

Matti Halonen

Moduloidun taajuusmenetelmän tuotteistaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

19.1.2014

Tekijä Otsikko	Matti Halonen Moduloidun taajuusmenetelmän tuotteistaminen
Sivumäärä Aika	30 sivua + 5 liitettä 19.1.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Koestamon päällikkö Tero Väisänen Lehtori Jarno Varteva
<p>Tämä insinööri työ tehtiin ABB Oy:n Pitäjänmäen konetehtaan sähkökonekoestamolle. Työssä on tuotteistettu IEC 60034 -standardin määrittelemä lämpenemäkoestusmenetelmä.</p> <p>Edellä mainitussa standardissa lämpenemäkoestusmenetelmälle on käytetty nimitystä MFM Modulated Frequency Method. Tällä menetelmällä induktiokonetta kuormitetaan syöttämällä koneen nimellistaajuuden vaihtojännitteen lisäksi myös toisentaajuisia vaihtojännitettä. Tällöin konetta kuormitetaan ilman akselikuormaa (ilman kuormakonetta).</p> <p>Vaihtosähkölähteenä käytettiin ACS 800 -taajuusmuuttajaa. Työssä tutkittiin taajuusmuuttajan parametrisointia ja ohjelmointia lämpenemäkoestusta varten sekä taajuusmuuttajan välipiirin toimintaa energiavarastona.</p> <p>Työn lopputulokseksi saatiin koestuslaitteisto, joka soveltuu pienjänniteinduktiokoneiden lämpenemäkoestukseen moduloidulla taajuusmenetelmällä.</p>	
Avainsanat	moduloitu taajuusmenetelmä, lämpenemäkoestus, taajuusmuuttaja, energiavarasto

Author Title	Matti Halonen Productization of Modulated Frequency Method
Number of Pages Date	30 pages + 5 appendices 19 January 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Tero Väisänen, Test field manager Jarno Varteva, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for the test field of ABB Oy Pitäjänmäki. In this study a new heat run method, which is defined in the IEC 60034 -standard, was productized.</p> <p>The new heat run method is called MFM Modulated Frequency Method in the IEC 60034 -standard. In this method, asynchronous machine is fed by an alternating current source. The power source includes two frequency components: nominal voltage on nominal frequency and lower voltage on lower frequency. In this case, an asynchronous machine is loaded on a desired power with no need for coupling to a load machine.</p> <p>ACS 800 -frequency converter was used as the alternating current source. In this study, parametrization and programming of the ACS 800 was researched. Functioning of direct current circuit of the frequency converter as energy storage was also studied.</p> <p>The result of this thesis is a functioning testing equipment, which can be used for testing low voltage asynchronous machines with a Modulated Frequency Method.</p>	
Keywords	Modulated Frequency Method, Heat run, frequency converter, energy storage

Sisällys

Tiivistelmä	
Abstract	
Sisällys	
1 Johdanto	1
2 Lämpenemäkoemenetelmät ja käytettävä laitteisto	2
2.1 Epätahtikone	2
2.1.1 Epätahtikoneen toiminta ja häviöt	3
2.1.2 Epätahtikoneen tehot	5
2.2 Taajuusmuuttaja	7
2.2.1 Tasasuuntaaja	8
2.2.2 Vaihtosuuntaaja	9
2.2.3 Taajuusmuuttajan välipiiri	9
2.3 Lämpenemäko	10
2.3.1 Lämpenemäko kuormakonemenetelmällä	11
2.3.2 Lämpenemäko kaksoistaajuusmenetelmällä	12
2.3.3 Lämpenemäko moduloidulla taajuusmenetelmällä	13
3 Taajuusmuuttajan muutokset moduloidulle taajuusmenetelmälle	14
3.1 Taajuusmuuttajan koestussovellus	15
3.2 Taajuusmuuttajan parametrimuutokset	16
3.3 Taajuusmuuttajan lisäkapasitanssi	18
3.3.1 Lisäkapasitanssin mitoitus ja kondensaattorityypin valinta	18
3.3.2 Lisäkondensaattoripatteriston modulaarisuus	20
3.3.3 Lisäkondensaattoripatteriston sulakesuojaus	21
3.4 Moduloidun taajuusmenetelmän testaus	22
3.4.1 Moduloidun taajuusmenetelmän testauksen mittausmenetelmät	23
3.4.2 Moduloidun taajuusmenetelmän testauksen mittaustulokset	24
4 Lämpenemäkoestus moduloidulla taajuusmenetelmällä	27
4.1 Lämpenemäkokeen koejärjestelyt ja mittausmenetelmät	27
4.2 Lämpenemäkokeen mittaustulokset ja mittaustulosten käsittely	28
5 Yhteenveto	29
Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. INU-vaihtosuuntaajan momenttiohjeen lohkokaavio

Liite 2. ISU-vaihtosuuntaajan tasajännitteen lohkokaavio

Liite 3. Mittaus 1: kondensaattoripatteriston virran laskentakaavan tarkistus

Liite 4. Mittaus 2: systeemin häviöiden määrittäminen kuormitustilanteessa

Liite 5. Mittaus 3: sähköverkon jännitteen stabiilisuus

1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty ABB Oy:n Pitäjänmäen kone-tehtaan sähkökonekoestamolle. Työssä kehitettiin uusi lämpenemäkoestusmenetelmä koestamon käyttöön.

Työssä käsitellään koestamossa sähkökoneille suoritettavaa loppukoestusta, jolla varmistetaan tuotteen olevan tilauksen ja suunnitellun mukainen sekä turvallinen käyttöä. Koestuksessa mitataan ja lasketaan koneen sähkötekniiset arvot, häviötehöt ja saadaan tietoa tuotannon laadusta. Loppukoestus tehdään asiakkaan vaatimalla laajuudella, kuitenkin standardin määrittelyn mukaisesti.

Yksi kokonaisuus lajikoestettavan koneen loppukoestuksessa on lämpenemäkokeen suorittaminen, jolla selvitetään sähkökoneen eri osien käyttölämpötilat sijoituspaikalla. Lämpenemäkoetta suoritetaan epätahtikoneille yleensä kuormakone- tai kaksoistaajuusmenetelmällä.

Kaksoistaajuuslämpenemäajoja on tehty epätahtikoneille ABB Oy:n Pitäjänmäen kone-tehtaalla 1980-luvulta asti. Perinteisesti kyseinen lämpenemäkoetta toteutetaan syöttämällä kahdesta jännitelähteestä koestettavaa konetta eri taajuuksin. Lämpenemäkoetta voidaan tehdä myös taajuusmuuttajalla, jolloin tuloksien on havaittu olevan vertailukelpoisia perinteiseen menetelmään verrattuna. Tässä työssä tutkitaan kaksoistaajuusajoa vastaavaa moduloitun taajuusmenetelmän suorittamista taajuusmuuttajalla sekä menetelmän tuotteistamista.

Menetelmän kehittämisen taustalla on taloudellisuuden parantaminen sekä mahdollinen koekentän sähköverkon kuormitusasteen pienentäminen. Jos menetelmä toimii, se antaisi myös mahdollisuuksia lämpenemäkokeen suorittamiseen liikuteltavalla koestuskalustolla.

Työssä esitellään ensin tarvittavaa sähköteoriaa moduloituun taajuusmenetelmään liittyen, minkä jälkeen keskitytään esittelemään taajuusmuuttajan muutoksia sekä mitaustuloksia ja analysointia.

2 Lämpenemäkoemenetelmät ja käytettävä laitteisto

Kun lämpenemäkoestusta suoritetaan moduloidulla taajuusmenetelmällä, koestettava sähkökone toimii vuoroin sekä moottorina että generaattorina. Tämän vuoksi teoriaa esitellään kummastakin tilanteesta. Myös taajuusmuuttajan toimintaperiaate ja lämpenemäkoestusmenetelmät esitellään.

2.1 Epätahtikone

Sähkökoneen toiminta perustuu kahteen pääkomponenttiin: staattoriin ja roottoriin. Staattori on kiinteä osa koneen runkoa, jossa sijaitsevat käämitykset muodostavat koneen päämagneettikentän. Roottorilla tarkoitetaan koneen pyörivää osaa, usein akselia, missä sijaitsee johdinaineesta valmistetut sauvat.

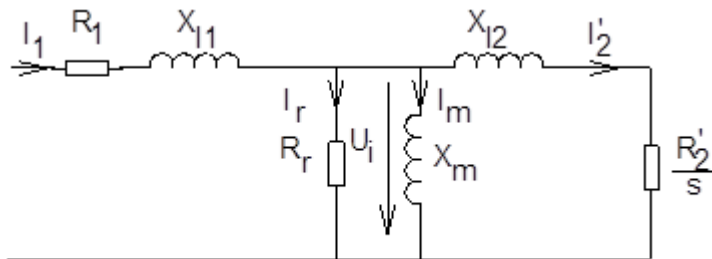
Staattorin kolmivaihekäämityksessä vaihekäämitykset on sijoitettu 120 asteen vaiheerolla toisiinsa nähden, minkä vuoksi koneeseen muodostuu pyörivä magneettikenttä, joka leikkaa staattorikäämitystä sekä roottorin sauvoja. Tämän takia magneettivuo vuoroin pienenee ja suurenee käämityksissä. Tällöin sähkömotorinen jännite (SMJ) muodostuu staattorikäämitykseen sekä roottorin sauvojen välille.

Roottoriin muodostuu sähkövirta SMJ:n vuoksi. Virta aiheuttaa voiman kohtisuorasti sekä magneettikenttään että virralliseen johdinsauvaan nähden ja aiheuttaa näin momentin pyöreään akseliin.

Sähkökoneen toiminta perustuukin voimavaikutukseen magneettikentässä liikkuvien varauksellisten hiukkasten ja magneettikentän välillä. [1, s. 134; 2, s. 316–317.]

2.1.1 Epätahtikoneen toiminta ja häviöt

Epätahtimoottorin sijaiskytkentä (kuva 1) sisältää pääreaktanssin, rautahäviön sekä staattorin- ja roottorin hajareaktanssin ja resistiivisen häviön.



Kuva 1. Epätahtimoottorin yhden vaiheen sijaiskytkentä

Staattorin vaihekäämin reaktanssi sekä päävuon magneettinen vastus eli pääreluktanssi muodostavat yhdessä pääreaktanssin X_m . Pääreaktanssista aiheutuu magnetointivirta I_m , mikä on käytännössä koneen tyhjäkäyntivirta. Magnetointivirran vaikutuksesta syntyy myös hajareaktanssi X_{l1} . Hajareaktanssi muodostuu, kun osa päämagneettivuosta oikaisee ilmavälin kautta takaisin staattoriin, päämagneettivuon mennessä ilmavälin kautta roottoriin. Hajareaktanssiin X_{l1} kuuluu myös kyseisen magneettipiirin reluktanssi.

Pyörivän magneettikentän vuoksi syntyy rautahäviöitä R_r . Magneettivuon indusoi raudan pyörrevirtoja, jotka lämmittävät rakenteita ja näin aiheuttavat häviöitä. Pyörrevirtojen suuruuteen vaikuttavat magneettivuon muutosnopeus, läpäisemä pinta-ala ja voimakkuus sekä raudan tilavuus ja sähköinen johtavuus. Pyörrevirtojen määrää voidaan vähentää pienentämällä vuon läpäisemää pinta-alaa kasaamalla sähkökoneen staattori ja roottori ohuista, toisistaan eristetyistä rautalevyistä. Nykyisissä sähkökoneissa rautahäviöt ovat verrattain pienet, varsinkin kuormitustilanteissa muiden häviöiden kasvaessa suhteessa paljon suuremmiksi.

Roottorisauvoihin indusoituneen SMJ:n aiheuttama roottorivirta I_2' synnyttää sauvan ympärille magneettivuon, josta osa oikaisee ilmavuon kautta takaisin roottoriin. Tämä häviö yhdessä kyseisen magneettipiirin reluktanssin kanssa merkitään hajareaktanssiksi X_{l2} . Roottorikäimityksen resistiivisiä häviöitä kuvataan R_2' .

Kuormituksen eri tilanteita voidaan kuvata jakamalla resistiivisyyttä R_2' jättämällä s. Jättämällä tarkoitetaan staattorin magneettikentän kulmanopeuden ns. tahtinopeuden, ja roottorin kulmanopeuden erotusta suhteessa tahtinopeuteen. Näin ollen jättämän suurentuessa eli kuormituksen kasvaessa roottorivirta I_2' suurenee resistiivisyyden pienentyessä. Todellisuudessa roottoriin indusoituva SMJ suurenee jättämän suurentuessa, koska staattorin muodostama päämagneettivuo leikkaa roottorin käämistä suuremmalla muutosnopeudella. [2, s. 319–326; 3, s. 11–12.]

Kun epätahtikoneen nopeutta säädetään ja momentti halutaan pitää vakiona, päämagneettivuon voimakkuus pidetään vakiona. Koska vuon voimakkuus määräytyy magnetointivirran ja vuon kulmanopeuden perusteella, nopeuden suurentuessa staattorin jännitettä nostetaan samassa suhteessa aina nimellisnopeuteen asti. Tätä nopeusaluetta kutsutaan vakiomomenttialueeksi ja nimellisnopeudella staattorin jännite on nimellisarvossaan. Myös nimellisnopeutta suuremmilla nopeuksilla staattorin jännite pidetään nimellisenä, sillä eristeet on suunniteltu tämän jännitetason mukaisesti. Staattoriin indusoituva SMJ kuitenkin kasvaa nopeuden suurentuessa, jolloin käämistä yllä vaikuttava jännite ja magnetointivirta pienenevät. Koneen tehon pysyessä vakiona ja nopeuden suurentuessa momentti laskee kääntäen verrannollisesti nopeuteen nähden. Tätä nopeusaluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi [4, s. 15–16].

Epätahtikoneen jättämän vuoksi roottoriin muodostuu voimavaikutuksen myötä momentti. Kun jättämä on positiivinen, kone toimii moottorina. Roottorin pyöriessä nopeammin kuin staattorin magneettikenttä, esimerkiksi erillisen vetokoneen vaikutuksesta, puhutaan negatiivisesta jättämästä, jolloin epätahtikone toimii generaattorina. Staattorin käämistä saa magnetointivirran verkosta, roottoriin indusoidun SMJ:n suunta muuttuu vastakkaiseksi moottorikäyttöön verrattuna ja momentin sekä tehon suunta muuttuu.

Staattorin ja roottorin käämistä resistiivisyyteen vaikuttaa myös virran ahtautuminen. Virran ahtautumista muodostuu johdinaineessa kulkevan vaihtovirran vaikutuksesta. Virta muodostaa johtimen ympärille magneettikentän, joka on yhdensuuntainen johtimen poikkileikkauksen kanssa. Magneettikentän vaikutuksesta johtimeen muodostuu pyörrevirtoja, joiden suunta on johtimen keskiosassa alkuperäisen virran vastainen. Näin ollen johtimen resistanssi kasvaa johtavan pinta-alan pienentyessä. Virranahdon vaikutus kasvaa virran taajuuden kasvaessa [5, s. 93].

Häviöt muodostuvat tällöin staattori- ja roottorikäemitysten resistiivisyydestä, rautahäviöistä, lisähäviöistä ja hankaushäviöistä. Hankaushäviöihin kuuluvat laakereissa tapahtuvat kitkahäviöt sekä tuuletushäviöt rungon sisä- ja ulkopuolella. Lisähäviöihin kuuluvat esimerkiksi yliaallot. Yliaallot aiheuttavat epäsymmetriaa päävuohon, josta aiheutuu vastamomenteja ja akselin tärinää.

2.1.2 Epätahtikoneen tehot

Kolmivaiheisen epätahtimoottorin verkosta ottama sähköteho on

$$P_1 = S_1 \times \cos \varphi = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \cos \varphi \quad (1)$$

, missä

U_1 = staattorin pääjännite

I_1 = staattorin vaihevirta

Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, tästä tehosta osa kuluu resistiivisiin häviöihin staattorikäemityksessä. Staattorin resistiivihäviöt voidaan laskea seuraavasti

$$P_{R1} = 3 \times R_1 \times I_1^2 \quad (2)$$

, missä

R_1 = staattorin käemityksen vaiheresistanssi

Staattorissa aiheutuu myös rautahäviöitä ja lisähäviöitä. Rautahäviöitä ei arvioida tässä työssä. Lisähäviöt on vaikea määrittää, joten yleensä ne arvioidaan prosenttiarvoina nimellistehosta. IEC-standardi määrittää lisähäviöt 1 kW – 10 MW epätahtikoneille seuraavasti

$$P_{\text{lisä}} = P_2 [0.025 - 0.005 \log_{10}(P_2 / 1kW)] \quad (3)$$

, missä

P_2 = akseliteho

Staattorista roottoriin ilmavälin kautta siirtyvä teho on verkosta otettavan tehon ja resistiivi-, lisä- ja rautahäviöiden erotus. Tätä ilmavälitehoa voidaan käsitellä myös ilmaväli-momenttina, jolloin ilmaväliteho jaetaan magneettikentän kulmanopeudella.

Ilmaväliteho voidaan ajatella roottoripuolella jakautuvan akselin mekaaniseksi tehoksi P_2 ja roottorin häviöihin P_r . Roottorihäviöihin kuuluvat resistiivihäviöt P_{r2} ja hankaushäviöt P_{hh} . [2, s.327–329.]

Hankaushäviöt muodostavat mekaanisen momentin, mikä sähkökoneen toimiessa moottorina vastustaa liikettä. Koneen jarruttaessa eli toimiessa generaattorina hankaushäviöiden muodostama momentti vaikuttaa samaan pyörimissuuntaan sähköisen momentin kanssa. Jos tiedetään saman sähkökoneen pätötehot moottori- ja generaattoritulassa, hankaushäviöteho voidaan siis ilmoittaa seuraavasti

$$P_r = P_m - P_g \quad (4)$$

, missä

P_m = moottorin pätöteho

P_g = generaattorin pätöteho

Kuormituksen ja nopeuden pysyessä vakiona, koneen loisteho on vakio, mikä voidaan laskea kaavalla 5. Jos generaattorin näennäisteho tiedetään, sen pätöteho voidaan laskea kaavan 6 mukaisesti.

$$Q = \sqrt{S_m^2 - P_m^2} \quad (5)$$

$$P_g = \sqrt{S_g^2 - Q^2} \quad (6)$$

Edellä esitetyt kaavat sijoittamalla kaavaan 4, johdetaan yhtälö hankaushäviöiden laskemiselle seuraavasti

$$P_r = S_m \times \cos \varphi - \sqrt{S_g^2 - Q^2} = S_m \times \cos \varphi - \sqrt{S_g^2 - S_m^2 (1 - \cos^2 \varphi)} \quad (7)$$

2.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: verkkokytketyt taajuusmuuttajat, virta- sekä jännitevälipiiritaajuusmuuttajat.

Syklokonvertteri on yleisin verkkokytketty taajuusmuuttaja. Se ei sisällä välipiiriä vaan muodostaa verkon pääjännitteestä sähkökoneelle vaihejännitteen, jonka tehollisarvoa ja taajuutta voidaan säätää. Syklokonvertteri sopii suuritehoisiin ja hitaisiin käyttöihin, koska suurin koneelle syötetty taajuus jää noin puoleen verkon taajuudesta.

Virtavälipiiritaajuusmuuttajaksi kutsutaan laitetta, joka tasasuuntaa verkon vaihtojännitteen tasajänniteeksi, suodattaa virran välipiirissä ja vaihtosuuntaa tasajännitteen halutun taajuiseksi vaihtojänniteeksi sähkökoneelle. Virtavälipiirissä pyritään pitämään välipiirin virta mahdollisimman vakiona.

Jännitevälipiiritaajuusmuuttajassa välipiirin tasajännite pyritään pitämään mahdollisimman vakiona. Taajuusmuuttajan ominaisuuksista riippuen myös sähkökoneen generoima vaihtojännite voidaan tasasuunnata, suodattaa ja edelleen vaihtosuunnata sähköverkkoon. Tällöin puhutaan itse- tai pakkokommutoidusta taajuusmuuttajasta.

Tässä työssä keskitytään jännitevälipiiritaajuusmuuttajaan, joka kykenee tasasuuntaamaan sähkökoneen generoiman vaihtojännitteen. Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja lyhennetään lopputyössä taajuusmuuttajaksi. [7, s. 90–98; 6, s. 84,63.]

Taajuusmuuttaja voidaan siis jakaa kolmeen toiminnalliseen kokonaisuuteen: verkko- ja käyttöpuolen suuntaajiin sekä välipiiriin. Verkko- ja käyttöpuolen suuntaajat koostuvat tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan ominaisuuksista.

Tasa- ja vaihtosuuntaajat toteutetaan puolijohteita käyttämällä. Nykyään käytössä ovat tyristorit ja IGBT-transistorit suuren tehonkeston sekä ohjattavuuden vuoksi.

Myös tavallisia ohjaamattomia diodeja käytetään ohjattavien puolijohteiden rinnalla estosuuntaan. Tätä diodia kutsutaan nolladiodiksi. Nolladiodin tehtävä on suojata ohjattavaa puolijohdetta poiskytkennän aikana, jolloin sähkökoneen virran muutosnopeus ja tästä johtuva koneen käämityksen muodostama induktiojännite on suuri. Nolladiodi tarjoaa induktiojännitteelle vaihtoehdoisen purkautumistien, suojaten ohjattavaa puolijohdetta läpilyönniltä ja muuta laitteistoa läpilyönnin aiheuttamilta sähkömagneettisilta häiriöiltä [6, s. 75–76].

2.2.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajan tehtävä on muodostaa vaihtojännitteestä tasajännitettä. Ohjatut tasasuuntaajat mittaavat verkon vaihtojännitteiden vaihekulmia ja ohjaavat puolijohteita sopivalla hetkellä, jolloin puolijohteen tila muuttuu johtavaksi. Jos puolijohteiden ohjauskulma on 0 astetta, ne ohjataan johtavaksi tavallisen diodin tavoin. Näin ollen myötäkytketyt puolijohteet ovat johtavassa tilassa vaihtojännitteiden positiivisen puolijakson ajan ja vastakytketyt puolijohteet negatiivisen puolijakson ajan.

Kun ohjauskulmaa säädetään 0 asteesta 90 asteeseen, tasajännitteen tehollisarvo laskee lineaarisesti kohti arvoa nolla. Tällöin verkon vaihtovirran vaihekulma siirtyy suhteessa vaihejännitteeseen ohjauskulman verran, jolloin verkko näkee tasasuuntaajan induktiivisena loistehokuormana.

Kun ohjauskulmaa säädetään 90 asteesta 180 asteeseen, tasajännitteen tehollisarvo suurenee lineaarisesti nolasta kohti verkon pääjännitteen huippuarvoa. Tällä välillä tasajännitekiskoston napaisuus vaihtuu, jolloin tehon suunta muuttuu. Loistehon määrä vähenee ohjauskulman lähentyessä 180 astetta. [7, s. 48–49.]

Tasajännitteen tehollisarvoa voidaan myös nostaa verkon pääjännitteen huippuarvoa suuremmaksi, joka on tässä työssä välttämätöntä. Kun tasasuuntaajan kanssa kytetään sarjaan kela, voidaan ohjattavien puolijohteiden avulla varastoida energiaa kelan magneettikenttään. Kolmivaiheisen tasasuuntaajan tapauksessa joko ylä- tai alahaaran puolijohteet ohjataan hyvin lyhyeen oikosulkuun keskenään, jolloin kelan virta suurenee hetkellisesti. Puolijohteiden palautuessa normaaliin tilaan, kela vastustaa virran muu-
tosta ja syöttää varastoidun energian tasasuuntaajaan päin. Energia varastoituu taa-
juusmuuttajan välipiiriin kapasitanssiin, jolloin tasajännite nousee.

2.2.2 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tehtävä on muodostaa tasajännitteestä halutun taajuinen vaihtojännite. Yleensä vaihtosuuntaus toteutetaan Pulse Width Modulation -menetelmällä, jonka toimintaperiaatena on syötettävien jännitepulssien pituuden säätäminen. Vaihtosuuntaaja syöttää sähkökoneelle vaihtosähköä puolijohteita kytkemällä välijännitepiirin + ja -napoihin. Vaihtosähkö koostuu jännitepiikeistä, joiden amplitudi on tasajännitteen suuruinen. Taajuuden muuttuessa jännitepiikkien leveys ja muutosnopeus muuttuvat. Pulssien leveys ja muutosnopeus vaihtelevat myös muodostettavan jännitteen tehollisarvon muuttuessa sinikäyrää vastaavaksi [6, s. 84–86].

Koska vaihtosuunnattu vaihtojännite muodostetaan jännitepulsseista, jännitteen säröisyys on suuri. Induktiivisten kuormien virrat kuitenkin noudattavat hyvin sinimuotoa induktanssin virrantasaamisominaisuuden takia [7, s. 91].

2.2.3 Taajuusmuuttajan välipiiri

Taajuusmuuttajan verkkopuolen ja käyttöpuolen suuntaajan välissä sijaitsee välipiiri. Jännitevälipiirissä sijaitsee kondensaattori minkä kapasitanssi suodattaa tasajännitettä. Kapasitanssi toimii myös energiavarastona esimerkiksi sähkökonetta jarrutettaessa. Kapasitanssi oikein mitoitettuna vähentää tehopiikkejä sähköverkossa. Kondensaattoriin varautunut sähköenergia voidaan laskea kaavalla 8 [6, s. 70].

$$E_C = \frac{C * U_{dc}^2}{2} \quad (8)$$

, missä

C = kondensaattorin kapasitanssi

U_{dc} = välipiirin tasajännite

Koska kondensaattorin kapasitanssi on vakio, sähköenergian muutos noudattaa kondensaattorin yli vaikuttavan jännitteen muutosta (kaava 9).

$$\Delta E_C = \frac{C \times (U_{dc2}^2 - U_{dc1}^2)}{2} \quad (9)$$

2.3 Lämpenemäkoee sähkökoneelle

Lämpenemäkoeeesta saadaan selville koneen käämitysten, laakereiden ja muiden osien lämpeneminen. Lämpenemäkoee suoritetaan useimmiten koneen nimelliskuormala. Standardien mukaan konetta kuormitetaan kunnes lämpötilanmuutos on <2 K tunnissa.

Standardit sekä luokituslaitokset määrittelevät eristysten lämmönkestävyyden perusteella tarkat lämpenemäraajat, joissa koneen on pysyttävä nimelliskuormituksella. Koneen eri osien lämpötilanmuutosta tarkkaillaan kuormituskokeen aikana koneeseen asennetuilla lämpötila-antureilla. Lämpötila-antureina käytetään usein platinasta valmistettuja vastuksia, joiden resistiivisyys kasvaa lineaarisesti lämpötilaan nähden.

Staattorikäämien tarkka lämpötilannousu lasketaan kaavalla 10. Ennen koeeen aloittamista koneen staattorikäämeistä mitataan kylmävastus ja käämin lämpötila. Käämituksen lämpötilan voi mitata koneeseen asennetuilla platinavastuksilla tai erityistapauksissa infrapunälämpömittarilla. Kun koneen lämpötilanmuutos vakautuu <2 K tunnissa verrattuna jäähditysaineen lämpötilanmuutokseen, staattorikäämeistä mitataan kuumavastus koneen pysähdyttyä. Kuumavastus on mitattava standardin vaatimassa ajassa joka 200 – 5 000 kVA koneissa on 120 s [10].

$$\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (k + \Theta_1) + \Theta_1 - \Theta_a \quad (10)$$

, missä

Θ_1 = kylmävastusmittausta vastaava käämin lämpötila (°C)

Θ_2 = kuumavastusmittausta vastaava käämin lämpötila (°C)

Θ_a = koneeseen virtaavan jäähditysaineen keskimääräinen lämpötila (°C)

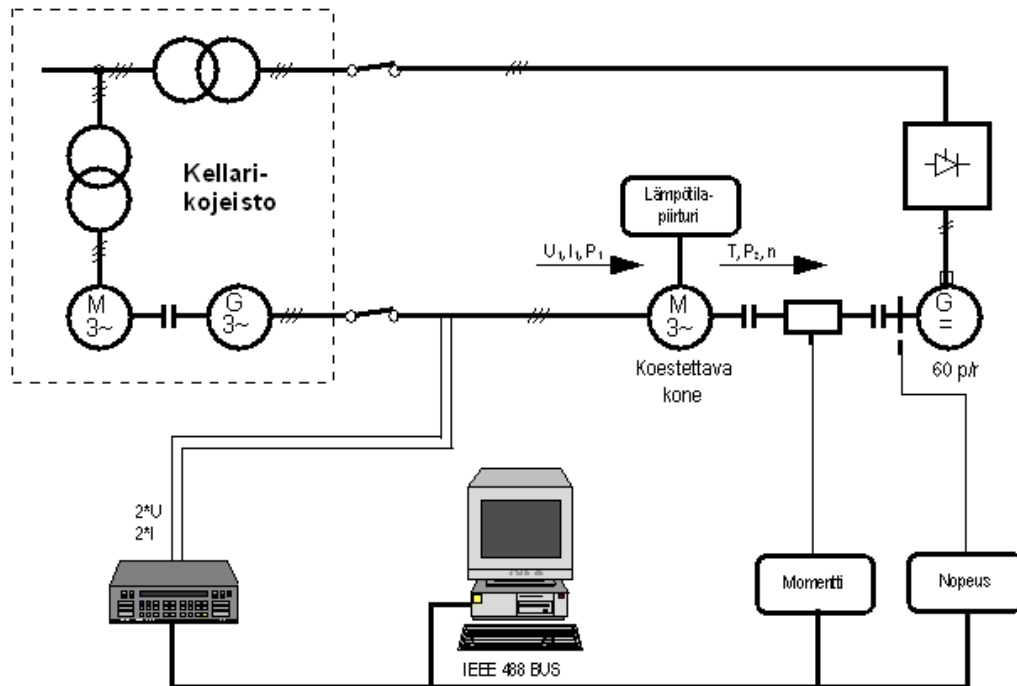
R_2 = käämin kuumavastus

R_1 = käämin kylmävastus

k = materiaalivakio ($k_{Cu} = 235$)

2.3.1 Lämpenemäkoje kuormakonemenetelmällä

Yleisin tapa suorittaa lämpenemäkoje on kuormittaa koestettavaa konetta kytkemällä sen akselille esimerkiksi tasasähkögeneraattori (kuva 2).



Kuva 2. Koestusjärjestely lämpenemäkojeelle kuormakonemenetelmällä [10]

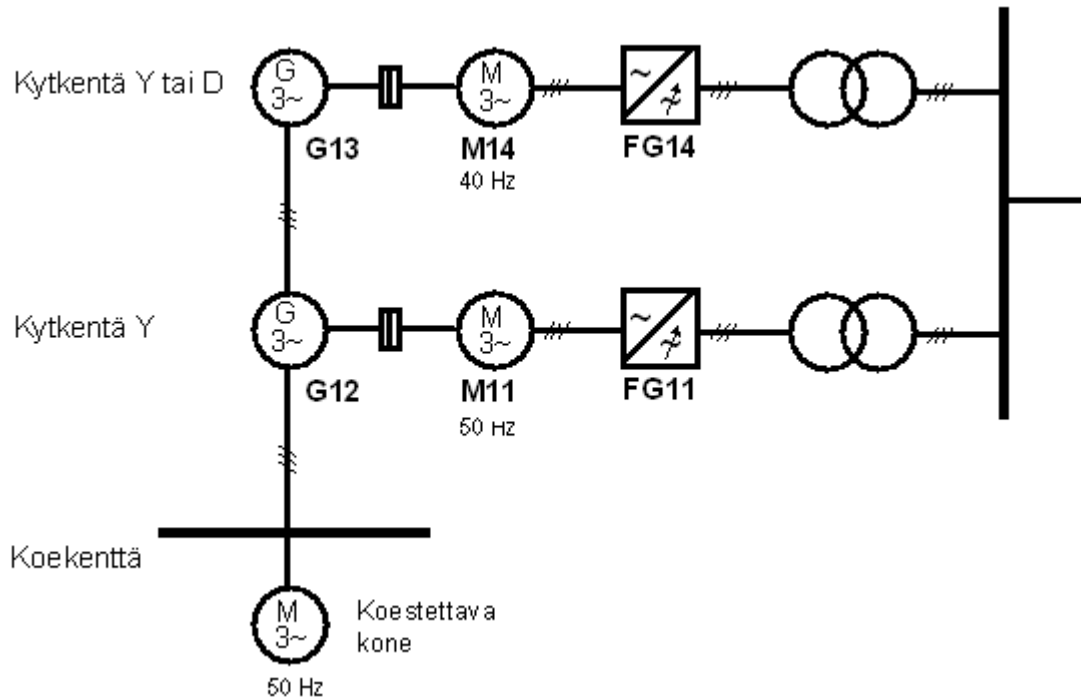
Koestettavaan koneeseen syötetään tahtigeneraattorilla jännite, jonka taajuus ja tehollisarvo ovat koestettavan koneen nimelliset. Jännitteen tehollisarvoa säädetään tahtigeneraattorin magnetoinnilla ja taajuutta generaattoriin kytketyn moottorin pyörimisnopeutta muuttamalla.

Koestettavan koneen kuormitusta lisätään suurentamalla tasasähkögeneraattorin magnetointivirtaa, jonka vuoksi päämagneettivuo generaattorissa vahvistuu ja ankkurikämmitykseen indusoituva SMJ kasvaa. Lähdejännite kommutoidaan tasajännitteeksi, joka kytketään kuormaan vaihtosuuntaajaan avulla. Tämän vuoksi ankkuri- ja päävuon voimavaikutus suurenee ja koestettavan koneen akselikuormitus kasvaa.

Koestettavan koneen akseliteho lasketaan momentin- ja nopeudenmittauksen avulla. Koska akseliteho ja sähköteho tunnetaan, hyötysuhde on laskettavissa.

2.3.2 Lämpenemäkoek kaksoistaajuusmenetelmällä

Kaksoistaajuuslämpenemäkoeksessa testattavaa konetta syötetään esimerkiksi kahdella sarjaankytketyllä generaattorilla. Koestusjärjestely esitetään kuvassa 3:

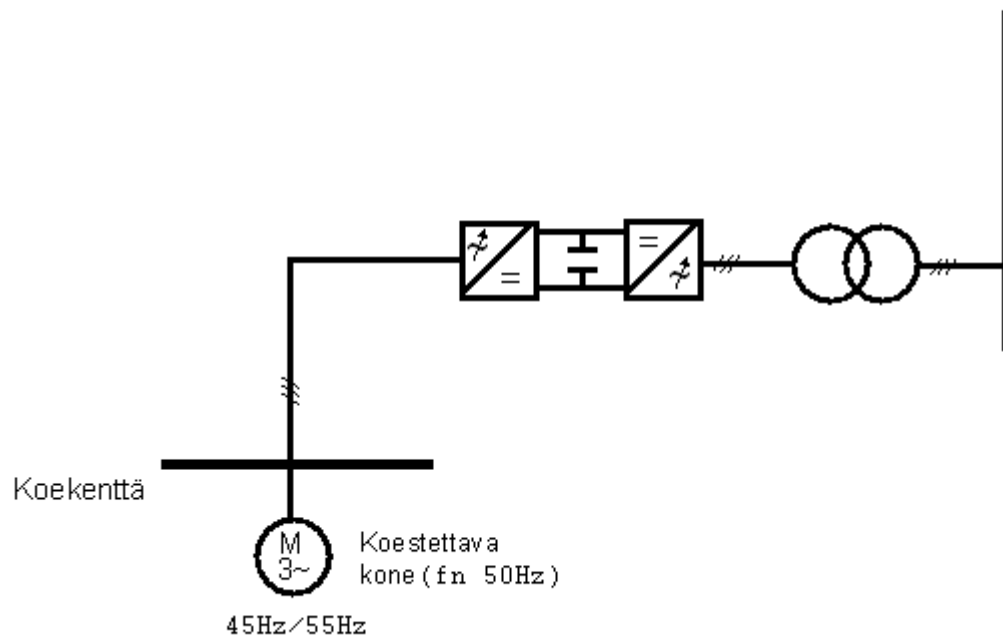


Kuva 3. Koestusjärjestely lämpenemäkoekelle kaksoistaajuusmenetelmällä [10]

Tässä menetelmässä toinen generaattoreista syöttää koneen nimellisjännitettä. Toinen generaattori säädetään syöttämään pienempää jännitettä tehollisarvoltaan sekä taajuudeltaan. Taajuusero jännitteillä on yleensä 5–10 Hz. Vaihejännitteiden summautuksessa koneeseen syntyy magneettivuoto, jonka taajuus vaihtelee nopeasti. Roottori pyörii vuoroin päämagneettivuota nopeammin, jolloin kone toimii generaattorina ja vuoroin päämagneettivuota hitaammin, jolloin kone toimii moottorina (ks. 2.1.1). Tällä menetelmällä hyötysuhdetta ei voida määrittää, koska akselille ei voida kytkeä momenttimittausta.

2.3.3 Lämpenemäkoee moduloidulla taajuusmenetelmällä

Moduloidun taajuusmenetelmän lämpenemäkoeksessa koestettavaa konetta syötetään taajuusmuuttajalla. Esimerkki koestusjärjestelystä nähdään kuvassa 4:



Kuva 4. Koestusjärjestely lämpenemäkoekselle moduloidulla taajuusmenetelmällä

Toimintaperiaate on sama kuin kaksoistaajuusmenetelmässä. Koneen magneettikentän taajuutta ohjataan vain generaattoreiden sijaan taajuusmuuttajalla. Hyötysuhdetta ei voida määrittää.

3 Taajuusmuuttajan muutokset moduloidulle taajuusmenetelmälle

Moduloitu taajuusmenetelmä määritellään standardissa IEC 60034–29. Sähkölähteenä voidaan käyttää taajuusmuuttajaa. Standardi ei määrittele vaihtosähkölähdettä tarkasti vaan antaa suosituksia:

The power source **may** be a generator with a symmetrical multiphase excitation winding, or an induction wound-rotor motor excited by a multiphase current of periodically varying low frequency f_m [11].

Lämpenemäkoee moduloidulla taajuusmenetelmällä suoritettuna on periaatteeltaan sama kaksoistaajuusmenetelmän kanssa. Taajuusmuuttajalla syötetään koestettavaan koneeseen vaihtojännite, jonka taajuus vaihtelee nopeasti, jonka vuoksi kone toimii vuoroin moottorina ja generaattorina. Standardin vaatimuksena onkin, että jännite taajuusmoduloidaan sisältämään kantoaallon lisäksi modulaatioaalto.

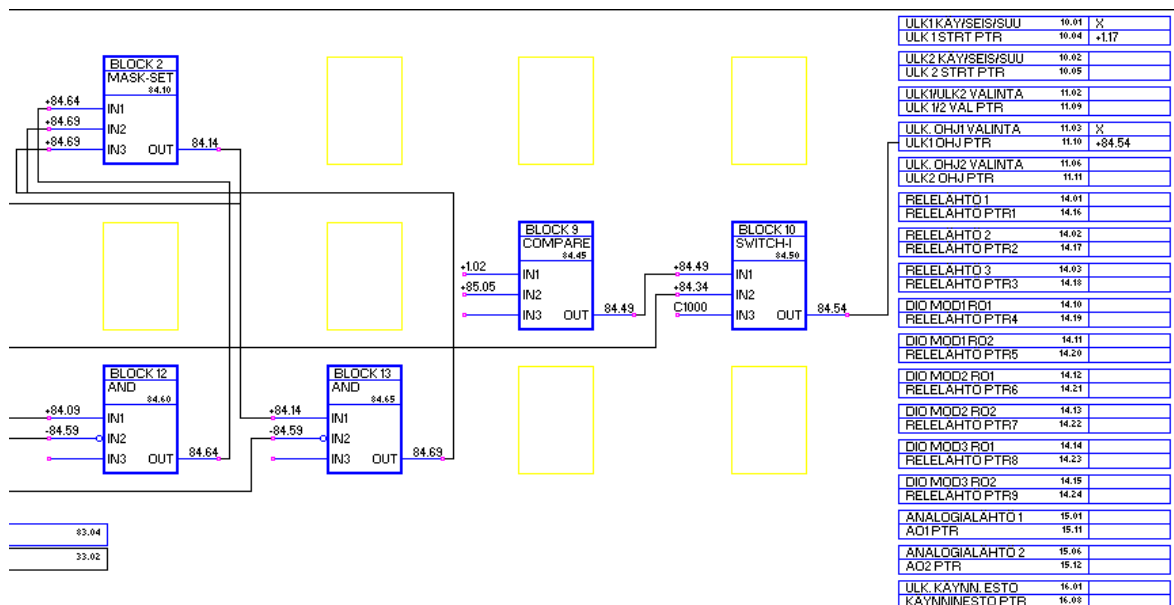
Koska taajuusmuuttajan välipiirin kapasitanssi toimii energiavarastona, kondensaattorit mitoitetaan koneen jarrutusenergian mukaan. Näin roottorin liike-energiaa voidaan käyttää hyväksi moottorisyklissä. Ideaalilanteessa taajuusmuuttaja ei generoi energiaa sähköverkkoon, tehonsuunta sähköverkon ja taajuusmuuttajan välillä ei vaihdu, sekä sähköverkko kuormittuu vain systeemin häviöistä.

Menetelmän tuotteistamista varten taajuusmuuttajalle kehitettiin koestussovellus ja tarvittavat taajuusmuuttajan parametrimuutokset tutkittiin. Myös kapasitanssin laskentakaavan paikkansapitävyys tarkistettiin.

3.1 Taajuusmuuttajan koestussovellus

Sovellus lämpenemäkokeelle tehtiin DriveAP-ohjelmalla. Ohjelma on kehitetty ABB:n taajuusmuuttajien ohjelmointia varten. Ohjelmointi perustuu loogisiin portteihin, jotka kirjoittavat taajuusmuuttajan parametreja halutusti. Ohjelmoinnissa voidaan käyttää muuttujina sekä loogisia arvoja (1/0) että kokonaislukuja, jotka ovat joko käyttäjän vaki-oita tai taajuusmuuttajan oloarvoja. Kokonaislukuina toimivat mm. kiihdytys- ja hidastusajat sekä nopeusohjeet.

Kuvassa 5 esitetään kuvakaappaus ohjelman käyttöliittymästä. Sovellus ladataan taajuusmuuttajan muistiin mistä sen voi parametrin avulla ottaa käyttöön. Sisäistä sovellusta käyttämällä saavutetaan luotettava toimintavarmuus sekä 12 ms ohjelman päivitysaika.



Kuva 5. DriveAP-ohjelman käyttöliittymä

Koestussovellus perustuu nopeusreferenssin uudelleenkirjoittamiseen sekä ramppiajan säätämiseen. Käyttäjävakioiden avulla käytetään kahta nopeusohjetta, ylä- ja alanopeutta. Kun laskettu roottorin nopeuden oloarvo saavuttaa ylänopeuden, nopeusreferenssi kirjoitetaan alanopeudeksi, jolloin tietyllä ramppiajalla saavutetaan haluttu kiihtyvyyksi eli momentti.

Moottorin kiihdytysaikaparametriksi asetetaan pienin mahdollinen aika, jolloin haluttu ramppiaika nopeuden muutokseen säädetään rajoittamalla koneen maksimimomenttia analogia-tuloon kytketyllä portaattomalla säätövastuksella. Koneen kuormitusta valvotaan erillisellä tehomittauksella, jolla mitataan koneen vaihevirtoja ja -jännitteitä.

Nopeussäädön epätarkkuuden vuoksi koestussovellukseen ohjelmoitiin nopeusohjeen kompensointisäätö, mikä vertaa laskettua roottorin nopeuden oloarvoa aseteltuun nopeuksien käyttäjävakioihin ja säätää nopeuden sisäistä ohjearvoa kunnes oloarvo asetuu riittävän tarkasti käyttäjävakioarvoon. Nopeusohjeen kompensointisäätö toimii niin maksimimomenttiarvoa suurentamalla, jolloin epätarkkuus kasvaa, kuin maksimimomenttia pienentämällä, jolloin epätarkkuus vähenee.

3.2 Taajuusmuuttajan parametrimuutokset

Aina ennen moottorin käynnistämistä ensimmäistä kertaa taajuusmuuttajan käyttöpuolen suuntaajan parametreista tarkistetaan ja muutetaan oikeaksi moottorin kilpiarvot sekä suoritetaan ID-ajo. ID-ajon aikana taajuusmuuttaja mittaa tarvittavat sähkötekniset arvot Direct Torque Control -säädön moottorimallia varten.

DTC - moottorinsäätötekniikka pystyy ohjaamaan moottoria riittävän nopeasti kaksoistaajuuskoetta varten, momentin vasteaika voi olla jopa 1–2 ms ilman erillistä nopeuden mittausta. Vektorisäädöllä saavutetaan noin 10–20 ms vasteaika takometrillä varustettuna. Lämpenemäkokeen vaatiessa jopa 50 ms kiihdytysrampia, vektorisäätö aiheuttaisi todennäköisesti epävakautta. Kuitenkin ilman nopeudenmittausta DTC-säätötekniikka laskee roottorin nopeuden 0,5 %:n tarkkuudella, jonka vuoksi DTC-säätötekniikka on myös koestustilanteessa ajallisesti sekä taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto kuin vektorisäätö. [8, s. 18.]

Kilpiarvojen lisäksi taajuusmuuttajan suuntaajista täytyi muuttaa myös muita parametrejä, jotka esitellään seuraavaksi.

Käyttöpuolen suuntaajan momenttiferenssin lohkokaavio on liitteessä 1. Momenttiferenssin toimintaperiaatteena on saavuttaa haluttu pyörimisnopeus asetetussa ramppiajassa rajojen salliessa. Rajoittavina suureina ovat asetellut toimintarajat tasajännitteelle, koneen virralle, momentille, roottorin nopeudelle sekä moottori- ja generointiteholle. Toimintarajaparametrit säädettiin tasolle, jossa ne eivät rajoittaneet käytön toimintaa vaan mahdollisen vikatilanteen sattuessa suojaisivat konetta.

Tasajännitteen toimintarajaparametreilla rajoitetaan jännitteen sallittu vaihteluväli. Yläjänniteraja asetettiin pienimmän jännitekeston omaavan komponentin mukaisesti. Yläjännitesäätö estää käyttöpuolen suuntaajaa syöttämästä jarrutusenergiaa välipiiriin tasajännitteen noustessa liian suurelle tasolle. Tällöin käyttäjän määrittelemä jarrutusramppi ei toteudu. [9, s. 14–15.]

Nopeusohjeen PID - säätöä käytetään käytännössä P - säätimenä, jolloin roottorin pyörimisnopeus noudattaa sisäistä ohjetta nopeasti ja liioitellusti. Säätö on tällöin epätarkka, jonka vuoksi koestussovellukseen ohjelmoitiin kompensointisäätö (ks. 3.1).

Verkkopuolen suuntaajan parametreista muutettiin välipiirin tasajännitteeseen vaikuttavia säätöjä (Tasajännitesäädön lohkokaavio, liite 2). Tasajännitesäädön lohkokaaviossa on rajoittimena jännitteen ylä- ja alaraja-arvot sekä generointiteho.

Yläjänniteraja asetettiin pienimmän jännitekeston omaavan komponentin mukaisesti. Generointiteho rajoitettiin 5 % koneen nimellistehosta. Tällöin vaihtosuuntaaja ei voi syöttää energiaa sähköverkkoon, vaan se varastoituu välipiirin kapasitanssiin.

Tasajännitteen muutosnopeudesta vastaa PI-säädin. Tasajännitteen integrointiaikavaiota suurennettiin, jolloin muutosnopeus hidastuu ja verkkopuolen suuntaaja ei tulkitse tasajännitteen nousua merkiksi syöttää energiaa sähköverkkoon.

3.3 Taajuusmuuttajan lisäkapasitanssi

Taajuusmuuttajan sisäinen kapasitanssi mitoitetaan tehtaalla riittämään normaaleihin käyttöolosuhteisiin, jolloin tarve on vähäinen. Tämän vuoksi taajuusmuuttajan välipiirin täytyy lisätä kapasitanssia moduloitua taajuusmenetelmää varten, jotta voidaan varastoida suuria jarrutusenergiämääriä.

Lisäkapasitanssin määrään vaikuttaa koestettavan koneen ja käytössä olevan taajuusmuuttajan ominaisuudet. Systemin mitoitus aloitetaan määrittämällä tarvittava kapasitanssi koestettavalle koneelle, minkä jälkeen valitaan suojaus.

3.3.1 Lisäkapasitanssin mitoitus ja kondensaattorityypin valinta

Koska roottorin kineettinen energia generoidaan sähköenergiaksi ja varastoidaan kondensaattoreiden kapasitanssiin, voidaan energiat merkitä yhtäsuuriksi.

$$\Delta E_K = \Delta E_C \quad (11)$$

, missä

ΔE_K = roottorin kineettisen energian muutos

ΔE_C = kondensaattoreiden sähköenergian muutos

Roottorin pyörimisliikkeeseen sidottu kineettinen energia esitetään seuraavasti

$$E_K = \frac{J \times \omega^2}{2} \quad (12)$$

, missä

J = roottorin inertia

ω = roottorin kulmanopeus

Tutkittavassa lämpenemääjossa roottoria kiihdytetään ja jarrutetaan kahden kulmanopeuden välillä, joten roottoriin sitoutuneen kineettisen energian muutosta kuvataan kaavalla 13.

$$\Delta E_k = \frac{J \times (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2} \quad (13)$$

Sijoittamalla kapasitanssin sähköenergian kaavan (9) ja roottorin kineettisen energian kaavan (13) kaavaan 11, saadaan yhtälö tarvittavalle kapasitanssille (kaava 14).

$$C = \frac{J \times (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{U_{dc2}^2 - U_{dc1}^2} \quad (14)$$

Kaavasta 14 voitiin havaita tarvittavan kapasitanssin olevan riippuvainen roottorin inertiaasta sekä roottorin kulmanopeuden ja välipiirin tasajännitteen vaihteluvälistä.

Tasajännitteen yläraja määräytyi alimman jännitekestoisuuden omaavaan komponenttiin, kondensaattorin, mukaisesti 1 155 V:n. Säätoivirheiden takia ylärajaa pienennettiin 1 %, jolloin yläraja on 1 144 V. Alarajana toimii verkon pääjännitteen huippuarvo, minkä verkkopuolensuuntaaja määrittelee loistehosäädön kautta. [9, s. 14,15.]

Koska roottorin inertia ja tasajännitteen vaihteluväli on vakio, roottorin kulmanopeuden vaihteluvälillä voidaan vaikuttaa tarvittavan kapasitanssin suuruuteen. Vaihteluvälille määritetään kuitenkin raja, jotta mitoitus voidaan saattaa loppuun. Koska perinteisessä kaksoistaajuusajossa 10 Hz:n taajuusero on usein suurin käytetty, käytetään tässä sovelluksessa samaa rajaa.

Kulmanopeuden raja määritellään siis tapauskohtaisesti koneesta riippuen. Nopeudet valitaan nimelliskulmanopeuden ylä- ja alapuolelta, jotta kone jäähtyy tasaisesti. Jos koneen nimellistaajuus on 50 Hz, tällöin kapasitanssin laskentaan käytetään kulmanopeuden vaihteluvälinä 345.4 rad/s (55 Hz) ja 282.6 rad/s (45 Hz).

Energiavarastoksi valitaan perinteinen kondensaattori. Eri energiavarastoiden jännite- ja virtakestoisuutta, elinikää, hyötysuhdetta sekä varauskapasiteettia tarkasteltiin. Superkondensaattorin suuren varauskapasiteetin vuoksi tilantarve olisi paljon pienempi verrattuna perinteiseen kondensaattoriin. Kuitenkin lataus- ja purkausmäärien lukumäärä on rajallinen, useasta eri lähteestä tarkistettuna superkondensaattori kestää 1 000 000 - 500 000 syväpurkausta. Tarve on kuitenkin lähes ääretön, koska 5 tuntia kestävässä koestuksessa syklejä on noin 300 000 latausta. Perinteisen kondensaattorin elinikä ei ole riippuvainen lataus- ja purkaussykleistä. Tämän lisäksi perinteisen kondensaattorin teoreettinen hyötysuhde on 100 %, kun superkondensaattorille ilmoitetaan hyötysuhteeksi 90-95 % [12, s. 13; 6, s. 107].

3.3.2 Lisäkondensaattoripatteriston modulaarisuus

Lisäkondensaattoripatteristot sijoitetaan standardirunkoihin, joita voidaan kytkeä rinnakkain tarvittava määrä. Esimerkkinä lasketaan kapasitanssi R8 runkoiselle kaapille.

R8 lisäkenttärunkoiseen kaappiin (2 024 mm x 793 mm x 524mm) mahtuu kahden kahvasulakkeen ja asennusvaran lisäksi noin 300 kondensaattoria. Tällöin kahvasulakkeelle ja asennusvaralle jää tilaa noin 300 mm x 793 mm x 524mm kaapin yläosasta. Käytetyn kondensaattorin kapasitanssi on 4.6 mF, jännitekestoisuus 385 V ja tilantarve 130 mm x 130 mm x 130 mm. Koska taajuusmuuttajan välipiirin tasajännite rajoitetaan 1 144 V ja kondensaattorin jännitekesto on 385 V, kondensaattoreita kytketään kolme kappaletta sarjaan. Kolmen sarjaankytketyn kondensaattorin jännitekesto on 1 155 V ja kapasitanssi 1.53 mF. R8 runkoon saadaan sijoitettua siis noin 153 mF.

Samalla tavalla voidaan mitoittaa eri kapasitanssisia moduulipatteristoja, jolloin moduuleja voidaan valita koestettavan koneen mukaisesti. Vaikka moduulipatteristojen energiakapasiteetti on tiedossa, konkreettista tehokapasiteettia ei voida määrittää ilman tietoa koneen inertiaasta ja nimellismomentista.

3.3.3 Lisäkondensaattoripatteriston sulakesuojaus

Sulakkeet sijoitetaan erikseen jokaiseen lisäpatteristoon. Tällä tavoin vikatilanteen satuessaan pienennetään oikosulkuenergiaa huomattavasti verrattuna tilanteeseen jossa sulake sijoitetaan yhteiseksi koko kondensaattoripatteriston väylälle.

Kondensaattoripatteriston suojaksi mitoitetaan sulakkeet koestettavan koneen nimellispäätötehon mukaisesti. Koska koneen generoima vaihtosähkön päätöteho ja välipiirin tasasähkön teho ovat yhtäsuuret (kaava 15), voidaan johtaa yhtälö kondensaattoreiden virralle (kaava 16).

$$P_{dc} = P_{ac} \quad (15)$$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3} \times U_{ac} \times I_{ac} \times \cos \varphi}{U_{dc}} \quad (16)$$

Kapasitanssit sijoittuvat taajuusmuuttajassa kahteen tai useampaan yksikköön; taajuusmuuttajan sisäiseen kapasitanssiin ja ulkopuolisiin lisäkondensaattoripatteristoihin. Tässä työssä lasketaan vain lisäkondensaattoripatteristojen virta, koska alkuperäinen patteristo on suojattu. Koska kaikkien patteristojen yli vaikuttaa samansuuruinen jännite, virta jakautuu kapasitanssien suhteen mukaisesti.

$$I_{dc} = I_{Corig} + I_{C1} + \dots + I_{Cn} = I_{dc} \times \left(\frac{C_{orig}}{C_{kok}}\right) + I_{dc} \left(\frac{C_1}{C_{kok}}\right) + \dots + I_{dc} \left(\frac{C_n}{C_{kok}}\right) \quad (17)$$

Sijoittamalla välipiirin tasavirran lauseke (kaava 16) kaavaan 17, saadaan laskentakaava halutun lisäkondensaattoripatteriston virralle (kaava 18), esimerkiksi patteristolle nro 1.

$$I_{C1} = \frac{\sqrt{3} \times U_{ac} \times I_{ac} \times \cos \varphi}{U_{dc}} \times \left(1 - \left(\frac{C_{orig}}{C_{kok}}\right) - \dots - \left(\frac{C_n}{C_{kok}}\right)\right) \quad (18)$$

Sulakkeena käytetään aR-sulaketyppiä, koska ko. sulaketta käytetään myös taajuusmuuttajan etusulakkeina. Näin varmistetaan että vikatilanteen sattuessa patteriston sulake toimii ennen etusulakkeita. Sulaketyypin toiminta-aika on hyvin nopea, minkä vuoksi se sopii hyvin puolijohteiden ja kondensaattoreiden suojaamiseen.

3.4 Moduloidun taajuusmenetelmän testaus

Menetelmän tutkimista ja testaamista varten rakennettiin testikokoonpano.

Taajuusmuuttajana käytettiin ACS800-17. Tekniset tiedot:

- 690 V
- 93 A
- 3.113 mF (sisäinen kapasitanssi)
- 7.670 mF (ulkoinen lisäkapasitanssi)
- η : 0.97.

Sähkökoneena käytettiin ripajähdytteistä M4GP 200MLE oikosulkumoottoria. Tekniset tiedot:

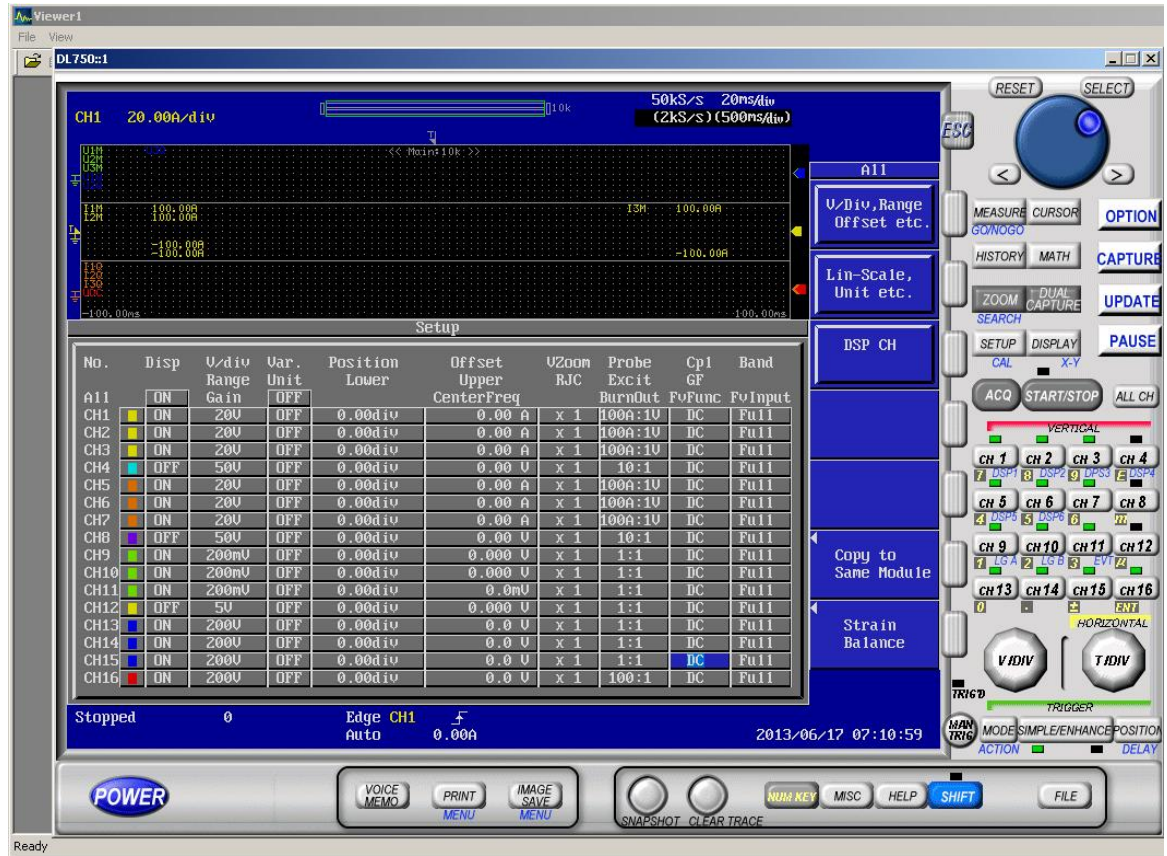
- 440 V
- 48.2 A
- 60 Hz
- 1778 rpm
- $\cos\varphi$: 0.83
- η : 0.945
- staattorikäämityksen vaiheresistanssi 75.8 m Ω (20°C).

Seuraavat testit tehdään menetelmän toimimisen tarkistamiseksi:

- Kondensaattoripatteriston virran laskentakaavan tarkistus
- Systemin häviöiden määrittäminen kuormitustilanteessa
- Sähköverkon jännitteen stabiilisuus.

3.4.1 Moduloidun taajuusmenetelmän testauksen mittausmenetelmät

Virran ja jännitteen mittaamiseen käytettiin Yokogawa DL750-oskilloskooppia. Oskilloskooppi kytkettiin tietokoneeseen USB-portilla, jolloin mittausdataa oli mahdollisuus tutkia tarkemmin Xviewer-ohjelmaa käyttämällä. Xviewer-ohjelmassa mitattiin mitattujen suureiden tehollisarvoja ja integraalia kustakin mittausportista halutulla aikavälillä sekä laskettiin tehoja.



Kuva 6. Oskilloskoopin asetukset

Kuvassa 6 nähtiin oskilloskoopin asetukset. Taajuusmuuttajan välipiirin tasajännitettä, verkon ja koneen vaihejännitteitä sekä -virtoja mitattiin. Käytetyt oskilloskoopin kanavat sekä mittavälineet:

- CH1–CH3 ja CH5–CH7 ovat virtamittauksia. Mittauksessa käytettiin Fluken virtapihtiä, muuntosuhde 10 mV /A.

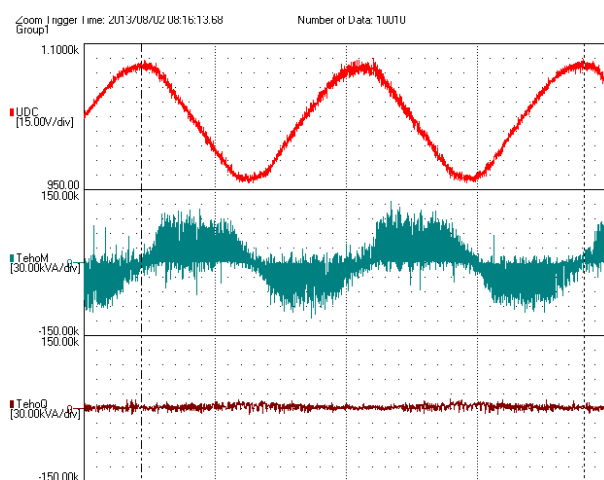
- CH9–CH11 ovat koneen jännitemittauksia. Kytetty jänniteprobella, muuntosuhde 1/ 2 000. Oskilloskoopin jännitekesto on 1 000 V, mikä olisi ylittynyt taajuusmuuttajan syöttäessä jopa 1 140 V jännitepiikkejä.
- CH13–CH15 ovat sähköverkon jännitemittauksia. Suora mittaus.
- CH16 on välipiirin jännitemittaus. Kytetty jänniteprobella, muuntosuhde 1/1 000.

3.4.2 Moduloidun taajuusmenetelmän testauksen mittaustulokset

Kuvakaappaukset ja mittaustulokset ovat Xviewer-ohjelmasta. Värit toistuvat samoina joka kuvassa:

- punainen - välipiirin tasajännite
- turkoosi - koneen näennäisteho
- ruskea - verkon näennäisteho
- vihreä - koneen vaihevirta
- keltainen - kondensaattoripatteriston virta.

Kuvassa 7 nähdään havaintokuva systeemin toiminnasta. Välipiirin jännitetaso vaihtelee koneen tehovirtauksen vaihtuessa positiivisesta negatiiviseen. Samalla sähköverkon tehovirtaus pysyy suhteessa hyvin pienenä. Sähköverkon ja -koneen tehot on skaalattu yhtäsuuriksi.



Kuva 7. Havaintokuva koestuksen ollessa käynnissä

Kondensaattoripatteriston virran laskentakaavan tarkistus -mittaus

Sähkökonetta kuormitettiin nimellisteholla. Mittausdata liitteessä 3. Mittaustulokset ovat

- kondensaattoripatteriston virran tehollisarvo 22.3 A
- moottorin virran tehollisarvo 48.7 A
- välipiirin tasajännitteen tehollisarvo 1 049.6 V
- moottorin pääjännitteen tehollisarvo 499.0 V.

Kondensaattoripatteriston tehollisvirta laskettiin kaavalla 18

$$I_{c1} = \frac{\sqrt{3} \times 499.0V \times 48.7A \times 0.83}{1049.6V} \times \left(1 - \left(\frac{3.113mF}{10.783mF}\right)\right) = 23.7A$$

Mitatun kondensaattoripatteriston tehollisvirran ollessa 22.3 A, laskentakaava voidaan todeta luotettavaksi. Virhettä aiheuttaa mm. epätarkkuus Xviewer-ohjelmassa mittausvälin asettelussa.

Systeemin häviöiden määrittely kuormitustilanteessa –mittaus

Mittausdata esitetään liitteessä 4. Mittaustulokset ovat

- moottorisyyklin näennäisteho 41 349 VA ja aika 0.0640 s
- generaattorisyyklin näennäisteho 38 745 VA ja aika 0.0535 s
- energiavirta sähköverkosta taajuusmuuttajaan jaksonaikana 393 J.

Kone kuormittuu siis jaksonaikana keskimääräisesti 40 163 VA:n teholla, koneen nimellistehon ollessa 38 400 VA. Yhden jakson teoreettista kokonaishäviöenergiaa tarkastellaan ja verrataan sitä mitattuun taajuusmuuttajaan syötettyyn sähköenergiaan.

Staattorin resistiivihäviöteho laskettiin kaavalla 2 (ks. 2.1.2). Virta-arvona käytettiin jakson tehollisvaihevirtojen keskiarvoa. Staattorin käämityksen resistanssiarvo on laskennallinen 20°C lämpötilassa. **Staattorin resistiivihäviöenergia** on

$$E_{r1} = P_{r1} \times t = 3 \times R_1 \times I_1^2 \times t = 3 \times 0.0758\Omega \times 46.5A^2 \times 0.1175s = 57J$$

, missä

t = jakson aika

Koneen moottorisyklin aikainen hankaushäviöteho laskettiin kaavan 7 (ks. 2.1.2) mukaisesti. Tällöin **hankaushäviöenergia** on

$$E_{hh} = P_{hh} \times t_m = (41349VA \times 0.83 - \sqrt{38745VA^2 - (41349VA^2(1 - 0.83^2))}) \times 0.0640s = 204J$$

, missä

t_m = moottorisyklin aika

Koneen lisähäviöteho laskettiin kaavan 3 (ks. 2.1.2) mukaisesti, jolloin **lisähäviöenergia** on

$$\begin{aligned} E_{lisa} &= P_{lisa} \times t \\ &= (40163 * 0.83 * 0.945)kW \times (0.025 - 0.005 \log_{10}((40163 * 0.83 * 0.945)kW / 1kW)) \times 0.1175s \\ &= 29J \end{aligned}$$

Sähkökoneen tehon ollessa keskimäärin 40 047 VA ja energiavirtauksen kulkiessa pääsääntöisesti taajuusmuuttajan välipiiriin ja koneen välillä, **taajuusmuuttajan häviöenergia** arvioidaan seuraavasti

$$E_{sc} = \frac{P_{sc} \times t}{2} = \frac{(\frac{40163VA}{0.97} - 40163VA) \times 0.1175s}{2} = 73J$$

Kokonaishäviöenergian teoreettinen arvio on siis 363 J, energiavirran ollessa sähköverkosta taajuusmuuttajaan mittauksen perusteella 393 J.

Tämän perusteella voidaan todeta sähköverkon syöttävän vain systeemin häviöt. Virhettä laskentaan syntyy, koska taajuusmuuttajan hyötysuhde on ilmoitettu nimellisteholle ja tässä sitä ajetaan osakuormalla. Koneen rungossa tapahtuvia rautahäviöitä ja roottorin käämityksen resistiivihäviöitä ei ole arvioitu.

Voidaan myös todeta energiavirran kulkevan sähköverkossa pääsääntöisesti yhteen suuntaan, sähköverkosta taajuusmuuttajaan, koska sähköenergia on positiivinen moottori- sekä generaattorisyklissä.

Sähköverkon jännitteen stabiilisuus –mittaus

Mittausdata esitetään liitessä 5. Mittausdatan perusteella voidaan havaita silmämääräisesti jännitteen pysyvän stabiilina. Suurempia sähkökoneita koestettaessa tilanne voi kuitenkin muuttua virran kasvaessa, jolloin sähköverkon impedanssi vaikuttaa olennaisesti jännitteen stabiilisuuteen.

4 Lämpenemäkoestus moduloidulla taajuusmenetelmällä

Pienjänniteinduktiomoottori lämpenemäkoestettiin moduloidulla taajuusmenetelmällä, jotta varmistetaan tuotteen oikeasta toiminnasta. Koestuksessa on tarkoituksena seurata koneen ja sovelluksen vakautta kuormituskokeessa sekä koneen lämpenemän määrää verrattuna perinteiseen kuormakonemenetelmän lämpenemään.

4.1 Lämpenemäkokeen koejärjestelyt ja mittausmenetelmät

Koestettavan koneen tekniset tiedot:

- 55 kW
- 690 V
- 58.8 A
- Lämpenemä kuormakonemenetelmällä 70.5 K (suoritettu aikaisemmin).

Staattorikäämien resistanssin mittaukseen käytettiin mikro-ohmimittaria. Moottorin jännitteitä ja virtoja mitattiin tehoanalyysaattorilla. Ympäristön ja koneen lämpötilamittaukseen käytettiin PT-100-lämpötila-antureita. Lämpötiloja seurattiin, jotta tiedetään milloin kone saavuttaa standardien määrittelemän lämpötilannousurajan. Tällöin koneen voidaan katsoa saavuttaneen stabiilin lämpötilan, ja kone voidaan pysäyttää.

Taajuusmuuttajan lisäkapasitanssi mitoitettiin 3.3.1 mukaisesti.

4.2 Lämpenemäkokeen mittaustulokset ja mittaustulosten käsittely

Moottoria koestettiin neljä tuntia, kunnes lämpötilannousu vakioitui alle 2 K /h. Koneetta kuormitettiin nimellisesti taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Koneen tehollisvirta ja taajuus koestuksen aikana

Kellonaika	I1 [A]	f [Hz]
8:50	57.9	49.4
9:20	58.7	49.4
9:50	58.1	49.3
10:20	58.1	49.3
10:50	58.0	49.3
11:50	58.7	49.4
12:20	58.9	49.4
12:50	58.1	49.4

Lämpenemän laskemista varten mitattiin seuraavat resistanssi- ja lämpötila-arvot

- Käämien kylmävastus $R_1 = 0.1636 \Omega$ (lämpötilassa $\Theta_1 = 23.7 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Käämien kuumavastus $R_2 = 0.2166 \Omega$ (mitattu 55 s koneen pysäyttämisen jälkeen)
- Jäähdytysilman keskimääräinen lämpötila koestuksen viimeisen puolen tunnin ajalta $\Theta_\alpha = 25.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Staattorikämmien lämpötilannousu laskettiin kaavalla 10 (ks. 2.3)

$$\Delta\Theta = \frac{(0.2166 - 0.1636)}{0.1636} \times (235 + 23.7\text{C}) + 23.7\text{C} - 25.7\text{C} = 81.8\text{K}$$

Moottorin lämpenemä moduloidulla taajuusmenetelmällä on 11.3 K enemmän kuin kuormakonemenetelmällä. Lämpenemäeroon vaikuttaa mm. taajuusmuuttajan aiheuttamat yliaallot sekä roottorin virranahtoilmiö (ks. 2.1.1). Laitteisto havaittiin vakaaksi kuormitustilanteessa.

5 Yhteenveto

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin ja lopputulokseksi valmistui toimiva taajuusmuuttajalaitteisto moduloitua taajuusmenetelmää varten. Lämpenemän ollessa suurempi ripajäähdytteisillä koneilla moduloidulla taajuusmenetelmällä kuin kuormakone menetelmällä, menetelmän käyttö tuotannossa on vaativaa. Varsinkin pienitehoisten induktio-koneiden markkinoilla hyötysuhdekilpailu on kova jolloin loppukoestuksessa mitattu huono hyötysuhde aiheuttaisi ongelmia tilaajan kanssa.

Menetelmä sopiikin erityisen hyvin suuremmille moduulikoneille, joiden ilmankierto ei ole suljettu. Tällöin moduloidun taajuusmenetelmän aiheuttama roottorin lisälämpenemän vaikutus koneen staattorilämpenemään pienenee. Menetelmällä voidaan koestaa myös suurille lämpötiloille suunnitellut pienjännitekoneet uunissa ilman kuormakonetta. Tämä vaatisi myös kuormakoneelta suuren lämmönkestävyyden.

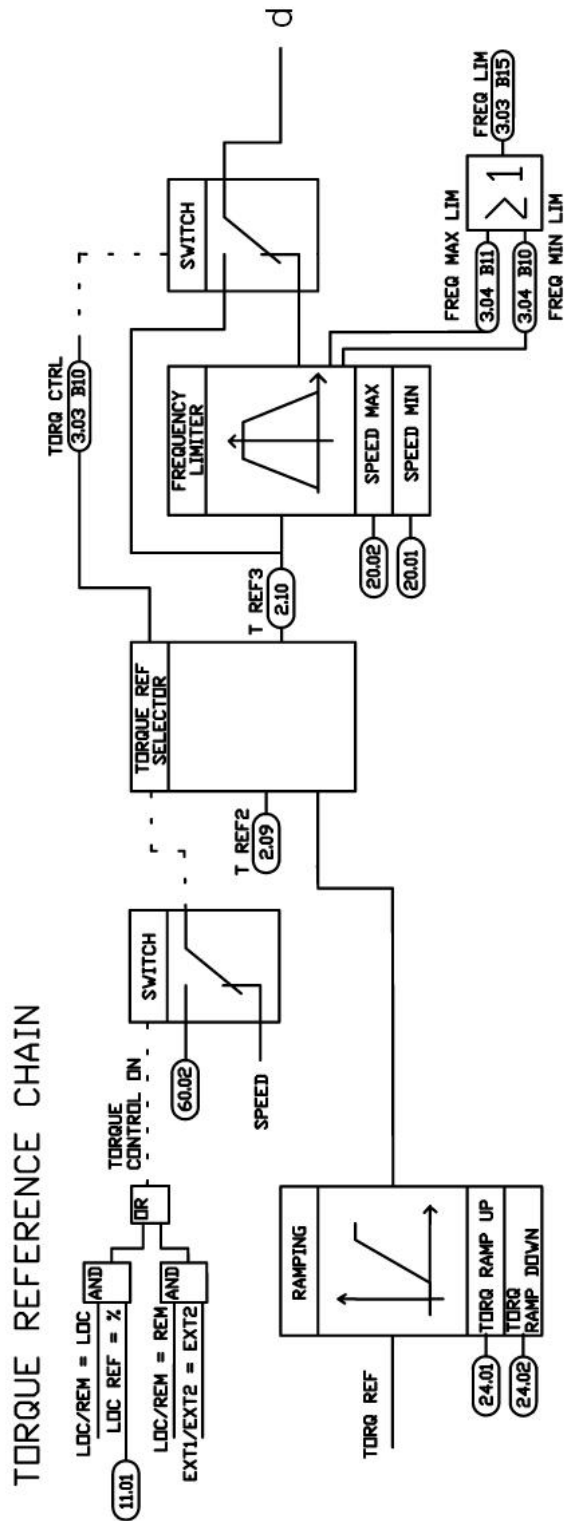
Laitteistosta voidaan rakentaa liikuteltava pienen tilantarpeen vuoksi. Tällöin sähkökoneita voidaan tarpeen vaatiessa koestaa myös käyttöpaikalla, koska sähköverkon vaatimukset koestusta varten ovat matalat pienen tehovirtauksen takia.

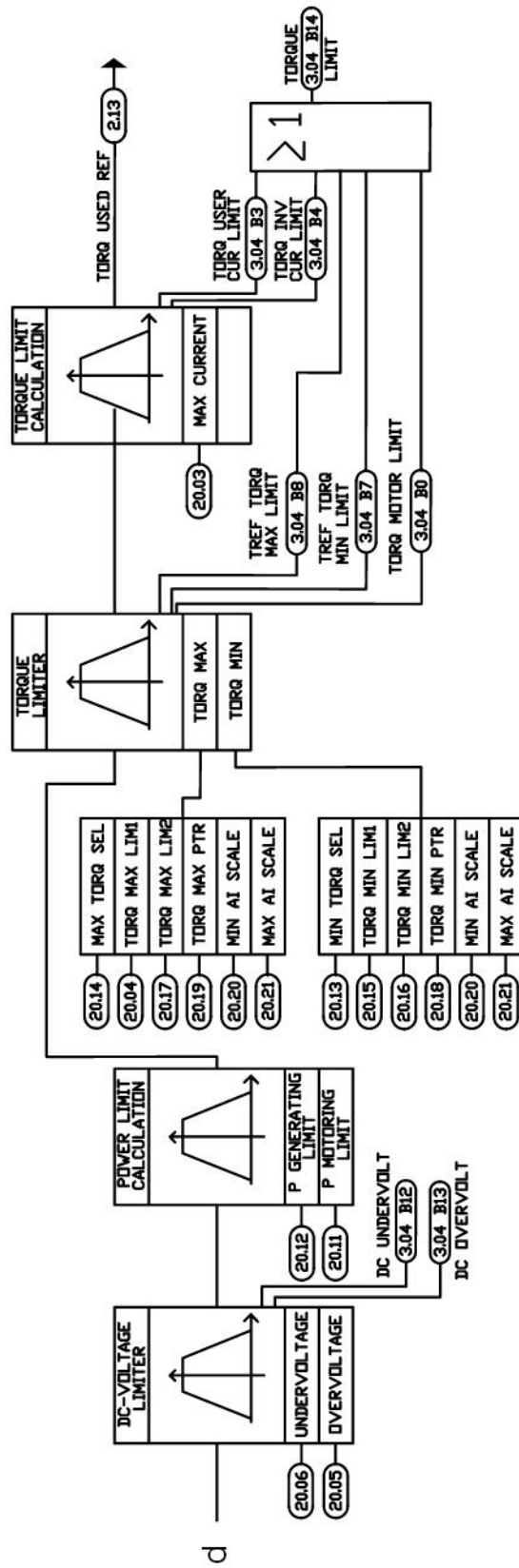
Tulevaisuudessa pohdittavaa jäi energianvarastoinnin kannalta. Millä tavoin tarvittava kapasitanssi saadaan kokonaistaloudellisesti kannattavammin käyttöön ottamalla huomioon tilantarve, investointikustannukset sekä huollontarve tavallisen kondensaattorin ja superkondensaattorin osalta. Aikaisemmin todettiin että superkondensaattorit eivät sovi tähän sovellukseen, koska niiden lataus- ja purkaus syklien määrä on rajallinen. Kyseessä on kuitenkin tieto syväpurkausmäärästä, joten ei tiedetä miten superkondensaattorit kestäisivät kun purkaus olisi vain osittainen. Myös välipiirin tasajännitteen alarajan pienintä arvoa tullaan tutkimaan. Oletuksena on, että alarajaa voidaan laskea verkon pääjännitteen huippuarvoa pienemmäksi. Tällöin tarvittava kapasitanssin määrä vähenee merkittävästi tasajännitteen vaihteluvälin suurentuessa.

Lähteet

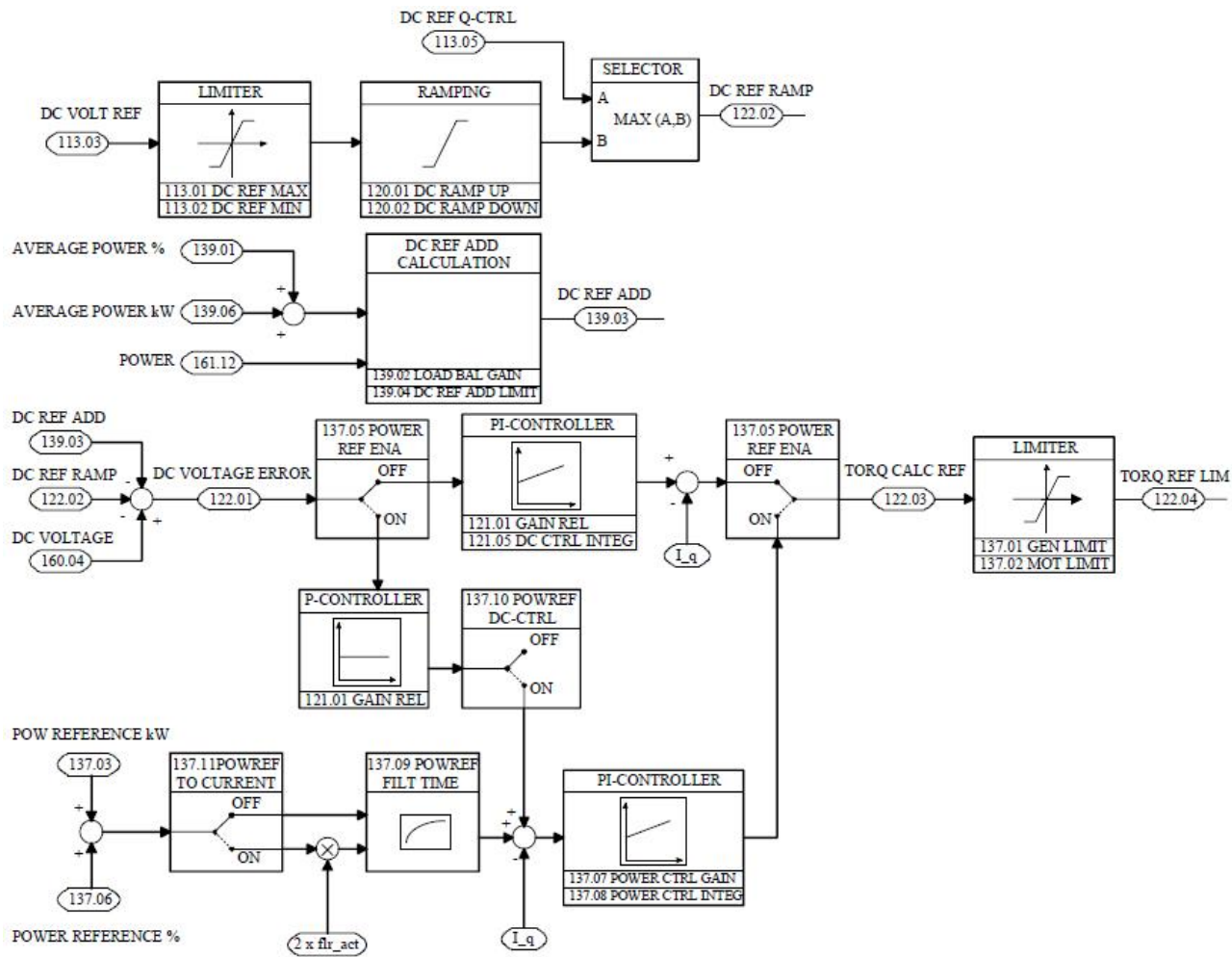
- 1 Inkinen P, Manninen R, Tuohi J. 2002. Momentti 2 insinöörifysiikka. Keuruu: Ota-va.
- 2 Tonteri A. 1994. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Por-vo: WSOY.
- 3 Hietalahti L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Vantaa: Amk kustannus oy Tam- mertekniikka.
- 4 Hietalahti L. 2011. Säädettyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Tammertekniikka.
- 5 Silvonen K. 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria: Passiiviset komponentit, sähköfy- siikka, DC-, AC- ja transienttianalyysi, osoitinlaskenta, sähkövoimatekniikka, kak- siportit, RF-tekniikka. Helsinki: Hakapaino.
- 6 Hietalahti L. 2011. Sähkökäyttö ja hybriditekniikka; ajoneuvo- ja työkone- käyttöön. Vantaa: Amk kustannus Oy Tammertekniikka.
- 7 Hietalahti L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Vantaa: Amk kustannus Oy Tammertekniikka.
- 8 Technical guide No.1: Direct torque control (REV C). 2011. ABB Oy.
- 9 Tekninen opas nro. 8: Sähköinen jarrutus. 2001. ABB Oy.
- 10 Sisäinen ohjeistus P-00588. 2010. Luettu 10.8.2013. ABB Oy.
- 11 IEC 60034-29: Equivalent loading and superposition techniques – Indirect testing to determine temperature rise (edition 1.0). 2008.
- 12 Pandolfo A.G, Hollenkamp A.F. 2006. Carbon properties and their role in super- capacitors. Elsevier B.V.

INU-vaihtosuuntaajan momenttiohjeen lohkokaavio

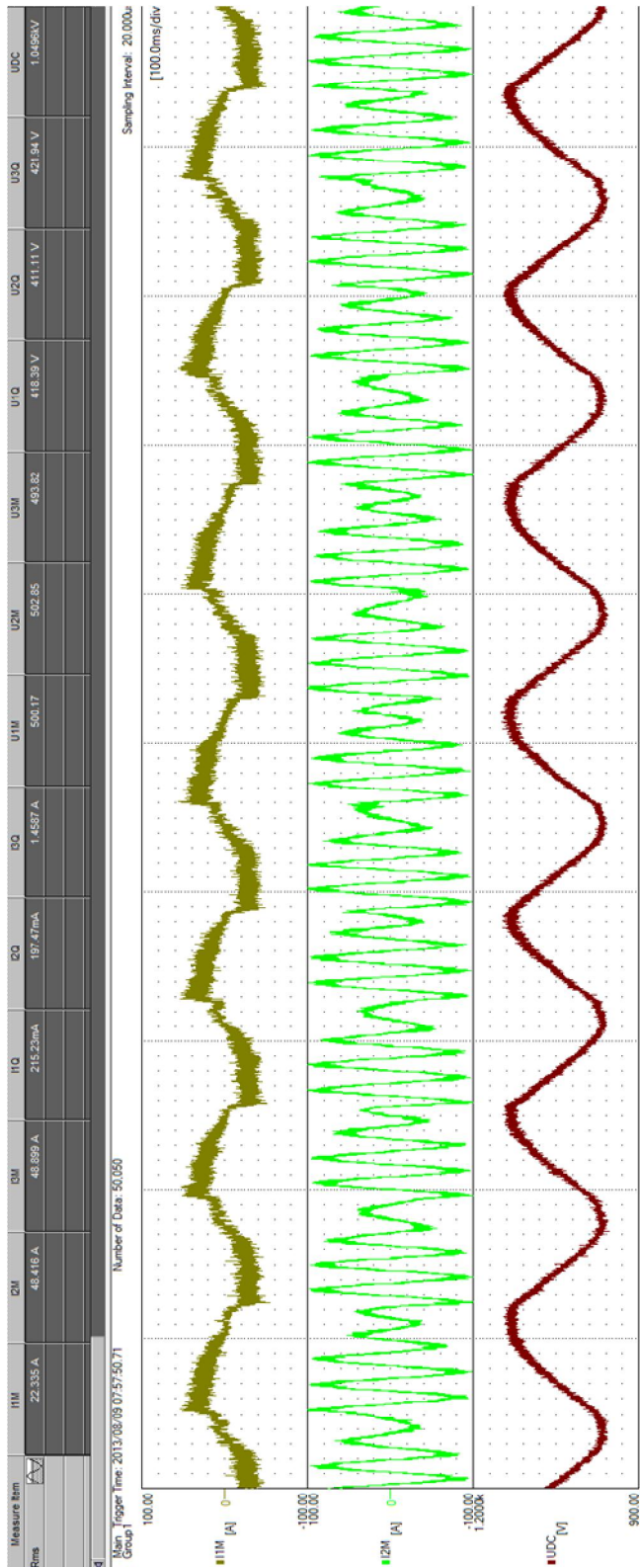




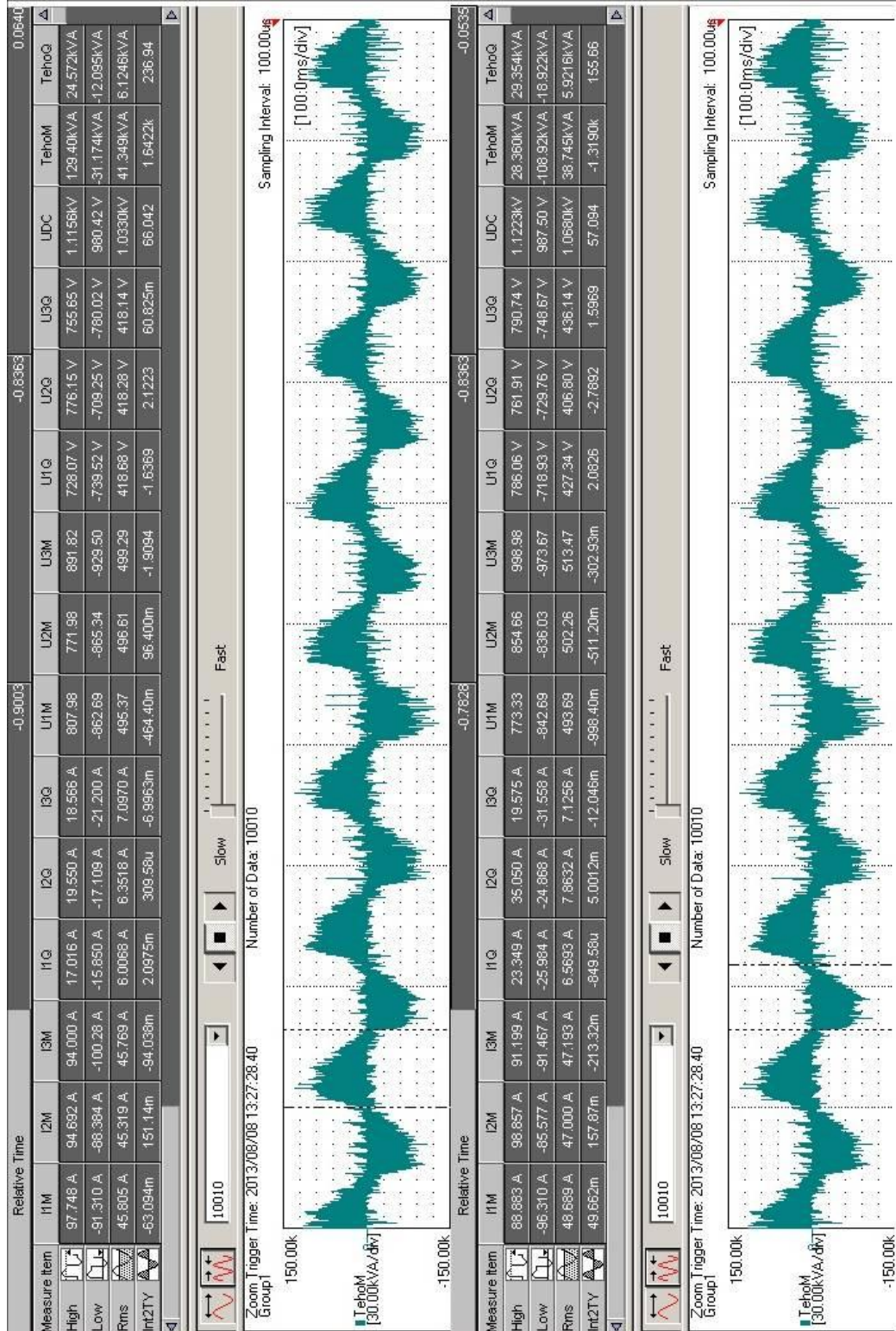
ISU-vaihtosuuntaajan tasajännitesäädön lohkokaavio



Mittaus 1: kondensaattoripatteriston virran laskentakaavan tarkistus



Mittaus 2: systeemin häviöiden määrittys kuormitustilanteessa



Mittaus 3: sähköverkon jännitteen stabiilisuus

