Electronics: Converters, Applications, and Design 2nd Edition, John Wiley & Sons inc., 1995, Chapters,6, 7 (section 7-7), 8. Viitattu 28.3.2019, saatavilla: <http://uni-site.ir/khuelec/wp-content/uploads/Mohan-Power-Electronics.pdf>
- [11] T. Suntio & J. Rekola, Power Electronic Converters -kurssin luentodiat, Tampereen teknillinen yliopisto 2018.
- [12] W. Bin, N. Mehd, High-Power Converters and AC Drives (2nd Edition), John Wiley & Sons, 2017, Chapter 6: Two-Level Voltage Source Inverter.
- [13] M. Mahawar, S. Banerjee, M. Jain, S. Sinha, Sukriti. Performance analysis of various control methods for three phase VSI feeding static loads & dynamic loads. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). 2016:1-5. Viitattu 28.3.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla (DOI): [10.1109/ICPEICES.2016.7853335](https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853335)
- [14] Victor Gao, Harmonics, Aspencore Internetsivut, viitattu 15.3.2019, saatavilla: <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/harmonics.html>

- [15] S. Kharjule, Voltage Source Inverter, Instrumentation and Control Department, College of Engineering, 2015, viitattu 14.3.2019, saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7503407&tag=1>
- [16] All About circuits Internetsivu, Understanding, Calculating, and Measuring Total Harmonic Distortion (THD), 20.2.2017. Viitattu 15.3.2019, saatavilla: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>
- [17] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems, IEEE transactions on power electronics, vol. 19, no. 5, 2004, pp. 1184–1194. Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1331479>
- [18] V. Vongmanee, V. Monyakul, Grid connected inverter with unity power factor for wind power applications, IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, 2009, pp. 900-903. Viitattu 28.3.2019, saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5356320>
- [19] M. A. Eltawil, Z. Zhao, Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 1, January 2010, pp. 112-129. Viitattu 28.3.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032109001749#aep-section-id28>
- [20] T. Suyata, S. Po-Ngam, Simplified Active Power and Reactive Power Control with MPPT for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters, IEEE, 2014, 4 s.. Viitattu 28.3.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6839804&tag=1>
- [21] Kalogirou, Soteris A., McEvoy's Handbook of Photovoltaics - Fundamentals and Applications (3rd Edition), Elsevier, 2018, 4.2 Maximum Power Point Tracking, pp. 779-781. Viitattu 28.3.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla Knovel sivuilta.
- [22] X. Fang, S. Misra, G. Xue, D. Yang, Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, vol. 14, issue: 4, pp. 944-980. Viitattu 19.3.2019, saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6099519>
- [23] Power electronics news, The Smart Grid: What's "the grid" and how is it "smart?", viitattu 19.3.2019, saatavilla: <https://www.powerelectronicsnews.com/technology/the-smart-grid-whats-the-grid-and-how-is-it-smart>
- [24] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, G. P. Hancke, Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, Volume: 7, Issue: 4, pp. 529-539. Viitattu 19.3.2019, saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6011696>
- [25] Juan David Bastidas-Rodríguez, Carlos Ramos-Paja, Types of inverters and topologies for microgrid applications, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, viimeisin versio 30.12.2016, saatavilla: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6299834.pdf>

- [26] MD Tanjimuddin, Reactive power control in grid-connected converter, Diplomityö, Tampere University of Technology: Faculty Council of the Faculty of Computing and Electrical Engineering, 2018, 64 sivua. Viitattu 28.3.2019, saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/26576/Tanjimuddin.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [27] S. Santoso, H. W. Beaty, Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition, Chapter 8. Smart Grids and Microgrids, McGraw-Hill Education, 2018, 1633 s.
- [28] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez, Control of Power Converters in AC Microgrids, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, 2012, pp. 4734–4749. Viitattu 28.3.2019, Saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6200347>
- [29] R. J. Vijayan, C. Subrahmanyam, R. Roy, Dynamic modeling of microgrid for grid connected and intentional islanding operation, 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), 2012. Viitattu 12.4.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6302055>
- [30] H. W. Beaty, D. G. Fink, Standard Handbook for Electrical Engineers, Sixteenth Edition, 16.8 Automatic Generation Control, Droop Control and Physical Constraints, McGraw-Hill, 2013, 2000 s.
- [31] J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, T. Ise, Enhanced Virtual Synchronous Generator Control for Parallel Inverters in Microgrids, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 8, Issue: 5, Syyskuu 2017, Viitattu 12.4.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7401122>
- [32] Vance VanDoren, Fundamentals of cascade control, Control Engineering, Elokuu 2014. Viitattu 4.4.2019, Saatavilla: <https://www.controleng.com/articles/fundamentals-of-cascade-control/>
- [33] S. Vijayasamundeeswari, M. Gopinath, Open loop and closed loop solar based cascaded h-bridge inverter using fuzzy logic, 2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT), IEEE, Maaliskuu 2017. Viitattu 4.4.2019, saatavilla TTY-tunnuksilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8094051>
- [34] Tarun Agarwal, Multilevel Inverter – Types & Advantages, electronics I projects I focus, Elprocus. Viitattu 4.4.2019, saatavilla: <https://www.elprocus.com/multilevel-inverter-types-advantages/>
- [35] M. R. Miveh, M. F. Rahmat, A. A. Ghadimi, M. W. Mustafa, Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review, Renewable Sustainable Energy Reviews, vol. 54, Helmikuu 2016, pp. 1592– 1610.
- [36] J. W. Kolar, F. Schafmeister, S. D. Round, H. Ertl, Novel Three-Phase AC-AC sparse matrix converters, 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002, vol. 2, pp. 777–791.
- [37] S. H. Lee, S. G. Song, S. J. Park, C. J. Moon, M. H. Lee, Grid-connected photovoltaic system using current-source inverter, Solar Energy, vol. 82, no. 5, 2008, pp. 411–419.

[38] P. P. Dash, M. Kazerani, Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current Source Inverter-Based Photovoltaic System, *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, 2011, pp. 443–450,