

Tero Aatos Mustonen

LAITTEIDEN TESTAUKSESSA KULUTETTU ENERGIA VACON OYJ:SSÄ

Tekniikka ja liikenne

2013

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tero Mustonen
Opinnäytetyön nimi	Laitteiden testauksessa kulutettu energia Vacon Oyj:ssä.
Vuosi	2013
Kieli	suomi
Sivumäärä	30
Ohjaaja	Jari Koski

Vacon Oyj on osana energiansäästökampanjaa, jonka tavoitteena on vähentää energiankulutusta 20 % vuoteen 2016 mennessä.

Tässä työssä tutkitaan Vacon Oyj:n taajuusmuuttajien ja inverttereiden testaamiseen kuuluvien energioiden suhteita. Työssä mitattiin testattavien laitteiden verkosta otettavan energian ja testauspiirissä kierrätettävän energian suhdetta eri testauskonsepteissa.

Työhön kuului mittauslaitteistojen käyttöönotto sekä uusien suunnittelu ja rakentaminen. Tulokset kirjattiin ylös työn aikana raportointia ja analysointia varten.

Työssä saatiin tuloksia useiden neste- ja ilmajäähdytteisten laitteiden verkosta otettavan energian ja testauspiirissä kierrätettävän energian suhteista. Tulosten avulla oli mahdollista vertailla erikokoisia ja erityyppisiä laitteita, mutta myös vertailla eri testausmenetelmien ominaisuuksia.

Avainsanat	taajuusmuuttaja, invertteri, energiatehokkuus, testaaminen
------------	--

ABSTRACT

Author	Tero Mustonen
Title	Energy Consumption in Product Testing at Vacon Oyj.
Year	2013
Language	Finnish
Pages	30
Name of Supervisor	Jari Koski

This thesis studies the relations of the energies consumed when testing Vacon Oyj frequency converters and inverters. Vacon Oyj is taking part in an energy saving campaign the objective of which is to save energy 20 % until year 2016.

The relations of the energy that is taken from the grid and the recyclable energy in the energy circuit was measured and compared in different testing concepts in this thesis.

The thesis included commissioning the measuring equipment and designing and building new ones. The results were written down for analysis and reporting.

Many results were gained on the energy relations of air and liquid-cooled devices. The results made the comparison of different size and different type of devices possible but also the comparison of properties of different testing concepts.

Keywords	Frequency converter, inverter, energy efficiency, testing
----------	---

TERMIT JA LYHENTEET

1. AFE - Active Front End, verkkoon regeneroiva DC-syöttöyksikkö.
2. NFE – Non Regenerative Front End, verkkoon regeneroimaton DC-syöttöyksikkö.
3. PWM – Pulse Width Modulation, ohjaustapa, jolla säädetään invertterin vaihtojännitteen tehollisarvoa.
4. IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor, jänniteohjeella toimiva invertterin ohjauskomponentti.
5. IO-kortti – Input / Output –kortti taajuusmuuttajassa.
6. HASS – Highly Accelerated Stress Screening. Testausmuoto, jossa laitetta vanhennetaan normaalia nopeammin.
7. VAP1 – Moottoritestausjärjestelmä Vacon Oyj:llä.
8. VAP3,VAP4 – BackToBack-konseptin mukainen testausjärjestelmä Vacon Oyj:llä.
9. INU – Invertteri eli vaihtosuuntaaja.
10. PMU – Power Monitoring Unit. Monipuolinen tehon ja energian mittalaitte.
11. CAT3 – Mittalaitteiden ylijänniteluokka 3.
12. Firmware – Laitteen sisäinen ohjelmisto.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

TERMIT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 YRITYS JA TUOTTEET	8
2.1 Yritys	8
2.2 Tuotteet.....	9
2.3 Tuotteiden rakenteet	10
3 TESTAAMINEN	13
3.1 Yleistä.....	13
3.2 Esitestaus	14
3.3 Testaus uunissa.....	14
3.4 Testauskonseptit	15
3.4.1 Perinteinen testausmenetelmä.....	15
3.4.2 BackToBack-konsepti	18
4 MITTAUSPERIAATE.....	20
4.1 Tehon ja energian mittaaminen	20
4.2 Hyötysuhteet ja häviöt.....	20
4.3 Mittauksen turvallisuus	21
5 TYÖN TOTEUTUS	23
5.1 Hypoteesi.....	23
5.2 Suunniteltu toteutus	23
5.3 Työn eteneminen	24
5.3.1 FI10:n testaaminen perinteisellä menetelmällä	25
5.3.2 FI10:n testaaminen BackToBack-konseptilla	26
6 TULOKSET JA TARKASTELU	27
6.1 Tulokset.....	27
6.2 Tarkastelu	27

7 LOPPUPÄÄTELMÄT	29
7.1 Hypoteesin ja tulosten kohtaaminen.....	29
7.2 Jatkotutkimusehdotuksia	29
LÄHTEET	30

1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajan yleistyminen moottorikäytöissä on sen huomattavan energiansäästön ansiota. Energiasäästön ohella on moottorin ohjattavuus helpottunut huomattavasti taajuusmuuttajan avulla. Suomen johtavan taajuusmuuttajia valmistavan Vacon Oyj:n globalisoituminen on saanut aikaan energiankulutuksen tarkemman seurannan niin taajuusmuuttajien testauksessa kuin kiinteistön kulutuspisteidenkin osalta. Vacon Oyj on osana maailmanlaajuisista energiansäästökampanjaa, jonka tarkoituksena on vähentää energiankulutusta 20 % vuoteen 2016 mennessä. /1/

Vacon Oyj:llä pyritään hyödyntämään taajuusmuuttajan testauksessa tarvitsemaa energia mahdollisimman hyvin kierrättämällä se takaisin taajuusmuuttajaa syöttävään piiriin tai takaisin sähköverkkoon. Nykyään Vacon Oyj:n uudemmilla testausmenetelmillä päästään todella hyviin lukuihin kierrätettävän- ja verkosta otettavan energian suhteen. Käytännössä uusilla testausmenetelmillä tämä tarkoittaa, että käynnistyksen jälkeen verkosta otetaan testin aikana enää sähköpiirin häviötehot.

Työn tarkoituksena on selvittää Vacon Oyj:n tilauskannan yleisimpien keski- ja suuritehoisten taajuusmuuttajien ja inverttereiden, syötettävän ja kierrätettävän energian suhde eri testauskonsepteissa. Tarkoituksena on selvittää kuinka ”vihreää” Vacon Oyj:n testaus on kullakin testausmenetelmällä ja vertailla tuloksia eri laitteiden ja testausmenetelmien kesken.

2 YRITYS JA TUOTTEET

2.1 Yritys

Vuonna 1993 ryhmä ABB Industry Oy:n Vaasan tehtaan avainhenkilöitä perusti Vaasa Control Oy:n tavoitteenaan tulla yhdeksi maailman suurimmista taajuusmuuttajavalmistajista. Ensimmäinen tuoteperhe, Vacon CX, lanseerattiin vuonna 1995. Samana vuonna vietettiin Vaasan tehtaan avajaisia ja perustettiin tytäryhtiöt Saksaan ja Ruotsiin. Ensimmäiset suuret taajuusmuuttajat toimitettiin Seikun sahalle Poriin. Yhteistyö merkittävän kumppanin Schindlerin kanssa, joka on maailman johtavia hissi- ja liukuportaiden valmistajia, alkoi vuonna 1996. /2/

Toisen sukupolven Vacon NX:n suunnittelu aloitettiin syksyllä 1998. Vuonna 2000 Vacon NX tuotiin markkinoille. Samana vuonna tapahtui listautuminen Helsingin Pörssiin ja nimi vaihdettiin Vacon Oyj:ksi. Vuosi 2000 oli myös Kiinan tytäryhtiön perustamisvuosi, jossa tuotanto aloitettiin vuonna 2005. /2/

Kolmas sukupolvi Vacon 10 lanseerattiin vuonna 2008 Vaconin juhliessa 15 vuotispäiväänsä samana vuonna. Vuonna 2010 päätettiin laajentaa osaamisaluetta ostamalla espanjalainen aurinkoenergiainverttereiden suunnitteluun erikoistunut yhtiö. Vacon 8000 Solar -invertterin ja Solar Multimasterin ohjelmistot suunniteltiin 2010 ja vuonna 2011 Vacon 8000 Solar -invertteri saavutti laajat kansallisten sähköjakelijoiden vaatimukset täyttävät verkkohyväksynät. /2/

On selvää, että kasvua on tapahtunut huomattavasti alkuvuosista ja siitä kertoo myös vuoden 2010 liikevaihto, 338,0 MEUR. Tuotanto- ja tuotekehityspisteet löytyvät nykyään Suomen ja Kiinan lisäksi myös Yhdysvalloista ja Italiasta. Myyntitoimistoja on nykyään 27 maassa ja yhteistyökumppaneita on kertynyt vuosien varrella useita, mikä on mahdollistanut suuren aseman maailman taajuusmuuttajamarkkinoilla. /2/

2.2 Tuotteet

Taajuusmuuttajalla ohjattu moottori on yleinen näky teollisuudessa ja yleisty kovaa vauhtia myös kotitalouksissa. Taajuusmuuttajien ja invertterien kysyntä on alentanut hintaa huomattavasti viime vuosien aikana. Vacon Oyj:n tuotevalikoima ylittääkin nykyään 0,25kW:n ilmajäähdytteisistä noin 5MW:n nestejäähdytteisiin taajuusmuuttajiin. Taajuusmuuttaja pidentää moottorin elinikää ja säästää energiaa, käytöstä riippuen jopa yli 50 %:a.

Pumppu- ja puhallinkäytöt ovat yleisiä taajuusmuuttajan käyttökohteita, joissa pehmeän käynnistyksen lisäksi ohjataan nopeutta portaattomasti. Myös hissi-, kuljetin- ja nosturikäytöissä nämä ominaisuudet ovat tarkan ohjattavuuden lisäksi tärkeitä. Tuulimyllyissä ja aurinkopaneeleissa tärkeä ominaisuus, DC- jännitteen muokkaaminen käytettävämpään AC- muotoon, hoidetaan vaihtosuuntaajan avulla. Vaihtosähkömuodossa se on mahdollista syöttää takaisin syöttävään sähköverkkoon. Taajuusmuuttajien ja invertterien ominaisuudet soveltuvat myös laivojen ohjaus- ja voimansiirtojärjestelmiin.

Tasasuuntaajia on Vacon Oyj:llä erilaisia, regeneroivia tai ei regeneroivia. Regenerointi tarkoittaa sähköenergian siirtämistä takaisin syöttävään verkkoon. Tämän lisäksi laitteen täytyy pystyä tahdistumaan verkkoon, tällainen DC-syöttöyksikkö on nimeltään AFE. NFE on verkkoon regeneroimaton DC-syöttöyksikkö.

2.3 Tuotteiden rakenteet

Tässä työssä taajuusmuuttajalla tarkoitetaan pulssinleveyssäädettyä (PWM) välipiirillistä taajuusmuuttajaa. Invertteristä puhuttaessa tarkoitetaan vaihtosuuntaajaa, joka on periaatteeltaan taajuusmuuttaja ilman tasasuuntaajaa ja välipiiriä.

Taajuusmuuttajan pääkomponentit:

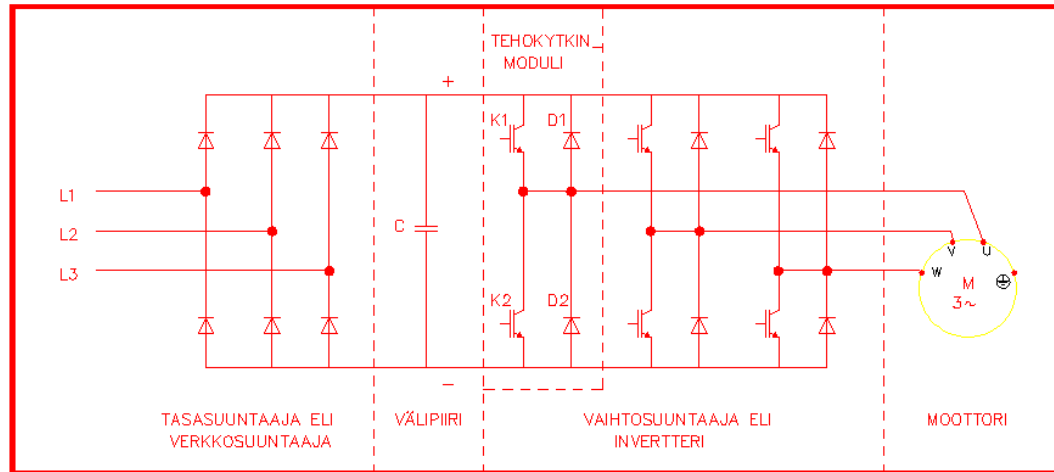
- tasasuuntaaja
- välipiiri
- vaihtosuuntaaja.

Verkkokommutoiduksi suuntaajaksi kutsutaan yleisesti tasasuuntaajaa, joka kytkeytyy sähköverkkoon. Sen kytkentätaajuudeksi määräytyy verkon taajuus 50Hz, joka myös ohjaa suuntaajan venttiileitä. Diodisillan eli tasasuuntaajan tehtävänä on suunnata verkon vaihtojännite tasajännitteeksi välipiiriin (Kuva1). Välipiirissä oleva kondensaattori tasoittaa jännitettä ja yhdessä AC-kuristimen kanssa ne muodostavat LC-suodattimen, joita käytetään myös testauspiireissä vähentämään häiriöitä ja tasoittamaan verkon virran käyrämuotoa (Kuva 1).

Kondensaattorin ja kelan sarjakytkentää eli imupiiriä käytetään yleisesti teollisuudessa käytöissä, jossa halutaan vähentää suuntaajan yliaaltoja. Imupiiri viritetään suuntaajan rinnalle, samalle taajuudelle kuin yliaalto, jolloin se ”imee” yliaallon suotimen läpi.

Invertterin kytkentätaajuus on normaalisti 3-9 kHz. Kytkentätaajuutta nostamalla voidaan parantaa moottorin virran käyrämuotoa, mutta tämä nostattaa IGBT:iden ja laitteen lämpötilaa nopeasti, varsinkin kuumissa testasuuneissa. Invertterin jänniteohjatuilla IGBT-venttiileillä muokataan moottorille halutun muotoista ja taajuista vaihtojännitettä. Moottorin käämien päät U, V ja W siis kytkeytyvät vuorotellen välipiiriin +- ja -kiskoon IGBT:iden ohjaamina. Yksi tehokytkinmoduuli sisältää 2 IGBT-venttiiliä (K1,K2) ja 2 diodia (D1,D2). Tehokytkinmoduuli on rajattu kuvaan katkoviivalla (Kuva1). K1:n johtaessa U-vaihe on kytkeytynyt vä-

lipiirin pluskiskoon K2:n johtaessa miinuskiskoon. Diodin tehtävä on ”tappaa” piikit, jotka syntyvät IGBT:n kytkennässä. Näin saadaan U-vaiheen ”tasajännitteen” kantikas muoto, joka yhdessä kahden muun vaiheen kanssa muodostaa kolmivaiheisen vaihtojännitteen moottorille.

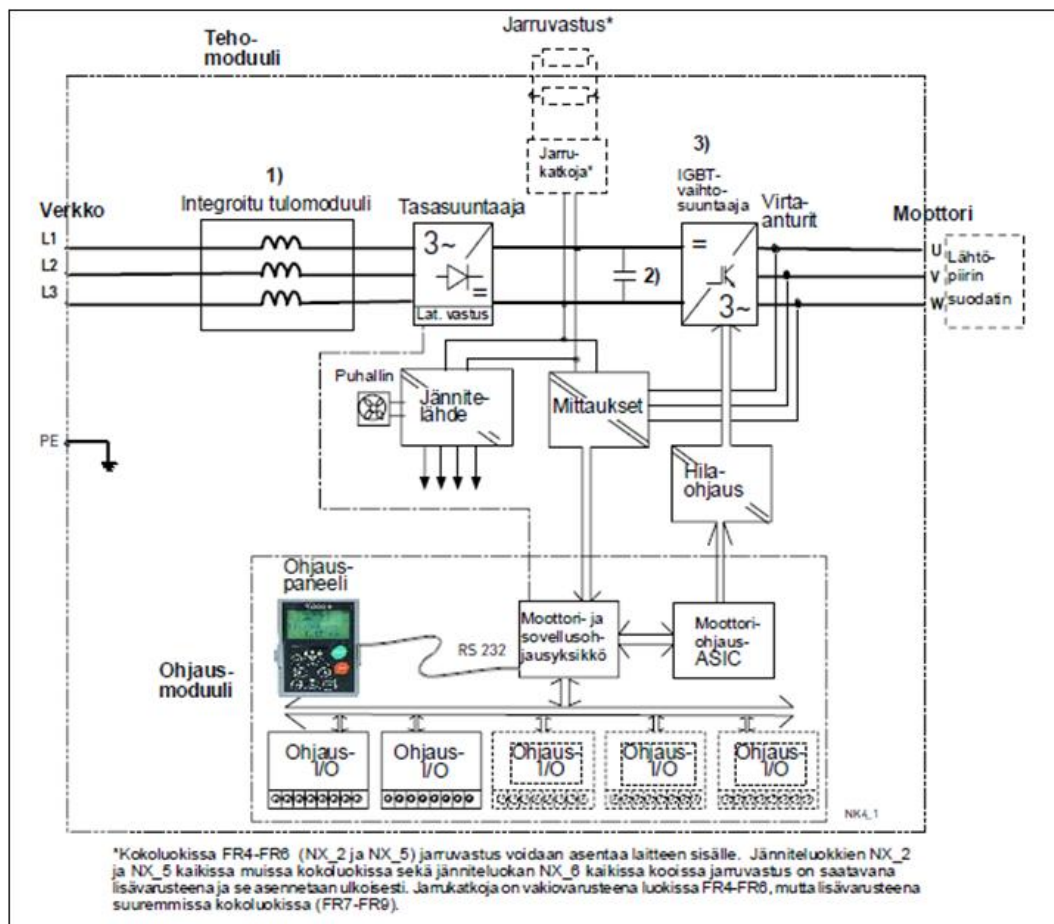


Kuva 1. Taajuusmuuttajan periaatekuva ja erillinen moottori

Vacon Oyj:n taajuusmuuttajassa on paljon tärkeitä osia, joita periaatekuvassa ei esiinny. Taajuusmuuttajan toimintaa selventää alla oleva lohkokaavio Vacon Oyj:n NX -laitteesta (Kuva 2).

Lohkokaavio jakautuu kahteen pääosaan; teho- ja ohjausmoduuliin. Jo lueteltujen perusosien lisäksi laitteessa on myös mikroprosessori, joka ohjaa moottoria mittauksien, parametriasetusten, ohjausliittymän ja ohjauspaneelin tietojen perusteella. Moottori- ja sovellusohjausyksikkö ohjaa ASIC-piiriä, joka laskee ohjausjaksot IGBT-venttiileille. Hilaohjausmoduulin tehtävänä on vahvistaa ohjaussignaaleja IGBT:ille. /3/

Ohjausmoduulin paneelilta ohjataan taajuusmuuttajaa, asetetaan parametrejä ja luetaan mittausrvoja. Korttipaikkaan asetettavalla IO- kortilla saadaan lisäksi tietokoneen liittämiseksi taajuusmuuttajaan ja taajuusmuuttajan ohjaamista varten NCDrive- ohjelmalla. Näin parametrien asettaminen on sujuvampaa ja samalla voi seurata mittausrvoja paneelilta. IO- kortteja on monenlaisia ja niiden avulla onnistuu myös erikoisempia ohjauksia vaativat kohteet. Laitteiden tavallisten sovel- lusten lisäksi saatavana on erikoissovelluksia, esimerkiksi suurnopeuskäyttöihin.



Kuva 2. Nx:n moduliakaavio /2/

3 TESTAAMINEN

3.1 Yleistä

Laitteiden testaamisella pyritään löytämään mahdolliset viat, kuten vialliset komponentit ja valmistusvirheet jo ennen asiakkaalle lähetystä. Vaikka laitteet tarkastetaan silmämääräisesti, pääsee valmistusvirheitä silti testausvaiheeseen. Vacon Oyj:llä kokoluokaltaan keski- ja suurikokoiset laitteet, eli FR9/FI9-kokoluokan laitteet ja niitä suuremmat, tarkastetaan kokoonpanon jälkeen ensin silmämääräisesti, jonka jälkeen laite siirretään esitestausvaiheeseen. Tällä vaiheella pyritään vähentämään uunissa rikkoutuvien laitteiden määrää. Esitestauksessa ilmenneet viat ovat yleensä helpommin korjattavissa kuin suoraan uunissa testattaessa ilmenevät, esimerkiksi testausvirtojen aiheuttamat laiterikkoutumiset olisivat.

Esitestauksen läpäistyään laite siirretään ja kytketään testauskaapeleilla testausuuniin, jossa laitteen varsinainen testaaminen suoritetaan. Keski- ja suurikokoisten laitteiden testaamisesta vastaa siihen koulutettu, ammattitaitoinen ryhmä, kun taas pienikokoisten laitteiden testaaminen on keskitetty kokoonpanolinjalla testaamiseen. Kokoonpanolinjoilla on myös korjaustiimi, joka hoitaa testauksessa löydetyt vikatapaukset. Korjaustiimin vastuualueella voi olla useampia linjoja, koska laitteiden testaaminen tapahtuu pääosin kokoonpanijoiden ja automatiikan toimesta. Pienemmän luokan laitteille ei erikseen suoriteta esitestausta, vaan testausuuni hoitaa tarvittavat testit kerralla. Laitteen osia voidaan testata myös erikseen, joko tehtaalla tai osatoimittajan puolesta.

Automatiikkaa kuvaa hyvin myös NX- linjaston robottilinjat, jotka kuljettavat laitteen kokoonpanopaikalta uuniin. Uunista laite kulkeutuu pakkausasteelle, josta laite siirretään lähetysalueelle. NX- linjat edustavat Vacon Oyj:llä niin sanottuja vanhemman sukupolven laitteita.

Uudemmissa linjoilla laite kuljetetaan kokoonpanopisteiltä kevyitä rullaratoja pitkin testiuuniin, eli raskaita robottilinjastoja ei tarvita. Myös linjojen huoltotarve ja korjauskatkojen riskit vähenevät. Suuremmille laitteille on rakennettu erillisiä pakkausalueita, joihin laite kuljetetaan siihen tarkoitettulla pöydällä. Pakkausalueilla on tarvittavat siltanosturit ja nostopöydät laitteiden käsittelyä varten.

3.2 Esitestausta

Esitestauksessa tehtävät testit jakautuvat kahteen pääryhmään, Safety-testiin ja niin sanottuun kevyeen Functional-testiin. Safety-testi sisältää PCT-testin eli maadoituksen jatkuvuuden testauksen. Tällä varmistetaan, että laite on maadoitettu pisteistä, jotka vaativat sitä toiminnan tai suojauksen vuoksi. Safety-testi sisältää myös High Voltage eli HV-testin, jossa laitteen osien jännitekestoisuutta testataan suurjännitteellä. Safety-testin lisäksi laitetta testataan kevyellä funktionaalisella testillä, joka sisältää toiminnallisia kokeita. Toiminnallisissa kokeissa ohjataan moottoria ja tarkkaillaan laitteen mitta-arvoja ja käyttäytymistä, esimerkiksi suunnanvaihto- ja kuormituskokeilla.

3.3 Testaus uunissa

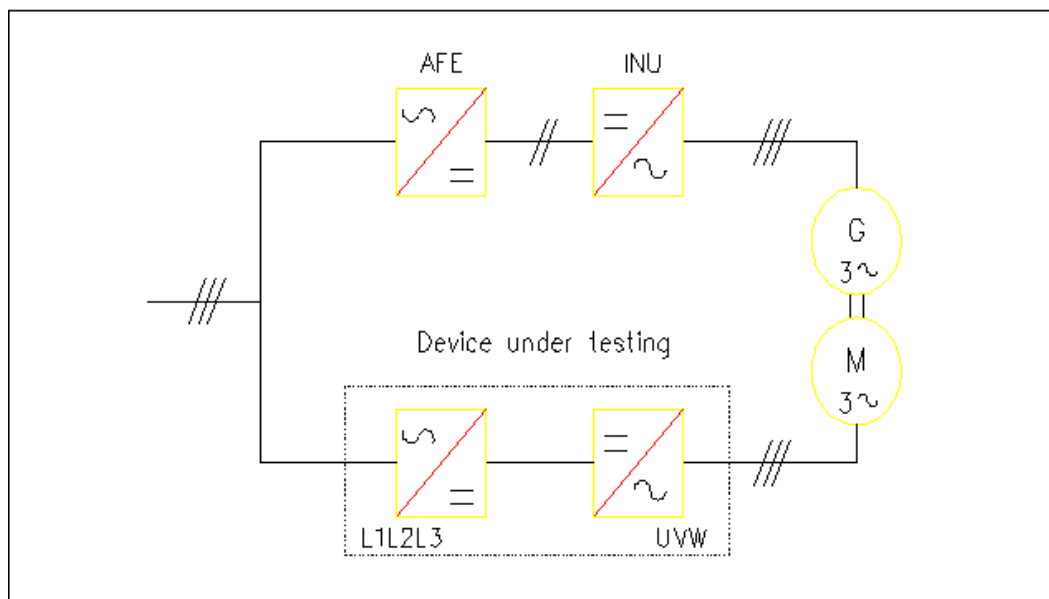
Laitteen testaaminen uunissa vaatii kaapelien ja nestejäähdytteisillä laitteilla myös letkujen kiinnityksen laitteeseen. Tämän jälkeen uunin ulkopuolisilla painikkeilla ohjataan työmaadoitus auki ja virrat päälle. Uunin ulkopuolella on tietokone, johon syötetään laitteen numero. Tietokanta tunnistaa laitteen ja asettaa sen testausarvot testiin. Tietokoneelta ohjataan laitteelle halutut toiminnot, kuten laitteen nestejäähdytys päälle, jonka jälkeen käynnistetään testaus ja laite alkaa ajaa tiettyä testaussekvenssiä läpi. Uunin päällä olevat lamput näyttävät uunin tilan ja varotoimena esimerkiksi uunin ovet lukittuvat testiä aloitettaessa.

Testaussekvenssissä on perusteellisemmat ja tarkemmat funktionaaliset testit kuin esitestauksessa. Näiden funktionaalisten testien jälkeen sykli siirtyy HASS-testaukseen, eli laitteen vanhennukseen. Laitetta vanhennetaan uunissa keinotekoisesti lyhyessä ajassa, jolla laitteen kuormitus saadaan vastaamaan esimerkiksi 6 kuukauden rasitusta normaalioloissa. Laitetta kuormitetaan myös nimellisvirtaa huomattavasti suuremmalla virralla, testistä riippuen. Uunin lämpötilan ollessa 50 °C voi laite olla jopa 85 °C, eli laitetta todella testataan äärirajoilla.

3.4 Testauskonseptit

3.4.1 Perinteinen testaustapa

Perinteinen testaustapa tarkoittaa Vacon Oyj:llä yleisintä ja vanhempaa testaustapaa, jossa kahden oikosulkumoottorin akselit on kiinnitetty toisiinsa tähän tarkoitettuun kytkimen avulla. Toinen moottoreista toimii normaalisti laitteen kuormamoottorina ja toinen generaattorina. Kuormamoottorin kaapelointi kulkee Y/D-kytkimen kautta, jolla valitaan moottorin kytkennäksi tähti- tai kolmiokytkentä. Jokaisen moottoriparin generaattori on kytketty omaan invertteriinsä. Invertteri ja regeneroiva AFE-laite muodostavat Vaconin Common DC-bus-järjestelmän, johon on mahdollista liittää useita inverttereitä moottoriparien lukumäärän mukaan. Nämä laitteet yhdessä generaattorin kanssa mahdollistavat sähköenergian siirtämisen takaisin sähköverkkoon. VAP1:n uunien testausvirroissa päästään noin 1200A:iin. Kuvassa 3 on yksinkertaistettu kuva testauspiiristä.



Kuva 3. Yksinkertaistettu perinteinen testauspiiri

Suurempien teholuokkien testausjärjestelmään kuuluu laitteen testauspaikka eli uuni, sähkötila ja testin aikana hyvin meluisa moottorikenttä. Sähkötila sijaitsee usein moottorikentän välittömässä läheisyydessä kaapeloinnin kustannusten minimoimiseksi. Yhdessä nämä tilat sisältävät moottorit, keskuksat, keskuksien kokeet ja kuormalaitteet, syöttömuuntajat ja jarruvastukset. Näiden tilojen jäähdyttäminen, varsinkin kesäaikaan, on usein haasteellista suurten lämpökuormien vuoksi. Jäähdytys- ja ilmastointikoneille pitää myös varata isot tilat laitteiden suuren kokoluokan vuoksi. Ilmastointi- ja jäähdytyslaitteet on myös huollettava vuosittain.

Järjestelmän kaapelit ovat kooltaan suuria ja usein painavia. Kaapelihyllyjen vaihtoehtona käytetäänkin usein kaapelikuiluja tai -kanavia, jotka rakennetaan lattian alle tai seinän viereen. Myös järjestelmien syöttökeskuksien kaapelointikanava puistomuuntajan päästä on rakennettu maahan, muuntajalle lisättävien kaapelien mahdollistamiseksi. Kaapelointi pyritään aina pitämään mahdollisimman lyhyenä kustannusten ja tilojen rajallisuuden vuoksi.

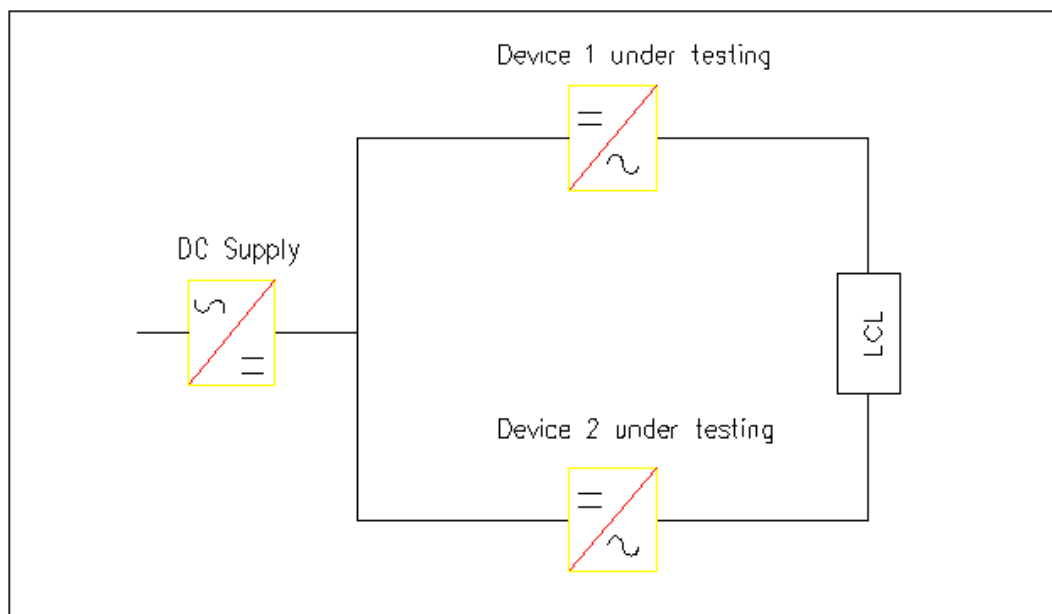
Energian mittaamiseen valitun VAP1.1-uunin testeissä on mahdollista ajaa kolmi-

vaiheista testilaitetta, 230 V:n, 400 V:n tai 690 V:n jännitteillä. Laitetta kuormitetaan joko 250 kW:n tai 500 kW:n moottorilla. Myös yhtäaikainen kuormittaminen on mahdollista. Moottorin jarrutuksessa energia siirtyy jarruvastuksiin, joissa se muuttuu lämmöksi. Jarrutusenergiaa ei siis saada hyödynnettyä takaisin verkkoon tai testauspiiriin.

Perinteisellä testaustavalla on hyvin kattavat testimahdollisuudet. VAP1:ssä pystytään testaamaan paljon erilaisia taajuusmuuttajia ja inverttereitä, niin neste- kuin ilmajäähdytteisiäkin. Laitteen laukaisutestit ovat monipuoliset ja kattavat, näitä ovat esimerkiksi laitteen ylivirta- ja ylijännitelaukaisut.

3.4.2 BackToBack-konsepti

Perinteiseen testausmenetelmään verrattuna BackToBack-konseptin rakentamiseen tarvittava laitteiston määrä on huomattavasti pienempi. Laitteisto koostuu pääosin uunista, keskuksesta, LCL-suotimista ja syöttävästä AFE-laitteesta. VAP4:n sähkötilan kooksi riittää noin 1/2 VAP1:n sähkölaitteiden vaatimasta koosta. Koska moottorikenttää ei tarvita, ei kovaa meluhaittaa pääse syntymään. VAP4 on nestejäähdytteisten INU-laitteiden testaamiseen suunniteltu konsepti, eikä se sovellu ideaalisesti ilmajäähdytteisten laitteiden testaamiseen. Kuvassa 4 on VAP3:n yksinkertaistettu testauspiiri, kun testataan kahta INU:a. VAP4:n vastaavan kuvan eroavaisuutena olisi Device2:n paikalla oleva kuormittava laite, jossa on AFE-sovellus. VAP4:ssa voidaan testata vain yhtä invertteriä kerrallaan.



Kuva 4. BackToBack-konseptin yksinkertaistettu testauspiiri kahden INU:n testauksessa.

VAP4:n BackToBack-uunit on rakennettu vain invertterien testaukseen. Tämä oli yksi syistä, miksi valittiin FI10-invertteri konseptien väliseen vertailuun. Testauspiiri on rakennettu niin, että kuormittava AFE tasasuuntaa sähköä takaisin testattavalle invertterille, ja syöttävä AFE syöttää piiriin vain häviöinä poistuvat tehot. Piiriin syötettävä jännite muunnetaan muuntajalla haluttuun arvoon. Muuntaja ei ole mukana varsinaisessa testauspiirissä, mutta sen häviöt näkyvät PMU:lla. Koska sähköenergiaa ei siirretä takaisin verkkoon, on verkon yliaaltopitoisuus vähäistä.

4 MITTAUSPERIAATE

4.1 Tehon ja energian mittaaminen

Teho- ja energiamittauksissa ovat elektroniset ja digitaaliset mittarit hyvin yleinen näky. Tehoa mitattaessa mittarille tuodaan virta, joka kulkeutuu mittarin läpi, ja jännite, joka mitataan joko vaiheiden väliltä tai vaiheen ja nollan väliltä. Pelkistetyinä energiamittauksessa on lähinnä erona vain pulssilaskuri ja sen kanssa toimiva kello, jotka mahdollistavat energian laskemisen. Digitaalisessa mittarissa sekä jännitteen ja virran kertominen että pulssien laskeminen on hoidettu mikroprosessorilla.

4.2 Hyötysuhteet ja häviöt

Testauspiirissä on usein moottoreita ja muuntajia. Vaihtovirtamoottoreiden ja muuntajien perusosia ovat käämi ja rautasydän, joissa syntyy häviöitä. Käämeissä ja johtimissa syntyy resistanssin aiheuttamia virtalämpöhäviöitä ja rautasydämen häviöt muodostuvat pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä. Rautasydämet kasataan ohuista toisistaan eristetyistä levyistä, millä pystytään vähentämään pyörrevirtahäviöitä, mutta myös johtavuutta, taajuutta ja vuontiheyttä pienentämällä niitä voidaan vähentää. Piin osuuden lisääminen rautasydämessä kaventaa hystereesisilmukkaa, ja näin pienentää hystereesihäviöitä, mutta heikentää myös mekaanisia ominaisuuksia. /4/

Moottorissa esiintyviä virtalämpöhäviöitä pienentämällä voidaan pienentää tuuletuksen tarvetta, joka pienentää mekaanisia häviöitä (P_{μ}). Sama pätee keskuksissa, jonka esimerkiksi johtimissa voidaan kasvattaa poikkipinta-alaa. Virtalämpöhäviöt (P_k) voidaan mitata oikosulkukokeessa ajamalla moottoria nimellisvirralla. Mekaaniset häviöt johtuvat laakeri- ja tuuletuskitkoista, jotka yhdessä rautahäviöiden (P_r) kanssa saadaan mitattua tyhjäkäyntikokeella. Standardien määräämät kuormituslisähäviöt (P_l) ovat noin 0,5 %:n luokkaa nimellistehosta ja ne johtuvat muun muassa yliaalloista. /4/

Hyötysuhde (η) voidaan laskea häviötehojen avulla tai suoraan akseli- (P_2) ja otto-
tehon (P_1) suhteesta. Hyötysuhde voi olla myös valmiiksi merkittynä moottorin

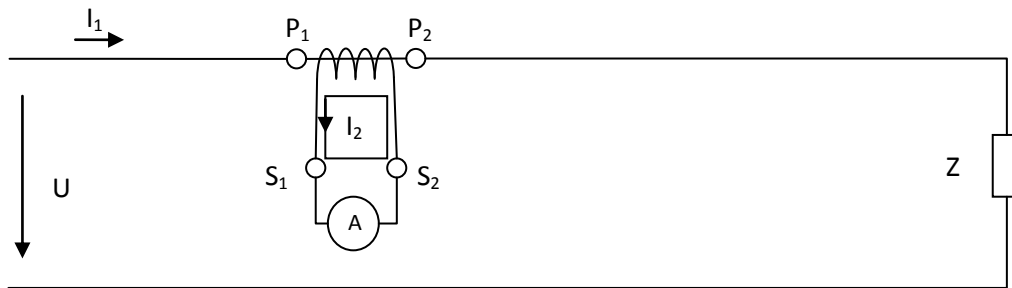
kilpiarvoihin tai sen voi laskea kilpiarvoista: nimellistehon (P_n), -jännitteen (U_n), -virran (I_n) ja -teho kertoimen ($\cos\varphi_n$) avulla. Jos hyötysuhde lasketaan, on kaava seuraavanlainen:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times U_n \times I_n \times \cos\varphi_n} = \frac{(P_1 - (P_k + P_r + P_\mu + P_l))}{P_1} \quad (1)$$

4.3 Mittauksen turvallisuus

Mittauksissa on yleisten turvallisuusohjeiden lisäksi huomioitava tiettyjä asioita. Mittalaitteiden on oltava eristyksiltään ja jännitekestoisuuksiltaan vähintään CAT3-luokan mittalaitteita. Taajuusmuuttajan muokkaama ”moottoriliittimien” jännite ei sovellu kaikille mittalaitteille ± 1000 V:n jännitepiikkiensä vuoksi.

Energian mittaus vaatii yleensä virtamuuntajat, jotka suojelevat toision mittalaitteita suurilta ylivirroilta ja mahdollistavat suurien virtojen mittaamisen ja laajemman mitta-alueen. Myös ensiön ja toision galvaaninen erottaminen on sähköturvallisuuden kannalta tärkeää, ja sillä estetään haitallisten tasavirtojen siirtyminen ensiöpiiristä toisiopiiriin. Virtamuuntajan toisiopiiriä avattaessa ei ensiöpiiri saa olla virrallinen tai toision avaaminen aiheuttaa muuntajan yllämpenemisen ja se rikkoutuu. Eli virtamuuntajan toisiopiiriin ei saa asentaa sulakkeita ja ennen mittarin poistoa toisiopiiristä on toision navat oikosuljettava. Virtamuuntaja kytketään kuorman kanssa sarjaan ensiön navoista P1 ja P2. Toisiovirta kiertää toision navoissa S1 ja S2 kuvan 5 mukaan. Vaihtoehtona virtamuuntajalle käytetään usein Rogowski-anturia, joka mittaa tuhansia ampeereja, eikä kyllästy kuten virtamuuntajat.



Kuva 5. Virtamuuntajan kytkentä piirissä

On myös hyvä ottaa huomioon magneettikentät, varsinkin VAP3:n tapaisilla moottorikentillä, missä on mitattu todella suuria magneettikenttiä testien aikana. Keskusten läheisyydessä oleskelua ei suositella, jos henkilöllä on huonokuntoinen sydän tai jos hän käyttää tahdistinta. Kentät johtuvat keskusten ja uunin välisten kaapelien virroista. Kaapelit on kytketty 1 vaihe / kaapeli, eikä normaalisti kuten esimerkiksi 3 vaihetta / kaapeli. Eli esimerkiksi 1.kaapelin kaikki johtimet on kytketty laitteen U-liittimeen ja 2.kaapelin kaikki johtimet V-liittimeen. Magneettikentän suuruuteen vaikuttaa johtimien symmetrinen asettelu ja esimerkiksi EMCMK- kaapelin yhtenäinen kuparifolio eli vaippa. Vaippa estää kaapelin sähkömagneettisen säteilyn ulospäin. Erikoisen kaapeloinnin vuoksi symmetristä asettelua ei ole ja magneettikentät ovat poikkeuksellisen suuria.

5 TYÖN TOTEUTUS

5.1 Hypoteesi

Mittaustyö tulee etenemään laitteiden testiin saatavuuden mukaan, ja mittausarvoja oletetaan saatavan jokaisesta testausjärjestelmästä tarpeeksi. Työn edetessä esiintyy varmasti uusia ideoita ja kysymyksiä mittauksissa ja työn toteuttamisessa, mutta niihin saadaan apua työn toimeksiantajan yhteyshenkilöltä.

Tuloksista perinteisen testausmenetelmän energiasuhde oletetaan 20-30 % huonommaksi kuin BackToBack-konseptin energiasuhde, perustuen testausmenetelmien kehitykseen ja laskettuihin arvioihin.

5.2 Suunniteltu toteutus

Työn rakenne jakautui 4 osaan: työn suunnittelu, mittausjärjestelmän rakennus, mittaukset ja muistiinpanot sekä raportointi. Mittausjärjestelmä rakennettiin taajuusmuuttajan testauspiirissä kiertävän energian mittaamiseen. Verkosta otettavan energian mittaus päätettiin toteuttaa uunin syöttökeskuksissa olemassa olevilla VAMP PMU- mittalaitteilla, joista saataisiin myös tarvittaessa virran- ja jännitteen käyrämuotoja verkosta otettavan energian tarkasteluun.

Mittaukset suunniteltiin tehtävän vuosien 2011 talven ja 2012 kevään aikana, laitteiden tilauskannan ja testiin saatavuuden mukaan. Mittaustulokset dokumentoitaisiin välittömästi testin jälkeen ja raportointi suoritettaisiin mittausten ohessa sekä mittausten jälkeen.

Käytettäviä uuneja oli kahta eri tyyppiä: moottoritestautapa eli niin sanottu perinteinen testausmenetelmä ja BackToBack- konsepti. VAP3:n BackToBack-konsepti mahdollistaa suuren virtaluokan laitteiden testaamisen noin 2000A:iin, mutta on yhtä laitetta testattaessa periaatteeltaan kuten VAP4, joten testausmenetelmien vertailuun yhdellä ja samalla laitteella valittiin moottoritestaus ja VAP4:n BackToBack- konsepti.

Laitteita päätettiin testata tuotannon testauksen normaalien testiaikojen ja sek-

venssin mukaan, jotta tulokset saataisiin vastaamaan kunkin laitteen normaalia testaustilannetta.

5.3 Työn eteneminen

Aluksi oli selvitettävä, missä kaikissa testausjärjestelmissä oli toimivat PMU-mittalaitteet. Jokaisen Vacon Oyj:n testauspaikan syöttökeskuksessa oli PMU, mutta harvassa se oli toimintakunnossa. PMU:iden kunnosta ei ollut etukäteen minkäänlaista tietoa, koska laitteita ei ollut aikaisemmin käytetty tämäläpisiin mittauksiin. Tarkoituksena oli tehdä mittaukset olemassa olevilla, toimivilla PMU:illa. Toimivien mittalaitteiden perusteella mittauspaikeiksi valittiin: VAP1 perinteiseen testaukseen sekä VAP3 ja VAP4 BackToBack-konseptin testeihin. Näiden mittalaitteiden tietojen lukemiseen ja tallentamiseen tarvittiin oikeat ohjelmat ja ajurit, mikä vaati yhteydenpitoa VAMP Oy:n asiakaspalveluun.

Mittauslaitteiston rakentaminen kierrätettävän energian mittaamiseen todettiin kuitenkin lähes turhaksi. Mittarin jännitekestoisuus 400 V, jäisi vajaan 500 V:n ja 690 V:n laitteille, joten se rajaisi testaamisen vain 400 V:n laitteille. Lisäksi taajuusmuuttajan toisiojännite on todella epätasaista ja täynnä jännitepiikkejä, eikä energiamittarin kestävydestä ollut takeita. Kierrätettävän energian mittaus-tulos päätettiin lukea testausjärjestelmän AFE-laitteen paneelilta uuden energiamittarin oston sijaan. Näin ollen pystyimme mittaamaan myös 500 V:n ja 690 V:n laitteiden energiat. AFE-paneeleista löytyi nollattava trip-mittaus laitteen läpi kulkevalle energialle ja sen mittaus-tulos perustuu laitteen mittaamiin hetkellisarvoihin.

VAP3:n BackToBack-konseptin mittauksien kanssa huomattiin ongelmia tulosten luotettavuuden suhteen. Energioiden suhde oli 2,5 %:n luokkaa, mikä on mitattujen virtojen perusteella virheellinen. Asiaa selvitettäessä kävi ilmi, että piiristä on mitattu muihin konsepteihin verrattuna myös epätavallinen 150 Hz:n kiertovirta.

Kiertovirta on suuruudeltaan noin 35 - 40 % ajettavasta virrasta ja sitä on pyritty eliminoimaan erilaisilla kuristimilla ja suotimilla, joiden lämpötilat ovat puolestaan aiheuttaneet ongelmia. Ongelma korjaantuisi laitteeseen ladattavalla räätä-

löidyillä firmwarella, jota ei ole tuotantokäytössä. Tällainen ratkaisu ei kuitenkaan ole hyväksyttävä. Kiertovirran ei tiedetä aiheuttavan mitään suuria ongelmia, joten suotimia ei normaalisti käytetä. /5/

Ongelman selvitykseen ei nähty aihetta panostaa enemmän, johtuen yksittäisten invertterilaitteiden mahdollisuudesta testata myös VAP4-uuneissa. Vaikka VAP3-uunin laitteet ovat huomattavasti VAP4-uunin laitteita suurempia virroiltaan, testauskonsepti on samanlainen yhtä invertteriä testattaessa. Näin ollen energioiden suhteissa ei mainittavia eroja VAP3:n ja VAP4:n välillä ole.

Mitattuamme uunien yleisimpien testilaitteiden energioita eri menetelmillä, päätimme siirtyä saman FI10-invertteri-laitteen mittaamiseen VAP1:n ja VAP4:n uuneissa. FI10:n testaamiseen VAP4:ssä tiedettiin tuovan lisähaastetta se, ettei siellä normaalisti tällaista testiä käsisasetuksin ajettu. Uuni on myös suunniteltu pääosin vain nestejäähdytteisten INU:jen testaamiseen, eli ilmajäähdytteisten testaamisen arveltiin tuovan ongelmia laitteen lämpötilan kannalta. Testattujen laitteiden määrää eri menetelmillä oli mahdollista täydentää vielä FI10:n testien jälkeenkin.

5.3.1 FI10:n testaaminen perinteisellä testauksella

Ilmajäähdytteisen invertterin testaamisen tiedettiin onnistuvan VAP1:n uunissa, koska sillä on hyvin laaja testauskapasiteetti. Yleensä laitteet testataan automaattisen testisekvenssin avulla, mutta FI10:ä ajettaisiin nyt käsisasetuksin. NcDrive-ohjelman avulla parametrien muuttaminen oli jouhevaa. Kytkentätaajuudeksi asetettiin 3,6 kHz ja virtaraja säädettiin 460 A:iin. Laite saadaan ajamaan omaa virtarajaansa vasten, kun generaattorin taajuus säädetään hieman laitteen taajuuden alapuolelle. Tämä on vaikeampaa testata menetelmillä, joissa ei ole moottoreita kuormana. Uunin lämmittimet kytkettiin pois päältä ja lämpötila uunissa pysyikin noin 40 °C:ssa. Koska uunin lämpötila pysyi alhaisena, ei laitteenkaan lämpötilojen kanssa tullut ongelmia.

5.3.2 FI10:n testaaminen BackToBack-konseptilla

Ilmajäähdytteisen INU:n testaaminen VAP4:ssä vaati alkuun hieman suunnittelua. Sen testaaminen käsisäädöllä olisi ollut vaikeampaa kuin VAP1:ssä, koska BackToBack-konseptissa ei ole pyöriviä koneita. Valmista testaussekvenssiäkään ei uunista löytynyt, koska siellä ei 520 A:n, 500 V:n FI10:ä testata. Käsiasetuksin ajamalla olisi arvoja ja asetuksia pitänyt säätää huomattavasti enemmän. Päätimme hakea VAP3:n tietokannasta vastaavan 460 A:n, 500 V:n laitteen tiedot, jota siellä oli koetestattu. Tiedot muokattiin vastaamaan 520 A:n laitetta ja mittaus päätettiin suorittaa testaussekvenssin HASS-ohjelman aikana. HASSin aikana ohjelma vanhentaa laitetta asetetulla virta-arvolla, joten testiin saatiin aseteltua samat arvot kuin VAP1:ssä. 60 minuutin testin virraksi asetettiin 460 A ja kytkentätaajuudeksi 3,6 kHz.

Laitteen ylikuumenemisen ajateltiin aiheuttavan ongelmia testissä, mutta jäähdytyksen ansiosta uunin lämpötila pysyi 30 - 40 °C:ssa. Jäähdytyskoneen kapasiteetin ollessa riittävä, FI10:n lämpötilaksi mitattiin korkeimmillaan vain 75 °C. Koska uunin lämpötila pysyi sopivana, ei testaussekvenssi joutunut pudottamaan kytkentätaajuutta.

6 TULOKSET JA TARKASTELO

6.1 Tulokset

Taulukko 1. Perinteisen testausmenetelmän ja BackToBack- konseptin mittaustuloksia

Testaus- menetelmä	Laite	Nimellis virta (A)	Nimellis jännite(V)	Testiaika (min)	Verkosta otettu energia (kWh)	Kierrätettävä energia(kWh)	Energioiden suhde(%)
VAP1							
Moottorit.	FR9	261	500	40	15	40	37,5 %
Moottorit.	FR10	460	500	75	58	207	28,0 %
Moottorit.	FR11	502	690	55	64	247	25,9 %
Moottorit.	CH62	502	690	150	197	898	21,9 %
Moottorit.	FI9	261	500	50	17	41	41,5 %
Moottorit.	FI10	520	500	60	41	134	30,6 %
Moottorit.	FI10	520	500	60	60	253	23,7 %
VAP4							
BackToBack	CH62	502	690	130	31	1022	3,0 %
BackToBack	CH63	750	690	130	56	1706	3,3 %
BackToBack	FI10	520	500	60	16	353	4,5 %
VAP3							
BackToBack	CH64	1900	690	130	113	4356	2,6 %
BackToBack	CH64	1900	690	130	108	4371	2,5 %

6.2 Tarkastelu

Kuten yläpuolella olevasta taulukosta 1 nähdään, testauksen energioiden suhdeluvut, eli verkosta otetun energian määrä verrattuna kierrätettyyn energiaan, vaihtelevat huomattavasti perinteisen testaustavan eli moottoritestauksen ja BackToBack-konseptin kesken. Pitää huomioida, että BackToBack-menetelmällä ei voida testata taajuusmuuttajia eli FR-alkuisia laitteita.

VAP1:n moottoritestauksen tuloksissa on suuria eroja eri laitteiden välillä. Tuloksista voimme päätellä, että testiaika on merkittävä tekijä, koska mitä pidempi on testiaika, sitä pidempi on vanhennus. Myös välitulokset osoittavat testiajan pituuden vaikuttavan energioiden suhteeseen. Esimerkiksi CH62:n testin energioiden suhde on 60 minuutin kohdalla noin 26 % ja 150 minuutin jälkeen noin 22 %:a. Myös FI10:n testaamisessa testaussekvenssillä tai käsin on huomattava ero energioiden suhteessa, joka on luokkaa 7 %:a. Tästä voimme päätellä, että vanhennuksen osuus testistä vaikuttaa energian kulutukseen huomattavasti. Funktionaalisten

testien aikana tehoa kuluu moottorien jarrutuksiin ja muuttuu jarruvastuksissa lämmöksi. Pienemmän luokan laitteilla, kuten FR9:llä ja FI9:llä, on huonommat energiasuhteet, mutta myös lyhyemmät testiajat.

Nestejäähdytteisen invertterin CH62:n tuloksia verratessa, VAP4:n ja VAP1:n välillä, nähdään VAP4:n testiuunien hyöty. Laitteiden nimellisarvojen ollessa samat ja testiaikojen ollessa lähes samat, tulokset ovat hyvin verrattavissa. Verkosta otetun energian määrä on yli 6-kertainen testausmenetelmässä VAP1. Toisaalta nestejäähdytyksen energian mittaus puuttuu VAP4:ssä, kun taas VAP1:ssä se on mukana. VAP4:n keskinäisissä testituloksissa ei merkittäviä eroja ole laitteen koon, testiajan pituuden tai jäähdytyksen suhteen. Ilmajäähdytteisen FI10:n sisäinen jäähdytyspuhallin on teholtaan 210 W. 60 minuutin testissä se kuluttaa energiaa 0,21 kWh ja vääristää lukemaa suhteiden vertailussa verrattuna nestejäähdytteiseen, jonka jäähdytyksen energiankulutusta ei ole testauksessa huomioitu. Suurin vaikuttava tekijä on kuitenkin testauspiirin komponenttien vähyys, kuten kuvasta 4 nähdään. INU:n hyötysuhteen ollessa noin 0,98, ei piirissä synny paljon tehohäviöitä.

FI10:n testausvertailu uunien välillä osoittaa, että BackToBack-konsepti on lähes ideaalinen myös ilmajäähdytteisen FI10:n testaamiseen. Molemmissa uuneissa (VAP1 ja VAP4) samalla laitteella tehdyt samanlaiset testit osoittavat BackToBack-testausmenetelmän (VAP4) ottavan merkittävästi vähemmän energiaa verkosta kuin vastaava testaus perinteisellä menetelmällä (VAP1).

Testauspiirin moottorit heikentävät piirin hyötysuhdetta häviötehoillaan. 250 kW:n moottorin hyötysuhde saadaan laskettua sen kilpiarvojen mukaan kaavan 1 mukaisesti. Kun $P_n=250000\text{W}$, $U_n=400\text{V}$, $I_n=417\text{A}$ ja $\cos\varphi_n=0,9$ niin hyötysuhdeeksi saadaan 0,96. Kaksi moottoria ja vähintään yksi ylimääräinen AFE tai INU verrattuna BackToBack-konseptiin saavat hyötysuhteen huonommaksi jo tasaisella moottorin ”nimelliskäytöllä”, joka on noin 10 %:a. Myös isojen laitteiden ja keskusten jäähdytykset ja kaapeloinnit pienentävät hyötysuhdetta verrattuna VAP4:een.

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

7.1 Hypoteesin ja tulosten kohtaaminen

Mittaustulokset vastasivat hyvin oletuksia ja arvioita ennen työn aloittamista. Työssä saatiin paljon tuloksia varsinkin perinteisellä menetelmällä. Testausmenetelmien vertailu onnistui hyvin FI10:n laitteella ja suhdeluokat antavat hyvin kuvaa konseptien energiatehokkuudesta. PMU:iden toimintakuntoon laitto oli työlämpi kuin osattiin olettaa. Kierrätettävän energian mittaukseen rakennetun mitauslaitteiston jääminen pois työstä aiheutti ongelmia, mutta se selvitettiin ja mitaustulosten saanti jopa helpottui.

7.2 Jatkotutkimusehdotuksia

Testauksen jälkeen laitteet otetaan uunista hallin puolelle, joista kookkaimmat lämmitävät hallia todella paljon. Tämä on ongelmallista varsinkin kesäaikaan kun jäähdytyskoneet ovat jo ennestään toimintakykynsä rajamailla. Laite on yleensä noin 50-85 °C ja tuotannon testiuuneja on yli kymmenen kappaletta P1-hallissa. Halliin on asennettu lisäpuhaltimia, mutta ne ottavat korvausilman kesäaikaan kuumalta katolta.

VAP3:n testauspiirin 150 Hz kiertovirtaa voisi tarkastella enemmän. Samalla voisi selvittää aiheuttaako tämä yliaalto piirin komponenteille tai testattavalle laitteelle minkäänlaista vahinkoa, ja onko sillä merkittävää vaikutusta häviötehoihin ja miten asian voisi korjata.

LÄHTEET

/1/ Elinkeinoelämän energiatehokkuussopimus 1.9.2010

/2/ Sijoittajat / Taloustietoa, Vacon lyhyesti [viitattu 2.5.2012]
<http://www.vacon.fi/Default.aspx?id=464734>

/3/ Tekninen tuki/ Esitteet ja käsikirjat/ UD00712S.pdf sivu17 [viitattu 20.4.2012]
<http://www.vacon.fi/Default.aspx?id=465761>

/4/ Verkkonen, V. 2007. SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT, 1 Sähkökoneiden perusteita ja Tasasähkökoneet sivut 9, 10 ja 54.

/5/ Saaristo, J. 2009. VAIHTOEHTOISET TESTAUSKONSEPTIT VACON OYJ:SSÄ. Vaasan Ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne