

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Jouko Esko

**NÄKÖKOHTIA VESIVOIMAGENERAATTORIN
TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖÖN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 19.02.2009

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Eero Koski

Työn tarkastaja

Bertil Brännbacka

ALKULAUSE

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat mahdollistaneet tämän diplomityön tekemisen. Työ on tehty ABB Oy voimantuotannon järjestelmät- yksikössä Vaasassa.

Erityinen kiitos ohjaajana toimineelle DI Eero Koskelle hyvästä ohjauksesta sekä erittäin mielenkiintoisesta aiheesta. Professori Timo Vekaraa sekä DI Bertil Brännbackaa haluan kiittää työni valvomisesta ja tarkastamisesta sekä asiantuntevista neuvoista ja vinkeistä.

Lisäksi haluan esittää lämpimät kiitokset läheisilleni sekä ystäväilleni, jotka ovat olleet korvaamaton tuki koko opiskelujeni ajan.

Vaasassa 12.2.2010

Jouko Esko

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1. JOHDANTO	9
2. VESIVOIMA	11
2.1. Vesivoimalaitoksien jaottelu	13
2.2. Vesivoimaturbiinit	14
2.2.1. Kaplan-turbiini	14
2.2.2. Francis-turbiini	16
2.2.3. Pelton-turbiini	17
2.2.4. Vesivoimaturbiinin valinta	18
3. MUUTTUVANOPEUSISET VESIVOIMAGENERAATTORIT	23
3.1. Epätahti- ja kestopagneettigeneraattorien erot	23
3.2. Epätahtigeneraattori	24
3.3. Kestomagneettigeneraattori	25
3.4. Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori	26
3.5. Generaattorin valinta	28
4. TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖ VESIVOIMALAITOKSELLA	30
4.1. Taajuusmuuttajakäytön etuja	31
4.1.1. Yksinkertainen rakenne	31
4.1.2. Loistehonsäätö	32
4.1.3. Turbiinin optimaalinen käyttöalue	33
4.1.4. Turbiinin rasituksen väheneminen	34
4.1.5. Esimerkkejä taajuusmuuttajalla saavutetuista hyödyistä	34
4.2. Taajuusmuuttajakäytön ongelmia ja haittoja	36
4.2.1. Verkkoon tuotetut yliaallot	36
4.2.2. Laakerivirrat	37

4.2.3.	Oikosulkuvirrat	46
4.2.4.	Vaikutukset verkon mittaus- ja ohjauspulsseihin	47
4.3.	Taajuusmuuttajassa käytettävät suodattimet	47
4.3.1.	EMC-suodatin	48
4.3.2.	LCL-verkkosuodatin	50
4.3.3.	du/dt-suodatin	51
4.3.4.	Sinisuodatin	52
4.3.5.	Yhteismuotoisen virran -suodatin	52
4.4.	Taajuusmuuttajan kaapelointi	53
4.4.1.	Taajuusmuuttajan verkkokaapelointi	54
4.4.2.	Generaattorin kaapelointi	57
4.4.3.	Kaapelin poikkipinnan määrittäminen	66
5.	LABORATORIOMITTAUKSET	69
5.1.	Laboratoriossa käytetty laitteisto	69
5.2.	Taajuusmuuttajan käyttöönotto	71
5.3.	Mittaukset	73
5.3.1.	Yliaaltomittaukset	75
5.3.2.	Generaattoripuolen jännitteen ja virran oskilloskooppimittaukset	77
5.3.3.	Päto- ja loistehon mittaaminen tehoanalysaattorilla	81
5.4.	Laboratoriomittausten yhteenveto	82
6.	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	85
6.1.	Taajuusmuuttajakäytön hyödyt on vesivoimalaitokselle	85
6.2.	Jatkotutkimusmahdollisuuksia	87
7.	YHTEENVETO	88
8.	LÄHDELUETTELO	90

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ρ	Veden tiheys
A	Vaihejohtimen poikkipinta-ala
A_p	Suojajohtimen poikkipinta-ala
C_0	Kaapelin keskinäiskapasitanssi
C_1	Laakeripesän ja -kuulan välinen hajakapasitanssi
C_{krt}	Ei-kiertävissä laakerivirroissa esiintyvä hajakapasitanssi
D	Juoksupyörän halkaisija
f	Taajuus
g	Maan putoamiskiihtyvyyys
h	Putouskorkeus
I_{ni}	Yliaallon, jonka järjestysnumero on n , teoreettinen tehollisarvo
L_0	Kaapelin keskinäisinduktanssi
L_{cable}	Kaapelin kriittinen pituus
n	Pyörimisnopeus
n_{11}	Turbiinin ominaispyörimisnopeus
n_{max}	Turbiinin suurin mahdollinen pyörimisnopeus
n_s	Generaattorin tahtinopeus
n_y	Yliaaltovirran järjestysnumero
P	Pätöteho
p	Napapariluku
P_t	Turbiinin teho
Q	Virtaama
Q_{11}	Turbiinin ominaisvirtaama
R_1	Laakeripesän resistanssi
T	Vääntömomentti
t	Aika
t_r	Pulssin nousunopeus
v	Aallon etenemisnopeus
V_{bus}	Taajuusmuuttajan välipiirin jännite
V_r	Heijastunut jännitepulssi
Z_0	Kaapelin aaltoimpedanssi
Z_1	Laakeripesän epälineaarinen impedanssi

Z_L	Generaattorin aaltoimpedanssi
Γ	Heijastuskerroin
η	Hyötysuhde
ω	Kulmanopeus
4Q	Nelikvadrantti
ABB	Asea Brown Boveri Ltd
ACS 6000	ABB Oy:n eräs taajuusmuuttajatyyppe
ACS 800	ABB Oy:n eräs taajuusmuuttajatyyppe
B.e.p	Piste, jossa hyötysuhde on suurin (Best efficiency point)
CMF	Yhteismuotoisenhäiriön suodatin, common mode filter
DFIG	Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (double-fed induction generator)
DTC	Suora momenttiohjaus (direct torque control)
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus, (electromagnetic compatibility)
EMI	Sähkömagneettinen häiriö (electromagnetic interference)
ESHA	Euroopan pienvesivoimayhdistys (European Small Hydro-power Association)
IEC	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IGBT	IGB-transistori (insulated gate bipolar transistor)
INU	Vaihtosuuntaaja (inverter unit)
NP	Nollapiste (neutral point)
PDS	Taajuusmuuttajakäyttö (power drive system)
PE	Suojamaadoitus (protective earth)
PG	Päävirtapiirin maadoitus (power ground)
PM	Kestomagneetti (permanent magnet)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (pulse width modulation)
RFI	Radiotaajuinen häiriö (radio-frequency interference)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TRMS	Todellinen tehollisarvo (true root mean square)

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jouko Esko	
Diplomityön nimi:	Näkökohtia vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttöön	
Valvojan nimi:	Professori Timo Vekara	
Ohjaajan nimi:	Diplomi-insinööri Eero Koski	
Tarkastajan nimi:	Diplomi-insinööri Bertil Brännbacka	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Oppiaine:	Sähkötekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2005	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2010	Sivumäärä: 95

TIIVISTELMÄ

Taajuusmuuttajan käyttö generaattorisovelluksissa on yleistynyt merkittävästi. Yleensä taajuusmuuttajan käytöllä pyritään saavuttamaan muuttuvanopeuksinen generaattorikäyttö, mutta vesivoimasovelluksissa taajuusmuuttajalla on mahdollista saavuttaa muitakin etuja. Näistä merkittävimpiä ovat vaihdelaatikon korvaaminen sekä generaattorin joustava rakenne.

Tässä diplomityössä on tutkittu asioita, joita tulee ottaa huomioon vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäytössä. Työssä on ensin tarkasteltu kirjallisuustutkimuksen avulla taajuusmuuttajakäytön etuja ja haittoja sekä pohdittu muuttuvanopeuksisten vesivoimageneraattoreiden rakenteita ja soveltuvuutta erityyppisiin vesivoimaturbiineihin. Tutkimusta on täydennetty laboratorioskokeilla, joissa tutkittiin taajuusmuuttajan aiheuttamia yliaaltoja ja laakerivirtoja. Pahimmillaan laakerivirrat aiheuttavat generaattorin tai turbiinin ennenaikaisen kulumisen. Laakerivirrat ovat kuitenkin oikeilla menetelmillä poistettavissa lähes kokonaan.

Työn tuloksena saatiin muodostettua käsitys seikoista, jotka tulee ottaa huomioon vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäytössä. Tutkimuksessa on esitetty myös käytännön menetelmiä taajuusmuuttajan aiheuttamien häiriöiden ja ongelmien minimoimiseksi, joista tärkeimpiä ovat generaattorin kaapelointi, taajuusmuuttajan suodattimet ja generaattorin maadoitukset.

AVAINSANAT: Vesivoima, muuttuvanopeuksinen generaattori, laakerivirta.

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Jouko Esko
Topic of the Thesis: Perspectives on Hydro Generator used by Full-scale Converter
Supervisor: Professor Timo Vekara
Instructor: M.Sc Eero Koski
Evaluator: M.Sc Bertil Brännbacka
Degree: Master of Science in Technology
Major of Subject: Electrical Engineering
Year of Entering the University: 2005
Year of Completing the Thesis: 2010

Pages: 95

ABSTRACT

Variable speed generator with full-scale converter has successfully become to stay. Variable speed operation is typically the main reason to use a full-scale converter, but in hydro power plants it is possible to achieve some other benefits. Gearless construction and better opportunities for generator specifications are the major advantages of the frequency converter application in hydro power plant.

This thesis, studies the things that should be taken into account in the use of full-scale variable speed generator drive in hydro power applications. This thesis includes theoretical study of full-scale converter application's advantages and disadvantages. Also, research of hydro generator's structures and suitability for different types of hydro turbines. The theoretical analysis is supported by laboratory tests, including harmonics and bearing currents caused by frequency converter. At worst, the bearing currents may increase wear and can cause premature failures in generator and turbine. However, bearing currents can be removed almost completely, with the proper methods.

This thesis helps in understanding of the factors, which must be taken into account, when planning or building hydro plants with full-scale variable speed generator drive. This study presents some practical methods to minimize problems caused by frequency converter. The most important methods are generator cabling, filters in frequency converter and generator grounding.

KEYWORDS: Hydro power, variable-speed generator, bearing current.

1. JOHDANTO

Diplomityössä tutkitaan vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttöä. Työssä tutkitaan täystehosuunnattuja generaattoriratkaisuja, joissa vesivoimageneraattori kytketään verkkoon taajuusmuuttajan kautta. Työn tarkoituksena on selvittää asioita, joita tulee ottaa huomioon muuttuvanopeuksisen vesivoimalaitoksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Tutkielma on tehty ABB Oy:n voimantuotannon järjestelmät -yksikköön, jossa suunnitellaan ja toteutetaan vesivoimalaitosprojekteja.

Täystehosuunnatussa voimalaitoksessa turbiinin pyörimisnopeus ei ole sidoksissa verkon taajuuteen tai generaattorin rakenteeseen, vaan turbiinin pyörimisnopeus saa vaihdella vapaasti. Vesivoimalaitoksilla taajuusmuuttajakäytön edut ei rajoitu pelkästään turbiinin pyörimisnopeuteen, koska sen käytöllä saavutetaan muitakin merkittäviä etuja. Usein merkittävämpänä etuna pidetään sitä, että täystehosuunnattu vesivoimalaitos voidaan toteuttaa ilman vaihdelaatikkaa. Vesivoimalaitoksille tyypillisen suuren vääntömomentin johdosta vaihdelaatikko saattaa olla kallis ja vikaherkkä. Vaihdelaatikot saattavat vaurioitua ja niiden korjaaminen on kallista eikä korjaamisen aikana voimalaitosta voida käyttää. Isoilla vesivoimalaitoksilla ylimääräisten käyttökeskeytyksien kustannukset saattavat nousta merkittäväksi, joten laitoksen huollettavuudella on iso merkitys komponentteja valittaessa. Taajuusmuuttajan huoltaminen on helppoa ja nopeaa, koska niissä käytettävät komponentit ovat nopeasti vaihdettavissa ja vastaavia komponentteja käytetään useissa sovelluksissa, joten varaosia on saatavilla.

Osa vesivoimalaitoksista on järkevästi ja kustannustehokkaasti toteutettavissa ainoastaan käyttämällä taajuusmuuttajaa. Pienissä laitoksissa taajuusmuuttajalla saavutetaan kustannustehokas laitteisto, jolloin laitoksen rakentaminen on taloudellisesti kannattavaa. Isoissa vesivoimalaitoksissa, joissa turbiinin pyörimisnopeus on pieni, saattaa turbiinin vääntömomentti kasvaa niin suureksi, että vaihdelaatikon toteuttaminen on hyvin kallista. Generaattori voidaan liittää verkkoon taajuusmuuttajan kautta, jonka vuoksi vaihdelaatikkaa ei tarvita. Taajuusmuuttajia voidaan tällä hetkellä asentaa sadan

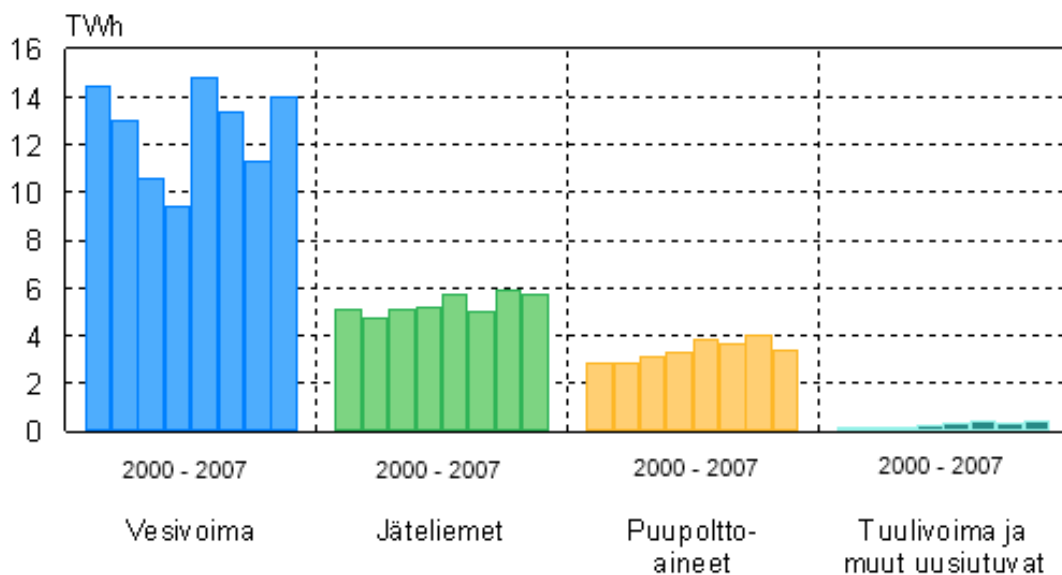
kilowatin generaattorista aina 27 megawatin generaattoriin, joten taajuusmuuttajatekniikalle on olemassa laajat markkinat.

Työssä tutkitaan asioita, joita vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäytöstä tulee tietää suunnittelu- ja toteutusvaiheessa. Ensimmäisenä, luvussa 2 luodaan yleinen katsaus vesivoimaan sekä selvitetään vesivoimaturbiinien ominaisuuksia ja erityispiirteitä. Seuraavassa luvussa 3 tarkastellaan taajuusmuuttajakäyttöön soveltuvien generaattoreiden ominaisuuksia ja valintaa. Luvussa 4 tutkitaan taajuusmuuttajan käyttöä vesivoimalaitoksella tarkastelemalla taajuusmuuttajakäytön etuja, haittoja ja kaapelointia sekä menetelmiä luotettavan käytön varmistamiseksi. Viidennessä luvussa tehdään yhteenveto laboratoriomittauksista, joissa tutkittiin taajuusmuuttajan aiheuttamia ilmiöitä sekä vaikutusta sähkön laatuun generaattori- ja verkkopuolella. Kuudennessa luvussa pohditaan vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttöä kirjoitetun teorian ja laboratoriomittausten perusteella sekä tehdään johtopäätökset tutkimuksen tuloksista. Luku 7 on diplomityön yhteenveto.

2. VESIVOIMA

Vesivoima on uusiutuva energialähde, jossa veteen varastoitunut energia muutetaan sähköenergiaksi. Vesivoiman uusiutuvuus perustuu veden luonnolliseen kiertokulkuun, jossa auringon lämmittämä vesi höyrystyy ja nousee ylös ilmakehään. Ilmakehässä vesihöyryn lämpötila laskee, jolloin höyry tiivistyy takaisin vedeksi ja sataa maahan joko vetenä tai lumena. Maahan satanut vesi virtaa luonnollisia reittejä takaisin mereen, jolloin siihen varastoitunut potentiaali- ja liike-energia hyödynnetään tuottamalla sähköä. (Fossdal ym. 2007: 58–60.)

Kuvassa 1 on Tilastokeskuksen vuonna 2008 julkaiseman tutkimuksen tulokset uusiutuvien energialähteiden osuudesta sähköntuotannosta.

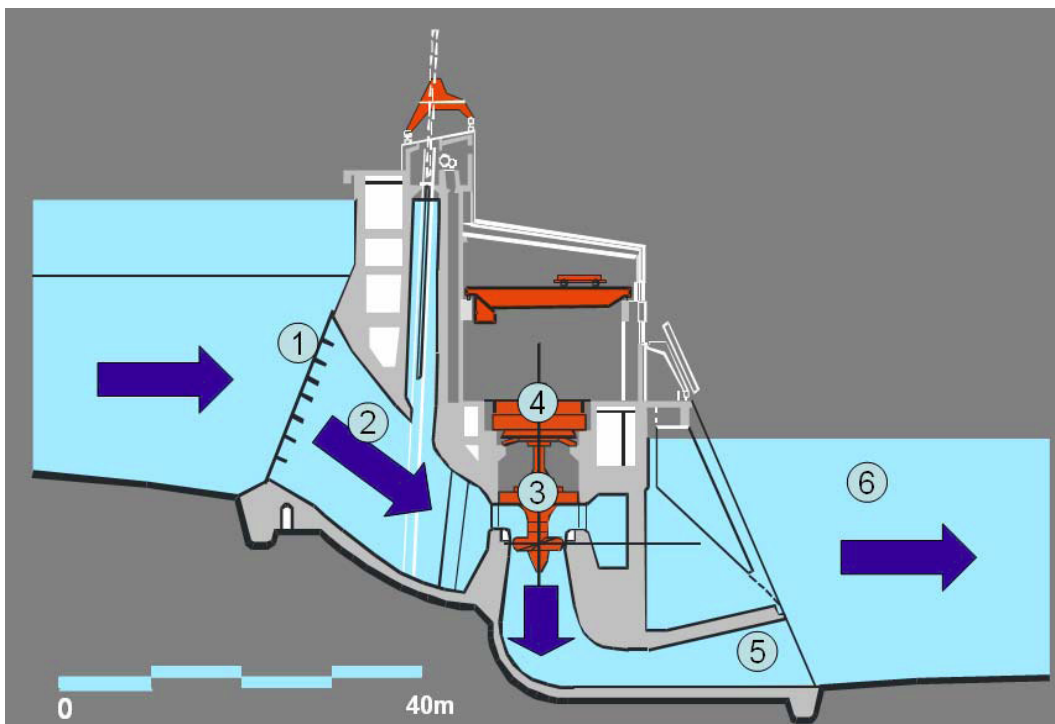


Kuva 1. Sähkön tuotanto Suomessa uusiutuvilla energialähteillä 2000 – 2007 (Tilastokeskus 2008).

Kuvaajasta nähdään, että vesivoima on Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde. Vesivoiman tärkein ominaisuus on sen säätöominaisuus, jolla voidaan vastata myös nopeisiin kuormanmuutoksiin. Valtaosa Suomen vesivoimalaitoksista on toteutettu Kaplan-turbiinilla, jonka säätökyky on erinomainen eikä säädöstä aiheudu turbiinille juurikaan kulumista tai hyötysuhteen laskua.

Riittävän nopeaa ja tehokasta säätöä ei monilla sähköntuotantomuodoilla voida teknisesti tai taloudellisesti toteuttaa ja etenkin tuntitason- tai sitä nopeammassa säädössä vesivoima on Suomessa sekä muissa Pohjoismaissa käytännössä ainoa vaihtoehto. Suomen voimalaitoksilla ylläpidettävistä taajuusohjatusta käyttöreservistä vesivoiman osuus on noin 85 % ja taajuusohjatusta häiriöreservistä vesivoiman osuus on noin 90 %. (Vesirakentaja 2008: 7–9.)

Vesivoimalaitosten rakenne on turbiinityypistä riippumatta periaatteeltaan samanlainen, joka koostuu ylävedestä, padosta, voimalasta ja alavedestä. Perinteisen vesivoimalaitoksen periaatekuva on esitetty kuvassa 2.



- 1: Välppä. Välppän tehtävä on estää ylimääräisten esineiden joutuminen turbiiniin.
- 2: Tuloputki. Vesi johdetaan turbiiniin tuloputken kautta.
- 3: Turbiini. Turbiinin avulla vedessä oleva energia muutetaan liike-energiaksi.
- 4: Generaattori. Generaattori muuttaa liike-energian sähköenergiaksi.
- 5: Imuputki. Vesi poistuu turbiinista imuputken kautta.
- 6: Alakanava / Alavesi. Voimalaitoksen läpi virrannut vesi laskeutuu alaveteen.

Kuva 2. Vesivoimalaitoksen periaatekuva (Energieoteollisuus 2005: 16).

Vesivoimalaitoksesta saatava teho P [W] voidaan laskea

$$P = \eta \rho g Q h, \quad (1)$$

missä h [m] on putouskorkeus, Q [m³/s] virtaama, ρ veden tiheys (998 kg/m³), η voimalaitoksen hyötysuhde ja g on maan putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s²). Yhtälöstä nähdään, että vesivoimalaitoksesta saatava teho on suoraan verrannollinen putouskorkeuteen ja virtaamaan. (Flaspöhler 2007: 81; Järvelä 2008: 128.)

2.1. Vesivoimalaitoksien jaottelu

Vesivoimalaitokset voidaan jaotella monilla eri tapaa. Yleisimmin käytettyjä jaotteluperiaatteita ovat säännöstely, käyttötapa, rakenne, teho ja putouskorkeus.

Säännöstelyn ja käyttötavan mukaan vesivoimalaitokset voidaan jakaa jokivoimalaitoksiin, säännöstelyvoimalaitoksiin, pumppuvoimalaitoksiin ja vuorovesilaitoksiin. Säännöstelyvoimalaitoksien yhteyteen on usein rakennettu tekoallas, jonka ansiosta tuotantoa voidaan säännöstellä jopa vuositasolla. Jokivoimalaitoksiin rakennetun padon avulla voidaan hoitaa ainoastaan lyhytaikasaatö. Pumppuvoimalaitoksissa on rakennettu säännöstelyaltaat sekä ala- että yläpuolelle laitosta, jolloin energiaa voidaan varastoida pumppaamalla halvalla yöenergialla vettä ala-altaasta yläaltaaseen. Vuorovesilaitoksissa vesi liikkuu turbiinin läpi edestakaisin vuorovesivaihtelun mukaan.

Rakenteen mukaan vesivoimalaitokset voidaan jakaa patolaitoksiin, paineputkilaitoksiin ja tunnelilaitoksiin. Tunnelilaitoksissa vesi johdetaan tunnelia pitkin voimalaitokselle, joka sijaitsee tunnelin varrella maan alla. Paineputkilaitoksessa vesi tulee voimalaitokselle erillistä paineputkea pitkin, jolloin voimalaitos sijaitsee padon takana. Patolaitokseksi sanotaan suomessakin tyypillistä ratkaisua, jossa laitos on rakennettu osaksi patoa.

Putouskorkeuden mukainen jako perustuu eri turbiinityyppien käyttöalueisiin. Jako ei kuitenkaan ole tarkasti määritelty, koska turbiinien käyttöalueet ovat osin yhtenevät. Suomessa käytössä olevien Kaplan-turbiinien putouskorkeus on noin 10–50 m ja Francis-turbiinien 40–400 m.

Tehon mukaan jaettaessa puhutaan pien- ja suurvesivoimalaitoksista. Raja näiden voimalaitosten välillä on 10 MW. Nykyään on alettu puhua myös minivesivoimalaitoksista, joiden teho on alle 1 MW. (Järvelä 2008: 128–130; Istolahti 2009: 10, 12–13.)

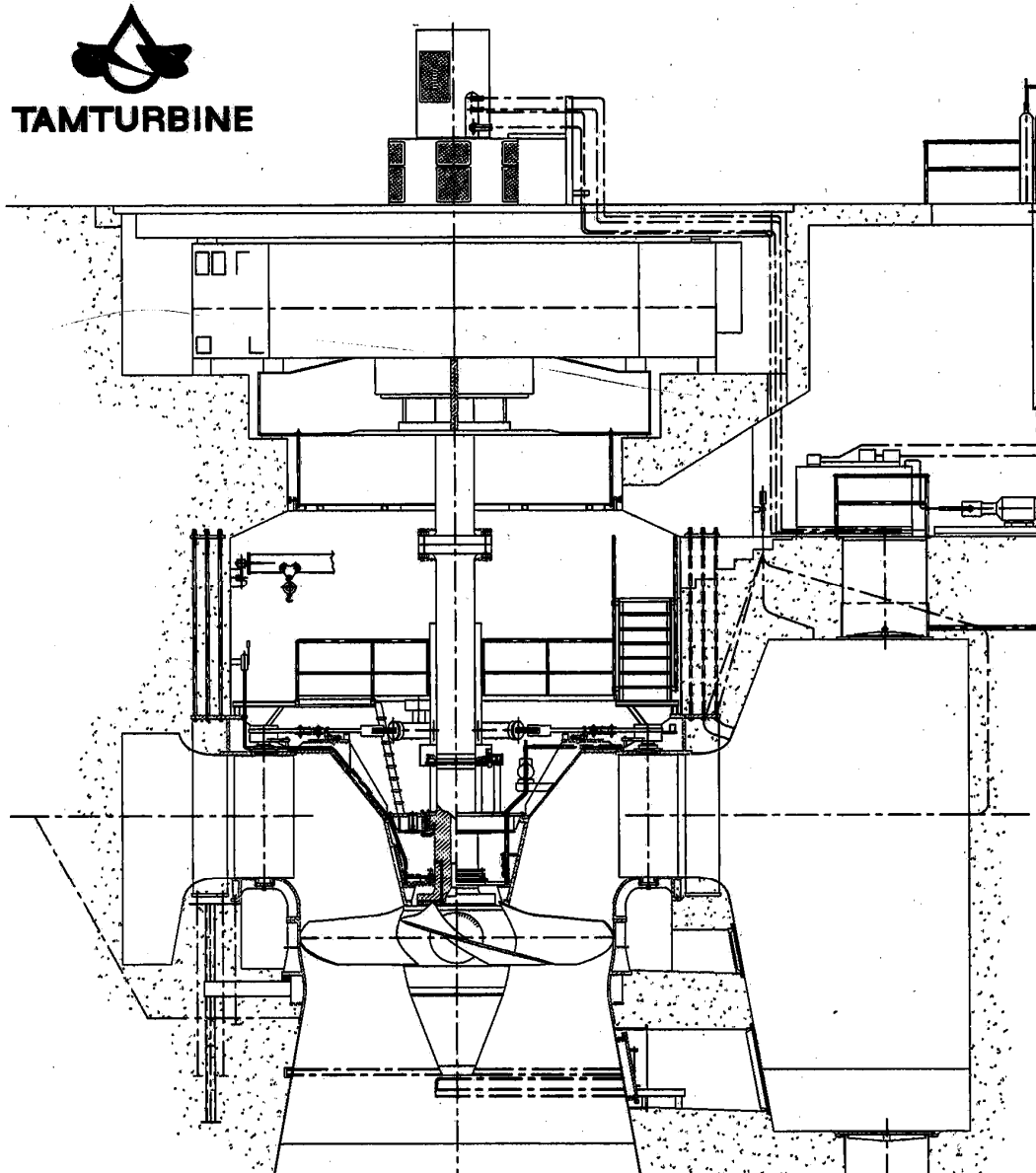
2.2. Vesivoimaturbiinit

Turbiinin avulla veteen varastoitunut energia muunnetaan generaattoria pyörittäväksi liike-energiaksi. Turbiinit jaetaan aktio- eli impulssiturbiineihin ja reaktio- eli ylipaineturbiineihin. Impulssiturbiineissa, kuten esimerkiksi Pelton-turbiinissa, veden potentiaalienergia muunnetaan liike-energiaksi, joka pyörittää juoksupyörää ja edelleen generaattoria. Reaktioturbiineissa, joita ovat esimerkiksi Kaplan- ja Francis-turbiini, turbiini saadaan pyörimään siipien ylä- ja alapuolen välisen paine-eron avulla. Reaktioturbiinit jaetaan vielä veden virtaussuunnan mukaan aksiaali- ja radiaaliturbiineihin. (Järvelä 2008: 130.)

2.2.1. Kaplan-turbiini

Kaplan-turbiinin toiminta perustuu sen läpi virtaavan vesimassan aiheuttamaan paine-energiaan, joten se soveltuu hyvin laitoksille joissa on pieni putouskorkeus ja suuri virtaama. Kaplan-turbiinissa on yleensä säädettävä radiaalinen johtopyörä, jolla saadaan säädettyä turbiinista saatavaa tehoa muuttamalla turbiinin läpi kulkevan veden määrää. Juoksupyörässä olevien säädettävien siipien kaltevuutta säätämällä saavutetaan kullakin kuormituksella paras mahdollinen hyötysuhde. Kaplan-turbiinin hyötysuhteen maksimiarvo koneen koosta riippuen on 91–95 %, joka saavutetaan 60–80 % avauksella. Hyötysuhde pysyy hyvänä, vaikka putouskorkeuden suhteellinen vaihtelu olisi suuri: esimerkiksi putouskorkeuden pienentyessä puoleen, hyötysuhde alentuu vain

noin 5 %. (Viherto 1992: 4–6.) Kuvassa 3 on Kaplan-turbiinilla toteutetun voimalaitoksen rakennekuva.



Kuva 3. Kaplan-turbiinilla toteutetun voimalaitoksen rakennekuva (Tilaaajalta saatua materiaalia).

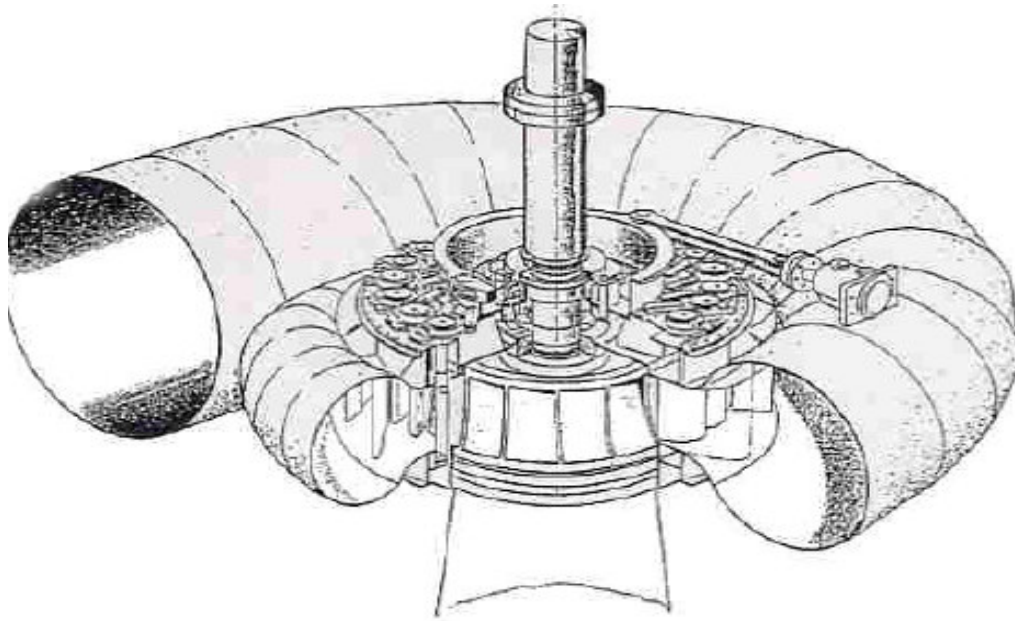
Kaplan-turbiinissa juoksupyörä on käynnin aikana säädettävä. Mikäli juoksupyörä on kiinteä tai koneen seistessä asetettava, käytetään nimitystä potkuriturbiini. Potkuriturbiinia käytetään yleensä vakioteholla, koska sen hyötysuhdealue ei ole niin

laaja kuin Kaplan-turbiinissa. Lisäksi potkuriturbiinissa saattaa osakuormilla syntyä turbiinia vahingoittavaa kavitaatiota.

Kaplan- tai potkuriturbiini voidaan asentaa myös vaakatasoon, jolloin puhutaan putkiturbiinista. Putkiturbiinit voidaan eritellä kotelotyypiksi (bulb), kuilutyypiksi (pit) sekä putkityypiksi (S-turbine). Putkiturbiinissa veden virtaus on aksiaalinen myös johtopyörässä. Putkiturbiineja käytetään, kun virtaus on huomattavan suuri putouskorkeuteen nähden. (Viherto 1992: 4–6; Määttänen ym. 1978: 90–91.)

2.2.2. Francis-turbiini

Francis-turbiinin suosio johtuu sen laajasta käyttöalueesta, joka ulottuu noin 700 metrin putouskorkeuksiin ja 1000 MW tehoihin. Turbiini voi olla vaaka- tai pysty akselinen. Francis-turbiinissa juoksupyörä on kiinteä ja johtopyörä on säädettävä. (Istolahti 2009: 16.) Francis-turbiinissa vesi kulkee tulospiraalin kautta, jolloin veteen saadaan aikaiseksi pyörreliike. Juoksupyörä muuntaa veden virtauksen tangentiaalisen liike-energian generaattoria pyörittäväksi vääntömomentiksi. Virtauksen ja vääntömomentin määrää säädellään johtopyörällä. Vesi poistuu Francis-turbiinista lähes pyörteettömänä. (Kinnula 2008: 13.) Francis-turbiinin rakenne on esitetty kuvassa 4.

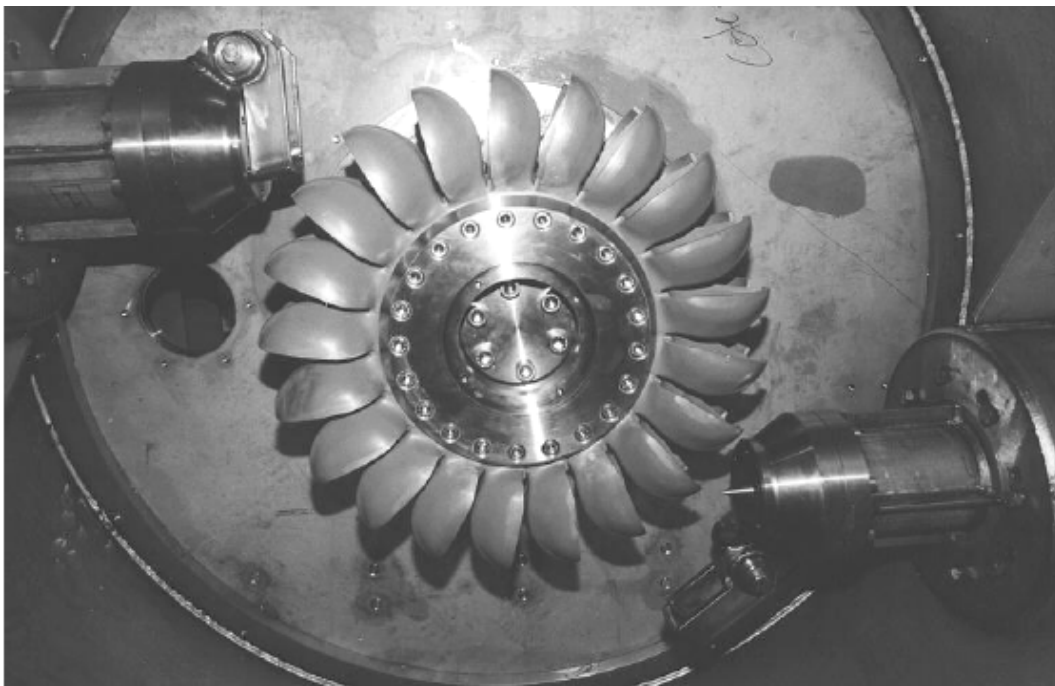


Kuva 4. Francis-turbiini (ESHA 2004: 162).

Francis-turbiinin hyötysuhteen huippuarvo on suurilla koneilla 93–95 % ja pienemmillä koneilla yleensä 89–92 %. Hyötysuhteen huippuarvo saavutetaan noin 80–90 % syötöllä. Putouksen vaihtelu vaikuttaa Francis-turbiiniin enemmän kuin Kaplan turbiiniin. Francis-turbiinin hyötysuhde alenee 15 %, kun putous pienenee puoleen alkuperäisestä. (Viherto 1992: 6.)

2.2.3. Pelton-turbiini

Pelton-turbiinin toiminta perustuu paine-eron sijaan veden liike-energian hyödyntämiseen. Pelton turbiinissa on yleensä yhdestä neljään suutinta, joista vesi suihkuu turbiinissa oleviin kuppeihin ja saa aikaan pyörivän liikkeen. Suuttimet ovat liikkuvia, jolloin käynnistys tapahtuu kääntämällä vesisuihku turbiiniin ja pysäyttämisen kääntämällä vesisuihku turbiinin ohi. Juoksupyörä on usein kiinnitetty suoraan generaattorin akseliin. Kuvassa 5 näkyy Pelton-turbiinin juoksupyörä ja suuttimet.



Kuva 5. Pelton-turbiinin rakenne (ESHA 2004: 159).

Pelton-turbiini soveltuu suurille putoukskorkeuksille, yli 1000 m saakka. Turbiinin hyötysuhde on hyvä jo pienellä virtaamalla. (ESHA 2004: 158.)

2.2.4. Vesivoimaturbiinin valinta

Turbiinityypin muodon ja koon valinnan kriteerit ovat:

- putouskorkeus
- virtaama
- pyörimisnopeus
- kavitaatio
- kustannukset.

Näiden perusteella turbiinin valinta ja suunnittelu toteutetaan. (ESHA 2004: 174.)

Putouskorkeus

Putouskorkeus on ensimmäinen asia, joka vaikuttaa turbiinityypin valintaan. Reaktioturbiineilla putouskorkeudella tarkoitetaan ylä- ja alavesipinnan välistä etäisyyttä ja impulssiturbiineilla ylavedenpinnan ja suuttimen välistä etäisyyttä. Taulukossa 1 on esitetty eri turbiineille soveltuvat putouskorkeudet.

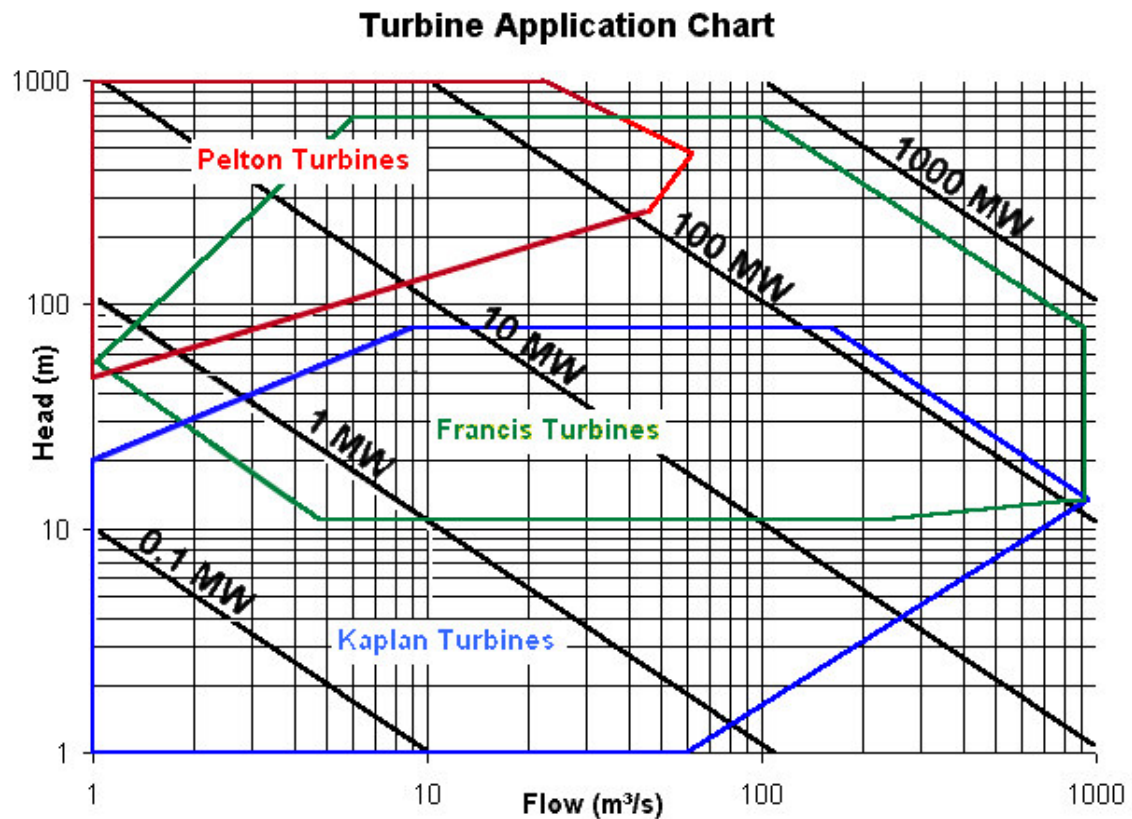
Taulukko 1. Vesiturbiineille soveltuvat putouskorkeudet (ESHA 2004: 175).

Turbiinityppi	Putouskorkeus [m]
Kaplan / potkuri	$2 < H < 40$
Francis	$25 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$

Virtaama

Virtaaman määrittäminen ei ole yhtä selvää kuin putouskorkeuden määrittäminen, koska virtaama ei pysy vakiona vaan vaihtelee usein vuodenaikojen mukaan. Virtaamaa arvioitaessa käytetäänkin usein apuna riittävän kattavia mittaustuloksia ja kaavioita.

Turbiinityppi voidaan valita, kun virtaama ja putouskorkeus on selvitetty. Valinta tehdään kuvan 6 kaavion avulla.

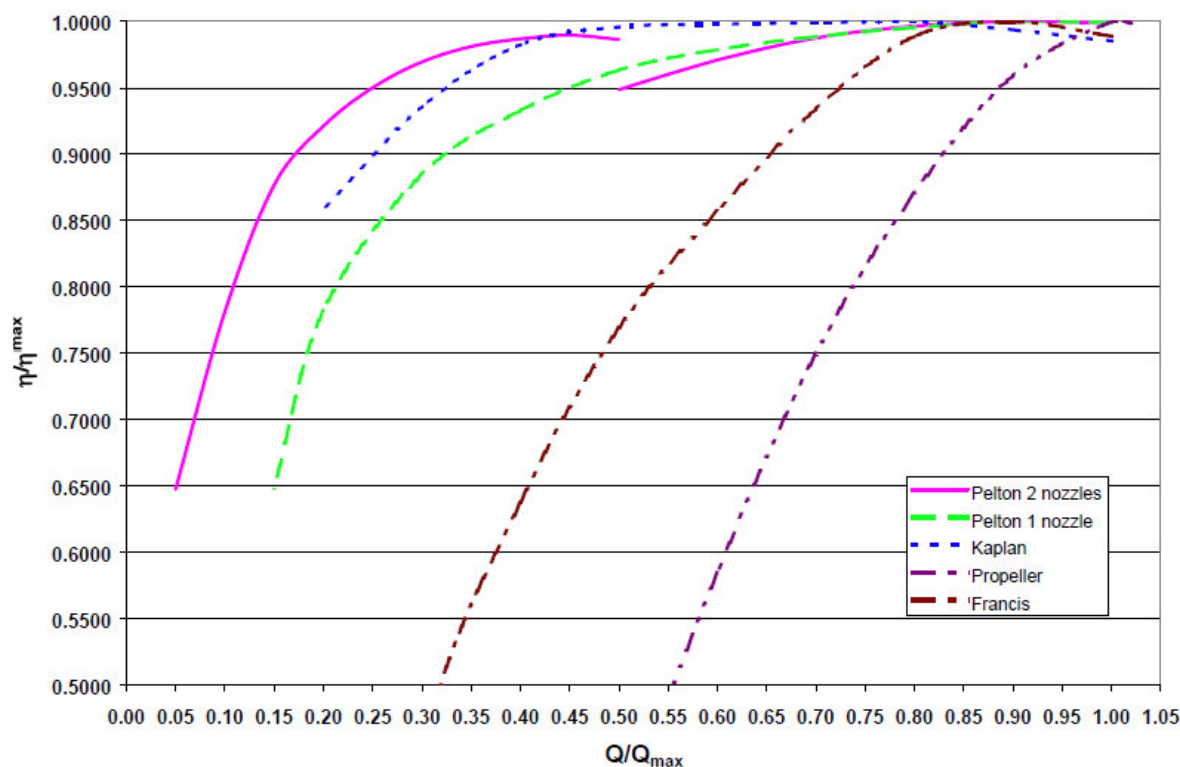


Kuva 6. Vesiturbiinien käyttöalueet (Siljamäki 2007: 16).

Mikäli virtaaman ja putouskorkeuden perusteella kuvan 6 kaavio antaa useamman eri vaihtoehdon tehdään valinta vertailemalla eri valmistajien antamia tietoja. Valmistajien antamista tiedoista vertaillaan ainakin hintaa, nimellistehoa ja hyötysuhdetta.

Turbiineja voidaan laittaa yhden ison sijaan useampi pieni turbiini. Useammalla turbiinilla voidaan saavuttaa yhtä turbiinia parempi hyötysuhde, etenkin silloin kun virtaama on pieni. Pienempien turbiinien pyörimisnopeus voidaan nostaa nopeammaksi kuin isossa turbiinissa, mikä saattaa sallia turbiinin kytkennän generaattoriin ilman vaihteistoa. (ESHA 2004: 176.) Lopullinen valinta yhden tai useamman turbiinin välillä pitää kuitenkin tehdä aina tapauskohtaisesti.

Vesivoimalaitoksien tehoon vaikuttaa yhtälön 1 mukaan lähinnä putouskorkeus ja virtaama. Suunnittelussa tulee tarkastella miten nämä suureet vaihtelevat ja ottaa tulokset huomioon turbiinia valittaessa. Kuvassa 7 on esitetty, miten virtaaman muutos vaikuttaa hyötysuhteeseen.



Kuva 7. Virtaaman vaikutus vesivoimaturbiinin hyötysuhteeseen (ESHA 2004: 183).

Kuvaajasta nähdään, että Pelton- ja Kaplan-turbiineilla hyötysuhdekäyrä on hyvin laaja, joten ne sietävät hyvin virtauksen muutosta. Kaikilla turbiinityypeillä voidaan parhaimmillaan saavuttaa yli 95 % hyötysuhde.

Pyörimisnopeus

Pyörimisnopeus määritellään putoukorkouden, virtaaman, turbiinityypin ja generaattorin mukaan. Generaattori, joka ei ole liitetty taajuusmuuttajan kautta, tulee pyöriä tahtinopeudella. Tahtinopeus saadaan lasketta

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (2)$$

missä f on taajuus [Hz], p on napapariluku [kpl] ja n_s on tahtinopeus [rpm]. Yhtälöstä nähdään, että generaattorin tahtinopeuteen vaikuttaa ainoastaan taajuus ja napapariluku. Turbiini voidaan liittää generaattoriin joko suoraan tai vaihteiston kautta.

Vesivoimaturbiineille erityistä on suuri ryntäysnopeus. Ryntäyksellä tarkoitetaan sitä tilannetta, kun turbiinia pyörittävä vesivoima on suuri ja generaattorin kuorma tipahtaa äkillisesti. Ryntäyksessä generaattorin kierrokset nousevat merkittävästi. Ryntäyskertoimia eri turbiineille on esitetty taulukossa 2. (ESHA 2004: 180.)

Taulukko 2. Vesivoimaturbiinien ryntäysnopeuskertoimia (ESHA 2004: 180).

Turbiinityyppi	Ryntäysnopeuskerroin n_{\max}/n
Kaplan	2,0–2,6
Francis	1,6–2,2
Pelton	1,8–1,9

Kavitaatio

Kavitaatio syntyy virtaavan nesteen, tässä tapauksessa veden, paikallisen paineen alenemisen vuoksi. Veden paineen laskiessa alle höyrystymispaineen, vesi höyrystyy ja alkaa kuplia. Iskeytyessään turbiinin siipiin kuplat kuluttavat metalliosia. Kulumista sanotaan kavitaatioeroosioksi. Kulumisen vuoksi siipien pinnalla oleva ruostesuojaus vaurioituu ja ruostuminen nopeutuu. Kavitaatio aiheuttaa myös hyötysuhteen pienenemistä ja voimakasta rusahtelevaa ääntä.

Kavitaatiota esiintyy erityisesti paikoissa, joissa vedenpaine on muutenkin matala, kuten Kaplan-turbiinin juoksupyörän jälkeen. Kavitaatiota esiintyy myös paikoissa, joissa veden virtausnopeus on suuri ja paikoissa, joissa esiintyy voimakasta pyörteisyyttä. (Laari 2006: 33; Flaspöhler 2007: 26.)

Kavitaatiota voidaan estää jo valmistusvaiheessa käyttämällä suurempia ainevahvuuksia ja kestävimpiä materiaaleja. Joissain suurissa laitoksissa osakuormilla esiintyvää kavitaatiota voidaan estää puhaltamalla ilmakuplia turbiinille. Huippunopeudella esiintyvää kavitaatiota voidaan vähentää pienentämällä virtausnopeutta ja pitämällä virtaus tasaisena. Kavitoinnista aiheutuvia ilmakuplia on esitetty kuvassa 8. (Laari 2006: 37–38.)



Kuva 8. Kavitointia turbiinin siivessä (Laari 2006: 37).

3. MUUTTUVANOPEUSISET VESIVOIMAGENERAATTORIT

Taajuusmuuttajan kautta kytketty muuttuvanopeuksinen vesivoimageneraattori voi olla epätahti-, tahti- tai kestopagneettigeneraattori ja se voidaan liittää turbiiniin suoraan tai vaihdelaatikon kautta. Vesivoimageneraattoreiden erikoispiirteitä ovat korkea vääntömomentti ja nimellisyörimisnopeuteen verrattuna korkea ryntäysnopeus. Nämä piirteet tiukentavat vesivoimageneraattorin mekaanisen kestävyuden ja mitoituksen vaatimuksia. Korkea ryntäysnopeus asettaa vaatimuksia myös jännitesuojaukselle, etenkin käytettäessä kestopagneettigeneraattoria. Turbiinien ryntäysnopeudet on esitetty tämän työn kappaleen 2.2.4 taulukossa 2.

Taajuusmuuttajan kautta liitettyä generaattoria ei tarvitse erikseen tahdistaa verkkoon. Taajuusmuuttajalla toteutetaan loistehon tuotannon säätö, joten myös epätahtigeneraattori-sovelluksella voidaan tuottaa loistehoa. Vikavirran tuotto ei taajuusmuuttaja-käytössä ole riippuvainen käytetystä generaattorityypistä, vaan taajuusmuuttajan virta-arvoista. Taajuusmuuttajan kautta verkkoon liitetyn vesivoimageneraattorin valintaan vaikuttaa ainakin turbiinin pyörimisnopeus, vääntömomentti sekä teho.

3.1. Epätahti- ja kestopagneettigeneraattorien erot

Epätahti- ja kestopagneettikoneiden magnetointi on toteutettu eri tavoilla. Kestopagneettikoneen magnetointi on toteutettu roottoriin asennetuilla kestopagneeteilla ja epätahtikone ottaa magnetointiin tarvittavan loistehon verkosta.

Sähkökoneen vääntömomentti määräytyy roottorin koosta, virrantiheydestä, vuontiheydestä ja virtakatteesta. Virrantiheyden ja virtakatteen kasvattamista rajoittaa koneen terminen kuormitettavuus, joten sähköinen kuormitettavuus on riippuvainen häviöistä ja jäähtytyksestä. Kestopagneeteilla toteutettu magnetointi ei aiheuta lämpöhäviöitä roottorissa vaan kestopagneettikoneen lämpöhäviöt koostuvat pääosin staattorin kuparihäviöistä. Epätahtikoneessa syntyy virtahäviöitä myös roottorissa, joka lisää jäähtytyksen tarvetta. Pienempien lämpöhäviöiden ansiosta kestopagneetti-

koneella voidaan tuottaa suurempi vääntömomentti kuin runkokooltaan samankokoisella epätahtikoneella. Verrattaessa runkokooltaan samankokoista epätahti- ja kestopagneettikoneita, voidaan kestopagneettitekniikalla saavuttaa jopa kaksinkertainen vääntömomentti epätahtikoneeseen verrattuna. Samantehoisia epätahti- ja kestopagneettikoneita verrattaessa on kestopagneettikoneen paino noin 30–50 % pienempi kuin epätahtikoneen. (Rilla 2006: 15,16,18,19; Pyrhönen 2006: 6.2, 6.7; Tammi 2009.)

Kestopagneettikoneen ja epätahtikoneen erot selittyvät erisuuruista lämpöhäviöistä ja jäähdystehoista. Kestopagneettigeneraattorissa virtalämpöhäviöitä on ainoastaan staattorissa. Epätahtigeneraattorissa lämpöhäviöitä on staattorin lisäksi myös roottorissa, joten jäähdystystä ei saada yhtä tehokkaaksi kuin kestopagneettigeneraattorissa. (Rilla 2006: 15,16,18,19; Pyrhönen 2006: 6.2, 6.7; Tammi 2009.)

3.2. Epätahtigeneraattori

Epätahtigeneraattorin pyörimisnopeus generaattorikäytössä on jättämän verran suurempi kuin tahtinopeus, eli jättämä on negatiivinen. Jättämän ansiosta epätahtigeneraattorin jännite ei nouse ryntäyksessä, joten generaattorin jännite voidaan valita samaksi kuin taajuusmuuttajan eikä siinä tarvitse huomioida jännitteen nousuvaraa kuten kestopagneettigeneraattorissa. Epätahtigeneraattori tarvitsee magnetointiin loistehoa, joka otetaan verkosta tai tuotetaan taajuusmuuttajan generaattorisuuntaajalla. Epätahtigeneraattorin tarvitsema loisteho tulee ottaa huomioon taajuusmuuttajaa mitoitettaessa.

Epätahtigeneraattori voidaan kytkeä turbiiniin joko suoraan tai vaihteiston kautta. Epätahtigeneraattorin rakenteesta johtuen generaattorin runkokoko on suuri suhteessa vääntömomenttiin, joten edullisten vakiorunkoihin rakennettujen koneiden vääntömomenttirajat ovat suhteellisen alhaiset. ABB Oy:n suurimpaan 560-vakiorunkoon valmistamien epätahtikoneen suurin vääntömomentti on noin 22 kNm, kun kestopagneettitekniikalla saadaan vastaavasta vakiorungosta yli 44 kNm vääntömomentti. (Tammi 2009). Vääntömomentti on kääntäen verrannollinen

pyörimisnopeuteen (ks. yhtälö 6), joten käyttämällä vaihdelaatikkaa saadaan generaattorin vääntömomenttia pienennettyä. Vesivoimageneraattorin suuren ryntäysnopeuden takia generaattorin pyörimisnopeutta ei kuitenkaan ole järkevää nostaa kovin suureksi, koska generaattorit tulee valmistaa kestävästi ryntäysnopeuden.

Epätahtigeneraattoreita voidaan käyttää sekä pien- että keskijännitteellä. Keskijännitetaajuusmuuttajaan kytketyn epätahtikoneen roottori tulee maadoittaa, mahdollisten laakerivirtojen ehkäisemiseksi. (ABB Oy 2004: 145.)

Keskijännitetaajuusmuuttajan kautta kytketty epätahtigeneraattori tulee olla häkkikämmetty, jonka eristyksessä on otettu huomioon taajuusmuuttajakäyttö. Taajuusmuuttajakäyttöisen epätahtikoneen eristyksen tulee olla mitoitettu suuremmille jännitepiikeille kuin suoraan kytkettyjen generaattoreiden. Mikäli generaattoria syötetään useammalla kuin yhdellä vaihtosuuntaajalla (yli 9 MW:n generaattorit), tulee generaattorissa olla rinnakkaiset käämit joiden välillä ei ole vaihesiirtoa. (ABB Oy 2004: 145.)

3.3. Kestomagneettigeneraattori

Kestomagneettigeneraattorin magnetointi on toteutetaan yleensä kiinteästi roottoriin asennetuilla kestopagneeteilla. Kestomagneettigeneraattorin magnetointia ei voida säätää, joten generaattorin jännite on käytännössä suoraan verrannollinen pyörimisnopeuteen. Kestomagneettigeneraattori toimii tahtigeneraattorina, joten myös sen tuottaman jännitteen taajuus on verrannollinen pyörimisnopeuteen.

Kestomagneettikoneella saavutetaan korkea vääntömomentti jo pienellä kierrosnopeudella, 100 rpm alkaen. Kestomagneettigeneraattoreita ei käytetä suurilla kierrosnopeuksilla. ABB Oy:n pienjännitteellä toteutettujen vakio kestopagneettikoneiden maksimipyörimisnopeusrajaksi on asetettu 1000 rpm. Vesivoimageneraattorin ryntäysnopeus voi olla jopa 2,5 kertaa nimellispyörimisnopeus, joten suositusten mukainen maksiminimellisnopeus PM (permanent magnet) - vesivoimageneraattorille on 400 rpm. Toinen rajoittava tekijä kestopagneetti-

generaattorin pyörimisnopeudelle on generaattorin maksimijännite, joka esimerkiksi ABB Oy:n vakio pienjännitegeneraattoreilla on 1000 V. Jänniterajan mukaan laskettu pyörimisnopeus antaa PM-vesivoimageneraattorille saman 400 rpm nimellisyörimisnopeuden kuin maksimipyörimisnopeuden mukaan laskettu.

Kestomagneettigeneraattori tuottaa jännitteen jo pienellä kierrosnopeudella, joten se tulee erottaa huoltotöiden ajaksi taajuusmuuttajasta suojakytkimellä (ABB 2003: 48). Suojakytkimenä voidaan käyttää esimerkiksi katkaisijaa tai erotinta. Kestomagneettisovelluksissa generaattorikatkaisijalla suojataan myös taajuusmuuttaja ryntäyksen aikaiselta ylijännitteeltä.

Kestomagneettigeneraattoria voidaan käyttää pien- ja keskijännitesovelluksissa. ACS 6000 ja ACS 800 -taajuusmuuttajiin on saatavissa kestomagneettisovellus, joka ottaa huomioon kestomagneettikoneiden ominaisuudet.

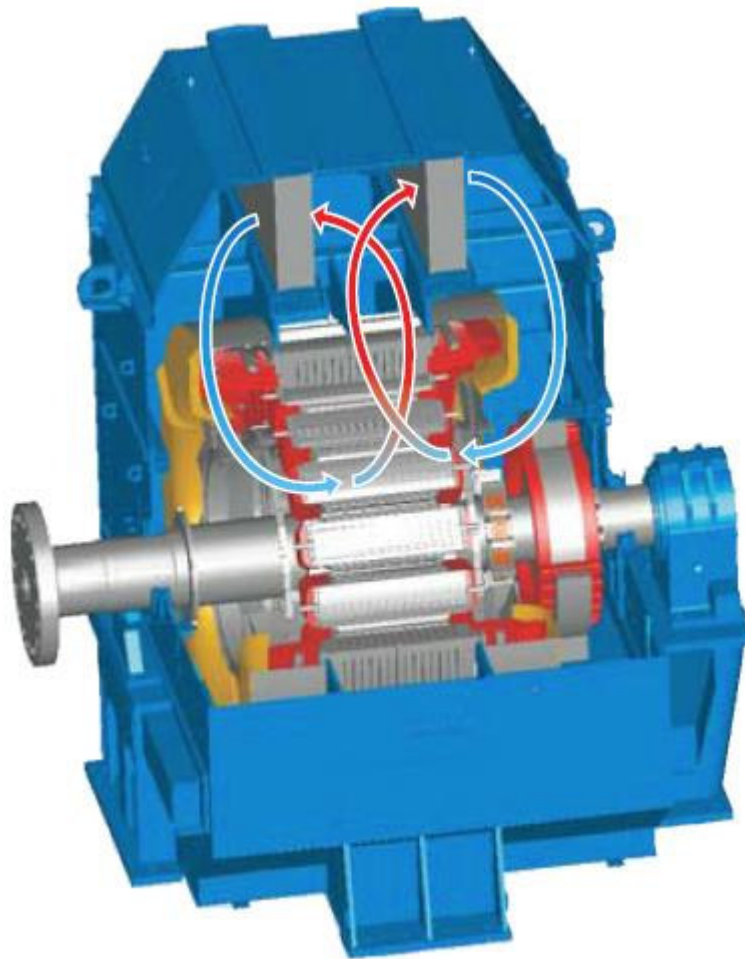
3.4. Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori

Vierasmagnetoitua tahtigeneraattoria käytetään keskijännitesovelluksissa. ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajalla voidaan toteuttaa magnetointi ja magnetoinnin ohjaus, kun ACS 800 -pienjännitetaajuusmuuttajiin ei ole saatavissa magnetointi-yksikköä.

ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan kautta kytketty tahtigeneraattori tulee olla avonapakone, jonka eristyksessä on otettu huomioon taajuusmuuttajakäyttö. Taajuusmuuttajakäyttöisen tahtikoneen eristyksen tulee olla mitoitettu suuremmille jännitepiikeille kuin suoraan kytkettyjen generaattoreiden. Mikäli generaattoria syötetään useammalla kuin yhdellä vaihtosuuntaajalla, tulee generaattorissa olla rinnakkaiset käämit joiden välillä ei ole vaihesiirtoa. ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajaan kytkettyjen epätahti- ja tahtikoneiden roottori tulee maadoittaa; mahdollisten laakerivirtojen estämiseksi. (ABB Oy 2004: 144.)

Vierasmagnetoidun tahtikoneen etuna kestomagneettitahtikoneeseen nähden on se, että siitä saadaan suurempi vääntömomentti samalla runkokoolla. Vierasmagnetoidun

tahtikoneen magnetointi saadaan tehokkaammaksi kuin kestmagneettitahtikoneen, joten vääntömomentti kasvaa. Isot keskijännitegeneraattorit ovat moduuli-koneita, joissa jäähdytys on toteutettu erillisellä jäähdytysyksiköllä. Moduulikoneiden tehokkaan jäähdytyksen takia lämpöhäviöt eivät ole samanlainen ongelma kuin pienemmissä vakiorunkoisissa generaattoreissa. Moduulikoneen rakenne on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Esimerkki moduuli-generaattorin rakenteesta. Jäähdytys on toteutettu ilma-vesi -tekniikalla. (ABB Oy 2005c:10.)

Kestomagneettigeneraattorilla voidaan kuitenkin saavuttaa korkeampi hyötysuhde kuin vierasmagnetoidulla tahtigeneraattorilla. Generaattorien hinnat ovat verrannollisia runkokokoon, joten jos vierasmagnetoitu tahtigeneraattori voidaan toteuttaa pienemmällä runkokokoolla, sillä voidaan saavuttaa taloudellista etua.

3.5. Generaattorin valinta

Generaattoreiden vertailu tehdään kustannusten ja soveltuvuuden perusteella. Generaattoreiden kustannukset ovat riippuvaisia lähinnä koneen runkokoosta ja vääntömomentista. Generaattorin runkokoko ja kustannukset saattaa kasvaa kohtuuttomiksi sovelluksissa, joissa turbiinin vääntömomentti on suuri. Generaattorin vääntömomenttia saadaan pienennettyä nostamalla generaattorin pyörimisnopeutta vaihdelaatikon avulla.

Pienjännitegeneraattorin valinta

Pienjännitegeneraattoreina taajuusmuuttajakäytöissä käytetään epätahti- tai kestopagneettigeneraattoria. Pienjännite-sovelluksia voidaan toteuttaa ACS 800 Multidrive -taajuusmuuttajalla noin 5 MW asti, joten generaattorin maksimivirta asettaa rajan pienjännitesovelluksille. Ion Boldean (2006: 10-81) mukaan 3 MVA tehoinen kestopagneettigeneraattori voidaan vielä valmistaa jännitteellä 690 V, mutta suuremmilla tehoilla siirrytään keskijännitekoneisiin.

Generaattorin valinta on aina tapauskohtainen, joka tehdään vääntömomentin, pyörimisnopeuden, tehon ja kustannusten perusteella. Kestopagneettigeneraattori soveltuu pienille, alle 400 rpm pyörimisnopeuksille ja epätahtigeneraattori soveltuu nopeammille pyörimisnopeuksille. Vesivoimaturbiini pyörimisnopeus on kuitenkin usein alle 400 rpm, joten valintaa ei voida tehdä yksin pyörimisnopeuden perusteella.

ABB Oy valmistaa vakiorunkoon epätahtigeneraattorin noin 22 kNm asti ja kestopagneettigeneraattorin 44 kNm asti (Tammi 2009). Generaattorin hinta on riippuvainen runkokoosta, joten korkean vääntömomentin ansiosta kestopagneettigeneraattori voi olla joissain sovelluksissa epätahtigeneraattoria edullisempi. Epätahtigeneraattori voidaan kuitenkin liittää turbiiniin vaihteiston avulla, jolloin generaattorin vääntömomentti ja hinta pienenee. Epätahtigeneraattori voidaan toteuttaa 400 V sijasta jännitteellä 690 V, joten pienentyneen virran vuoksi saavutetaan kustannussäästöjä kaapeloinnissa ja taajuusmuuttajassa. Taulukossa 3 on vertailtu pienjännitesovelluksissa käytettävien generaattorien keskeisimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 3. Pienjännitegeneraattorien vertailu.

	Kestomagneettigeneraattori	Epätahtigeneraattori
Magnetointi	Roottoriin asennetuilla kesto- magneeteilla	Loistehoa verkosta tai taajuusmuut- tajasta
Häviöt	Staattorissa	Staattorissa ja roottorissa
Hyötysuhde	Kestomagneettigeneraattorilla parempi, koska pienemmät häviöt	
Vääntömomentti	Kestomagneettigeneraattorissa suurempi vääntömomentti suhteessa runkokokoon	

Keskijännitegeneraattorin valinta

Suurilla pyörimisnopeuksilla käytetään epätahtigeneraattoria ja pienellä pyörimisnopeudella joko kestopagneetti- tai vierasmagnetointia tahtigeneraattoria. Vertailu näiden kestopagneetti- ja tahtigeneraattorien kesken ei ole niin selvä kuin pienjännitesovelluksissa, koska molemmat soveltuvat samantyyppisiin käyttöihin. Valinta voidaan tehdä kustannusten ja asiakkaan mieltymyksen perusteella.

Kestomagneettigeneraattorilla saavutetaan ulkoisesti magnetointia tahtigeneraattoria parempi hyötysuhde, koska siinä ei ole magnetointihäviöitä lainkaan. Tahtigeneraattorilla saavutetaan kestopagneettigeneraattoria korkeampi vääntömomentti suhteessa runkokokoon, joten generaattorin hinta saattaa olla edullisempi. Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin magnetointi toteutetaan taajuusmuuttajan erillisen magnetointi-yksikön ja liukurenkaiden kautta tai generaattorin akselissa olevalla kestopagneettigeneraattorilla. Kestomagneettigeneraattorin käyttö edellyttää taajuusmuuttajaan ainoastaan sopivan ohjelman eikä sen magnetoinnissa ole kuluja osia. Taulukossa 4 on vertailtu tahtigeneraattoreiden keskeisimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 4. Keskijännitetahtigeneraattorien vertailu.

	Kestomagneettigeneraattori	Vierasmagnetointi tahtigeneraattori
Magnetointi	Roottoriin asennetuilla kesto- magneeteilla	-Erillisestä jännitelähteestä liukuren- kaiden kautta roottoriin -Pyörivä magnetointi
Häviöt	Staattorissa	Staattorissa ja roottorissa
Hyötysuhde	-Kestomagneettigeneraattorilla parempi, koska pienemmät häviöt -Kestomagneettigeneraattorissa ei ole kuluja liukurenkaita	
Vääntömomentti	Tahtigeneraattorissa suurempi vääntömomentti suhteessa runko- koon	

4. TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖ VESIVOIMALAITOKSELLE

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet teollisuudessa samalla kun niiden hinta on alentunut ja tekniset ominaisuudet ovat parantuneet. Taajuusmuuttajat on suunniteltu usein lähinnä oikosulkumoottorin pyörimisnopeussäätöä varten, mutta tehoelektroniikan komponenttien kehittyessä taajuusmuuttajia on alettu hyödyntää myös generaattorikäytössä.

Ilmastonmuutos on vauhdittanut uusiutuvien energianlähteiden ja energiatehokkaiden ratkaisujen tutkimista ja kehittämistä. Taajuusmuuttajiin kehitettiin ominaisuus, jolla moottorin jarrutusenergia saatiin hyödynnettyä tuottamalla siitä sähköä verkkoon; moottori toimi siis generaattorina. Tuulivoimalaitoksissa taajuusmuuttajat otettiin nopeasti käyttöön, koska niillä saavutettiin merkittäviä rakenteellisia ja taloudellisia etuja. Tuulivoimalaitoksien nopea kehitys puolestaan vauhditti taajuusmuuttajien generaattoriominaisuuksien kehittämistä edelleen. Taajuusmuuttajien nimellistehot ovat kasvaneet muutamasta sadasta kilowatista useaan megawattiin, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajan käytön isoillakin voimalaitoksilla. (Chunting ym. 2004: 1.) Generaattorikäyttöön voidaan valita sama taajuusmuuttaja kuin moottorikäyttöön, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajien sarjatuotannon. Sarjatuotannon etuina on tuotteen laatu, lyhyt toimitusaika ja yksilöllistä tuotetta edullisempi hinta.

Tämän työn tutkimus on rajattu ainoastaan täystephosuunnattuihin taajuusmuuttajaratkaisuihin, jotka on toteutettu ABB Oy:n valmistamalla ACS 800- tai ACS 6000 -taajuusmuuttajalla. Molemmat taajuusmuuttajamallit ovat varustettu aktiivisella verkkosuuntaajalla, eli ovat niin sanottuja 4Q (nelikvadrantti) -taajuusmuuttajia. 4Q-käyttö tarkoittaa sitä, että tehoa on mahdollista siirtää taajuusmuuttajasta verkkoon ja verkosta taajuusmuuttajaan. Epätahtigeneraattoria käytettäessä 4Q-käyttö on ehdoton, mutta vaikka 4Q-käyttö ei ole aina välttämätön, niin käytännössä ainakin vesivoimalaitokset toteutetaan aina 4Q-taajuusmuuttajalla. 4Q-taajuusmuuttajasta on generaattorikäytössä ainakin seuraavat edut:

- Nelikvadrantti-taajuusmuuttajalla on mahdollista ottaa loistehoa generaattorista, joten välipiirin tasajännite pysyy vakiona myös pienellä kierrosnopeudella.
- Vakiona pysyvä välipiirin tasajännite mahdollistaa täyden jännitteen ja tehon tuottamisen verkkoon, vaikka generaattorin pyörimisnopeus olisi pieni.
- Mahdollisuus tuottaa tai kuluttaa loistehoa.
- Mahdollisuus käyttää epätahtigeneraattoria.
- Puolijohteiden korkea kytkentätaajuus mahdollistaa erittäin pienen virranvaihtelun generaattoripuolella. Pieni virranvaihtelu pitää generaattoria kuormittavan vääntömomentin mahdollisimman tasaisena.

Kestomagneettigeneraattoria varten taajuusmuuttajassa tulee olla sovellusohjelma, joka ottaa huomioon kestoplaneettikoneen erityisominaisuudet. (ABB Oy 2004: 15; Maibach ym. 2007: 6; Boldea 2006: 10-2, 10-47.)

4.1. Taajuusmuuttajakäytön etuja

Taajuusmuuttajan käytöllä voidaan vesivoimalaitoksella saavuttaa merkittäviä etuja. Merkittävimpänä etuna voidaan pitää vaihdelaatikon tarpeettomuutta. Vaihdelaatikko sisältää nykyäänkin merkittävän riskin, koska sen hajotessa laitoksen tuotanto keskeytyy kokonaan. Vaihdelaatikon sisältämä öljy muodostaa myös merkittävän ympäristöriskin, mikäli öljy pääsee vuotamaan vesistöön.

4.1.1. Yksinkertainen rakenne

Täytestehosuunnatun vesivoimalaitoksen rakenne on yksinkertainen ja luotettava. Täytestehosuunnatuissa vesivoimalaitoksissa taajuusmuuttajalla on yleensä korvattu vaihdelaatikko, koska se on kallis investointi, pienentää hyötysuhdetta ja on kallis ylläpitää.

Vaihdelaatikon kesto ja välityssuhde lasketaan turbiinin nimellisarvoista. Välityssuhde lasketaan turbiinin ja generaattorin pyörimisnopeudesta ja vesivoimaturbiinista saatava vääntömomentti voidaan laskea

$$P_t = \omega T, \quad (3)$$

missä ω on kulmanopeus. Kulmanopeus saadaan laskettua pyörimisnopeudesta,

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (4)$$

Sijoittamalla yhtälö 3 yhtälöön 4 saadaan,

$$P_t = \frac{2\pi n T}{60}, \quad (5)$$

josta voidaan laskea vääntömomentti

$$T = \frac{60 P_t}{2\pi n}. \quad (6)$$

Kaavoissa ω on kulmanopeus [rad/s], P_t on turbiinin teho [W], n on turbiinin pyörimisnopeus [rpm] ja T [Nm] on vääntömomentti.

4.1.2. Loistehonsäätö

Välipiirin jännite pidetään tasaisena ja riittävällä tasolla taajuusmuuttajan generaattori puolen suuntaajan avulla. Generaattorista saatavaa pätötehoa säädetään generaattorisuuntaajalla, josta pätöteho siirretään välipiiriin kautta verkkosuuntaajaan. Pätötehon tuotantoa ohjataan ainoastaan generaattorisuuntaajalla. Verkkosuuntaaja ja generaattorisuuntaaja ovat täysin erotettuja toisistaan, mikä tarkoittaa että verkkoon tuotetun loistehon määrää säädetään ainoastaan verkkosuuntaajalla. (Michalke 2008: 3–4.) Loistehon määrä ei ole sidoksissa tuotetun pätötehon määrään. Täyستهosuunnatusta voimalaitoksesta onkin mahdollista tuottaa tai kuluttaa loistehoa epätahti- ja kestopagneettigeneraattorikäytössä sekä seisovalta koneelta.

4.1.3. Turbiinin optimaalinen käyttöalue

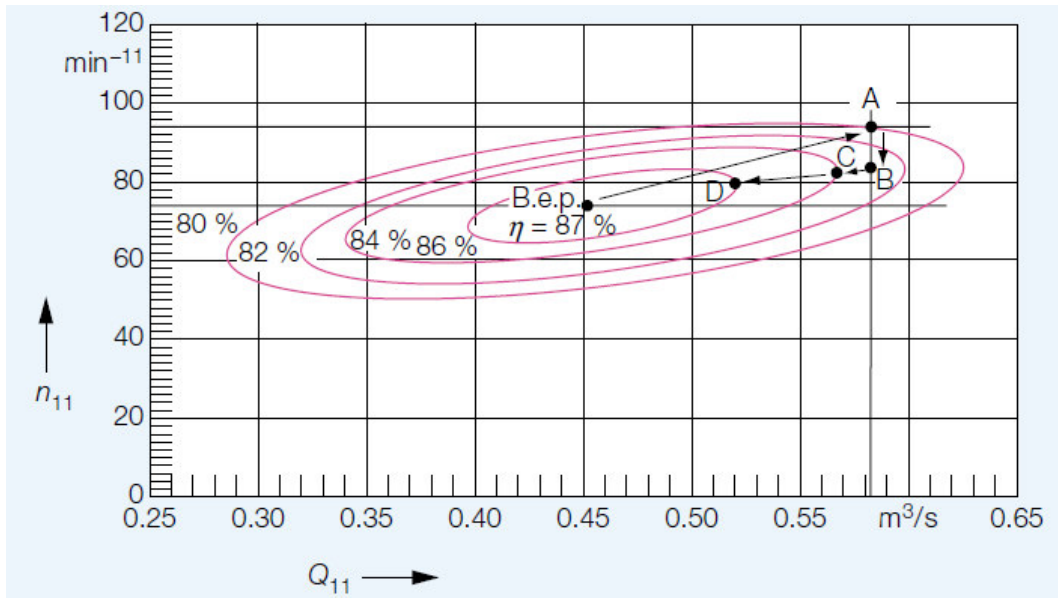
Täystehosuunnatussa generaattorikäytössä turbiinin pyörimisnopeus saa vaihdella vapaasti. Pyörimisnopeus voidaan asettaa siten, että turbiinin hyötysuhde on mahdollisimman korkea. Kuvassa 10 on erään Francis-turbiinin hyötysuhteen kuvaaja. Akseleilla on jokaisella turbiinille erikseen laskettavat ominaissuureet. Kuvan 10 pystyakselilla on pyörimisnopeus n_{11} , joka lasketaan

$$n_{11} = n \frac{D}{\sqrt{h}}, \quad (7)$$

missä n on turbiinin pyörimisnopeus [rpm], D on juoksupyörän halkaisija [m] ja H on putouskorkeus [m]. Vaaka-akselilla on virtaama Q_{11} , joka lasketaan

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{h}}, \quad (8)$$

missä Q on virtaama [m^3/s], D on juoksupyörän halkaisija [m] ja H on putouskorkeus [m].



Kuva 10. Francis-turbiinin hyötysuhdekäyrä. (Merino ym. 1996: 34.)

Suureet n_{11} ja Q_{11} on valmistajan antamia mallikokeen tuloksia, jotka on laskettu 1 m:n putoukselle ja 1 m:n halkaisijalle ja tästä johtuen merkitään alaindeksi ”11”. (Määttänen ym. 1978:73.)

Kuvassa 10 pisteessä B.e.p (Best efficiency point) on turbiinin hyötysuhde suurin. Kuvaajasta nähdään, että turbiinin hyötysuhdetta voidaan parantaa sovittamalla pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeuden muutoksella voidaan liikkua kuvaajan pysty akselin suuntaisesti. Esimerkiksi: Kuvaajan pisteessä A on turbiinin hyötysuhde 80 %. Pisteestä A voidaan siirtyä pisteeseen B pienentämällä turbiinin pyörimisnopeutta. Pisteessä B turbiinin hyötysuhde on 83 %, joten turbiinin hyötysuhde on parantunut 3 prosenttiyksikköä 83 prosenttiin pelkästään pyörimisnopeutta pienentämällä. (Merino ym. 1996: 34.)

4.1.4. Turbiinin rasituksen väheneminen

Täystephosuunnattuna generaattori alkaa tuottaa sähköä jo pienelläkin kierrosnopeudella eikä turbiinia tarvitse erikseen tahdistaa verkkoon. Tästä syystä vesivoimalaitos voidaan käynnistää vapaasti, jolloin turbiiniin kohdistuva rasitus on mahdollisimman pieni. (Schafer ym. 1998: 1.)

4.1.5. Esimerkkejä taajuusmuuttajalla saavutetuista hyödyistä

Tarkastellaan taajuusmuuttajakäytöllä saavutettuja etuja vielä kahden esimerkin avulla.

Esimerkki 1. Vaihdelaatikon korvaaminen

Kaplan-turbiini on asennettu jokivoimalaitokseen, jossa on hyvin suuri virtaama, mutta putouuskorkeus on pieni. Turbiinin nimellisteho on 5 MW ja nimellisyörimisnopeus 60 rpm.

Nyt yhtälön 6 mukaan vääntömomentti nimellisteholla ja -pyörimisnopeudella on suuri, noin 800 kNm, joka tekee vaihdelaatikosta kalliin ja vikaantumisherkän. Lisäksi vaihdelaatikossa tulee olla satoja litroja öljyä, joka muodostaa merkittävän ympäristöriskin.

Vaihtoehtoiksi jää suorakytkentägeneraattori tai taajuusmuuttajan kautta kytketty generaattori. Esimerkin tapauksessa suorakytkentägeneraattorin napapariluvuksi tulee yhtälön 2 mukaan 50. Suuri napapariluku voi aiheuttaa ongelmia generaattorin valmistuksessa. Taajuusmuuttajan kautta kytketty generaattori voidaan valmistaa pienemmällä napapariluvulla, koska generaattorista saatavan sähköenergian taajuus ei ole sidoksissa verkon taajuuteen.

Esimerkin 1 tapauksessa on todennäköistä, että taajuusmuuttajakäytöllä saavutetaan kustannussäästöjä, parempi hyötysuhde sekä yksinkertaisempi rakenne.

Esimerkki 2. Laitteiston yksinkertaistuminen

Kaplan-turbiini on asennettu pienvesivoimalaitokseen, jossa uusitaan vanha laitteisto, turbiinia lukuun ottamatta. Vanha laitteisto koostuu tahtigeneraattorista, vaihdelaatikosta, magnetointijärjestelmästä ja suojausjärjestelmästä.

Vanha laitteisto korvataan kestmagneettigeneraattorilla ja taajuusmuuttajalla. Kestomagneettigeneraattori ei tarvitse erillistä magnetointia ja taajuusmuuttaja korvaa vaihdelaatikon ja sillä hoidetaan myös pääosa suojuksista. Koska kyseessä on pienvesivoimalaitos, voidaan kestmagneettigeneraattori valmistaa vakiokokoiseen moottorirunkoon, jolloin sen hinta pysyy kohtuullisena.

Esimerkin 2 tapauksessa voimalaitoksessa olevien laitteiden määrä vähenee ja hyötysuhde parantuu. Taajuusmuuttaja yksinkertaistaa myös generaattorin käyttöä, koska tahdistusta ei tarvita ja loistehon säätö voidaan toteuttaa suoraan taajuusmuuttajasta.

Edellisistä esimerkeistä huomataan, että taajuusmuuttajan avulla voidaan vesivoimalaitoksella saavuttaa parempi hyötysuhde, yksinkertaisempi rakenne ja laitteiston yksinkertaisempi käyttö.

4.2. Taajuusmuuttajakäytön ongelmia ja haittoja

Taajuusmuuttajakäytön ongelmat liittyvät lähes poikkeuksetta suuntaajien korkean kytkentätaajuuden aiheuttamiin virta- ja jännitepiikkeihin. Virta- ja jännitepiikit aiheuttavat verkkopuolella sähkön laadun heikkenemistä ja generaattoripuolella akselivirtoja. Liitettäessä pieniä vesivoimalaitoksia verkkoon saattaa tulla ongelmia verkon suojauksessa.

4.2.1. Verkkoon tuotetut yliaallot

Yliaallot ovat sähköverkossa esiintyviä jännitteitä ja virtoja, joiden taajuus on suurempi kuin verkon taajuus. Verkossa esiintyvät yliaallot ovat yleensä harmonisia, mikä tarkoittaa sitä, että ne ovat verkkotaajuuden monikertoja. Taajuusmuuttajat tuottavat verkkoon yliaaltoja, joiden taajuus riippuu suuntaajan pulssiluvusta. Kuusi-pulssisen kolmivaiheisen tasasuuntaajan tuottaman yliaaltovirtojen järjestysnumerot voidaan laskea

$$n_y = 6k \pm 1, \quad (9)$$

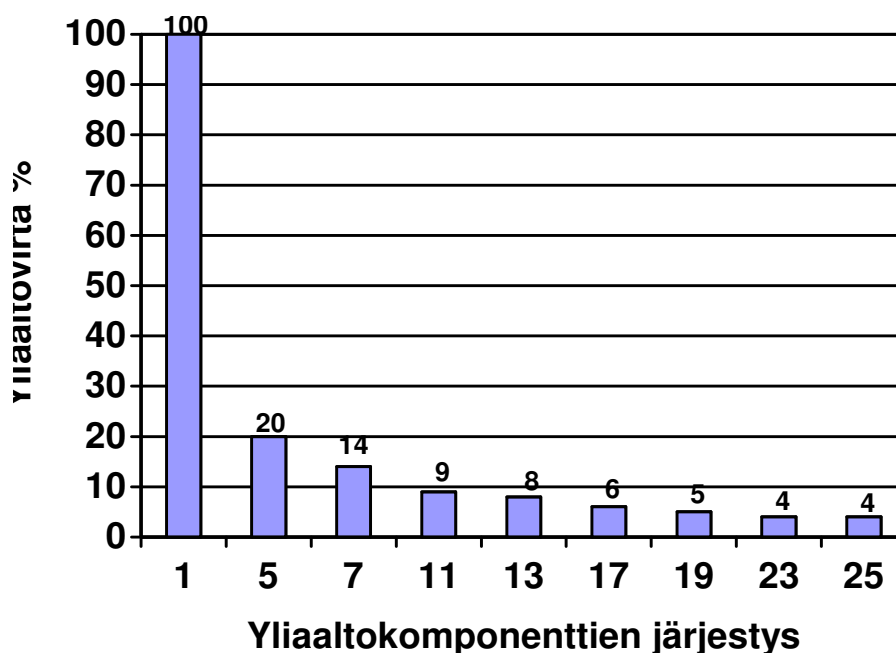
missä k saa arvot 1,2,3,... ja vastaavasti 12-pulssisillä varustettu taajuusmuuttaja tuottaa järjestysnumeroltaan

$$n_y = 12k \pm 1 \quad (10)$$

yliaaltoja. Yliaaltovirtojen teoreettiset tehollisarvot voidaan laskea

$$I_{ni} = \frac{I_1}{n_y}, \quad (11)$$

joten 6-pulssisuuntaajasta verkkoon tuotetut yliaaltovirrat jakautuvat kuvan 11 mukaan.



Kuva 11. Teoreettinen yliaaltosisältö 6-pulssisen tasasuuntaajan symmetrisessä virrassa (ABB Oy 2001: 7).

Yliaallot aiheuttavat muuntajien, kaapeleiden, moottoreiden, generaattoreiden ja kondensaattoreiden ylikuumentumista. Lisäksi ongelmia saattaa tulla elektronisissa laitteissa, kuten näytöissä ja valoissa, jotka saattavat vilkkua sekä tietokoneissa ja mittalaitteissa. Sähköverkkoon asennetut mittalaitteet saattavat antaa väärää mittaustuloksia, mikäli yliaaltoja esiintyy runsaasti. (ABB Oy 2001: 6–8.)

4.2.2. Laakerivirrat

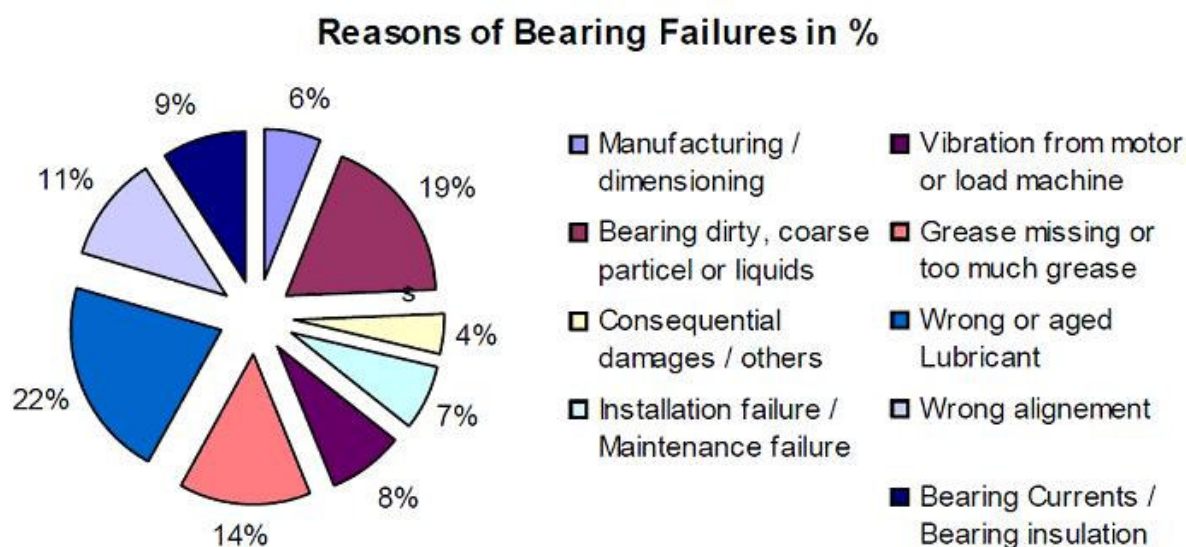
Sähkökoneen akseli on laakeroitu runkoon. Virtoja, jotka kulkevat akselin laakereiden läpi, kutsutaan laakerivirroiksi. Kuulalaakeri muodostuu kahdesta laakeripinnasta, joiden välissä on metallisia kuulia. Kuulalaakerin rakenne on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kuulalaakeri (JBRUP 2009).

Mikäli laakeripintojen välillä tapahtuu läpilyönti, syntyy laakeripesien ja kuulien välille suljettu virtapiiri. Laakerivirtoja muodostuu erityisesti, kun koneen pyörimisnopeus on pieni, jolloin metallikuulien ja laakeripesien välinen resistanssi pieni. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla kuulat nousevat laakerissa olevan voiteluaineen päälle, jolloin resistanssi suurenee. Laakerivirtoja esiintyy kuitenkin suurillakin pyörimisnopeuksilla, mikäli laakerin yli oleva jännite on riittävän suuri. (Erdman 1995: 250–259; Pyrhönen 2009: 132–134; Hoppler & Errath: 223.)

Laakerivirrat ovat syynä noin joka kymmenessä laakerivauriossa. Muut laakerivaurioiden syyt johtuvat esimerkiksi laakereiden virheellisestä asennuksesta, voitelun puutteesta tai tärinästä. Yleisimmät laakerivaurioiden syyt ja niiden yleisyys on esitetty kuvassa 13. (Hoppler & Errath: 223.)



Kuva 13. Laakerivaurioiden aiheuttajat ja niiden osuus kaikista vaurioista. (Hoppler & Errath 2007: 223.)

Laakerivirrat ei ole uusi ilmiö. Nykyään laakerivirrat aiheutuvat pääosin suuntaajien nopean kytkentätaajuuden seurauksena. Nykyään laakerivirtoja aiheuttaa etenkin PWM (pulse width modulation) -tyyppisen taajuusmuuttajan syöttämä yhteismuotoinen jännite, korkea kytkentätaajuus, huonot kaapeloinnit suuntaajan ja sähkökoneen välillä sekä käämitysten hajakapasitanssit. Yhteismuotoisella jännitteellä tarkoitetaan sitä, että kolmen vaiheen vektorisumma ei ole nolla. Tällöin sanotaan, että neutraalijännite ei ole nolla voltia.

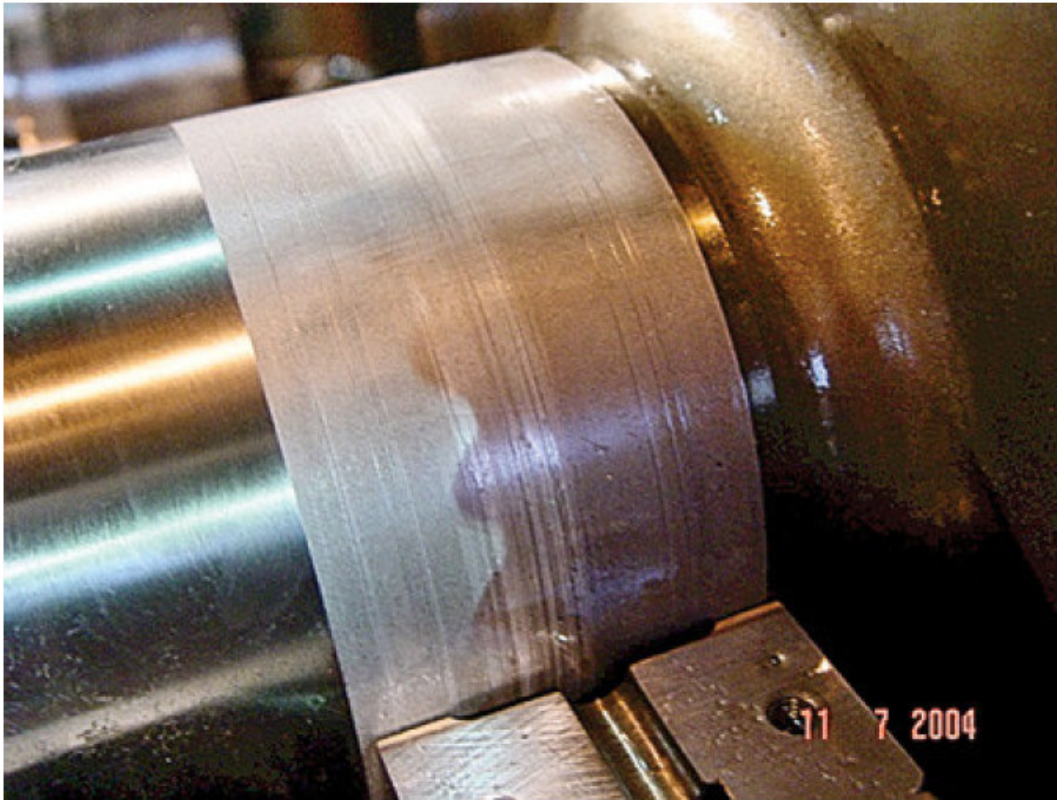
Jännite, joka tarvitaan laakerin yli, läpilyönnin tapahtumiseksi on suoraan verrannollinen laakeripintojen väliseen resistanssiin. Resistanssiin vaikuttaa muun muassa laakerin materiaali, pintojen karheus ja laakerissa oleva voiteluaine. Laakeripintojen välille muodostuu kaksi kondensaattoria, joiden varauksen purkaantuminen aiheuttaa läpilyönnin. Läpilyönnissä purkautunut varaus kulkee hyvin pienen kosketuspinnan kautta, mikä tarkoittaa suurta virrantiheyttä. Kuvassa 14 ja 15 on esitetty laakerivirtojen aiheuttamia uurteita laakeripintoihin. (Pyrhönen 2009: 132–133.)



Kuva 14. Laakerivirtojen aiheuttamia vaurioita laakeripinnassa (Kokko 2008: 44).

Laakerivirtojen aiheuttamia vaurioita esiintyy akselin laakereissa, vaihdelaatikoissa ja muissa paikoissa, josta akseliin varautunut sähköenergia voi purkautua. Kuvassa 14 nähdään tyypillistä ”pyykkilautakuvioita”, jota syntyy pyörimisnopeuden ollessa vakio. Laakerivirrat purkautuvat vakiokierrosnopeudella aina tasaisin väliajoin, jolloin ne muodostavat laakeripesään kuvan 14 kaltaiset vauriot. Kuvassa 15 on lähikuva tuulivoimageraattorin akselistä, jossa laakerivirrat ovat aiheuttaneet akselin hioutumista. (ABB Oy 1999: 5–8; Pyrhönen 2009: 133.)

Kuvan 15 alareunassa näkyy öljykanava. Laakerissa on käytetty jatkuvaa öljyvoitelua, joten kulumisen ei ole voinut aiheutua voitelun puutteesta. Lisäksi kulumisen laatu ei vaikuta normaalilta kulumiselta.



Kuva 15. Laakerivirtojen aiheuttamaa kulumista generaattorin akselissa. (Bothwell 2007: 70.)

Laakerivirtojen syntyminen

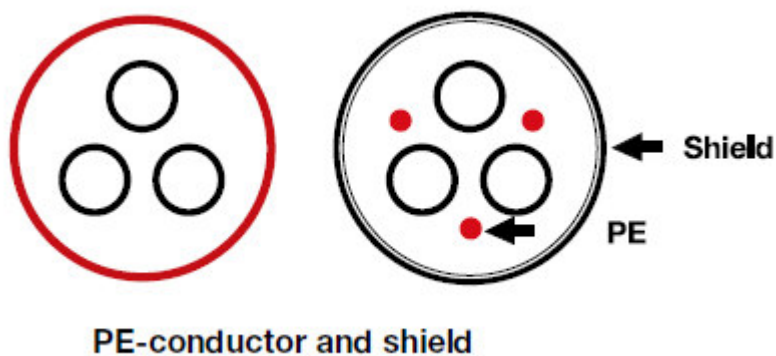
Laakerivirrat voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: kiertäviin ja ei-kiertäviin laakerivirtoihin. Joskus ei-kiertävät laakerivirrat jaetaan vielä akselinmaadoitusvirraksi ja kapasitiiviseksi purkausvirraksi. Molemmista aiheutuu samanlaiset ongelmat ja vauriot, mutta laakerivirtojen ehkäiseminen toteutetaan eri tavoin.

Ei-kiertävät laakerivirrat

Ei kiertävät laakerivirrat syntyvät potentiaalierojen noususta roottorin ja staattorikäämitysten välillä, staattorikäämityksen ja moottorin rungon välillä sekä moottorin rungon ja maan välillä.

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välinen syöttökaapeli tulisi aina olla symmetrinen, koska epäsymmetrisen kaapelin PE-johtimeen indusoituva jännite aiheuttaa ei-kiertäviä laakerivirtoja. Symmetrisessä kaapelissa PE-johdin tai -johtimet ovat symmetrisiä

kaikkiin kolmeen vaiheeseen nähden. Kuvassa 16 on esitetty symmetristen kaapeleiden tyyppiesimerkit. (Pyrhönen 2009: 135–136.)



Kuva 16. Taajuusmuuttajan ja sähkökoneen välinen kaapeli tulee olla symmetrinen laakerivirtojen ehkäisemiseksi (ABB Oy 2007: 2).

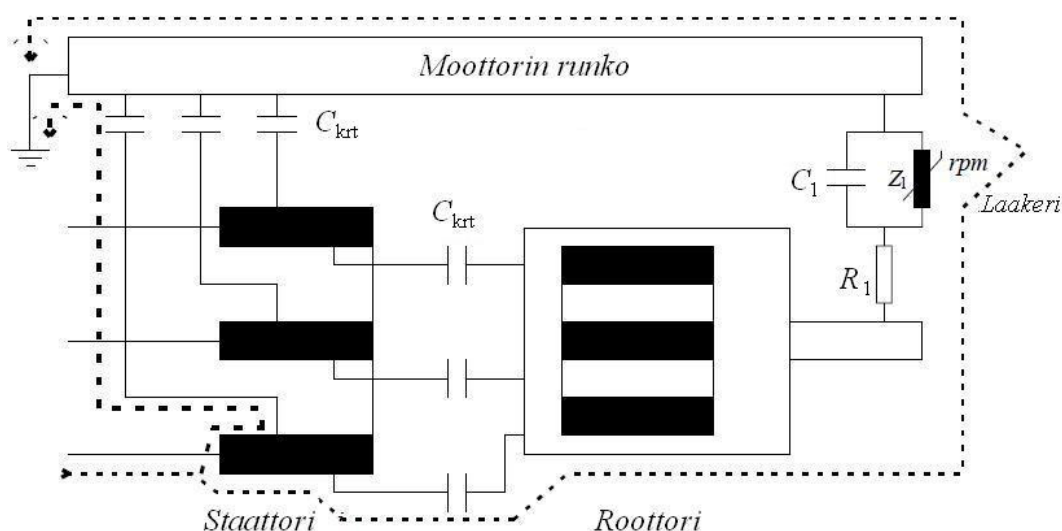
Kaapelointia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.4.

PE-johtimeen induoituneen jännitteen aiheuttaa taajuusmuuttajan syöttämä yhteismuotoinen jännite sekä suuria jännitepiikkejä sisältävät vaihejohtimien jännitteet. Nykyään taajuusmuuttajissa olevien IGBT (insulated gate bipolar transistor) -tehokomponenttien nousuaika voi olla noin 100 ns, jonka vuoksi vaihejohdin voi sisältää yhtälön 12 mukaan yli 10 MHz taajuuksia

$$f = \frac{1}{t}. \quad (12)$$

Kytettäessä PE-johdin ja armeeraus sähkökoneen ja taajuusmuuttajan runkoon nousee sähkökoneen rungon potentiaali maahan nähden. Mikäli armeeraus on liian suuri-impedanssinen kulkutie suuritaajuuselle virralle, virta alkaa kulkea myös generaattorin, moottorin tai niiden akseliin yhteydessä olevan koneen laakereiden läpi maahan. (Pyrhönen 2009: 135.) Kuvassa 19, beigellä ja numerolla 7, merkitty virta kuvaa kaapelin kautta syntyvää ei-kiertävää laakerivirtaa ja kuvassa vihreällä ja numerolla 3 on kuvattu armeerauksen kautta palaava suurtaajuinen virta.

Ei-kiertäviä laakerivirtoja syntyy myös sähkökoneen hajakapasitanssien aiheuttaman potentiaalın nousun takia. Suurtaajuisen jännitteen vaikuttaessa staattorikäämeissä, alkaa koneen staattorikäämityksen ja rungon sekä staattorikäämityksen ja roottorin välisissä hajakapasitansseissa kulkea virtaa. Hajakapasitanssia esiintyy jokaisessa sähkökoneessa ja se aiheuttaa koneen rungon potentiaalın nousua maahan nähden sekä roottorin potentiaalın nousun moottorin runkoon nähden. Kuvassa 17 on esitetty sähkömoottorin likimääräinen sijaiskytkentä suurtaajuisia komponenttia sisältävälle jännitteelle. Jännitteen sisältämien hyvin suurtaajuisien komponenttien vuoksi perinteinen sijaiskytkentä, jossa on pelkästään resistansseja ja induktansseja, ei päde taajuusmuuttajasovelluksissa. (Pyrhönen 2009: 136–137.)



C_{krt} staattorikäämityksen ja moottorin rungon välinen hajakapasitanssi

C_{krt} staattorikäämityksen ja roottorin välinen hajakapasitanssi

C_1 laakeripesän ja -kuulan välinen kapasitanssi

R_1 laakeripesän resistanssi

Z_1 laakeripesän epälineaarinen impedanssi

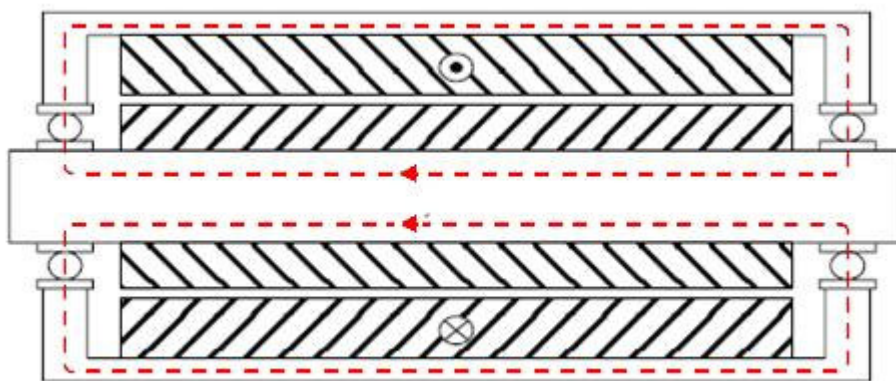
Kuva 17. Ei-kiertävien laakerivirtojen virtapiiri (Pyrhönen 2009: 137).

Kuvasta 17 nähdään, miten hajakapasitanssit yhdessä laakerin impedanssin kanssa muodostavat suljetun virtapiirin. Suljetussa piirissä kulkeva virta aiheuttaa vaurioita

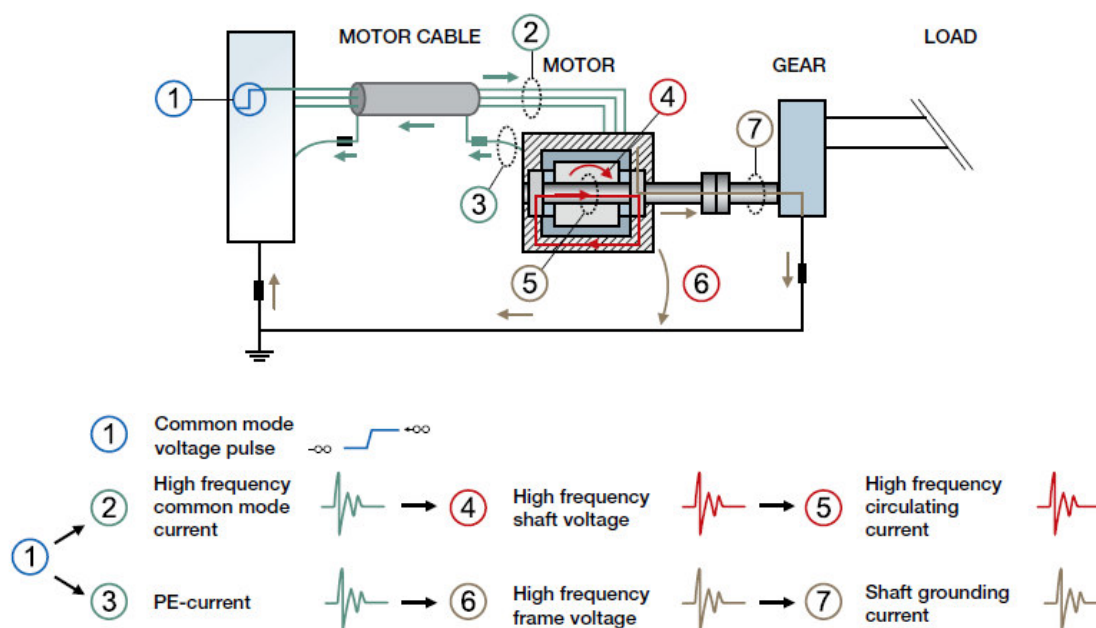
laakereille tai mahdolliselle vaihteistolle, riippuen suurtaajuisen virran kulkureitistä. Suurtaajuinen virta kulkee reittiä, jossa on pienin impedanssi.

Kiertävät laakerivirrat

Kiertävät laakerivirrat aiheutuvat staattorikäämyksessä kiertävästä suuritaajuisesta vuosta, joka indusoi suuritaajuisen jännitteen sähkökoneen akselipäiden välille. Suuritaajuinen vuo johtuu käämyksestä runkoon kulkeutuvien kapasitiivisten vuotovirtojen epäsymmetriasta. Kun akselien päiden välille indusoitunut jännite kasvaa riittävän suureksi, se ylittää laakeripesien impedanssin, jonka seurauksena vuota staattorissa kompensoiva virta alkaa kulkea akselin, laakerin ja staattorin rungon muodostamassa virtapiirissä. (ABB Oy 1999: 5–11.) Virtaa nimitetään suuritaajuiseksi kiertäväksi laakerivirraksi, ja se on esitetty kuvassa 18 ja 19.



Kuva 18. Kiertävien laakerivirran virtapiiri (Pyrhönen 2009: 138).



Kuva 19. Kaaviokuva kiertävästä virrasta ja akselinmaadoitusvirrasta (ABB Oy 2007: 1).

Laakerivirtojen pienentäminen

Laakerivirtoja voidaan helposti ehkäistä ja pienentää, mutta ei kuitenkaan täysin poistaa taajuusmuuttajakäytössä. Laakerivirrat on mahdollista kuitenkin saada sellaiselle tasolle, että niistä ei aiheudu ongelmia. Seuraavaksi on esitetty kuusi tapaa ehkäistä laakerivirtoja: (Pyrhönen 2009: 138–139.)

Maadoittaminen

Moottorin rungon potentiaalın nousua voidaan estää vain hyvällä kaapeloinnilla. Kaapelin armeeraus ja suojavaippa tulee kytkeä laitteiden runkoon siten, että liitoksen induktanssi on mahdollisimman pieni. Armeeraus tulee lisäksi kytkeä mahdollisimman lyhyellä vedolla PE-kiskoon. Tavoitteena on muodostaa Faradayn häkki taajuusmuuttajan ja generaattorin välille.

Lähtökuristin

Lähtökuristimella pyritään suodattamaan korkeat taajuudet. Hajakapasitanssien läpi kulkevat virrat pienenevät merkittävästi, kun käytetään sopivaa du/dt -suodatinta. Suodatin pienentää myös moottorikaapeliin indusoituvia jännitteitä. Lähtökuristimella

saadaan pienennettyä sekä kiertäviä että ei-kiertäviä laakerivirtoja. Suodattimia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.3.

Laakerin eristäminen

Kiertävät laakerivirrat voidaan estää eristämällä sähkökoneen toinen laakeri, mutta ei-kiertävien laakerivirtojen ehkäisemiseksi pitäisi eristää molemmat laakerit. Laakerin eristäminen voi kuitenkin aiheuttaa vaurioita generaattoriin liitettyyn vaihteistoon tai turbiinin kannatuslaakeriin.

Akselin maadoittaminen

Tehokkain tapa estää laakerivirtojen aiheuttamien laakerivaurioiden esiintymistä, on asentaa sähkökoneen akselille hiiliharjat. Hiiliharjat tulee asentaa molempien laakerien viereen, mahdollisimman lähelle. Hiiliharjat yhdistetään sähkökoneen runkoon mahdollisimman pieni-impedanssisesti. Hiiliharjat eivät vähennä laakerivirtoja, vaan estävät laakerivirtojen kulkeutumisen laakereiden läpi.

Sähkökoneeseen liitettävän laitteen galvaaninen erotus

Mikäli laakerivirrat kulkeutuvat sähkökoneeseen liitetyn laitteen kautta, voidaan laitteet erottaa galvaanisesti toisiinsa esimerkiksi kytkimellä. Tällaisen kytkimen löytäminen esimerkiksi vesivoimaturbiinin ja generaattorin välille voi olla kuitenkin hankalaa.

Johtavan laakerirasvan käyttö

Laakereissa voidaan käyttää voitelua, joka johtaa hyvin sähköä. Laakeripesien impedanssi pienenee, joten laakerivirta kulkee laakerin läpi aiheuttamatta vauriota laakerille. Menetelmää ei kuitenkaan ole juurikaan tutkittu.

4.2.3. Oikosulkuvirrat

Sähköverkon suojauksen kannalta on erittäin tärkeää, että vian sattuessa verkkoon syötetään riittävästi ja riittävän pitkän aikaa vikavirtaa. Vikavirta on tärkeää, koska suojauksen toiminta perustuu yleensä riittävän pitkäaikaiseen ylivirtaan.

Taajuusmuuttajakäytössä vikavirta määräytyy käytettävän laitteiston perusteella – eikä siis generaattorin. Usein taajuusmuuttaja mitoitetaan sopivaksi generaattorista saatavaan

sähkötehoon nähden, eikä sitä ole kustannusteknisesti kannattavaa ylimitoittaa. Tällöin suurin mahdollinen virta, joka voimalaitoksesta voidaan tuottaa on taajuusmuuttajan maksimivirta. Taajuusmuuttajalla ei myöskään voida syöttää suurinta mahdollista oikosulkuvirtaa kovin pitkää aikaa. Pieni oikosulkuvirta saattaa aiheuttaa kuitenkin ongelmia verkon suojauksessa.

4.2.4. Vaikutukset verkon mittaus- ja ohjauspulsseihin

Taajuusmuuttajien verkkoon syöttämän sähköön laatu saattaa suodattimista huolimatta olla heikko ja säröinen, joten verkossa olevat jännite-, virta- ja tehomittaukset saattavat antaa vääriä mittaustuloksia. Taajuusmuuttajissa käytetyistä suodattimista on kerrottu tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Taajuusmuuttajissa käytetään verkkopuolella du/dt -suotimia sekä yliaaltosuotimia. Verkkoon lisättyjen suotimien ongelma on se, että ne saattavat suodattaa verkosta myös sinne kuuluvia signaaleja. Sähköverkossa on perinteisesti siirretty signaaleja, jolla on hoidettu esimerkiksi tariffiohjaus sekä automaattisen mittarinluennan lukemien lähettäminen. Laitteet lähettävät ja vastaanottavat signaaleja yleensä verkon taajuutta suuremmalla taajuudella, jolloin verkkoon liitetyt suotimet saattavat suodattaa signaalit.

4.3. Taajuusmuuttajassa käytettävät suodattimet

Taajuusmuuttajan generaattoripuoli sisältää jyrkästi nousevia jännitepiikkejä, jotka ovat noin 1,35 kertaa verkkojännitteen suuruisia. Jännitepiikkejä esiintyy etenkin käytöissä, jotka ovat toteutettu ohjattavilla tehoelektroniikkakomponenteilla, kuten IGB-transistorilla.

Jännitepiikit saattavat voimistua vielä kaapelissa, josta johtuen pulssien jännite voi nousta lähes kaksinkertaiseksi. Jännitepulssien voimistuminen riippuu kaapeleiden ja liittimien vaimennus- ja heijastusominaisuuksista. Voimistuneet jännitepiikit rasittavat laitteiden ja kaapeleiden eristyksiä. Jännitteen heijastumista on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.4.2.

Nopeussäädettyjen käyttöjen korkea kytkentätaajuus sekä jännitepulssit, joiden nousuaika on hyvin lyhyt, voivat aiheuttaa laakerin kautta kulkevia virtapulsseja, jotka kuluttavat laakereita. Laakerin kautta kulkevia laakerivirtoja on esitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.2.

Jännitepiikkejä voidaan pienentää käyttämällä jännitteen nousunopeutta rajoittavia du/dt-suodattimia. Suodattimilla saadaan pienennettyä eristyksiin kohdistuvia rasitteita ja laakerivirtoja.

Laakerivaurioilta voidaan välttyä, kun kaapelit on valittu ja asennettu oikein, käytetään eritettyjä laakereita N-päässä (ei käyttöpää) sekä käytetään tarvittavia suodattimia. Generaattoripuolella suodattimia on yleisesti käytössä kahta eri mallia, joita käytetään joko yhdessä tai erikseen:

- du/dt-suodattimet, jotka suojaavat laitteiden ja kaapeleiden eristyksiä sekä pienentävät laakerivirtoja.
- common mode -suodattimet (CMF, common mode filter), joita käytetään erityisesti laakerivirtojen pienentämiseen.

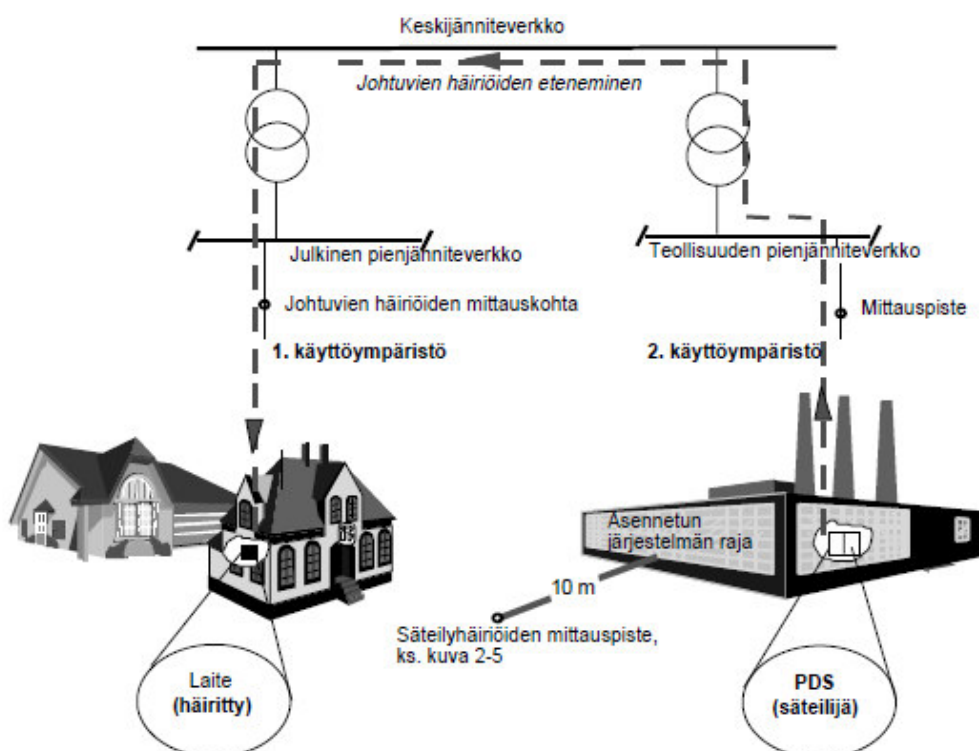
(ABB Oy 2005a: 59.)

Verkkopuolella taajuusmuuttajissa käytetään yleisesti LCL- ja EMC (electromagnetic compatibility) -suodattimia. LCL-verkkosuotimen tehtävä on vähentää verkkoon syötettyjä häiriöitä ja harmonisia yliaaltoja ja EMC-suodattimen tehtävänä on pienentää taajuusmuuttajan aiheuttamia radiotaajuisia häiriöitä.

4.3.1. EMC-suodatin

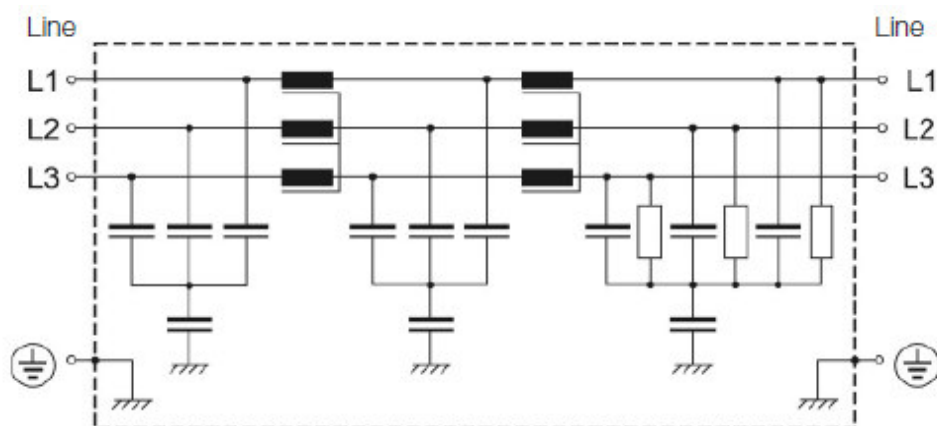
EMC tarkoittaa sähkö- ja elektroniikkalaitteiden yhteensopivuutta eli laitteiden kykyä toimia häiriöittä sähkömagneettisessa ympäristössä. Muuttuvanopeuksisten käyttöjen on katsottu aiheuttavan sähkömagneettista häiriötä. EMC-yhteensopivuuteen kuuluvat kaikki osat, jotka liittyvät PDS (power drive system) -käyttöihin. Standardissa SFS-EN 61800-3 on esitetty nopeussäädettyjen käyttöjen EMC-vaatimukset. (ABB Oy 2000: 8.)

Taajuusmuuttajissa käytetty EMC-suodatin on RFI (radio-frequency interference) -tyyppinen, joka suodattaa radiotaajuisia häiriöitä. RFI-suodatin tarvitaan aina liitettäessä PDS-käyttö julkiseen pienjänniteverkkoon eli 1. käyttöympäristöön. EMC-suotimen käyttöä suositellaan käytettäväksi myös 2. käyttöympäristössä, jossa PDS-laitteisto liitetään teollisuuden omaan pienjänniteverkkoon. (ABB Oy 2000: 17.) Käyttöympäristöjen määritelmät on esitetty kuvassa 20.

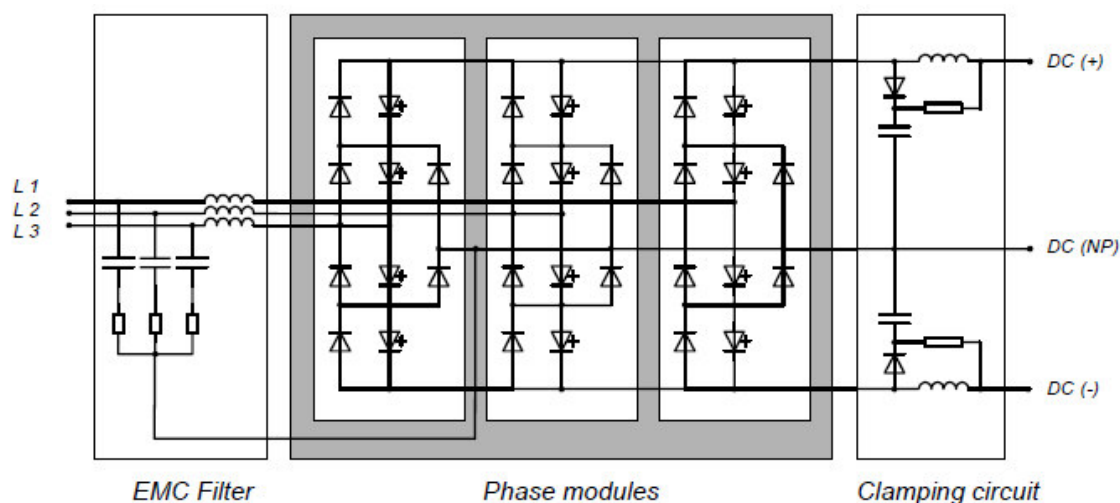


Kuva 20. Käyttöympäristöt ja häiriöiden eteneminen. (ABB Oy 2000: 12.)

Vesivoimalaitoksilla käytetyissä ABB Oy:n valmistamissa ACS800-17 taajuusmuuttajissa on vakiona 2. käyttöympäristöön soveltuva EMC-suodatin ja lisävarusteena mahdollisuus saada 1. käyttöympäristöön soveltuva EMC-suodatin (ABB Oy 2005a). Kuvassa 21 on esimerkki EMC-suodattimen piirikaaviosta. Kuvan 21 EMC-suodatinta käytetään tyypillisesti taajuusmuuttajissa, jotka toimivat pienjännitteellä. Kuvassa 22 on esitetty 3-tasoisissa taajuusmuuttajissa käytössä oleva EMC-suodattimen piirikaavio. Komitasotekniikkaa käytetään pääasiassa keskijännitetaajuusmuuttajissa.



Kuva 21. Esimerkki EMC-suotimen piirikaaviosta. (ABB Oy 2008a: 22.)

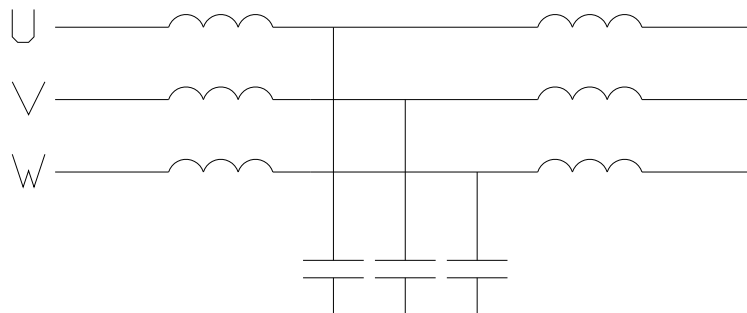


Kuva 22. Keskijännitetaajuusmuuttajissa käytetyn EMC-suodattimen piirikaavio. (ABB Oy 2004: 60.)

4.3.2. LCL-verkkosuodatin

Muuttuvanopeuksiset taajuusmuuttajakäytöt tuottavat verkkoon harmonisia yliaaltoja, joita pyritään suodattamaan verkkosuodattimella. Verkkosuodatin voi olla pelkkä kuristin (L-suodatin), mutta PWM-tyyppisissä taajuusmuuttajissa käytetään LCL-suodattimia. LCL-suodattimessa voidaan käyttää pienempiä kuristimia kuin L-suodattimessa, lisäksi LCL-suodattimella voidaan tarvittaessa vaimentaa kytkentätaajuudesta aiheutuvia harmonisia yliaaltoja. LCL-suodattimen oskilloiminen suodattimen resonanssitaajuudella voi kuitenkin joissain tilanteissa aiheuttaa ongelmia,

joten se tulee ottaa huomioon suodatinta suunnitellessa. (Dannehl ym. 2007: 1.)
Kuvassa 23 on esitetty LCL-suodattimen piirikaavio.



Kuva 23. LCL-suotimen piirikaavio. (Dannehl ym. 2007: 2.)

4.3.3. du/dt-suodatin

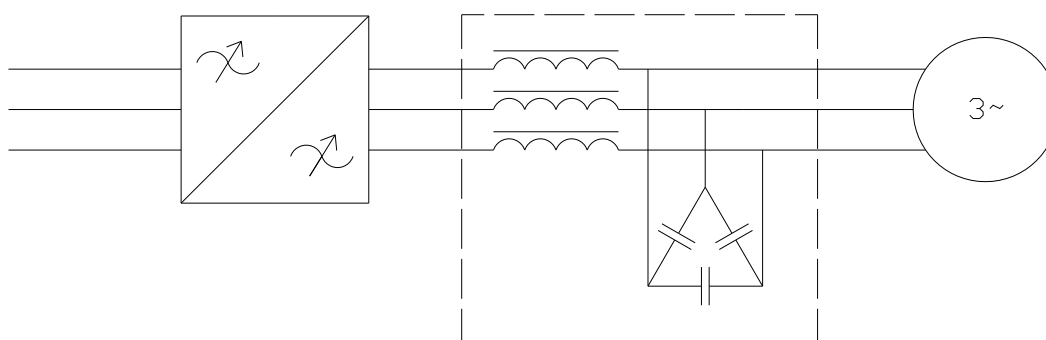
Jännitepiikit, joiden nousunopeus (du/dt) on korkea vahingoittavat generaattori eristyksiä sekä aiheuttavat ylijännitteitä pitkissä kaapeleissa. Jännitepiikkejä voidaan suodattaa asentamalla kaapelin taajuusmuuttajan puoleiseen päähän passiivinen du/dt -suodatin. (Habetler ym. 1999: 1279.)

du/dt -suodattimen tehtävänä on suodattaa nopeat jännitepiikit estämällä liian nopean jännitteenousun. Jännitepiikkien suodattaminen vähentää generaattorin käämityksen räsistystä sekä pienentää yhteismuotoista virtaa ja pienentää siten laakerivirtoja. (Ikäheimo ym. 2007: 4; Ström ym. 2009; 2.)

du/dt -suodattimina käytetään yleisesti yksinkertaista ja kustannustehokasta LC-tyyppistä suodatinta, mutta muitakin ratkaisuja saattaa esiintyä. LC-suodattimien ongelmaiseksi voi muodostua ylijännitteiden esiintyminen resonanssitaajuudella. Suodattimet suunnitellaankin yleensä siten, että niiden resonanssitaajuus on selvästi pienempi kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuus tai niihin lisätään vaimennuspiiri, jolla resonanssi-ilmiötä heikennetään. (Habetler ym. 1999: 1279.)

4.3.4. Sinisuodatin

Sinisuodatin on LC-tyyppinen alipäästösuodatin, joka vähentää suurtaajuisia komponentteja taajuusmuuttajan generaattoripuolella. Sinisuodatin koostuu yksi- tai kolmivaiheisesta kuristimesta sekä tähteen tai kolmioon kytketyistä kondensaattoreista. Kuvassa 24 on esitetty erään sini-suotimen piirikaavio.



Kuva 24. Sini-suodattimen piirikaavio. (ABB Oy 2008b: 13.)

ABB Oy:n sinisuodattimen käyttöohjeessa mainitaan, että sinisuodatinta käytettäessä käytetään skalaariohjausta DTC (direct torque control) -ohjauksen sijaan.

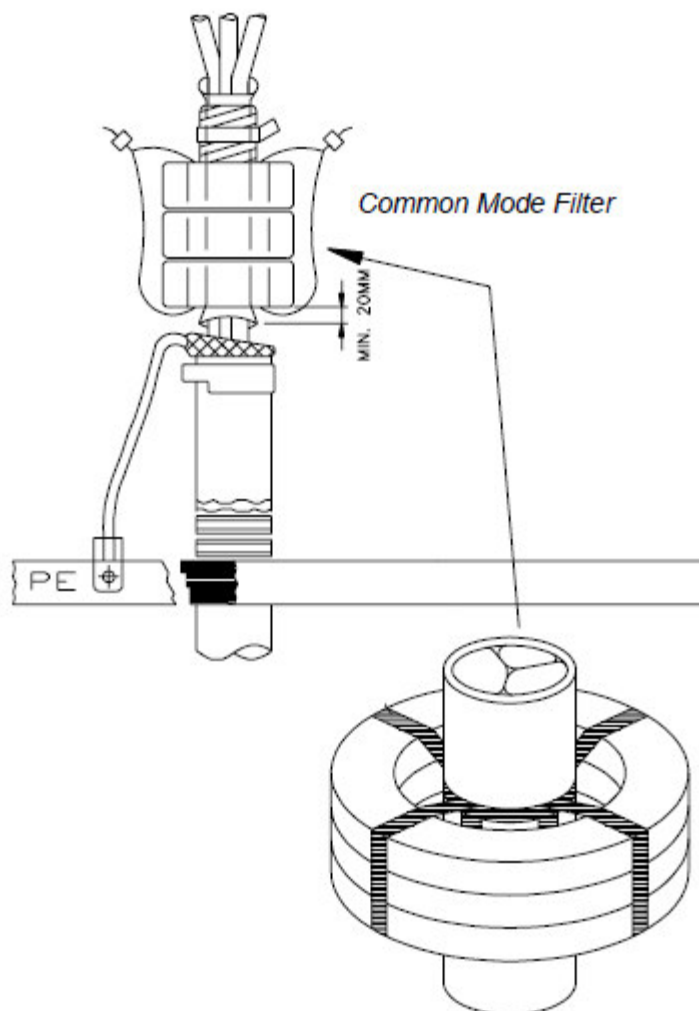
Sinisuodatinta käytetään laakerivirtojen pienentämiseen sekä silloin, kun taajuusmuuttajan ja generaattorin välinen etäisyys on pitkä. Sinisuodattimen ja generaattorin välisen kaapelin pituutta ei ole rajoitettu. Sinisuodatin alentaa kiertäviä sekä akselinmaadoitusvirrasta aiheutuvia laakerivirtoja. (ABB 2008b: 13–14.)

4.3.5. Yhteismuotoisen virran -suodatin

PWM-tyyppisen taajuusmuuttajan aiheuttama yhteismuotoinen jännite on yksi tärkeimmistä laakerivirtojen aiheuttajista (Pyrhönen 2009: 132), joten yhteismuotoisen virran -suodattimen käyttö muuttuvanopeuksisen generaattorin kanssa on perusteltua.

Common mode, eli yhteismuotoisen jännitteen ja virran suodatin, koostuu toroidisydämistä, jotka on asennettu generaattorikaapeleiden ympärille tai taajuusmuuttajan sisällä oleviin virtakiskoihin. Common mode -suodattimet pienentävät

laakerivirtoja suodattamalla yhteismuotoista virtaa.(Ikäheimo ym. 2007: 4.) Common mode -suodatin on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Taajuusmuuttajassa käytetty common mode -suodatin (ABB Oy 2003: 71).

4.4. Taajuusmuuttajan kaapelointi

Taajuusmuuttajan kaapelointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Taajuusmuuttajakäytössä kaapelin valinta ei rajoitu pelkästään poikkipinnan määrittämiseen, vaan huomioon tulee ottaa myös kaapelityypit ja -reitit. Oikeilla kaapelityypeillä ja -reiteillä voidaan ehkäistä merkittävästi taajuusmuuttajan aiheuttamia haittavaikutuksia, kuten laakerivirtoja.

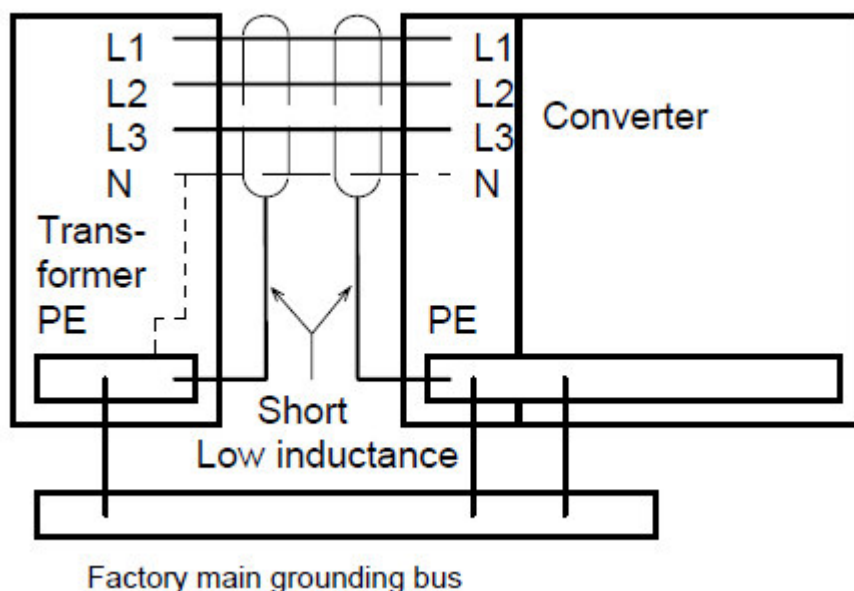
Kaapelissa esiintyvien suurtaajuisten jännitepiikkien takia, kaapelointi on erityisen tärkeää taajuusmuuttajan ja generaattorin välillä. Suurtaajuiset jännitepiikit aiheuttavat laakerivirtoja sekä EMC-häiriötä.

4.4.1. Taajuusmuuttajan verkkokaapelointi

Verkkokaapelointiin voidaan käyttää nelijohdinjärjestelmää, mutta suojatun ja symmetrisen kaapelin käyttö on suositeltavaa. (ABB Oy 2009a: 43.) Verkkokaapelointi voidaan toteuttaa myös käyttämällä kuparikiskoja, kaapelikiskoja tai kaapeleilla.

Verkkokaapelointi 3-johtimisella symmetrisellä kaapelilla

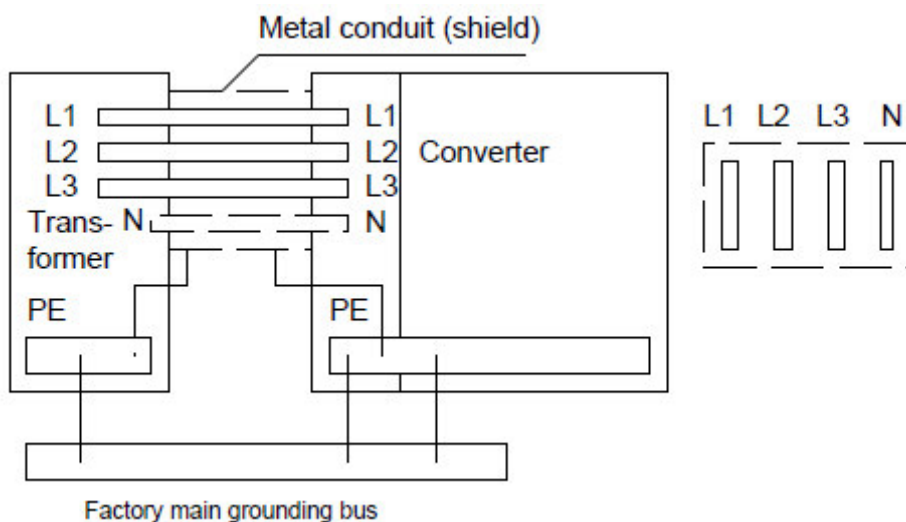
Symmetrisen ja suojatun kaapelin käyttö on suositeltavaa, mutta verkkopuolella ei pakollista. Symmetrisen kaapelin suojavaippa kytketään molemmista päistä PE-kiskoon. Riittävän virtakestoisuuden saavuttamiseksi symmetrisiä kaapeleita voidaan kytkeä useita rinnakkain. (ABB Oy 2005b: 3-1, 3-2.) Kuvassa 26 on esitetty symmetrisen kaapelin kytkentä.



Kuva 26. Symmetrisen kaapelin käyttö verkkokaapelina. (ABB Oy 2005b: 3-2.)

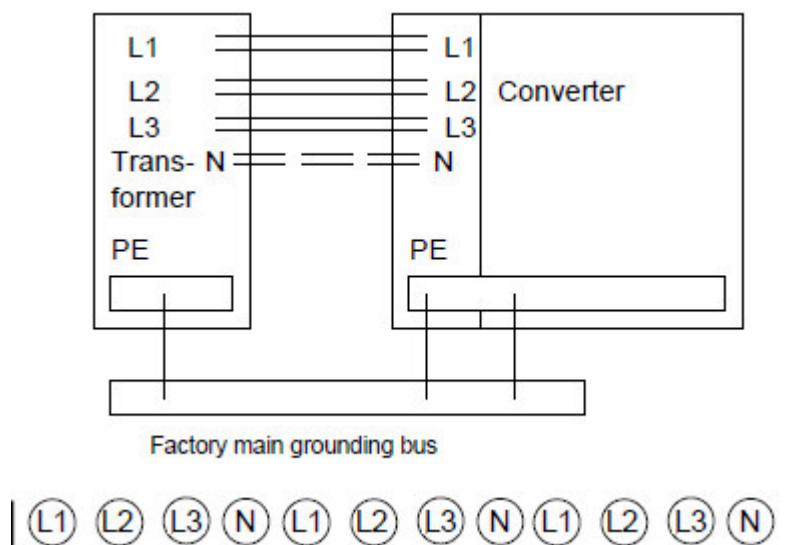
Verkkokaapelointi kiskoilla tai kaapelikiskoilla

Kiskostoa ja kaapelikiskostoa voidaan käyttää verkkomuuntajan ja taajuusmuuttajan väliseen kaapelointiin. Kiskostojen metalliset suojat tulee kytkeä PE-kiskoon vähintään toisesta päästään. (ABB Y 2005b: 3-3.) Kuvassa 27 on esitetty kaapeloinnin toteuttaminen kiskostolla.



Kuva 27. Verkkokaapeloinnin toteuttaminen kiskostolla. (ABB Oy 2005b: 3-3.)

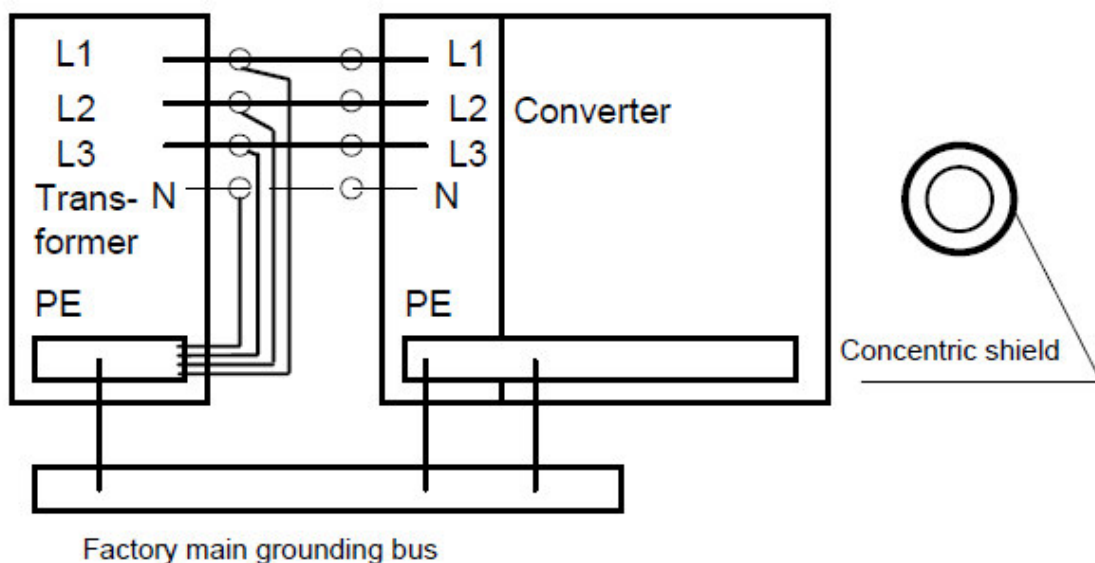
Kaapelikiskostossa vaihejohtimina on rinnakkain asennettuja yksijohtimisia kaapeleita. Kaapelikiskoston etuja tavalliseen kiskostoon nähden on erikseen asennettujen johtimien parempi jäähtytettävyys ja pienempi reaktanssi, joka mahdollistaa pitemmät kaapeloinnit. Mahdollisimman tasaisen virranjakelun saavuttamiseksi kaapelikiskot tulee asentaa kuvan 28 esitettyyn järjestykseen. (ABB Oy 2005b: 3-3, 3-4.)



Kuva 28. Verkko-kaapelointi kaapelikiskoilla. (ABB Oy 2005b: 3-3, 3-4.)

Verkon ja taajuusmuuttajan välinen 1-johtiminen suojavaipalla eristetty kaapeli

Verkon ja taajuusmuuttajan välinen kaapelointi toteutetaan usein siten, että jokaisella vaiheella on oma kaapelinsa. Kaapeli, jossa on johtava suojavaippa tai armeeraus, kytketään eristämällä suojavaipan taajuusmuuttajan puoleiset päät eikä niitä kytketä mihinkään ja verkon puoleiset päät kytketään PE-kiskoon. Kaapeleissa kulkeva vaihevirta indusoi jännitteen suojavaippaan. Suojavaippaan indusoitunut jännite aiheuttaa suojavaipassa kiertävän virran, mikäli se on kytketty molemmista päistään PE-kiskoon. PE-kiskossa kiertävä virta saattaa aiheuttaa laitteiden runkoon vaarallisia potentiaalieroja. Suositeltava kaapelointitapa on esitetty kuvassa 29. (ABB Oy 2005b: 3-4.)



Kuva 29. Taajuusmuuttajan liittäminen verkkoon 1-vaiheisella kaapelilla, jossa johtava suojavaippa (ABB 2005b: 3-4).

4.4.2. Generaattorin kaapelointi

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välisellä kaapeloinnilla voidaan vaikuttaa laakerivirtoihin, jännitteiden heijastumiseen ja sähkömagneettisiin häiriöihin (EMC). Kaikki mainitut ongelmat aiheutuvat PWM-taajuusmuuttajassa käytettyjen tehokomponenttien korkeasta kytkentätaajuudesta sekä jännitepulssien nopeasta nousunopeudesta. IGB-transistorin kytkentätaajuus on 2–20 kHz ja jännitepulssien nousunopeus (du/dt) noin 10–0,1 μs . Tutkimusten mukaan kaapeli, jossa on yhtenäinen johtava ja poimitettu alumiininen vaippa, on suositeltavin vaihtoehto. (Bartolucci & Finke 2001: 415.)

Kappaleen alussa esitetään kaapelointiin vaikuttavat teorit ja teoreettiset suositukset ja kappaleen lopuksi tarkastellaan ABB Oy:n suosituksia.

Kaapelin symmetrisyys, suojavaippa ja maadoitusjohtimet

Laakerivirtoja aiheuttavaa yhteismuotoista virtaa voidaan ehkäistä käyttämällä mahdollisimman symmetristä kaapelia. Symmetrinen kaapeli koostuu kolmesta samankokoisesta eristetystä johtimesta, jotka on kaapeloitu kolmion muotoisesti yhteen.

Isoissa kaapeleissa, joissa vaihejohtimen etäisyys maadoitusjohtimesta saattaa olla suurempi kuin vaihejohtimien välinen etäisyys, on maadoitusjohtimia syytä olla useampia. (Bartolucci & Finke 2001: 415.) Amperen lain mukaan johtimessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa magneettikentän ja Faradayn lain mukaan muuttuva magneettikenttä aiheuttaa jännitteen suljetussa virtapiirissä. Epäsymmetrinen kaapelirakenne aiheuttaa sen, että vaihejohtimet eivät kumoakaan toistensa magneettikenttiä täydellisesti, joka aiheuttaa hajavuota. Faradayn induktiolain mukaan syntynyt hajavuo indusoi jännitteen maadoitusjohtimeen, jossa alkaa kulkea virta. Maadoitusjohtimeen syntynyttä virtaa kutsutaan yhteismuotoiseksi virraksi, joka kulkee maadoitusjohtimesta taajuusmuuttajan suojamaadoitukseen. Laakerivirtojen ehkäisemiseksi tulisi käyttää mahdollisimman symmetristä kaapelia jossa ei synny hajavuota. Symmetrinen kaapeli, jossa on kolme vaihejohtinta ja kolme maadoitusjohtinta kumoaa hajavuota paremmin kuin kaapeli, jossa on vain yksi maadoitusjohtin. (Mercier & Cooper 2002: 3.) Bartoluccin ja Finken (2001: 415) mukaan kaapelissa tulisi olla alumiininen suojavaippa, joka on aukoton, yhtenäinen, aallotettu ja hyvin johtava. Alumiininen suojavaippa yhdessä rinnakkaisten maadoituskaapelien kanssa parantaa maadoitusta, jonka vuoksi kapasitiivisten virtojen yhteys maahan paranee ja laakerivirrat pienenee (Bartolucci & Finke 2001: 416).

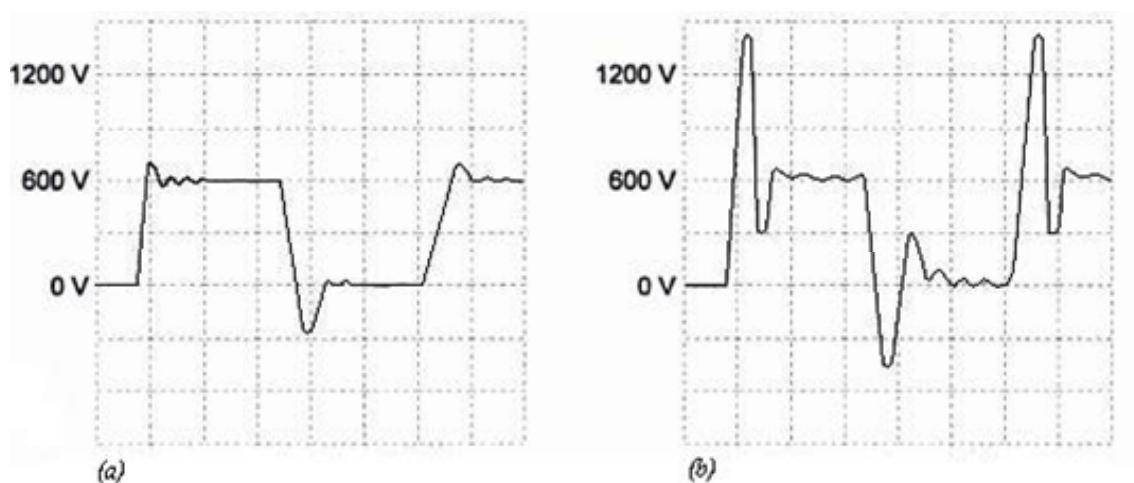
Jännitteen heijastuminen

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välisessä kaapelissa esiintyy jännitteen heijastumista, joka liittyy jännitepulssien suuruuteen ja nousunopeuteen sekä kaapelin ominaisimpedanssiin (characteristic impedance) ja generaattorin aaltoimpedanssiin (surge impedance). Kaapelien ominaisimpedanssi on suure, joka lasketaan kaapelin keskinäisinduktanssin L_0 [H/km] ja keskinäiskapasitanssin C_0 [F/km] perusteella. Ominaisimpedanssi ei ole riippuvainen kaapelin pituudesta. (Bartolucci & Finke 2001: 416.)

Taajuusmuuttajan kytkentätaajuudesta johtuen generaattorin syöttämä jännite koostuu jännitepulssista. Pulssien nousuaika vaihtelee 10–0,1 μ s välillä riippuen taajuusmuuttajan ja generaattorin koosta. Kaapelin liittimistä aiheutuu jännitteen heijastumista, joka aiheutuu kaapelin ja generaattorin aaltoimpedanssien

yhteensopimattomuudesta. Heijastuneen jänniteaallon suuruus riippuu siitä, miten hyvin kaapelin aaltoimpedanssi vastaa generaattorin aaltoimpedanssia. Noin 100 kW moottorin aaltoimpedanssi on noin 800Ω ja noin 400 kW moottorin aaltoimpedanssi noin 400Ω . (Bartolucci & Finke 2001: 416.) Kaapeleiden aaltoimpedanssi on muutamia kymmeniä ohmeja, esimerkiksi MCMK 3x185/95 aaltoimpedanssi laskettuna yhtälöllä 14 on noin 17Ω .

Heijastuneet jännitteet kulkevat kaapelissa edestakaisin muutamassa nanosekunnissa. Heijastuneet jännitteet voimistavat toisiaan siten, että jännitepiikin suuruus voi olla yli kaksinkertainen taajuusmuuttajan välipiiriin verrattuna. Jännitepulssin voimistuminen on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Pitkän kaapelin vaikutus jännitepulssiin. Kuvassa a on jännitepulssi kaapelin alkupäässä ja b kuvassa 100 m pitkän kaapelin loppupäässä (Barnes 2003: 134).

Heijastumista tapahtuu, mikäli kaapelin ja generaattorin aaltoimpedanssit ovat eri suuria. (Bartolucci & Finke 2001: 417.) Kaapelin pituudella on vaikutusta heijastuneen jännitteen tasoon. Kaapelin kriittisellä pituudella (cable critical length) ilmoitetaan kaapelin pituus, jossa jännitepulssin suuruus voi kaksinkertaistua, eli tapahtuu täydellinen heijastuminen. Kriittinen pituus voidaan laskea

$$L_{Cable} = \frac{vt_r}{2}, \quad (13)$$

missä

L_{Cable} on kaapelin lyhin pituus, jossa täydellinen heijastuminen voi tapahtua [m],

v on aallon etenemisnopeus, tyypillisesti noin puolet valonnopeudesta 150 m/ μ s,

t_r on pulssin nousunopeus [μ s]. IGBT suuntaajissa nousunopeus on noin 0,05–0,2 μ s välillä.

Laskettaessa kaapelin kriittinen pituus käyttäen edellä annettuja IGBT:n nousunopeuksia saadaan 3,75–15,00 m. (Mercier & Cooper 2002: 5.)

Kaapelin aaltoimpedanssi voidaan laskea, kun tiedetään kaapelin induktanssi L_0 [mH/km] ja käyttökapasitanssi C_0 [μ F/km]. Kaapelin aaltoimpedanssi [Ω] lasketaan

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (14)$$

Kun tiedetään kaapelin ja generaattorin aaltoimpedanssi, voidaan laskea heijastuskertoimen (reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (15)$$

missä Z_L on generaattorin aaltoimpedanssi [Ω], Z_0 on kaapelin aaltoimpedanssi [Ω]. Γ on laaduton. Heijastuskertoimen avulla voidaan arvioida jänniteheijastumisen aiheuttaman jännitepulssin suuruutta

$$V_r = (1 + \Gamma)V_{bus}, \quad (16)$$

missä V_r on jännitepulssin suuruus [V] ja V_{bus} on taajuusmuuttajan välijännitteen suuruus [V]. Tyypillinen heijastuskertoimen arvo on noin yksi, jolloin jännitepulssin arvo voi kaksinkertaistua välipiirin jännitteeseen verrattuna. (Bartolucci & Finke 2001: 417.)

Suuritehoisissa sovelluksissa voidaan käyttää useita rinnakkaisia kaapeleita. Rinnakkaisten kaapelien käyttö johtaa siihen, että kaapelien aaltoimpedanssi laskee entisestään. Usein kaapelin impedanssi on pienempi kuin generaattorin, jonka vuoksi yhteensopimattomuus lisääntyy kaapelien määrän kasvaessa. Käytettäessä kahta rinnakkaista kaapelia on aaltoimpedanssi puolet yhden kaapelin impedanssista ja kolmannes, kun käytössä on kolme rinnakkaista kaapelia. (Bartolucci & Finke 2001: 418.)

Jännitteen heijastumisen estämiseksi kaapelin tulisi olla mahdollisimman lyhyt, mielellään lyhyempi kuin kaapelin kriittinen pituus. Kaapelin ja generaattorin sovitus tulisi tehdä siten, että yhtälössä 15 esitetty heijastuskerroin olisi mahdollisimman pieni. Heijastuskerroin on pienimmillään silloin kun kaapelin ja generaattorin aaltoimpedanssien arvot ovat mahdollisimman samansuuruiset. Jännitteen heijastumisen aiheuttamien jännitepiikkien takia taajuusmuuttajan kanssa käytettyjen kaapeleiden tulee olla luokiteltu suuremmille jännitteille kuin taajuusmuuttajan nimellisyännite. (Bartolucci & Finke 2001: 418). ABB Oy (2006: 15) ohjeistaa, että 600 VAC:n kaapeli hyväksytään enintään 500 VAC:n taajuusmuuttajiin ja 690 VAC:n laitteiden kanssa tulee käyttää 1 kV:n kaapelia.

Sähkömagneettinen häiriö, EMI

EMI (electromagnetic interference) eli sähkömagneettinen häiriö aiheuttaa ongelmia elektroniikalle, kommunikaatiolle, ohjelmoitavalle logiikalle, ohjaukselle sekä maadoituspiireille. Sähkömagneettinen häiriö indusoi jännitteitä ja virtoja, jonka vuoksi viereiset laitteet muodostavat kapasitiivisen yhteyden keskenään ja niihin aiheutuu häiriöitä. (Bartolucci & Finke 2001: 418.)

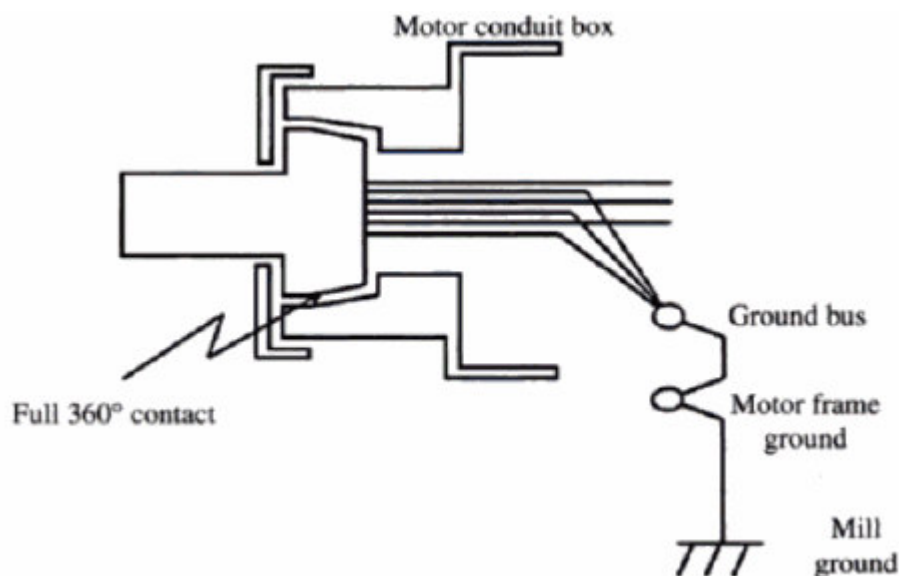
Lähekkäin asennetut kaapelit saattavat muodostaa keskenään kapasitiivisen yhteyden, mikäli kaapeleissa ei ole riittävää suojausta sähkömagneettihäiriötä vastaan. Riittävä suoja suurtaajuisia sähkö- ja magneettikenttiä vastaan on hyvin maadoitettu pieni-impedanssinen suojavaippa. Tutkimuksissa on todettu parhaimmaksi EMI-häiriöitä vastaan kaapeli, jossa on kolme maadoitus- ja vaihejohdinta sekä kaapelin ympärillä yhtenäinen aallotettu alumiinivaippa. Laakerivirtojen ehkäisemiseksi suositellaan samanlaista kaapelia.

Tärkein asia on kaapelin maadoitusjohtimien sekä suojavaipan maadoittaminen. Maadoituksen tulisi olla mahdollisimman pieni-impedanssinen, että suurtaajuiset jännite- ja virtapiikit maadoittuvat tehokkaasti. Generaattorikaapeli tulee maadoittaa sekä taajuusmuuttajan että generaattorin päästä. Suositeltava kaapelityyppi on esitetty kuvassa 31. (Bartolucci & Finke 2001: 420.)



Kuva 31. Taajuusmuuttajan ja generaattorin välille suositeltu kaapelityyppi.
(Bartolucci & Finke 2001: 420.)

Sähkömagneettisten häiriöiden ehkäisemiseksi kaapelin maadoitus tulee tehdä siten, että vaippa on maadoitettu 360° . Generaattorin liitäntäkotelon maadoituskisko liitetään generaattorin rungon maadoitusliittimeen eristetyllä maadoitusjohtimella, jonka virransiirtokapasiteetti on yhtä suuri kuin kaapelin maadoitusjohtimien yhteenlaskettu kapasiteetti. Suositeltu liitostapa on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Kaapelin maadoituksen ja suojavaipan kytkeminen. (Kiameh 2003: 10.18.)

ABB Oy:n suositukset generaattorikaapelointiin

ABB Oy:n suositukset vastaavat täysin edellä esitettyjen tieteellisten julkaisujen suosituksia.

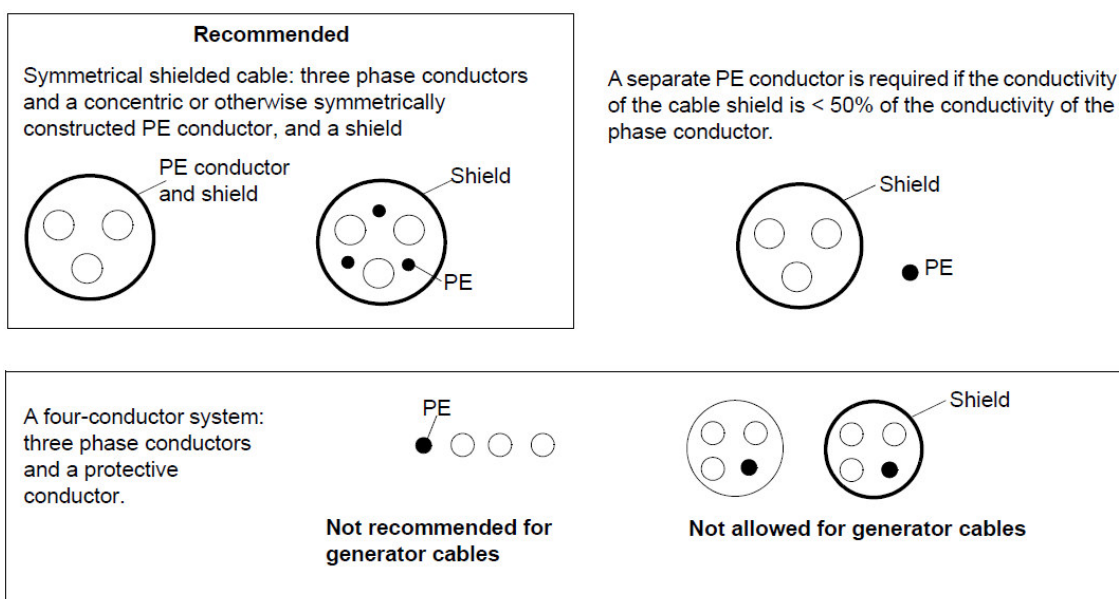
Generaattoreille suositellaan symmetristä, suojavaipallista kaapelia. Suojavaippaa ei kuitenkaan tarvita, jos kaapeli asennetaan yhtenäiseen metalliputkeen. Mikäli käytetään nelijohdinjärjestelmää, jännite voi indusoitua erilliseen PE-johtimeen. Indusoitunut jännite nostaa generaattorin rungon potentiaalia, joka voi aiheuttaa laakerivirtoja. Verrattuna nelijohdinjärjestelmään, symmetrinen kaapeli vähentää sähkömagneettista häiriötä koko järjestelmässä sekä generaattorin laakerivirtoja ja vaurioita. Nelijohdinjärjestelmä on sallittu taajuusmuuttajan verkkokaapeloinnissa, mutta siihenkin suositellaan symmetristä ja suojattua kaapelia. Suojavaipan johtokyky tulisi olla vähintään 1/10 vaihejohtimen johtokyvystä. Oikein mitoitettu suojavaippa vähentää tehokkaasti säteileviä ja johtuvia radiotaajuisia häiriöitä. Häiriösäteily ja laakerivirrat ovat sitä pienempiä, mitä parempi ja tiukempi suojavaippa on. PE-johtimen tulee täyttää IEC (International Electrotechnical Commission) 60439-1 vaatimukset. Vaatimuksen mukaiset suojajohtimien koot on esitetty taulukossa 5. Taulukossa esitetyt mitat pätevät,

kun suojajohdin on samaa materiaalia kuin vaihejohtimet. Taulukkoa voidaan soveltaa myös nelijohdinjärjestelmässä. (ABB Oy 2009a: 43–45.)

Taulukko 5. Maadoitusjohtimen koko suhteessa vaihejohtimien poikkipinta-alaan. (ABB Oy 2009a: 44.)

Vaihejohtimien poikkipinta-ala A [mm ²]	Vastaavan suojajohtimen minipoikkipinta-ala A_p [mm ²]
$A \leq 16$	A
$16 < A \leq 35$	16
$35 < A \leq 400$	$A/2$
$400 < A \leq 800$	200
$800 < A$	$A/4$

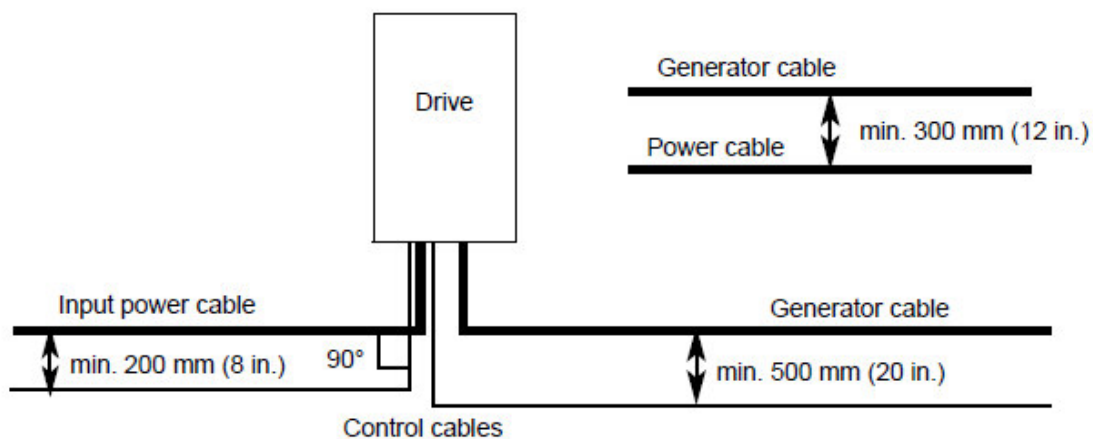
Sähkömagneettisten häiriöiden ja kapasitiivisten hajavirtojen vähentämiseksi, generaattorikaapeli sekä PE-maadoituspunos (kierretty suojavaippa) on pidettävä mahdollisimman lyhyenä. ABB Oy:n kaapelisuositukset generaattorikaapelointiin on esitetty kuvassa 33. (ABB Oy 2009a: 44.)



Kuva 33. Generaattorikaapeleista annetut suositukset. (ABB Oy 2009a: 44.)

Kaapeli on asennettava siten, että kaapelin suojavaipan maadoitus on 360°, jonka jälkeen se kierretään nippuun ja yhdistetään vielä PE-kiskoon (kuva 32). Jokainen

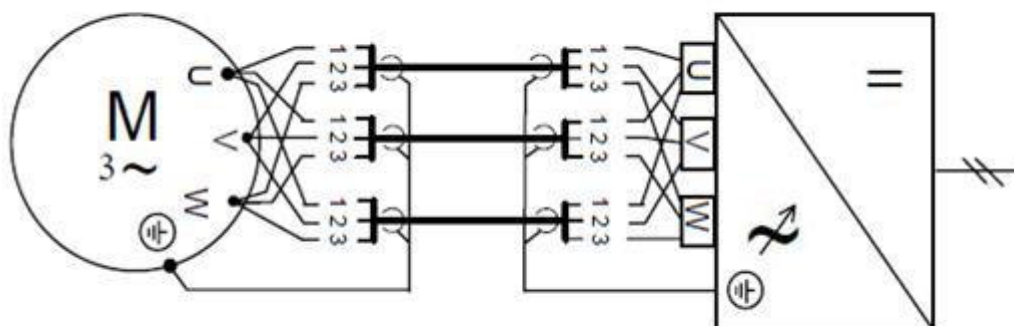
erillinen PE-johdin on liitettävä PE-kiskoon. (ABB Oy 2009a: 55) Kaapelit tulee asentaa tietylle etäisyydelle toisistaan. Etäisyydet on esitetty kuvassa 34.



Käytettäessä erillistä suojajohdinta (PE) sen etäisyys vaihejohtimiin tulee olla vähintään 300 mm ja suojajohtimien välinen etäisyys vähintään 150 mm. (ABB Oy 2005b: 3-8-3-9.)

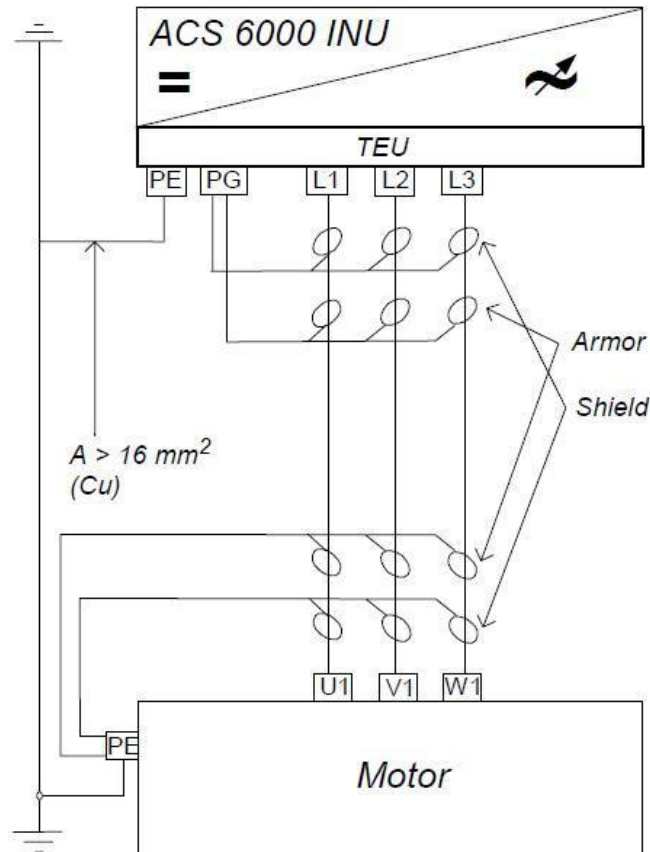
Kuva 34. Taajuusmuuttajan kaapeleiden väliset etäisyydet. (ABB Oy 2009a: 50.)

Kaapeloitaessa sovellusta, joissa on käytössä suuret tehot, tulee käyttää useaa rinnakkaista symmetristä kaapelia. (ABB Oy 2005b: 3-7.) Kuvassa 35 on esitetty useamman symmetrisen kaapelin kytkentä.



Kuva 35. Symmetrinen kaapelointi suuritehoisiin sovelluksiin. (ABB Oy 2005b: 3-7.)

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välisen kaapelointi suositellaan toteutettavaksi symmetrisellä kaapeloinnilla, mutta ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan kanssa voidaan ABB Oy:n (2004: 146) mukaan yksijohtimista kaapelia käyttää, jos kaapelin pituus ei ylitä 100 metriä ja kaapelit asennetaan kolmen ryhmiin. Kuvassa 36 on esitetty kaapelien armeerauksen ja suojavaipan kytkeminen ACS 6000 -taajuusmuuttajassa.



Kuva 36. Yksijohtimisen kaapelin käyttäminen ACS 6000 -taajuusmuuttajan ja sähkökoneen välillä. (ABB 2004: 154.)

4.4.3. Kaapelin poikkipinnan määrittäminen

Kaapelin poikkipinta tulee määrittää asennuspaikan ja -tavan mukaan. Taulukoissa 6 ja 7 on annettu PVC- ja XLPE-eristettyjen alumiini- ja kuparikaapeleiden virtakuormitukset I_{Lmax} . Korjauskerroin on 0,70 (Kaapelit asennettu rinnakkain kaapelihyllylle, enintään 9 kaapelia hyllyä kohti, kolme päällekkäin asennettua

tikastukea, käyttöympäristön lämpötila 30 °C. Lisätietoa standardeista SFS 6000-5-52, SFS-EN 60204-1 sekä IEC 364-5-52).

Taulukko 6. Tyypillisten alumiinikaapeleiden virtakuormitukset. (ABB Oy 2006: 16.)

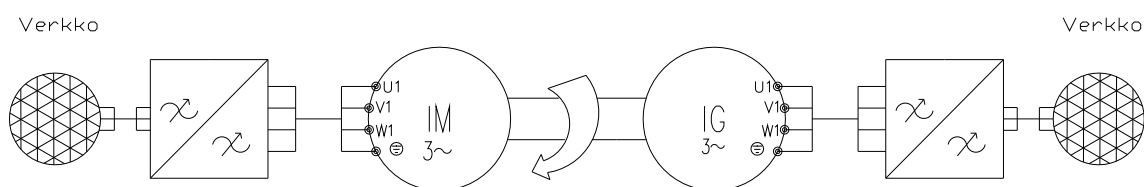
Alumiinikaapeli		PVC-eristys		XLPE-eristys	
		Johtimen lämpötila 70°		Johtimen lämpötila 90°	
Koko	Ø[mm]	I _{lmax} [A]	Lämpötila- vakio [s]	I _{lmax} [A]	Lämpötila- vakio [s]
3 x 185 + 57 Cu	49	199	255	249	255
3 x 240 + 72 Cu	54	235	330	294	330
2 x (3 x 70 + 21 Cu)	2 x 32	214	123	171	123
2 x (3 x 95 + 29 Cu)	2 x 38	260	150	208	150
2 x (3 x 120 + 41 Cu)	2 x 41	302	180	242	180
2 x (3 x 150 + 41 Cu)	2 x 44	348	215	278	215
2 x (3 x 185 + 57 Cu)	2 x 49	398	255	318	255
2 x (3 x 240 + 72 Cu)	2 x 54	470	330	376	330
3 x (3 x 150 + 41 Cu)	3 x 44	522	215	418	215
3 x (3 x 185 + 57 Cu)	3 x 49	597	255	478	255
3 x (3 x 240 + 72 Cu)	3 x 54	705	330	564	330
4 x (3 x 185 + 57 Cu)	4 x 49	796	255	637	255
4 x (3 x 240 + 72 Cu)	4 x 54	940	330	752	330
5 x (3 x 185 + 57 Cu)	5 x 49	995	255	796	255
5 x (3 x 240 + 72 Cu)	5 x 54	1175	330	940	330
6 x (3 x 240 + 72 Cu)	6 x 54	1410	330	1128	330
7 x (3 x 240 + 72 Cu)	7 x 54	1645	330	1316	330
8 x (3 x 240 + 72 Cu)	8 x 54	1880	330	1504	330
9 x (3 x 240 + 72 Cu)	9 x 54	2115	330	1692	330
10 x (3 x 240 + 72 Cu)	10 x 54	2350	330	1880	330

Taulukko 7. Tyypillisten kuparikaapeleiden virtakuormitukset. (ABB Oy 2006: 17.)

Kuparikaapeli		PVC-eristys		XLPE-eristys	
		Johtimen lämpötila 70°		Johtimen lämpötila 90°	
Koko	Ø[mm]	I _{lmax} [A]	Lämpötila- vakio [s]	I _{lmax} [A]	Lämpötila- vakio [s]
3 x 120 + 70	41	193	2313	241	2313
3 x 150 + 70	44	223	2724	379	2724
3 x 185 + 95	50	255	3186	319	3186
3 x 240 + 120	55	301	3904	376	3904
2 x (3 x 70 + 35)	2 x 32	274	1554	342	1554
2 x (3 x 95 + 50)	2 x 38	334	1954	418	1954
2 x (3 x 120 + 70)	2 x 41	386	2313	482	2313
2 x (3 x 150 + 70)	2 x 44	446	2724	558	2724
2 x (3 x 185 + 95)	2 x 50	510	3186	638	3186
2 x (3 x 240 + 120)	2 x 55	602	3904	752	3904
3 x (3 x 120 + 70)	3 x 41	579	2313	723	2313
3 x (3 x 150 + 70)	3 x 44	669	2724	837	2724
3 x (3 x 185 + 95)	3 x 50	765	3186	957	3186
3 x (3 x 240 + 120)	3 x 55	903	3904	1128	3904
4 x (3 x 150 + 70)	4 x 44	892	2724	1116	2724
4 x (3 x 185 + 95)	4 x 50	1020	3186	1276	3186
4 x (3 x 240 + 120)	4 x 55	1204	3904	1504	3904
5 x (3 x 185 + 95)	5 x 50	1275	3186	1595	3186
5 x (3 x 240 + 120)	5 x 55	1505	3904	1880	3904
6 x (3 x 185 + 95)	6 x 50	1530	3186	1914	3186
6 x (3 x 240 + 120)	6 x 55	1806	3904	2256	3904
7 x (3 x 240 + 72)	7 x 55	2107	3904	2632	3904
8 x (3 x 240 + 72)	8 x 55	2408	3904	3008	3904

5. LABORATORIOMITTAUKSET

Laboratoriotöissä tutustuttiin taajuusmuuttajan generaattorikäyttöön ja taajuusmuuttajan aiheuttamiin ongelmiin sähkön laadussa. Lähes kaikki taajuusmuuttajien tutkimustulokset liittyvät moottorikäyttöön, joten laboratoriotyön tarkoituksena on saada vahvistus olettamalle, että samat ilmiöt esiintyvät myös generaattorikäytössä. Työssä selvitettiin ensin miten taajuusmuuttajan asetuksia tulee muuttaa, kun sitä käytetään vesivoimageneraattorin kanssa. Mittauksissa tarkastellaan sähkön laatua taajuusmuuttajan ja generaattorin välillä. Laboratoriomittauksissa käytetyn laitteiston periaatekaavio on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Laboriolaitteiston periaatekaavio.

Generaattoria pyöritettiin taajuusmuuttajalla ohjatulla epätahtimoottorilla, jossa käytettiin pyörimisnopeussäätöä. Pyörimisnopeussäätö pyrkii pitämään moottorin pyörimisnopeuden vakiona, kuormituksesta riippumatta. Generaattorina käytettiin tavallista oikosulkumoottoria. Laboratoriossa käytettyjen laitteiden tarkemmat tiedot on esitetty seuraavassa kappaleessa.

5.1. Laboratoriossa käytetty laitteisto

Laboratoriossa käytetyt laitteet ja ohjelmat sekä niiden ominaisuudet:

- Taajuusmuuttaja: ACS800-11-0020-5
 - Syöttöjännite: 380 V, 400 V, 415 V, 440 V, 460 V, 480 V tai 500 V
 - Näennäisteho: 20 kVA
 - Pätöteho: 18,5 kW
 - Suuntaajien ohjelmat:

- Line rectifier (LR): IXAR7240
- Motor rectifier (MR): AMAR7220
- Epätahtikone
 - Jännite: 380 V
 - Taajuus: 50 Hz
 - Teho: 3,0 kW
 - Pyörimisnopeus: 1435 rpm
 - Virta: 6,8 A
 - $\text{Cos } \varphi$: 0,86
- DriveWindow 2.22
- Tehoanalysointilaitteisto: Voltech PM6000
- Oskilloskooppi: Agilent Technologies DSO5014A

Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajana on käytetty ABB Oy:n valmistamaa ACS800-11-0020-5 taajuusmuuttajaa, joka on pienin 500 V verkkoonjarruttava taajuusmuuttaja. Testilaitteen nimellisjännitteeksi on valittu 500 V, joten käytettäessä 400 V kestoplaneettageneraattoria saavutetaan jännitekestoisuutta ryntäyksen varalle. Ryntäyksessä vesivoimageneraattorin pyörimisnopeus saattaa nousta jopa 2,5-kertaiseksi, jolloin myös kestoplaneettageneraattorin jännite kasvaa lähes samassa suhteessa. (ABB Oy 2009b.)

Taajuusmuuttaja koostuu kahdesta ohjattavasta suuntaajasta, jotka ovat verkkosuuntaaja (Line rectifier, LR) ja moottoripuolen suuntaaja (Motor rectifier, MR). Suuntaajat on toteutettu IGBT-tehokompenteilla. ACS800-11 sisältää LCL-verkkosuotimen. (ABB Oy 2009b.)

Epätahtigeneraattori

Epätahtigeneraattorina käytettiin 3,0 kW epätahtimoottoria, jonka nimellisarvot löytyvät kappaleen alusta.

DriveWindow 2.22

DriveWindow on tietokoneeseen asennettava sovellus, jolla voidaan ohjata taajuusmuuttajaa, muuttaa parametreja sekä kerätä mittaustietoja. DriveWindow kytketään tietokoneeseen valokuitukaapelin avulla.

Tehoanalysointilaite

Mittauksissa käytettiin Voltech PM6000 tehoanalysointilaite, johon saadaan kytkettyä kuusi eri jännite- ja virtamittaria. Mittausten perusteella laite pystyy laskemaan esimerkiksi harmoniset yliaallot.

Oskilloskoopi

Mittauksissa käytettiin generaattorin ja taajuusmuuttajan välisen jännitteen ja virran tutkimiseen digitaalista oskilloskooppia. Oskilloskoopilla saadaan näkyviin nopeasti jännitepiikit.

5.2. Taajuusmuuttajan käyttöönotto

Taajuusmuuttajan käyttöönotto aloitetaan asettamalla tarvittavat parametrit. Parametrit voidaan asettaa suoraan paneelista tai DriveWindow-ohjelman avulla. Vesivoimajeneraattorin suojaamiseksi voidaan taajuusmuuttajaan asettaa raja-arvoja, jolla estetään generaattorin toimiminen moottorina. Vesivoimajeneraattori ei saa toimia moottorina, koska se saattaisi vaurioittaa turbiinia. Taulukossa 8 on listattu parametrit, jotka muutettiin ennen generaattorikäyttöä. Taulukossa esitetyt parametrit on selitetty tarkemmin taulukon jälkeen.

Taulukko 8. Parametrit, joita taajuusmuuttajaan tulee muuttaa ennen generaattorikäyttöä.

Param. Nro	Parametrin nimi	Alkup. Arvo	Muutettu arvo
26.01	TORQUE SELECTOR	SPEED	TORQUE
30.23	OVERVOLTAGE CTR	ON	OFF
20.05	MAXIMUM TORQUE [%]	300	0
20.06	MINIMUM TORQUE [%]	-300	-100
20.17	P MOTORING LIM [%]	300	0
20.18	P GENERATING LIM [%]	-300	-100

26.01 *TORQUE SELECTOR*

Tällä parametrilla voidaan muuttaa nopeusohje momenttiohjeeksi. Generaattorin tuottamaa sähköenergiaa säädetään muuttamalla momentin arvoa. Generaattorikäytössä voidaan käyttää myös nopeusohjetta.

30.23 *OVERVOLTAGE CTR*

Säätölee jarrutusmomenttia, mikäli välipiirin tasajännite on liian alhainen tai korkea. Generaattorikäytössä toiminto tulee kuitenkin kytkeä pois käytöstä.

20.05 *MAXIMUM TORQUE [%]*

Suurin vääntömomentti verrattuna generaattorin laskennalliseen nimellisarvoon. Maksimi momentti asetetaan nolaksi, joka estää taajuusmuuttajaan kytketyn generaattorin toimimisen moottorina.

20.06 *MINIMUM TORQUE [%]*

Pienin vääntömomentti verrattuna generaattorin laskennalliseen nimellisarvoon. Taajuusmuuttajassa negatiivinen vääntömomentti tarkoittaa sitä, että siihen liitettyä konetta pyöritetään. Parametrin arvoksi asennettiin laboratoriossa -100 %, ettei taajuusmuuttajaan nähden pieni oikosulkumoottori hajoaisi. Todellisuudessa arvoksi voi mielestäni jättää tehdasarvon -300 %.

20.17 *P MOTORING LIM [%]*

Parametrilla voidaan rajoittaa taajuusmuuttajaan kytketyn laitteen moottoritehoa. Generaattorikäytössä parametrin arvoksi tulee asettaa 0 %, jolloin taajuusmuuttaja toimii takatehorajoituksena. Parametrin arvo asetetaan prosentteina verrattuna generaattorin nimelliseen.

20.18 *P GENERATING LIM [%]*

Parametrilla voidaan rajoittaa generaattorista saatavaa tehoa. Arvo asetetaan prosentteina verrattuna generaattorin nimelliseen.

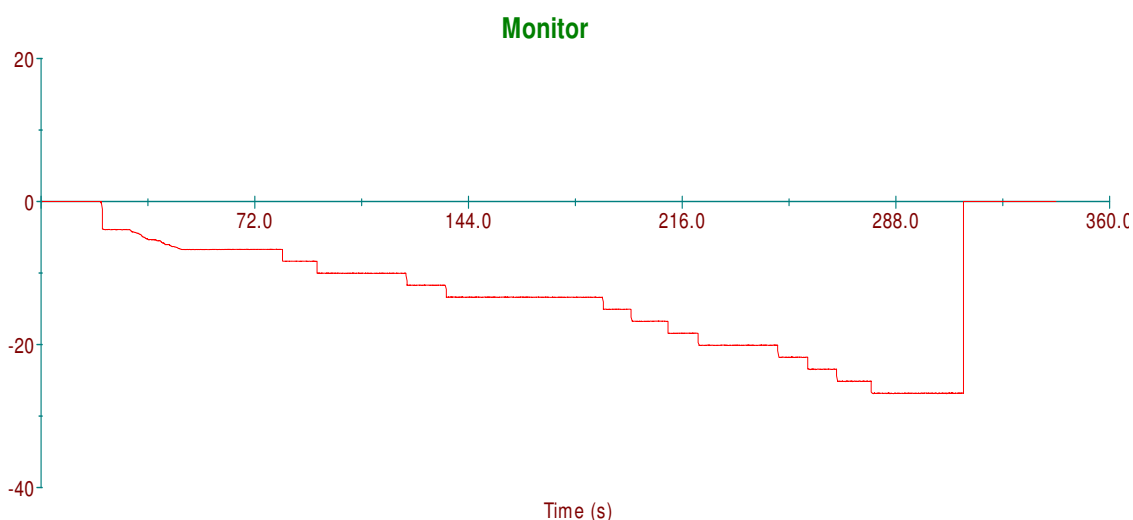
Edellä mainittujen parametrien muutokset ovat välttämättömimmät, joita taajuusmuuttajan parametreihin tulee tehdä ennen generaattorikäyttöä.

Taajuusmuuttajan parametreja tulee tarkastella aina tapauskohtaisesti, jolloin otetaan huomioon esimerkiksi suojausfunktiot, joita taajuusmuuttajalla halutaan toteuttaa.

Laboratoriotesteissä taajuusmuuttajaan asetettiin taulukossa 8 esitetyt arvot ja generaattorikäyttö toimi moitteettomasti, eikä generaattori pyörinyt missään vaiheessa moottorina. Osa taajuusmuuttajan suojausfunktioista irrottaa toimiessaan generaattorin verkosta. Vesivoimageneraattorin kuorman äkillinen irtoaminen aiheuttaa generaattorin ryntäämisen, joka saattaa olla hyvinkin voimakas. Taajuusmuuttajan laukaisut tulee yhdistää hätäpysäytyspiiriin, jossa turbiinin ryntäys estetään sulkemalla johtosolukkeet.

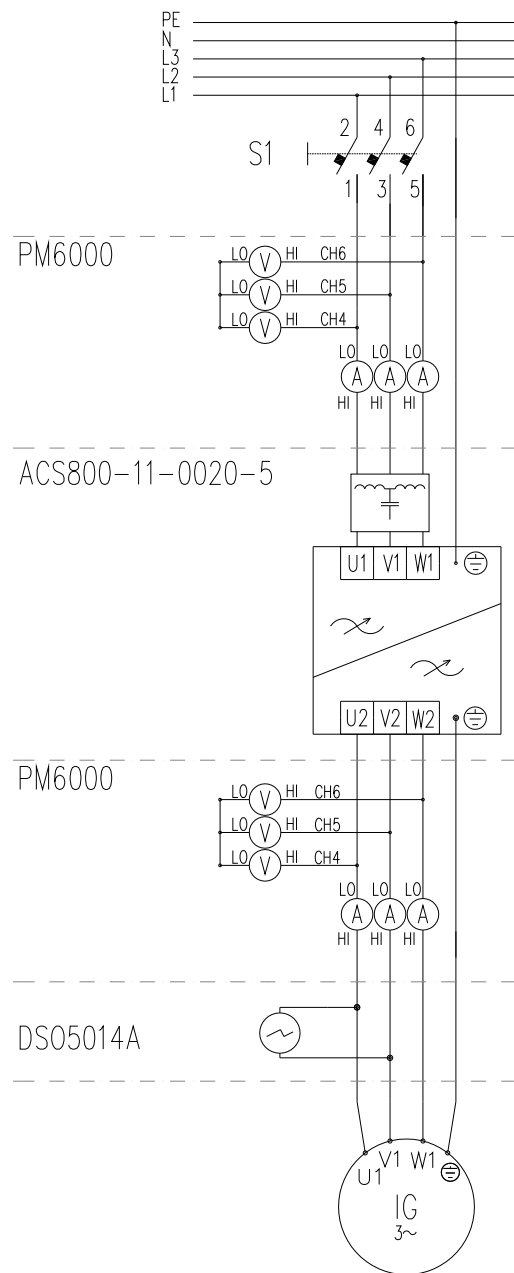
5.3. Mittaukset

Generaattorina toimivaa epätahtimoottoria pyöritettiin isommalla oikosulkumoottorilla, jota ohjattiin taajuusmuuttajan pyörimisnopeussäädöllä. Generaattorin kuormitusta säädettiin momenttiohjeella. Kuvassa 38 on esitetty momenttiohjeen muuttamisen vaikutus tuotettuun pätötehoon. Kuvan 38 tilanteessa generaattorin pyörimisnopeus pidetään vakiona ja ainoastaan momenttiohjetta muutetaan. Pätöteho on negatiivista, koska taajuusmuuttajan perusoletuksena pätötehon suunta on verkosta moottoriin.



Kuva 38. Momenttiohjeen muutoksen vaikutus tuotettuun tehoon. Pystyakselilla on pätöteho [W] ja vaaka-akselilla aika sekuntia [s].

Kuvassa 39 on esitetty laboratoriomittauksissa käytettyjen laitteiden kytkentä.



Kuva 39. Laboratoriomittausten piirikaavio.

5.3.1. Yliaaltomittaukset

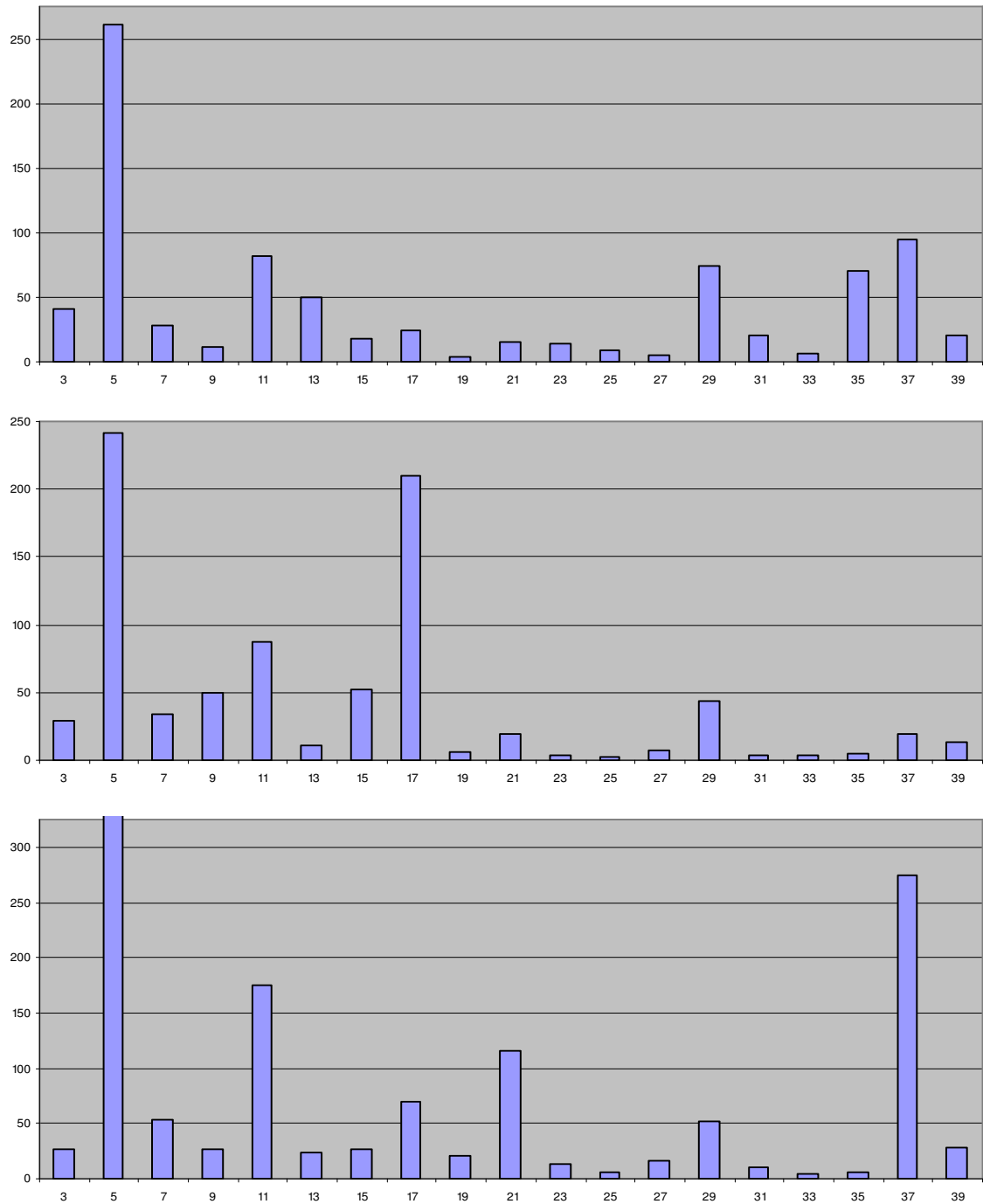
Taajuusmuuttajat ovat merkittäviä yliaaltojen lähteitä. Yliaallot aiheuttavat monia ongelmia, joita on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.2.1. Laboratoriossa mitattiin yliaaltoja taajuusmuuttajan verkkopuolelta ja generaattoripuolelta. Yliaaltomittaukset tehtiin PM6000-tehoanalysoitsajalla.

Yliaallot taajuusmuuttajan ja generaattorin välillä

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välillä esiintyy runsaasti yliaaltoja, joiden esiintyminen ja amplitudi vaihtelevat paljon. Yliaaltojen runsaasta esiintymisestä sekä niiden korkeasta amplitudista voidaan päätellä, että jännite on säröytynyt.

Yliaallot taajuusmuuttajan ja generaattorin välillä aiheuttavat sen, ettei siitä voida luotettavasti mitata esimerkiksi generaattorin jännitettä. Laboratoriossa, kun epätahtigeneraattoria pyöritettiin nimellisa nopeudella suuremmalla nopeudella taajuusmuuttajan mittaustulokset ja generaattorin navoissa olevan TRMS (true root mean square) -yleismittarin mittaustulokset erosivat merkittävästi. Syynä ovat todennäköisesti yliaaltojen aiheuttamat jännitepiikit, jotka vääristivät yleismittarin mittaustulosta.

Kuvassa 40 on esitetty kolme eri aikaan otettua yliaaltojännitteiden spektriä. Taajuusmuuttajan asetuksia tai generaattorin kuormitusta ei ole muutettu mittausten välissä, joten mittaustuloksia voidaan vertailla keskenään.



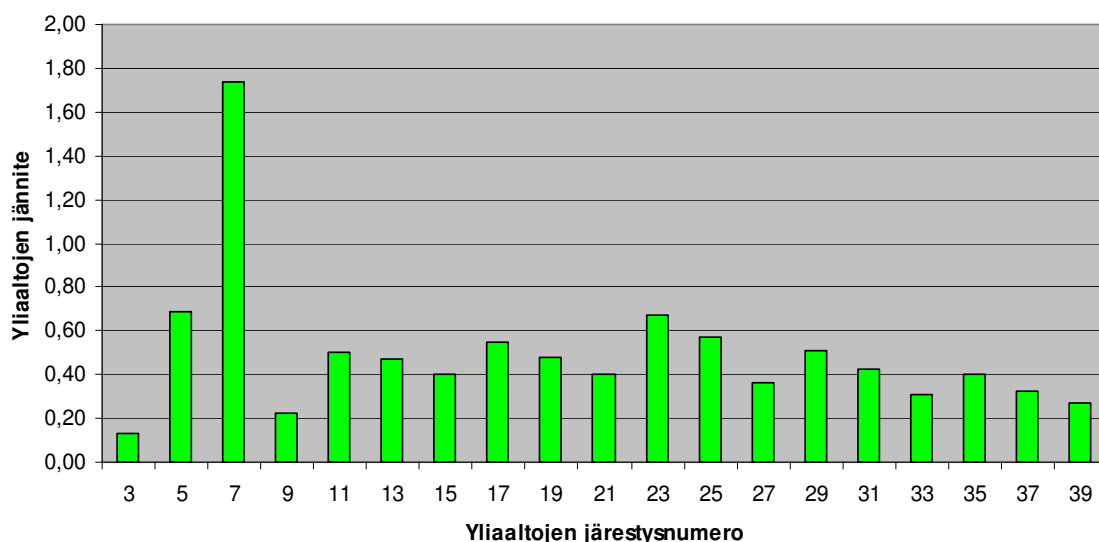
Kuva 40. Yliaaltojännitteiden esiintyminen taajuusmuuttajan ja generaattorin välissä. Vaaka-akselilla yliaaltojännitteiden järjestysnumero ja pystyakselilla yliaaltojännitteen suuruus [V].

Kuvasta 40 havaitaan, että tietyt harmoniset toistuvat muita voimakkaimpina, joka johtuu taajuusmuuttajan suuntaajasillan säännöllisestä kytkentätaajuudesta. Mittausten

perusteella generaattoripuolella yliaaltojen voimakkuus vaihtelee satunnaisesti. Merkityksellinen havainto on myös se, että generaattoripuolella saattaa esiintyä myös hyvin korkeataajuisia yliaaltoja, kuten 37. yliaalto jonka taajuus on 1850 Hz.

Yliaallot taajuusmuuttajan verkkopuolella

Taajuusmuuttaja tuottaa verkkoon yliaaltoja yhtälön 9 mukaan. Kuvassa 41 näkyy miten yliaallot jakautuivat. Kuvasta näkyy, että yhtälön 9 mukaiset yliaallot ovat hieman voimakkaampia kuin muut. Huomioitavaa on kuitenkin se, että yliaaltojen amplitudi on pieni verrattuna generaattoripuolen yliaaltoihin. Laboratoriossa käytetyssä ACS800-11 -taajuusmuuttajassa on verkkopuolella LCL-suodatin, joka suodattaa harmonisia yliaaltoja.



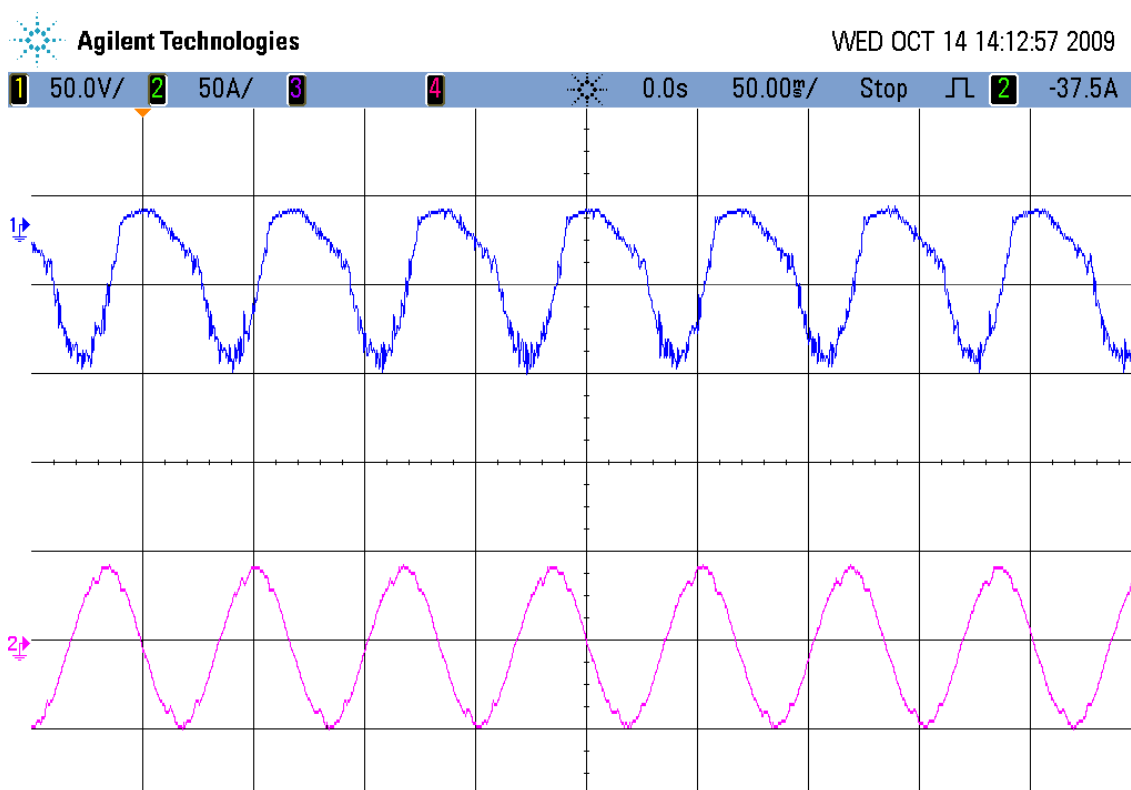
Kuva 41. Taajuusmuuttajan verkkoon tuottamat yliaallot generaattorikäytössä.

5.3.2. Generaattoripuolen jännitteen ja virran oskilloskooppimittaukset

Generaattoripuolen jännitettä tutkittiin oskilloskoopilla mittaamalla pääjännite ja vaihevirta. Mittauksilla pyrittiin selvittämään jännitteen ja virran säröisyyttä sekä mahdollisia suurtaajuisia jännitepiikkejä. Generaattoria pyöritettiin noin 500 rpm vakionopeudella ja momenttiohjeella -50 %. Laboratoriossa käytetyssä ACS800-11 taajuusmuuttajassa ei ollut mitään suotimia generaattoripuolella. Vesivoimasovel-

luksissa yleisesti käytetty ACS800-17 taajuusmuuttaja sisältää generaattoripuolella common mode- (yhteismuotoisen jännitte) ja du/dt-suotimen, jotka vähentävät haitallisia jännitepiikkejä.

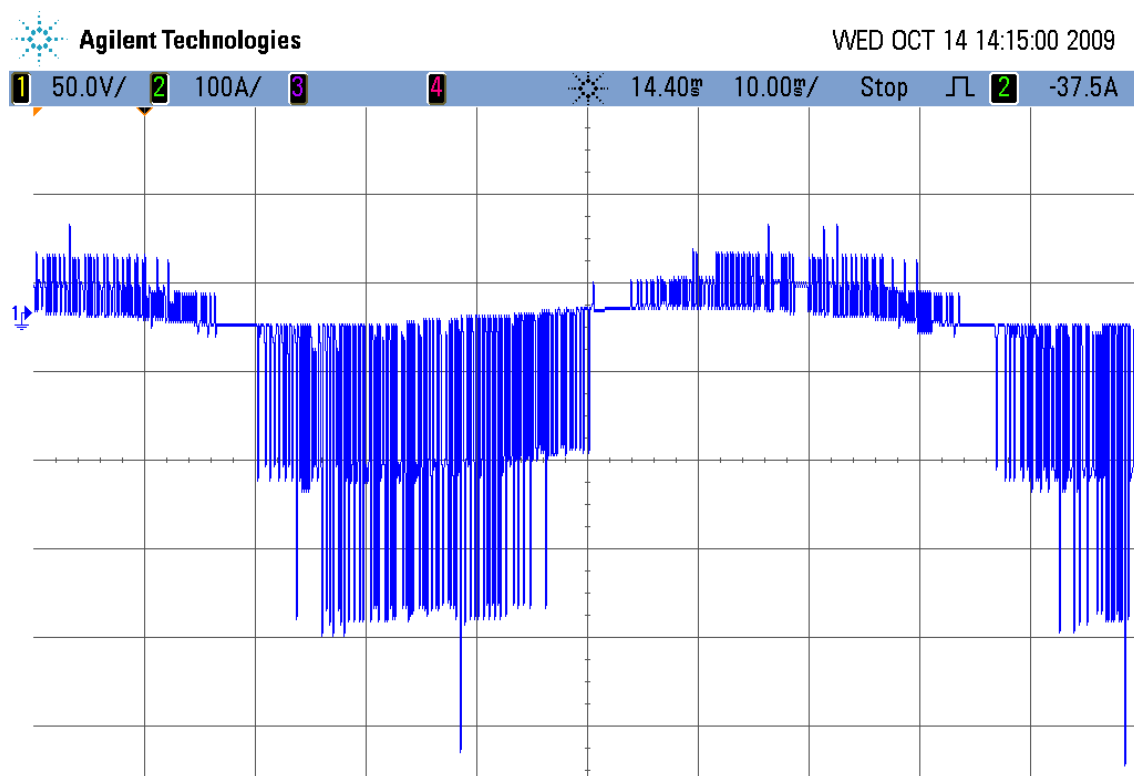
Kuvassa 42 on esitetty generaattorin tuottaman jännitteen ja virran käyrämuodot, jotka ovat suhteellisen hyvin sini-muotoisia. Jännitteen säröytyminen johtuu, kaapelin sisältämistä suurtaajuisista jännitepiikeistä. Jännitepiikkejä syntyy harmonisista yliaalloista, jännitteen heijastumisesta sekä kapasitiivisistä laakerivirroista.



Kuva 42. Generaattorin ja taajuusmuuttajan välinen jännite ja virta oskilloskoopilla mitattuna. Ylempi kuvaaja on jännite ja alempi kuvaaja on virta.

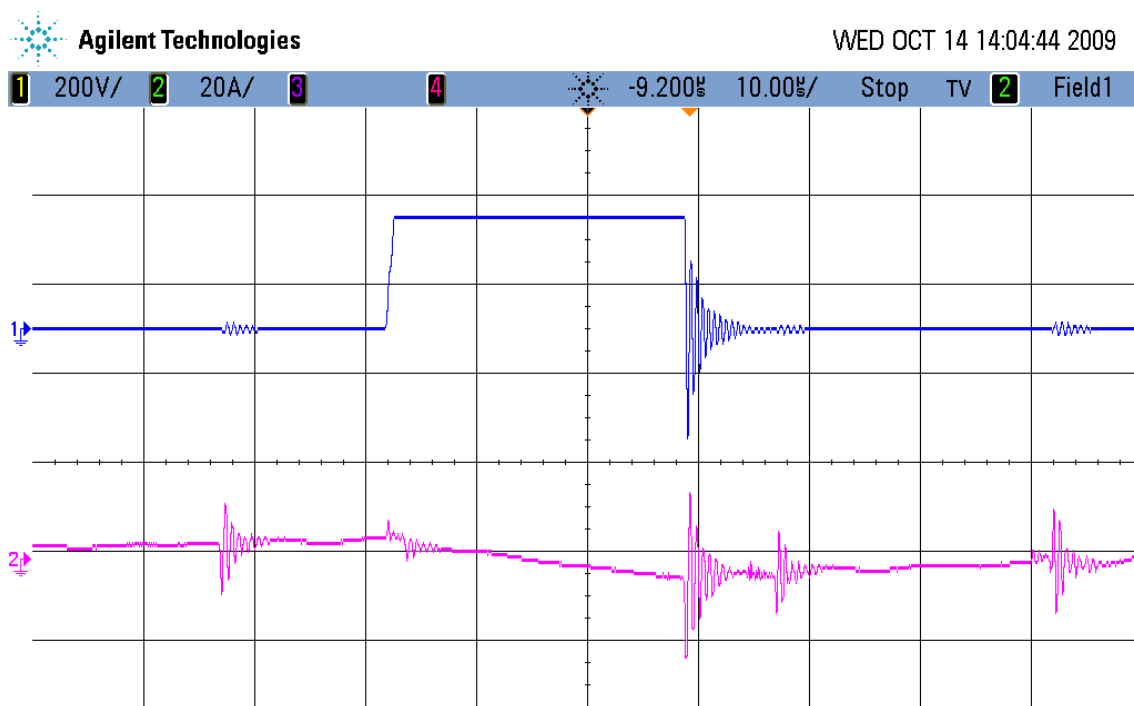
Kuvassa 43 on tarkasteltu tarkemmin generaattorin tuottamaa jännitettä. Kuvaajasta huomataan, että jännite on PWM-tyyppistä. Taajuusmuuttajan ja generaattorin välinen jännite näyttää mittausten perusteella olevan verrattavissa moottorikäyttöön. Moottorikäytöissä esiintyvät ongelmat tuleekin ottaa huomioon myös generaattorikäytössä.

Jännite on myös generaattorikäytössä PWM-tyyppistä, koska aina kun taajuusmuuttajan generaattoripuolen silta vaihtaa tilaansa muuttuu myös taajuusmuuttajaa syöttävä vaihe. Jännite muodostuu käytännössä samalla tavalla kuin moottorikäytössä, vaikka tehon suunta on eri.



Kuva 43. Generaattorin tuottama jännite on PWM-tyyppistä.

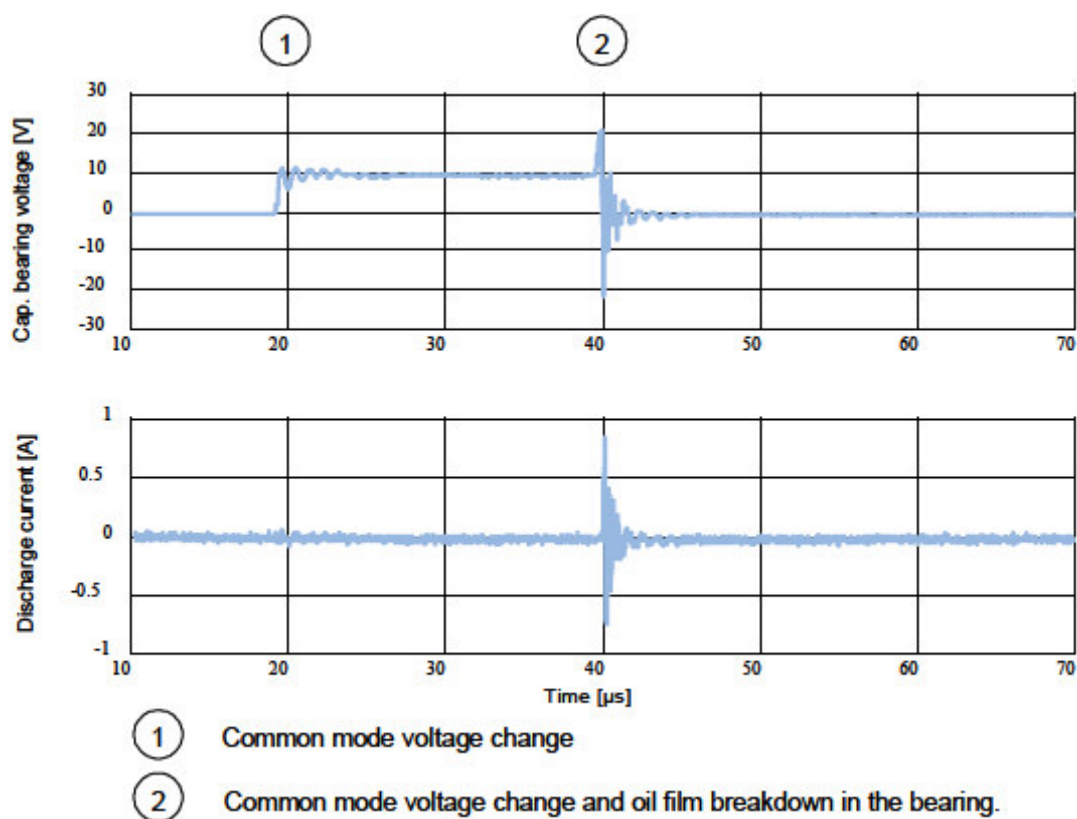
Kuvassa 44 on tarkennettu 1000 kertaiseksi kuvasta 43. Kuvassa 44 on näkyvissä yksi taajuusmuuttajan generaattorisillan kytkentämuutos. Kuvaajasta nähdään selvästi, miten jokainen kytkentä aiheuttaa suurtaajuisia jännite- ja virtapulsseja. Kuvassa yksi vaakaviivojen väli on 0,1 MHz, joten kun yhdessä ruudussa on 20 pulssia on niiden taajuus jo 2 MHz. Olennaista on myös se, että suurtaajuiset jännitepulssit ovat hyvin voimakkaita. Suurtaajuiset jännitepiikit aiheuttavat laakerivirtoja, joita on tarkemmin esitelty kappaleessa 4.2.2.



Kuva 44. Taajuusmuuttajan kytkentätaajuudesta aiheutuvia suurtaajuisia jännite- ja virtapiikkejä. Sininen on jännitteen kuvaaja ja lila on virran kuvaaja.

Jännitepulssit voimistuvat jännitteen heijastumisen vaikutuksesta. Voimistuneet jännitepulssit aiheuttavat läpilyönnejä, joista aiheutuu laakerivirtoja. Jännitteen heijastumista on käsitelty kappaleessa 4.4.2. Kuvassa 45 on esitetty oskilloskooppikuva yhteismuotoisen jännitteen ja virran käyttäytymisestä laakerivirtoja aiheuttavan läpilyönnin aikana. Kuvassa näkyy jännitepulssi, joka loppuu läpilyöntiin. Läpilyönnin seurauksena virtapiiri sulkeutuu, joka näkyy alemmassa kuvassa virtapiikkinä. Kuvia 44 ja 45 vertailemalla voidaan todeta, että kuvaajat muistuttavat toisiaan. Laakerivirrat syntyvät korkeiden jännitepiikkien aiheuttamista läpilyönneistä.

Oskilloskooppikuva 44 on otettu, kun oikosulkumoottori toimii generaattorina ja kuvassa 45 on tavallinen moottorikäyttö. Näiden kuvaajien vertailu vahvistaa sitä käsitystä, että moottorikäyttöjen ilmiöt esiintyvät verrannollisina myös generaattorikäytössä.



Kuva 45. Yhteismuotoisen jännitteen ja -virran kuvaaja. (Hoppler & Errath 2007: 225.)

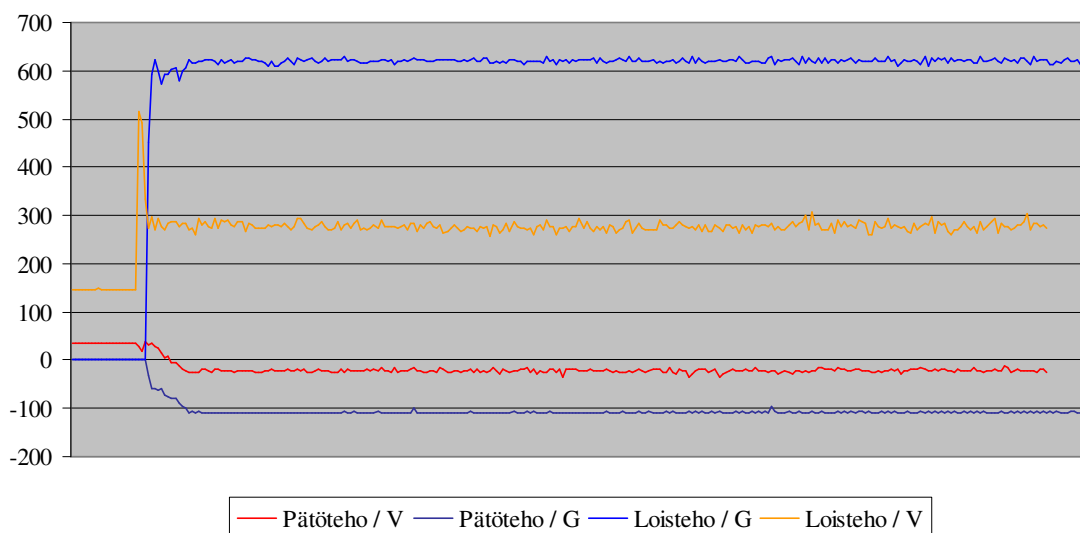
5.3.3. Pätö- ja loistehon mittaaminen tehoanalysaattorilla

Generaattoripuolen jännitettä ja virtaa tutkittiin myös tehoanalysaattorilla, jolla saatiin mittaustulos kolmen sekunnin välein. Mittaukset on tehty samaan aikaan kuin edellisen kappaleen oskilloskooppimittaukset. Generaattorin pyörimisnopeus 500 rpm ja momenttiohje -50 %.

Tehoanalysaattori koostuu jännite- ja virtamittareista ja niistä saatiin mittaustulos kolmen sekunnin välein. Tehoanalysaattorin kytkentä on esitetty tarkemmin kuvan 39 mittauspiirikaaviossa.

Tehoanalysaattorilla mitattiin pätö- ja loistehoa taajuusmuuttajan verkko- ja generaattoripuolelta. Laboratoriokokeissa generaattorina toimi epätahtigeneraattori, joka

ottaa magnetointivirtansa verkosta. Taajuusmuuttajalla voidaan tuottaa epätahtigeneraattorin tarvitsemaa loistehoa, kuten voidaan todeta kuvasta 46.



Kuva 46. Laitteiston päto- ja loisteho taajuusmuuttajan verkko- ja generaattoripuolelta.

Kuvaajasta nähdään, että generaattori ottaa loistehoa taajuusmuuttajasta enemmän kuin taajuusmuuttaja ottaa loistehoa verkosta. Osa loistehosta tuotetaan taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajassa. Tehoanalysaattori on asennettu niin, että tehon positiivinen suunta on verkosta taajuusmuuttajaan päin. Negatiivinen teho on verkkoon tuotettua tehoa. Osa generaattorin tuottamasta tehosta kuluu taajuusmuuttajassa, joka näkyy pätoheokuvaajien erotuksesta.

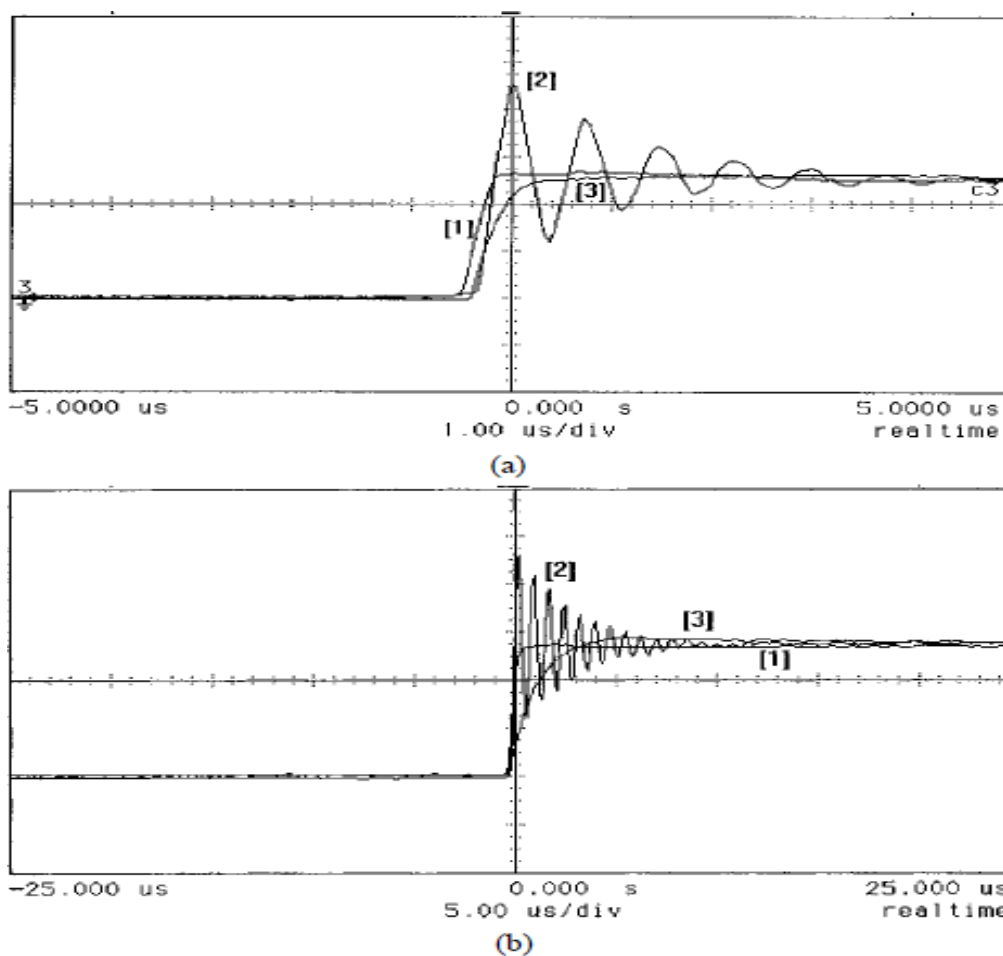
Taajuusmuuttajalla, jossa on ohjattava verkkosuuntaaja, voidaan säätää tuotetun tai kulutetun loistehon määrää.

5.4. Laboriomittausten yhteenveto

Laboriomittausten perusteella vahvistui käsitys generaattorikäytön ja moottorikäytön vastaavuudesta. Moottorikäytöissä esitetyt teoriat pätevät suoraan myös

generaattorikäyttöihin. Mittausten perusteella voidaan todeta myös se, että työssä teoreettisesti esitetyt asiat ovat todellisia taajuusmuuttajakäytöissä.

Kuvassa 47 esitetyssä mittauksessa on osoitettu suodattimien vaikutus suurtaajuisten jännitepulssien vaimentamiseen.



Taajuusmuuttajan moottorikäytössä esiintyvä jännitepulssi:

- [1] Taajuusmuuttajan ulostulossa
- [2] Moottorin liittimissä
- [3] Käytössä ei ole suodattimia

Kuva 47. du/dt -suodattimen vaikutus moottorikaapelissa esiintyviin jännitepulsseihin. Suodatin moottorin liittimissä (a) ja suodatin taajuusmuuttajan moottorilähdössä (b). (Jouanne ym. 1998: 1116.)

Kuvan 47 mittaustulos osoittaa, että sopivilla suodattimilla voidaan estää suurtaajuisten jännitepiikkien aiheuttamat ongelmat. Vertaamalla kuvien 44 ja 47 jännitepulsseja, voidaan todeta generaattori- ja moottorikäyttöjen kuvaajien vastaavan toisiaan. Kuvasta 47 nähdään, että suuntaajan kytkennän aikaiset jännitepulssit voidaan suodattaa tehokkaasti. Suodattimina käytetään kappaleessa 4.3 esitettyjä suodattimia. Laboratoriossa käytetyssä ACS800-11 taajuusmuuttajassa ei ole lainkaan suodattimia generaattoripuolella, mutta vesivoimasovelluksissa käytetyssä ACS 800-17 -taajuusmuuttajassa on generaattoripuolella tarvittavat suodattimet vakiona.

6. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Laboratoriomittaukset vahvistivat käsityksen siitä, että taajuusmuuttajan generaattorikäyttöön pätee samat teoriat kuin taajuusmuuttajan moottorikäyttöön. Taajuusmuuttajakäytöstä aiheutuvat ongelmat kuten yliaallot ja laakerivirrat esiintyvät myös generaattorikäytössä. Ongelmien tiedostamisella voidaan ennaltaehkäistä vaurioiden syntymistä ja mikäli vaurioita syntyy on niiden löytäminen ja korjaaminen helpompaa kun niiden aiheuttaja on tiedossa. Suodattimilla ja symmetrisellä kaapeloinnilla saadaan taajuusmuuttajakäytöstä luotettava, eikä ongelmia pitäisi aiheutua pitkälläkään aikavälillä.

Laboratoriomittauksien tuloksia ei pidä suoraan verrata todelliseen laitokseen, koska vesivoimalaitoksilla käytetyissä ACS800-17 tai ACS6000 -taajuusmuuttajissa on generaattoripuolella common mode- ja du/dt-suotimet. Todellinen tilanne on siis työssä esitettyjä laboratoriotutkimuksia optimaalisempi. Laboratoriotyössä saatiin vahvistus teoriaosuuden väitteisiin taajuusmuuttajan aiheuttamista ongelmista. Merkittävä huomio on myös se, että jännitteen tai virran mittaaminen ei ole luotettavasti mahdollista generaattorin syöttöjohtimista. Taajuusmuuttajasta on kuitenkin mahdollista saada useita mittaustuloksia, joita voidaan pitää vertailuarvoina mittalaitteiden tuloksille. Laboratoriotyössä tehtyjen havaintojen perusteella voidaan kuitenkin taajuusmuuttajan sisäisiä mittauksia pitää luotettavina.

6.1. Taajuusmuuttajakäytön hyödyt on vesivoimalaitokselle

Täystehosuunnatun voimalaitoksen suurimmaksi eduksi mielletään usein muuttuva kierrosnopeus. Vesivoimalaitoksella taajuusmuuttajan merkittävimpana etuna voidaan kuitenkin pitää vaihteetonta ratkaisua. Vesivoimaturbiinien korkean vääntömomentin johdosta vaihdelaatikot ovat todella kalliita, kookkaita ja heikentävät laitoksen hyötysuhdetta. Voimalaitoksiin ei haluta vaihteistoa, jos on mahdollista toteuttaa vaihteeton ratkaisu. Taajuusmuuttajissa käytettyä tekniikkaa voidaan pitää luotettava, koska vastaavaa tekniikkaa on ollut käytössä moottorikäytöissä ja voimalaitoksilla

esimerkiksi magnetointilaitteistoissa. Taajuusmuuttajien etuna on myös se, että sen huoltaminen on helppoa ja nopeaa, koska moduulimaiset osat on nopeasti vaihdettavissa ja niiden valmistusmäärät on suuria. Voimalaitokselle voi myös varastoida tiettyjä varaosia, jolloin mahdollisesta vikatilanteesta voidaan selvitä nopeasti.

Taajuusmuuttajalla saavutettua muuttuvaa pyörimisnopeutta voidaan pitää positiivisena lisänä vaihdelaatikon korvaamisesta. Taajuusmuuttajan käytöllä on mahdollista saavuttaa parannusta hyötysuhteeseen (kuva 10), kun turbiinin pyörimisnopeus saa vaihdella. Isoilla vesivoimalaitoksilla pienikin parannus hyötysuhteeseen tuo merkittävän lisän sähkön tuotantoon. Taajuusmuuttajan avulla voidaan myös toteuttaa vesipintojen säätely pyörimisnopeutta muuttamalla, josta johtuen energiantuotanto saadaan pysymään tasaisena virtaaman säätelystä huolimatta. Pehmeä käynnistyminen ja pysäyttäminen rasittavat vähemmän turbiinia sekä generaattoria, jonka vuoksi niiden kuluminen vähenee.

Tiivistettynä taajuusmuuttajan edut vesivoimalaitokselle ovat:

- ei vaihdelaatikkoa
- hyötysuhteen parantuminen
- loistehon säätö
- laitteiston ja käytön yksinkertaistuminen
- ei verkkoon tahdistusta
- nopea huolto
- turbiinin ja generaattorin kulumisen vähentyminen.

Vaihdelaatikon korvaaminen vesivoimalaitoksilla ei ole kuitenkaan välttämättömyys taajuusmuuttajaa käytettäessä. Joissain tapauksissa turbiinin pyörimisnopeus on järkevää sovittaa generaattoriin vaihdelaatikon avulla, jos esimerkiksi vääntömomentin pienentäminen tekee generaattorista huomattavasti edullisemmän. Vaihdelaatikosta huolimatta taajuusmuuttajan asentaminen kannattaa etenkin pienitehoisille laitoksille, koska pienille tehoille taajuusmuuttaja on suhteellisen edullinen. Taajuusmuuttajaa käyttämällä voidaan generaattoriksi ja vaihdelaatikoksi valita edullinen vakiomalli sekä napapariluku voidaan valita generaattorin koon kannalta optimaaliseksi.

Diplomityön perusteella syntyi käsitys, että vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttö on perusteltua ja kannattavaa tietyissä sovelluksissa. Taajuusmuuttajan käyttö kannattaa, mikäli sillä voidaan saavuttaa etuja vesivoimalaitoksen luotettavuuteen, käytettävyyteen tai hyötysuhteeseen. Joissain laitoksissa taajuusmuuttajan käytöllä saavutetaan myös taloudellisia etuja, kun kallis vaihdelaatikko voidaan jättää pois. Taajuusmuuttajaa käyttämällä generaattorin fyysinen koko saadaan pienemmäksi, käyttämällä pienempää napaparilukua tai pj-sovelluksissa kestopagneettigeneraattoria epätahtigeneraattorin sijaan.

6.2. Jatkotutkimusmahdollisuuksia

Taajuusmuuttajia on hyödynnetty vesivoimalaitoksilla suhteellisen vähän aikaa, joten jatkotutkimusmahdollisuuksia löytyy varmasti uusien laitosten valmistuttua paljonkin.

Tässä työssä on tutkittu ainoastaan täystehosuunnattuja taajuusmuuttajaratkaisuja. Mielenkiintoinen tutkimus olisi selvittää miten kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (DFIG doubly-fed induction generator) soveltuisi vesivoimaan. DFIG-tekniikka on tuulivoimatekniikassa havaittu erittäin toimivaksi ratkaisuksi, joten sen soveltuvuus vesivoimatekniikkaan olisi syytä selvittää.

Eräs tutkittava kokonaisuus voisi olla taajuusmuuttajakäyttöisen vesivoimalaitoksen käytön optimointi. Tutkimuksesta pitäisi saada selville asetukset ja parametrit, joilla vesivoimalaitoksen käyttö olisi optimaalisinta. Tutkimus tulisi sisältää ainakin turbiinin ohjauksen, taajuusmuuttajan ohjauksen, generaattorin ohjauksen sekä loistehon säädön. Tutkimuksessa voisi tehdä esimerkiksi laskelmia taajuusmuuttajan momenttiohjeen määrittämiseksi, jotka nykyisin määritellään kokeellisesti ja asetellaan portaittain.

7. YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttöä ja selvitettiin asioita, joita tulee tietää vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäytöstä. Taajuusmuuttajan käyttö vesivoimageneraattorin kanssa on vielä suhteellisen uusi asia, joten työssä on tuotu esille asioita, joita on hyvä tietää toimiessaan projektin suunnittelijana, toteuttajana tai laitoksen käyttäjänä.

Ensimmäisenä työssä luodaan katsaus vesivoimaan, vesivoimalaitoksiin ja vesivoimaturbiineihin. Taajuusmuuttajakäytössä merkittävin asia, joka vesivoimalaitoksien erityispiirteistä tulee ottaa huomioon, on turbiinin korkea ryntäysnopeus, joka voi olla jopa 2,5 kertaa nimellispyörimisnopeus. Korkea ryntäysnopeus saattaa aiheuttaa ihmisille ja laitteille vaarallisen korkean jännitteen, etenkin kestopagneettigeneraattoria käytettäessä. Korkea ryntäysnopeus aiheuttaa myös vaatimuksia vesivoimageneraattorin mekaaniselle ryntäyskestolle.

Työn pääpaino on taajuusmuuttajakäytön tutkimisessa. Taajuusmuuttajan käyttäminen vesivoimalaitoksissa antaa paljon mahdollisuuksia, mutta vaatii myös huolellista perehtymistä mahdollisten ongelmien välttämiseksi. Työssä selvitetään mitä etuja taajuusmuuttajan käyttämisellä saavutetaan ja mitä ongelmia ja haittoja siitä aiheutuu. Vesivoimalaitoksille merkittävin etu taajuusmuuttajan käytöstä on mahdollisuus toteuttaa ratkaisu ilman vaihdelaatikkoa, sekä mahdollisuus valita optimaalisen generaattorityyppi. Muita etuja on hyötysuhteen parantuminen, säädettävyyden ja laitteiston yksinkertaisuus. Taajuusmuuttajasta aiheutuvat ongelmat liittyvät käytännössä aina taajuusmuuttajan aiheuttamiin jännite- ja virtapiikkeihin. Jännite- ja virtapiikit aiheuttavat yliaaltoja ja laakerivirtoja, jotka saattavat aiheuttaa lukuisia ongelmia, mikäli niitä ei ole asennuksissa otettu riittävästi huomioon. Taajuusmuuttajan käyttöön liittyvät ongelmat ovat helposti estettävissä kaapeloinnilla, maadoituksilla ja suodattimilla. Vesivoimalaitoksilla käytettävät taajuusmuuttajat sisältävät aina tarvittavat suodattimet, joten mikäli taajuusmuuttaja on kaapeloitu ja maadoitettu oikein ei merkittäviä ongelmia muodostu. Taajuusmuuttajan verkkopuolella olevat suodattimet voivat kuitenkin aiheuttaa ongelmia suodattamalla verkosta sinne kuuluvia signaaleja,

kuten tariffi-ohjauksen tai automaattisen mittarinluennan signaaleja. Diplomityössä on selvitetty miten taajuusmuuttajan aiheuttamat ongelmat syntyvät ja miten niitä voidaan ehkäistä. Tietoisuus taajuusmuuttajan aiheuttamista ongelmista auttaa tunnistamaan esimerkiksi laakerivirtojen aiheuttamat ongelmat ajoissa.

Työssä on selvitetty myös taajuusmuuttajakäyttöisten vesivoimageneraattoreiden erikoispiirteitä ja valintaa. Taajuusmuuttajan ansiosta vesivoimageneraattorin rakenteeseen voidaan vaikuttaa. Generaattorina voidaan käyttää epätahti-, kestopagneetti ja tahtigeneraattoria. Generaattorin fyysinen koko saadaan taajuusmuuttajakäytön ansiosta myös pienemmäksi, koska generaattorin taajuus ei ole sidoksissa verkon taajuuteen. Taajuus voidaan sovittaa vapaasti, joten napapariluku voidaan valita vapaasti.

Diplomityössä tehtiin laboratoriotutkimuksia, joissa tutkittiin työssä esitettyjen teorioiden perusteella sähkön laatua taajuusmuuttajan verkko- ja moottoripuolella. Laboratoriomittaukset tehtiin oskilloskoopilla ja tehoanalysaattorilla. Oskilloskoopilla tutkittiin generaattorin tuottaman jännitteen ja virran käyrämuotoa, joista tehtiin teorioihin perustuen arvio laakerivirtojen esiintyvyydestä. Tehoanalysaattorilla saatiin selville taajuusmuuttajan tuottamat yliaallot, virrat, jännitteet ja tehot. Tehoanalysaattorin mittaustulosten perusteella arvioitiin taajuusmuuttajan vaikutusta sähkön laatuun. Laboratoriomittausten perusteella saatiin vahvistus teoriaosuudessa esitellyille asioille.

Taajuusmuuttajakäyttöiset vesivoimageneraattorit ovat vasta tekemässä tuloaan, joten tulevaisuudessa tullaan näkemään mihin suuntaan tekniikkaa kehitetään. Diplomityön perusteella voidaan todeta, että taajuusmuuttajan käyttö vesivoimalaitoksissa on kannattavaa ja tekniikkaa tullaan varmasti hyödyntämään tulevaisuudessa.

8. LÄHDELUETTELO

ABB Oy (1999). Bearing Currents in Modern AC Drive Systems. *Technical Guide No. 5*. Helsinki: ABB Industry Oy / Drives.

ABB Oy (2000). PDS-käyttöjen asennus ja kokoonpano EMC-vaatimusten mukaan. *Tekninen opas nro 3*. Helsinki: ABB Industry Oy.

ABB Oy (2001). Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. *Tekninen opas nro 6*. Helsinki: ABB Industry Oy / Drives.

ABB Oy (2003). *Hardware Manual: ACS800-17 Drives (75 to 1120 kW)*. Helsinki: ABB Oy / AC Drives.

ABB Oy (2004). *Technical catalog: ACS 6000 Medium Voltage Drives*. Rev. C. Switzerland: ABB Switzerland Ltd.

ABB Oy (2005a). *Hardware Manual: ACS800-17 Drives 55 to 2500 kW (75 to 2800 HP)*. Switzerland: ABB Switzerland Ltd.

ABB Oy (2005b). *Grounding and Cabling of the Drive System*. Finland: ABB Oy / AC Drives.

ABB Oy (2005c). *Synchronous Motors*. Helsinki: ABB Oy / Machines.

ABB Oy (2006). *ACS800 Sähköasennuksen suunnittelu: Nestejäähdytteiset ACS800 Multidrive –taajuusmuuttajat ja ACS800 Multidrive –moduulit*. Rev B. Helsinki: ABB Oy.

ABB Oy (2007). Bearing currents in AC drive systems. *Technical notes*. Rev B. ABB Oy / Drives.

- ABB Oy (2008a). EMC compliant installation and configuration for a power drive system. *Technical guide No. 3*. Rev D. ABB Oy / Drives.
- ABB Oy (2008b). Sine Filters. *User Manual*. Rev G. ABB Oy / AC Drives.
- ABB Oy (2009a). ACS800-77LC Wind Turbine Drive (Back-to-Back). *Hardware Manual*. Rev B. Helsinki: ABB Oy / AC Drives.
- ABB Oy (2009b). System Control Program 7.x. *Firmware manual*. Helsinki: ABB Oy / AC Drives.
- Barnes, M. (2003). *Variable Speed Drives and Power Electronics*. Oxford: Newnes.
- Bartolucci, E. & Finke, B. (2001). Cable Design for PWM Variable-Speed AC Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 37:2, 415–422.
- Boldea, I. (2006). *The Electric Generators Handbook. Variable Speed Generators*. Florida: CRC Press.
- Bothwell, J. (2007). Controlling shaft voltages. *Power magazine*, 151: 5, 70–72.
- Chunting, M., Flippa, M., Shen, J. & Natarajan, N. (2004). Modelling and Control of a Variable-Speed Constant-Frequency Synchronous Generator with Brushless Exciter. *IEEE transactions on Industry Applications* 40: 2, 565–573.
- Dannehl, J., Fuchs, F. & Hansen, S. (2007). PWM Rectifier with LCL-Filter using different Current Control Structures. *IEEE 2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. 1–10.
- Energiategollisuus (2005). *Vesivoimatuotannon määrä ja lisäämismahdollisuudet Suomessa*. Helsinki: Kauppa- ja Teollisuusministeriö.

- Erdman, J., Kerkman, R. J., Schlegel, D. & Skibinski, G. (1995). Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications* 32: 2, 250–259.
- ESHA (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Belgia: European Small Hydropower Association – ESHA.
- Flaspöhler, T. (2007). *Design of the runner of a Kaplan turbine for small hydroelectric power plants*. Tampere University of Applied Sciences. Mechanical engineering department. Final thesis.
- Fossdal, M. L., Arnstad, E., Mathiesen, K. B. & Eriksen, B. (2007). Hydropower. *Renewable energy* [Verkkodokumentti]. Norway: The Center for Renewable Energy. [Viitattu 10.7.2009]. Saatavissa: <http://www.renewableenergy.no/file.axd?fileID=12/>. Sivut 58–68.
- Habetler, T., Naik, R. & Nondahl, T. (1999). Design and Implementation of an Inverter Output LC Filter Used for DV/DT Reduction. *APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999*. 2, 1279–1284.
- Hoppler, R. & Errath, R. (2007). Motor Bearings, not just a piece of metal. *IEEE- IAS/PCA Cement Industry Conference 29 April – 03 May 2007*. 214–233.
- Ikäheimo, J., Pekola, J. & Haring, T. (2007). *Selection rules for VSD applications: Insulation and Filtering*. Finland: ABB Oy Motors.
- Istolahti, H. (2009). *Vesiturbiinin säätö kestopagneettigeneraattorikäytössä*. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan laitos. Diplomityö. 69 s.
- JBRUP (2009). *Products: bearings* [Online]. JBRUP Trading L.L.C. [Viitattu 20.8.2009]. Saatavissa: <http://www.jbrup.com/items.html>.

- Jouanne, A., Zhang, H. & Wallace, A. (1998). An Evaluation of Mitigation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 34:5, 1113–1122.
- Järvelä, J. (2008). *14. Vesirakennus*. Luentomoniste [Verkkodokumentti]. Helsinki: Teknillinen korkeakoulu, Vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorio. [Viitattu 14.7.2009]. Saatavissa: <http://www.water.tkk.fi/wr/kurssit/Yhd-12.1020/Luento12.pdf>.
- Kiameh, P. (2003). *Electrical Equipment Handbook: Troubleshooting and Maintenance*. New York: The McGraw-Hill Companies.
- Kinnula, M. (2008). *Pienvesivoiman elvytys, käyttöönotto ja kannattavuus*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan laitos. Diplomityö. 112 s.
- Kokko, V. (2008). Sähkömoottorit: Käynninaikainen kunnonvalvonta. *Promaint* 22: 5, 42–48.
- Laari, A. (2006). *Vuosaaren B-voimalaitoksen lauhduttimen merivesikanavaan sijoitettavan pienvesivoimalan kannattavuusselvitys*. Helsingin ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. 53 s.
- Määttänen, M., Koskinen, M., Pulkkinen, P., Soini, M. & Silvan, H. (1978). *Vesivoimalaitokset*. Helsinki: Insinöörityö Oy.
- Maibach, P., Faulstich, A., Eicher, M. & Dewar, S. (2007). *Full-scale Medium Voltage Converters for Wind Power Generators up to 7 MVA* [Verkkodokumentti]. Switzerland: ABB Switzerland Ltd. [Viitattu 11.08.2009]. Saatavissa: [http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/9847712acf892432c125740f003c3d65/\\$File/Full-Scale_Medium-Voltage_Converters_for_Wind_Power_Generators_up_to_7_MVA.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/9847712acf892432c125740f003c3d65/$File/Full-Scale_Medium-Voltage_Converters_for_Wind_Power_Generators_up_to_7_MVA.pdf).

- Mercier, D. & Cooper, D. (2002). Selection of Power Cables for PWM AC Adjustable-speed Drives. *IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*. 1–7.
- Merino, J.M. & Lopez, A (1996). ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant. *ABB Review* 37: 4, 33–38.
- Michalke, G., Hansen, A. D. & Hartkopf, T. (2008). *Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator* [Verkkodokumentti]. Belgium: European Wind Energy Conference EWEC. [Viitattu 24.8.2009]. Saatavissa: http://www.ewec2008proceedings.info/ewec2008/allfiles2/103_EWEC2008fullpaper.pdf.
- Pyrhönen, J. (2006). *6. Pyörivän koneen päämitat*. Opetusmateriaali [Verkkodokumentti]. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. [Viitattu 19.12.2009]. Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2720400/luku6%20paamitat.pdf>.
- Pyrhönen, J. (2009). *Sähkökäytöt*. Opetusmateriaali [Verkkodokumentti]. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. [Viitattu 26.8.2009]. Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2721000/Loppuosa.pdf>.
- Rilla, M. (2006). *Kestomagneettitahtikoneen lämpömallinnus*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö. 85 s.
- Schafer, D. & Simond, J. (1998). *Adjustable Speed Asynchronous Machine in Hydro Power Plants and its advantages for the Electric Grid Stability* [Verkkodokumentti]. Switzerland: LME – Laboratoire de machines electriques. [Viitattu 6.10.2009]. Saatavissa: http://lme.epfl.ch/webdav/site/lme/users/wetter/public/publications/1998/speeddrive_1998.pdf.

- Siljamäki, J. (2007). *Kestomagneettigeneraattorin sähköistys- ja suojausratkaisut vesivoimalaitoksilla*. Vaasan ammattikorkeakoulu. Insinöörityö. 84 s.
- Ström, J., Tyster, J., Korhonen, J., Rauma, K., Saren, H. & Silventoinen, P. (2009). Active du/dt filtering for variable-speed AC drives. *EPE '09. 13th European Conference on Power Electronics and Applications*. 1–10.
- Tammi, A. (2009). Product Manager, ABB Oy / Motors. Palaveri Vaasassa 18.12.2009.
- Tilastokeskus (2008). *Sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä kasvoi 25 prosenttia vuonna 2007* [Online]. Tilastokeskus, 26.9.2008 [Viitattu 5.8.2009]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2007/salatuo_2007_2008-0926_tie_001.html.
- Vesirakentaja (2008). *Voimaa vedestä 2007. Selvitys vesivoiman lisäämismahdollisuuksista*. Helsinki: Vesirakentaja Oy.
- Viherto, H. (1992). *Vesivoimalaitoksen säädön tutkiminen simulointimallin avulla*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sääätötekniikan laitos. Diplomityö.