

Myötäkytkennän hyödyt ja rajoitteet uusiutuvien energialähteiden liitälaitteissa

Tuomas Messo & Teuvo Suntio

Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos, PL 692, 33101 Tampere
Puh. +358 40 198 1513, tuomas.messo@tut.fi

Tomi Roinila & Matti Vilkkö

Tampereen teknillinen yliopisto, Systemiteknikan laitos, PL 692, 33101 Tampere
Puh. +358 50 074 8818, tomi.roinila@tut.fi

TIIVISTELMÄ

Uusiutuvat energialähteet, kuten aurinko- ja tuulivoima, on tyypillisesti kytketty sähköverkkoon vaihtosuuntaajien avulla. Vuorovaikutukset verkon ja vaihtosuuntaajien impedanssien välillä voivat aiheuttaa resonanssi-ilmiöitä, jotka johtavat alentuneeseen tehon laatuun, ja saattavat rikkoa tehoelektronisia komponentteja. Vaihtosuuntaajan impedanssia voidaan kasvattaa käyttämällä myötäkytkentää, joka vähentää harmonisten resonanssi-ilmiöiden esiintymistä. Tässä paperissa esitellään myötäkytkennän hyötyjä ja rajoitteita. Analyysissä käytetään hyväksi DQ-tasossa tehtävää, laajakaistaiseen herätesignaaliin perustuvaa, taajuusvasteiden mittaussuunnitelmaa. Tuloksia voidaan käyttää adaptiiviseen myötäkytkennän säätämiseen, sekä yleiseen taajuusvasteiden laskentaan DQ-tasossa.

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos, fossiilisten polttoaineiden ehtyminen ja vihreiden arvojen aikaansaama poliittinen paine ovat voimakkaasti kiihdyttäneet uusiutuvan energian kuten tuulivoiman ja aurinkovoiman kehitystä ja käyttöönottoa viimeisten vuosien aikana. Euroopan Unionin maat ovat asettaneet kunnianhimoiset tavoitteet uusiutuvien energialähteiden osuudelle kokonaisenergian tuotannossa: vuoteen 2020 mennessä uusiutuvan energian on muodostettava 20 % osuus Euroopan Unionissa tuotetusta kokonaisenergiasta /1/.

Merkittävimpiä haasteita uusiutuvien energialähteiden tehokkaammalle hyödyntämiselle ovat energialähteiden liitälaitteiden aiheuttamat resonanssi-ilmiöt. Ilmiöt aiheutuvat liitälaitteiden ja verkon impedanssin välisestä vuorovaikutuksesta /2/. Liitälaitteet, kuten esimerkiksi vaihtosuuntaaja, ovat tehoelektronisia komponentteja sisältäviä piirejä, joita käytetään energialähteiden tuottaman sähköenergian muokkaamiseen

sähköverkkoon sopivaksi. Resonanssi-ilmiöitä voidaan vähentää jos vaihtosuuntaajan impedanssi saadaan muokattua mahdollisimman suureksi verkon sen hetkiseen impedanssiin nähden. Jatkuva-aikaiset mittaukset ja erilaiset (oppivat) säätöratkaisut ovat edellytyksiä sähköverkon ja liitäntälaitteiden optimoituun toimintaan.

Tässä työssä on toteutettu mittausjärjestelmä, jolla vaihtosuuntaajan impedanssi voidaan luotettavasti mitata. Mittauksessa käytetään hyväksi binääriseen satunnaissekvenssiin perustuvaa herätesignaalia (maximum-length binary sequence (MLBS)), jonka avulla mittaus voidaan suorittaa nopeasti ja jatkuva-aikaisesti /3/. Työssä näytetään kuinka myötäkytkentä verkkojännitteestä kasvattaa vaihtosuuntaajan impedanssia huomattavasti. Tämä on myös yhtenevä analyttisen piensignaalin mallin antamien tulosten kanssa. Mallin ja mittausten avulla voidaan päätellä, että verkkojännitteen mittauksessa käytettävällä alipäästösuotimen rajataajuudella sekä jo pienelläkin viiveellä on merkittävä vaikutus myötäkytkennän suorituskykyyn.

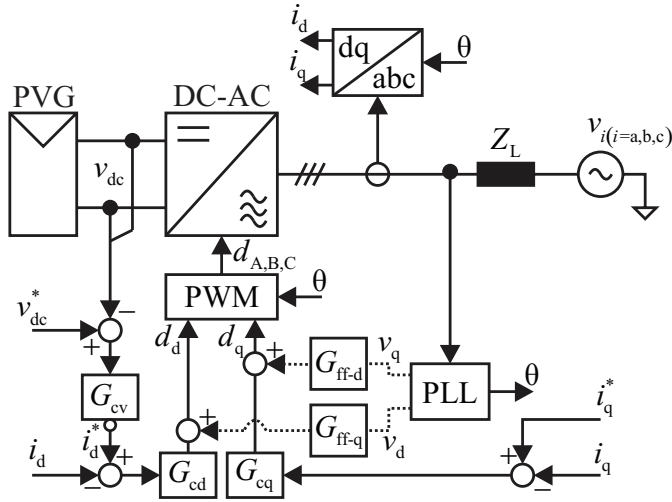
2 TEORIA JA MENETELMÄT

2.1 Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan impedanssi DQ-tasossa

Kolmivaiheisten liitäntälaitteiden impedanssia kuvataan yleensä DQ-tasossa, jossa sinimäiset kolmivaiheiset virrat ja jännitteet kuvautuvat tasasuureina. Kolmivaiheiset signaalit voidaan muuttaa pyörivään avaruusvektorkoordinaatistoon Parkin muunnoksen avulla. Vaihtosuuntaajan impedanssille voidaan määrittää DQ-tasossa neljä komponenttia, d ja q-komponentit Z_d , Z_q , sekä näiden väliset ristikkäistermit Z_{qd} ja Z_{dq} . Ristikkäisvaikutukset ovat yleensä heikkoja, jolloin stabiilius määräytyy d- ja q-komponenttien perusteella. Harmoniset resonanssi-ilmiöt voidaan välttää jos impedanssin d- ja q-komponentit saadaan muokattua riittävän suuriksi verkon impedanssiin nähden /4/.

2.2 Myötäkytkennän vaikutus vaihtosuuntaajan impedanssiin

Kuvassa 1 on esitetty verkkoon kytketty aurinkopaneeli (PVG), ja siinä käytetyn vaihtosuuntaajan säätöjärjestelmä. Myötäkytkentäreitit on kuvattu katkoviivalla. Säätöjärjestelmä on toteutettu DQ-tasossa, mikä mahdollistaa tavallisten PI-säätimien käytön. Verkkojännitteiden d ja q-komponentit mitataan vaihelukkopiirin (PLL) avulla, vavistetaan myötäkytkentäkertoimilla G_{ff-d} ja G_{ff-q} ja lisätään vaihtosuuntaajan kytkinten pulssisuhteisiin d_d ja d_q . Järjestelmästä on tehty piensignaalin malli, jonka avulla optimaalinen myötäkytkentäkerroin voidaan määrittää ja impedanssien muodot ennustaa /5/. Myötäkytkennän suurin hyöty impedanssin suhteen saadaan kun myötäkytkentäkerroin valitaan tasajännitteen käänteisluvun suuruiseksi ($G_{ff-d} = G_{ff-q} = 1/V_{dc}$). Mitattuja jännitteitä suodatetaan alipäästösuodattimella, jotta mittaushäiriöt eivät vaikuttaisi vaihtosuuntaajan toimintaan. Alipäästösuodattimen on huomattu piensignaalin mallin perusteella heikentävän myötäkytkennän tehokkuutta. Myös viiveen on huomattu heikentävän myötäkytkennän toimintaa.



Kuva 1: Vaihtosuuntaajan säätöjärjestelmä.

2.3 MLBS-herätesignaali

Pseudo-satunnainen binäärisekvenssi (pseudo-random binary sequence (PRBS)) on jaksollinen laajakaista-signaali, jonka pituus on N . Suosituimmat PRBS signaalit ovat maksimipituuteen perustuvia signaaleja (maximum-length binary sequence (MLBS)). Tällaisten signaalien pituus on $N = 2^n - 1$, missä n on kokonaisluku. Maksimipituisten signaalien suosio johtuu niiden erittäin helposta toteutettavuudesta $/3/$. MLBS-signaalilla on pienin mahdollinen huippukerroin (peak factor) $|x|_{\text{peak}}/x_{\text{rms}} = 1$, joten se soveltuu erinomaisesti käytettäväksi järjestelmiin, jotka ovat herkkiä ja vaativat matala-amplitudista herätesignaalia. MLBS-signaali on deterministinen, joten se voidaan toistaa ja injektoida täsmälleen samanlaisena. Näin saadaan keskiarvotuksen kautta kasvatettua signaali-kohina-suhdetta ja siten mitatun vasteen laatua. Tarkempaa tietoa MLBS-signaalin generoimisesta ja signaalin ominaisuuksista löytyy lähteestä $/3/$.

2.4 Logaritminen keskiarvotus

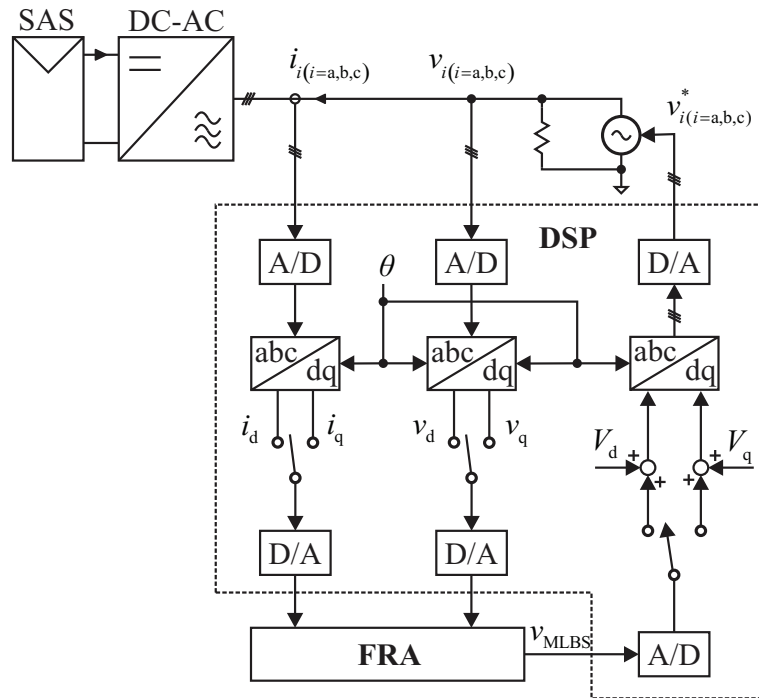
Yksinkertaisin menetelmä taajuusvasteen laskemiseksi mitatusta datasta on käyttää suoraa Fourier-muunnosta mitatulle jännitteelle ja virralle, mutta menetelmä ei itsessään pienennä ulkoisten häiriöiden vaikutusta. Tässä paperissa käytetään logaritmista keskiarvotusta $/3/$, jossa impedanssille $G(j\omega)$ saadaan

$$G(j\omega) = \left(\prod_{k=1}^P \frac{V_k(j\omega)}{I_k(j\omega)} \right)^{1/P} \quad (1)$$

missä P on injektoitujen herätejaksojen lukumäärä, ja V sekä I ovat mitattu jännite ja virta. Menetelmässä mitatut sisäänmeno- ja ulostulodatat on Fourier-muunnettu ja segmentoitu herätteen pituuden mukaan, minkä jälkeen esitystä (1) on sovellettu. Menetelmä pienentää laskennallisesti ulkoisten häiriöiden vaikutusta sekä sisäänmeno- että ulostulopuolelta.

3 SUORITETUT KOKEET

Mittaukset tehtiin käyttämällä prototyypilaitteistoa, jonka teho oli skaalattu kaupallista vaihtosuuntaajaa pienemmäksi. Prototyypin parametrit ja komponenttiarvot on esitetty taulukossa 1. Piensignaalin malli on voimassa vaihtosuuntaajalle teholuokasta riippumatta, joten tulokset voidaan yleistää myös suuremmilla teho- ja jännitetasoilla toimiville vaihtosuuntaajille. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 2. Se koostuu tarkasteltavasta vaihtosuuntaajasta, MLBS-herätettä käyttävästä taajuusvasteanalyysointilaitteesta (FRA), sekä digitaalisesta signaaliprosessorista (DSP).



Kuva 2: Mittausjärjestely vaihtosuuntaajan ulostuloimpedanssin laskemiseksi.

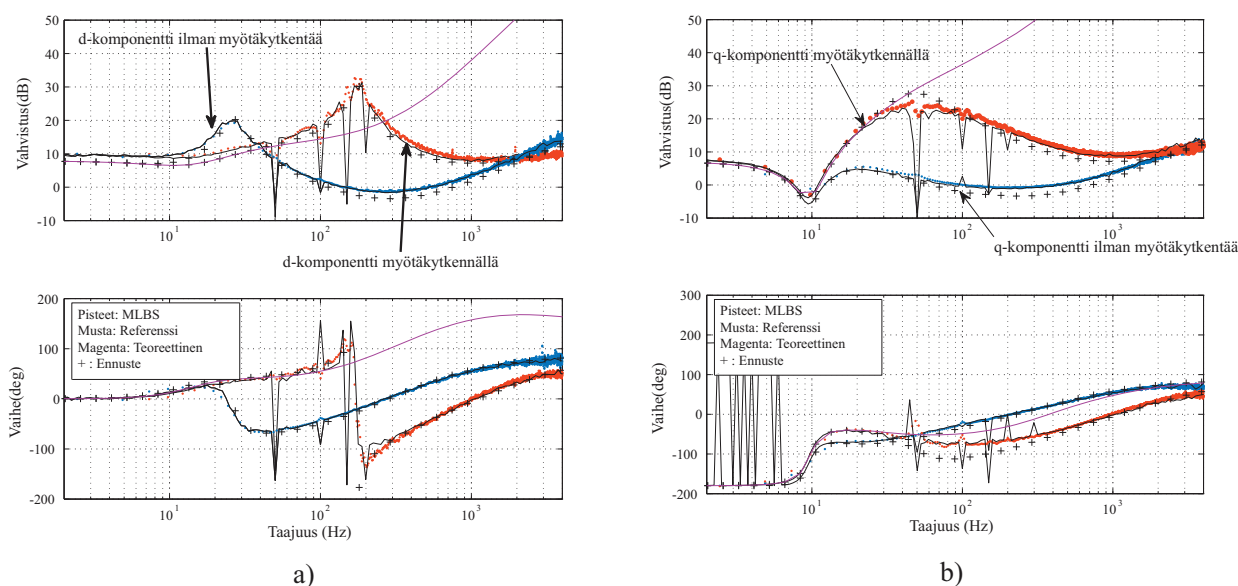
MLBS-herätesignaali suunniteltiin käyttämällä lähteessä [3] esitettyjä suunnitteluvaiheita. Mittauksissa käytettiin 8191 pituisia MLBS-herätettä 20 kHz generointitaajuudella. Tämä tuotti noin 2.4 Hz resoluution ja hyvän energiasisällön 4 kHz kaistalle. MLBS-signaalia käytettiin 10 jakson pituisena. Heräte injektioitiin erikseen sähköverkon referenssjännitteen d- ja q-komponenttiin. Herätteen amplitudi verkon jännitteessä oli noin 1 V, joka vastaa noin 10 % jännitteessä. Impedanssin laskemiseksi vaadittiin kaksi mittaussykliä; yksi d- ja yksi q-komponentille. DSP näytteisti verkon jännitteet ja virrat (80 kHz), signaalit DQ-muunnettiin, minkä jälkeen ne tallennettiin analyysointilaitteeseen ja sovellettiin kaavaa (1). Yksi mittaussykli vei aikaa noin 4 sekuntia. Mittausmenetelmän validoimiseksi impedanssit mitattiin myös sinisignaaleihin perustuvalla taajuusvasteanalyysointilaitteella. Tämä menetelmä antaa luotettavan tuloksen, mutta yksi mittaussykli vie aikaa noin 30 minuuttia.

Kuvassa 3 on esitetty ulostuloimpedanssin d- ja q-komponentit myötäkylkellä ja ilman myötäkylkettä.

Taulukko 1: Prototyypin parametrit ja komponenttiarvot.

V_{dc}	30 V	$V_{a,b,c\text{-peak}}$	10 V
I_{dc}	2.5 A	ω_s	$2\pi \cdot 50$ Hz
P_{dc}	75 W	$L_{(a,b,c)}$	180 μ H
C	1.15 mF	f_s	75 kHz

Värillisillä pisteillä on kuvattu MLBS-herätteellä mitatut impedanssit ja mustalla viivalla on kuvattu sinisignaaleihin perustuvalla taajuusvasteanalyysointilla mitatut impedanssit. Kuvissa on myös esitetty piensignaali-mallilla lasketut taajuusvasteet, jotka on kuvattu plus-merkein. Ennusteissa on huomioitu säätöjärjestelmän mikrokontrolleritoteutuksesta aiheutuva 1,5 kytöntäjakson suuruinen viive sekä digitaalinen alipäästösuodin, jonka rajataajuus oli asetettu 2 kilohertsiin. Lisäksi magentalla on esitetty teoreettinen impedanssi, joka saataisiin jos viiveet sekä alipäästösuodin voitaisiin poistaa. Tämä on mahdollista muun muassa analogisella toteutuksella. Aihetta tullaan käsittelemään tarkemmin tulevaisuudessa.



Kuva 3: Vaihtosuuntaajan ulostuloimpedanssin a) d-komponentti ja b) q-komponentti myötäkytkennällä ja ilman myötäkytkentää.

Kuten kuvasta 3a nähdään, myötäkytkentä poistaa impedanssista matalataajuisten resonanssien. Toisin sanoen myötäkytkentä pyrkii muokkaamaan impedanssin muistuttamaan passiivisen piirin impedanssia. Tämä on tärkeä havainto, sillä tämänkaltaisen piiri ei aiheuta stabiiliusongelmia tai resonanssi-ilmiöitä kun verkon impedanssi on myös passiivinen [6]. Alipäästösuodattimen vaikutus impedanssiin alkaa näkymään jo dekadia ennen suotimen rajataajuutta, n. 200 hertsin kohdalla. Impedanssin vahvistus on selvästi pienempi teoreettiseen maksimiarvoon nähden tätä suuremmilla taajuuksilla. Viiveen vaikutus ei näy yhtä selvästi mitatuissa impedansseissa, mutta käytännössä viive vaikuttaa samalla tavalla ja laskee impedanssin vahvistusta. Viiveetöntä järjestelmää ei ollut mahdollista mikrokontrolleritoteutuksen takia tutkia.

Myötäkytkennän vaikutus impedanssin q-komponenttiin on hyvin samankaltainen, kuten kuvasta 3b nähdään. Impedanssin vahvistus kasvaa merkittävästi kun verrataan sitä tilanteeseen, jossa myötäkytkentää ei käytetä. Myös q-komponentin tapauksessa alipäästösuotimen ja viiveen myötäkytkentää heikentävä vaikutus alkaa näkyä jo hyvin matalilla taajuuksilla. Impedanssin q-komponentti käyttäytyy matalilla taajuuksilla kuin negatiivinen vastus. Negatiivinen resistanssi aiheuttaa helposti stabiiliusongelmia heikossa verkossa, jos verkkosynkronointi on viritetty liian nopeaksi. Kuten kuvasta 3b huomataan, myötäkytkennällä ei voida vaikuttaa negatiivisen resistanssin esiintymiseen.

4 YHTEENVETO

Tässä työssä toteutettiin MLBS-herätesignaaliin perustuva mittausjärjestelmä, jolla voidaan mitata uusiutuvan energian verkkoliitännässä käytetyn vaihtosuuntaajan impedanssi DQ-tasossa. Mittauksella todennettiin verkkojännitemyötäkytkennän vaikutus vaihtosuuntaajan impedanssiin. Myötäkytkennällä on huomattava vaikutus impedanssin suuruuteen, ja sen avulla on mahdollisuus parantaa verkkoyhdistetyn järjestelmän stabiiliusominaisuuksia. Jännitemittauksen alipäästösuotimen sekä säätöjärjestelmän aiheuttaman viiveen huomattiin heikentävän myötäkytkennästä saatavaa hyötyä. Tuloksia voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi myötäkytkennän adaptiiviseen säätöön, tai yleisenä DQ-tason nopeana mittausmenetelmänä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Europe's energy portal. available at <http://www.energy.eu/>.
- [2] X. Wang, F. Blaabjerg, M. Liserre, Z. Chen, J. He, and Y. Li. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(7):3318–3329, 2014.
- [3] T. Roinila, M. Vilkkö, and J. Sun. Broadband methods for online grid impedance measurement. In *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 3003–3010, 2013.
- [4] J. Sun. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 26:3075–3078, 2011.
- [5] T. Messo, J. Jokipii, and T. Suntio. Effect of conventional grid-voltage feedforward on the output impedance of a three-phase photovoltaic inverter. In *Proc. The International Power Electronics Conference*, pages 514–521, 2014.
- [6] L. Harnefors, A. G. Yepes, A. Vidal, Ana J. Dova-Gandoyidal, and Jesús Doval-Gandoy. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 2015.