



## **TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

## **INSINÖÖRITYÖ**

**Taajuusmuuttajaan perustuva voimantuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon**

**Työn tekijä: Petteri Laiti  
Työn valvoja: lehtori, DI Jari Ijäs  
Työn ohjaaja: DI Esa Ylinen**

**Työ hyväksytty: \_\_\_\_. \_\_\_\_. 2010**

**Jari Ijäs  
lehtori, dipl.ins.**



## **ALKULAUSE**

Tämä sähkövoimatekniikan insinööri työ tehtiin Edec Development Oy:n toimeksiannosta. Haluan kiittää työni ohjaajaa dipl.ins. Esa Ylistä mielenkiintoisesta aiheesta ja hyvistä neuvoista sekä muita työssä mukana olleita Edec Developmentin työntekijöitä. Työni valvoja dipl.ins. Jari Ijäs Metropolia Ammattikorkeakoulusta ansaitsee suuret kiitokset monista neuvoista, joita sain.

Helsingissä 1.5.2010

Petteri Laiti

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Petteri Laiti	
<b>Työn nimi:</b> Taajuusmuuttajaan perustuva voimantuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon	
<b>Päivämäärä:</b> 1.5.2010	<b>Sivumäärä:</b> 46 s.
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn ohjaaja:</b> lehtori, dipl.ins. Jari Ijäs, Metropolia Ammattikorkeakoulu	
<b>Työn ohjaaja:</b> dipl.ins. Esa Ylinen, Edec Development Oy	
<p>Tämä insinööri työ tehtiin Edec Development Oy:lle. Työssä tutkittiin, miten taajuusmuuttaja soveltuu tahtigeneraattorin ja heikon sähköverkon väliin. Tavoitteiden saavuttamiseksi tutkimusmenetelmänä käytettiin työn alkuvaiheessa teoreettista tarkastelua ja työn loppuvaiheessa tehtiin kokeellisia mittauksia.</p> <p>Työn alkuvaiheessa tutkittiin teoreettisesti alan kirjallisuuden pohjalta työn kannalta tärkeimpiä komponentteja, joita ovat tahtigeneraattorit ja niiden magnetointijärjestelmät sekä taajuusmuuttaja. Seuraavaksi selvitettiin voimantuotantolaitteiden verkkoonliittyminen ja sähköverkon suojaus taajuusmuuttajan kannalta. Työn loppuvaiheessa suoritettiin testauksia Vaconin toimittaman taajuusmuuttajan verkkoonliittymistilanteista sekä kuormitusten jakautumisesta taajuusmuuttajan ja dieselgeneraattorin välillä. Testaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähkö- ja energiatekniikanlaboratorioissa.</p> <p>Työssä tehtyjen testien perusteella saatiin tietoa taajuusmuuttajan toimivuudesta sähköverkon välikappaleena. Testauksien perusteella voitiin todeta, että taajuusmuuttajan verkkoonliittyminen toimii hyvin ja taajuusmuuttaja kykenee siirtämään generaattorin tuottaman sähkötehon. Työn tulosten perusteella saadaan hyvä pohja tehdä suunnitelmia taajuusmuuttajan liittämiseksi tahtigeneraattorin ja heikon sähköverkon väliin sekä raportin perusteella voidaan tehdä kattavia jatkotutkimuksia.</p>	
<b>Avainsanat:</b> taajuusmuuttaja, dieselgeneraattori, tahdistus, kuormanjako	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Petteri Laiti	
<b>Title:</b> Power Generation Connecting to Weak Electrical Network by Using Frequency Converter	
<b>Date:</b> 1 May 2010	<b>Number of pages:</b> 46
<b>Department:</b> Electrical engineering	<b>Study Programme:</b> Electrical Power Engineering
<b>Instructor:</b> Jari Ijäs, M.Sc. (Eng), Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences	
<b>Supervisor:</b> Esa Ylinen, M.Sc. (Eng), Edec Development Ltd.	
<p>This final year project was carried out for Edec Development Ltd. The purpose of the project was to determine the suitability of a frequency converter between a synchronous generator and weak electrical network. This study is based on theoretical observation and some experiments.</p> <p>The first part of this study describes the most important theory on the components examined. The most important components are synchronous generators and their excitation systems and frequency converter. The second part looks at the electrical power generation devices and connecting them to the mains as well as the protection of the frequency converter. The frequency converter mains hold and load sharing between the frequency converter and diesel generator were tested at the end of the work. The tests were carried out in the Metropolia University of Applied Sciences electrical and energy technology laboratories.</p> <p>Based on the findings, this study provides information on the frequency converter working between a synchronous machine and weak electrical network. The test results show that the mains hold of the frequency converter works smoothly and frequency converter is able to transfer the energy of the synchronous machine to the net without any larger problems. This final year project provides a good basis for making plans to connect a frequency converter between synchronous machines and a weak electrical network and it also serves as a basis for comprehensive further research.</p>	
<b>Keywords:</b> frequency converter, diesel generator, synchronizing, load sharing	

## SISÄLLYS

### ALKULAUSE

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

## SISÄLLYS

### LYHENTEET JA SYMBOLIT

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄ</b>	<b>2</b>
2.1	Sähkökoneet	2
2.2	Tahtigeneraattori	2
2.3	Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmä	5
2.4	Taajuusmuuttaja	8
2.4.1	Jännitevälipiiri	9
2.4.2	Generaattorisuuntaaja	9
2.4.3	Verkkovaihtosuuntaaja	10
2.4.4	Tehon kulkusuunta ja moduloitu jännite	10
2.4.5	LCL-suodatin	12
2.4.6	Taajuusmuuttajan häviöt	12
<b>3</b>	<b>GENERAATTORILAITTEISTON VERKKOON LIITTYMINEN</b>	<b>13</b>
3.1	Tahtigeneraattorin tahdistaminen verkkoon	13
3.2	Taajuusmuuttajan verkkoon tahdistus	15
3.3	Katkaisijaohjaukset	16
3.4	Voimalaitoksen säädöt	17
3.4.1	Jännitteen ja loistehon säätö	17
3.4.2	Taajuuden ja tehon säätö	19
<b>4</b>	<b>SÄHKÖVERKON SUOJAUS</b>	<b>21</b>
4.1	Vikatyytit	21
4.2	Suojauksen selektiivisyys taajuusmuuttajan kannalta	24
<b>5</b>	<b>TAAJUUSMUUTTAJALAITTEISTON TESTAUS</b>	<b>25</b>
5.1	Simuloitava verkko	25

<b>5.2</b>	<b>Testauslaitteiston esittely</b>	<b>26</b>
<b>5.3</b>	<b>Testauksen suoritus</b>	<b>27</b>
<b>5.4</b>	<b>Testaustulokset ja niiden analysointi</b>	<b>28</b>
5.4.1	<i>Taajuusmuuttajan muodostama tyhjä verkko</i>	28
5.4.2	<i>Taajuusmuuttajan syöttämä saareke</i>	29
5.4.3	<i>Taajuusmuuttajan tahdistus tyhjän dieselgeneraattorin rinnalle</i>	32
5.4.4	<i>Taajuusmuuttajan tahdistus kuormitetun dieselgeneraattorin rinnalle</i>	34
5.4.5	<i>Dieselgeneraattorin tahdistus tyhjän taajuusmuuttajan rinnalle</i>	36
5.4.6	<i>Dieselgeneraattorin tahdistus kuormitetun taajuusmuuttajan rinnalle</i>	39
5.4.7	<i>Kuormien jakautuminen taajuusmuuttajan ja dieselgeneraattorin kesken</i>	41
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>45</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>46</b>

## LYHENTEET JA SYMBOLIT

### Lyhenteet

AC	Alternating Current; vaihtovirta
AFE	Active Front End; Vaconin käyttämä termi aktiiviselle suuntaajalle
AVR	Automatic Voltage Regulator; automaattinen jännitteensäätäjä
DC	Direct Current; tasavirta
DC bus	Direct Current busbar; tasavirtakisko
DG	dieselgeneraattori
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; eristehilatransistori
INU	Inverter Unit; Vaconin käyttämä termi aktiiviselle verkkosuuntaajalle
LCL	kahdesta kelasta ja kondensaattorista koostuva suodatin
NCDrive	Vacon-taajuusmuuttajan monitorointiohjelma
NXI	Vaconin käyttämä tuotesarja
PWM	Pulse Width Modulation; pulssinleveysmodulaatio
SG1	Synchronous Machine 1; tasavirtakoneen pyörittämä tahtigeneraattori
SG2	Synchronous Machine 2; dieselmoottorin pyörittämä tahtigeneraattori
smv	sähkömotorinen voima
THD	Total Harmonic Distortion; harmoninen kokonaissärö
VSI	Voltage Source Inverter; jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

## Symbolit

$E, E_q$	lähdejännite
$E_{max}$	maksimilähdejännite
$f$	taajuus
$f_n$	nimellistaajuus
$f_{ohj}$	taajuuden ohjearvo
$f_k$	käämityskerroin
$I_n$	nimellisvirta
$I_{nG}$	generaattorin nimellisvirta
$I_m$	magnetointikäänin virta
$I_{m, max}$	magnetointikäänin maksimi kuormitettavuus
$I_{pm}$	mitattu pätövirta
$I_s$	Induktiivinen virta
$n$	pyörimisnopeus
$N$	johdinkierrokset
$p$	napapariluku
$P$	pätöteho
$P_{max}$	maksimi pätöteho
$Q$	loisteho, verkko
$R_s$	staattorikäänin resistanssi
$S$	näennäisteho
$S_{nG}$	generaattorin nimellisteho
$S_{max}$	maksimi näennäisteho
$\Delta U$	jännite-ero
$U_{DC}$	tasajännite
$U_n$	nimellisjännite
$U_s$	napajännite
$X_d$	pitkittäisreaktanssi



$X_q$	poikittaisreaktanssi
$x$	statiikan suhteellisarvo
$\alpha$	vaihe-ero
$\delta$	tehokulma
$\varphi$	magneettivuo
$\Psi$	kokonaiskäämivuo
$\Psi_F$	tasamagnetointikäämivuo
$\omega$	kulmanopeus

## 1 JOHDANTO

Nykyisin voimalaitosten teho syötetään lähes yksinomaan suoraan verkkoon ilman välikappaleita. Suora kytkeytyminen verkkoon on hyvä ja toimiva tapa silloin, kun generaattoria pyörittävän voimakoneen pyörimisnopeus voidaan pitää vakiona.

Sovelluksissa, joissa generaattoria pyörittävä mekaaninen voimakoneisto pyörii muuttuvalla nopeudella tai momentilla, voi kyseinen generaattorilaitteisto heiluttaa syötettävän verkon taajuutta, jos verkko on heikko. Edellä mainittu tilanne löytyy esimerkiksi tuulivoimasovelluksesta. Taajuusmuuttaja voi olla ratkaisu kyseisten ongelmien välttämiseksi. Taajuusmuuttajalla voidaan muuttaa generaattorin syöttämä taajuus verkon taajuutta vastaavaksi.

Taajuusmuuttajaa käytettäessä voidaan voimakoneen tuottama teho ajaa laajemmalla pyörimisnopeusalueella verkkoon. Tällä tavoin voimakoneen pyörimisnopeus voidaan optimoida taloudellisesti ja kustannuksia säästää.

Tässä insinööriyössä selvitetään taajuusmuuttajan soveltuvuutta tahtigeneraattorin ja sähköverkon väliin. Työssä selvitetään lisäksi teoreettisesti sekä mittauksin tahdistustilanteita ja kuormitusten jakautumista taajuusmuuttajan sekä sen rinnalla käyvän muun voimantuotannon kesken.

Työn alussa esitellään tämän selvityksen kannalta sähkövoimajärjestelmän tärkeimmät komponentit, joita ovat tahtigeneraattori, moottori ja taajuusmuuttaja. Lisäksi selvitetään tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmän peruseriaatteet.

Tämän jälkeen käsitellään tahtigeneraattoreiden ja taajuusmuuttajien verkkoonliityntä, johon kuuluu lähinnä tahdistukset, katkaisijaohjaukset sekä pättö- ja loistehojen säädöt. Generaattoreihin liittyvä suojaus käsitellään hyvin yleisellä tasolla. Lisäksi virtaselektiivisyys esitellään taajuusmuuttajan kannalta.

Lopuksi esitellään testaukset, joita tehtiin Vaconin valmistamalla taajuusmuuttajalaitteistolla ja dieselgeneraattorilla. Testaukset liittyvät tahdistuksiin ja tehonjakoon.

## 2 SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄ

Sähkövoimajärjestelmä voidaan jakaa kolmeen osaan: sähkön tuotanto, sähkön kulutus sekä niitä yhdistävät johdot. Sähkövoimajärjestelmässä tuotetun ja kulutetun tehon on oltava joka hetki samat verkon stabiilin tilan säilyttämiseksi /1/. Mikäli kulutus ja tuotanto eivät vastaa toisiaan, muuttuu tällöin verkon taajuus siten, että tuotannon ollessa kulutusta suurempi taajuus kasvaa ja kulutuksen ollessa suurempi taajuus pienenee. Verkkoon kytkettyjen sähkökoneiden inertia eli hitausmassa hidastaa verkossa tapahtuvia taajuuden muutoksia /2/.

Sähkö tuotetaan voimalaitoksissa, joissa voimakone pyörittää mekaanisesti sähkögeneraattorin roottoria. Kun pyörivää roottoria magnetoidaan, synnyttää se staattorikäimitykseen sähkömotorisen voiman. Mekaaninen akseli-voima tuotetaan tyypillisesti joko vesi-, höyry- tai kaasuturbiineilla sekä tuuli-voimalla, joka on voimakkaasti kasvava sähköntuotantomuoto. Varavoimageraattoreissa käytetään usein dieselmootteita. Laivoissa käytetään yleensä suuria dieselgeneraattoreita tai kaasuturbiineja. Tässä työssä keskitytään dieselgeneraattoreihin.

### 2.1 Sähkökoneet

Pyörivät sähkökoneet voidaan jakaa kahteen pääosaan: tasasähkökoneisiin ja vaihtosähkökoneisiin. Vaihtosähkökoneet voidaan myös jakaa moneen eri alakategoriaan, mutta tärkeimmät niistä ovat epätahtikoneet sekä tahtikoneet. Molempien edellä mainittujen koneiden staattorikäimitykset ovat lähestulkoon samanlaiset, mutta niiden roottorirakenteet poikkeavat toisistaan. Tämän tutkimuksen kannalta tärkein on tahtikone.

### 2.2 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattorin roottoria eli napakäämiä pyöritetään voimakoneen avulla ja samaan aikaan roottorin käämeihin syötetään tasavirtaa eli magneetivirtaa, joka saa aikaan magneettikentän. Staattoriin nähden pyörivä eli muuttuva magneettikenttä synnyttää staattorin käämeihin sähkömotorisen voiman (smv) eli lähdejännitteen  $E$ .

Verkkoon kytketyn tahtikoneen roottorin ja staattorin magneettikentät pyörivät täsmälleen samalla nopeudella, joten kone pyörii tahdissa. Tyhjäkäyvän

tahtigeneraattorin sähkömotorisen jännitteen taajuus on napapariluvun ja roottorin pyörimisnopeuden tulo, joka selviää seuraavasta yhtälöstä:

$$n = \frac{f}{p} \text{ eli } n = 60 \cdot \frac{f}{p} \text{ [r/min]} \quad (1)$$

jossa  $n$  on roottorin pyörimisnopeus

$p$  on generaattorin napapariluku.

Indusoituneen jännitteen itseisarvon määrää pyörimisnopeus ja magneetointivirta. Molempien suureneminen kasvattaa myös päälähdejännitettä, joka saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_k f N \varphi_m \quad (2)$$

jossa  $f_k$  on käämityskerroin

$f$  on taajuus

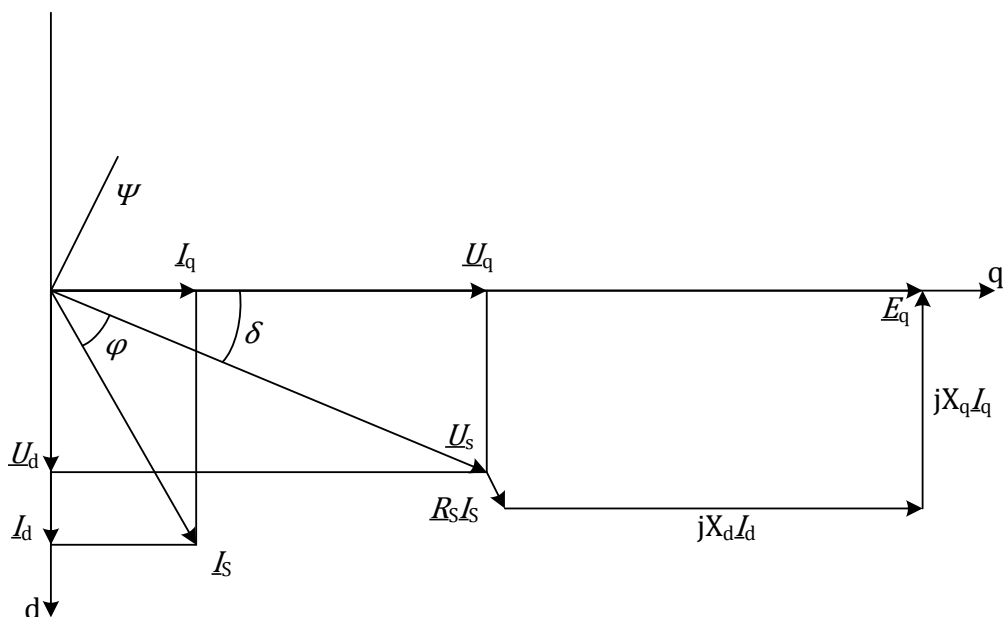
$N$  on staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

$\varphi_m$  on yhden magneettinavan päävuo, joka on sama kuin staattorivyöhyden maksimi- eli huippuvuo  $\hat{\varphi}_m$ . /3./

Tahtikoneiden roottori- eli napapyörän rakenteen perusteella ne voidaan jakaa kahteen eri ryhmään eli umpi- ja avonapaisiin tahtikoneisiin. Umpinaparoottoreita käytetään pääsääntöisesti nopeasti pyörivissä koneissa ja avonaparoottoreita hidaskäyntisissä tahtikoneissa. Tosin nykyään esimerkiksi Siemens valmistaa myös umpinapaisia tahtikoneita hidaskäyntisiin sovelluksiin, joten jaottelu nopeuden perusteella alkaa olla hieman vanhanai-kaista. /4./

Avo- ja umpinapaiset tahtikoneet poikkeavat matemaattisesti toisistaan. Reaktansseilla on suuri merkitys tahtikoneen ominaisuuksiin. Avonapaisessa tahtikoneessa sen roottorirakenteen johdosta pitkittäiset ja poikittaiset ilma- välit poikkeavat toisistaan, jonka takia myös pitkittäisreaktanssi  $X_d$  ja poikittaisreaktanssi  $X_q$  poikkeavat keskenään. Umpinapaisen tahtikoneen matemaattinen mallintaminen on huomattavasti helpompaa kuin avonapaisen, johtuen sen symmetrisestä rakenteesta. Umpinapageneraattorin pitkittäinen reaktanssi  $X_d$  ja poikittainen reaktanssi  $X_q$  ovat lähes yhtä suuret.

Kuvassa 1 on esitetty erään avonapaisen tahtigeneraattorin osoitinpiirros:



Kuva 1. Induktiivisella virralla  $I_s$  kuormitetun avonapatahtigeneraattorin osoitinpiirros. Tehokulma  $\delta$  on smv:n  $E = E_q$  ja napajännitteen  $U_s$  välillä.  $R_s$  on staattorikäämin resistanssi,  $\Psi_f$  on tasamagnetointikäämivuo ja  $\Psi$  on kokonaiskäämivuo /5;6/

Avonapatahtigeneraattorin pätöteho voidaan lausua tehokulmayhtälöllä

$$P = \frac{EU_s}{X_d} \sin \delta + U_s^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta \quad (3)$$

missä  $E$  on koneen sisäinen vaiheiden välinen sähkömotorinen voima

$U_s$  on koneen vaiheiden välinen napajännite, eli verkon pääjännite.

Umpinapaisen tahtigeneraattorin ( $X_d = X_q$ ) tehokulmayhtälö voidaan lausua seuraavasti:

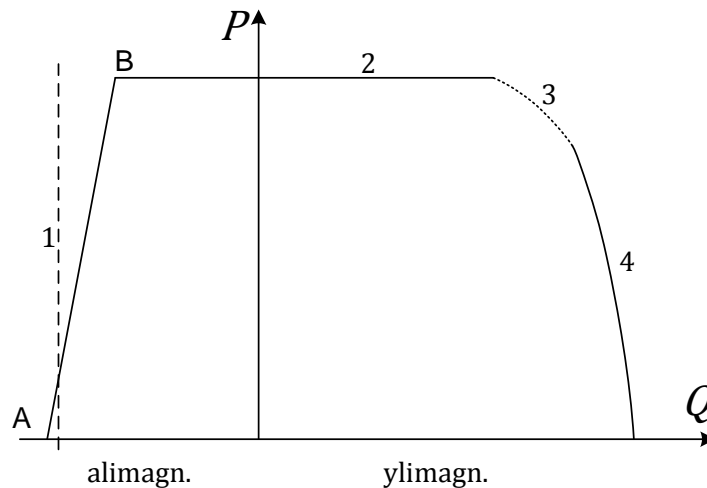
$$P = \frac{EU_s}{X_d} \sin \delta \quad (4)$$

Loistehon yhtälö saadaan seuraavasti:

$$Q = \frac{EU_s}{X_d} \cos \delta + \frac{U_s^2}{X_d} \quad (5)$$

Kuvassa 2 on esitetty erään tahtigeneraattorin PQ-diagrammi, joka kuvaa generaattorin jatkuvan toiminnan rajoja. Raja 1 kuvaa staattisen stabiiliuden

rajaa eli magnetoinnin alarajaa, jota ei saa alittaa tahdistuamisen vuoksi. Käytännön raja kulkee pisteiden A ja B välillä. Raja 2 kuvaa voimakoneen tehontuottoa, joka on maksimiteho mitä voidaan tuottaa ( $P=P_{\max}$ ). Rajalla 3 tulee vastaan staattorikäämin virtaraja eli kuormitettavuus ( $S=S_{\max}$ ). Raja 4 on magnetointikäämin jatkuvan tilan maksimikuormitettavuus, jonka mukaan määräytyy myös maksimilähdejännite ( $I_m=I_{m,\max}$  sekä  $E=E_{\max}$ ).



Kuva 2. Tahtigeneraattorin PQ-diagrammi /5/

Yksinkertaistetusti tahtikoneet poikkeavat epätahtikoneista siten, että tahtikoneiden roottoreiden magnetointia voidaan säätää halutun suuruiseksi muuttamalla roottorikäämeissä kulkevaa magnetointivirtaa. Magnetointia muuttamalla muutetaan myös staattorikäämitykseen indusoituvaa päälähdejännitettä.

### 2.3 Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmä

Tämän luvun tarkoitus on selvittää tahtikoneissa yleisesti käytettyjen magnetointijärjestelmien keskeisimmät toiminnallisuudet.

Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmä koostuu kolmesta osakokonaisuudesta, joita ovat:

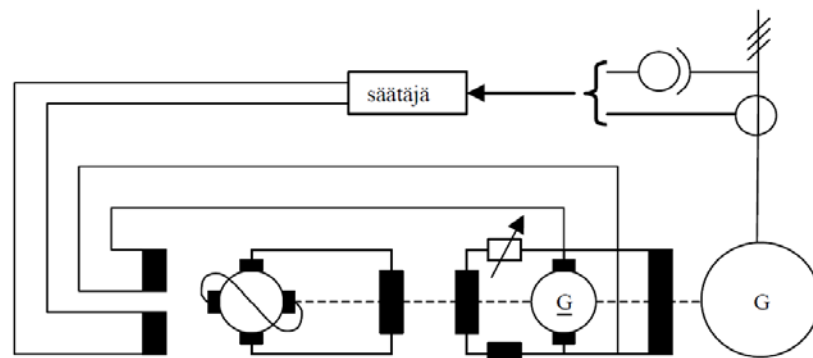
1. magnetointilaitteisto
2. säätäjä
3. käsiohjauslaitteisto.

Magnetointilaitteiston tarkoitus on syöttää roottorille tasasähköä sen magnetoimiseksi, joka synnyttää ankkurikäämiin lähdejännitteen. Säätäjä

puolestaan ohjaa magnetointilaitteistoa tahtikoneen navoista mitattujen suurteiden perusteella. Pääsääntöisesti säätö tapahtuu generaattorin napajännitteen perusteella, mutta myös muita säätöohjeita voi tapauskohtaisesti olla. Käsihjauslaitteistolla generaattorin jännite voidaan asettaa halutun suuruiseksi säätämällä manuaalisesti magneitoimisvirtaa. Tahtikoneet jaetaan magneitoimismenetelmän perusteella harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. /3;5./

#### *Pyörivä herätinkonemagneitointi*

Kuvassa 3 on esitetty pyörivällä herätinkonemagneitoinnilla toimiva järjestelmä. Magneitointi tehdään tahtikoneen roottorin kanssa samalle akselille sijaitetulla tasavirtageneraattorilla. Tahtikoneen säätö tehdään säätämällä herätinkoneen magneitointia. Pääkoneen magneitointivirta tuodaan roottorille hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla. /7./

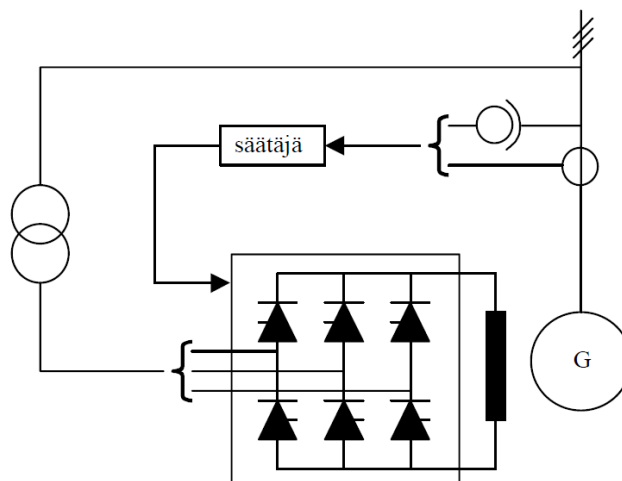


*Kuva 3. Pyörivän herätinkonemagneitoitinnin periaate /8/*

#### *Staattinen magneitointi*

Staattisen magneitoinnin (kuva 4), eli harjallisen magneitoinnin magneitoitien energia saadaan tyypillisesti suoraan generaattorin navoista magneitoitimuuntajan avulla. Säätäjä ohjaa tyristorisiltaa, joka tekee roottoriin tarvittavan tasavirran magneitointia varten. Tasavirta puolestaan johdetaan roottoriin hiiliharjojen avulla. /7./

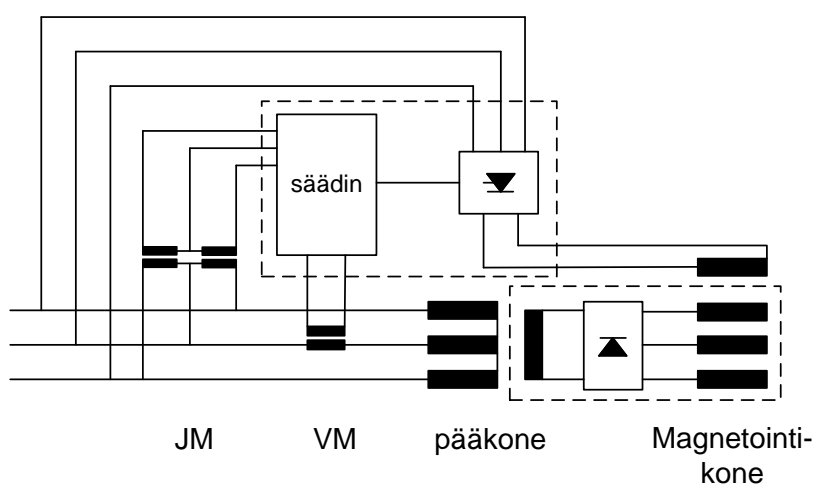
Magneitoitimenetelmän etuja ovat suuri nopeus, luotettavuus sekä vähäinen huollon tarve. Järjestelmän haittapuolena ovat hiiliharjat sekä tehopuolijohdeiden läpi kulkevat suuret virrat. /5./



Kuva 4. Staattisen magnetoinnin periaate /8/

#### Harjaton magneointi

Kuvassa 5 on esitetty harjaton magneointiratkaisu. Pääkoneen navoista syötetään tyristorisiltaa, joka syöttää tasavirtaa magneointikoneen (ulkonapainen tahtikone) magneointikäämiin. Tämä puolestaan synnyttää jännitteen roottoriakselille sijoitettun magneointikoneen työvirtakäämiin, joka syöttää pääkoneen roottorikäämiä diodisillan kautta. Pääkoneen roottorikäämi synnyttää jännitteen staattorikäämiin. Tahtigeneraattorin herääminen, eli jännitteen nousu voidaan varmistaa esimerkiksi yhdellä apukoneeseen sijoitetulla kestopagneettinavalla.



Kuva 5. Harjattoman magnetoinnin periaate /9/

Harjattoman magnetoinnin hyvä puoli on, että hiiliharjoista on päästy eroon, koska se vähentää huollon tarvetta. Haittapuolena on hidas



säätödynamiikka /9/. Harjatonta magnetointimenetelmää käytetään tyypillisesti pienemmän kokoluokan eli 10 - 20 MVA:n koneissa.

Harjaton magnetointi on toteutettavissa myös siten, että verkkosyötön sijaan magnetointikone saa magnetointitehon roottoriakselille sijoitetusta kesto-magneettitahtikoneesta, jolloin ei olla riippuvaisia pääkoneelta saatavasta jännitteestä.

## 2.4 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan tarkoituksena on sovittaa esimerkiksi vakiotaajuinen verkko sekä nopeussäädettävä moottori keskenään. Tässä tutkimuksessa selvitetään nelikvadranttisen taajuusmuuttajan soveltuvuutta generaattorikäyttöön, jossa energia voi kulkea molempiin suuntiin.

Generaattorikäytössä taajuusmuuttajan tarkoitus on siirtää generaattorissa tuotettu energia verkkoon päin, toisin kuten moottorikäytössä. Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty generaattori voi toimia eri taajuudella kuin verkko. Tämä mahdollistaa generaattorin kytkemisen verkkoon jo pienellä ja muuttuvalla kierrostaajuudella eli tehoa voidaan syöttää tilanteissa, joissa se ei olisi mahdollista generaattorin ollessa kytkettynä suoraan verkkoon.

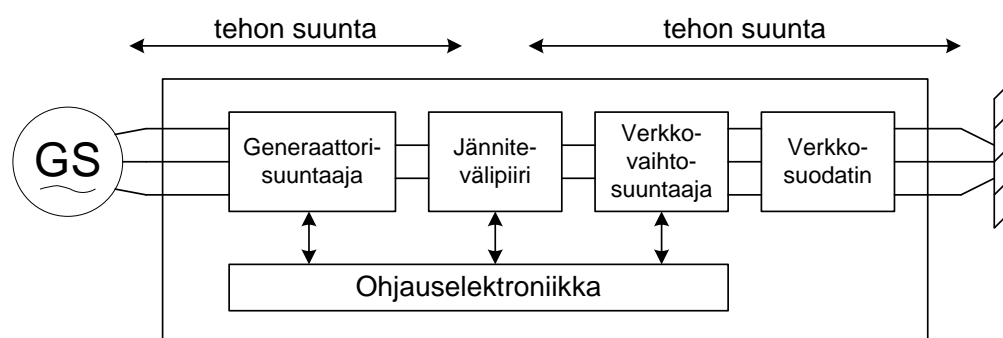
Esimerkkinä voisi olla generaattorikäyttö, jossa generaattorin voimakone pyörii nimellinopeutta pienemmillä kierroksilla, jolloin generaattorin tuottaman jännitteen taajuus on myös pienempi. Mikäli generaattori on kytketty verkkoon, jossa on maksimissaan vain muutama generaattori, ja sen suhteellinen teho muihin generaattoreihin on suuri, laskee verkon taajuus tämän yhden generaattorin takia. Taajuusmuuttajan avulla tämän yhden generaattorin tuottama jännite voidaan pitää vakiotaajuisena. Taajuusmuuttajaa voidaan käyttää lisäksi voimakoneen hyötysuhteen optimointiin, säätämällä voimakoneen kierrostaajuutta kysytyn sähkötehon perustella /2/.

Yleisimmin käytössä oleva taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja (VSI; *Voltage Source Inverter*). Sen etuja ovat mm. tehon siirto molempiin suuntiin, loistehon säätömahdollisuus sekä harmonisten yliaaltojen kompensointimahdollisuus. /10./

Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja käsittää kolme pääpiirin osaa:

1. generaattorisuuntaaja
2. jännitevälipiiri
3. verkkovaihtosuuntaaja.

Taajuusmuuttaja sisältää myös verkkosuodattimen ja ohjauspiirin, jolla puoli-johdekytkimiä ohjataan. Seuraavaksi on esitetty periaatekaavio taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketystä generaattorista (kuva 6):



Kuva 6. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekaavio generaattorikäytössä /6/

Generaattorisuuntaaja on ensimmäisenä tarkasteltaessa taajuusmuuttajan toimintaa generaattorista verkon suuntaan. Suuntaaja tekee generaattorin syöttämästä vaihtosähköstä sykkivää tasasähköä jännitevälipiirille. Tasasuuntaaja voi olla toteutettu diodeilla, tyristoreilla, tehotransistoreilla tai edellisten yhdistelmillä. Diodeilla toteutettu suuntaaja on ohjaamaton eli se kykenee syöttämään tehoa vain yhteen suuntaan. Puoliksi ohjattu silta on diodien ja tyristorien yhdistelmä. Täysin ohjatussa sillassa on pelkästään tyristoreja tai transistoreja.

#### 2.4.1 Jännitevälipiiri

Jännitevälipiirissä on kondensaattori, joka tasoittaa suuntaajan syöttämän sykkivän tasajännitteen. Lisäksi välipiirissä voi olla tasoituskuristin ennen kondensaattoria.

#### 2.4.2 Generaattorisuuntaaja

Generaattorisuuntaajan tehtävä on siirtää generaattorin tuottama teho jännitevälipiiriin sekä pitää välipiirin jännite vakiona. Generaattorisuuntaaja ei säädä välipiirin jännitettä aktiivisesti, mutta se ei esimerkiksi nosta jännitettä

asetettua ylärajaa suuremmaksi. Välipiirin jännitteen noustessa ylärajalle, pienentää generaattorisuuntaaja jarruttavaa momenttia, joka puolestaan pudottaa välipiirin jännitettä. Mikäli generaattorin mekaanista momenttia ei samanaikaisesti pienennetä, generaattorin pyörimisnopeus kasvaa. Verkkovaihtosuuntaajan toimintahäiriö voi esimerkiksi aiheuttaa edellä mainitun tilanteen. Tietyissä tapauksissa generaattorisuuntaaja voi demagnetoida generaattoria, jolloin generaattorin napajännite saadaan pysymään nimellisenä vielä kaksinkertaisella nopeudella. /2;10./

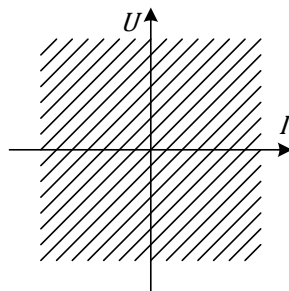
### 2.4.3 Verkkovaihtosuuntaaja

Verkkovaihtosuuntaajan tarkoitus on syöttää generaattorisuuntaajan välipiiriin syöttämä teho verkkoon. Mikäli verkon taajuus laskee, täytyy verkkovaihtosuuntaajan reagoida syöttämällä lisää pätötehoa verkkoon. Jos verkon jännite laskee, verkkovaihtosuuntaaja syöttää induktiivista loistehoa verkkoon. Verkkovaihtosuuntaajan syöttämä teho saa välipiirin jännitteen laskemaan, jolloin generaattorisuuntaajan täytyy reagoida syöttämällä välipiiriin lisää tehoa. Tämä puolestaan pudottaa generaattorin taajuutta ja jännitettä, jolloin voimakoneen mekaanista momenttia ja generaattorin magnetointia täytyy kasvattaa.

Verkkovaihtosuuntaaja säätelee välipiirin jännitettä vain siinä tapauksessa, että jännite laskee alarajan alapuolelle. Sääto tapahtuu vähentämällä tehon siirtämistä verkkoon. /2;10./

### 2.4.4 Tehon kulkusuunta ja moduloitu jännite

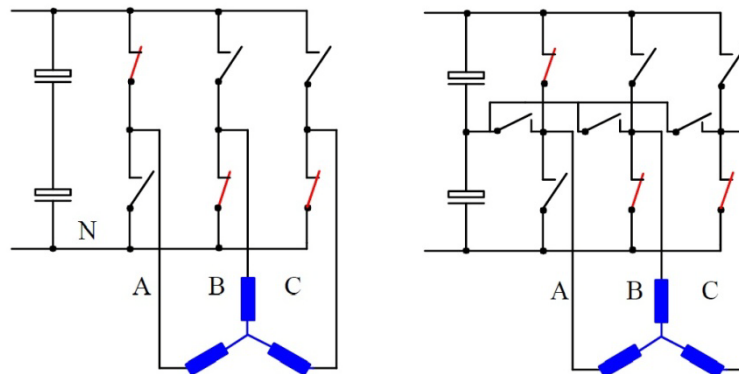
Nelikvadranttisessa taajuusmuuttajassa molemmat suuntaajat ovat aktiivisia, joista Vacon käyttää nimitystä *AFE (Active Front End)*. Tehopuolihohteet ovat *IGBT-transistoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor)*, jotka mahdollistavat virran kulun verkon molempiin suuntiin (kuva 7).



Kuva 7. Virta-jännite-tason kvadrantit /4/

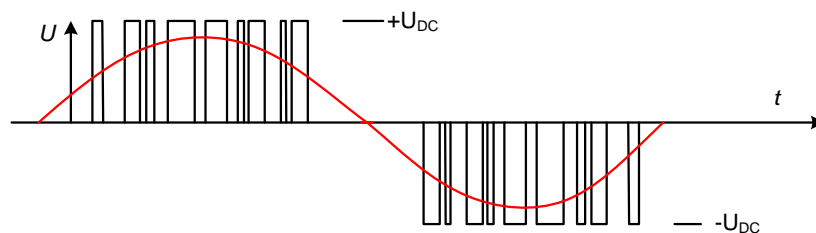
Koska myös jännitteen suunta voi vaihtua ja teho on virran ja jännitteen tulo, myös teho voi kulkea aktiivisuuntaajissa molempiin suuntiin. Tämä nähdään kuvasta varjostettuna alueena, jolloin kaikki neljä kvadranttia ovat käytettävissä.

Aktiivisillan modulointi tapahtuu pulssinleveysmoduloinnilla (*PWM; Pulse Width Modulation*). Nykyisin taajuusmuuttajat ovat joko kaksi- tai kolmitasoisia (kuva 8). Kolmitasoisia käytetään pääasiassa suuritehoisissa käytöissä. /4./



Kuva 8. Kaksi- ja kolmitasojännitevälipiiritaajuusmuuttajan vaihtosuuntausosien periaatekytkennät /4/

Pulssinleveysmodulaatioon perustuvassa taajuusmuuttajassa välipiirin jännitettä pilkkotaan amplitudiltaan yhtä pitkiin, mutta ajaltaan eripituisiin jaksoihin. Kuvassa 9 on kaksitasoisen suuntaajan muodostama jännite. Pulssien välinen tauko voi myös vaihdella. Kuvassa on esitetty myös suodatettu jännite punaisella.



Kuva 9. PWM-moduloinnin periaatekuva /4/

Kolmitasoisen suuntaajan tekemä pulssimuotoinen jännite on samankaltainen kuin kaksitasoisen, mutta siinä on sekä positiivisella että negatiivisella puolella kaksi jännitetasoa. Mitä enemmän taajuusmuuttajassa on tasajännitetasoa, sitä sinimuotoisempaa on sen tuottama jännite.

#### 2.4.5 LCL-suodatin

Aktiivisen syöttöyksikön verkkoon syöttämä jännite on suodatettava. Suodatus toteutetaan LCL-suodattimella, jonka tarkoitus on poistaa tai vähentää perustaajuutta suuremmat taajuuskomponentit. Ylimääräiset taajuuskomponentit aiheuttavat virtaan ja jännitteeseen säröä, joiden kokonaistasoa prosentteina eli kokonaissärökerrointa kuvataan THD-arvolla (*Total Harmonic Distortion*). Eri standardit määrittelevät virralle ja jännitteelle maksimi särötasovaatimukset. Yleisenä tasona voidaan kuitenkin pitää 8 % THD-arvoa, joka pohjautuu SFS-EN 50160 -standardiin. Lisäksi on olemassa esimerkiksi laivoille luokituslaitosten säännöt, jotka määrittävät omat tasonsa. Tässä työssä ei käsitellä standardien ja luokkien vaatimuksia tarkemmin.

LCL-suodatin sisältää kaksi induktanssia sarjassa sekä niiden väliin rinnalle kytketyt kondensaattorit. LCL-suodin voidaan toteuttaa pieniarvoisilla komponenteilla, minkä takia kustannukset pysyvät aisoissa.

Suodatetun jännitteen käyrämuoto muistuttaa enemmän sinimuotoa, kun taas suuntaajan moduloima jännite muistuttaa enemmän sarjaa kanttiaaltoja. LCL-suodatin täytyy olla molemmissa AFE-yksiköissä, koska teho voi kulkea molempiin suuntiin ja näin ollen molemmat AFE-yksiköt voivat syöttää verkkoa. Generaattorin puoleinen suodatin suojaa generaattoria jännitepiikeiltä ja verkon puoleinen suodatin puolestaan pitää jännitteen yliaaltopitoisuuden sääntöjen mukaisissa rajoissa.

Suodatin tarvitaan myös syöttävän generaattorin puolelle, jotta generaattorille ei pääse haitallisia jännitepiikkejä. Erityisesti vanhemmissa generaattoreissa, joissa ei ole käytetty vahvennettua eristystä, on syytä olla varovainen jännitepiikkien suhteen. Pahimmassa tapauksessa generaattorin eristeiden rikkoutuminen johtaa koko generaattorin tuhoutumiseen oikosulun seurauksena.

#### 2.4.6 Taajuusmuuttajan häviöt

Taajuusmuuttajan hyötysuhteeseen sekä sen seurauksena taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat siinä syntyvät häviöt. Häviöitä taajuusmuuttajassa aiheuttavat suuntaajassa olevien puolijohteiden kytkentä- ja johtohäviöt, ohjaus- ja säätöhäviöt sekä LCL-suodattimien häviöt.

Kustannuksiin vaikuttaa lisäksi invertterin kytkentätaajuus. Kytkentätaajuuden kasvaessa voidaan  $LCL$ -suodattimen komponenttikokoa pienentää, mikä pienentää kustannuksia. Kytkentätaajuuden kasvaessa invertterin kytkentähäviöt kuitenkin kasvavat, mikä puolestaan heikentää hyötysuhdetta ja siten myös laitteiston käyttötehoa.

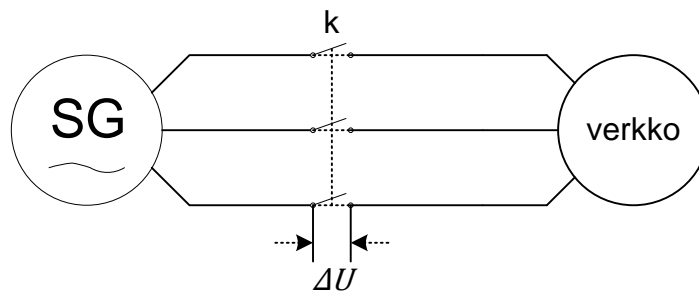
### 3 GENERAATTORILAITTEISTON VERKKOON LIITTYMINEN

Verkkoon kytkettävä tahtigeneraattori tai taajuusmuuttaja on tahdistettava verkkoon. Tahdistus pienentää verkon ja generaattorin välisien jänniteerojen aiheuttamia virtatransientteja. Mikäli generaattori kytketään verkkoon tahdistamatta, kytkentä voi tapahtua juuri sellaisella hetkellä, jolloin verkko ja generaattori ovat vaiheoppositiossa. Tämä aiheuttaa 3-vaiheiseen oikosulkuun nähden 2-kertaisen virran, joka voi olla tuhoisa verkon ja generaattorin kannalta.

#### 3.1 Tahtigeneraattorin tahdistaminen verkkoon

Tahtikoneen verkkoon kytkeminen ei voi tapahtua kuten oikosulkumoottorilla, joka kytketään verkkoon sen pyörimisnopeuden ollessa nolla. Tahtikoneen napajännitteiden tulee olla verkon jännitteiden kanssa samansuuruiset. Käynnistyksen alkuvaiheessa roottorin pyörimisnopeus ja siitä aiheutuva tahtikoneen jännitteen taajuus eivät ole lähelläkään verkon taajuutta. Tahtikoneen rinnankäynnin mahdollistamiseksi verkon kanssa on se tahdistettava verkkoon.

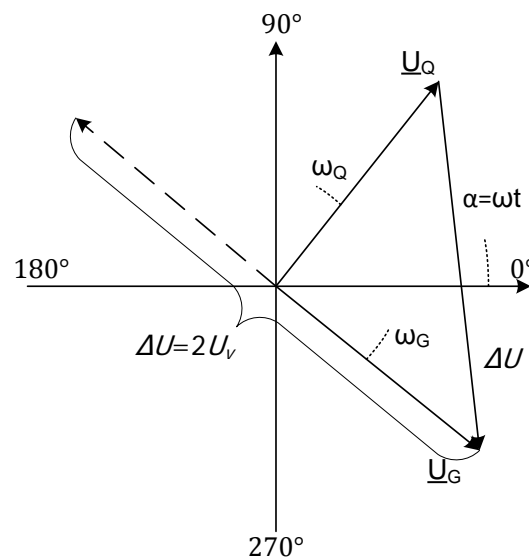
Kuvassa 10 on esitetty sähköverkko, jonka oletetaan olevan ”jäykkä” eli jännite ja taajuus ovat vakioita. Verkon rinnalle kytketään avuksi käsisäätöinen tahtigeneraattori SG.



Kuva 10. Tahtikoneen tahdistaminen verkkoon katkaisijan  $k$  avulla

Tahdistus voi tapahtua ainoastaan sellaisella hetkellä, kun jännite-ero  $\Delta U$  on katkaisijan k liittimien välillä lähes nolla. Jännitteen ollessa suhteellisesti paljon nollaa suurempi, syntyy suuria tasoitustransienttivirtoja. Tasoitustransientit voivat aiheuttaa generaattorin putoamisen tahdistusta tai irtoamisen verkosta suojiin toimiessa.

Kuvassa 11 on generaattorin ja verkon vaihejännitteiden osoittimet. Jännite-ero  $\Delta U$  on suurimmillaan eli  $2U_v$  silloin, kun tahdistettavien verkkojen vaihejännitteet ovat vastakkaisvaiheiset. Generaattorin jännitteiden itseisarvo voidaan säätää magnetoinnilla (ks. 2.3).



Kuva 11. Tahdistettavien verkon osien jänniteosoittimet /11/

Verkon ja generaattorin välinen vaihe-ero saadaan nolaksi tietyin väliajoin kun generaattorin taajuus on verkon taajuutta suurempi. Esimerkiksi generaattorin taajuus on verkon taajuutta 0,1 Hz suurempi. Näin saadaan generaattorin vaiheosoittimet pyörimään hieman verkon vaiheosoittimia nopeammin. Mikäli generaattorin ja verkon taajuudet ovat samat, ja vaiheosoittimet eivät ole päällekkäin, vaihe-eroa ei saada koskaan nolaksi, eikä myöskään tahdistusta voida suorittaa.

Tahdistushetkellä generaattorin ja verkon taajuuksien on oltava lähes samansuuruiset generaattorin taajuuden ollessa vain hieman suurempi, jotta jänniteosoittimet katkaisijan molemmin puolin olisivat mahdollisimman pitkän aikaa päällekkäin. Tällöin  $\Delta U$  on pitkään lähes nolla, ja katkaisijan sulkemiselle jää enemmän aikaa. Generaattorin taajuuden säätö hoidetaan

voimakoneen momenttia säätämällä. Jotta jänniteosoittimien pyörimissuunta olisi oikea molemmin puolin katkaisijaa, vaihejärjestysten on oltava myös samat.

Tahdistusehdot saadaan koottua seuraavasti:

- Generaattorin ja verkon jännitteiden itseisarvojen on oltava lähes yhtä suuret.
- Generaattorin ja verkon jännitteiden vaihekulmien on oltava lähes samat.
- Generaattorin ja verkon taajuuksien on oltava lähes yhtä suuret.
- Vaihejärjestyksien on oltava samat tahdistettavien laitteiden välillä.

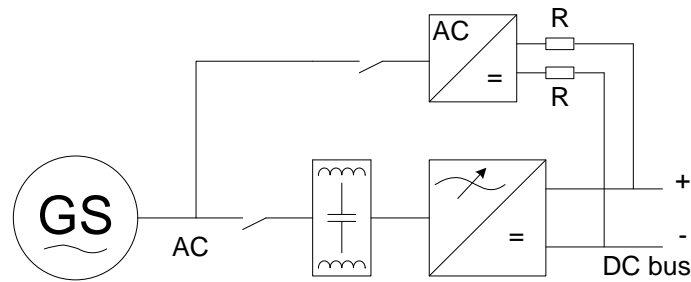
Generaattoria kytkettäessä verkkoon tahdistus voidaan suorittaa siten, että generaattorin taajuus on hieman verkon taajuutta suurempi, jolloin tahdistettavien komponenttien vaihe-ero saadaan poistettua. Tällä tahdistusmenetelmällä generaattori syöttää hieman tehoa verkkoon tahdistushetken jälkeen ja voi aiheuttaa pieniä tasoitusvirtoja, mutta vältetään kuitenkin mahdollinen takateho. Tätä tapaa kutsutaan dynaamiseksi tahdistukseksi /12/. Tarkasti suoritettun tahdistuksen jälkeen tahtigeneraattori ei anna tehoa verkkoon eikä ota tehoa verkosta /11/.

Toinen generaattorin tahdistustapa on staattinen tahdistus. Tässä menetelmässä generaattorin nopeus ajetaan hyvin lähelle verkon nopeutta niin, että generaattorin vaiheosoittimet ovat hieman verkon vaiheosoittimia edellä. Kun verkon nopeus on hieman suurempi, verkon jännite-osoitin ottaa kiinni generaattorin jänniteosoittimen. Osoittimien ollessa täsmälleen päällekkäin, tahdistettavan generaattorin taajuus ohjataan samaksi verkon taajuuden kanssa. Kun taajuudet ovat täsmälleen samat ja vaihe-erot nolla sekä jännitteiden amplitudit ovat samat, tahdistus voidaan suorittaa. /12./

### 3.2 Taajuusmuuttajan verkkoon tahdistus

Ennen kuin taajuusmuuttajan voi tahdistaa verkkoon, välipiirissä on oltava jännite. Välipiirin lataukseen on suositeltavaa käyttää ulkoista latauspiiriä jolloin syötön voi valita joko tahtigeneraattorin puolelta tai syötettävän verkon puolelta (kuva 12). Kuvassa on esitetty vain syöttävän verkon puolelta ladattava versio.





Kuva 12. Taajuusmuuttajan suuntaajayksikkö (alempana) varustettuna ulkoisella latauspiirillä (ylempänä)

Kun välipiiri on ladattu riittävälle tasolle, tahtigeneraattorin puoleinen AFE-yksikkö sulkee pääkontaktorin. Kontaktorin sulkeutumisen jälkeen AFE-yksikkö on valmis moduloimaan virtaa.

Vacon NXI -verkkosuuntaaja tahdistetaan verkkoon joko lyhyellä oikosululla tai käyttämällä lisäkorttia (Vacon optiokortti 7), joka mittaa verkon jännitteen ja taajuuden sekä vertailee sitä taajuusmuuttajan jännitteeseen. Vertailujen perusteella taajuusmuuttaja moduloi syötettävän sähkön tarpeen mukaan verkon kanssa saman taajuiseksi, tahdistusehtojen mukaisesti edellisen luvun tavoin. Heikossa verkossa suositetaan käytettäväksi lisäkorttiin perustuva tahdistusta. /13./

Optiokorttia voidaan käyttää myös, kun taajuusmuuttaja halutaan ohittaa katkaisijalla. Optiokortti mittaa tulopuolen jännitteen ja taajuuden, vertailee arvoja verkon arvoihin ja suorittaa tahdistuksen sopivalla hetkellä. Tahdistuksen jälkeen taajuusmuuttajan teho voidaan ajaa hallitusti nolleen ja samanaikaisesti generaattorin teho nostetaan kuormitusta vastaavaksi. /14./

### 3.3 Katkaisijaohjaukset

Katkaisijaohjauksia tarvitaan, kun generaattorilaitteisto, kuormitus tai kaksi erillään olevaa verkon osaa halutaan tahdistaa tai kytkeä yhteen tai generaattorilaitteisto kytketään irti verkosta joko tarkoituksellisesti tai vian seurauksena. Tahdistusta varten tarvitaan tahdistusrele tai automaattitahdistin. Myös taajuusmuuttaja osaa suorittaa tahdistuksen. Tahdistuslaitteisto antaa oikealla tahdistushetkellä signaalin katkaisijalle, jolloin katkaisija suljetaan (ks. 3.1).

Automaattitahdistuslaitteistossa on tyypillisesti jännitteen- ja taajuudensovitus funktiot, eli tahdistuslaitteisto voi suorittaa generaattorin jännitteen ja taajuuden säädöt. Lisäksi tahdistuslaitteessa on yleensä oltava katkaisijan laukaisuajan kompensointi, joka ottaa huomioon laukaisuviiveen. Tällä tavoin generaattori voidaan kytkeä verkkoon juuri sopivalla hetkellä. Taajuusmuuttajalla on sekä generaattorin että verkon puolella omat katkaisijat tai kontaktorit, joita taajuusmuuttaja voi ohjata.

Vacon NXI -yksikössä on katkaisijalle releohjaus. Taajuusmuuttajassa on oltava erillinen latauspiiri, jolla välipiirin jännite saadaan nostettua aluksi (tahdistustilanteissa) riittävän korkealle, tässä tapauksessa rajana on 80 % nimellisestä välipiirin jännitteestä. Välipiirin latauduttua, Vaconin releohjauskortissa oleva rele sulkeutuu, jolloin katkaisija saa ohjausjännitteen ja se sulkeutuu.

Generaattorin verkosta irti kytkeminen voi tapahtua manuaalisesti käsiohjauksella tai automaattisesti katkaisijalle annettavalla irtikytkentäkäskeyllä. Vikatilanteessa generaattorin suojarile tai taajuusmuuttaja antaa katkaisijalle avauskäskyn eli ohjausjännite poistetaan katkaisijalta.

### 3.4 Voimalaitoksen säädöt

Sähköverkossa voi olla useita rinnankäyviä generaattoreita, jotka syöttävät samaa verkkoa samanaikaisesti. Verkon jännitteen ja taajuuden on pysyttävä lähes vakioina sekä vaihejännitteiden suuntien on oltava samat verkon symmetrian vuoksi. Verkon jännitettä on oltava mahdollisuus säätää, jotta verkossa säilyy tasapaino tuotetun ja kulutetun loistehon välillä sekä verkon taajuutta on oltava mahdollisuus säätää, jotta verkossa säilyy tasapaino tuotetun ja kulutetun pätötehon välillä.

Verkon jännitettä säädetään muuttamalla generaattorin roottoriin magneetointivirtaa, jolloin generaattorin tuottama loisteho muuttuu. Taajuutta säädetään muuttamalla generaattorin verkkoon syöttämää pätötehoa. /5;15./

#### 3.4.1 Jännitteen ja loistehon säätö

Yhtälön 2 perusteella voidaan havaita, että verkkoa syöttävän tahtigeneraattorin lähdejännitteeseen voidaan vaikuttaa vain taajuutta sekä magneettivuon suuruutta muuttamalla, koska muut jännitteeseen vaikuttavat tekijät yhtälössä ovat vakioita. Koska sähköverkon taajuuden on oltava vakio, niin

käytännössä jännitteensäätö suoritetaan yksinomaan magnetoimisvirtaa säätämällä.

Kun verkkoon on kytketty useampia generaattoreita rinnakkain, magnetoimisvirta vaikuttaa loistehoon. Sähköverkossa loistehotasapaino vaikuttaa suoraan verkon jännitteeseen eli laadukkaan sähkön takaamiseksi verkon jännitteen itseisarvoa on säädettävä. /5./

Verkossa, jossa on monta rinnankäyvää generaattoria samanaikaisesti, jännitteensäätö voidaan tehdä seuraavilla toimenpiteillä:

- säätämällä tahtigeneraattoreiden magnetoimisvirtaa
- käyttämällä rinnakkaisreaktoreita ja kondensaattoreita, joista käytetään myös nimitystä kompensointilaitteistot
- muuntajien käämikytkimiä säätämällä.

Taajuusmuuttajilla voidaan myös säätää loistehoa ja taajuusmuuttajan nopean säätödynamiikan vuoksi loistehon kompensointi on hyödyllinen ominaisuus. Saarekeverkkojen jännite säädetään lähes yksinomaan tahtigeneraattoreilla, mutta taajuusmuuttajien yleistyminen generaattorikäytössä lisää myös loistehon säätömahdollisuuksia.

Generaattorin jännitteensäädön hoitaa automaattinen jännitteensäätäjä *AVR (Automatic voltage regulator)*. Jännitteensäätimessä voi olla joko isokroninen säätö tai loistehostatiikka (*voltage droop*). Taajuusmuuttajassa on myös joko isokroninen tai statiikkasäätö.

#### *Isokroninen säätö*

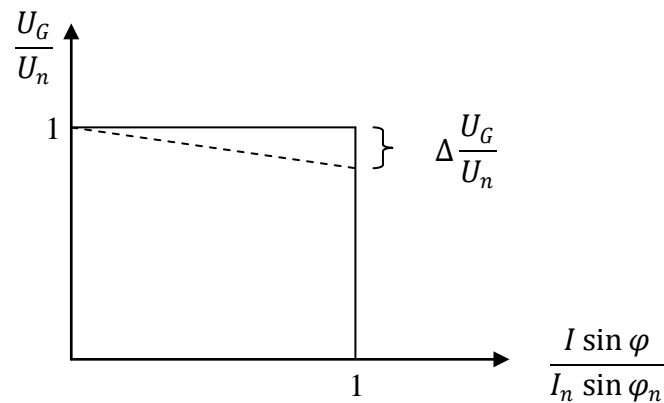
Mikäli generaattoriyksiköitä säädetään keskitetysti jollain ylemmän tason ohjauksella, kuten koneautomaation tai ohjelmoitavan logiikan avulla, voidaan jännitteensäätötapana käyttää isokronista säätöä. Tässä säätötavassa taajuus ja jännite eivät laske virran kasvaessa, kuten myöhemmin esiteltävissä statiikkasäädöissä. Tehonhallintalaitteisto hoitaa kuormien jakamisen.

#### *Loistehostatiikka*

Yksinkertaisesti loistehostatiikka on jännitteensäätimen ominaisuus, jolla muutetaan jännitteen ohjearvoa generaattorin syöttämän loistehon muuttuessa. Loistehostatiikkaa voidaan käyttää tahtigeneraattoreissa sekä

taajuusmuuttajissa, joiden rinnalla on muutama muu tehonsyöttöyksikkö. /9./

Rinnankäyvät generaattorit kuormittuvat epätasaisesti, jos yhden generaattorin jännitteen ohjearvo on suurempi kuin muilla. Tilanteen välttämiseksi jännitteensäätimissä käytetään loistehostatiikkaa ja jokaisen generaattorin statiikan arvo asetellaan yhtä suureksi, yleensä 0 - 5 %. Mikäli verkko on lisäksi heikko ja rinnankäyvät koneet ovat erilaisia, asetellun on syytä olla 5 - 6 %. Statiikkaa käytettäessä jokainen generaattori kuormittuu tasaisesti oman kapasiteettinsa mukaan.



Kuva 13. Loistehostatiikka

Verkon loistehotarpeen kasvaessa generaattorilta vaaditaan vähemmän jännitettä (kuva 13). Mikäli statiikka on aseteltu 3 %:iin, putoaa verkon jännite 3 % mentäessä nimellispisteeseen, joka kuvassa on kohdassa 1 vaaka-akselilla.

### 3.4.2 Taajuuden ja tehon säätö

Sähkövoimajärjestelmässä taajuus kuvaa pätötehotasapainoa. Kun verkon taajuus pysyy lähes vakiona, on tuotetun ja kulutetun pätötehon suhde lähes vakio.

Yksittäin saarekkeessa käyvän generaattorin taajuuden säätö perustuu kierrosnopeuden säätöön. Sähköverkon kuormituksen kasvaessa generaattorin sähköinen vastamomentti pyrkii kasvamaan, mikä on vastakkaissuuntainen generaattorin voimakoneen tuottamalle mekaaniselle vääntömomentille. Tämä pyrkii hidastamaan generaattorin akselinopeutta, joka puolestaan on suoraan verrannollinen taajuuteen. Taajuuden pysyvän alenemisen

estämiseksi on voimakoneen tehoa lisättävä, mikä dieselgeneraattoreissa tapahtuu säätämällä polttoaineen syöttöä.

### *Pätötehostatiikka*

Pätötehostatiikan (speed droop) toiminta on täysin analoginen loistehostatiikan kanssa. Verkossa, jossa on rinnankäyviä generaattoreita, täytyy generaattorien nopeudensäätäjissä käyttää pätötehostatiikkaa. Mikäli verkon pätötehon tarve kasvaa, muuttuu generaattorin nopeusohje statiikkasuoran mukaisesti nimellispisteeseen asti. Tällöin verkon taajuus myös putoaa statiikkaprosentin verran. Näin saadaan verkon tehotasapaino pysymään stabiilina.

Statiikan arvoksi asetellaan tyypillisesti 2 - 6 %. Jos rinnankäyvät generaattorit poikkeavat nimellisteholtaan paljon toisistaan, niin on suositeltavaa käyttää suurempaa statiikan arvoa, esimerkiksi 6 %:a. Voimakoneen ohjetehon muutos siirtää statiikkasuoraa, mutta suoran kulmakerroin pysyy vakiona. /5./

Kun statiikkaprosentti tunnetaan, taajuuden muutos virran funktiona voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$\Delta f_n = f_{ohj} - f_{ohj}(1 - x) \quad (6)$$

missä  $f_{ohj}$  on taajuusohje ilman kuormitusta

$x$  on asetellun statiikan suhteellisarvo

Edellisen yhtälön perusteella saadaan laskettua teoreettinen taajuus mitatun virran funktiona seuraavasti:

$$f_t(I) = f_{ohj} - \frac{I_{pm}}{I_n} \Delta f_n \quad (7)$$

missä  $I_{pm}$  on mitattu pätövirta

$I_n$  on generaattorin tai taajuusmuuttajan nimellisvirta

Edellä esitettyjä lois- ja pätövirtastatiikoita käytetään yleensä tahtigeneraattorien automaattisissa jännitteen- ja taajuudensäätölaitteissa, mutta

taajuusmuuttaja voi myös sisältää statiikkaominaisuuden, jolloin sitä voidaan käyttää esimerkiksi dieselgeneraattorin tavoin.

## 4 SÄHKÖVERKON SUOJAUS

Sähköverkko täytyy varustaa mahdollisia vikatilanteita varten suojalaitteilla, joista suojareleet ovat yksi osa. Mahdollisia vikatilanteita voivat olla esimerkiksi oikosulut, maasulut, ylikuormitukset, yli- ja alijännitteet, liialliset taajuuspoikkeamat sekä johdinkatkokset.

Lyhyesti relesuojaukselta vaaditaan seuraavaa:

- selektiivistä toimintaa
- riittävän nopeaa toimintaa
- aukotonta suojausta
- käyttövarmuutta ja yksinkertaisuutta
- käytettävyyttä
- koestettavuutta
- kohtuullista hankintahintaa.

Releet muodostavat yhdessä katkaisijoiden kanssa suoja-alueita. Suojaus on aukoton, kun vierekkäiset alueet ovat hieman limittäin. Suojan toimiessa vain omalla alueellaan on se absoluuttisesti selektiivinen. Selektiivisyys voi olla joko aikaselektiivistä eli aikaan perustuvaa tai virtaselektiivistä eli virtaan perustuvaa. Jos vikaa ei ole, tai se on suoja-alueen ulkopuolella, ja rele ei toimi, puhutaan selektiivisyydestä.

Päätehtävä relesuojauksella on havaita vikoja sekä rajoittaa vikaantunut alue mahdollisimman pieneksi. Suuntauksena on kuitenkin ennakoiva relesuojaus, jolla pyritään ennalta ehkäisemään vikojen syntymistä. Usein varsinaisen suojauksen vikaantumisen varalta käytetään varasuojauksia. /16./

### 4.1 Vikatyypit

Seuraavat viat ovat tyypillisimpiä generaattorin kannalta:

- ylivirta
- yllämpö
- maasulku
- ylijännite

- epäsymmetrinen kuormitus, eli vinokuorma
- taajuuspoikkeama
- takateho
- ryntäys.

#### *Ylivirta ja ylikuormitus*

Ylivirta on nimellisvirtaa suurempi virta. Oikosulku on virtapiirissä kahden eri potentiaalissa olevan pisteen välinen tahallinen tai tahaton yhteys mitättömän impedanssin läpi. Generaattori täytyy suojata oikosulkujen ja ylikuormitusten varalta. Tyypillisin suojaus on ylivirta-aikarele. /16./

Pysyvän oikosulun aikana generaattorin magnetointilaitteistoinen on kyettävä syöttämään verkkoon 2 s ajan kolminkertainen vikavirta, ellei suojausten selektiivisyyden toiminta mahdollista lyhyempää aikaa. Joka tapauksessa turvallisuus täytyy pystyä takaamaan. /17./

#### *Ylilämpö*

Generaattorin ylilämpösuojaus toteutetaan normaalisti termisellä releellä, joka on ainakin yhdessä vaiheessa. Rele on kaksiportainen. Aluksi se antaa hälytyksen ja suuremmassa lämpötilassa suoritetaan laukaisu. Parempi tarkkuus saadaan toteuttamalla rele tietokoneavusteisesti. /16./

#### *Maasulku*

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirrat kytkeytyvät johtojen ja maan välisen maakapasitanssin kautta. Terveessä tilassa maakapasitanssien kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla.

Generaattorin maasulku voidaan havaita usealla eri menetelmällä, joita ovat

- nollajännitteenmittaus kiskon jännitemuuntajan avokolmiosta
- kaapelivirtamuuntaja maasulun suuntareleen kanssa
- generaattorin verkonpuoleisten virtamuuntajien summavirtamittaus
- maadoitusmuuntajan avokolmioon syötettävän jännitteen aiheuttaman virran tarkkailu
- jännitemuuntajan avokolmion kolmatta yliaaltoa tarkkaileva rele. /16./

### *Ylijännite*

Kaapeliverkon kuormituksen äkillinen häviäminen, jänniteensäätäjän rikkoutuminen tai voimakoneen ryntäys aiheuttavat jännitteen nousua, minkä takia generaattori sekä verkko on varustettava ylijännitereleellä. Releen tarkoitus on avata nopeasti generaattorin pääkatkaisija, heikentää tai poistaa generaattorin magnetointi ja mahdollisesti pysäyttää voimakone. /16./

### *Vinokuorma*

Vinokuormitus, eli epäsymmetrinen kuorma saattaa johtua esimerkiksi vaihekatkosta tai katkaisijan vajaanapaisesta toiminnasta. Vinokuormarele eli epäsymmetriarele mittaa kuormitusvirran vastakomponenttia. Vastakomponentti aiheuttaa myötäkomponenttiin nähden vastakkaisen magneettikentän, joka puolestaan aiheuttaa roottoriin 100 Hz:n taajuisia hajavirtoja. Hajavirrat voivat olla vaarallisia roottorin kuumenemisen kannalta. /16./

### *Taajuuspoikkeama*

Tahtigeneraattorin liiallinen taajuuden nousu voi johtua voimakoneen nopeussäätäjän vioittumisesta tai kuorman äkillisestä poiskykytyymisestä. Taajuusrele mittaa generaattorin jännitteen taajuutta. Taajuuden noustessa asettelua suuremmaksi, irrotetaan generaattori verkosta ja se pysäytetään. Tällä tavoin estetään pyörimisnopeuden vaarallinen kasvu, jota kutsutaan ryntäykseksi. /16./

### *Ryntäys*

Ryntäyssuoja on rinnakkainen suoja taajuussuojalle. Erona on nopeuden mittaus esimerkiksi takometrillä. Koneen jännitekin nousee rynnätessä, yhtälön 2 mukaisesti taajuuden kasvaessa. Jänniterele on kuitenkin hitaampi, koska jänniteensäätö hidastaa jännitteen nousua. /16./

### *Takateho*

Takateho tarkoittaa tilannetta, jossa tehon kulkusuunta vaihtuu generaattorin ja verkon välillä eli tehoa alkaa virrata verkosta generaattorin suuntaan. Takateho voi olla erittäin haitallista dieselgeneraattorille sylintereiden akselille kohdistuvan suuren vastapaineen aiheuttaman mekaanisen rasituksen vuoksi.



Suojausta ei saa asetella liian herkäksi, ettei laukaisua tapahdu turhaan. Esimerkiksi tahdistustilanteiden lievien takatehojen sekä verkon tehoheilah- telujen vuoksi riittävä hitaus on tarpeellinen /16/. Rinnankäyville generaatto- reille on järjestettävä aikahidastettu takatehosuojaus. Suojalaitteen asetus- ten on suositeltavaa olla 8 - 15 % nimellisestä dieselgeneraattoreille. Lisäksi 50 % pudotus jännitteessä ei saa estää takatehosuojauksen toimivuutta, vaikka se pienentää takatehon määrää. /18./

Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyssä generaattorissa takateho- ongelma on pienempi, koska taajuusmuuttaja ei päästä tehoa verkosta ge- neraattorin suuntaan ilman aktiivista toimintaa. Aktiivisella toiminnalla tarkoi- tetaan taajuusmuuttajan puolijohdekytkimien toimintaa, joka saa aikaan vir- ran kulkeutumisen taajuusmuuttajasta generaattoriin päin.

#### **4.2 Suojauksen selektiivisyys taajuusmuuttajan kannalta**

Taajuusmuuttaja on kytketty generaattorin ja verkon väliin, jolloin vikatilantei- ta ja erityisesti oikosulkutilanteita ajatellen suojauksen selektiivisyys on otet- tava erityisesti huomioon. Koska taajuusmuuttaja voi toimia kaikissa virta- ja jännitetasojen kvadranteissa eli teho voi siirtyä taajuusmuuttajan molempiin suuntiin, täytyy suojauksen ja selektiivisyyden toimia myös molempiin suun- tiin.

Oikosulkutilanteessa generaattorin on kyettävä syöttämään 3-kertainen virta nimellisvirtaan nähden 2 sekunnin ajan /18/. Taajuusmuuttaja ei saa hu- onontaa sähköverkon selektiivisyyttä. Mikäli taajuusmuuttajan avulla kytketty generaattori on ainoa verkkoa syöttävä laitteisto, täytyy taajuusmuuttajan pystyä syöttämään generaattorin nimellisvirtaan nähden 3-kertainen virta riit- tävän oikosulkuvirran varmistamiseksi.

Vacon NXI -sarjan taajuusmuuttajia voi kuormittaa 2-kertaisella nimellisvirral- la. Jos taajuusmuuttajan nimellisteho mitoitetaan generaattorin nimellistehon kanssa samaksi, siitä seuraa, että taajuusmuuttaja on ylimitoitettava 1,5- kertaiseksi, jotta generaattoriin nähden 3-kertainen ylivirta saavutetaan.

Taajuusmuuttaja voidaan mitoittaa myös oleellisesti generaattoria pienem- mäksi, jos sitä halutaan käyttää vain osakuormilla tietyissä tilanteissa. Tämä tarkoittaa sitä, että täydellä kuormituksella taajuusmuuttaja täytyy ohittaa katkaisijan avulla. Käytettäessä taajuusmuuttajaa ohituskatkaisijan ollessa

auki ja taajuusmuuttajan ollessa ainoa verkkoa syöttävä laite, tulee ongelmaksi vikavirran syöttökapasiteetti.

Otetaan esimerkkinä tahtigeneraattori, jonka nimellisteho on 1 000 kVA ja nimellisjännite on 400 V sekä taajuusmuuttaja, jonka nimellisteho on 500 kVA. Generaattorin syöttämä nimellisvirta saadaan laskettua yhtälöllä:

$$I_{nG} = \frac{S_{nG}}{\sqrt{3} \times U_n} \quad (8)$$

missä  $S_{nG}$  on generaattorin nimellisteho

$U_n$  on verkon nimellisjännite

$$\Rightarrow I_{nG} = \frac{1\,000\text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 400\text{ V}} = \underline{1\,444\text{ A}}$$

Saatu virta kerrotaan 3:lla, jolloin saadaan vaatimusten mukainen vikatilanteen virta.

$$3 \times I_{nG} = 3 \times 1\,444 = \underline{4\,332\text{ A}}$$

Saatua tulosta voidaan verrata taajuusmuuttajan nimellisvirtaan (722A), joka saadaan laskettua yhtälöllä 8, huomataan, että se on 6-kertainen virta. Tämä on käytännössä mahdotonta saavuttaa ilman taajuusmuuttajan reipasta ylimitoittamista. Vaconin lupaamalla 2-kertaisella ylivirralla taajuusmuuttaja tulisi mitoittaa nimellisteholtaan 1 500 kVA tehoiseksi, jotta suojauksen selektiivisyys voidaan varmistaa.

## 5 TAAJUUSMUUTTAJALAITTEISTON TESTAUS

Testausosio rajattiin käsittämään ainoastaan taajuusmuuttajaan liittyvät testit ja mittaukset. Testejä ja mittauksia tehtiin taajuusmuuttajan verkkoonliittymistilanteista. Lisäksi taajuusmuuttajan ja dieselgeneraattorin välistä tehonjakoa testattiin pätö- ja loistehojen osalta.

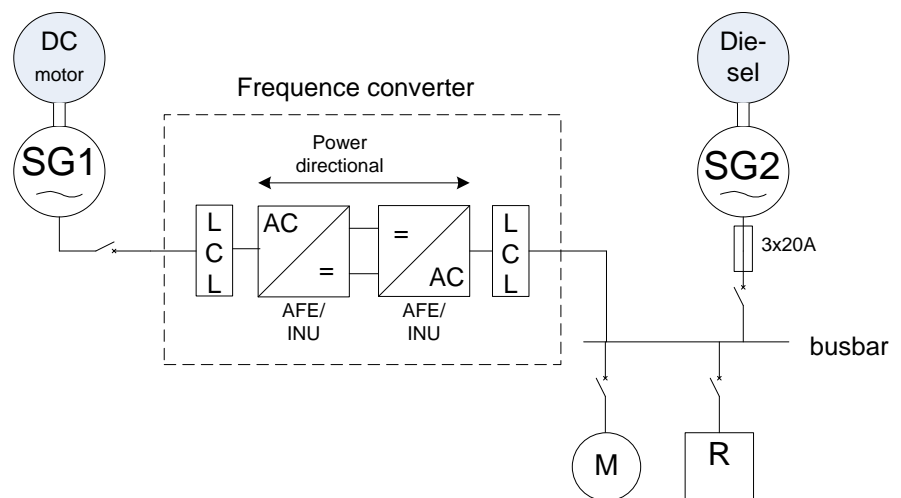
### 5.1 Simuloitava verkko

Työssä testattiin Vacon NXI -sarjan taajuusmuuttajan toimivuutta generaattorikäytössä Vaconilta saadulla sovelluksella, joka on suunniteltu syöttämään generaattorin tuottama teho heikkoon verkkoon tai saarekkeeseen.

Koska sovellus on vielä testausvaiheessa, ei sen sisältöä käydä tarkemmin läpi.

Kuvassa 14 on esitetty periaatekaavio sähköverkosta, jolla järjestelmää testattiin. Tasavirtamoottorin, kuvassa DC-motor, pyörittämä tahtigeneraattori SG1 syöttää taajuusmuuttajaa (*Frequency converter*) ja taajuusmuuttaja syöttää puolestaan verkkoa rinnakkain dieselgeneraattorin SG2 kanssa.

Verkon kuormituksena käytettiin säädettävää vastusta sekä tyhjänä käyvää oikosulkumoottoria. *LCL*-suodattimet tarvitaan taajuusmuuttajan molemmille puolille (ks. 2.4.5).



Kuva 14. Testauslaitteiston kaaviokuva

## 5.2 Testauslaitteiston esittely

Testaukset tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähkökone- ja energiatekniikanlaboratoriossa olevilla laitteilla. Lukuun ottamatta energiatekniikanlaboratoriossa sijaitsevaa dieselgeneraattoria kaikki muut laitteet sijaitsevat sähkökonelaboratoriossa.

### *DC-moottori*

Testeissä käytetty moottori oli vierasmagnetoitu tasavirtamoottori, joka on kytketty samalle akselille tahtikoneen kanssa, jolloin sillä voidaan pyörittää tahtikonetta tai joissain tapauksissa jarruttaa kun tahtikonetta halutaan käyttää moottorina. Tässä työssä ei kuitenkaan tehty testejä tahtikoneen käyttämiseen moottorina. Moottorin teho on 11 kW.

### *Tahtigeneraattori*

Testissä käytetty generaattori on avonapainen tahtigeneraattori, jonka nimellisteho on 10 kVA ja nimellisjännite 400 V.

### *Taajuusmuuttaja*

Taajuusmuuttaja koostui kahdesta erillisestä *AFE*-yksiköstä (Vacon NXI00225A2TOCSSA1A20000C3), joihin molempiin asennettiin Vaconin toimittama sovellus. Tuotetunnuksessa kolmas kirjain *I* tarkoittaa todellisudessa *INU (Inverter Unit)* -yksikköä. Koska tässä työssä on edellä käytetty Vaconin aktiivisesta syöttöyksiköstä nimitystä *AFE*, niin selkeyden vuoksi sitä käytetään myös tässä yhteydessä.

Sovelluksesta pystyi valitsemaan oikean moodin käyttötilanteen mukaan. Käyttötilanteita olivat, tasasuuntaus, saarekkeeseen syöttö sekä syöttäminen heikkoon verkkoon. Yksiköt ovat keskenään yhdessä *Common DC bus* -väylän kautta. Molempien *AFE*-yksiköiden nimellisvirta on 22A.

### *Dieselgeneraattori*

Dieselgeneraattorina testissä käytettiin Metropolian energiatekniikanlaboratoriossa olevaa SDMO TM20K -mallista 20 kW:n generaattoria. Generaattorilaitteistossa on automaattiset jännitteen ja taajuudensäätöyksiköt sekä niissä lois- ja pätohostatiikat. Statiikka-asettelujen säädöt ovat kotelon sisällä eikä niitä kiireellisen aikataulun vuoksi ehditty ottaa käyttöön. Laitteessa on lisäksi käsitahdistuslaitteisto, jota käytettiin testiosion tahdistustilanteissa.

## **5.3 Testauksen suoritus**

Testausvaiheessa tehtiin erilaisia testejä ja mittauksia verkossa olevien generaattorilaitteiden tahdistustilanteista sekä tehonjakotilanteista. Testit tehtiin siten, että taajuusmuuttajan verkkovaihtosuuntaaja kytkettiin suoraan verkkoon ilman kontaktoria tai katkaisijaa. Tarkoituksena oli tehdä testejä myös Vaconin optiokortti 7 perustuvilla tahdistuksilla, mutta laitteistoa ei saatu toimimaan halutulla tavalla.

Seuraavana on listattu työssä tehdyt testaukset:

- taajuusmuuttajan muodostama tyhjä verkko
- taajuusmuuttajan syöttämä saarekeverkko

- taajuusmuuttajan tahdistus dieselgeneraattorin rinnalle, dieselgeneraattorin ollessa kuormittamattomana
- taajuusmuuttajan tahdistus dieselgeneraattorin rinnalle, dieselgeneraattorin ollessa kuormitettuna
- dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan rinnalle, taajuusmuuttajan ollessa kuormittamattomana
- dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan rinnalle, taajuusmuuttajan ollessa kuormitettuna
- kuormituksen jakautuminen taajuusmuuttajan ja dieselgeneraattorin kesken.

Mittaukset, joissa tutkittiin lyhytaikaisia muutosilmiöitä, tehtiin digitaalisella oskilloskoopilla. Tehollisarvoja mitattiin Vacon NXI -suuntaajayksikön omalla monitorointi työkalulla. Lopussa tehtyjen tehonjakomittauksien virrat mitattiin pihvirtamittareilla ja taajuudet mitattiin sähkönlaatumittarilla.

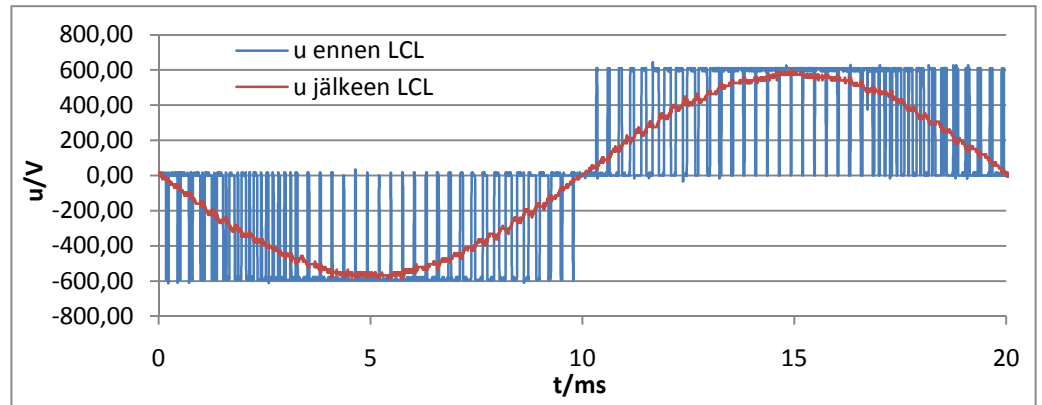
#### 5.4 Testaustulokset ja niiden analysointi

Oskilloskoopilla tehdyissä mittauksissa kaikki jännitekäyrät on mitattu vaiheiden L1 ja L2 väliltä sekä virrat on mitattu aina L1-vaiheesta. Jännite  $U_{L1-L2}$  on  $U_{L1}$  jännitettä 30 astetta edellä, kuten myös L1-vaiheesta mitattua täysin resistiivistä virtaa. Kun vaihesiirto on 30 astetta eli ajallisesti 1,7 ms, niin käytännössä se voidaan jättää huomioimatta, koska tarkasteluajat ovat yleensä vähintään sadan millisekunnin luokkaa.

Vacon monitorointi työkalulla saadut mittaustulokset voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia virtojen osalta. Kuvissa negatiiviset arvot tarkoittavat, että taajuusmuuttaja syöttää virtaa verkon suuntaan ja positiiviset arvot tarkoittavat päinvastaista virran suuntaa.

##### 5.4.1 Taajuusmuuttajan muodostama tyhjä verkko

Kuva 15 esittää taajuusmuuttajan muodostamaa tyhjää verkkoa eli kuormittamatonta tilannetta. Sininen jännitekäyrä on mitattu taajuusmuuttajan napojen ja LCL-suodattimen välistä ja punainen jännitteen käyrämuoto on puolestaan mitattu LCL-suodattimen jälkeen. Testauksella haluttiin varmistaa miten taajuusmuuttaja pystyy muodostamaan tyhjän verkon. Vaikka taajuusmuuttajan jälkeen olikin kytketty suodatin, oletetaan sen kuuluvan osaksi taajuusmuuttajaa eikä sitä ajatella kuormaksi.

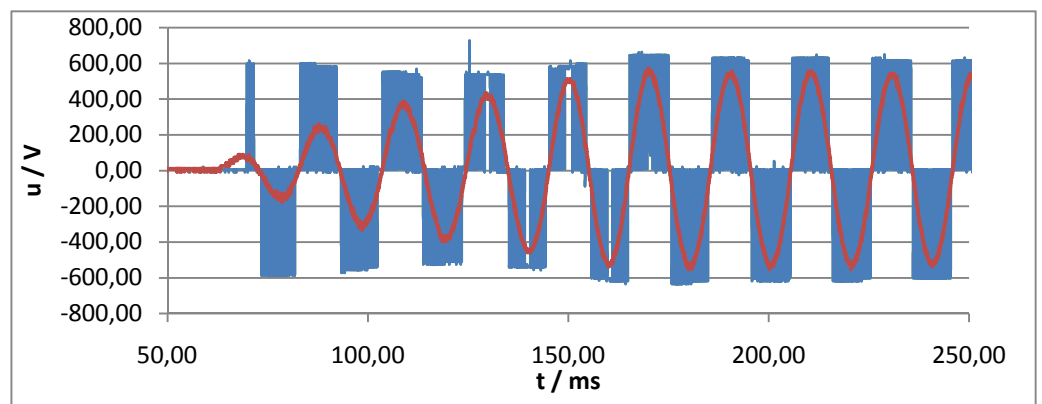


Kuva 15. Taajuusmuuttajan napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto (sininen) sekä LCL-suodattimen jälkeinen käyrämuoto (L1-L2 pääjännite, punainen käyrä). Taajuusmuuttajan muodostama tyhjä verkko

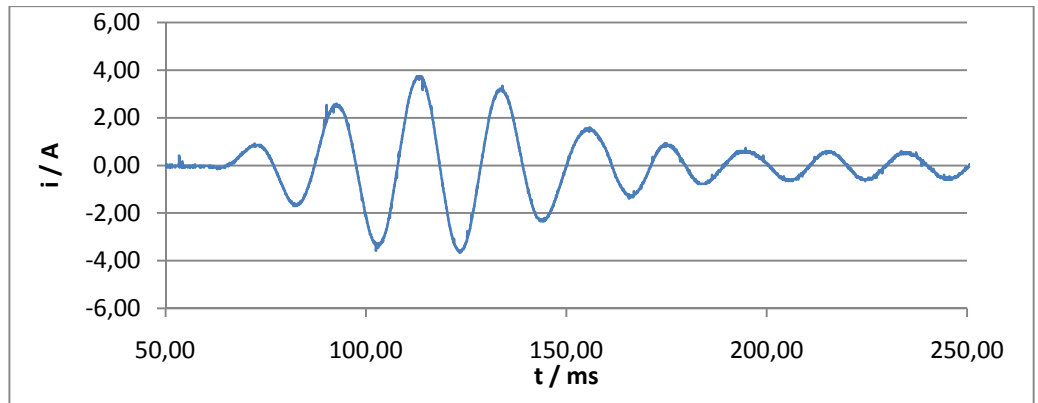
Kuvaajista on helppo havaita miten LCL-suodatin tekee taajuusmuuttajan syöttämästä pulssimuotoisesta jännitteestä lähes sinimuotoista jännitettä. Pientä säröytymistä on havaittavissa myös suodattimen jälkeisessä jännitteessä, mutta se täyttäneen kuitenkin normien mukaiset vaatimukset säröytymisen puolesta. Testissä olisi ollut syytä käyttää sähkönlaatumittaria, jolla olisi voitu varmistua särötasosta (ks. 2.4.5). Taajuusmuuttaja pystyi muodostamaan jännitteen lähes tyhjään verkkoon ilman mitään ongelmia.

#### 5.4.2 Taajuusmuuttajan syöttämä saareke

Kuvat 16 ja 17 esittävät tilannetta, jolloin taajuusmuuttajalle annetaan käynnistyskäsky, ja se on kytketty syöttämään saarekettä, jossa on vastus ja oikosulkumoottori. Ensimmäisessä kuvaajassa on vastaavista paikoista mitatut syöttöjännitteet (ks. 5.4.1), ja toisessa kuvaajassa on L1-vaiheen virran hetkellisarvo.



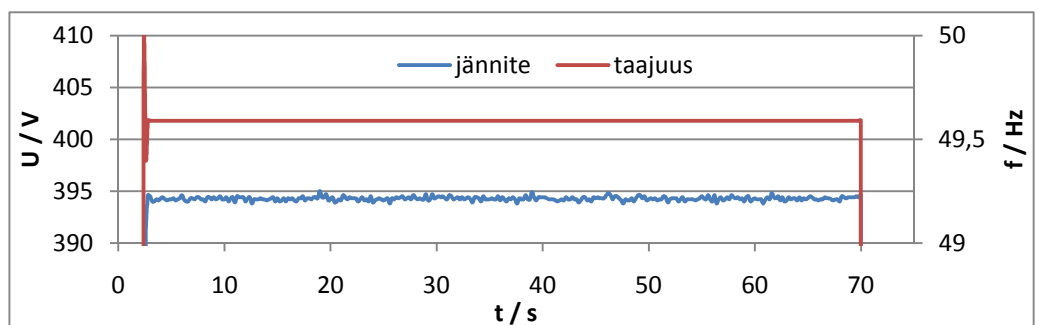
Kuva 16. Taajuusmuuttajan napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto (sininen) ja LCL-suodattimen jälkeen mitattu jännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto (punainen), jotka on mitattu saarekekuormituksen kytkentähetkellä; kuormituksena on vastus ja oikosulkumoottori



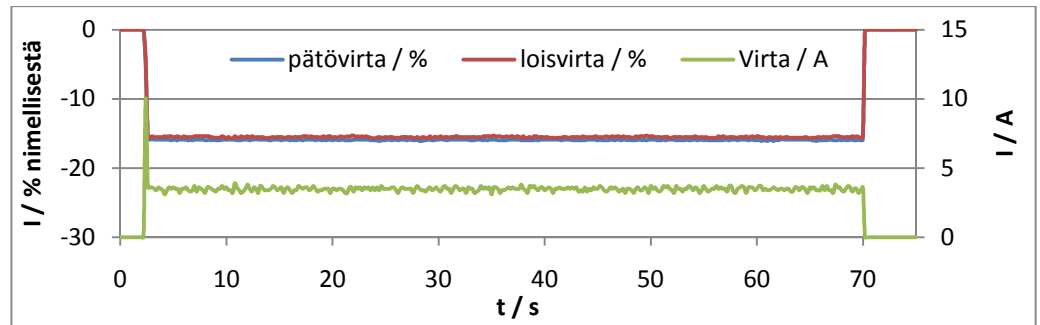
Kuva 17. Taajuusmuuttajan syöttämän virran (L1-vaihe) käyrämuoto, joka on mitattu saarekekuormituksen kytkentähetkellä; kuormituksena on vastus ja oikosulkumoottori

Syöttöjännitteeseen tulee käynnistyshetken jälkeen notkahdus, joka on nähtävissä jännitteen käyrämuotoa esittävästä kuvaajasta (kuva 16). Notkahdus johtuu oikosulkumoottorin ottamasta käynnistysvirrasta, joka puolestaan purkaa välipiirin kondensaattorien varausta hetkellisesti (kuva 17). Käynnistysvirta aiheuttaa taajuusmuuttajan välipiiriin jännitenotkahduksen, joka on nähtävissä sinisten palkkien alenemisena. Kuorman saaman jännitteen (punainen käyrä) hidas nousu johtuu *LCL*-suodattimesta, jonka induktanssit hidastavat virran muutosta ja näin ollen myös jännitteen nousua. Suodattimen jälkeisen jännitteen nousuun vaikuttaa lisäksi em. käynnistysvirtasysäys.

Seuraavat kuvaajat esittävät myös samaa saarikäyttötestiä, mutta mittaukset ovat taajuusmuuttajan sisäisiä arvoja Vacon *NCDrive* -ohjelman monitorointi sovelluksella. Mitattu jännite on tehollisarvo, ja taajuus keskiarvo sekä tarkastelujakso on pidempi.



Kuva 18. Kuvaajat ovat taajuusmuuttajan syöttöjännitteen tehollisarvo (sininen) ja vastaavan jännitteen taajuus (punainen); kuormituksena on vastus ja oikosulkumoottori



Kuva 19. Kuvaajat ovat taajuusmuuttajan näennäisvirran (vihreä), pätövirran (sininen) ja loisvirran (punainen) tehollisarvot; kuormituksena on vastus ja oikosulkumoottori

Kuvasta 18 nähdään, miten taajuus käy 50 Hz:ssä käynnistystilanteessa (n. 2 sekunnin kohdalla), mutta putoaa hyvin pian 49,6 Hz:n tuntumaan. Taajuuden putoaminen johtuu taajuusmuuttajan pätötehostatiikasta, jonka asettelu oli 5 %. Virtojen kuvaajista (kuva 19) nähdään, että virta (vihreä käyrä) on vakiintuneessa tilassa n. 3,5 A, ja pätövirta on puolet kokonaisvirrasta, eli  $3,5A/2=1,75 A$ . Kun taajuusmuuttajan nimellisvirta on 22 A ja taajuuden ohjearvoasettelu tyhjäkäynnillä on 50 Hz, saadaan statiikkaprosentti laskettua yhtälöllä 6 seuraavasti:

$$\Delta f_n = 50 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz}(1 - 0,05) = 2,5 \text{ Hz}$$

Edellisen perusteella voidaan laskea teoreettinen taajuus mitattua virtaa vastaanvassa pisteessä yhtälön 7 perusteella seuraavasti:

$$f_t(I) = 50 \text{ Hz} - \frac{1,75A}{22A} 2,5 \text{ Hz} = 49,80 \text{ Hz}$$

Lasketusta tuloksesta havaitaan, että se on suurempi kuin vastaava mitattu arvo, joka on edellisen kuvaajan perusteella 49,6 Hz. Tämä tarkoittaa sitä, että taajuus on todellisuudessa laskenut 0,2 Hz enemmän, kuin statiikkaasettelun perusteella olisi pitänyt. Ero voi johtua esimerkiksi Vaconin monitorintisovelluksen mittausepä tarkkuudesta.

Kuvan 19 perusteella loisvirta on niin ikään 1,75 A, mikä tarkoittaa että loisvirran osuus nimellisvirrasta on  $1,75/22$ , joka on 7,95 %. Statiikka asettelu ollessa 5 %, jännitteen alenema on nimellisvirralla 20 V ja mitatussa pisteessä sen tulisi olla n. 398,4 V. Kuitenkin mitattu jännite oli hieman alle 395 V, joten loistehostatiikka ei ole toiminut tarkoitetulla tavalla. Sähkölaatumittarilla olisi voitu arvioida, tapahtuuko taajuusmuuttajan säätö perusaallon



arvojen mukaan vai koko jännitteen tehollisarvon perusteella. Asiaa olisi syytä tutkia tarkemmin vielä tulevaisuudessa, mikäli testejä jatketaan.

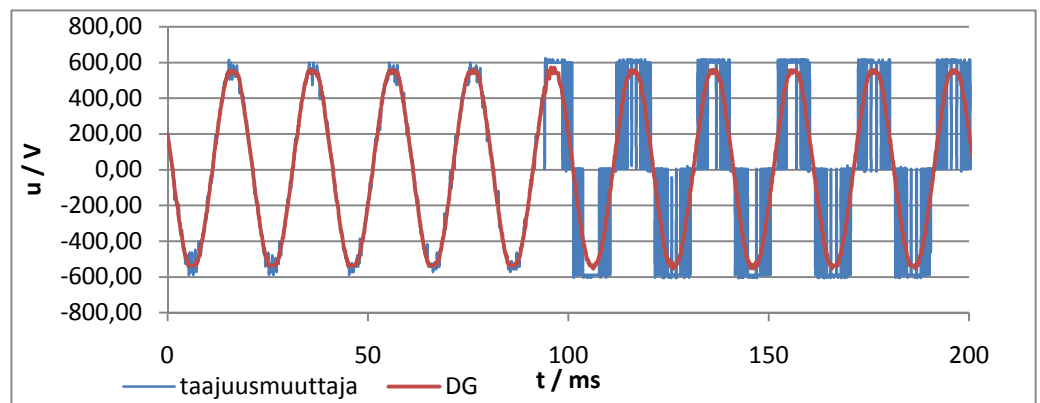
Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että taajuusmuuttajan pätohostatiikkaominaisuus toimii oikealla tavalla eli pätövirran kasvaessa taajuus pienenee lähes oikeassa suhteessa. Loisvirtastatiikan toimivuutta olisi syytä testata lisää nostamalla loiskuormaa asteittain nimellispisteeseen asti.

Saarikäyttötesti osoittautui kokonaisuudessaan onnistuneeksi, eikä moottorin käynnistysvirtakaan aiheuttanut ongelmia. Todellisessa sähköverkossa tosin verkkoon kytketään ensin jännite ja sen jälkeen vasta lisätään kuormitusta asteittain, joten siinä mielessä testin olisi voinut toteuttaa hieman eri tavalla.

#### 5.4.3 Taajuusmuuttajan tahdistus tyhjän dieselgeneraattorin rinnalle

Tässä tilanteessa tahdistus on ehkä hieman väärä sana, koska mitään katkaisijaa ei suljeta jännite ja vaihe-ero tietojen perusteella. Menetelmää voidaan kutsua esimerkiksi oikosulkutahdistukseksi. Testissä taajuusmuuttaja tahdistettiin kuormittamattoman dieselgeneraattorin rinnalle.

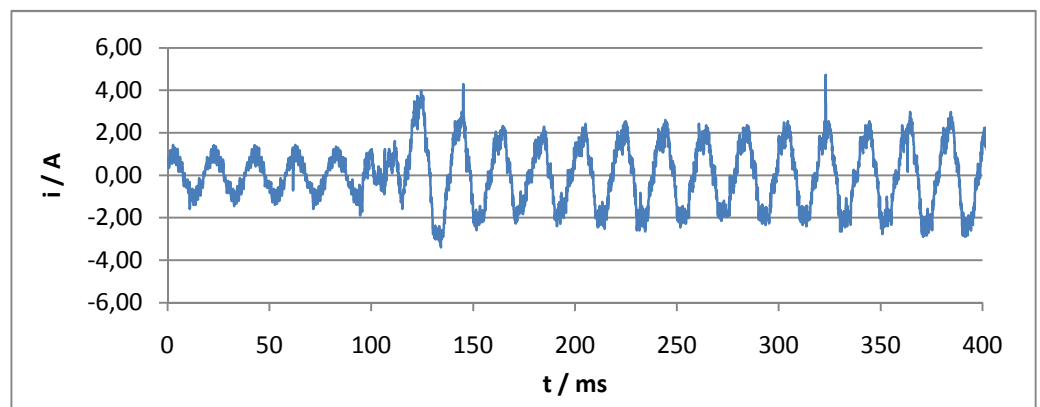
Seuraavissa kuvissa (kuvat 20 ja 21) on esitetty taajuusmuuttajan kytkentätilanne dieselgeneraattorin rinnalle. Kuvaajan alkuosassa molemmat käyrät ovat päällekkäin. Tämä selittyy sillä, että jännitteet on mitattu LCL-suodattimen molemmin puolin ja koska tahdistus tapahtuu ilman katkaisijaa, pääsee dieselgeneraattorin syöttämä jännite taajuusmuuttajalle asti ennen tahdistusta. Hieman ennen 100 ms taajuusmuuttajalle annetaan käynnistyskäsky, jolloin taajuusmuuttaja alkaa moduloida sähköä verkkoon päin.



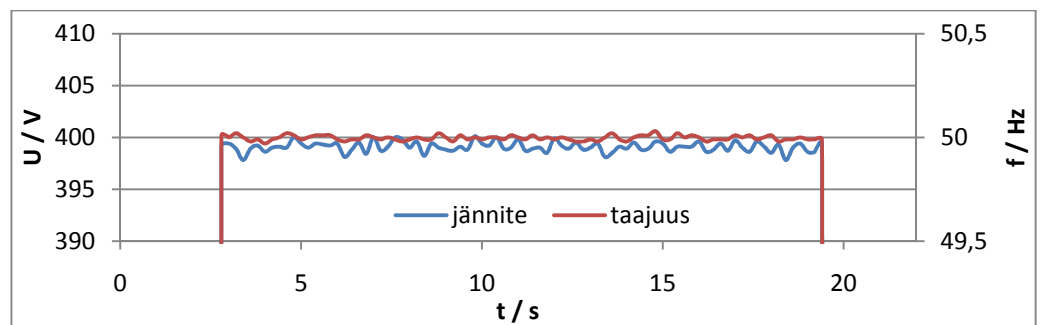
Kuva 20. Taajuusmuuttajan napajännitteen (L1-L2 jännite) käyrämuoto (sininen) ja LCL-suodattimen jälkeen mitattu jännitteen (L1-L2 jännite) käyrämuoto (punainen); mitattu taajuusmuuttajan tahdistushetkellä kuormittamattoman DG:n rinnalle

Kuvaajasta nähdään, miten taajuusmuuttaja osaa ”napata” tilanteesta kiinni, eikä tahdistustilanne aiheuta ongelmia.

Seuraavassa kuvaajassa (kuva 21) on esitetty virran tehollisarvo. Ennen tahdistusta piirissä kulkee huippuarvoltaan hieman yli ampeerin virta. Tämä virta pääsee kulkemaan taajuusmuuttajassa olevien nolladiodien kautta. Noin 100 ms:n kohdalla olevasta tahdistustilanteesta huomataan että käynnistysvirtapiikki on hieman jatkuvan tilan virtaa suurempi. Tämä tarkoittaa sitä, että suora kytkeytyminen kuormittamattomaan verkkoon ei näyttäisi aiheuttavan ongelmia käynnistysvirtojen osalta. Kuvaajasta on havaittavissa, että virta säröytyy aika pahan näköisesti. Virralle ei kuitenkaan ole särötasovaatimuksia, joten sen puolesta ongelmia ei ole.



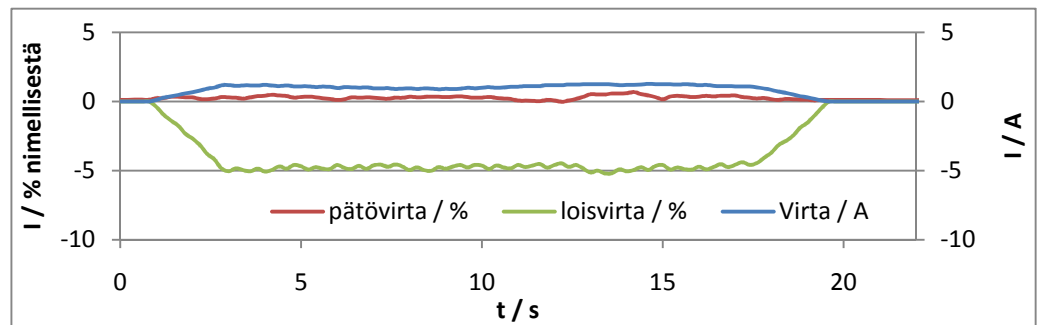
Kuva 21. Taajuusmuuttajan syöttämän virran (L1-vaihe) käyrämuoto; Mitattu taajuusmuuttajan tahdistushetkellä kuormittamattoman DG:n rinnalle



Kuva 22. Jännitteen ja taajuuden tehollisarvot; Taajuusmuuttajan tahdistus kuormittamattoman DG:n rinnalle; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla

Edellisessä kuvaajassa on jännitteen tehollisarvo ja taajuuden keskiarvo taajuusmuuttajan tahdistuksesta ja sen jälkeisestä tilanteesta dieselgeneraattorin rinnalla (kuva 22).

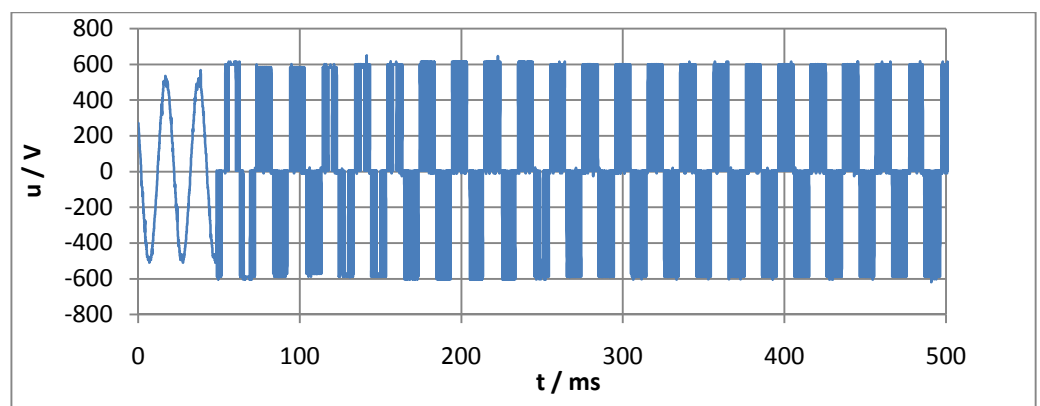
Jännitteen taso on n. 399 V, mutta taajuus on pysytellyt nimellistaajuuden tuntumassa koko testin ajan, kuten oli tarkoituskin. Jännite alenee loisvirtas-tatiikan (5 %) mukaisesti *LCL*-suodattimen ottamasta loisvirrasta. Noin 1 ampeerin loisvirta (kuva 23) on taajuusmuuttajan nimellistehosta 1/22 osaa, joten jännitteenkin tulisi pudota 1/20 osaa, koska 5 % 400 V:stä on 20 V. Jännitteen ja taajuuden tehollisarvoissa on nähtävissä hieman epätasaisuutta, mutta vaihtelut ovat kuitenkin suhteellisen pieniä. Tässä vaiheessa voidaan todeta, että loistehostatiikka toimii oikealla tavalla, ja muutenkin testi näyttäisi onnistuneen hyvin.



Kuva 23. Virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteellinen arvo nimellisestä; Taajuusmuuttajan tahdistus kuormittamattoman DG:n rinnalle; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla

#### 5.4.4 Taajuusmuuttajan tahdistus kuormitetun dieselgeneraattorin rinnalle

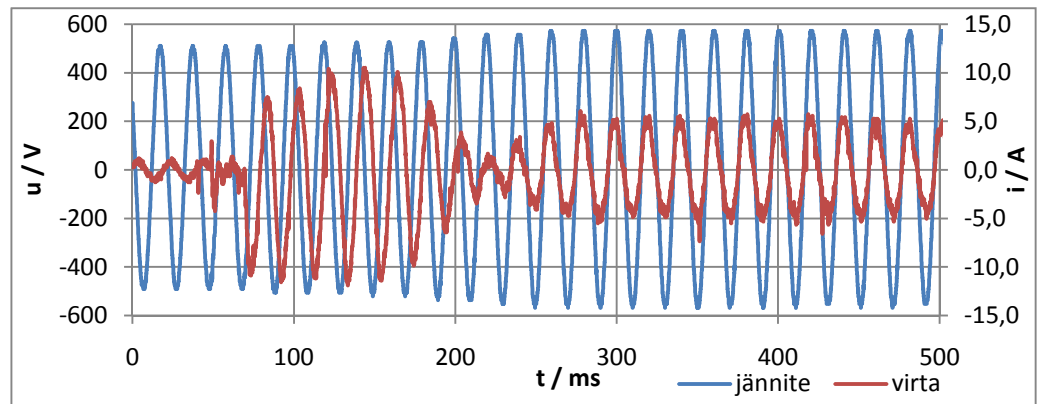
Taajuusmuuttaja tahdistettiin dieselgeneraattorin rinnalle, jonka kuormana oli vastus ja oikosulkumoottori. Kuvassa 24 on taajuusmuuttajan napajännitteen käyrämuoto.



Kuva 24. Taajuusmuuttajan napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto (sininen); Mitattu taajuusmuuttajan tahdistushetkellä kuormitetun DG:n rinnalle

Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että tilanne on lähestulkoon samankaltainen syöttöjännitteen osalta kuin edellinen testi, jossa taajuusmuuttaja

tahdistettiin dieselgeneraattorin muodostamaan kuormittamattomaan verkkoon. Taajuusmuuttaja aloittaa jännitteen moduloinnin nätisti, ilman minikäänlaisia ongelmia.

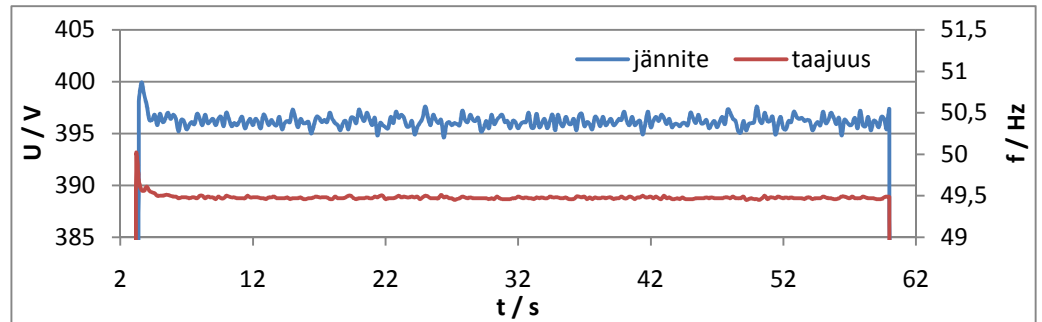


Kuva 25. *LCL-suodattimen jälkeen mitattu jännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto (punainen) sekä L1-vaiheesta mitattu virta; Mitattu taajuusmuuttajan tahdistushetkellä kuormitetun DG:n rinnalle*

Kuvan 25 sininen käyrä on *LCL*-suodattimen verkon puolelta mitattu jännite ja punainen käyrä on L1-vaiheen virta. Kuvaajasta huomataan, että kytkentävirta on n. 2-kertainen tasaantuneeseen tilanteeseen verrattuna. Kytkeä hetken jälkeen on havaittavissa selvä notkahdus virrassa. Virran käyrämuoto on sinimuotoisempaa kuin edellisessä testissä, jossa ei ollut kuormitusta. Mitä enemmän piirissä on induktiivista kuormaa, sen paremmin virran käyrämuotokin muistuttaa sinimuotoa. Verkon jännitteen kuvaajasta huomataan, että tahdistus ei vaikuta juuri mitenkään sen sinimuotoon.

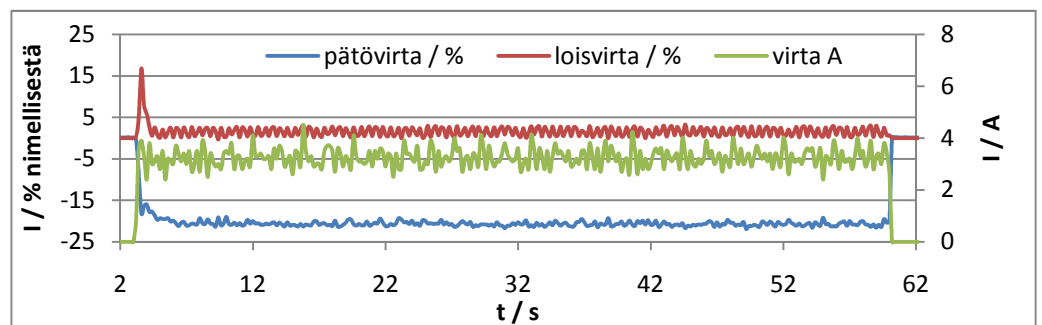
Jännitteen amplitudi nousee tahdistuksen jälkeen n. 180 ms ajan. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että dieselgeneraattorin suhteellinen loiskuormitus putoaa n. puoleen, kun taajuusmuuttaja tahdistetaan sen rinnalle, jolloin statiikkasuoran mukaisesti myös jännite nousee.

Kuvassa 26 on taajuusmuuttajan syöttämän jännitteen ja taajuuden tehollisarvot. Kuvaajista nähdään miten käynnistyshetkellä (n. 4 s) sekä jännite että taajuus käyvät nimellisarvoissaan, mutta pian käynnistytksen jälkeen molemmat putoavat hieman. Putoaminen johtuu taajuusmuuttajalle asetetuista statiikoista, jotka olivat testaushetkellä sekä päto- ja loisivirralla 5 %.



Kuva 26. Jännitteen ja taajuuden tehollisarvot; Taajuusmuuttajan tahdistus kuormitetun DG:n rinnalle; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla

Kuvassa 27 on virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteelliset arvot nimellisvirrasta. Virta on hieman yli 3 A ja pätövirta on negatiivisella puolella, mikä tarkoittaa että teho siirtyy taajuusmuuttajasta kuormituksen suuntaan. Loisvirta on hienoisesti nollan positiivisella puolella, mikä puolestaan tarkoittaa, että taajuusmuuttaja syöttää verkkoon kapasitiivista loisvirtaa. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että taajuusmuuttaja kompensoi dieselgeneraattorin verkkoon syöttämää induktiivista loisvirtaa.



Kuva 27. Virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteellinen arvo nimellisestä; Taajuusmuuttajan tahdistus kuormitetun DG:n rinnalle; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla

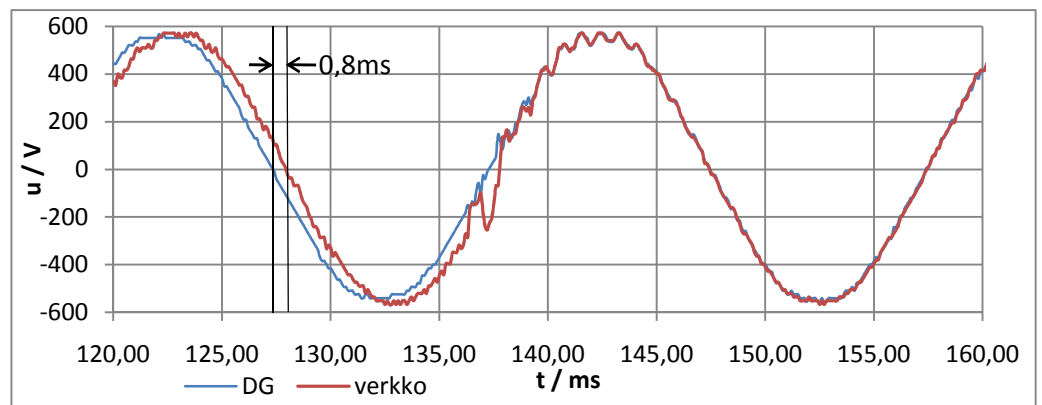
Rinnankäyntitesti onnistui hyvin tahdistuksen ja myös pätövirran jakautumisen suhteen. Tahdistuksesta ei aiheutunut ylisuuria virtapiikkejä, jotka olisivat aiheuttaneet suojien toimimista. Verkon jännite oli kuitenkin melko alhainen, mikä voi johtua myös dieselgeneraattorin jänniteohjeesta, joka ei välttämättä ollut ihan 400 V.

#### 5.4.5 Dieselgeneraattorin tahdistus tyhjän taajuusmuuttajan rinnalle

Dieselgeneraattori rinnalle tahdistettiin taajuusmuuttaja, joka oli kuormittamaton LCL-suodatinta lukuun ottamatta. Tahdistus tehtiin dieselgeneraattorissa olevalla digitaalisella synkronoskoopilla, jossa on oikeaa

tahdistushetkeä kuvaava *LED*-näyttö. Näytöstä näkee tahdistettavien generaattoreiden vaihe-eron. Kun vaihe-ero on nolla, tahdistusnappia painetaan, jolloin kontaktori saa ohjauksen. Käsitahdistus on hieman epätarkka, varsinkin jos kytkettävien generaattorien taajuudet poikkeavat paljon toisistaan ja vaihe-ero on niiden välillä nolla vain hyvin lyhyen aikaa.

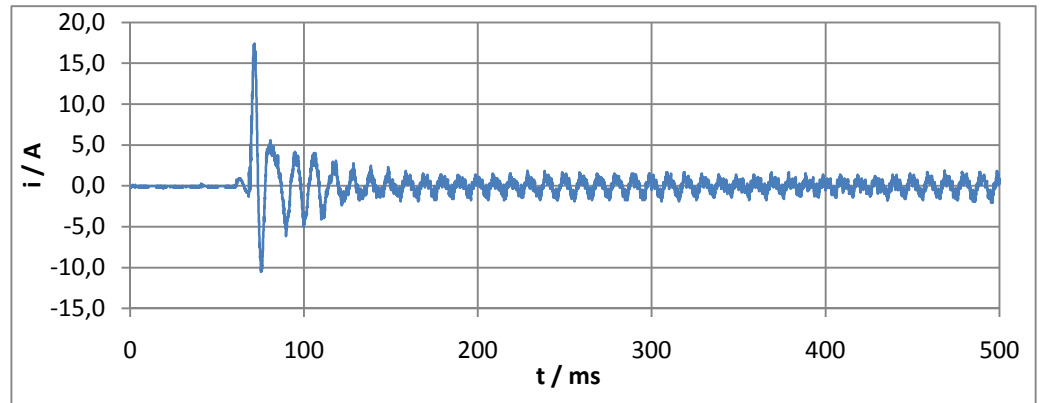
Kuvista 28 ja 29 nähdään dieselgeneraattorin tahdistaminen taajuusmuuttajan muodostamaan verkkoon, joka on kuormittamaton. Tahdistushetki on n. 136 ms:n kohdalla.



Kuva 28. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormittamattomaan verkkoon; Sininen käyrä on dieselgeneraattorin napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto ja punainen käyrä on verkon napajännitteen (L1-L2) käyrämuoto

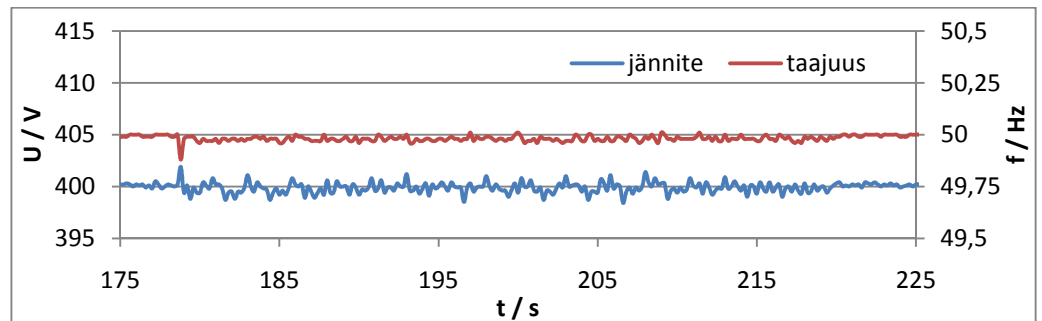
Jännitteen käyrämuodoista nähdään miten dieselgeneraattorin ja verkon jännitteet ovat pienessä vaihesiirrossa sekä jännitteiden amplitudit poikkeavat hieman ennen tahdistushetkeä (kuva 28). Vaihe-ero (0,8 ms) on merkittynä kuvaan. Se tarkoittaa 14,4 asteen vaihesiirtoa. Tahdistushetkellä ja n. 8 ms sen jälkeen jännitteet säröytyvät hieman.

Seuraavasta kuvaajasta nähdään tahdistushetkellä tapahtuva kytkentävirtasysäys, jonka huippuarvo on n. 17 A (kuva 29). Sysäysvirta aiheutuu luultavasti edellä kuvattujen jännitteiden vaihe- ja amplitudierojen vuoksi, jolloin kytkentähetken jälkeen verkossa kulkee tasoisvirta jännitteiden tasaamiseksi. Ilmiö näyttäisi kestävän n. 80 ms, jonka jälkeen virta on vakiintunut huippuarvoltaan n. ampeerin luokkaan, mikä johtuu taajuusmuuttajan ja verkon väliin kytketystä *LCL*-suodattimesta, joka ottaa loisivirtaa.



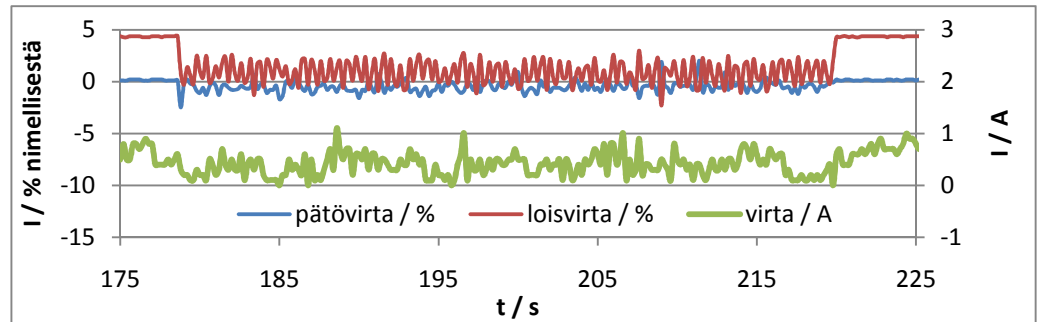
Kuva 29. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormittamattomaan verkkoon; Kuvassa on virran käyrämuoto

Kuvissa 30 ja 31 on tahdistustilanteesta (n. 178 s) jännitteen, taajuuden ja virran tehollisarvot sekä pätö- ja loisvirtojen suhteellisarvot nimellisvirrasta. Jännitteen kuvaajasta huomataan, että tahdistushetkellä on pieni piikki, jolloin jännite käy n. 402 V:ssa, jonka jälkeen jännite hieman heiluen pysyttelee 400 V:n tuntumassa. Taajuus puolestaan vajoaa aavistuksen tahdistustilanteessa, jonka jälkeen se palautuu lähes takaisin 50 Hz:iin. Kuvaajista on lisäksi havaittavissa suurempaa vaihtelua tahdistushetken ja n. 220 sekunnin välillä, jolloin dieselgeneraattori oli kytkettynä taajuusmuuttajan rinnalle.



Kuva 30. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormittamattomaan verkkoon; Kuvassa jännitteen ja taajuuden tehollisarvot

Huomioitava asia tilanteessa on se, että taajuusmuuttajan syöttämä virta hieman putoaa rinnankäynnin aikana (kuva 31). Tätä voidaan verrata tilanteeseen, jossa taajuusmuuttaja tahdistettiin dieselgeneraattorin rinnalle. Huomataan, että *LCL*-suodattimen ottama loisvirta tulee taajuusmuuttajalta, kun tässä tapauksessa näyttäisi käyvän päinvastoin (vrt. 5.4.3).

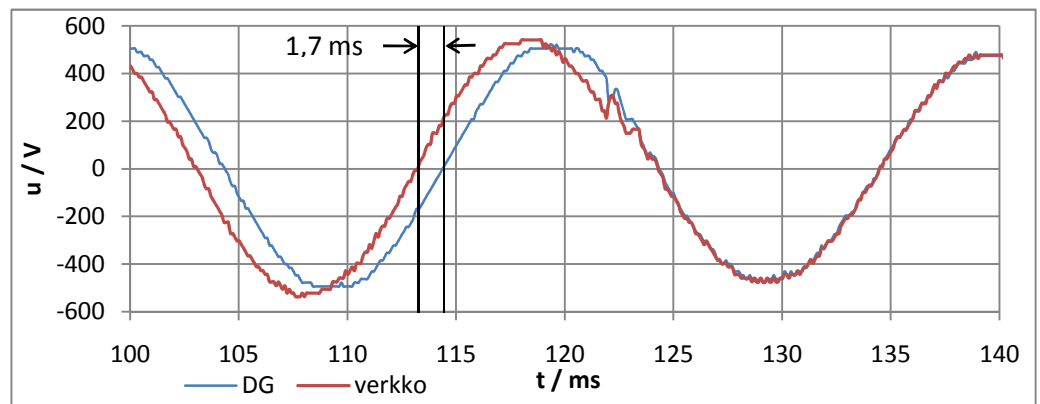


Kuva 31. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormittamattomaan verkkoon; Kuvassa virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteelliset arvot nimellisvirrasta

#### 5.4.6 Dieselgeneraattorin tahdistus kuormitetun taajuusmuuttajan rinnalle

Dieselgeneraattori tahdistettiin kuormitetun taajuusmuuttajan rinnalle. Kuormana oli vastus ja oikosulkumoottori.

Kuvissa 32 ja 34 on esitetty sinisellä dieselgeneraattorin ja punaisella verkon jännitteet ( $U_{L1-L2}$ ), dieselgeneraattorin tahdistamistilanteesta taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitettuun verkkoon. Tahdistus tapahtuu n. 122 ms:n kohdalla.



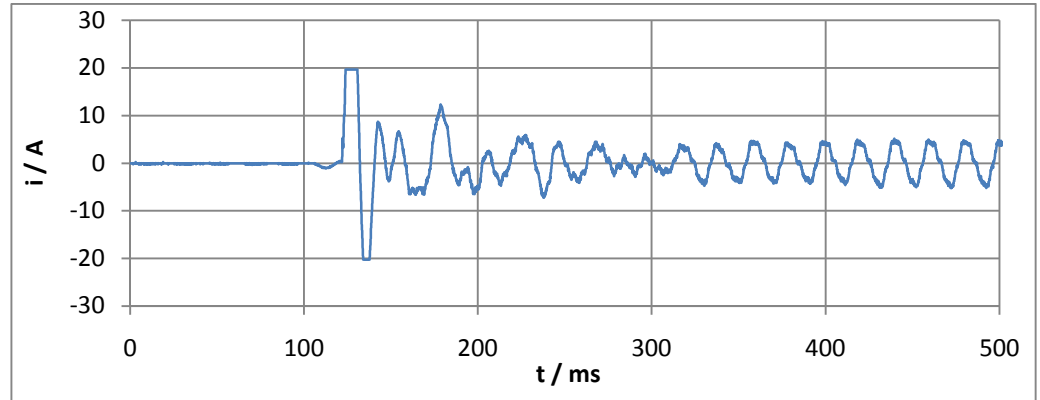
Kuva 32. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitettuun verkkoon; Sininen käyrä on dieselgeneraattorin napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto ja punainen käyrä verkon napajännitteen (L1-L2) käyrämuoto

Kuvasta 32 nähdään, että vaihe-ero on 1,7 ms tahdistushetkeä ennen, mikä on peräti 30 astetta. Tuloksesta huomataan, että tahdistus on tehty 30 astetta liian myöhään. Lisäksi huomataan, että jännitteiden amplitudit poikkeavat toisistaan.

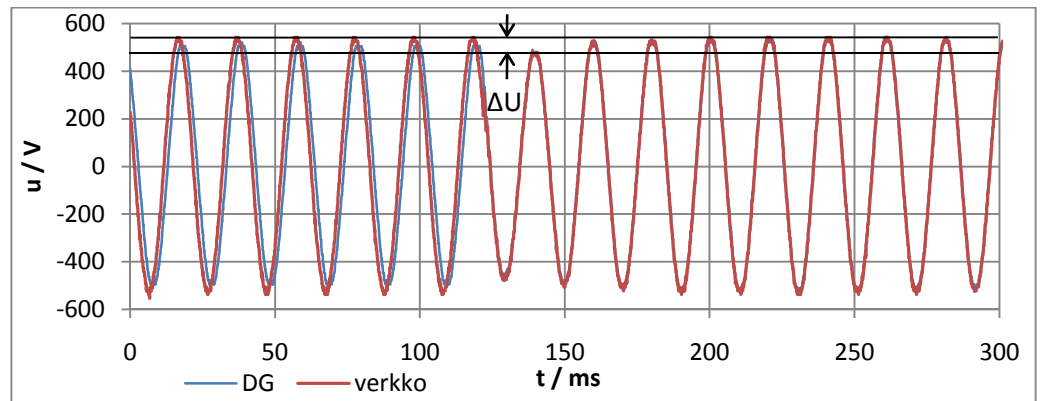
Seuraavassa kuvaajassa käynnistysvirta on enimmillään 20 A (kuva 33). Mitauksessa käytetty virtapihti oli tarkoitettu maksimissaan 20 A:n virran



mittaukseen, ja näin ollen virta leikkaantuu 20 A:n kohdalla. Todellinen virta on siis suurempi. Käynnistysvirta on suurempi kuin edellisessä testissä, koska tahdistushetkellä vaihe-erot olivat n. 2-kertaiset edellisen testin vaihe-eroihin nähden. Mikäli käytössä olisi esimerkiksi automaattinen tahdistuslaitteisto, voisi tahdistuksen tehdä paljon tarkemmin oikealla hetkellä, ja virtasäysäys olisi myös pienempi.



Kuva 33. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitetuun verkkoon; Virran (L1-vaihe) kuvaaja

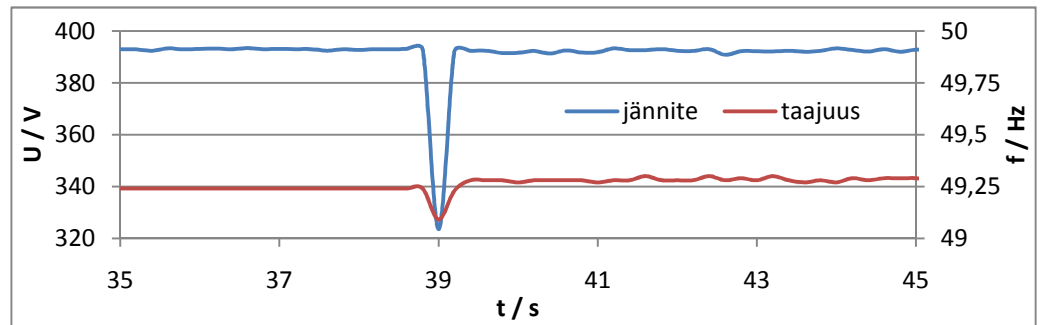


Kuva 34. Dieselgeneraattorin tahdistus taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitetuun verkkoon; Sininen käyrä on dieselgeneraattorin napajännitteen (L1-L2 pääjännite) käyrämuoto ja punainen käyrä on verkon napajännitteen (L1-L2) käyrämuoto

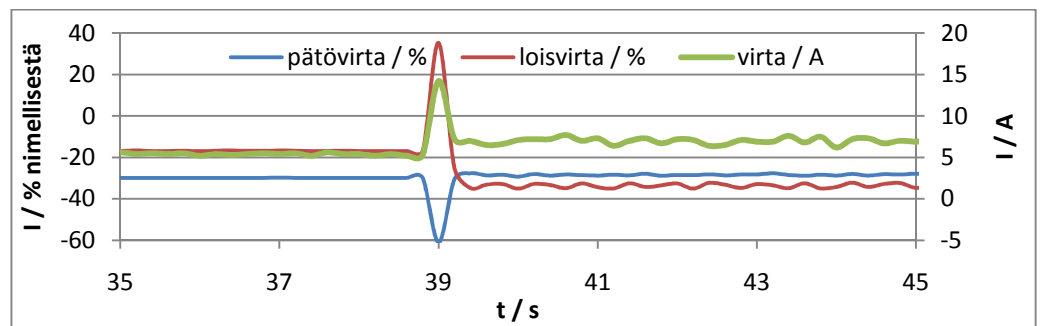
Kuvassa 34 on saman tilanteen jännitteet kuin kuvassa 32, mutta selkeyden vuoksi aika on skaalattu 0 - 300 ms, jotta nähdään jännitteen putoaminen tahdistuksen jälkeen. Havaitaan, kuinka jännite putoaa tahdistushetken jälkeen käynnistysvirtapiikin vuoksi. Huippuarvojen erotus  $\Delta U$  on n. 70 V, mikä tarkoittaa tehollisarvossa n. 50 V pudotusta 400 V tasosta.

Kuvasta 35 nähdään NCDrive-ohjelmalla mitatun taajuusmuuttajan syöttöjännitteen tehollisarvo sekä taajuus. Huomataan, että jännite on pudonnut

n. 70 V. Tämä on 20 V enemmän, kuin oskilloskoopilla mitatun jännitteen perusteella arvioitu tehollisarvo.



Kuva 35. Kuva esittää dieselgeneraattorin tahdistusta taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitettuun verkkoon; Kuvassa jännitteen ja taajuuden tehollisarvot; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla



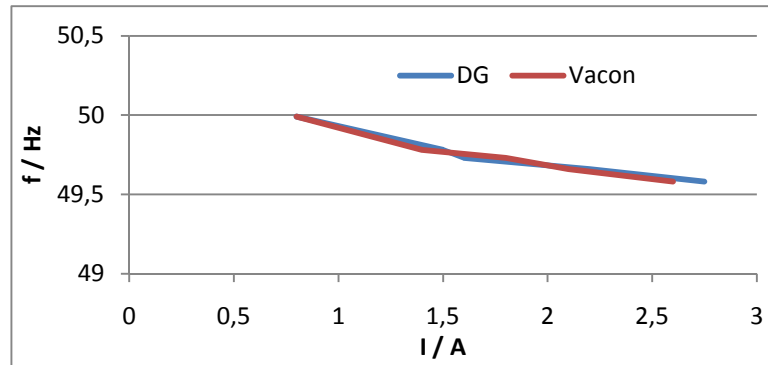
Kuva 36. Kuva esittää dieselgeneraattorin tahdistusta taajuusmuuttajan muodostamaan kuormitettuun verkkoon; Kuvassa virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteelliset arvot nimellisestä; Mitattu Vacon NCDrive -ohjelmalla

Kuvassa 36 on taajuusmuuttajalta mitatun virran tehollisarvo sekä pätö- ja loisvirran suhteellisarvot nimellisarvoista.

#### 5.4.7 Kuormien jakautuminen taajuusmuuttajan ja dieselgeneraattorin kesken

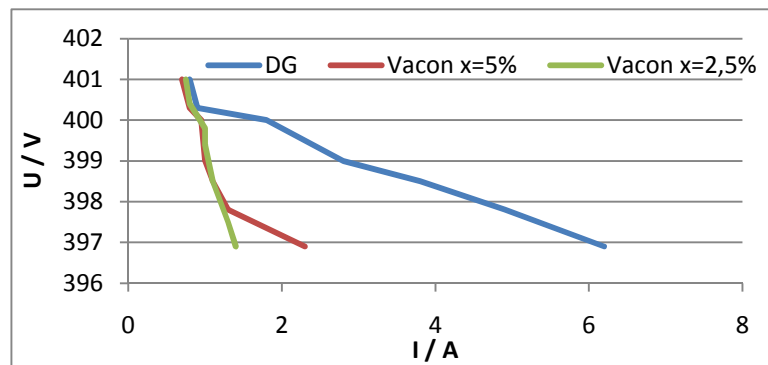
Kuormien jakautumista testattiin dieselgeneraattorin ja taajuusmuuttajan kesken sekä resistiivisellä että induktiivisellä kuormalla. Mittaukset toteutettiin mittaamalla virrat pihtivirtamittarilla ja jännitteet sekä taajuudet mitattiin tehoanalysaattorilla. Tarkoituksena oli saada suuntaa antavaa tietoa siitä, miten dieselgeneraattori ja taajuusmuuttaja jakavat kuormitusta keskenään.

Resistiivisellä kuormalla mitattiin sekä dieselgeneraattorin että taajuusmuuttajan virrat taajuuden funktiona. Molemmille tuotantoyksiköille oli säädetty tyhjäkäyntitaajuudeksi 50 Hz ja taajuusmuuttajan pätötehostatiikka oli säädetty 5 %:iin. Dieselgeneraattorin statiikka-asettelujen säätö ei ollut käytettävissä testauksilanteessa, eikä sen asetteluarvosta ole myöskään tietoa.



Kuva 37. Pätökuormien jakautuminen DG:n ja taajuusmuuttajan kesken.

Kuvasta 37 nähdään, että molemmat kuvaajat ovat lähes päällekkäin, joten pätökuorman jakautuminen dieselgeneraattorin ja taajuusmuuttajan kesken on erittäin tasaista. Testi olisi ollut järkevää tehdä suuremmilla kuormilla, jolloin olisi nähty, miten kuorman jako tapahtuu lähempänä nimellisvirtoja.



Kuva 38. Loiskuormien jakautuminen DG:n ja taajuusmuuttajan kesken.

Kuva 38 esittää dieselgeneraattorin ja taajuusmuuttajan loisvirtojen jakautumista. Mittaus tehtiin kahdella eri taajuusmuuttajan loisvirtastatiikkaprosentin arvolla. Ensimmäisessä mittauksessa käytettiin 5 %:n statiikka-arvoa ja toisessa 2,5 %:n arvoa. Kuvassa dieselgeneraattorin virtakäyrä (sininen) kuvaa molempia mittauksia, koska käytännössä molempien mittauksien käyrät olivat lähes identtiset dieselgeneraattorin osalta. Kuvista nähdään selvästi se, että dieselgeneraattori kuormittuu lähes yksin molemmissa tapauksissa. Huomioitavaa on myös se, vaikka taajuusmuuttajan statiikka aseteltiin toisessa testissä 2,5 %:iin, ero vain kasvoi virran ollessa suurimmillaan.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Testissä tehtyjen mittausten perusteella on analysoitu taajuusmuuttajan käyttäytymistä rinnankäyntitilanteissa ja sen syöttäessä yksin kuormitusta.

### *Testaukset*

Taajuusmuuttaja pystyi muodostamaan jännitteen tyhjään verkkoon ilman mitään ongelmia. Jännitteen käyrämuoto on ennen *LCL*-suodatinta tasaista pulssimuotoista jännitettä. *LCL*-suodatin tekee pulssimuotoisesta jännitteestä lähes tasaista sinimuotoista jännitettä.

Saarikäyttötesti osoittautui onnistuneeksi kuorman kytkemisen osalta, eikä moottorin käynnistysvirtakaan aiheuttanut ongelmia. Testi olisi hyvä tehdä nimellisvirtaa vastaavalla kuormituksella, jotta nähtäisiin miten käynnistys vaikuttaa taajuusmuuttajan toimintaan.

Saarikäyttötestin sekä muiden mittausten perusteella huomataan, että päto- tehostatiikka toimii, kuten on tarkoitus. Loisvirtastatiikan toimivuutta olisi syytä testata laajemmin. Testeissä olisi syytä mitata erikseen tehoanalysaattorilla sekä dieselgeneraattorin että taajuusmuuttajan loisvirrat kasvattamalla kuormitusta asteittain lähelle nimelliskuormaa.

Taajuusmuuttajan tahdistukset onnistuivat hyvin dieselgeneraattorin rinnalle ja taajuusmuuttaja osasi aloittaa moduloinnin aina vauhdista, eikä suuria kytkentätransientteja ollut havaittavissa. Loistehostatiikka toimi myös oikealla tavalla *LCL*-suodattimen ottamalla loisteholla, tahdistettaessa taajuusmuuttajaa dieselgeneraattorin muodostamaan tyhjään verkkoon.

Myös dieselgeneraattorin tahdistukset taajuusmuuttajan rinnalle sujuivat ilman suurempia ongelmia. Käynnistystransientit olivat varsinkin toisessa testissä hieman suurehkoja tahdistushetken vaihe-eron ollessa 30 astetta, mutta suojat eivät laenneet. Tuloksista kuitenkin huomattiin, että tahdistukset on syytä tehdä tarkasti, jotta ylisuurilta käynnistysvirroilta vältytään.

Viimeisenä tehty testi kuormitusten jakautumisesta toimi suuntaa antavana, miten päto- ja loistehot jakautuvat dieselgeneraattorin ja taajuusmuuttajan välillä. Huomattiin, että varsinkin päto-teho jakautui hyvin tarkasti tasan molempien tuotantoyksiköiden kesken. Tarkempia tuloksia varten olisi syytä testata vielä suuremmilla kuormilla ja dieselgeneraattorin statiikka-arvo olisi syytä olla säädettävissä. Loiskuorman jakautuminen puolestaan oli hyvin epätasaista, dieselgeneraattorin ottaessa lähes koko kuormituksen itselleen. Myös loisvirtastatiikan asettelu olisi hyvä saada selville dieselgeneraattorin osalta, mikäli testejä halutaan uusia tulevaisuudessa.

Kaiken kaikkiaan testit onnistuivat hyvin pienistä vastoinkäymistä huolimatta. Tuloksia voidaan hyödyntää jatkotestauksia varten ja niitä voidaan hyödyntää toteutuksiin, joissa taajuusmuuttaja liitetään osaksi voimantuotantoa.

#### *Taajuusmuuttajaa syöttävän tahtikoneen käyttäminen moottorina*

Tahtikonetta voidaan käyttää myös moottorina. Esimerkiksi laivoissa tämä voisi tarkoittaa sitä, että pääkoneen akseliin kytkettyä generaattoria käytettäisiin moottorina pyörittämään potkuria, mikäli pääkone vikaantuisi. Tämä voidaan tehdä myös taajuusmuuttajan avulla, jolloin tehon suunta olisi verkosta generaattoriin. Tässä työssä asian käsittely jätettiin työn rajauksien takia pois, mutta asiaa olisi hyvä tutkia myöhemmin sekä tehdä käytännön testejä ja mittauksia. Taajuusmuuttajan ohjaus olisi syytä toteuttaa kenttäväylän avulla, jotta taajuusmuuttajan parametrimuutokset voisi tehdä helposti.

Kuvitellaan, että laivan pääkone vikaantuu, jolloin potkuriakseli irrotetaan vaihteistolla pääkoneesta. Laiva on lisäksi liikkuvassa tilassa, jolloin akselilla on jokin pyörimisnopeus ja näin ollen myös generaattorilla. Tällöin taajuusmuuttajan parametointi täytyisi ensinnäkin muuttaa siten, että tehon kulkusuunta vaihtuisi toisinpäin. Lisäksi taajuusmuuttajan tulisi kytetä syöttämään tahtikonetta ensin sitä nopeutta vastaavalla taajuudella, millä akseli pyörii, ja tämän jälkeen sen tulisi nostaa tahtimoottorin nopeus johonkin tiettyyn ennalta suunniteltuun nopeuteen.

Lisäksi olisi syytä miettiä, millä tavoin tahtikonetta halutaan ohjata. Ohjataan sitä kuten moottoria ohjataan normaalisti taajuusmuuttajalla vai toteutetaan ohjaus vain syöttämällä saareketta tietyllä taajuudella, jolloin moottori seuraa perässä. Mikäli ohjaus tehtäisiin perinteisellä tavalla, tahtikoneen magnetointia täytyisi kytetä ohjaamaan taajuusmuuttajalla ja säätödynamiikka voisi olla tarkempi, jos taajuusmuuttajalle voitaisiin asetella tahtikoneen parametrit. Jälkimmäinen tapa voisi olla käytännössä helpompi toteuttaa, mutta sen säätödynamiikka voisi puolestaan olla huonompi. Lisäksi tahtikoneen rinnalla voisi olla muita kulutuslaitteita, kuten ohjauspotkurimoottoreita. Tällöin taajuusmuuttaja tulisi mitoittaa suuremmaksi tai taajuusmuuttaja syöttäisi moottoreita vain omalla nimellisteholla sekä siihen verrannollisella taajuudella, jolloin verkon taajuus laskisi ylikuormitustilanteissa.

## 7 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä tutkittiin taajuusmuuttajan liittämistä tahtigeneraattorin ja heikon sähköverkon väliin teoreettisella ja kokeellisella menetelmällä. Teoriaosuudessa käytiin läpi sähköverkon kannalta oleelliset osat ja kokeellisessa osuudessa tehtiin mittauksia tahdistustilanteista sekä kuormitusten jakautumisesta taajuusmuuttajan ja sen rinnalla käyvän dieselgeneraattorin kesken.

Mittauksilla tutkittiin Vacon NXI -taajuusmuuttajan toimivuutta em. tilanteissa tekemällä tahdistuskokeita ja tutkimalla kuormitusten jakautumista tuotantoyksiköiden kesken. Tehdyt kokeet onnistuivat suurimmalta osalta hyvin. Taajuusmuuttaja pystyy muodostamaan jännitteen tyhjään kuormittamattomaan verkkoon, syöttämään saarekekuormaa sekä tahdistamaan dieselgeneraattorin muodostamaan verkkoon sen ollessa joko kuormittamaton tai kuormitettu.

Taajuusmuuttajan kaupalliselle tasolle saattaminen tarvitsee vielä jatkotestauksia, joita ei tässä työssä voitu eikä ehditty tehdä. Lisäksi loisivirran käyttäytymistä statiikkasuorien mukaan olisi syytä testata enemmän. Tahdistuksien onnistuminen, pätövirran tasainen jakautuminen sekä taajuusmuuttajan vakaa toiminta rinnankäynnissä antavat lupaavan vaikutelman uuden sovelluksen toimivuudesta.

## LÄHTEET

- /1/ Lassila, J. Luentomateriaali. *Sähköverkkotekniikan peruskurssi - BL20A0700*. Johdanto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2010.
- /2/ Ylinen, Esa. Henkilökohtainen tiedonanto. Edec Development Oy. 6.4.2010.
- /3/ Aura, Lauri. - Tonteri, Antti. *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. 1. painos. Porvoo. WSOY. 1996.
- /4/ Pyrhönen, Juha. *Sähkökäytöt - osa 1*. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2006.
- /5/ Mörsky, Jorma. Mörsky, Janne. *Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka*. Helsinki. Otatieto Oy. 1994
- /6/ Lana, Andrey. *Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliityntä*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. 2008.
- /7/ Kainulainen, Konsta. *Teollisuussähköverkon stabiilisuus saarekekäyttöön siirryttäessä*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan osasto. 2001.
- /8/ *Turbogeneraattorin jännitteensäätö*. INSKO:n julkaisu 23 - 77, Luku XI.
- /9/ Pyrhönen, Juha. *Sähkökäytöt - osa 2*. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2006.
- /10/ Lindh, Tuomo. Niemelä, Markku. *Hajautetun voimantuotannon verkkoonliityntä ja koneet*. DENSY loppuraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2005.
- /11/ Aura, Lauri. - Tonteri, Antti. *Sähkämiehen käsikirja 2*. WSOY. Porvoo. 1986.
- /12/ DEIF käyttöohje. *PPM-3 protection and power management - Multi-line 2 designers reference handbook*. Viitattu 5.3.2010.
- /13/ Rauma, Ahti. Vacon Oy. Sähköpostikeskustelu. 24.2.2010.
- /14/ Vacon käyttöohje. *Optiokortti 7*. Viitattu. 25.2.2010.
- /15/ Käyhkö, Tomi. *Laivan voimalaitoksen ja jännitevälipiirillisen ruoripotkurikäytön vuorovaikutusten mallintaminen*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2004.
- /16/ Mörsky, Jorma, *Relesuojaustekniikka*. Hämeenlinna. Otatieto Oy. 1993.
- /17/ Standardi IEC 60092-301, 3. painos, International Electrotechnical Commission, 1980.
- /18/ Standardi IEC 60092-202, 4. painos, International Electrotechnical Commission, 1994-03.