

Jussi Raja-Aho

HARMONINEN RESONANSSI VERKKOYHDISTETYISSÄ JÄRJESTELMISSÄ

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Tenure track -professori Tomi Roinila
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jussi Raja-Aho: Harmoninen resonanssi verkkoyhdistetyissä järjestelmissä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Joulukuu 2022

Uusiutuvan energiantuotannon liittäminen sähköverkkoon tapahtuu tehoelektronisten invertte-
reiden avulla, jotka vuorovaikuttavat toistensa ja sähköverkon kanssa aiheuttaen sähköverkossa
harmonista resonanssia. Harmoninen resonanssi vaikuttaa sähköverkon stabiiliuteen ja laatuun
ja voi pahimmillaan rikkoa sähköverkkoon kytkettyjä laitteita.

Harmoniset yliaallot syntyvät sähköverkossa, kun verkkoon liitetään epälineaarista kuormaa.
Epälineaarisen kuorman takia sähköverkon virran aaltomuoto ei ole puhdasta siniaaltoa, vaan se
on voimakkaasti vääristynyt. Tämä johtuu siitä, että yliaaltovirta on monen virtakomponentin sum-
ma ja ominaistajuuden monikertojen virrat ovat nimeltään harmonisia yliaaltovirtoja. Kulkiessaan
sähköverkon johdinten impedanssien läpi harmoninen yliaaltovirta synnyttää Ohmin lain mukai-
sesti harmonista yliaaltojännitettä. Harmonisten yliaaltojen vaikutuksesta nämä harmoniset yli-
aallot voimistuvat sähköverkkoon kytkettyjen laitteiden resonanssitaajuuksilla, ja tätä kutsutaan
harmoniseksi resonanssiksi.

Harmonisen resonanssin ennustamiseksi ja ennaltaehkäisemiseksi on kehitelty erilaisia me-
netelmiä. Tässä työssä tarkastellaan, mitä harmoninen resonanssi on, ja esitellään kolme erilais-
ta menetelmää sen ennustamiseksi ja ennaltaehkäisemiseksi. Nämä menetelmät ovat lineaaris-
kvadraattinen regulaattori (engl. Linear quadratic regulator, LQR), todennäköisyyspohjainen reso-
nanssitaajuuskaistan siirtomenetelmä (engl. Probabilistic resonance frequency band shift method,
PRFB) ja hybridi-induktiivinen ja aktiivinen suodatusmenetelmä (engl. Hybrid inductive and active
filtering method, HIAF). Näiden menetelmien vaikutusta harmoniseen resonanssiin sähköverkos-
sa on tutkittu simulaatioiden ja käytännön testien avulla. Työssä esitellään myös lyhyesti omalla
simulaatiotyöllä, mitkä ovat harmonisten yliaaltojen ja harmonisen resonanssin vaikutukset säh-
köverkon virran vääristymään ja säröön.

Työssä esiteltyjen tutkimusten tulokset osoittivat, että harmonisen resonanssin sijainti on en-
nustettavissa ja sen vaikutuksia sähköverkkoon on mahdollista mitätöidä osittain tai jopa koko-
naan. Harmonisen resonanssin vaikutukset sähköverkossa ovat pääosin sähköverkon virran aalto-
muodon vääristymistä ja vaihe-erojen muutoksia. Näitä vaikutuksia myös havainnollistetaan työs-
sä lyhyesti simulaatiotyön avulla.

Avainsanat: Harmoninen resonanssi, harmoninen yliaalto, verkkoyhdistetty, invertteri

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän työn aihe ei ollut minulle entuudestaan kovinkaan tuttu, mutta kirjoitusprosessin aikana tietämykseni aiheeseen syventyi huomattavasti. Myös kiinnostukseni työn aiheeseen kasvoi suuresti työtä tehdessäni. Työn tekeminen oli erittäin mielenkiintoista ja paikoin uuden asian oppiminen oli haastavaa.

Erityiskiitos avusta, jonka sain työtä tehdessäni kuuluu ohjaajalleni Tomi Roinilalle ja ystäväilleni, joilta sain paljon neuvoja ja kannustusta. Kiitän myös perhettäni luottamuksesta ja kannustuksesta tämän työprosessin aikana.

Tampereella, 14. joulukuuta 2022

Jussi Raja-Aho

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Harmoninen resonanssi	3
2.1	Harmoniset yliaaltovirrat ja -jännitteet ja harmoninen resonanssi	3
2.2	Harmonisen resonanssin vaikutus verkkoyhdistetyissä järjestelmissä	5
3.	Menetelmät harmonisen resonanssin vähentämiseksi	9
3.1	Lineaariskvadraattinen regulaattori	9
3.1.1	Simulaation tulokset	9
3.1.2	Kokeelliset tulokset	10
3.2	Todennäköisyyspohjainen resonanssitaajuuskaistan siirtomenetelmä	11
3.2.1	Testitulokset	11
3.2.2	Menetelmän mahdolliset sovelluskohteet.	13
3.3	Hybridi-induktiivinen ja aktiivinen suodatusmenetelmä	13
3.3.1	Piirin topologia	14
3.3.2	Testitulokset	15
4.	Simulaatio	17
5.	Yhteenveto	24
	Lähteet	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Ω	ohmi, resistanssin yksikkö
APF	aktiivisuodatin (eng. active power filter)
FFT	nopea Fourier-muunnos (eng. fast Fourier transform)
H	henry, induktanssin yksikkö
HAPF	hybridi aktiivi- ja passiivisuodatin (eng. hybrid active and passive power filter)
HIAF	hybridi-induktiivinen ja aktiivinen suodatusmenetelmä (eng. Hybrid inductive and active filtering method)
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
IPF	induktiivisuodatin (eng. inductive power filter)
LQR	lineaariskvadraattinen regulaattori (eng. Linear Quadratic Regulator)
PPF	passiivisuodatin (eng. passive power filter)
PRFB	todennäköisyyspohjainen resonanssi taajuuskaistan siirtomenetelmä (eng. Probabilistic resonance frequency band shift technique)
pu	per-unit-järjestelmä
THD	harmoninen kokonaisvääristymä (engl. Total Harmonic Distortion)
V	voltti, jännitteen yksikkö
VAr	vari, loistehon yksikkö

1. JOHDANTO

Energiantuotannossa uusiutuvat energialähteet tulevat entistä tärkeämmiksi. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on pyrittävä pois uusiutumattomien, fossiilisten polttoaineiden käyttämisestä ja siirryttävä kohti uusiutuvien polttoaineiden käyttöä. Aurinkopaneelit ja tuulivoimalat ovat lisääntyneet huomattavasti myös Suomen sähköverkkoa syöttävissä energialaitoksissa, ja Euroopassa ollaan tekemässä merkittäviä uudistuksista sähköverkkojen kehittämiseksi kohti päästövapaata energiantuotantoa.

Sähköverkkojen jatkuva muokkautuminen päästövapaaseen energiantuotantoon tuo mukanaan paljon haasteita sähköverkkojen toiminnassa. Puhtaista energialähteistä aurinko- ja tuulivoima ovat olleet jo pitkään potentiaalisia korvaajia nykyisille energialähteille. Näiden uusien energialähteiden käyttöönotto nykyisessä sähköverkossa vaatii haastavampia sovelluksia, sillä aurinko- ja tuulivoimaloiden tehonmuokkaus ei ole niin yksinkertaista kuin perinteisillä energiamuodoilla. [1]

Verrattuna aiempiin vuosikymmeniin sähköenergian kulutus on kasvanut merkittävästi. Uusien sähköisten laitteiden kytkentä sähköverkkoon tapahtuu pääosin tehoelektronisilla laitteilla (esimerkiksi inverttereillä). Sähköverkkoon kytkettyjen inverttereiden välinen vuorovaikuttaminen toistensa ja myös sähköverkon kanssa havaitaan sähköverkossa ilmenevänä harmonisena resonanssina. Harmoninen resonanssi voidaan havaita rinnakkain toimivien inverttereiden ja rinnakkain toimivien virtalähteiden välillä sähköverkon taajuudesta poikkeavana jaksollisena häiriönä. Harmoninen resonanssi voi pahimmillaan vaurioittaa sähköverkkoon kytkettyjä tehoelektronisia laitteita ja vaikuttaa sähköverkon stabiilisuuteen ja hyötysuhteeseen. Harmonisen resonanssin vaikutusten ennustaminen ja ehkäiseminen on välttämätöntä jatkuvan energiantuotannon varmistamiseksi. [1] Viime vuosina on tutkittu ja kehitetty paljon erilaisia menetelmiä harmonisen resonanssin ennustamiseksi ja sen heikentämiseksi. Myös tehoelektronisten laitteiden jatkuva kehittäminen itsessään auttaa vähentämään harmonista resonanssia.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on käydä läpi, mitä harmoninen resonanssi on ja miten se ilmaantuu verkkoon kytkettyjen järjestelmien toiminnassa. Työssä käydään läpi millaisia erilaisia keinoja harmonisen resonanssin ennustamiseen ja ehkäisemiseen on olemassa. Työssä esiteltäviä menetelmiä ovat lineaariskvadraattinen regulaattori (eng. Linear Quadratic regulator, LQR), todennäköisyyspohjainen resonanssitaajuuskaistan

siirtotekniikka (eng. Probabilistic resonance frequency band shift technique, PRFB) ja hybridi-induktiivinen ja aktiivinen suodatusmenetelmä (eng. Hybrid inductive and active filtering method, HIAF). Tässä työssä havainnollistetaan harmonisen resonanssin vaikutuksia myös simulaatioiden avulla.

Tämän kandidaatintyön loppuosa koostuu seuraavasti. Luvussa 2 käydään läpi, mitä harmoninen resonanssi on ja kuinka se vaikuttaa muun muassa aurinkopaneelien, tehoelektronisten inverttereiden ja verkkoon kytkettyjen moottoreiden toimintaan. Luvussa 3 esitellään ja käydään läpi erilaisia menetelmiä harmonisen resonanssin vähentämiseksi. Luvussa 4 havainnollistetaan harmonista resonanssia simulaatioiden avulla. Luku 5 sisältää yhteenvedon.

2. HARMONINEN RESONANSSI

Tässä luvussa käydään läpi, miten harmoninen yliaaltovirta ja -jännite muodostuu ja mitä on harmoninen resonanssi. Luvussa kerrotaan myös, miten harmoninen resonanssi ilmenee verkkoon yhdistetyissä järjestelmissä ja miten se vaikuttaa niiden toimintaan.

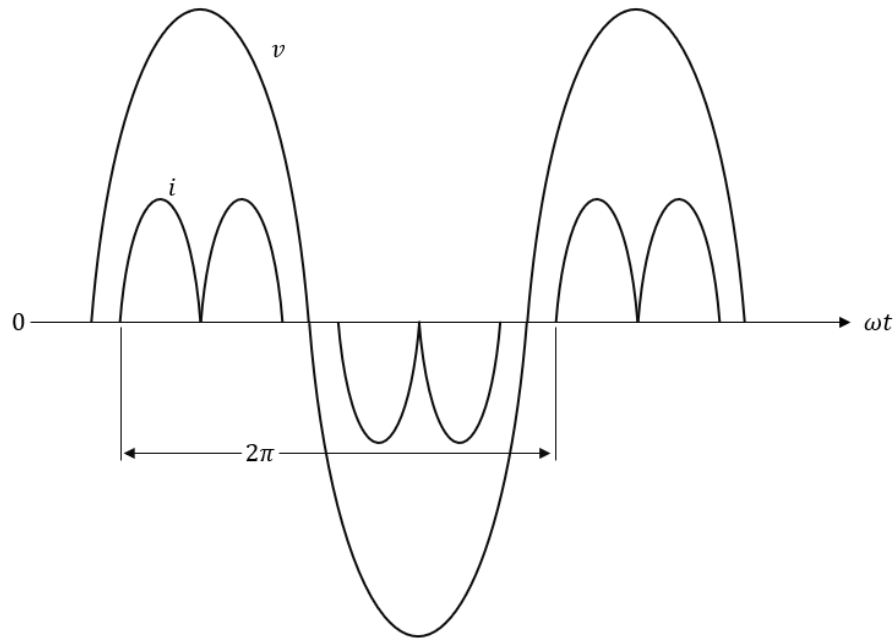
2.1 Harmoniset yliaaltovirrat ja -jännitteet ja harmoninen resonanssi

Ideaalisessa sähköverkossa vaihtovirrat ja -jännitteet ovat aaltomuodoltaan sinimuotoista verkon taajuudella (Suomessa 50 Hz). Oikeissa järjestelmissä näin ei kuitenkaan ole, vaan virta- ja jänniteaaltomuodot ovat vääristyneitä siniaaltoja. Nämä vääristyneet virrat ja jännitteet voidaan kuvata Fourier-analyysin avulla virta- ja jännitekomponenttien summana. Näitä virta- ja jännitekomponentteja kuvataan nimellä harmoninen yliaaltovirta ja -jännite. Harmoniset yliaallot ovat kokonaislukukerrannaisia verkon perustaajuudesta ja perustaajuutta kuvataan yleensä alaindeksillä 1. Sähköverkossa on tyypillistä, että harmoniset yliaallot ovat pienimpiä parillisilla kertoimilla ja suurimpia parittomilla 3., 5., 7. ja joskus myös 11. ja 13. kertoimilla. [2]

Harmoninen yliaaltovirta syntyy, kun sähköverkkoon kytketään epälineaarista kuormaa, kuten tasavirta- tai vaihtovirtakäyttöjä, joita syötetään tasavirtamuuntajan avulla. Epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että kuormitusvirta ei ole muodoltaan samanlaista siniaaltoa kuin verkkotaajuuden siniaalto. Ohmin lain mukaan yliaaltojännite muodostuu yliaaltovirran kulkiessa johtimen impedanssin läpi. Usein tehoelektronisista tasasuuntaajassa ulostulovaihevirta on voimakkaasti vääristynyt kuten kuvasta 2.1 nähdään. Vakaassa tilassa tämä aaltomuoto toistuu jaksoittain ajassa T taajuudella $f = \omega/2\pi = 1/T$. [3]

Resonanssi on ilmiö, jossa järjestelmään syötetään värähtelyä sen ominaistaajuudella. Tämän seurauksena värähtely voimistuu ja kun sitä ei hallita, se voi vaurioittaa järjestelmää. Sähkölaitteissa resonanssia tapahtuu silloin, kun järjestelmän kapasitiivinen reaktanssi on yhtä suuri järjestelmän induktiivisen reaktanssin kanssa. Joissakin sähkölaitteissa resonanssia käytetään vahvistamaan langattomia signaaleja, mutta resonanssi voi syntyä myös tahattomasti, jolloin siitä tulee yleensä ongelma.

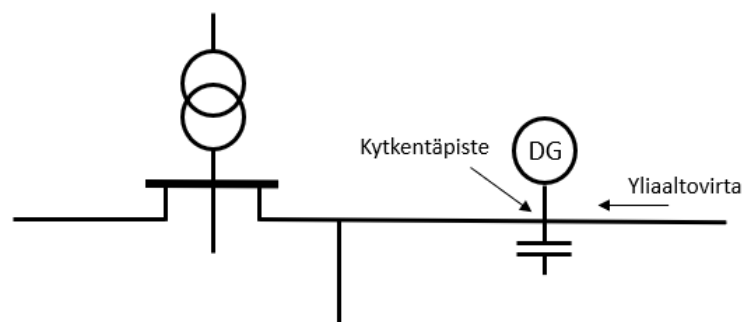
Sähköverkossa loistehoa kompensoidaan rinnakkaiskondensaattorin avulla. Harmonista



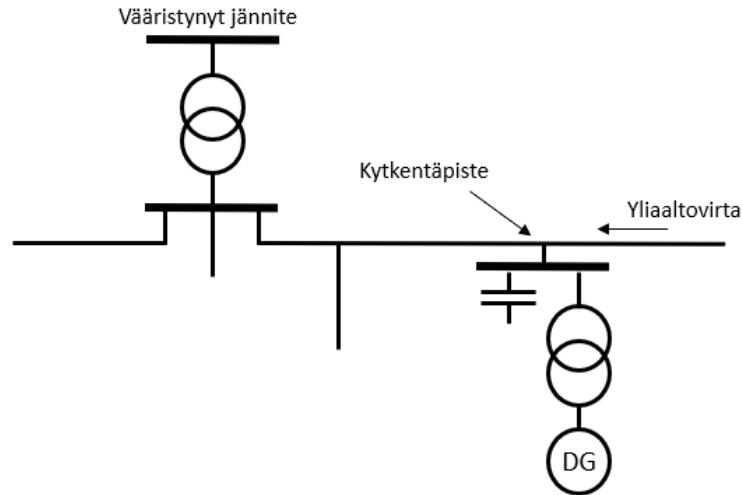
Kuva 2.1. Vaihtovirran yhden vaiheen aaltomuoto.

resonanssi esiintyy sähköverkossa kahta erilaista: rinnakkais- ja sarjaresonanssia. Rinnakkaisresonanssi tapahtuu, kun harmonisen virtalähteen näkökulmasta kondensaattorin kapasitanssi on rinnan verkon impedanssin kanssa. Tämä tilanne on havainnollistettu kuvassa 2.2, jossa generaattori on kytketty pienjänniteverkkoon kondensaattorin ollessa lähellä kytkentäpistettä. Harmoninen yliaaltojännite verkon kytkentäpisteessä on harmonisen yliaaltovirran ja johtimen impedanssin tulo harmonisella taajuudella. Jos tämä resonanssitaajuus on yhtä suuri harmonisen taajuuden kanssa, suuria yliaaltojännitteitä voi muodostua. [4]

Sarjaresonanssi puolestaan tapahtuu, kun paikallinen kapasitanssi on resonanssissa induktanssin kanssa paikallisväylän ja etäväylän välillä, jonka harmoninen yliaaltojännite on voimakkaasti vääristynyt. Sarjaresonanssin takia harmonisen yliaaltojännitteen vääristymä voi olla erittäin korkea. Esimerkki tällaisesta verkosta on esitetty kuvassa 2.3. Generaattori on kytketty muuntajan avulla keskijänniteverkkoon ja kondensaattori on lii-



Kuva 2.2. Esimerkki rinnakkaisresonanssipiiristä.



Kuva 2.3. Esimerkki sarjaresonanssipiiristä.

tetty generaattorin kytkentäpisteeseen kompensoimaan loistehoa. Harmoninen yliaaltojännite ja vääristynyt jännite voivat vahvistua sarjaresonanssin takia. Sarjaresonanssissa kapasitanssi tulee kytkentäpisteen kondensaattorista. Vaikka kaapelit ja sähkölinjat tuottavat kapasitanssia, jakeluverkossa kiinteät kondensaattoripankit ovat hallitsevia. Sarjaresonanssissa induktanssi on pääväylän ja kytkentäpisteen välinen induktanssi. [4] Sarjaresonanssi on sähköverkossa ilmiönä harvinaisempi kuin rinnakkaisresonanssi.

Sähköverkossa harmoninen resonanssi on erittäin vaikea ennustettava, sillä resonanssin syntymiseen vaikuttavat verkossa verkon komponentit, loisteho ja verkon näennäisteho. Varsinkin korkean kertaluvun harmoniset yliaallot voivat aiheuttaa verkossa arvaamattomia ja vaikeasti ennustettavia ongelmatilanteita, sillä niitä on vaikea havaita.

2.2 Harmonisen resonanssin vaikutus verkkoyhdistetyissä järjestelmissä

Harmoninen resonanssi ilmenee sähköverkossa, kun sen ominaistajuus on vaikutuksessa yliaaltovirtaa syöttävän järjestelmän kanssa. Harmonisella resonanssilla on suuria vaikutuksia sähköverkon laatuun ja stabiilisuuteen. Jokaisella sähköjärjestelmällä on oma ominaistajuus, joka on systeemin reaktanssin ja tehokertoimen korjauskondensaattorien määrän funktio. Tämän takia rinnakkaiskondensaattorit voivat aiheuttaa harmonista resonanssia ja kasvattaa järjestelmän impedanssia vuorovaikuttavalla taajuudella. Epälineaaristen kuormien aiheuttama harmoninen yliaaltovirta, jonka taajuus on lähellä järjestelmän ominaistajuutta aiheuttaa suuria yliaaltojännitteitä resonanssitilojen takia. Sähköverkkoon kytketään koko ajan enemmän epälineaarista kuormaa, kuten moottorikäyttöjä, tehoelektronisia muuntimia ja elektronisia sulatusuuneja, joten rinnakkaisresonanssin ilmentyminen sähköverkossa on tullut normaaliksi ilmiöksi. [5]

Yliaallot, joiden järjestysluku on kolmen kerrannainen (3., 9., 15., 21., ...), ovat erittäin haitallisia sähköverkon toiminnalle, jos niitä ei oteta järjestelmän suunnittelussa huomioon. Jos virta on yhtä suuri kaikissa vaiheissa, nämä yliaaltovirrat ovat samassa vaihekulmassa jokaisessa vaiheessa ja summautuvat tähtikytkennässä nollajohtimeen. Tällöin nollajohtimessa kulkee kolminkertainen virta kolmannella harmonisella taajuudella vaihejohtimeen verrattuna. Tämä johtaa nollajohtimen ylikuormittumiseen. [2] Suuremmilla korkeamman kertoiminen harmonisilla yliaalloilla (25. ja 50. harmonisten välillä) vaikutukset ovat lähes mitättömiä sähköjärjestelmien kannalta. Vaikka ne voivat aiheuttaa häiriöitä pienitehoisille elektronisille laitteille, ne eivät yleensä vahingoita sähköjärjestelmiä. Yleinen poikkeus tapahtuu silloin, kun taajuusalueella on järjestelmäresonanssia. Nämä resonanssit voidaan herättää leikkaamalla tai vaihtamalla siirtymätilaa tehomuuntimissa, ja niitä yleensä havaitaan maakaapeleissa. [6]

Moderni teollisuus luo sähköverkkoon harmonisia yliaaltovirtoja epälineaarisen kuorman takia, joka aiheuttaa jännitteissä harmonista säröä epälineaarisen kuorman heikon tehokertoimen takia. Teollisuudessa heikkoa tehokerrointa kompensoidaan tehokertoimen korjauskondensaattorien avulla, jotka voivat vahvistaa harmonisia yliaaltovirtoja aiheuttaen resonanssia. Resonanssitila aiheuttaa moottorien ja muuntajien ylikuumentumista ja herkkien elektronisten komponenttien virheellistä toimintaa. [6] Alla esitellään joitain kohteita, jossa harmonista resonanssia voidaan havaita.

Moottorit

Sähköverkkoon kytketyn sähkökoneen liitäntäkohdassa yliaaltojännitteet aiheuttavat harmonisia magnetointivirtoja sähkökoneen staattorissa ja tämän seurauksena rautasydämessä ja roottorissa syntyy harmonisia magnetointivuoksia. Harmoniset magnetointivuot indusoivat pyörrevirtoja rautasydämessä ja yliaaltovirtoja roottorissa. Osa harmonisista komponenteista on etumerkiltään positiivisia, mikä tarkoittaa 120° vaihe-eroa normaalissa pyörimissuunnassa A-B-C ja osa taas on etumerkiltään negatiivisia, mikä tarkoittaa 120° vaihe-eroa vastakkaiseen pyörimissuuntaan A-C-B. Positiiviset virrat aiheuttavat vääntöä samaan suuntaan ja negatiiviset vastakkaiseen suuntaan, joten kokonaisvääntö on pulssimaista. Pulssimainen vääntö aiheuttaa mekaanista räsitusta ja kohinaa moottoreissa, ja yliaaltovirrat aiheuttavat kohinaa ja kasvattavat värinää muuntajissa. [2]

Taajuus, missä järjestelmä värähtelee sen luonnollisella taajuudella, kutsutaan resonanssitaajuudeksi. Esimerkiksi sähköverkkoon kytketty induktiomoottori, jonka resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla

$$f_{\text{res}} = f_0 \times \sqrt{\frac{S_k}{S_{\text{gen}}}} \times x_m, \quad (2.1)$$

jossa f_0 on perustaajuus, S_k on oikosulkuteho S_{gen} on moottorin näennäisteho ja x_m on magnetointireaktanssi, saadaan selville, mitä harmonista taajuutta lähimpänä induktiomoottorin synnyttämä resonanssitaajuus on. Esimerkiksi, jos induktiomoottorin resonanssitaajuus on 221 Hz, viides yliaalto taajuudella 250 Hz on alttein resonanssille. Kun resonanssitaajuus on lähellä harmonista taajuutta, voi yliaaltojännite olla voimakkaasti vääristynyt. [4]

Moottorit ovat sähköverkossa rinnan verkon impedanssin kanssa harmonisen jännitelähteen näkökulmasta, ja täten ne siirtävät järjestelmäresonanssia korkeammalle taajuudelle laskien järjestelmän nettoinduktanssia. Sähköverkossa moottorit myös vaimentavat joitain harmonisia komponentteja riippuen roottorin impedanssin ja resistanssin suhteesta. Pienemmät moottorit, joiden impedanssin ja resistanssin suhde on pieni, auttavat vaimentamaan harmonista resonanssia. [6]

Aurinkopaneelit

Jakeluverkossa aurinkopaneelit kytketään verkkoon inverttereiden avulla. Koska asuinalueella aurinkopaneelien invertterit on kytketty suoraan pienjänniteverkkoon, pienjänniteverkon impedanssi edustaa jännitelähdemuuntimen (engl. Voltage source converter, VSC) vaikutusta kytketyssä jakeluverkossa. Vaikka invertterit aiheuttavat joitain resonanssialueita, kytkentäpisteen impedanssi on lähellä järjestelmän impedanssia. Tämän takia aurinkopaneelien kytkentä ei aiheuta vakavia resonanssitiloja pienjänniteverkossa. Pienjänniteverkkoon kytkettyjen aurinkopaneelien vaikutus on suurempi korkean kertoimen harmonisilla yliaalloilla ja pienempi matalan kertoimen harmonisilla yliaalloilla. Koska aurinkopaneelit on kytketty suoraan pienjännitepuolelle, niiden vaikutukset keski- ja korkeajänniteverkkoon ovat mitättömät. Syy tälle on se, että jakelumuuntajan muuntosuhde on niin suuri, että pienjännitepuolen impedanssi on paljon suurempi kuin keskijännitepuolen impedanssi. Kuten aurinkopaneelit, monet muut VSC-pohjaiset järjestelmät, kuten tuuli-voimalat, sähköautojen latauspisteet ja keskeytymättömät virtalähteet (engl. uninterruptible power source, UPS) kohtaavat harmonisen resonanssin aiheuttamia ongelmia. [7]

Kotielektroniikka

Asuinrakennusten ja toimistotilojen modernit elektroniikkalaitteet vaikuttavat harmoniseen resonanssiin niiden sisältämien tehoelektronisten laitteiden takia. Näihin laitteisiin kuuluvat muun muassa tietokoneet, mikroaaltouunit, akkukäyttöisten laitteiden laturit, pesukoneet jne. Näiden elektroniikkalaitteiden tehoelektroniset komponentit toimivat suuremmilla taajuuksilla, joten näiden laitteiden vaikutukset harmoniseen resonanssiin tapahtuu yleensä 10. tai suuremmilla harmonisilla yliaalloilla. Koska kotikäyttöiset elektroniikkalaitteet ovat yleensä kytketty verkon yhteen vaiheeseen, niiden harmonisen resonanssin

vaikutukset havaitaan eri suuruisina eri vaiheissa. Vanhemmilla asuinalueilla harmonisen resonanssin vaikutukset ovat suuremmat kuin uudemmilla alueilla, koska uudemmissa pienjänniteverkoissa on otettu huomioon kotielektroniikkalaitteiden aiheuttamat ongelmat kytkemällä kondensaattoripankki verkon muuntajan yhteyteen kompensoimaan alle 2 000 Hz taajuuksia. [8]

3. MENETELMÄT HARMONISEN RESONANSSIN VÄHENTÄMISEKSI

Sähköverkossa hajautettujen tuotantojärjestelmien lisääntymisen vuoksi verkkoon kytkettyjen inverttereiden määrä lisääntyy jatkuvasti. Rinnakkaisten inverttereiden aiheuttamaa harmonista resonanssia pyritään vähentämään erilaisten suodinten avulla. Tässä luvussa tarkastellaan harmonisen resonanssin ennustamiseen ja ennaltaehkäisyyn käytettäviä menetelmiä, lineaariskvadraattista regulaattoria, todennäköisyyspohjaista resonanssitajuuskaistan siirtomenetelmää ja hybridi-induktiivista ja aktiivista suodatusmenetelmää.

3.1 Lineaariskvadraattinen regulaattori

Perinteinen ohjausmenetelmä verkkokytkettyjen inverttereiden tutkimisessa on ollut kaksoisohjaussilmukka (engl. dual-control-loop). Bao Xien tekemässä tutkimuksessa [9] esitellään lineaariskvadraattinen regulaattori (engl. Linear quadratic regulator, LQR), jonka toiminta perustuu optimaaliseen ohjausteoriaan, joka voi seurata nykyisen virran ohjausta nollalla vakaantilan virheellä, ja vaimentaa tehokkaasti LCL-suotimen resonanssia verkon impedanssivaihtelun aikana. Aikaisemmissa tutkimuksissa LQR-menetelmä perustui kokonaisjakson takaisinkytkentään, mutta koska takaisinkytkennän takia ohjaus oli riippuvainen tilariippuvista muuttujista, joten tällä tavalla toteutettu LQR-menetelmä ei osoittautunut kovin tehokkaaksi. [9]

Tilamuuttujien arvioimiseksi invertterin lähtövirrasta esitettiin Kalman-suodattimeen pohjautuvaa LQR-menetelmää, jotta tavanomaista LQR:ää voidaan soveltaa huomioimatta ohjaus- ja häiriötuloja. Verkkoon kytketyn invertterin tapauksessa kuitenkin virran seuranta on ehdotonta. LQR:n systemaattisessa suunnittelussa LCL-suotimella varustettu invertteri ottaa huomioon ohjausvirran ja häiriötulot. Tällä tavalla suunniteltua LQR-menetelmää tutkitaan suorittamalla verkkoon kytketyllä invertterillä testejä simulaatiolla ja kokeellisesti. [9]

3.1.1 Simulaation tulokset

Lähteessä [9] esitetyssä tutkimuksessa menetelmää simuloidaan MATLAB Simulink ohjelmalla, ja tässä alaluvussa esitellään tutkimuksen tuloksia. Standardissa IEC 61000-2-2

määritetään, että verkkojännite on järjestetty sisältämään 40., 41. ja 42. kertoimen harmonisia yliaaltojännitteitä, joiden suuruusluokka on 0,2 %, 0,1 % ja 0,2 % verkon ominaisjännitteestä, ja simulaatio on ajettu pohjautuen standardiin. Aluksi testi suoritetaan perinteisellä ohjausmenetelmällä ja verkon impedanssin arvoa muutetaan 2 mH:n, 5 mH:n ja 8 mH:n välillä. Verkon impedanssin ollessa 2 mH:a tuloksista huomataan, että invertteri toimii vakaasti ja verkkoon syötetty virta on hyvälaatuista. Harmonisen virran kokonaisvääristymä (engl. Total harmonic distortion, THD) on 1,5 % 40. kertoimen harmonisella yliaaltovirralla. [9]

Seuraavaksi verkon impedanssi nostetaan 5 mH:yy ja havaitaan, että invertterin kytkentäpisteen jännite ja verkkoon syötetty virta ovat molemmat voimakkaasti vääristyneitä. Yliaaltovirtojen harmoniset komponentit ovat pääosin 40. harmonisen ympärillä ja niiden THD on 7,64 %. On tärkeää huomata kytkentäpisteen jännitteen vääristymän olevan parempi kuin edellisessä testissä, koska harmoniset yliaaltojännitteet kasvavat verkon impedanssin kasvaessa. Verkon impedanssin ollessa 5 mH:a järjestelmän vakaus on erittäin alhaisella tasolla ja harmoniset yliaallot ovat voimakkaasti vääristyneet. Tämän takia testiä ei jatketa nostamalla verkon impedanssia 8 mH:yy. [9]

Invertterin ohjausmenetelmä muutetaan uudelleen suunniteltuun LQR-menetelmään ja tutkimus suoritetaan uudelleen. Tuloksista havaitaan, että invertteri toimii vakaasti eri verkon impedanssin arvoilla. Tällöin yliaaltovirtojen THD:t ovat vain 1,27 %, 1,53 % ja 1,77 % verkon impedanssin ollessa 2 mH:a, 5 mH:a ja 8 mH:a. Täten järjestelmän vakaus paranee ja hyvälaatuinen verkkoon syötetty virta voidaan aina saavuttaa. [9]

Testi suoritetaan myös muuttamalla verkon vaihtojännitteen suuruutta 311 V:sta 200 V:iin. Perinteisellä menetelmällä verkkoon syötetyssä virrassa jännitetason alenemisen hetkellä on pieni rajanylitys ja virran arvon tasaantumisen kesti useita jaksoja. LQR-menetelmällä tehdyssä testissä jännitetason alenemisen hetkellä verkkoon syötetyn virran ylitys on ilmeisempi, mutta virran arvon tasaantuminen on paljon nopeampaa. [9]

3.1.2 Kokeelliset tulokset

Lähteessä [9] myös tutkittiin käytännön kokeella LQR-menetelmän vaikutuksia sähköverkkoon, ja tässä alaluvussa tutkitaan kyseisen tutkimuksen tuloksia. Perinteisellä ohjausmenetelmällä verkon impedanssin ollessa 2 mH:a invertteri toimii vakaasti ja verkkoon syötetty virta on hieman vääristynyt sen THD:n ollessa 1,42 %. Kun verkon impedanssi nostetaan 5 mH:yy, invertterin kytkentäpisteen jännite ja verkkoon syötetty virta sisältävät paljon harmonisia yliaalloja. Harmoniset yliaallot esiintyvät pääosin 2000 Hz ympärillä THD:n ollessa 7,14 %. 40. kertoimen harmonisen yliaaltovirran suuruus on 1,74 A, joka on 5,67 % verkon ominaisvirran suuruudesta. Täten todistettiin, että järjestelmän vakauden heikentäminen johtaa harmonisen resonanssin ja muiden harmonisten yliaaltojen vahvistumiseen. Kun verkon impedanssi nostetaan 8 mH:yy, huomataan verkkoon

syötetyn virran alkavan värähdellä kasvavalla suuruudella voimakkaasti, joten järjestelmä sammutetaan testilaitteiden vaurioitumisen välttämiseksi. [9]

Testi suoritetaan myös LQR-menetelmää käyttäen, jotta järjestelmän vakaus saadaan paremmaksi. Testin tuloksista havaitaan, että invertteri toimii vakaasti koko testin ajan. Verkkoon syötetty virta sisältää jonkin verran harmonisia yliaaltoja, ja verkon impedanssin arvoilla 2 mH:a, 5 mH:a ja 8 mH:a virtojen THD:t ovat 1,12 %, 1,36 % ja 1,57 %. [9]

Jännitetason muutoksen aikana 311 V:sta 200 V:in tulokset ovat samankaltaiset simulaation tulosten kanssa. Perinteisellä ohjausmenetelmällä jännitetason muutoksen aikana virran arvon ylittäminen on pienempi kuin LQR-menetelmällä, mutta virran arvon tasaantuminen oli hitaampaa kuin LQR-menetelmällä. [9]

3.2 Todennäköisyypohjainen resonanssitaajuuskaistan siirtomenetelmä

Deterministinen analyysi ei pysty tuomaan esille sähköverkon käytännön satunnaista käyttäytymistä epävarmuustekijöiden takia. Tämän vuoksi on alettu kehittää menetelmiä sähköjärjestelmien harmonisen resonanssin satunnaisuuden paljastamiseksi, jotka perustuvat todennäköisyyteen. Yksi tällainen menetelmä on todennäköisyypohjainen resonanssitaajuuskaistan siirtomenetelmä (engl. Probabilistic resonance frequency band shift method, PRFB shift method). [10]

PRFB-menetelmä ottaa sähköverkkosimulaatiossa huomioon resonanssitaajuuden, modaalisen impedanssin ja jokaisen väylän osallistumisarvon, jotka ovat riippuvaisia järjestelmän parametreista. Täten PRFB luodaan sellaisella taajuusalueella, joka on herkkä vastaaville parametreille. PRFB:ssä resonanssin todennäköisyys jokaisella resonanssitaajuudella voidaan laskea matemaattisesti. PRFB:n modaalisten impedanssien epävarmuutta esitetään käänteisen pilvimallin avulla kolmella numeerisella arvolla: 1) odostusarvolla, joka on edustavin ja tyypillisin modaalisen impedanssin näyte järjestelmässä, 2) entropialla, joka esittää modaalisen impedanssin epävarmuusmittausta sisältäen satunnaisuuden, ja 3) hyperentropialla, joka on entropian epävarmuusaste, ja se kuvaa modaalisen impedanssin hajautusastetta. Väylän osallistumisarvot ovat hyödyllisiä arvioidessa kunkin väylän osallistumisastetta. Osallistumisarvo ilmoitetaan prosenttilukuna tietyn väylän numeron ja simulaation ajokertojen suhteesta. [10]

3.2.1 Testitulokset

Lähteestä [10] esitetyssä tutkimuksessa testit suoritetaan IEEE-14 väylätestijärjestelmässä. Järjestelmän epävarmuustekijät on esitetty kaikille generaattorien ulostuloille, verkkoelementeille ja järjestelmäkuormille. Testi suoritettiin kolmessa osassa, joissa en-

simmaisessa tapauksessa otettiin huomioon vain väyläkondensaattorin parametrin epävarmuus. Tämän testin tarkoitus on havainnoida kuinka arvioida yksittäisen parametrin vaikutusta järjestelmän harmonisen resonanssin käyttäytymiseen sekä tutkia PRFB:n herkkää parametria. Testistä saadut tilastolliset tulokset järjestelmän harmonisen resonanssin käyttäytymisestä sisältää resonanssin ilmentymisen todennäköisyyden jokaisessa resonanssipisteessä ja modaalisen impedanssin. Tuloksista huomataan, että vaihtelevan todennäköisyyden resonanssipisteet ovat resonanssikaistalla 13,3 pu - 15,2 pu ja muut järjestelmän resonanssipisteet eivät juurikaan vaikuta. Tuloksista voidaan havaita myös, että kondensaattorin epävarmuus ei juurikaan vaikuta PRFB:n väylän osallistumisarvoon. Täten kondensaattori on PRFB:n herkkä parametri 14.5 pu taajuuksilla, ja se voi vaikuttaa resonanssitaajuuksiin ja modaaliseen impedanssiin resonanssikaistalla, mutta ei vaikuta väylien osallistumisasteeseen. Kaikille järjestelmien epävarmoille parametreille niiden yksilöllistä vaikutusta resonanssitodennäköisyyksiin tietyllä resonanssikaistalla, voidaan löytää ja luokitella resonanssikaistan resonanssitaajuuden herkkät parametrit voidaan löytää ja luokitella. Samalla kun verrataan erilaisista epävarmoista parametreista johtuvien modaalisten impedanssien arvioituja todennäköisyystiheysjakauksia ja käänteisen pilvimallin parametreja, impedanssiherkkyysparametrit voidaan löytää ja luokitella. [10]

Toisessa tapauksessa tutkitaan, kuinka arvioida tietyntyyppisten verkkoelementtien, kuten johdinten ja suodinten, tai kuormien vaikutusta harmonisen resonanssin käyttäytymiseen. Kuormituksen vaihtelu kussakin järjestelmän väylässä edustaa epävarmuutta erityyppisten ja milloin tahansa kytkettyjen ja irrotettujen kuormien koostumuksesta. Testin tuloksista huomataan, että kuorman epävarmuustekijöillä on vaihtelevia vaikutuksia neljällä eri resonanssikaistalla (3,5 pu, 10 pu, 14,5 pu ja 25 pu), sisältäen niiden resonanssitaajuudet, modaaliset impedanssit ja väylien osallistumisasteet. Verrattuna ensimmäiseen tapaukseen, huomataan, että väyläkondensaattorin ja kuormitusten välillä on selvästi erilaisia vaikutuksia modaaliseen impedanssiin resonanssikaistalla 14,5 pu taajuuden ympärillä. Väylien osallistumisasteet ovat lähes samat kussakin tapauksessa. [10]

Kolmannessa tapauksessa havainnollistetaan todennäköisyyden arviointeja ottaen huomioon järjestelmän kaikki epävarmuustekijät. Tuloksista huomataan, että deterministisen tutkimuksen referenssikäyrän kaikkien seitsemän resonanssitaajuuspisteiden ympärille (3 pu, 4,5 pu, 6 pu, 10,5 pu, 13 pu, 14,5 pu ja 25 pu) on muodostunut todennäköisiä resonanssikaistoja. Todennäköisten resonanssien määrä jokaisella resonanssikaistalla on kasvanut huomattavasti verrattuna edellisiin tapauksiin. [10]

Vertailemalla eri tapauksien tuloksia, huomataan että PRFB:ssä on aina useampi kuin yksi herkkä parametri. Jokaisen osittaisen parametrin herkkyysinformaatio voidaan saavuttaa vertailemalla tapauksien tuloksia, sisältäen todennäköisyyspohjaisen resonanssitaajuuskaistan, todennäköisyystiheysjakauksien ja modaalisen impedanssin ja väylien osallistumisasteen käänteisen pilvimallin. Väylien osallistumisasteet resonanssikaistalla liittyvät

vahvasti mukana olevien väyläkondensaattorien sijaintiin ja kokoon. [10]

3.2.2 Menetelmän mahdolliset sovelluskohteet

PRFB voi tarjota todennäköisyyslausekkeita harmonisen resonanssin ja siihen liittyvien vaikutustekijöiden stokastisen käyttäytymisen kvantifioimiseksi. PRFB arvioi uusiutuvan energian järjestelmien käytettävissä olevien epävarmuustekijöiden vaikutusta järjestelmän harmonisen resonanssin stokastiseen käyttäytymiseen, määrittää järjestelmän parametrien sallitut virheet harmonisten yliaaltojen modelointia ja resonanssin analysointia varten huomioimalla niiden herkkyysasteet. PRFB myös suorittaa harmonisen resonanssin riskiarvioinnin ottamalla harmonisen lähteen sijainnin huomioon ja määrittää parametrit ja sijainnit eri passiivisille ja aktiivisille suotimille, joilla on hyvä kriittisten todennäköisten resonanssikaistojen kestävyys. [10]

Vakava harmoninen resonanssi tapahtuu vain, jos resonanssitaajuus on lähellä yhtä järjestelmän harmonisten lähteiden synnyttämää taajuutta. Olettaen, että resonanssitaajuuskaistaa voidaan siirtää toisille taajuuksille, jotka ovat kauempana harmonisen lähteen synnyttämästä taajuudesta, harmonista resonanssia voidaan heikentää tai parhaimmassa tapauksessa hävittää kokonaan. Täten PRFB:n näkökulmasta resonanssitaajuuskaista voidaan siirtää tavoitetaajuudelle muuttamalla yhtä tai useampaa herkkää parametriä. Esimerkiksi, jos tavoitetaajuus on 16 pu, voidaan testissä havaitun kuudennen taajuuskaistan (13 pu - 15,5 pu) perusteella väyläkondensaattori valita herkkäksi parametriksi, ja alentamalla kondensaattorin parametria saadaan taajuuskaistaa siirrettyä. Vähitellen alentamalla väyläkondensaattorin nimellisarvoa, huomataan, että nimellisarvo putoaa 76 %:iin alkuperäisestä arvosta ja tällöin resonanssitaajuuskaista siirtyy tavoitetaajuudelle. Väyläkondensaattorin parametrin muuttamisella ei kuitenkaan ole vaikutusta muihin resonanssitaajuuskaistoihin. Täytyy huomata, että yksi tietty parametri voi olla monen eri todennäköisen resonanssitaajuuskaistan herkkä parametri, joten herkän parametrin vaikutukset muihin resonanssitaajuuskaistoihin täytyy ottaa huomioon. [10]

3.3 Hybridi-induktiivinen ja aktiivinen suodatusmenetelmä

Passiivista tehosuodatusta (engl. Passive power filtering, PPF) on pidetty laajalti ekonomisena vaihtoehtona sähkötehon laadun parantamiseksi. PPF-menetelmä voi kuitenkin vain pienentää määritetyn kertoimen harmonisia yliaaltovirtoja, ja järjestelmän impedanssi vaikuttaa suuresti sen suodatuksen suorituskykyyn. Kun jakeluverkossa passiivisuodatin altistuu alhaiselle impedanssille, rinnakkaisresonanssi sähköverkon ja suodattimen välillä vahvistuu herkästi, jonka seurauksena harmonisten yliaaltovirtojen amplitudien kasvua ja voi jopa vaikuttaa jakeluverkon jänniteprofiileihin. Toisin kuin PPF, aktiivinen tehosuodatin (engl. Active power filter, APF) voi tehokkaasti välttää harmonista resonanssia. Tällä

hetkellä käytännön sovelluksissa on otettu käyttöön PPF- ja APF-menetelmien yhdistelmä, hybridi aktiivinen ja passiivinen suodatusmenetelmä (Hybrid active and passive filter, HAPF). Kuitenkin lähes kaikki PPF-, APF- ja HAPF-menetelmät ovat tehokkaita vain parantamaan sähköverkon tehonlaatua julkisessa verkossa, mutta verkossa, jossa on paljon epälineaarista kuormaa, nämä suodatusmenetelmät eivät ratkaise harmonisten yliaaltojen tuottamia ongelmia tarpeeksi hyvin. [11]

Seuraavaksi esitellään esimerkki suuritehoisen teollisuuslaitoksen tasajännitelähteen muuntajasta. Koska muuntajan muuntajasillan vaihtovirtapuolella vaihejännite on erittäin suuri, suodatinta ja loistehon kompensointilaitetta on mahdotonta asentaa verkossa kuorman puolelle, joten se täytyy asentaa muuntajan tasajännitepuolelle, jonka vaikutuksesta kaikki harmoniset yliaaltokomponentit ja loistehokomponentit virtaavat vapaasti muuntajan käämityksiin. Tämä johtaa muuntajassa ylimääräisiin häviöihin, laitteiden lämpötilan nousuun, värinään ja säröön. [11]

Edellisen esimerkin ongelmien ehkäisemiseksi on kehitelty induktiivinen tehosuodatin (engl. Inductive power filter, IPF). Tämä menetelmä yhdistää harmonisten yliaaltojen vaimentamisen ja loistehon kompensointia lähellä muuntajasilloja, sillä se voi rajoittaa harmonisten yliaalto- ja loistehokomponenttien virtausta ja vähentää näiden komponenttien vaikutuksia muuntajaan ja sitä ympäröiviin sähkölaitteisiin. Tutkimuksista on huomattu, että induktiivisella suodattamisella on potentiaalisia etuja harmonisen resonanssin vaimentamiseen sähköverkon ja suodatinlaitteen välillä. Tätä IPF-menetelmää on alettu yhdistää edellisten suodatusmenetelmien kanssa ja on päädytty hybridi-induktiiviseen ja aktiiviseen suodatusmenetelmään (engl. hybrid inductive and active filter, HIAF), jonka tarkoituksena on parantaa sähköverkon tehon laatua julkisessa sähköverkossa, ja teollisuuden käyttämässä epälineaarisen kuorman sähköverkossa. [11]

3.3.1 Piirin topologia

HAPF-menetelmässä passiivisuodatin koostuu 5., 7., 11. ja 13. kertoimen harmonisten yliaaltojen yksiviritteisistä (engl. single-tuned) suodattimista, joiden käyttötarkoitus on heikentää epälineaarisen kuorman synnyttämien kyseisten kertoimien harmonisten yliaaltovirtojen ominaisuuksia. HAPF-menetelmän passiivisuodattimien yhteyteen on kytketty aktiivisuodatin, jonka tarkoituksena on vahvistaa passiivisuodattimien suodatuskykyä ja heikentää rinnakkaisresonanssia passiivisuodattimen ja verkon välillä. Toisin kuin perinteinen HAPF-menetelmä, HIAF-menetelmä koostuu epälineaarisen kuorman lähelle kytketystä täysviritetystä (engl. fully-tuned, FT) haarasta, joka sisältää 5., 7., 11. ja 13. kertoimen harmonisten yliaaltojen suodattimet, ja sarjaan kytketystä aktiivisuodattimesta. Verkkomuuntajan toisiopuolella on laajennettu kolmiokytkentä, jossa jokaisella vaiheella laajennetun kytkennän ja kolmiokytkennän välillä on haaroitin kytkettynä FT-haaraan. Erona HAPF- ja HIAF-menetelmien välillä on, että HIAF-menetelmässä harmoniset yliaaltovir-

rat vaimennetaan lähellä epälineaarista kuormaa, täten verkkomuuntajan ensiökäämityksessä on vähemmän harmonisia yliaaltovirtoja. Tämän ansiosta harmonisen vuotovirran määrää verkkomuuntajassa voidaan vähentää, ja HIAF-menetelmä osoittautuu hyväksi menetelmäksi verkkomuuntajan kannalta. Sarja- ja rinnakkaisresonanssin välttämiseksi, perinteinen passiivisuodatin ei ymmärrä FT-haaran topologiaa, joka alentaa sen suodattustehoa. Puolestaan HIAF-menetelmässä sen harmonisen magneettipotentialin tasapainon vuoksi laajennetun ja normaalin kolmiokytkennän välillä, FT-haara voidaan suunnitella saavuttamaan resonanssin halutulla harmonisella taajuudella. FT-haaran ollessa rinnakkain jakeluverkon ja verkkomuuntajan käämityksen kanssa, verkon impedanssin ollessa pieni, harmoninen resonanssi ei ole niin herkkä vaikuttamaan verkon muiden komponenttien kanssa. [11]

3.3.2 Testitulokset

Lähteessä [11] esitetyssä tutkimuksessa esitellään kaksi tapausta, joista ensimmäisessä vertaillaan PPF-, HAF-, IPF- ja HIAF-menetelmien suorituskykyä, ja toisessa tapauksessa tutkitaan dynaamisen vasteen suorituskykyä. PPF- ja HAF- menetelmiä käytetään sähköverkossa, jossa suodattimet ovat kytkettynä ennen verkkomuuntajaa jakeluverkon puolelle, ja IPF- ja HIAF-menetelmiä käytetään verkossa, jossa suodattimet ovat kytkettynä verkkomuuntajan toisiopuolelle lähelle verkon epälineaarista kuormaa. Ilman suodatusta verkkovirran aaltomuoto jakeluverkon puolella on hyvin vääristynyt. Käytettäessä perinteistä PPF-menetelmää 5., 7., 11. ja 13. kertoimen harmonisten yliaaltojännitteiden suodattamiseksi, jakeluverkon virran aaltomuoto on voimakkaasti vääristynyt. PPF-menetelmällä suodatetulle virralle suoritetaan nopea Fourier-muunnos (engl. fast Fourier transform, FFT), jonka avulla huomataan, että haluttujen harmonisten yliaaltovirtojen arvot eivät ole laskeneet, vaan kasvaneet huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että harmoninen resonanssi vahvistuu passiivisuodattimen impedanssin ja verkon impedanssin välillä näillä taajuuksilla. Kun käytetään HAF-menetelmää, harmoninen resonanssi voidaan vähentää lähes olemattomaksi, ja tällöin jakeluverkon virran aaltomuoto on lähes puhdasta siniaaltoa. [11]

Siirryttäessä IPF- ja HIAF-menetelmien käyttämiseen, myös verkon topologia muuttuu suodattimen kytkennän ja verkkomuuntajan toisiopuolen kolmiokytkennän kannalta, kuten edellä on mainittu. Kuten edellisessä verkkotopologiassa, ilman suodatusta jakeluverkon virran aaltomuoto on vääristynyt. Käytettäessä IPF-menetelmää 5., 7., 11. ja 13. kertoimen harmonisten yliaaltovirtojen suodattamiseksi, huomataan, että vakava resonanssi-ilmiö ei ole niin suuri kuin PPF-menetelmällä, vaikkakin virran aaltomuodossa on hieman vääristymää. Tämä tarkoittaa sitä, että induktiivisella suodattamisella on luonnollinen ominaisuus harmonisen resonanssin välttämiseksi jakeluverkon impedanssin ja suodattimen impedanssin välillä. Koska FT-haara on kytketty haaroittimella muuntajan toisiökäämi-

tykseen, ja ensiökäämitys on kytketty suoraan jakeluverkkoon ilman mitään rinnakkaista suodatusta, jakeluverkon kokonaisimpedanssi ei koostu vain verkon impedanssista, vaan myös ensiökäämin ekvivalentista impedanssista. Se voi nostaa jakeluverkon kokonaisimpedanssia ja sillä voi olla mahdollisia hyötyjä harmonisen resonanssin välttämiseksi. Käytettäessä HIAF-menetelmää jakeluverkon virran aaltomuoto saadaan suodatettua lähes puhtaaksi siniaalloksi. [11]

Toisessa tapauksessa tutkitaan HIAF-menetelmän dynaamisen vasteen suorituskykyä kahdella eri tavalla: kytkemällä HIAF-menetelmä kytketään järjestelmään 0.4 sekunnin kohdalla ja arvioidaan HIAF-menetelmän vasteen suorituskykyä ja sen vaikutusta järjestelmän dynaamiseen suorituskykyyn, ja muuttamalla kuormaa 0.4 sekunnin kohdalla ja arvioimalla HIAF-menetelmän vastetta epälineaarisen kuorman vaihteluun. Ensimmäisen tavan tuloksista huomataan, että 0.4 sekunnin kohdalla HIAF-menetelmä vastaa erittäin nopeasti päälle kytkentään ja vetää harmoniset yliaaltovirrat puoleensa FT-haaraan, ja tästä eteenpäin verkossa olevien harmonisten yliaaltovirtakomponenttien määrä on pienentynyt huomattavasti jakeluverkon puolella. Tuloksista huomataan, että HIAF-menetelmä ei vaikuta jakeluverkon jänniteprofiiliin. Siirryttäessä tutkimaan dynaamisen vasteen suorituskykyä kuorman resistanssi muutetaan 60:stä 20:een, täten se vaikuttaa tasajännitteen alenemiseen ja kuorman virran nousuun. HIAF-menetelmä huomaa muutoksen nopeasti, joten vasteaika on pieni. Täten jakeluverkon virran aaltomuoto pysyy lähes puhtaana siniaaltona. [11]

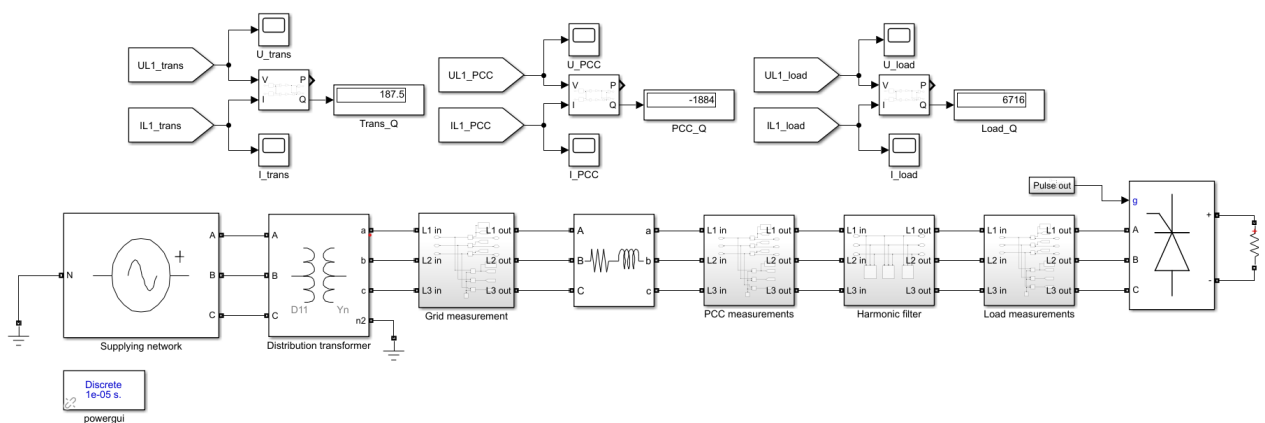
Kaikki tutkimustulokset osoittavat, että HIAF-menetelmä voi vähentää harmonisten yliaaltovirtojen harmonisen lähteen, eli tässä tapauksessa epälineaarisen kuorman lähellä. Tämä menetelmä alentaa harmonisten yliaaltovirtojen määrää muuntajan ensiökäämityksessä ja täten jakeluverkossa, joka on tärkeää muuntajan vakaan ja tehokkaan toiminnan kannalta, ja tärkeä asia energiamuunnosjärjestelmien kannalta. Tutkimustuloksista huomataan myös, että induktiivisella suodattamisella on luonnollinen ominaisuus harmonisen resonanssin vähentämiseksi jakeluverkossa. Täten HIAF-menetelmä voi tehokkaasti vähentää harmonista resonanssia, riippumatta epälineaarisen kuorman muutoksista. HIAF-menetelmällä on paljon potentiaalisia sovelluskohteita teollisessa sähköverkossa, uusiutuvien energialähteiden integroinnissa osaksi sähköverkkoa ja myös muissa energiamuunnosjärjestelmissä, jotka pohjautuvat tehoelektronisiin muuntajiin. [11]

4. SIMULAATIO

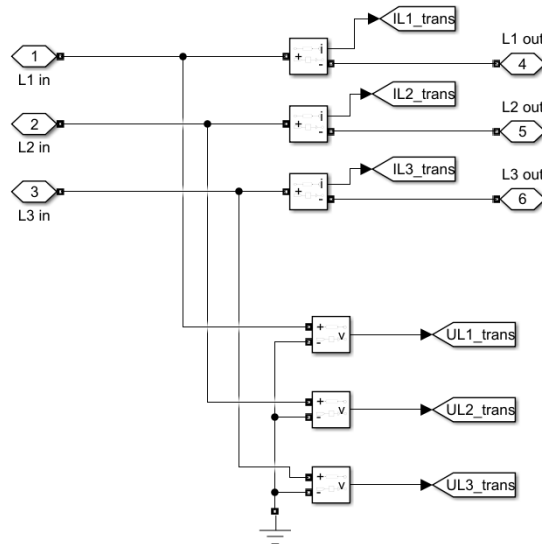
Tässä luvussa esitetään MATLAB Simulink-ohjelmalla toteutetun simulaation tuloksia. Simulaatiossa on toteutettu yksinkertainen pienjänniteverkko, johon on kytketty epälineaarinen kuorma, tässä tapauksessa hilaohjattu tyristori. Simulaation muut osat koostuvat sähköverkkoa syöttävästä generaattorista, jakelumuuntajasta, 1 km mittaisesta maakaapelista ja passiivisesta harmonisesta suodattimesta. Simulaation tarkoituksena on havainnollistaa, kuinka harmoniset yliaallot ja harmoninen resonanssi vaikuttavat sähköverkossa. Alla kuvassa 4.1 on esitetty kyseisen simulaation kaaviorakenne.

Generaattori syöttää verkkoon 20,5 kV jännitettä 50 Hz taajuudella. Jakelumuuntaja on näennäisteholtaan 100 kVA muuntaja, ja sen kytkentätyyppi on Dyn11. Koska kyseessä on pienjänniteverkko, muuntajan muuntosuhde on 20,5 kV / 0,41 kV. Maakaapelina simulaatiossa on simuloitu Suomessa hyvin yleisessä käytössä oleva AMCMK HF 1 kV maakaapeli [12]. Maakaapelin suojuksen resistanssi on 1,2 Ω /km ja nimellinen induktanssi on 0,24 mH/km [13]. Tyristoriin on kytketty 4 Ω vastus ja tyristorin hilan ohjaus on toteutettu [14] mallin mukaisesti, mutta tyristorin liipaisukulmaksi (engl. firing angle) on asetettu 30 astetta.

Simulaation ajaminen aloitetaan ilman minkäänlaista harmonisten suodattamista, jotta saadaan selville lähtötilanne, johon suodattimien toimintaa verrataan. Kun simulaatio ajetaan, lasketaan muuntajan loistehon määrä, jotta saadaan selville harmonisen suodattimen vaatima kompensatioloisteho. Tämä kompensatioloisteho saadaan lasket-



Kuva 4.1. MATLAB Simulink simulaation kaaviokuva

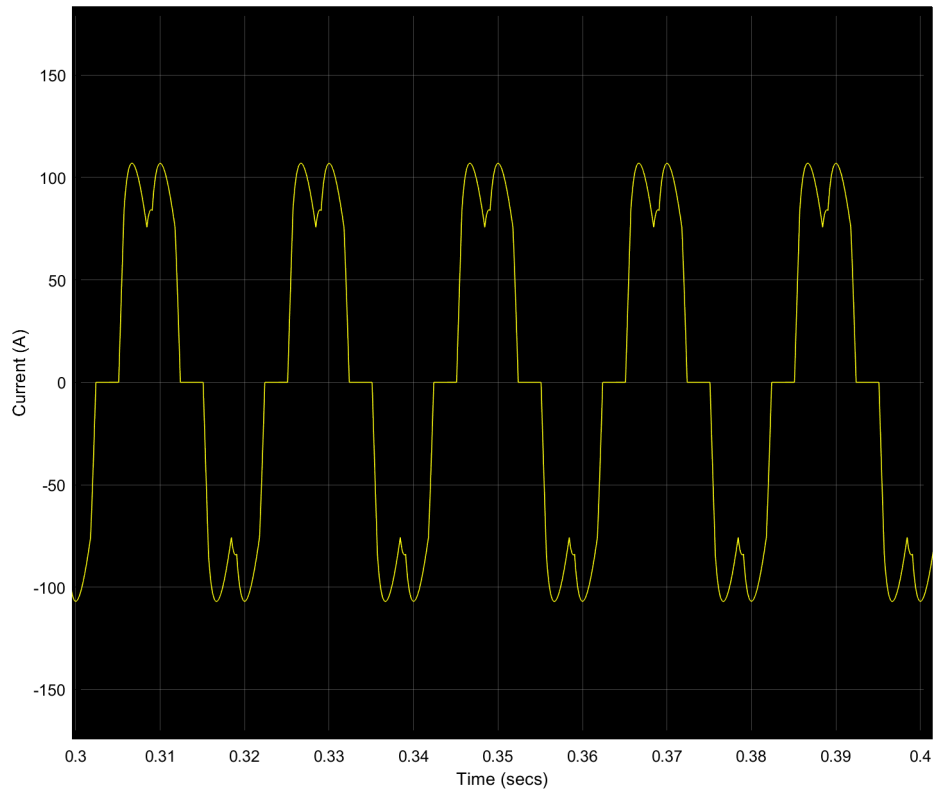


Kuva 4.2. Simulaation mittauslohkojen sisäinen rakenne.

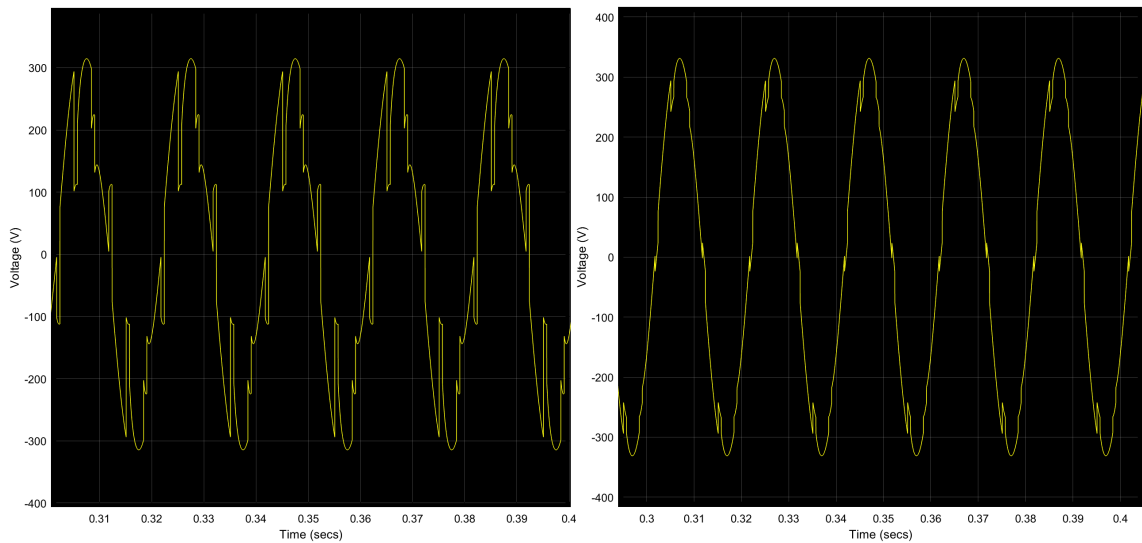
tua mittaamalla muuntajan yhden vaiheen jännite ja virta, jotka ovat mitattu kuvassa 4.2 näkyvällä tavalla. Hyödyntämällä Simulinkin kirjastoja, voidaan loisteho laskea Power measurements-lohkon avulla. Yhden vaiheen loistehoksi ensimmäisellä simulaatioajolla saadaan noin 9700 VAR:ia. Kertomalla tämä kolmella saadaan kaikkien kolmen vaiheen loisteho, joka on 29100 VAR:ia.

Ilman suodatinta verkon jännite ja virta ovat vääristyneitä jokaisessa mittauspisteessä, muuntajalla, kytkentäpisteessä (engl. point of common coupling, PCC) ja kuormalla. Kuvassa 4.3 huomataan, että kuorman virran aaltomuoto ei ole puhdasta siniaaltoja, vaan tasasuuntaajan synnyttämä virta on hyvin vääristynyt. Ilman suodatusta jokaisessa mittauspisteessä virran aaltomuodot ovat samanlaisia. Kuvassa 4.4a nähdään kuorman jännitteen aaltomuoto, joka on voimakkaasti vääristynyt. Jännitteen aaltomuoto kuitenkin muuttuu sinimuotoisemmaksi muuntajalla, joka voidaan nähdä kuvasta 4.4b. Tämä johtuu kaapelien impedanssista, jonka takia harmonisten yliaaltojen vaikutukset heikkenevät mitä kauempana kuormasta ollaan.

Harmonisten yliaaltojen määrää mittauspisteessä voidaan havainnollistaa kokonaisvääristymän (engl. total harmonic distortion, THD) avulla, joka on laskettu Simulinkin sisäisen FFT-analyysityökalun avulla. KytKentäpisteessä ja muuntajalla virran THD on 27,72 % ominaiskomponentista. Jännitteen THD kytKentäpisteessä mitattuna on 28,78 % ja muuntajalla 6,73 %. Myös jännitteen THD on hyvin korkea lähellä kuormaa, mutta muuntajalla THD on jo paljon pienempi. Jännitteen ja virran tapauksessa 5. harmoninen yliaalto on suurin. Virran 5. yliaallon osuus on 25,4 % muuntajalla, sekä kytKentäpisteessä. Jännitteen 5. yliaallon osuus kytKentäpisteessä on 24,5 % ja muuntajalla 4,8 %. Muista harmonisista yliaalloista suurimpia virran ja jännitteen tapauksessa ovat 7. ja 11. yliaallot, joiden osuus virrassa on molemmilla noin 7 % ja jännitteellä kytKentäpisteessä 8,3 % ja 11,8 %,



Kuva 4.3. Kuorman virran aaltomuoto ilman suodatusta.



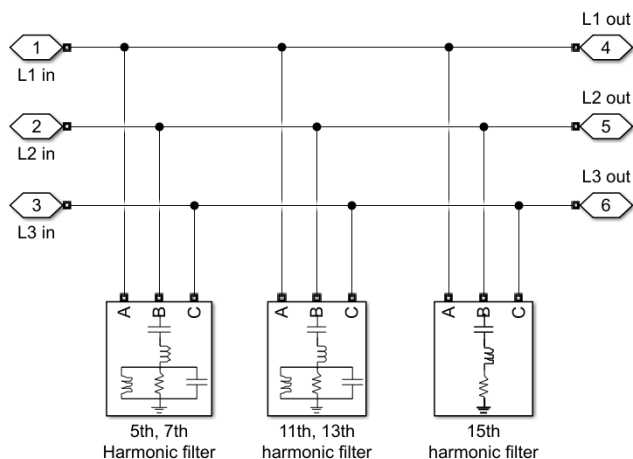
(a) Kuorman jännitteen aaltomuoto

(b) Muuntajan jännitteen aaltomuoto

Kuva 4.4. Jännitteen aaltomuoto ilman harmonisten yliaaltojen suodatusta kuormalla ja muuntajalla.

ja muuntajalla 1,9 % ja 2,8 %.

Seuraavaksi simulaatio ajetaan suodattamalla osa harmonisista yliaalloista. Suodattaminen simulaatiossa tapahtuu kuvassa 4.5 näkyvällä suodattimella, josta kytetään päälle 5. ja 7. harmonisen yliaallon suodatin. Harmonisen suodattimen parametriksi täytyy syöttää verkosta kompensoitava loisteho, joka on 29100 VAR. Näin saadaan harmoninen suo-

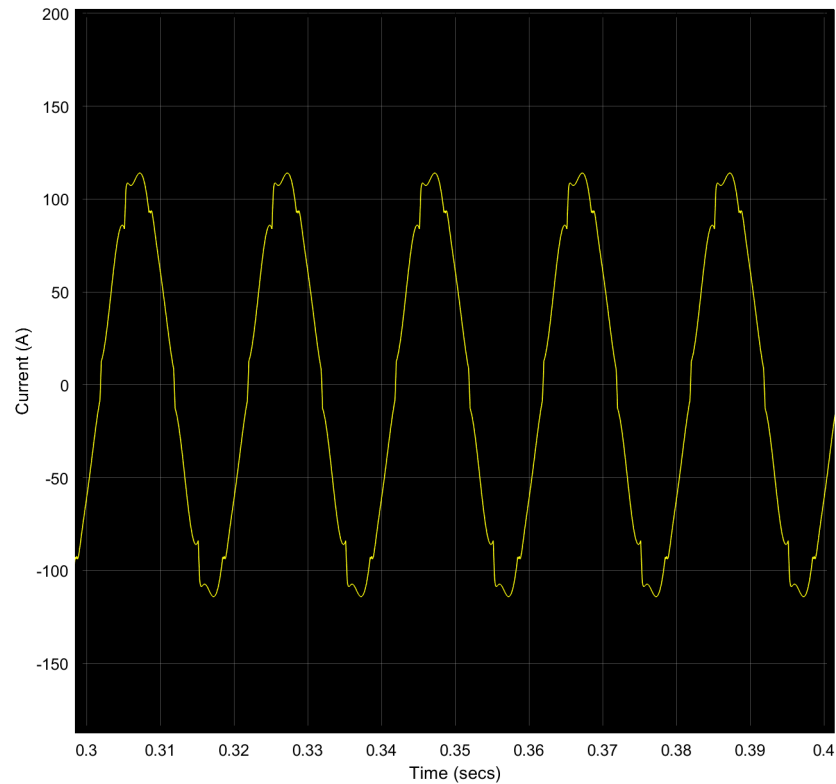


Kuva 4.5. Simulaation 5., 7., 11., 13. ja 15. harmonisen yliaallon suodatin.

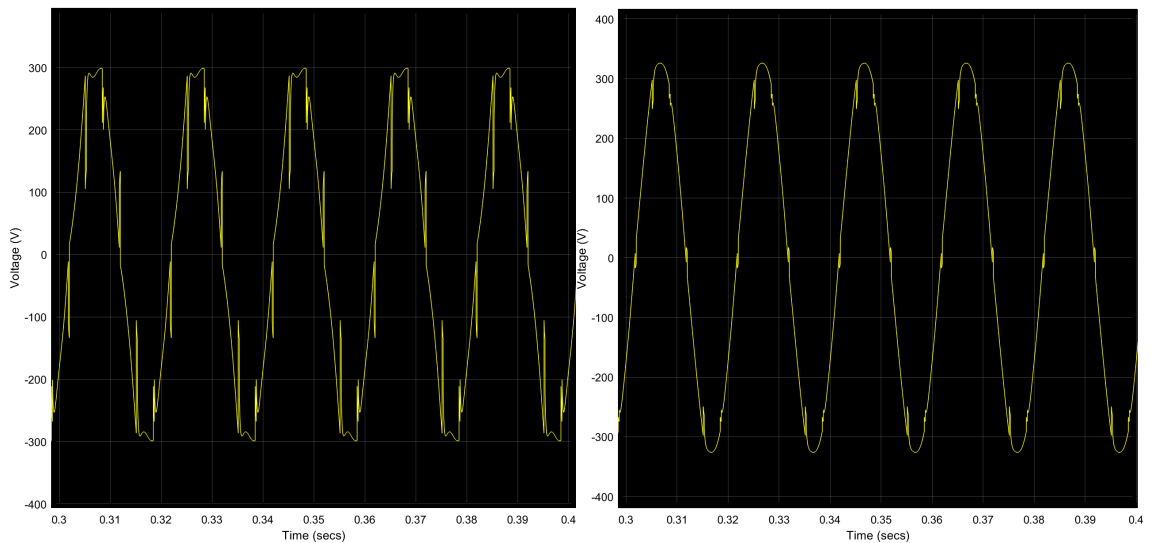
datin kompensoimaan myös verkon loistehon muuntajalla lähes nolllaksi. Harmonisesta suodattimesta huolimatta virta ja jännite pysyvät kuormalla hyvin samalaisena kuin ilman suodatustakin. Harmoninen suodatin suodattaa suodattimen parametreihin asetetut harmoniset yliaallot kytkentäpisteen ja muuntajan välillä. Kuten kuvasta 4.6 huomataan, kytkentäpisteen virran aaltomuoto muistuttaa paljon enemmän siniaaltoa, mutta on silti hieman vääristynyt. Virran aaltomuoto on muuntajalla samanlainen, kuin kytkentäpisteessä. Jännitteen aaltomuoto kytkentäpisteessä on samanlainen kuin kuormalla, eli voimakkaasti vääristynyt, mutta muuntajan jännitteen aaltomuoto on jo hyvin lähellä siniaaltoa, kuten kuvasta 4.7 nähdään.

Virran ja jännitteen THD:t ovat huomattavasti alemmat kytkentäpisteessä kuin ilman harmonisten yliaaltojen suodattamista. THD on enää vain 3,58 % ja 5. yliaallon osuus on pudonnut alle 1 % ja 7. yliaallon osuus on jo lähes 0 %. Virralla nyt suurin harmoninen yliaalto on 11. joka on 2,1 % ominaiskomponentista. Kytkentäpisteessä jännitteen THD on 10,14 % ja muuntajalla vain 2,49 %. 5. yliaallon osuus molemmissa mittauspisteissä on alle 1 % ja suurimmiksi ovat nousseet 11. ja 15. yliaallot, jotka ovat kytkentäpisteessä 3,9 % ja 4,3 % ominaiskomponentista. Harmonisten osuus matalilla harmonisilla yliaalloilla on siis huomattavasti pienentynyt, ja korkeamman kertoimen harmoniset yliaallot ovat nyt suuremmassa roolissa.

Viimeisenä simulaatiossa kytketään kaikki harmoniset suodattimet verkkoon, eli verkosta suodatetaan 5., 7., 11., 13. ja 15. yliaallot, ja simulaatio ajetaan uudelleen. Nyt jokaiselle kolmelle harmoniselle suodattimelle asetetaan kompensatioloiستهoksi yhteensä 29100 VAr, eli jokaiselle 9700 VAr, koska suodattimet ovat rinnankytkettynä sähköverkossa. Kytkentäpisteessä virran aaltomuoto on jo lähes siniaalto, ja vääristymän määrä on hyvin pieni, kuten kuvasta 4.8 nähdään. Kuten kuvasta 4.9a nähdään, jännitteen aaltomuoto kytkentäpisteessä muistuttaa hieman edellisen suodattimen tuottamaa aaltomuotoa, mutta parannuksia on hieman havaittavissa aallon huipun pyöreyydessä. Muuntajalla taas



Kuva 4.6. KytKentäpisteen virran aaltomuoto 5. ja 7. harmonisella suodattimella.



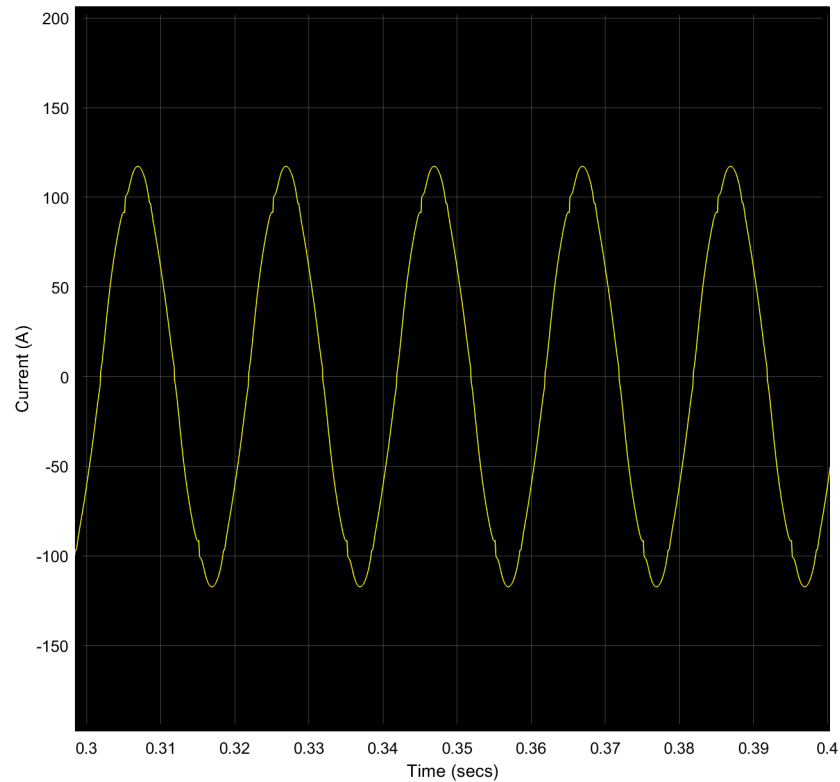
(a) KytKentäpisteen jännitteen aaltomuoto

(b) Muuntajan jännitteen aaltomuoto

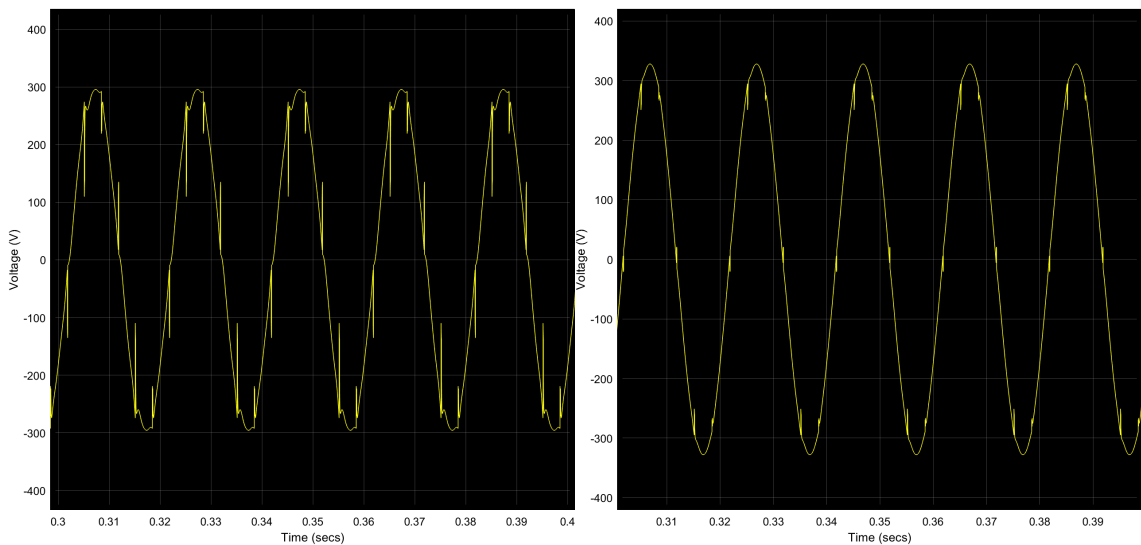
Kuva 4.7. Jännitteen aaltomuoto 5. ja 7. harmonisella suodattimella kytKentäpisteessä ja muuntajalla.

jännitteen aaltomuoto on hyvin siniaaltomaista, kuten kuvasta 4.9b nähdään.

Virran THD kytKentäpisteessä on käytettävällä harmonisella suodattimella enää 2,72 %, ja suurimpana harmonisena yliaallona on 5. yliaalto, joka on 2,6 % ominaiskomponentista. Kaikki muut harmoniset yliaallot ovat alle 0,5 % ominaiskomponentista, eli virta on lähes puhdasta virtaa. KytKentäpisteen jännitteen THD on 3,84 % ja suurin harmoninen



Kuva 4.8. Kytentäpisteen virran aaltomuoto 5., 7., 11., 13. ja 15. harmonisella suodattimella.



(a) Kytentäpisteen jännitteen aaltomuoto

(b) Muuntajan jännitteen aaltomuoto

Kuva 4.9. Jännitteen aaltomuoto 5., 7., 11., 13. ja 15. harmonisella suodattimella kytkentäpisteessä ja muuntajalla.

yliaalto on virran tapaan 5. yliaalto. Sen suuruus ominaiskomponentista on 2,2 %, ja muut harmoniset yliaallot ovat alle 1,5 % suuruisia, joista suurin on 35. yliaalto. Muuntajalla jännitteen THD on enää 0,94 %, joista suuri on 5. yliaalto suuruudella 0,54 %. Muut yliaallot ovat alle 0,35 % ominaiskomponentista.

Harmonisen suodattamisen rooli sähköverkon laadussa on erittäin suuri, kuten simulaation tuloksista voidaan päätellä. Pelkkä harmonisten suodattaminen ei kuitenkaan yksin riitä poistamaan kaikkia sähköverkon laadullisia ongelmia, mutta harmonisten yliaaltojen osuus on kuitenkin merkittävä. Ilman minkäänlaista suodattamista tasasuuntaajan (simulaatiossa hilaohjattu tyristori) ulostulovirta kulkeutuu sellaisenaan läpi koko järjestelmän ja täten jännite on erittäin vääristynyttä koko verkossa. Suodattamalla matalan kertoimen harmonisia yliaaltoja, saadaan virran aaltomuoto vastaamaan jo lähes siniaaltoa, mutta korkeampien harmonisten yliaaltojen vaikutukset ovat vielä liian voimakkaat. Lisäämällä suodattimeen korkeampia harmonisia taajuuksia, saadaan lähes kaikki haitallisen suuruiset harmoniset yliaallot poistettua virrasta. Jakeluverkossa kaapelin ominaisuudet myös vaikuttavat harmonisten yliaaltojen voimakkuuksiin muuntajalla parantaen jännitteen aaltomuotoa, mutta virran aaltomuoto ei silti muutu ilman suodatusta.

5. YHTEENVETO

Uusiutuvien energialähteiden käyttö nykypäivän sähköverkossa lisääntyy koko ajan ja tulevaisuuden näkymät ovat jo kokonaan jättäneet fossiiliset polttoaineet energiantuotannosta pois. Uusiutuvien energialähteiden liittäminen sähköverkkoon kuitenkin vaatii haastavampia sovelluksia, sillä tehonmuokkaus ei ole enää niin yksinkertaista. Tehoelektroniset laitteet, kuten invertterit, joiden avulla muun muassa aurinkovoimalat liitetään sähköverkkoon vuorovaikuttavat toistensa ja myös sähköverkon kanssa. Tämä vuorovaikuttaminen havaitaan sähköverkossa harmonisena resonanssina. Harmoninen resonanssi voi pahimmillaan vaurioittaa sähköverkkoon liitettyjä järjestelmiä.

Yliaaltovirrat, joita sähköverkossa synnyttävät epälineaariset kuormat, kuten esimerkiksi elektroniset sulatusuunit, kannettavat tietokoneet ja aurinkovoimalat, vääristävät virran aaltomuotoa. Yliaaltovirtojen kulkiessa verkon johtimen impedanssin läpi, ne aiheuttavat Ohmin lain mukaan yliaaltojännitteitä. Harmoniset yliaallot ovat kokonaislukukerrannaisia ominaistaajuudesta. Parittomat harmoniset yliaallot, ja etenkin kolmen kerrannaiset ovat sähköjärjestelmien kannalta haitallisimpia, sillä ne ovat samassa vaihekulmassa kolmivaihejärjestelmissä ominaiskomponentin kanssa. Parittomat harmoniset yliaallot ovat suuruudeltaan pienempiä, mutta myös niillä on haitallisia vaikutuksia sähköjärjestelmissä. Nämä harmoniset yliaallot resonoivat verkkoon kytkettyjen järjestelmien ominaistaajuuksien kanssa. Täten yliaallot voimistuvat ja vääristävät virtaa ja jännitettä.

Harmonista resonanssia on vaikea paikantaa verkossa, mutta sen ennustamiseksi ja ennaltaehkäisemiseksi on kehitelty erilaisia menetelmiä. LQR-menetelmän avulla harmonisen resonanssin vaikutuksia invertterissä voidaan vaimentaa voimakkaasti vaihtelevalla sähköverkon impedanssilla. Täten sähköverkon stabiiliutta ja laatua voidaan parantaa huomattavasti. PRFB-menetelmän avulla sähköverkossa syntyvän harmonisen resonanssin sijaintia voidaan ennustaa matemaattisesti todennäköisyyteen perustuen. PRFB-menetelmän avulla saadaan selville, millä mahdollisella resonanssikaistalla harmonista resonanssia syntyy, hyödyntämällä simulaatiossa todennäköisyyslaskentaa, modaalista impedanssia, ja laskemalla jokaisen verkon väylän osallistumisastetta harmoniseen resonanssiin. Täten harmonista resonanssia voidaan siirtää toisille taajuuskaistoille sen vaikutusten minimoimiseksi. HIAF-suodattimen ansiosta epälineaarisen kuorman tuottamia yliaaltovirtoja voidaan vaimentaa muuntajan ensiöpuolella. Täten harmonisten vuotovirtojen määrää saadaan matalammaksi ja jakeluverkon jännite pysyy puhtaampana.

Ilman minkäänlaista harmonisten yliaaltojen suodattamista epälineaarisen kuorman tuottama vääristynyt virta kulkeutuu sellaisenaan koko verkon läpi ja täten jännite on voimakkaasti vääristynyttä jokaisessa mittauskohdassa kuorman ja jakelumuuntajan välillä. Verkon kaapelien sisäinen impedanssi kuitenkin heikentää harmonisten yliaaltovirtojen vaikutusta jännitteeseen mitä pidemmälle verkossa mennään. Lisäämällä kuorman läheisyyteen harmoninen suodatin, saadaan harmonisia yliaaltovirtoja heikennettyä suodatimeen asetetuilla taajuuksilla. Mitä useampia taajuuksia suodatimeen asetetaan, sitä puhtaammaksi virran aaltomuoto saadaan ja täten jännitteen aaltomuoto saadaan lähes siniaalloksi. Ilman suodattamista jännitteen ja virran kokonaisvääristymät ominaiskomponenttiin verrattuna ovat lähellä 30 prosenttia, mutta lisäämällä verkkoon harmoninen suodatin 5., 7., 11., 13. ja 15. yliaalloille, saadaan jännitteen kokonaisvääristymä muuntajalla mitattuna jo alle yhteen prosenttiin, ja virran kokonaisvääristymä kytkentäpisteessä noin kahteen prosenttiin.

Vaikka harmonisen resonanssin vaikutuksia ja sijaintia on vaikea ennustaa, tutkimuksissa kehitettyjen sovellusten ja menetelmien avulla harmonisen resonanssin eliminoiminen on mahdollista toteuttaa hyvällä hyötysuhteella, ja tulevaisuuden menetelmien avulla harmonista resonanssia on paljon helpompi ennaltaehkäistä. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on tärkeää, että nykyinen fossiilisten energialähteiden käyttäminen saadaan korvattua kokonaan uusiutuvilla energialähteillä. Tämä kuitenkin vaatii kehitystyötä ja tutkimuksia laitteiden ja menetelmien parantamiseksi.

LÄHTEET

- [1] H. Alenius. "Broadband Methods in Stability Analysis of Multi-Parallel Grid-Connected Converters". Väitöstyö. Tampere University, 2021.
- [2] J. Honkanen. "Harmonic Performance Improvement of STATCOM". Diplomityö. Tampere University, 2018. URL: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25980> (viitattu 13. 10. 2022).
- [3] N. Mohan. *Power electronics : converters, applications, and design*. 3rd ed. Place of publication not identified: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] M. H. J. Bollen. *Integration of distributed generation in the power system*. IEEE Press series on power engineering. Hoboken, N.J: Wiley, 2011.
- [5] N. Eghtedarpour et al. "Harmonic resonance in power systems - a documented case". Teoksessa: *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2014, s. 857–861.
- [6] R. C. Dugan. *Electrical Power Systems Quality*. 3rd ed. Place of publication not identified: McGraw Hill Professional Publishing, 2012.
- [7] H. Hu et al. "Potential Harmonic Resonance Impacts of PV Inverter Filters on Distribution Systems". *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* 6 (2015), s. 151–161.
- [8] J. Meyer et al. "Harmonic resonances in residential low-voltage networks caused by consumer electronics". *CIGRE - Open Access Proceedings Journal* 2017.1 (2017). Publisher: IET Digital Library, s. 672–676.
- [9] B. Xie et al. "Harmonic resonance analysis and stability improvement for grid-connected inverters". *Journal of Power Electronics* 20.1 (2019). Place: Singapore Publisher: Springer Singapore, s. 221–235.
- [10] Z. Li et al. "Probabilistic Harmonic Resonance Assessment Considering Power System Uncertainties". *IEEE Transactions on Power Delivery* 33.6 (2018). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery, s. 2989–2998.
- [11] Y. Li et al. "Hybrid inductive and active filtering method for damping harmonic resonance in distribution network with non-linear loads". *IET Power Electronics* 8.9 (2015), s. 1616–1624.
- [12] J. Kokkonen. "Pienjänniteverkon maakaapeloinnin uudet työmenetelmät ja kosketussuojatut kaapelityypit". Diplomityö. Aalto University, 2018, s. 76. URL: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35492/master_Kokkonen_Joakim_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y (viitattu 06. 12. 2022).

- [13] *Nexans - Alumiinikaapelit*. URL: <https://www.nexans.fi/fi/products/Power-cables-1-145-kV/LV-power-cables-1-kV/Aluminium-cables/AXQJ--AMCM29779/product.html> (viitattu 06. 12. 2022).
- [14] *Three-Phase Harmonic Filters - MATLAB & Simulink*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/three-phase-harmonic-filters.html> (viitattu 06. 12. 2022).