



TAHTIKONE JA SEN SÄÄTIMEN TOIMINTA

Timo Niemi-Nikkola

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIMO NIEMI-NIKKOLA:
Tahtikone ja sen säätimen toiminta

Opinnäytetyö 48 sivua
Huhtikuu 2013

Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa tehtiin tutkimuksia Stamfordin BCA 164 A tahtikoneelle ja sen säätimelle SA465-2 myöhempää opetustarkoitusta varten.

Tahtikoneen ominaisuuksia tutkittiin tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeen avulla. Vertailtaessa tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeen tuloksia teoreettisiin kuvaajiin voitiin todeta kokeiden onnistuneen. Tahtikoneelle määritettiin myös reaktanssit, kuten pitkittäinen ja poikittainen tahtireaktanssi sekä pitkittäinen ja poikittainen alkureaktanssi. Reaktanssien määrittämisessä ilmeni mittauksien aikana ongelmia, koska tahtikoneen magnetointi toteutettiin harjattomasti. Sen vuoksi kaikkia reaktansseja ei ollut mahdollista määrittää, koska tahtikoneen käämitykseen ei voitu tehdä tarvittavia mittauskytkentöjä. Ainoastaan tahtireaktanssien ja pitkittäisen alkureaktanssin mittaustulokset olivat lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja. Nollareaktanssia ei koneen rakenteen vuoksi määritetty ollenkaan.

Tahtikoneen säätö- ja kuormituskäyrämittauksia varten kone tahdistettiin sähköverkkoon ja tahdistuksesta laadittiin ohjeet opetuskäyttöä varten. Tahtikoneen sähköverkkoon tahdistaminen onnistui ilman ongelmia. Molemmissa mittauksissa jarrugeneraattorilla luotiin tahtikoneelle kuorma. Säätö- ja kuormituskäyrän mittaukset onnistuivat, sillä mittauksien kuvaajat vastasivat teoreettisia kuvaajia.

Työssä tutkittiin myös tahtikoneen säätimen SA465-2 toimintaa. Tutkimuksissa ja testeissä todettiin, että säädin oli ilmeisesti rikki, koska sillä ei ollut mahdollista toteuttaa magnetoinnin säätöä. Säätimestä esiteltiin eri säätöjen toimintaa, mutta niiden toimintaa ei voitu käytännössä kokeilla.

Asiasanat: tahtikone, tahtigeneraattori, tahdistaminen, tyhjäkäyntikoe, oikosulkukoe, pitkittäinen alkureaktanssi, poikittainen alkureaktanssi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Power Electricity

TIMO NIEMI-NIKKOLA:
Synchronous machine and the method of its regulator

Bachelor's thesis 48 pages
April 2013

Stamford BCA 164A synchronous machine and its AVR regulator SA 465-2 was examined in electric laboratories of Tampere University of Applied Sciences. The examinations were made for later educational purposes.

The characteristics of the synchronous machine were examined by testing the machine with open-circuit and short circuit tests. The results of these tests were compared to theoretical results and the results were correct. The reactances of the synchronous machine were also defined. In this thesis only direct-axis and quadrature-axis synchronous reactance and direct-axis subtransient reactance were possible to determine. The results of these reactances were close to the values of the manufacturer. It was not possible to define all the reactances because the machines excitation was carried out brushless. To define all the reactances it would have been necessary to get hands on the machines windings and this is not possible in brushless machines.

Before the control characteristic and load characteristic measurements the synchronous machine had to be synchronized to the electric network and instructions were made about the synchronization for educational purposes. The control characteristic and load characteristic measurements succeeded because the theoretical curves were close to the curves that were drawn up from the measurements.

The thesis included the examination of the synchronous machine's AVR regulator SA 465-2. During the examinations it became clear that the regulator was broken because it was not working properly. Therefore only the regulators adjustment functions were presented but it was not possible to try those functions in practice.

Key words: synchronous machine, synchronization, direct-axis synchronous reactance, quadrature-axis synchronous reactance

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TAHTIKONE.....	7
2.1	Rakenne	7
2.2	Harjaton tahtikone.....	8
2.3	Harjattoman tahtikoneen säätimen yleisperiaate	9
2.3.1	Herätys	9
2.3.2	Oikosulkumagnetointi.....	9
2.3.3	Alitaajuusrajoitus	10
2.3.4	Jännitteen säätö	10
2.4	Tyhjäkäyntikoe	11
2.5	Oikosulkukoe	13
2.6	Tahtikoneen reaktanssit	14
2.7	Säätökäyrä.....	14
2.8	Kuormituskäyrä	17
3	TUTKIMUKSEN KOHTEENA OLLUT TAHTIKONE JA SEN SÄÄDIN	19
3.1	Tahtikone Stamford BCA 164A	19
3.2	Tahtikoneen säädin SA 465-2.....	21
3.2.1	Magnetoinnin säätimen termistöä	22
4	MITTAUKSET	25
4.1	Tyhjäkäyntikokeen tulokset.....	25
4.2	Oikosulkukokeen tulokset.....	26
4.3	Pitkittäisen ja poikittaisen tahtireaktanssin määrittäminen.....	28
4.4	Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssin määrittäminen.....	32
4.5	Vastareaktanssin määrittäminen	35
4.6	Nollareaktanssin määrittäminen.....	35
4.7	Säätökäyrä.....	36
4.8	Kuormituskäyrät	40
4.9	Säätimen SA 465-2 toiminnan koestaminen.....	43
5	POHDINTA.....	46
5.1	Työn tulokset	46
	LÄHTEET.....	48

ERITYISSANASTO

U_0	tyhjäkäyntijännite, V
P_0	nimellistoimintapiste
δ	ekvivalenttinen ilmaväli
I_k	oikosulkuvirta, A
I_n	staattorin nimellisvirta, A
I_m, I_r	magnetointivirta, A
Φ, Φ_m	päävuoto, V _s
X_σ	hajareaktanssi, Ω
X_d	pitkittäinen tahtireaktanssi, Ω
X_q	poikittaisen tahtireaktanssi, Ω
X_d''	pitkittäinen alkureaktanssi, Ω
X_q''	poikittaisen alkureaktanssi, Ω
X_{hd}	pitkittäinen pääreaktanssi, Ω
$X_{\sigma 1}$	staattorikäämin hajareaktanssi, Ω
$X_{\sigma 3}$	magnetointikäämin hajareaktanssi, Ω
$X_{\sigma 2}$	vaimennuskäämin hajareaktanssi, Ω
X_2	vastareaktanssi, Ω
X_0	nollareaktanssi, Ω
T_k	kuormamomentti, N _m
AVR	automaattinen jännitteen säädin (Automatic Voltage Regulator)
UFRO	alitaajuusrajoitinpiiri (Under Frequency Roll Off)

1 JOHDANTO

Tässä työssä kerrotaan Stamfordin BCA164A vierasmagnetoidusta tahtikoneesta ja sen toiminnasta generaattorina. Työssä keskitytään harjattomasti magnetoituun tahtikoneeseen ja sen rakenteeseen. Lisäksi työssä käsitellään tahtikoneen magnetoinnin säädintä SA465-2 sekä sen toimintaa.

Tämän työn tavoitteena on tutkia tahtikonetta ja sen toimintaa sekä mallintaa mittauksia, joita tulevat sähkövoimatekniikan oppilaat voivat kyseisellä tahtikoneella toteuttaa. Tutkimukset kohdistuvat tahtikoneen reaktansseihin, oikosulku- ja tyhjäkäyntimittauksiin. Tahtikoneelle määritellään myös säätö- ja kuormituskäyrät sekä koestetaan sen magnetoinnin säätimen toimintaa. Tarkoituksena on syventää tähän mennessä opittuja asioita ja soveltaa niitä käytännön esimerkkien avulla. Työssä perehdytään myös magnetoinninsäätimeen ja sen toimintaan käytännössä.

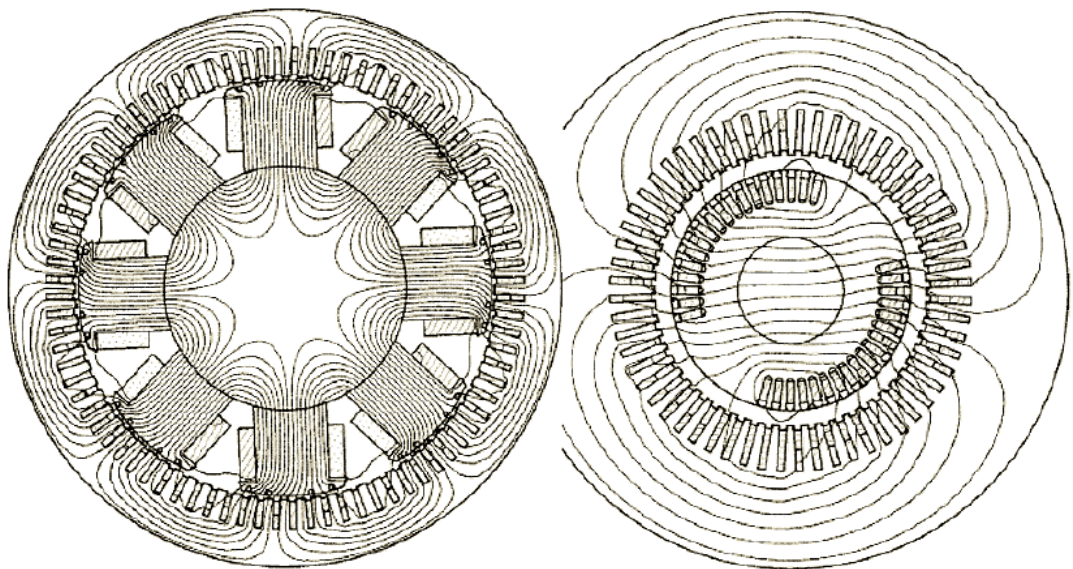
Tahtikoneet ovat yleisimpiä generaattoreina käytettävistä sähkökoneista. Ne kuuluvat keskeisenä osana sähköntuotantoon ja myös varavoimantuotantoon sähkökatkotilanteissa. Moottoreina tahtikoneita käytetään harvoin, koska varsinaisesti niistä on hyötyä vasta yli 1 MW moottorikäytöissä.

Tahtikoneen tahdistaminen sähköverkkoon kuuluu keskeisenä osana esimerkiksi varavoiman käyttöönottoa. Sähköverkkoon tahdistamisessa on omat ehtonsa, joiden toteuttua generaattori voidaan kytkeä verkkoon ja taas verkosta pois. Tahtikoneen verkkoon tahdistaminen on osa säätö- ja kuormituskäyrän määrittämistä. Työssä esitellään ohjeet tutkitun tahtikoneen verkkoon tahdistamiselle laboratorio-olosuhteissa jarrumoottorin avustuksella.

2 TAHTIKONE

2.1 Rakenne

Tahtikoneet voidaan jakaa kahteen erilaiseen konetyyppiin roottorirakenteensa mukaisesti. Nämä konetyypit ovat umpinapakone ja avonapakone. Tahtikoneen rakenne muodostuu kolmivaiheisella käämillä varustetusta staattorista ja staattorin keskellä pyörivästä roottorista. Tahtikoneen staattori muistuttaa oikosulkukoneen staattoria, mutta niiden roottorien rakenteet ovat erilaiset. Roottorin naparakenne magnetoidaan ulkoisella tasanäkölähteellä, eikä se vastaa oikosulkumoottoreissa olevaa oikosuljettua häkkikämmitystä. Avo- ja umpinapaisen tahtikoneen poikkileikkaus ja tahtikoneissa vaikuttavat magneettikentät on havainnollistettu kuvassa 1. (Hietalahti, 2011, 87.)



KUVA 1. Kuormitetun umpinapaisen tahtikoneen poikkileikkaus ja siinä vaikuttavat magneettikentät (Hietalahti, 2011, 87)

Tässä työssä käsitelty tahtikone on rakenteeltaan avonapainen, kuten tyypillisesti tämän kokoluokan tahtikoneet ovat. Umpinapaiset koneet ovat useimmiten kokoluokkaa 500–2000 MVA ja tyypillisin käyttökohte ovat höyryturbiinikäytöt. (Hietalahti, 2011, 87.)

Toisin kuin umpinapaisissa tahtikoneissa avonapaisten koneiden roottorin rakenne ei ole sylinterin muotoinen. Avonapaisissa tahtikoneissa roottorin rakenne koostuu erillisistä

navoista eli avonavoista. Näiden avonapojen ympärille käämitään magnetointikäämitys, joka on tyypillisesti lattakuparia tai muotolankaa. (Hietalahti, 2011, 87.)

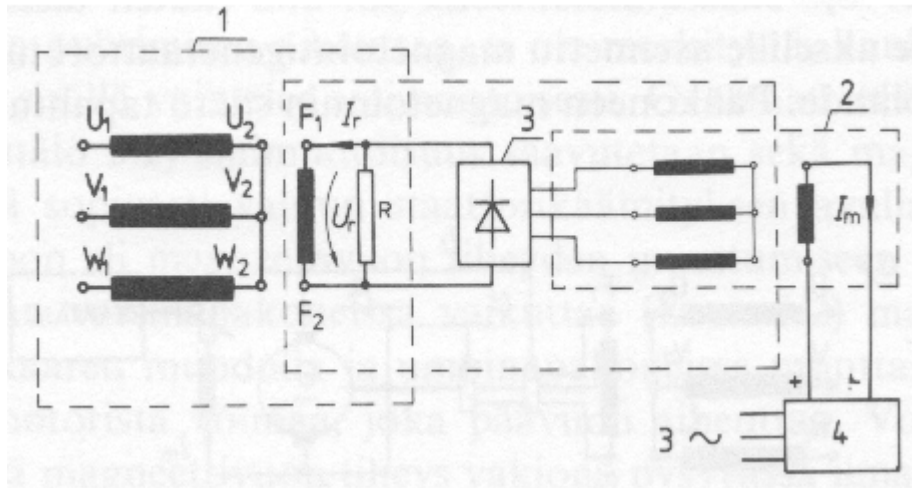
Avonapaisen tahtikoneen roottori on magneettisilta ominaisuuksiltaan epäsymmetrinen. Tämä tarkoittaa sitä, että roottorin ollessa eri asennoissa staattorin suhteen se johtaa eri tavalla. Roottorin ollessa navan suuntaisesti se johtaa magneettivuota erinomaisesti, kun taas roottorin ollessa napavälissä suuri ilmaväli johtaa magneettivuon huonoon johtumiseen. (Hietalahti, 2011, 87.)

2.2 Harjaton tahtikone

Tahtikoneita on sekä harjallisia että harjattomia. Tässä työssä tutkittu tahtikone on harjatonta mallia. Harjallisissa tahtikoneissa magnetointivirran syöttö tapahtuu kahdella koneen roottoriin kiinnitetyllä liukurenkaalla ja näihin koko ajan kosketuksissa olevilla hiiliharjoilla. Harjattomissa tahtikoneissa ei ole hiiliharjoja, vaan magnetointivirran syöttö toteutetaan koneen akselille sijoitetulla magnetointikoneella. Magnetointikoneella tuotettu vaihtojännite syötetään dioditasasuuntaajan kautta magnetointikäämitykseen, jolloin hiiliharjoja ei tarvita. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet, 1996.)

Harjattoman tahtikoneen magnetointikoneena toimii erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori (kuva 2). Magnetointikoneena toimiva vaihtosähkögeneraattori on sijoitettu pääkoneen kanssa samalle akselille. Tällöin magneettinavat ovat tahtikoneen staattorissa ja lähdejännite indusoituu roottorissa olevaan käämitykseen. Magnetointikoneen vaihtosähkögeneraattorissa muodostuva kolmivaiheinen vaihtojännite tasasuunnataan diodisillan avulla tasajännitteeksi U_r . Tämän tasajännitteen vaikutuksesta pääkoneen magnetoimiskäämiin F1-F2 johtuu magnetoimisvirta I_r .

Säätämällä magnetointikoneen vaihtosähkögeneraattorilla magnetoimisvirtaa I_m , vaikutetaan pääkoneen magnetoinnin säätöön. Kuvan 2 numeroilla tarkoitetaan: 1. pääkone, 2. magnetointikone, 3. diodisilta, 4. säädin. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 246.)



KUVA 2. Harjattoman tahtigeneraattorin magnetoinnin kytkentäkuva (Aura & Tonteri, Sähkämiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 246)

2.3 Harjattoman tahtikoneen säätimen yleisperiaate

Säätimen tavallisimmat osa-alueet ovat magnetointi, generaattorin herätys, oikosulkumagnetointi, alitaajuusrajoitus ja jännitteen säätö.

2.3.1 Herätys

Generaattorin herätyksellä tarkoitetaan sitä, että generaattori tarvitsee herättää, kun se käynnistetään. Käytännössä tahtikone varustetaan herättingeneraattorilla, jonka yhteen napaan on liitetty kestopagneetti. Kestomagneetin avulla luodaan remanenssivuo, jolloin magnetoimisgeneraattorin staattoriin indusoituu jännite. Tämä indusoitunut jännite herättää generaattorin, koska tällöin tahtikoneen napakäämiin syntyy magnetoimisvirta. Väärään suuntaan magnetoitu kestopagneetti ei herätä tahtikonetta. Tahtikone ei myöskään herää, jos sitä pyöritetään kyseisessä tilanteessa huomattavasti alle tahtinopeuden. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 250.)

2.3.2 Oikosulkumagnetointi

Sähköverkkojen oikosulkusuojauksen on toimittava aina selektiivisesti ja näin on myös silloin, kun verkkoa syötetään tahtigeneraattorilla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että

ylivirtareleiden toiminnan seurauksena generaattorin syöttöä hallitsevan katkaisijan on toimittava, kun generaattorin syöttämässä verkossa tapahtuu oikosulku. Generaattorin vaihejännite saattaa oikosulkutilanteessa pienentyä noltaan asti, jolloin myös säätimelle syötetty magnetointiteho pienenee. Tästä syystä oikosulkutilanteita varten generaattorin vaihejohtimiin kytketään virtamuuntajat, jotka toiminnallaan oikosulkutilanteissa magne-toivat magnetoimisgeneraattoria. Yksi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa muodostuu suurempi oikosulkuvirran arvo kuin kolmivaiheisessa oikosulussa. Yksi- ja kaksivaihei-sissa oikosuluissa vaihejännite säilyy osittain, minkä ansiosta säädin magneto-i magnetoimisgeneraattoria myös normaalitietä. Kolmivaiheisessa oikosulussa tarvitaan suurin magnetointi, jotta oikosulkua voidaan ylläpitää. Jotta relesuojaus toimii ja generaattorin katkaisija aukeaa, tarvitsee oikosulkumagnetoinnin avulla luodun oikosulkuvirran I_k olla vähintään $3 \cdot I_n$. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 251.)

2.3.3 Alitaajuusrajoitus

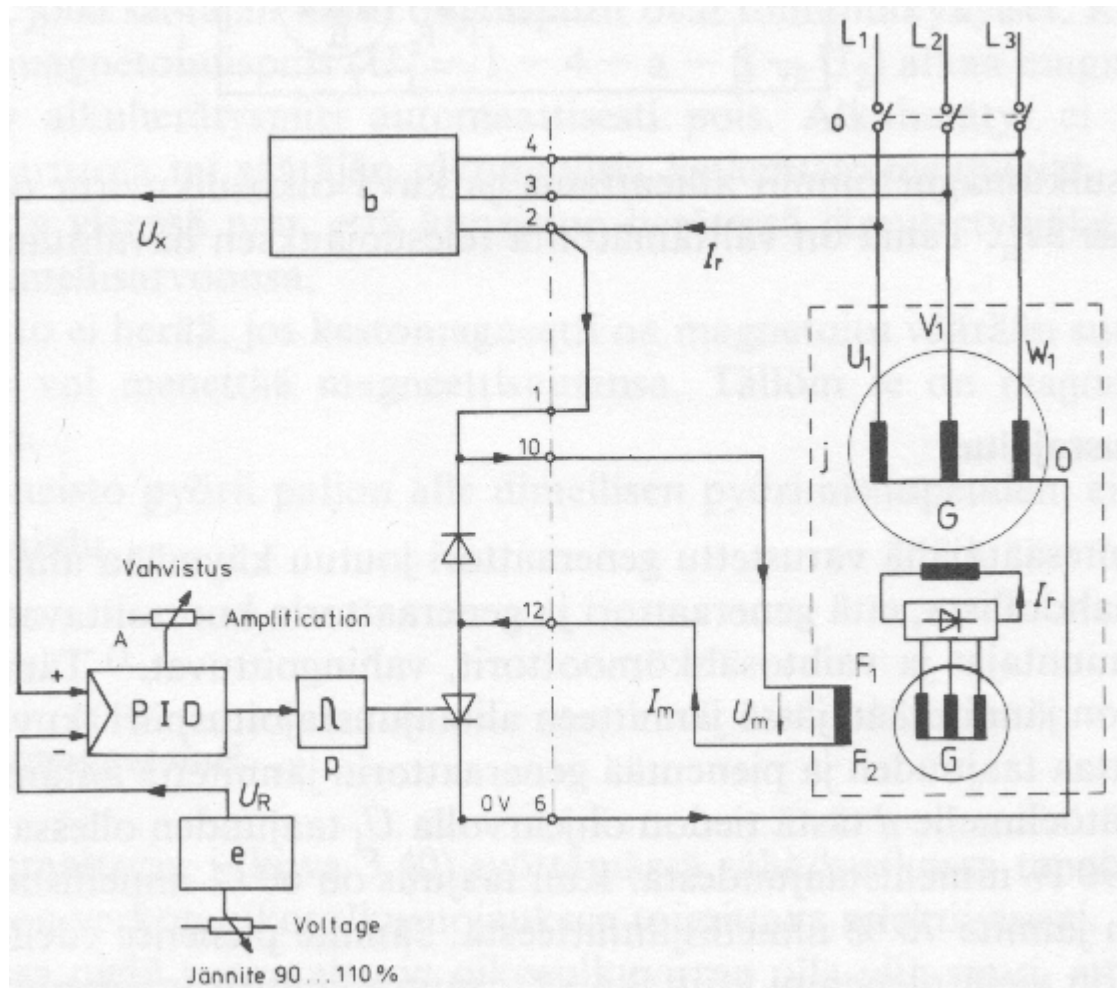
Generaattori ja sen kuormana olevat laitteet eivät välttämättä kestä jännitteensäätimellä varustetun generaattorin alinopeutta, minkä takia säätäjät varustetaan jännitteen alitaajuusrajoituspiirillä. Alitaajuusrajoitinpiiri seuraa generaattorin taajuutta ja säätää sen jännitettä tarvittaessa. Alitaajuusrajoitus on tässä työssä tutkimuksen alaisena olleessa tahtikoneessa toteutettu UFRO-säädöllä, jonka toiminta on selitetty tarkemmin myöhemmin tässä työssä. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996.)

2.3.4 Jännitteen säätö

Normaalissa kuormitustilanteessa tahtikoneen säätimellä vaikutetaan magnetoimisvirran I_m arvoon PID-säätimen avulla. PID-säädin määrittelee liipaisukulman ohjaamalleen tyristorille, joka varsinaisesti toteuttaa halutun ohjauksen.

Kuvalla 3 havainnollistetaan tahtikoneen jännitteen säätöä ohjaavan PID-säätimen toimintaa. PID-säätimelle muodostuu oloarvojännite U_x piirin b kautta. Säätimen piirikor-tissa olevan VOLTAGE-potentiometrin avulla määritetään ohjearvojännite U_R piiristä

e. Piiri b muodostaa oloarvojännitteen U_x muuttamalla generaattorin pääjännitteet niiden tehollisarvoihin U verrannolliseksi tasajännitteeksi U_x . Piirin e VOLTAGE-potentiometrillä ohjataan tahtikoneen liitinjännitettä U 0,9 ja 1,1 välillä liitinjännitteestä U_n .

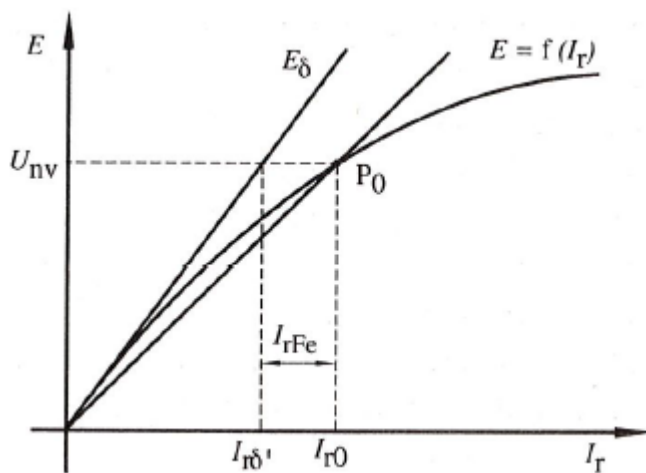


KUVA 3. Harjattoman tahtikoneen jännitteen säätöpiiri (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 278)

2.4 Tyhjäkäyntikoe

Tahtikoneen ajatellaan toimivan tyhjäkäyväenä, kun sen staattori on kuormittamaton, jolloin staattorin virta on arvossa nolla. Tahtikonetta magnetoidaan magnetointikäimityksen avulla. Tahtikoneen päävuo Φ synnyttää sähkömotorisen jännitteen E_v , kun tahtikonetta magnetoidaan tasavirralla I_r . Kun magnetoimisvirtaa I_r lisätään, sähkömotorisenjännitteen E_v käyrämuoto on ensiksi lineaarinen, mutta raudan kyllästyessä kasvu hiljenee ja käyrämuoto alkaa hiljalleen kaartua.

Kuvassa 4 on esimerkki tyhjäkäyntikokeen eri suureiden käyrämuodoista. Tahtikoneen ollessa täysin lineaarinen, jollakin tietyllä ekvivalenttisella ilmavälillä δ , sitä voitaisiin kuvata suoralla E_δ . Suora $E=f(I_r)$ kuvaa nimellistoimintapisteen P_0 kautta kulkevaa tyhjäkäyntikäyrää, jossa raudan kyllästymistä ei huomioida ja näin sen katsotaan olevan lineaarinen. Kolmas kuvassa oleva käyrä edustaa aikaisemmin kuvattua käytännön tilannetta, jossa käyrä kulkee nimellistoimintapisteen kautta ja raudan kyllästyminen on selkeästi havaittavissa.



KUVA 4. Tyhjäkäyntikokeen teoreettinen kuvaaja (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 243)

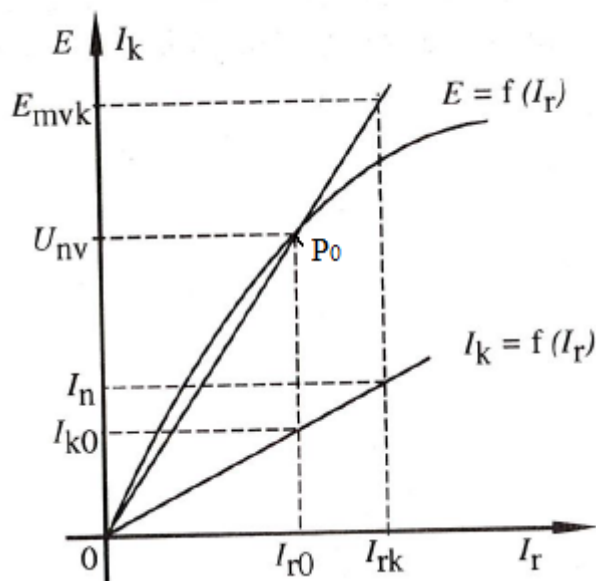
Tahtikoneen epälineaarisuus vaikuttaa ratkaisevasti sen käsittelyyn. Lineaariseksi oletetun koneen tyhjäkäyntihetkellä sen napajännite on arvossa $U_{nv} = E_{mv}$, kun sitä magnetoidaan päävuolla Φ_m . ”Kuormitettaessa konetta, aiheuttaa kuormituksen virta staattorissa pyörivän magneettikentän, jonka aseman napapyörän kenttään Φ_m nähden määräytyy kuormituksen vaihesiirron perusteella.” (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 243.) Tämä taas riippuu kuormituksen luonteesta, sillä resistiivisellä, kapasitiivisella ja induktiivisellä kuormalla kaikilla on erilaiset vaikutukset vaihesiirtokulmaan. ”Puhdas pätökuorma aiheuttaa poikittaiskentän, joka on päävuohon Φ_m nähden 90° kulmassa. Puhdas loiskuorma aiheuttaa pääkentän suuntaisen pitkittäiskentän. Induktiivinen kuorma aiheuttaa pääkentälle vastakkaisen pitkittäiskentän, ja kapasitiivinen kuorma pääkentän suuntaisen pitkittäiskentän.” (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 243.) Loiskuorman vaikutus näkyy pääkentän suuntaisena pitkittäiskenttänä. Erilaiset kuormitusvirrat aiheuttavat

tahtikoneeseen erilaisia magnetointitilan muutoksia, joita kutsutaan ankkurireaktioiksi. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 243.)

2.5 Oikosulkukoe

Tahtikoneen oikosulkutilannetta voidaan pitää kuormituksen erikoistapauksena. Napaoikosulun tapahtuessa kuormituksen impedanssi ja tahtikoneen napajännite saavat molemmat arvon nolla. Oikosulkutilanteessa koneen kuormitusvirtaa kutsutaan oikosulkuvirraksi I_k . Koneen hajareaktanssi X_σ on tässä tilanteessa suurempi kuin koneen resistanssi R . Näin ollen resistanssin arvo on nolla. Tämän perusteella on laadittu kuvan 5 kuvaajat. (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996.)

Kuvassa 5 on esitetty erään tahtikoneen tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeen kuvaajat. Oikosulkuvirtaa kuvaa suora $I_k = f(I_r)$. Tahtikoneen oikosulkupiirin impedanssin ollessa pieni saavuttaa oikosulkuvirran arvo koneen nimellisvirran arvon melko nopeasti. Oikosulkukokeen mittaustuloksista saatujen kuvaajien tulisi olla oikosulkuvirtaa kuvaavan suoran mukaisia. Kuvassa 5 nimellisjännitteellä tyhjäkäyvän koneen magnetointia kuvaa I_{r0} ja I_{k0} kuvaa tämän magnetoinnin oikosulkuvirran arvoa. Koneen nimellisvirran magnetoinnin arvoa kuvaa I_{rk} .

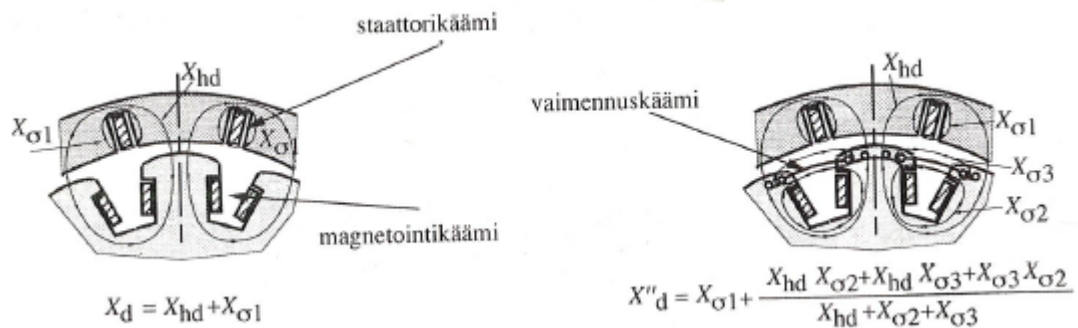


KUVA 5. Oikosulkukokeen ja tyhjäkäyntikokeen kuvaaja (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 246)

2.6 Tahtikoneen reaktanssit

Tahtikoneen reaktanssit muodostuvat koneen magneettikentistä. Reaktanssit voidaan laskea koneen mittojen perustella tai mitata koneen valmistusvaiheessa koekäytön yhteydessä. Reaktansseja on sekä pitkittäisiä että poikittaisia. Asennoilla kuvataan roottorin asentoa suhteessa staattorin magneettikenttään. Pitkittäis- ja poikittaisasennon reaktansseja ovat tahtireaktanssit, alkureaktanssit. Näiden lisäksi tahtikoneelle voidaan määrittää vastareaktanssi ja nollareaktanssi. Tahtireaktanssit määräytyvät jatkuvan tilan arvojen perusteella, joita voivat olla tyhjäkäynti- tai oikosulkutilanne sekä normaalikuormatilanne.

Tahtikoneen reaktanssit muodostuvat eri magneettikenttien yhteisistä vaikutuksista. Kuvalla 6 on havainnollistettu reaktanssien muodostumista piirrosten ja laskentakaavojen avulla teoreettisesta näkökulmasta. Pitkittäinen tahtireaktanssi X_d muodostuu pitkittäisen pääreaktanssin X_{hd} ja staattorikäämin hajareaktanssin $X_{\sigma 1}$ summasta. Alkureaktanssin muodostumiseen vaikuttaa pitkittäinen pääreaktanssi, staattorikäämin hajareaktanssi, magnetointikäämin hajareaktanssi $X_{\sigma 2}$ ja vaimennuskäämin hajareaktanssi $X_{\sigma 3}$.



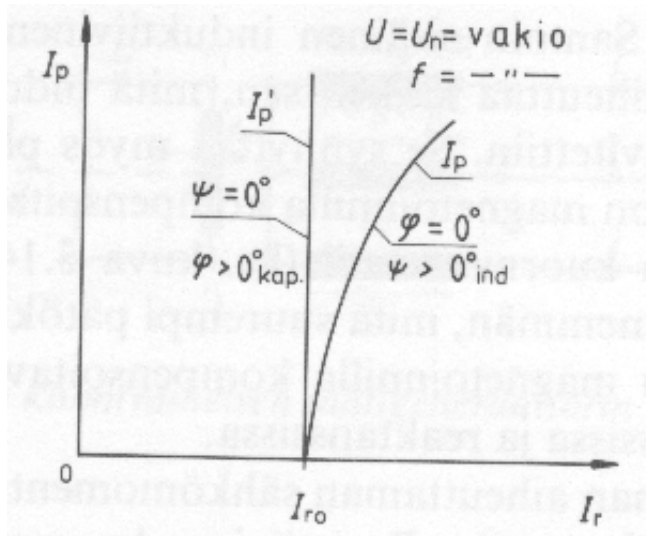
KUVA 6. Tahtikoneen reaktanssien muodostuminen (Aura & Tonteri, Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet, 1996, 264, muokattu)

2.7 Säätökäyrä

Säätökäyrien avulla voidaan tutkia resistiivisen, induktiivisen ja kapasitiivisen kuorman ja erilaisten tehokertoimien arvojen vaikutusta koneen magnetointiin.

Resistiivisellä kuormalla säätökäyrä on lähes suora. Suoraa käyristää tahtikoneen sisäinen induktiivinen loisvirtakomponentti, jonka koneen päävuolle aiheuttaman vastakkaisen ankkurikentän vaikutus kompensoidaan ylimagnetoimalla tahtikoneetta. Resistiivisen kuorman kasvaessa tahtikoneen magnetoiminta pitää kasvattaa. Käytännössä tahtigeneraattorin magnetoiminnalla kompensoidaan myös jännitehäviöt vaihekäämin resistanssissa ja reaktanssissa. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 256.)

Kuvassa 7 on resistiivisen kuorman teoreettinen säätökäyrä. Resistiiviselläkin kuormalla generaattoria on hieman ylimagnetoitava, jotta sisäisen induktanssin vaikutukset voidaan kompensoida. Kuvan tilanteessa tahtikoneen jännite ja taajuus ovat vakioita. Koneen sisäisen päätövirtakomponentin ollessa I'_p on sisäinen vaihesiirtokulma $\psi = 0^\circ$ ja ulkoinen vaihesiirtokulma $\varphi > 0^\circ$. Sisäisen päätövirtakomponentin ollessa $I'_p = I_p \cos \psi$, sisäinen vaihesiirtokulma $\psi = > 0^\circ$ ja ulkoinen vaihesiirtokulma $\varphi = 0^\circ$.

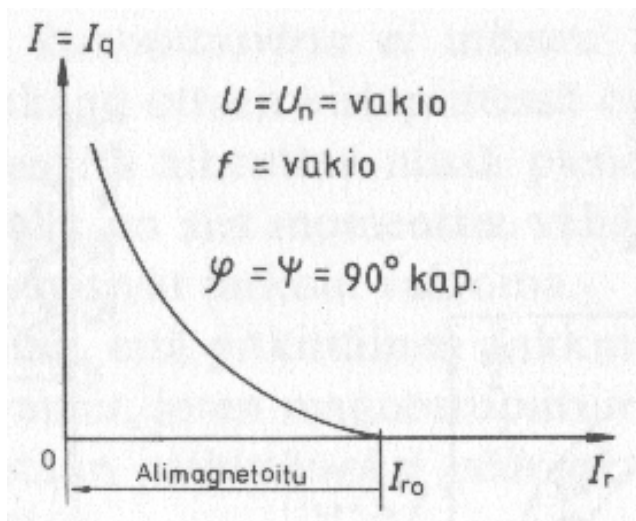


KUVA 7. Resistiivisen kuorman säätökäyrä (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 255)

Kapasitiivisesti kuormitetun tahtikoneen ”kuormitusvirran synnyttämä ankkurivuo Φ_{ad} on virtansa kanssa samanvaiheinen, joten se on päävuon Φ_m kanssa samanvaiheinen, siis myös samansuuntainen.” (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 250.) Tällöin kapasitiivinen loisvirta magnetoit kuten tahtikoneen magnetoimisvirta eli molemmat virrat magnetoivat samaan suuntaan. Tällöin kapasitiivinen loisvirta toimii vahvistavana tekijänä tahtikoneen päämagneettikenttään nähden. Päämagneettikentän vahvistuminen aiheuttaa tahtikoneen lähdejännitteen nousemisen. Koneen mag-

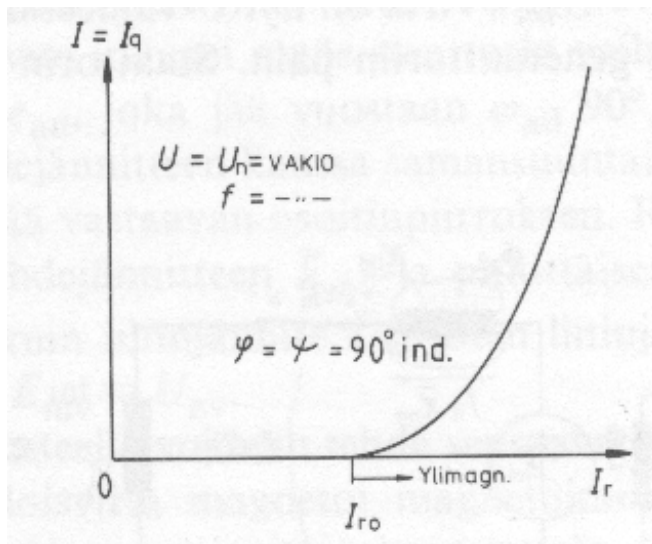
netointia pitää tästä syystä pienentää eli alimagnetoida, jos koneen liitinjännitteen halutaan olevan vakio. Kapasitiivisen kuorman edelleen kasvaessa tahtikoneen magnetointia on pienennettävä. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 252.)

Kuvassa 8 on alimagnetoidun kuorman teoreettinen säätökäyrä. Kuvasta voidaan nähdä alimagnetoinnin vaikutus generaattorin staattorivirtaan ja magnetointivirtaan, kun jännite ja pyörimisnopeus ovat vakioita. Kuorman kasvaessa staattorivirta kasvaa kohti nimellistä arvoaan ja generaattorin magnetointia vähennetään.



KUVA 8. Kapasitiivisen kuorman säätökäyrä (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 252)

Induktiivinen loisvirta toimii vastakkain magnetoimisvirran kanssa. Loisvirta magnetoimisvirran luomaa päävuota vastaan, jolloin ankkurireaktion aiheuttama lähdejännite muuttaa kuorman kasvaessa pääjännitettä pienemmäksi. Tästä syystä tahtikoneita on ylimagnetoitava, jotta ankkurireaktion vaikutus kumoutuu ja tahtikoneen jännite pysyy nimellisessä arvossaan. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 249.) Kuvassa 9 on ylimagnetoidun kuorman teoreettinen säätökäyrä. Vaaka-akselilla on magnetointivirran arvo ja pysty-akselilla staattorivirran arvo.

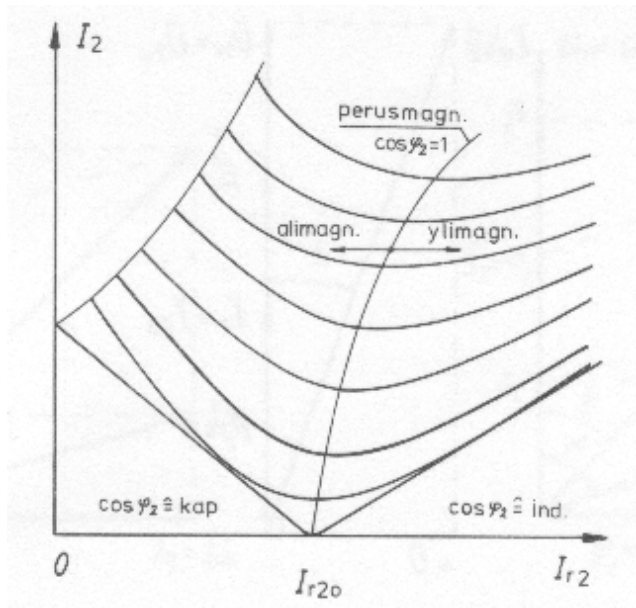


KUVA 9. Induktiivisen kuorman säätökäyrä (Aura & Tonteri, Sähkämiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 249)

2.8 Kuormituskäyrä

Kuormituskäyrillä eli V-käyrillä tutkitaan erikokoisten kuormitusten vaikutusta tahtikoneen magnetoimisvirtaan ja staattorivirtaan ali- ja ylimagnetoimalla konetta. Yksittäinen kuormituskäyrä määritetään aina jollakin vakioteholla. Kuormituskäyrillä voidaan myös havainnollistaa tahtikoneen käyttöä tahtigeneraattorina loistehon kompensointiin. Koneen ylimagnetoimtilanteessa generaattori syöttää verkkoon induktiivista loistehoa ja toimii näin loistehon kompensoijana verkon kannalta. Alimagnetoimalla generaattoria induktiivisen loistehon tarve kasvaa, jolloin generaattori ottaa tarvitsemansa induktiivisen loistehon verkosta.

Kuvasta 10 nähdään erikokoisten kuormien yli- ja alimagnetoiminnan vaikutukset pystyakselin staattorivirtaan ja vaaka-akselin magnetointivirtaan. Kuvaan on myös määritelty alimagnetoituille kuormille rajat, joiden jälkeen generaattori putoaa tahdistasta.



KUVA 10. Tahtigeneraattorin teoreettinen kuormituskäyrä eli V-käyrä (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 265)

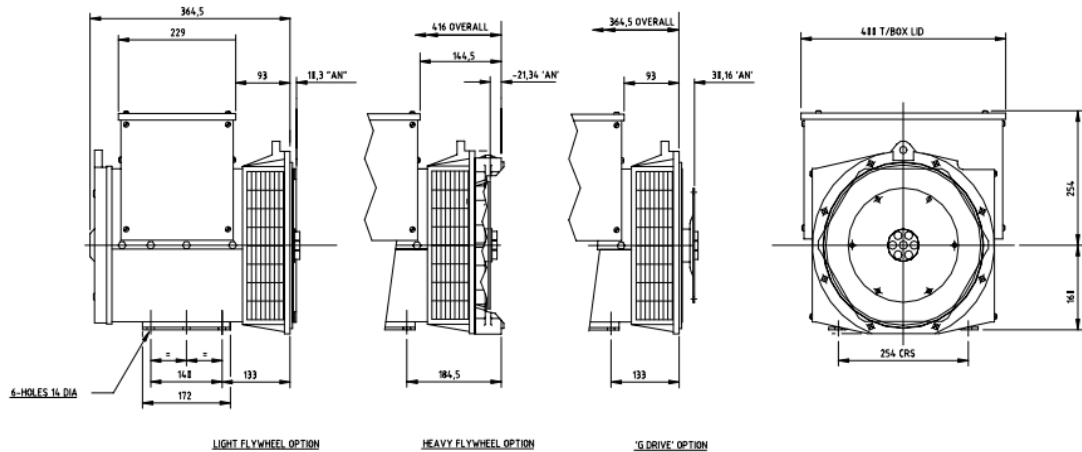
3 TUTKIMUKSEN KOHTEENA OLLUT TAHTIKONE JA SEN SÄÄDIN

3.1 Tahtikone Stamford BCA 164A

Työssä tutkimuksen kohteena oleva tahtikone on Stamford BCA 164A. Tämä tahtikone on vierasmagnetoitu harjaton tahtikone. Kuvissa 11 ja 12 on esiteltynä koneen mitat ja ominaisuudet sekä kuvia koneen rakenteesta.

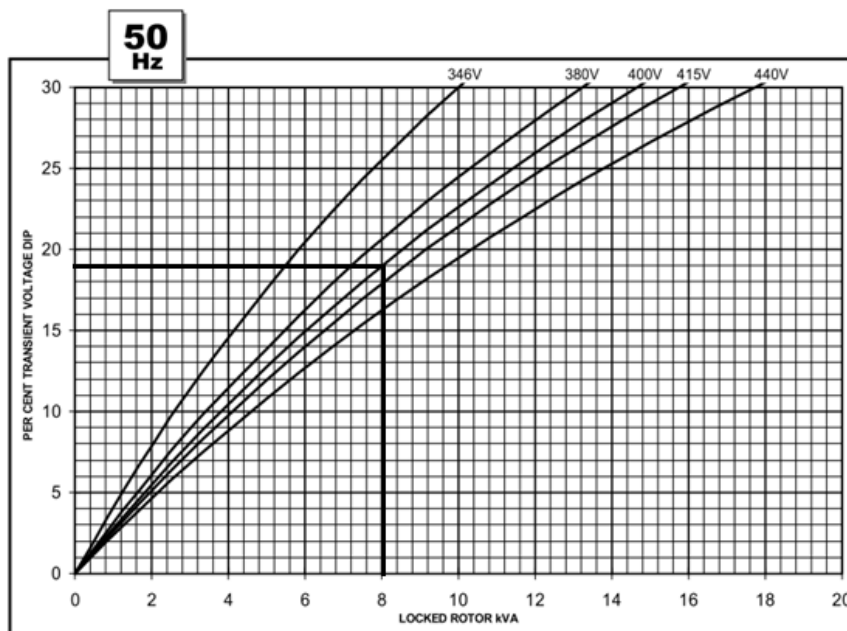
CONTROL SYSTEM	SELF EXCITED							
A.V.R.	STANDARD SX460				OPTIONAL SA465			
VOLTAGE REGULATION	± 1.5 %				± 1.0 %			
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	SELF EXCITED MACHINES DO NOT SUSTAIN A SHORT CIRCUIT CURRENT							
INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER CONCENTRIC							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	12							
STATOR WDG. RESISTANCE	1.62 Ohms PER PHASE AT 22°C SERIES STAR CONNECTED							
ROTOR WDG. RESISTANCE	0.44 Ohms at 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6306 - 2RS. (ISO)							
WEIGHT COMP. GENERATOR	88 kg							
WEIGHT WOUND STATOR	22.5 kg							
WEIGHT WOUND ROTOR	25.64 kg							
WR ² INERTIA	0.0923 kgm ²							
SHIPPING WEIGHTS in a crate	101 kg							
PACKING CRATE SIZE	64 x 54 x 72 (cm)							
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	0.071 m ³ /sec 150 cfm				0.09 m ³ /sec 191 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127	240/120	254/127	266/133	277/138
kVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	8.1	8.1	8.1	6.2	9.6	10.2	10.2	10.2
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	1.994	1.800	1.672	1.940	2.367	2.248	2.057	1.889
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.204	0.184	0.171	0.199	0.242	0.230	0.210	0.193
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.127	0.115	0.107	0.124	0.152	0.144	0.132	0.121
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	0.992	0.895	0.831	0.967	1.177	1.117	1.022	0.939
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.229	0.207	0.192	0.223	0.272	0.258	0.236	0.217
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.080	0.072	0.067	0.078	0.095	0.090	0.083	0.076
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.191	0.172	0.160	0.186	0.226	0.215	0.197	0.181
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.086	0.078	0.072	0.084	0.103	0.098	0.089	0.082
REACTANCES ARE SATURATED VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED								
T _d TRANSIENT TIME CONST.	0.012 s							
T'' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.003 s							
T' _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	0.2 s							
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.004 s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d							

KUVA 11. Stamford BCA 164A tahtikoneen ominaisuudet (Newage AVK SEG, 2002)



KUVA 12. Stamford BCA 164A tahtikoneen fyysiset mitat (Newage AVK SEG, 2002)

Tahtikone toimii kuvassa 13 moottorina. Kuvasta nähdään moottorin käynnistyessä muodostuvan hetkellisen jännitekuopan suuruus, kun konetta käynnistetään eri nimellisjännitteillä ja roottorille lukituilla erikokoisilla kuormilla. Kuvassa x-akselilla on koneen roottorilla olevan lukitun kuorman koko kVA:na ja y-akselilla hetkellisen jännitekuopan suuruus %. Käyrillä kuvataan eri nimellisjännitteillä muodostuvia arvoja. Tutkitulla tahtikoneella nimellisjännite oli 400 V ja nimellinen näennäisteho 8,1 kVA. Hetkellinen jännitekuoppa on noin 19 % koneen nimellisjännitteestä 400 V, kun kone käynnistetään 8,1 kVA:n kuormalla.



KUVA 13. Stamfordin BCA 164A tahtikoneen käynnistyskäyrä moottorina eri nimellisjännitteillä ja 50 Hz:n taajuudella, kun koneen roottori lukitaan johonkin näennäistehon arvoon (Newage AVK SEG, 2002, muokattu)

3.2 Tahtikoneen säädin SA 465-2

Tahtikoneen säädin on SA 465-2. Tämä säädin on AVR-tyypin säädin, joka tarkoittaa automaattista jännitteen säädintä. Tämän säätimen ominaisuudet ja tarkemmat tekniset tiedot on kerrottu kuvassa 14. Säädin ohjaa puoliaaltotasasuunnatuilla tyristoreilla muun muassa tahtikoneen magnetointia. Säädin voidaan asettaa toimintaan hyvin yksinkertaisesti. Säätimelle tuodaan mittatietoina koneen syöttämän pääjännite ja virta, jolloin näiden tietojen ja asetettujen parametrien avulla säädin magnetoi tahtikonetta halutulla tavalla. Säädin tarvitsee käynnistysvaiheessa alkutehoa. Tämä teho tuotetaan säätimelle jännitemittauksen välityksellä, jolloin säädin ottaa alkutehonsa remanenssivuosta. (Heikkilä, 2007)

TECHNICAL SPECIFICATION	
SENSING INPUT	
Voltage	100 - 130 } Jumper 170 - 250 } Selectable
Frequency	50 - 60Hz nominal
Phase	2
Wire	2
POWER INPUT	
Voltage	100 - 250 Vac
Frequency	50 - 60Hz
Phase	1
Wire	2
OUTPUT	
Voltage	75dc @ 170 Vac input 105 dc @ 240 Vac input
Current	Continuous 4A dc Transient 7.5A for 10 seconds
Field resistance	10 Ω minimum up to 170Vac input 15 Ω minimum up to 250Vac input
REGULATION	(See Note 1) +/- 1.0% Average
THERMAL DRIFT	0.05% per $^{\circ}\text{C}$
TYPICAL SYSTEM RESPONSE	
	Field current to 90% 80ms Machine Volts to 97% 300ms
EXTERNAL VOLTAGE ADJUSTMENT	+/- 10% with 1 K Ω trimmer
UNDER FREQUENCY PROTECTION	
Set Point (See Note 2)	95% Hz
Slope	170% down to 30 Hz
UNIT POWER DISSIPATION	12 watts maximum
BUILD UP VOLTAGE	3.5 V ac (@ AVR terminals)
ACCESSORY INPUT	+/- 1V input = +/- 10% change in output volts @ 415V nominal
QUADRATURE DROOP	
Maximum sensitivity (10 Ω Burden)	0.07 A for 5% droop @ 0p.f.
ENVIRONMENTAL	
Vibration	20-100 Hz 50 mm/sec 100 Hz-2 kHz 3.3g
Relative Humidity	0-60 $^{\circ}\text{C}$ 95% RH
Operating Temperature	-40 to +70 $^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	-55 to +80 $^{\circ}\text{C}$
Weight	360 grams
NOTES	
	1. With 4% engine governing. 2. Factory set, semi sealed, selectable.

KUVA 14. Säätimen SA 465-2 tekniset tiedot (Heikkilä, 2007, 59)

3.2.1 Magnetoinnin säätimen termistöä

Jännitteen säätö

Stamfordin BCA 164A tahtikoneen ulostulojännite asetetaan luonnollisesti jo tehtaalla, mutta siihen voidaan kuitenkin vaikuttaa muuttamalla VOLTS-säätöä (ks. kuva 15.). Säätimen mukana tulleiden ohjeiden mukaisesti jännitteen säätö tulisi toteuttaa niin, että ennen tahtikoneen käynnistämistä VOLTS-säätö tulisi kääntää vastapäivään siten, että jännite alkaa liikkua edestakaisin hieman haluttua jännitettä suuremmalla arvolla. VOLTS-, TRIMMER- ja STABILITY-säätöjen tulee olla käännettynä vastapäivään puoleenväliin koko säädöstään. Tämän jälkeen säätimeen lisätään sopiva ulkoinen jännitteenmittaus ja tahtikone käynnistetään ja pyöritetään tyhjäkäynnissä tahtinopeudella. Koneen käynnistyttyä voi olla mahdollista, että UFRO-toiminto alkaa toimia, koska jännite saattaa laskea tehtaalla asetetun raja-arvon alle. Tämän säätimen raja-arvo on tyypillisesti 95 % halutusta jännitteen arvosta, 400 V. Käynnistyksen jälkeen VOLTS-säädintä käännetään myötäpäivään, jotta jännitteen vaihtelu tasoittuisi haluttuun jännitteen arvoon. Jos koneen vakaus on huono, tulee vakautta säätää STABILITY-säädön avulla. (Newage AVK SEG , 2006.)

Stabiiliuden säätö

AVR-tyyppin säätimeen sisältyy myös tahtikoneen jännitteen vakaudesta huolehtiva piiri. Piirissä olevalla kytkimellä voidaan alustaa säädin erikokoisille koneille, jolloin säädin voidaan asetella käytettävää tahtikonetta varten. Oikeanlaiset säädöt STABILITY-säädölle löydetään pyörittämällä konetta tyhjäkäynnissä ja samanaikaisesti hitaasti kääntämällä STABILITY-säädintä vastapäivään siihen asti, kunnes tahtikone muuttuu hiljalleen epävakaaksi. Optimikohta löytyy kääntämällä tästä asemasta säätöä hiukan myötäpäivään. (Newage AVK SEG , 2002.) Stabiiliuden säätöä käytetään esimerkiksi sähköverkon loistehon kompensoinnissa. Magnetointia säätämällä voidaan hallita tahtikoneen verkkoon syöttämän induktiivisen loistehon määrää.

UFRO-säätö (Under frequency roll-off)

Säätimelle on tehtaalla aseteltu ns. kulmapiste (knee point) taso, jolloin säädin alkaa pienentää tahtikoneen liitinjännitettä magnetointia pienentämällä, jottei koneen käämi-

tys joutuisi liian suuren kuormituksen alaiseksi. AVR-säätö toimii yhdessä alinopeuspiirin kanssa, joka antaa tiedon säätimelle joko voltteina tai hertseinä. Tahtikoneen nopeuden pudotessa riittävästi alle asetetun nopeuden UFRO-piiri aloittaa toimintansa ja punainen LED-valo syttyy. Näin tapahtuu koneen pyörimisnopeuden pudotessa alle 47 Hz:n eli ennalta asetetun knee point -tason alle. (Newage AVK SEG , 2002.)

Tehtaalla aseteltu kulmapiste taso on sinetöity ja tason muuttaminen tarkoittaa sinetin poistamista. Kulmapiste tasoa säädetään UFRO-säädintä kääntämällä. Ainoa asetus, mitä tässä säädössä voidaan muuttaa ilman sinetin poistamista, on koneen nimellispyörimisnopeuden muuttaminen joko 50 Hz:iin tai 60 Hz:iin. (Newage AVK SEG , 2002.)

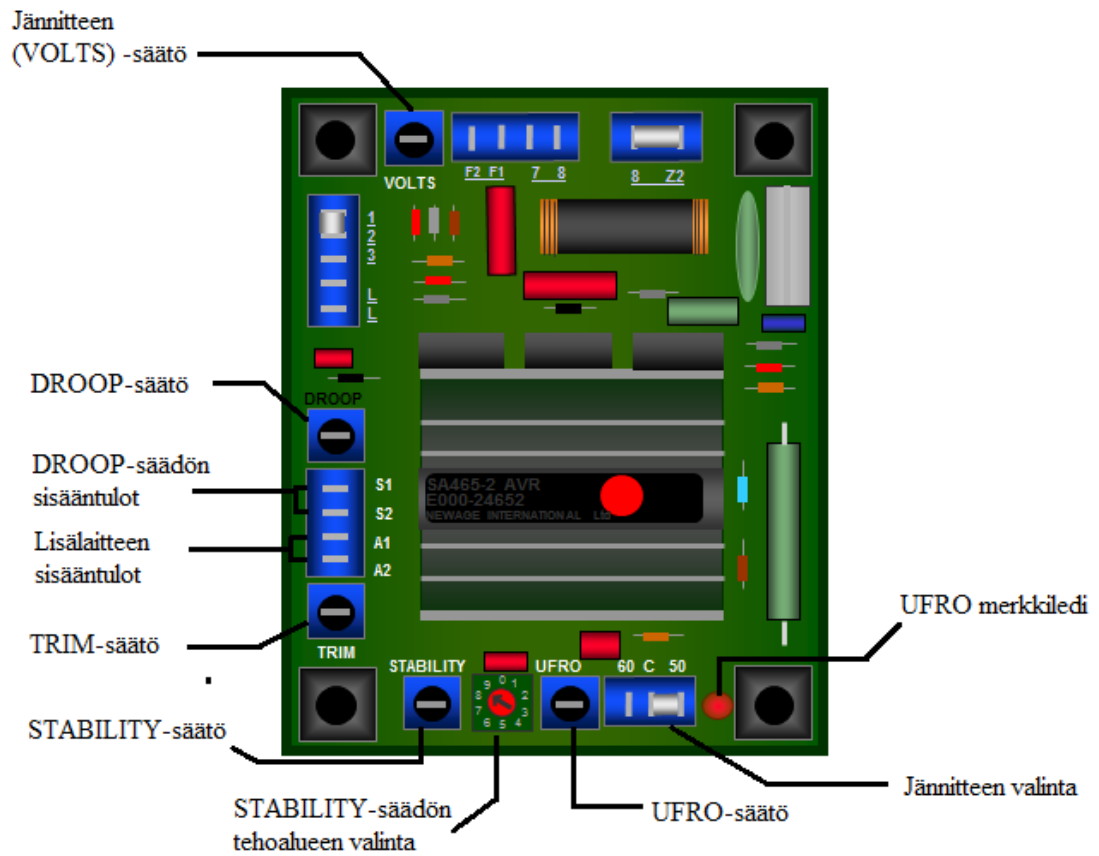
DROOP-säätö

DROOP-säädöllä vaikutetaan tahtikoneen jännitejäykkyyteen ja sillä voidaan asettaa kuormitustilanteen jännitteenalenemalle raja-arvo. Tahtikoneita voidaan käyttää generaattoreina myös rinnankäytössä ja tätä tilannetta varten säädin on varusteltu DROOP-säädöllä. DROOP-säädössä AVR-säädin saa tehokertoimen määrittelemän signaalin, jonka avulla varsinainen säätö toteutetaan. DROOP-säädön vaikutusta voidaan lisätä kääntämällä säätöruuvia myötäpäivään ja vähentää kääntämällä säätöruuvia vastapäivään. DROOP-säätö asetellaan tehtaalla niin, että se sallii noin viiden prosentin jännitteen aleneman täyden kuorman tehokertoimen ollessa nolla. (Newage AVK SEG , 2002.)

TRIM-säätö

AVR-säätimeen voidaan myös kytkeä lisälaitteita, kuten tehokertoimen säädin tai jännitteen hienosäädin. Jännitettä voidaan hienosäätää ulkoisella potentiometrillä, joka kytketään säätimen A1 ja A2 liittimiin. Vastapäivään säätämällä lisälaitteen vaikutus katoaa ja myötäpäivään kääntämällä se vahvistuu. Normaalissa käyttötilanteessa, kun jännitteensäädintä käytetään tehokertoimen säätimen rinnalla, käännetään säädin täysin myötäpäiväiseen asentoon. (Newage AVK SEG , 2002.)

Aikaisemmin kerrottujen termien säätöjen sijainti säätimen SA 465-2 piirikortilla on tarkemmin selitetty alla olevassa kuvassa 15.

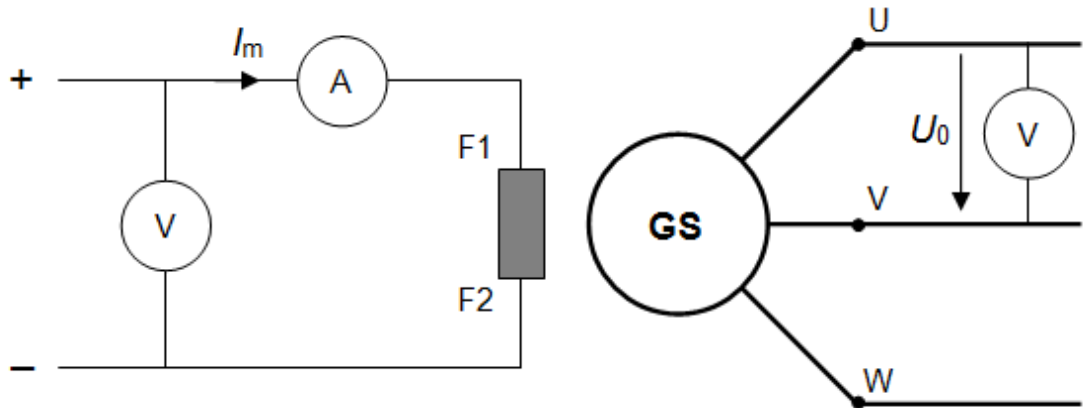


KUVA 15. Tahtikoneen säädin SA 465-2 (Newage AVKSEG, muokattu)

4 MITTAUKSET

4.1 Tyhjäkäyntikokeen tulokset

Tyhjäkäyntikoe suoritettiin sähkölaboratoriossa kuvassa 16 esitetyn kytkennän mukaisesti. Koe toteutettiin tahtikoneen nimellisellä pyörimisnopeudella eli 1500 1/min ja 50 Hz.



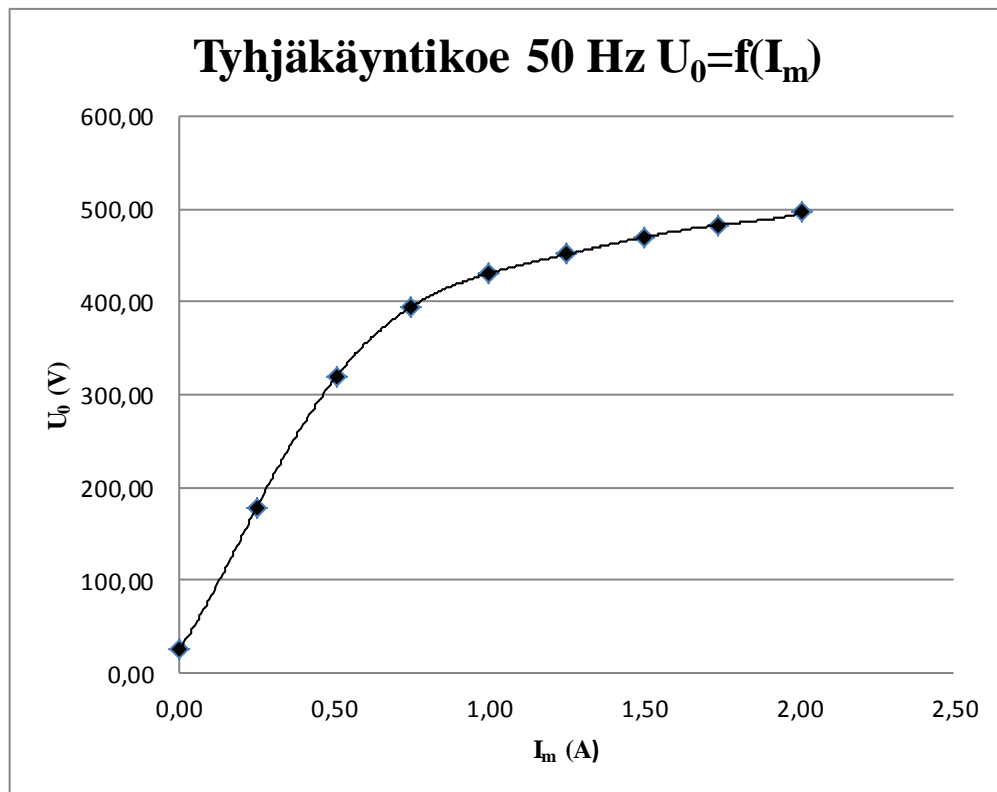
KUVA 16. Tyhjäkäyntikokeen mittauskytkentä (Mäkinen, 2012)

Taulukossa 1. ovat tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset. Tahtikoneen magnetointijännitteen mitoitusarvo on 37 V ja magnetointivirran mitoitusarvo 2 A. Mittaukset aloitettiin suurimmasta magnetointivirran arvosta, jolloin magnetointijännite nousi hieman yli 37 V. Tällöin tyhjäkäyntikokeen kuvaajasta saatiin selkeä, ja näin ollen sitä oli helpompi verrata teoreettiseen kuvaajaan kokeen oikeellisuuden toteamiseksi. Mittauksissa otettiin myös yksi mittauspiste nimellisellä jännitetasolla, jolloin on mahdollista verrata mitattuja arvoja laskennallisiin arvoihin.

TAULUKKO 1. Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset

F (Hz)	U_m (V)	I_m (A)	U_0 (V)
50,00	38,90	2,01	496,00
50,00	33,80	1,74	482,60
50,00	29,40	1,50	468,70
50,00	24,50	1,25	452,00
50,00	19,70	1,00	429,50
50,00	14,80	0,75	395,00
50,00	9,88	0,51	320,00
50,00	4,94	0,25	178,00
50,00	0,00	0,00	25,20

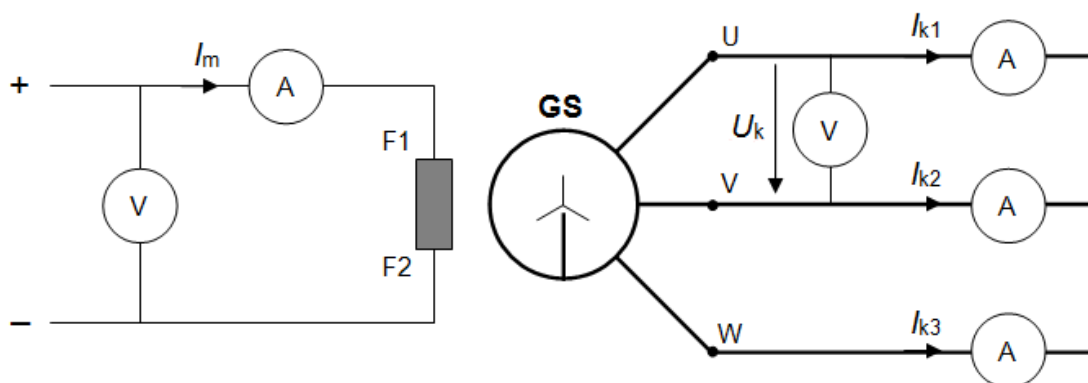
Kuviosta 1 voidaan nähdä, että tahtikoneen tyhjäkäyntijännite on riippuvainen magnetointivirran suuruudesta. Pienellä magnetointivirran arvolla käyrämuoto on lineaarinen, mutta koneen raudan alkaessa kyllästyä käyrämuoto kaareutuu ja magnetointivirta ei kasvata tyhjäkäyntijännitettä enää yhtä nopeasti kuin alussa. Magnetointivirran arvolla nolla tahtikoneessa ilmenee tyhjäkäyntijännitettä, mikä johtuu magnetointipiirin remanenssista.



KUVIO 1. Tyhjäkäyntikokeen kuvaaja

4.2 Oikosulkukokeen tulokset

Oikosulkukoetta varten tehtiin kuvan 18 mukainen kytkentä sähkölaboratorioon. Tahtikonetta koestettiin sen nimellispyörimisnopeudella 1500 1/min ja 50 Hz. Virran mittaamisessa käytettiin apuna Fluke 337 pihtiampeerimittareita. Näissä mittareissa tarkkuusalue oli rajattu yhteen desimaaliin. Verrattaessa näitä mittaustuloksia toisella Megger DCM 300E pihtiampeerimittareilla, jossa virta ilmoitettiin kahden desimaalin tarkkuudella, saatuihin tuloksiin voidaan mittaustuloksia pitää riittävän tarkkoina ja luotettavina.



KUVA 18. Oikosulkukokeen mittauskytKentä (Mäkinen, 2012)

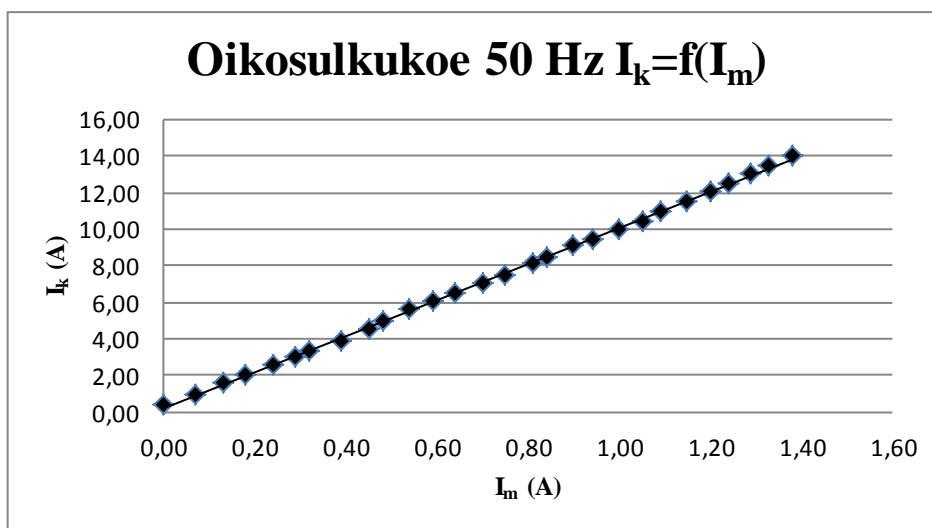
Taulukossa 2 on tahtikoneelle tehdyn oikosulkukokeen mittaustulokset. Mittaukset aloitettiin vaihevirran ollessa noin 20 % enemmän kuin tahtikoneen nimellinen virta. Mittauksia jatkettiin puolen ampeerin välein 0 ampeeriin asti.

TAULUKKO 2. Oikosulkukokeen mittaustulokset

F (Hz)	U_m (V)	I_m (A)	U_k (V)	I_{k1} (A)	I_{k2} (A)	I_{k3} (A)
50,00	26,80	1,38	0,95	14,00	14,00	14,00
50,00	25,70	1,33	0,89	13,50	13,50	13,50
50,00	25,10	1,29	0,88	13,00	13,10	13,10
50,00	23,90	1,24	0,86	12,40	12,60	12,50
50,00	23,20	1,20	0,86	12,00	12,00	12,10
50,00	22,20	1,15	0,84	11,40	11,60	11,60
50,00	21,10	1,09	0,82	10,90	11,00	11,00
50,00	20,30	1,05	0,78	10,40	10,50	10,50
50,00	19,30	1,00	0,76	10,00	10,00	10,00
50,00	18,30	0,94	0,73	9,40	9,50	9,40
50,00	17,50	0,90	0,67	9,10	9,10	9,10
50,00	16,30	0,84	0,62	8,50	8,50	8,50
50,00	15,60	0,81	0,69	8,10	8,10	8,10
50,00	14,40	0,75	0,66	7,50	7,50	7,50
50,00	13,50	0,70	0,60	7,10	7,10	7,10
50,00	12,40	0,64	0,57	6,50	6,50	6,50
50,00	11,40	0,59	0,53	6,10	6,10	6,10
50,00	10,40	0,54	0,49	5,60	5,60	5,60
50,00	9,30	0,48	0,43	5,00	5,00	5,00
50,00	8,70	0,45	0,40	4,50	4,50	4,50
50,00	7,50	0,39	0,36	4,00	3,90	3,90
50,00	6,20	0,32	0,30	3,40	3,40	3,30
50,00	5,50	0,29	0,26	3,00	3,00	3,00
50,00	4,58	0,24	0,22	2,60	2,60	2,60
50,00	3,37	0,18	0,18	2,00	2,00	2,00
50,00	2,55	0,13	0,14	1,60	1,60	1,60
50,00	1,38	0,07	0,09	1,00	1,00	1,00
50,00	0,16	0,00	0,03	0,40	0,40	0,40

Oikosulkukokeen mittaustuloksien perusteella piirretty suora kuviossa 2 vastaa teoreettista kuvaajaa. Oikosulkukokeen kuvaajan tulee olla lineaarinen, jolloin magnetointivir-

ran kasvaessa vaihevirran tulee kasvaa samassa suhteessa. Magneettipiirin kyllästymisen alkaisi suuremmilla magnetoimisvirran arvoilla käyristää kuvaajaa tyhjäkäyntikäyrää vastaavalla tavalla.



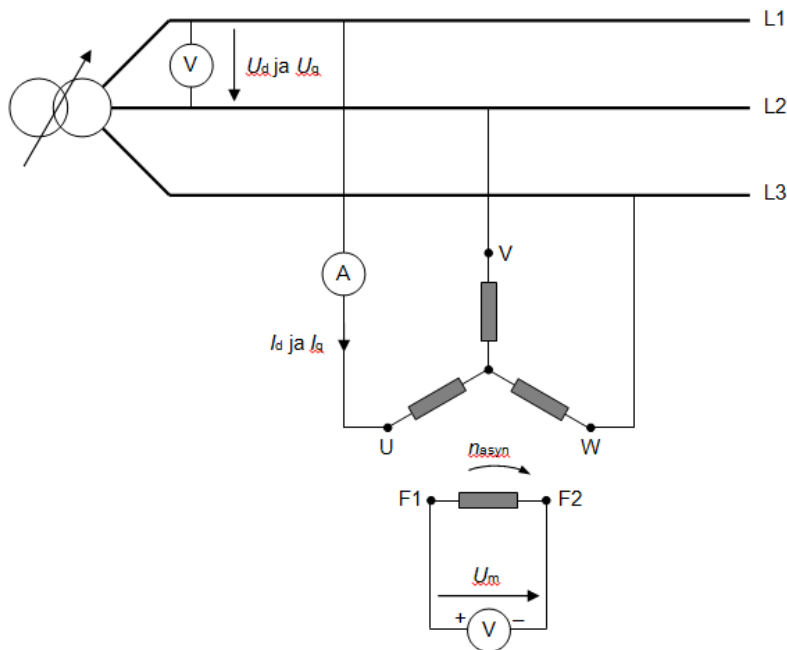
KUVIO 2. Oikosulkukokeen kuvaaja

4.3 Pitkittäisen ja poikittaisen tahtireaktanssin määrittäminen

Mittauksia varten toteutettiin kuvan 20 mukainen mittauskytkentä sähkölaboratoriossa. Varsinaiset mittaukset toteutettiin niin, että tahtikoneetta pyöritettiin lähes tahtinopeudella. Tällöin roottorissa sijaitseva magnetoimiskäämi on vuoroin pitkittäisessä ja poikittaisessa asennossa staattorivirtojen aiheuttamaan pyörivään magneettikenttään nähden. Koneen pyörimisnopeuden ajatellaan olevan sopiva, kun koneen avoimeen magnetointikämmitykseen indusoitunut jännite vaihtaa napaisuutta noin kahden sekunnin välein. Kuitenkaan tällä tahtikoneella emme voineet magnetointijännitettä mitata, koska kone oli harjatonta mallia. Staattorijännite nostettiin noin 100 V:iin, joka oli noin ¼ nimellisestä jännitteestä eli 400 V:sta. Tämän jälkeen mitattiin suurin ja pienin staattorivirran arvo. (Mäkinen, 2012.)

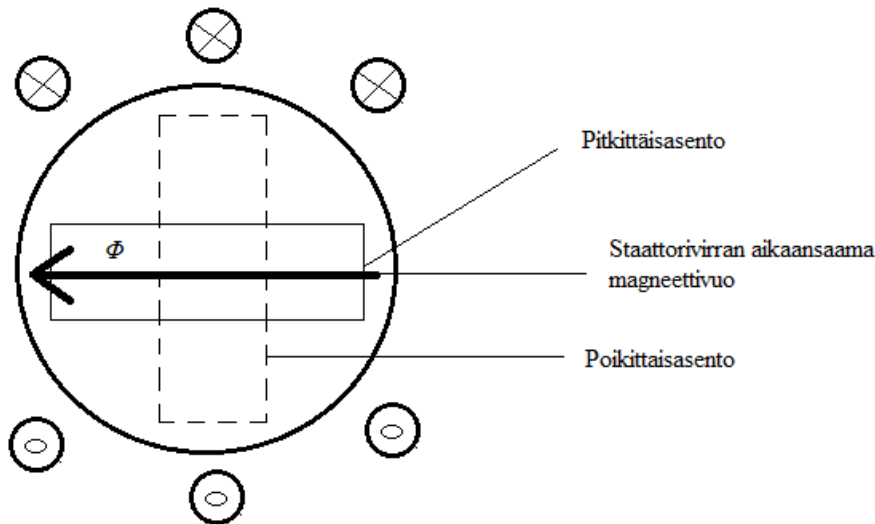
Mittauksissa ei ollut mahdollista toteuttaa magnetointijännitteen mittausta, koska tutkitu tahtikone oli harjatonta mallia. Harjattoman mallin tahtikoneessa ei päästä käsiksi koneen magnetointikämmitykseen, jolloin jännitteen mittaaminen magnetointikämmityksestä on mahdotonta. Magnetointijännitteen arvo pitkittäisen ja poikittaisen tahtireak-

tanssin määrittämisessä on keskeinen, joten tahtireaktanssien määrittämiseen oli keksittävä toinen tapa.



KUVA 20. Pitkittäisen ja poikittaisen tahtireaktanssin mittauskytkentä (Mäkinen, 2012)

Koska roottorin asentoa ei voinut päätellä magnetointijännitteen suuruuden perusteella, määrittäminen tehtiin virran ja jännitteen mittaustuloksien avulla. Kuvalla 21 havainnollistetaan tilannetta, joka ilmenee mittaustilanteessa. Tahtikoneen roottori on joko pitkittäisessä tai poikittaisessa asennossa suhteessa 3-vaiheisen staattorivirran aikaansaamaan, tahtinopeudella pyörivään, tasakenttään nähden. Tahtikoneen roottorin tiedettiin olevan pitkittäisessä asennossa silloin, kun staattorin virta on pienimmillään. Pitkittäisasennossa magneettipiirin permeanssi on suuri. Tästä syystä staattorivirta jää pitkittäistilanteessa pieneksi. Roottorin ollessa poikittaisasennossa staattorivirta on suurimmillaan, koska magneettivuo joutuu kulkemaan ilmvälän kautta.



KUVA 21. Roottorin asento suhteessa tahtikoneen 3-vaiheisen staattorivirran aikaansaamaan magneettivuohon.

Taulukossa 3 on pitkittäisen ja poikittaisen tahtireaktanssin mittaustulokset. Mittauksia tehtiin vertailun vuoksi yhteensä kolme kappaletta. Taulukkoon on merkitty myös valmistajan ilmoittamat tahtireaktanssien arvot, jotka löytyvät tahtikoneen datalehdeltä kuvasta 11 sivulta 19. Kuten taulukosta voi huomata mittauksessa 2 mitatut arvot ovat lähimpänä valmistajan ilmoittamia arvoja. Mittauksessa 2 käytettiin 100 V ohjearvoa suurempaa arvoa vertailun vuoksi.

TAULUKKO 3. Pitkittäisen ja poikittaisen tahtireaktanssin mittaustulokset

Roottorin asento suhteessa staattoriin	Mittaus	U (V)	I (A)	X _d	X _q	Suhteellisarvot			Valmistajan ilmoittamat			
						U _{vN} (V)	I _N (A)	Z _N (A)	x _d	x _q	x _d	x _q
X _d	1.	101,9	1,47	40,02	18,06	400	11,6	19,91	2,01	0,91	1,800	0,895
X _q		99,5	3,18									
X _d	2.	167,25	2,61	37,00	17,69				1,86	0,89		
X _q		163,9	5,35									
X _d	3.	101,8	1,53	38,41	18,18				1,93	0,91		
X _q		99,8	3,17									

Varsinaisia mittaustuloksia taulukossa 3 ovat virran ja jännitteen arvot. Näiden arvojen avulla selvitettiin pitkittäisen X_d ja poikittaisen X_q tahtireaktanssin arvot sekä näiden suhteelliset arvot.

Pitkittäisen X_d ja poikittaisen X_q tahtireaktanssin arvot laskettiin seuraavasti:

$$X_d = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{101,9 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 1,47 \text{ A}} = 40,02 \Omega$$

$$X_q = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{99,5 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 3,18 \text{ A}} = 18,06 \Omega$$

Tahtireaktanssin suhteellisarvojen määrittämiseen tarvitaan nimellisimpedanssin Z_N arvoa. Jännitteen ja virran arvot saatiin tahtikoneen arvokilvestä:

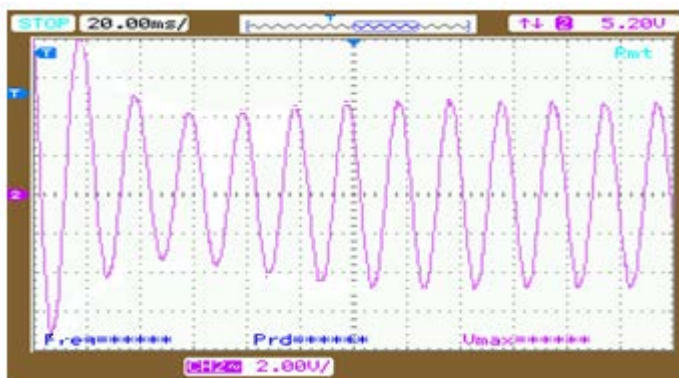
$$Z_N = \frac{U_{vN}}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 11,6 \text{ A}} = 19,91 \Omega$$

Suhteellisarvot voidaan laskea nimellisimpedanssin ja tahtireaktanssien suhteesta:

$$x_d = \frac{X_d}{Z_N} = \frac{40,02 \Omega}{19,91 \Omega} = 2,01$$

$$x_q = \frac{X_q}{Z_N} = \frac{18,06 \Omega}{19,91 \Omega} = 0,91$$

Tahtireaktanssin pitkittäisasennon mittaustulokset eivät olleet aivan samat kuin valmistajan ilmoittamat arvot, joten pitkittäisasennon arvo määritettiin myös oskilloskoopin avulla. Oskilloskoopin mittaushetki on kuvassa 22.



KUVA 22. Tahtireaktanssin pitkittäisasennon määrittäminen oskilloskoopin avulla

Kuvasta 22 on pyritty ottamaan keskiarvoinen kohta aaltomuodosta. Virran arvo on tehollisarvo kuvan noin 5 A huippuarvosta. Nimellisimpedanssin ollessa sama saadaan pitkittäisen tahtireaktanssin suhteellisarvoksi 1,64. Tälläkään mittaustavalla ei päästä tarkasti valmistajan ilmoittamiin arvoihin. Mittausarvot eivät ole kovinkaan tarkkoja,

sillä ne määritettiin osittain silmämääräisesti oskilloskoopin kuvaruudulta. Mittaustulokset ovat taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Pitkittäisen tahtireaktanssin mittaustulokset

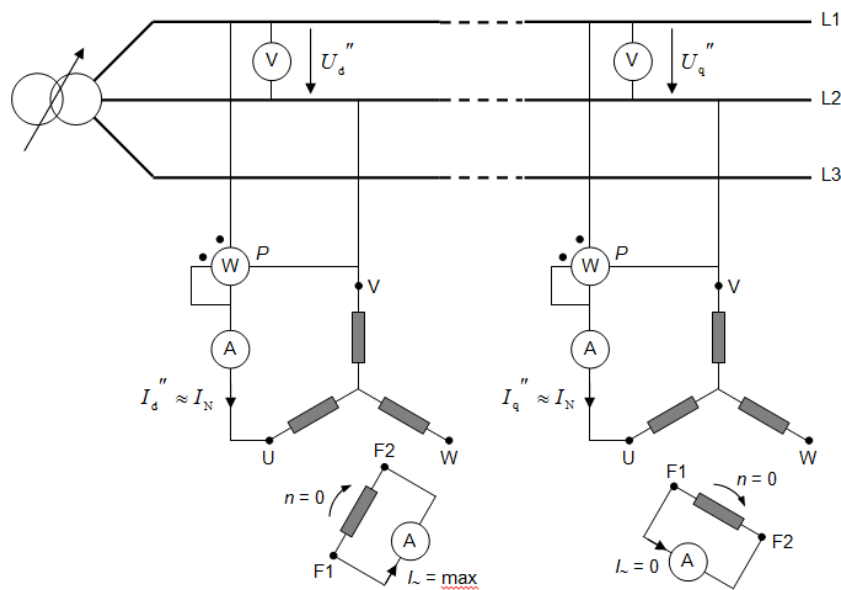
U (V)	I (A)	Z_N (Ω)	x_d
115,47	3,54	19,91	1,64

Tässä tilanteessa pitkittäisen tahtireaktanssin suhteellisarvo voidaan laskea kaavalla:

$$x_d = \frac{U}{I} = \frac{115,47 \text{ V}}{3,54 \text{ A}} = 1,64$$

4.4 Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssin määrittäminen

Pitkittäistä ja poikittaista alkureaktanssia määritettäessä tahtikoneen roottori pysyy paikallaan ja kone ei siis näin ollen ole käynnissä eikä pyöri. Mittaukset toteutetaan niin, että koneen roottoria pyöritetään käsin pitkittäiseen ja poikittaiseen asentoon. Mittaukset suoritetaan nopeasti, koska moottorin käämitykset lämpenevät nopeasti jäähdytyksen puuttuessa.



KUVA 23. Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssin mittaustilanteen kytkentäkuva (Mäkinen, 2012)

Käytössä ollut tahtikone oli harjatonta mallia, joten magnetointivirtaa ei voitu mitata eikä magnetointipiiriä voitu oikosulkea, koska moottorin käämitykseen ei päästy käsiksi. Mittauksissa oli mahdollista selvittää moottorin ottama teho, virta ja vaihejännite. Taulukossa 5 ovat alkureaktanssien mittaustulokset. Siitä voi huomata, että mittauksissa ei päästy kovinkaan lähelle valmistajan ilmoittamia arvoja.

TAULUKKO 5. Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssin mittaustulokset

U_d'' (V)	I_d'' (A)	P (W)	X_d''	x_d''	Valmistajan ilmoittama x_d''
27,80	3,11	53,00	4,47	0,22	0,12
U_q'' (V)	I_q'' (A)	P (W)	X_q''	x_q''	Valmistajan ilmoittama x_q''
35,00	2,98	69,00	5,87	0,29	0,21

Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssien arvot laskettiin kaavalla:

$$X_d'' = \frac{U_d''}{2 \cdot I_d''} = \frac{27,80 \text{ V}}{2 \cdot 3,11 \text{ A}} = 4,47 \Omega$$

$$X_q'' = \frac{U_q''}{2 \cdot I_q''} = \frac{35,00 \text{ V}}{2 \cdot 2,98 \text{ A}} = 5,87 \Omega$$

Pitkittäisen ja poikittaisen alkureaktanssien suhteellisarvot laskettiin kaavalla:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_N} = \frac{4,47 \Omega}{19,91 \Omega} = 0,22$$

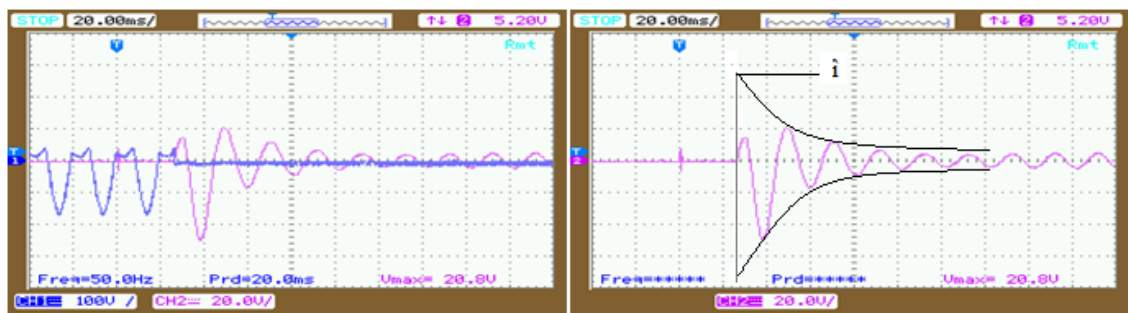
$$x_q'' = \frac{X_q''}{Z_N} = \frac{5,87 \Omega}{19,91 \Omega} = 0,29$$

Koska tavallisella mittaustavalla alkureaktanssien arvot eivät olleet lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja, selvitettiin alkureaktanssien arvoja lisäksi oskilloskoopin avulla. Oskilloskooppimittauksia suoritettiin vain pitkittäisen alkureaktanssin osalta, koska poikittaisen alkureaktanssin osalta mittaustilannetta ei ollut mahdollista luoda.

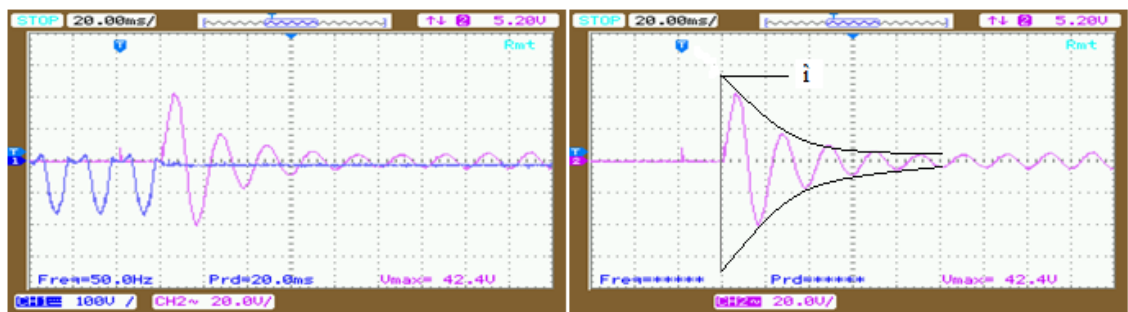
Mittauksissa käytettiin kontaktorin ja painonapin yhdistelmää luomaan koneeseen tilanne, jossa roottori olisi napaoikosulussa ja pitkittäisasennossa. Moottorin käämityksen nopean lämpenemisen johdosta painonapilla luotiin hetkellinen impulssi, joka näkyy

selvästi oskilloskooppi-kuvissa. Tämän impulssin avulla oskilloskooppikäyrästä voitiin määrittää virran ja jännitteen arvot, jolloin pitkittäinen alkureaktanssi voitiin määrittää. Mittauksia suoritettiin kaksi kappaletta. Oskilloskooppikuvat mittauksista ovat kuvissa 24 ja 25. Kummankin kuvan vasemmanpuoleisessa osassa on jännitteen ja virran aaltomuoto, oikeanpuoleisessa osassa ainoastaan virran aaltomuoto.

Virran huippuarvo \hat{i} määritettiin kuvista verhoikäyrän avulla oikosulun tapahtuessa. Virran arvo on oskilloskooppikuvissa huippuarvona, jolloin virran arvo jaettiin kahden neliöjuurella, jotta virrasta saatiin tehollisarvo. Jännitteestä määritettiin vaihejännite, joten oskilloskoopin arvo jaettiin kolmen neliöjuurella.



KUVA 24. Oskilloskooppimittaus 1.



KUVA 25. Oskilloskooppimittaus 2.

Taulukosta 6 nähdään, että oskilloskoopin avulla pitkittäisen alkureaktanssin suhteelliset arvot on tarkemmin määriteltävissä, sillä molemmissa mittauksissa arvot ovat lähempänä valmistajan ilmoittamaa arvoa kuin aikaisemmin toteutetussa mittauksessa.

TAULUKKO 6. Pitkittäisen alkureaktanssin oskilloskooppi mittauksen tulokset

Mittaus	U (V)	I (A)	Z_N (Ω)	x_d''	Valmistajan ilmoittama x_d''
1	115,47	56,57	19,91	0,103	0,12
2	115,47	42,43	19,91	0,137	0,12

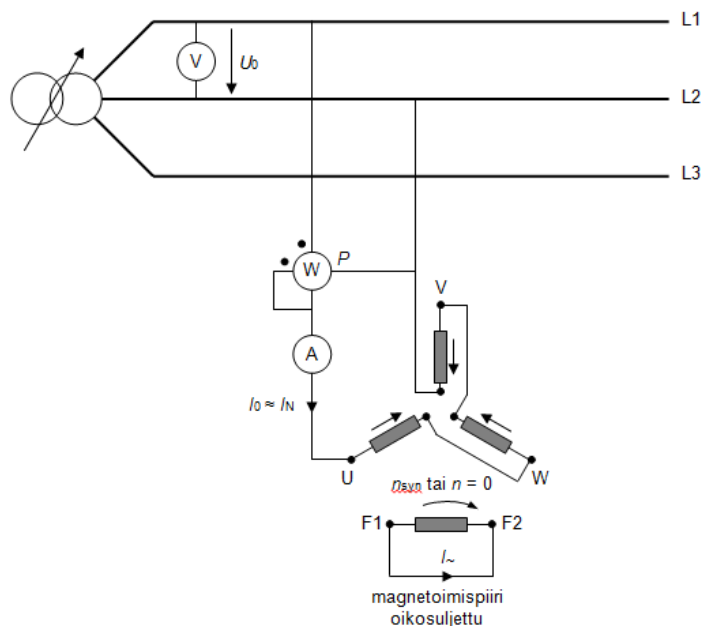
4.5 Vastareaktanssin määrittäminen

Vastareaktanssi X_2 voidaan laskea alkureaktanssin mittaustulosten perusteella. Laske-
misessa on käytetty mittaustuloksia, jotka löytyvät taulukosta 5. Näissä mittauksissa ei
voitu määrittää staattorivirran arvoa, joten se vaikuttaa tulokseen.

$$X_2 = \frac{1}{2} \cdot (X_d'' + X_q'') = \frac{1}{2} \cdot (4,47 \, \Omega + 5,87 \, \Omega) = 5,17 \, \Omega$$

4.6 Nollareaktanssin määrittäminen

Nollareaktanssin X_0 määrittämisessä keskeistä on magnetoimispiirin oikosulkeminen.
Magnetoimispiiriä ei kuitenkaan voitu tästä tahtikoneesta sulkea, koska kone on harja-
tonta mallia. Toinen ongelma nollareaktanssin mittaamisessa ilmeni tahtikoneen käämi-
tyksen kytkemisessä kuvan 26 osoittamalla tavalla avokolmiokytkentään. Harjattoman
tahtikoneen käämityksen kytkentöjä ei voi muuttaa, joten kuvan 26 mukaisia kytkentöjä
ei voitu tehdä. Tämä tarkoittaa sitä, että tälle tahtikoneelle ei näissä olosuhteissa voitu
nollareaktanssia määrittää.



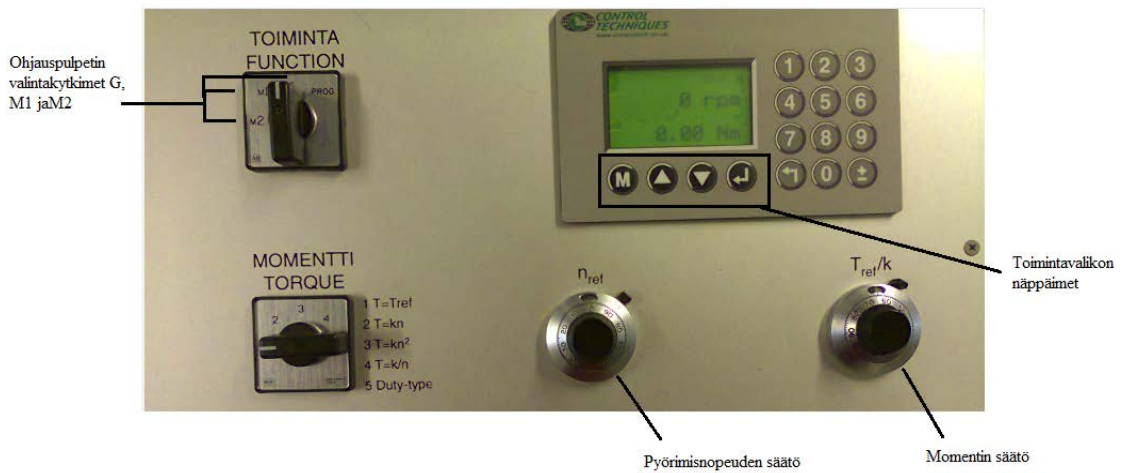
KUVA 26. Nollareaktanssin mittauskytkentä (Mäkinen, 2012)

4.7 Säätökäyrä

Säätökäyrät määritettiin eri tehokertoimen arvoilla, jotka olivat 1, 0,8 ind., 0,6 ind. ja 0,8 cap. Kuormituksen määrä ja tehokertoimen arvo määritettiin jarrugeneraattorin avulla. Tämä tarkoittaa, että ennen mittauksia tahtigeneraattori tahdistettiin verkkoon moottorina, jolloin jarrugeneraattorilla voitiin luoda verkkoon tahdistetun tahtigeneraattorin akselille säädettävä kuorma. Jarrugeneraattoria voidaan käyttää moottorina, jonka kierrosnopeutta voidaan säätää, tai generaattorina mallintamaan erikokoisia kuormia. Ohjauspulpetin valintakytkimen asennolla määritellään eri käyttötavat.

Tahtigeneraattorin verkkoon tahdistaminen aloitettiin pyörittämällä tahtigeneraattorin akselia jarrugeneraattorin avulla. Tällöin jarrugeneraattorin ohjauspulpetin valintakytkin tulee olla asennossa M2 tai M1 riippuen siitä, kumpaan suuntaan tahtigeneraattorin akselin halutaan pyörivän. Tässä tahdistuksessa käytettiin valintakytkimen asentoa M2, jolloin tahtigeneraattorin akselinpästä katsottuna akseli pyöri myötäpäivään. Kuvassa 27 selvitetään eri säätöjen sijainti ohjauspulpetissa.

Tämän jälkeen ohjauspulpetin toimintavalikon sivulta kuusi valitaan momentin säätö nopeuskäytössä. Valinta tehdään liikkumalla valikossa alaspäin olevaa nuolinäppäintä painaen, kunnes ollaan kohdassa momentin käyttö nopeuskäytössä. Tämän jälkeen painetaan M-näppäintä ja alaspäin olevaa nuolinäppäintä yhtäaikaaisesti, jolloin saadaan valittua momentin säätö aktiiviseksi. Tämän jälkeen M-näppäintä painamalla valitaan toimintatapa joko valituksi tai pois päältä. Ylöspäin olevalla nuoli-painikkeella liikutaan valikossa ja enter-näppäin vahvistaa valinnan. Painamalla M-näppäintä ja ylöspäin olevaa nuoli-näppäintä poistutaan valikosta.



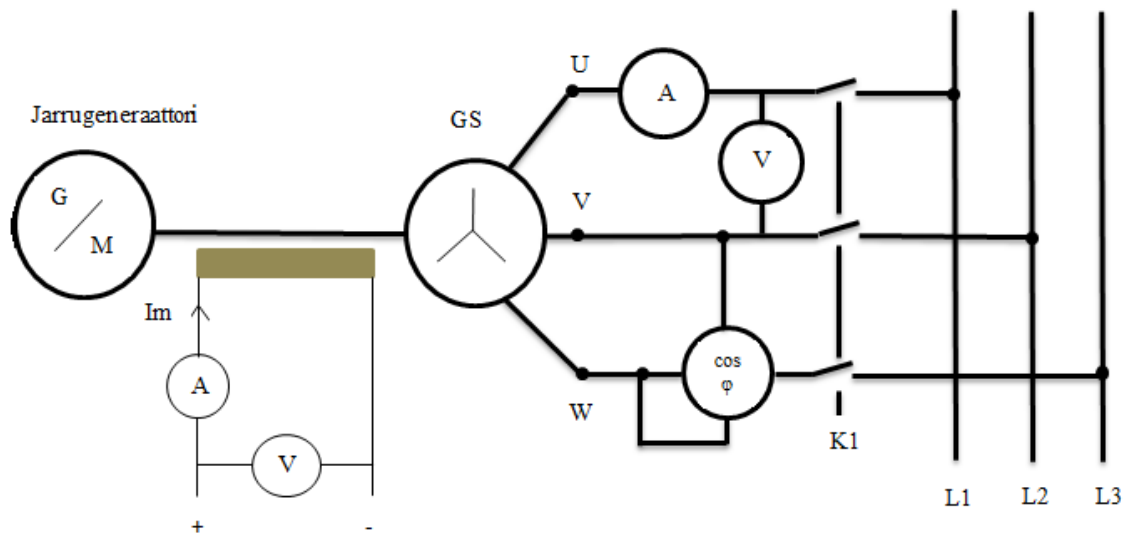
KUVA 27. Jarrugeneraattorin ohjauspulpetin säätötaulu

Tahtigeneraattorin akselilla tarvitsee verkkoon tahdistuksen yhteydessä olla tietyn kokoinen momentti, jotta verkkoon tahdistus onnistuisi tahtigeneraattorin osalta. Momentin suuruus tarvitsee määritellä tapauskohtaisesti sopivaksi, sille ei tässä tapauksessa ole mitään ohjearvoa. Ohjauspulpetista säädetään tässä vaiheessa myös moottorin pyörimisnopeus hieman yli 1500 1/min. Kun momentti ja pyörimisnopeus ovat oikeassa arvossa, säädetään tahtigeneraattorin magnetoinnilla generaattorin liitinjännite tarkalleen vallitsevan verkkojännitteen suuruiseksi.

Tahdistuksessa käytettiin apuna synkronoskooppia. Synkronoskooppi mittaa sekä verkon että tahtigeneraattorin jännitettä. Ennen tahdistamista molempien jännitteiden tulee olla tarkalleen yhtä suuret. Tahtikoneelle tarvitsee tahdistuksen onnistumiseksi luoda sama jännitetaso kuin verkossa kyseisellä hetkellä on. Synkronoskoopissa on tahdistuskello, johon on merkitty tahdistuskohta. Tahdistuskellon osoittimen ollessa tahdistuskohdassa tahtigeneraattori kytketään verkkoon. Tahdistuskellon osoittimen pyörimistä hallitaan jarrugeneraattorin momentin ja nopeuden suuruutta muuttamalla. Tämä on tärkeää sen vuoksi, että tahdistaminen ja verkkoon-kytkemishetki ovat tarkkoja toimenpiteitä, ja tahdistuskellon osoittimen pyörimisnopeuden on syytä olla sopivan hidas, jotta tarkka tahdistus on mahdollista tehdä. Tahtigeneraattorin verkkoon kytkeminen toteutettiin kontaktori ja painonappi-yhdistelmällä.

Kun tahtikone oli tahdistettu verkkoon, kytkettiin jarrugeneraattori pois päältä. Jarrugeneraattorin valintakytkin käännetään asentoon G, jolloin sitä voidaan käyttää generaattorina erilaisten kuormien mallintamiseen. Kuormia säädetään momentin suuruutta muuttamalla. Kuorman eli momentin ollessa halutussa arvossa voidaan tehokerroin sää-

tää oikeaan arvoon nyt tahtimoottorina käyvän koneen magnetointia muuttamalla. Magnetointijännite ja -virta luodaan tahtikoneelle virtavaunun avulla. Vaunun avulla voidaan säätää tahtikoneen magnetointia. Magnetointia kasvatettaessa tehokerrointa voidaan säätää induktiivisemmaksi ja magnetointia vähentämällä tehokerroin muuttuu kapasitiivisemmaksi. Säätekäyrien mittauskytkentä on kuvassa 28.



KUVA 28. Säätekäyrien mittauskytkentä

Mittautulokset ovat taulukossa 7. Mittauksia rajoittavia tekijöitä olivat tahtikoneen nimellisvirta 11,6 A, magnetointivirran mitoitusarvo 2 A ja magnetointijännitteen mitoitusarvo 37 V. Tämän vuoksi kaikilla tehokertoimen $\cos \varphi$ arvoilla ei mittauksia voitu toteuttaa yhtä suurella kuormalla. Suurimmillaan näiden suureiden arvot olivat 11 Nm:n kuormalla tehokertoimen ollessa arvossa 0,6 induktiivista. Tuloksista ilmenee, että kapasitiivisella tehokertoimen arvolla tahtikonetta alimagnetoidaan, jolloin magnetointivirran ja jännitteen arvot jäävät pieniksi. Toisaalta taas induktiivisilla tehokertoimen arvolla tahtikonetta ylimagnetoidaan, jolloin magnetointivirran ja -jännitteen arvot nousevat kohti mitoitusarvoa 2 A.

Vertailtaessa kapasitiivisen ja induktiivisen tehokertoimien arvoja toisiinsa nähdään, että tehokertoimen ollessa 0,8, kapasitiivista voidaan tahtikonetta kuormittaa noin 3 Nm enemmän kuin tehokertoimen ollessa 0,8 induktiivista. Toisaalta kun tehokerroin putoaa arvosta 1 arvoon 0,6 induktiivista vähenee kuormituksen määrä, vaikka tahtikone tarvitsee edelleen yhtä paljon virtaa. Kuormituksen kasvaessa myös virta kasvaa ja jotta te-

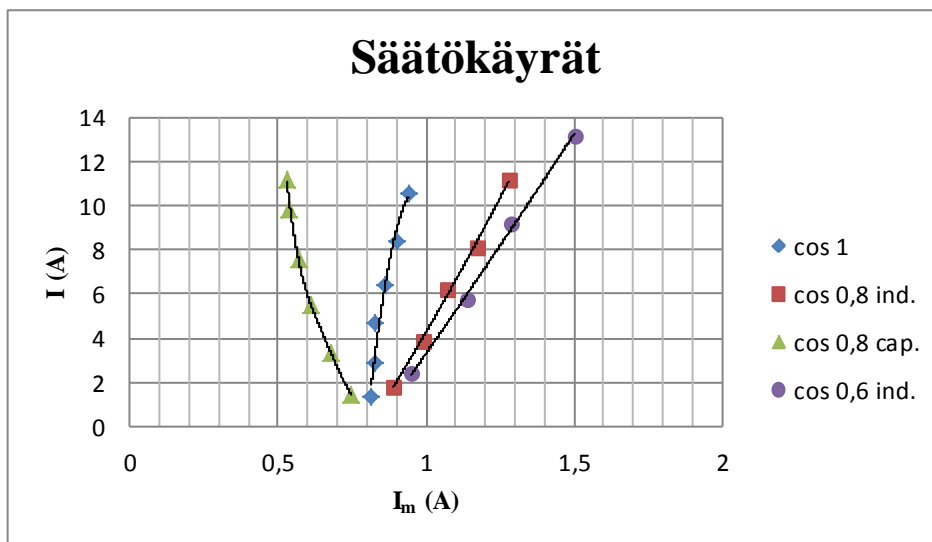
hokerroin $\cos \phi$ voidaan pitää halutussa arvossaan, tarvitsee tahtikoneen magnetointia lisätä tai vähentää, riippuen siitä onko virta kapasitiivista vai induktiivista.

TAULUKKO 7. Säätokäyrämittauksien tulokset

f (Hz)	U (V)	T (Nm)	$\cos \phi$	I (A)	I_m (A)	U_m (V)
50	400	0	1	1,3	0,815	16,13
50	400	3	1	2,9	0,83	16,58
50	400	7	1	4,7	0,83	16,6
50	400	11	1	6,4	0,86	17,01
50	397	15	1	8,4	0,90	17,86
50	397	20	1	10,6	0,94	18,6
f (Hz)	U (V)	T (Nm)	$\cos \phi$	I (A)	I_m (A)	U_m (V)
50	400	0	0,8 ind	1,8	0,89	17,79
50	400	3	0,8 ind	3,9	0,99	19,7
50	400	7	0,8 ind	6,2	1,07	21,3
50	399	11	0,8 ind	8,1	1,17	23,3
50	398	15	0,8 ind	11,2	1,28	25,58
f (Hz)	U (V)	T (Nm)	$\cos \phi$	I (A)	I_m (A)	U_m (V)
50	400	0	0,8 cap	1,5	0,75	17,99
50	400	3	0,8 cap	3,3	0,68	13,73
50	400	7	0,8 cap	5,5	0,61	12,21
50	399	11	0,8 cap	7,6	0,57	11,4
50	399	15	0,8 cap	9,8	0,54	10,79
50	397	18	0,8 cap	11,2	0,53	10,55
f (Hz)	U (V)	T (Nm)	$\cos \phi$	I (A)	I_m (A)	U_m (V)
50	400	0	0,6 ind	2,4	0,95	18,91
50	400	3	0,6 ind	5,8	1,14	22,65
50	400	7	0,6 ind	9,2	1,29	25,78
50	399	11	0,6 ind	13,2	1,50	30,03

Kuviossa 3 on taulukon 7 mittaustuloksien perusteella piirretyt kuvaajat. Käyristä voidaan selvästi nähdä, kuinka magnetointivirran suuruus vaihtelee halutun tehokertoimen mukaisesti. Virran ollessa kapasitiivista tarvitsee tahtikonetta alimagnetoida ja virran ollessa induktiivista tahtikonetta ylimagnetoidaan. Toisaalta tehokertoimen 1 arvossa käyrä muuttuu lopulta hieman induktiiviseksi koneen sisäisten jännitehäviöiden vuoksi ja magnetointia tarvitsee tällöin lisätä, jotta tehokertoimen haluttu arvo saavutetaan.

Tämä johtuu siitä, että tahtikoneen sisäisen induktiivisen virtakomponentin synnyttämää päävuolle vastakkaista ankkurikenttää tarvitsee magnetoinnin avulla kompensoida. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, 1986, 256.) Toisaalta mitä pienemmäksi tehokerroin lasketaan, sitä enemmän tahtikonetta tarvitsee magnetoida, kun koneen liitinjännite on vakio ja kuormaa kasvatetaan. Vaikka tahtikonetta ei kuormiteta, virta ei silti ole nolla, koska moottorikäytössä sitä tarvitaan tahtikoneen tyhjäkäynnin ylläpitämiseksi.



KUVIO 3. Säätökäyrien kuvaajat

4.8 Kuormituskäyrät

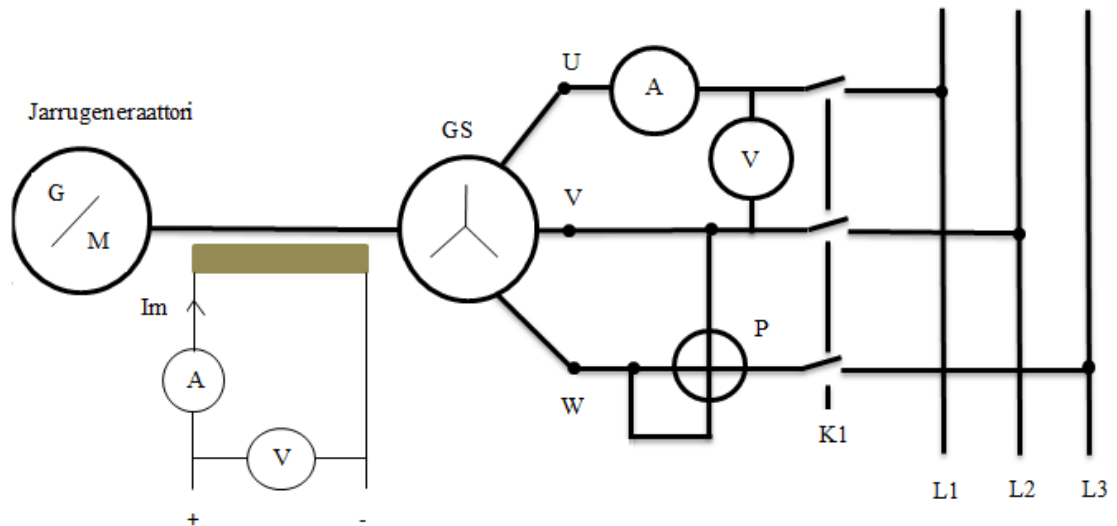
Kuormituskäyrämittauksissa tahtigeneraattori tahdistettiin verkkoon säätökäyrän mittauksissa esitetyllä tavalla. Tässä kohdassa ei siitä syystä kerrota uudelleen tahtikoneen verkkoon tahdistuksen vaiheita. Jarrugeneraattorin ohjauspulpetista tarvitsee säätökäyrämittausten tapaan valita valintakytkimestä asento G, jolloin jarrugeneraattorin avulla voidaan tuottaa kuormaa tahtikoneen akselille.

Tahtikoneen verkkoon tahdistuksen jälkeen suunniteltiin kuormat, joilla generaattoria kuormitettaisiin. Kuorma mallinnettiin jarrugeneraattorin avulla ja tästä syystä jarrugeneraattorin 5 kW teho rajoitti suurimman kuormituksen tehoa.

Mittauksia varten toteutettiin kuvan 29 mukainen mittauskytkentä. Mittauksissa jarrugeneraattorilla säädetään tahtikoneen akselille kuormitus, ja koneen ollessa tahdistettuna verkkoon se pyörii nimellispyörimisnopeudellaan 1500 1/min mittausten ajan. Tämän jälkeen tahtikonetta ensin ylimagnetoidaan ja sitten alimagnetoidaan kaikilla kuormilla. Mittauspisteitä otetaan sopivin välein. Mittauksia rajoittavia tekijöitä jarrugeneraattorin koon lisäksi ovat magnetointivirran mitoitusarvo 2 A (DC), magnetointijännitteen mitoitusarvo 37 V (DC) ja tahtigeneraattorin nimellisvirta 11,6 A. Ylimagnetointi tarkoittaa magnetointivirran kasvattamista ja alimagnetointi magnetointivirran vähentämistä.

Kuormien momentti määritettiin kaavalla:

$$T_k = \frac{P_k}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{2000 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500 \frac{1}{\text{min}}}{60}} = 12,7 \text{ Nm}$$



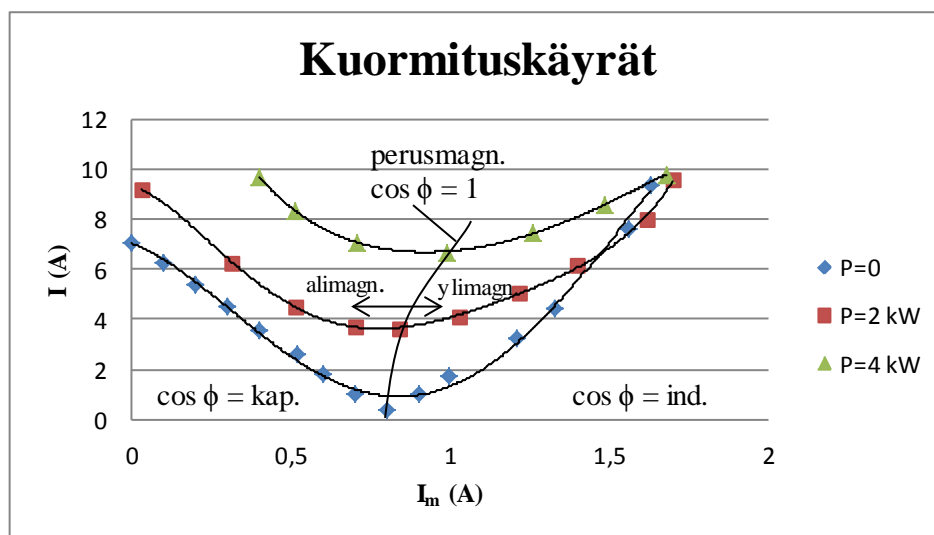
KUVA 29. Kuormituskäyrien mittauskytkentä

Kuormituskäyrien eli V-käyrien mittaustulokset ovat taulukossa 8. Mittaukset suoritettiin keskenään hieman erilaisilla jännitteillä ja se vaikutti mittaustuloksiin. Taulukosta 8 voi huomata miten koneen ylimagnetointi- ja alimagnetointitilanteissa vaihevirta kasvaa, kun konetta kuormitetaan jollakin vakiokuormituksella. Kuorman kasvaessa yli- ja alimagnetointi vaikuttavat nopeammin vaihevirran suuruuteen, jolloin mittauspisteitä on vähemmän.

TAULUKKO 8. V-käyrän mittausten tulokset

P_k (kW)	T_k (Nm)	f (Hz)	U (V)	I (A)	I_m (A)	U_m (V)	P (W)
0	0	50	406	0,40	0,80	17,40	210
0	0	50	402	1,00	0,90	17,80	450
0	0	50	401	1,70	1,00	19,80	450
0	0	50	402	3,25	1,21	24,00	540
0	0	50	403	4,45	1,33	26,60	600
0	0	50	406	7,60	1,56	31,30	510
0	0	50	406	9,40	1,63	33,20	630
0	0	50	406	1,00	0,70	14,30	210
0	0	50	406	1,80	0,60	12,10	210
0	0	50	406	2,60	0,52	10,30	210
0	0	50	406	3,60	0,40	8,00	240
0	0	50	406	4,50	0,30	6,00	270
0	0	50	406	5,40	0,20	4,10	270
0	0	50	406	6,30	0,10	2,20	300
0	0	50	406	7,10	0,00	0,50	330
P_k (kW)	T_k (Nm)	f (Hz)	U (V)	I (A)	I_m (A)	U_m (V)	P (W)
2	12,7	50	402	3,65	0,84	16,60	2505
2	12,7	50	402	4,10	1,03	20,40	2550
2	12,7	50	402	5,05	1,22	24,10	2595
2	12,7	50	402	6,20	1,40	27,80	2850
2	12,7	50	402	8,00	1,62	32,30	3060
2	12,7	50	402	9,60	1,70	34,20	3330
2	12,7	50	402	3,75	0,70	14,00	2490
2	12,7	50	402	4,55	0,51	10,30	2535
2	12,7	50	402	6,30	0,31	6,14	2670
2	12,7	50	402	9,20	0,03	0,60	2880
P_k (kW)	T_k (Nm)	f (Hz)	U (V)	I (A)	I_m (A)	U_m (V)	P (W)
4	25,5	50	401	6,70	0,99	19,70	4620
4	25,5	50	401	7,45	1,26	25,10	4770
4	25,5	50	401	8,60	1,49	29,60	4920
4	25,5	50	401	9,80	1,68	33,50	5130
4	25,5	50	400	7,10	0,71	14,10	4590
4	25,5	50	400	8,35	0,51	10,20	4680
4	25,5	50	400	9,70	0,40	7,90	4860

Kuviossa 4 on kuormituskäyrien mittaustulosten perusteella tehdyt kuvaajat eri kuormituksilla. Magnetointivirran ollessa pieni vaihevirta on kapasitiivista ja taas magnetointivirran kasvaessa vaihevirta on induktiivista. Kuvaan on piirretty mittauksissa määritetty magnetointiraja, josta voidaan erottaa yli- vai alimagnetoidaanko generaattoria. Raja määrättyi tehokertoimen perusteella.



KUVIO 4. Kuormituskäyrät

Tahtikoneen virran ollessa kapasitiivista tarvitsee generaattori kuitenkin toimiakseen induktiivista loistehoa, joka otetaan verkosta. Tämä tarkoittaa sitä, että tahtikoneella voidaan kompensoida verkossa olevaa loistehoa. Toisaalta, kun tahtikonetta ylimagneutoidaan, se tuottaa verkkoon induktiivista loistehoa.

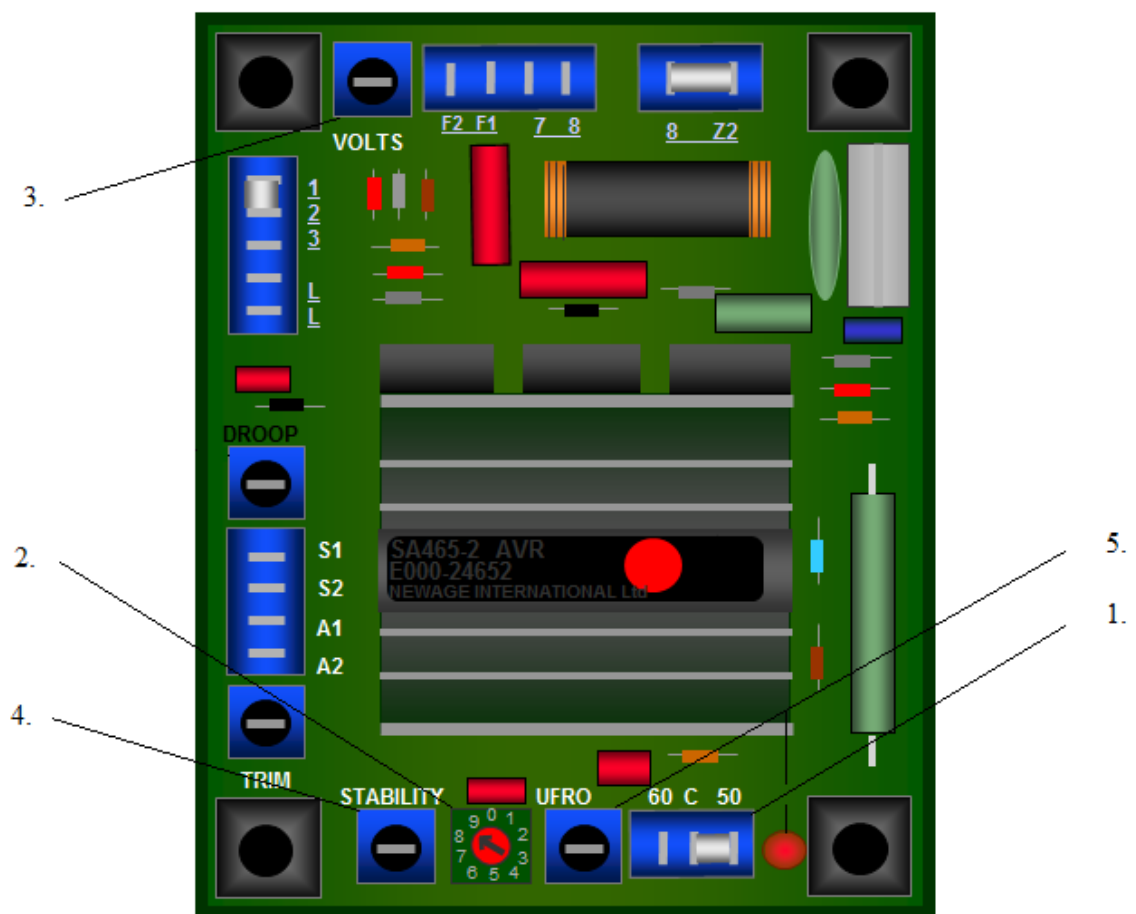
4.9 Säätimen SA 465-2 toiminnan koestaminen

Tässä testissä oli tarkoituksena selvittää tahtikoneen säätimen toimintaa erilaisissa tilanteissa. Aikaisemmissa mittauksissa tahtikonetta magnetoitiin ulkoisella tasavirtalähteellä, mutta näissä testeissä säädin huolehti tahtikoneen magnetoimisesta. Koneen akselia pyöritettiin jarrugeneraattorin avulla. Jarrugeneraattoria käytettiin koestuksessa moottorina, jonka kierrosnopeutta voitiin säätää ohjauspulpetista. Tahtikoneen säätimestä tarkistettiin, että siinä oli säätimen ohjeen mukaisesti asetukset kohdallaan, ennen kuin sitä varsinaisesti käytettiin.

Ennen säätimen käyttöä täytyy kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin: Säätimen + ja - napa kytketään yhteen yhdessä tahtikoneen magnetoinnin + ja - napojen kanssa. Valmistajan koulutusmateriaalin mukaan tahtikonetta pyöritettäessä 50 Hz:llä alin jännite on 380 V ja ylin 415 V, joten käyttötilanteessa on pysyttävä näiden jännitteiden sisällä. Koulutusmateriaalin mukaan alle 380 V jännitteellä tahtikoneen jännite reagoisi huonosti kuorman vaihdoksiin. Yli 415 V jännitteellä magnetointivirta kasvaa liian suureksi, mikä voi aiheuttaa muutoksia koneen käämityksiin niiden ylikuumennuttua. Täydellä

kuormalla tämän tahtikoneen jännitehäviö on 1 %, mikä tarkoittaa tahtikoneen 400 V nimellisjännitteellä noin 396 V jännitettä. Säätimen piirikortista valitaan 50 Hz:n alue yhdistämällä liittimet C ja 50 (kuva 28 kohta 1).

STABILITY-säätimelle valitaan tahtikoneen koon mukaisesti oikea perusasetus valintakytkimestä. Vasteajan halutaan olevan medium-asennossa, joten valintakytkimestä valitaan asento 4, joka vastaa alle 100 kW (kuva 28 kohta 2). Tällöin vasteaika vastaa generaattorin aikavakiota. Vasteajan ollessa medium-asennossa säädin vastaa hitaammin jännitteen heilahteluun ja estää näin välkyntäilmiötä.



KUVA 28. Säätimen SA 465-2 AVR-piirikortti (Newage AVKSEG, muokattu)

Tahtikonetta käynnistettäessä tulisi VOLTS-säätö olla käännettynä täysin vastapäiväiseen asentoon (kuva 27 kohta 3). Tämän jälkeen STABILITY-säätö pitäisi kääntää keski-asentoon (kuva 27 kohta 4). Tämän jälkeen tahtikone käynnistetään pyörittämällä sitä jarrugeneraattorin avulla nimellisellä pyörimisnopeudella ilman kuormaa. Jos tässä vaiheessa UFRO-merkkivalo syttyy, se tarkoittaa, että tahtikone pyörii liian hitaalla nopeudella (kuva 27 kohta 5). Pyörimisnopeutta nostetaan jarrugeneraattorin ohjauspulpe-

tin pyörimisnopeuden säätimestä. VOLTS-säätöä käännetään myötäpäivään, kunnes nimellinen jännitetaso 415 V saavutetaan. Jos tämän jälkeen jännite vaihtelee eikä tasaannu, STABILITY-säätöä tarvitsee säätää (kuva 27 kohta 4). STABILITY-säätöä käännetään myötäpäivään, kunnes jännite tasaantuu. Kun jännite on tasaantunut ja oikeassa arvossa, voidaan tahtikoneen kuormitus aloittaa.

Varsinaisia testejä aloittaessamme teimme ohjeiden mukaiset käytännön asetukset säätimelle. Kuitenkin kun tahtikoneen kierrosnopeutta nostettiin jarrugeneraattorin avulla, nousi liitinjännite välittömästi noin 476 V:iin ja magnetointivirta noin 5 A:iin. Tahtikoneen kierrosnopeus ei ollut tällöin ehtinyt juurikaan nousta. Kokeilimme tahtikoneen kierrosnopeuden nostoa myös niin, että säädimme jarrugeneraattorilta kierrosnopeuden tarvittavaan 1500 1/min ja käynnistimme jarrugeneraattorin heti tästä pyörimisnopeudesta. Tällöin kytkentätilanne kuvasti tahtikoneen verkkokytkentäistä käynnistämistä. Liitinjännite ja magnetointivirta nousivat jälleen vastaaviin lukemiin kuin aikaisemmin. Tämän vuoksi säätimen toimintaa ei ollut mahdollista koestaa eikä säätimen toiminnasta voitu esittää käytännön tuloksia.

Säätimen virheellinen toiminta saattaa johtua siitä, että säädin on rikkoutunut aikaisempien koestuksien aikana. Tämä olisi ollut mahdollista todentaa vertaamalla koestamisessa käytetyn säätimen toimintaa toiseen samanlaiseen säätimeen. Koestuksia tehtäessä ei sähkölaboratoriossa kuitenkaan ollut mahdollisuutta testata toista säädintä. Tämän työn toteuttamiseen asetut aikarajat, eivät myöskään antaneet sijaa mahdollisten vikojen laajemmalle selvitykselle.

5 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tehdä Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa käytettävänä olleelle tahtikoneelle koestusmittauksia ja suunnitella mahdollisia mittauksia ja töitä, joita oppilaat voisivat kyseisellä koneella tulevaisuudessa tehdä. Mielestäni tässä onnistuttiin kuitenkin kohtalaisesti.

5.1 Työn tulokset

Tahtikoneen tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeiden mittauksien toteutus sujui ongelmitta. Vertailtaessa mittaustuloksista saatuja kuvaajia teoreettisiin kuvaajiin huomataan niiden olevan samankaltaisia. Tämän perusteella voidaan todeta mittauksien ja kokeiden kokonaisuudessaan onnistuneen halutulla tavalla ja saatuihin tuloksiin voidaan luottaa.

Tahtikoneen reaktanssien määrittämisessä ilmenneiden ongelmien vuoksi reaktanssien määrittämistä voidaan pitää ongelmallisena tulevaisuuden oppilastöissä. Kaikkia tahtikoneen reaktansseja ei voitu määrittää luotettavasti, tai lainkaan, ja niiden reaktanssien, joiden arvot määritettiin, arvot eivät vastanneet aivan valmistajan ilmoittamia arvoja. Työssä käytettyjen mittausten menetelmien ja valmistajan mittauskäytäntöjen välillä voi olla eroja ja se voisi myös selittää eroavaisuudet arvojen välillä. Tahtikoneen magneointi oli toteutettu harjattomasti, joten poikittaisen alkureaktanssin, vastareaktanssin ja nollareaktanssin määrittäminen ei ollut mahdollista.

Alun vaikeuksien jälkeen säätökäyrien mittaukset onnistuivat lopulta hyvin. Säätökäyrien määrittämisessä tahtikonetta käytettiin ennen tahdistusta generaattorina ja tahdistuksen jälkeen moottorina. Mittaukset onnistuivat, sillä vertailemalla käyrien muotoja teoreettisiin arvoihin voidaan havaita samankaltaisuuksia. Eroavaisuuksiakin on, mutta jokainen generaattori tuottaa omanlaisensa säätökäyrät eri tehokertoimien avulla.

Kuormituskäyrien määrittäminen onnistui hyvin. Mittaustuloksista saaduista kuvaajista voidaan selkeästi nähdä käyrien määrittämisen keskeisiä asioita, kuten resistiivisen kuorman tarvitsema ylimagneointi. Koestukset tehtiin generaattorin magneointivirran ja nimellisen virran sekä kuorman mallintamiseen käytetyn jarrugeneraattorin sallimissa

rajoissa. Vertailemalla kuormituskäyriä teoreettisiin arvoihin huomataan, että molemmissa käyrissä on samankaltaisuuksia, joten mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina.

Työssä oli tarkoituksena selvittää tahtigeneraattorin säätimen toimintaa ja sen tavallisia säätöominaisuuksia. Selvitystyö jäi kuitenkin kesken, koska tutkimusten aikana huomattiin, että säädin ei toiminut oikein. Säätimen arvioitiin rikkoutuneen aikaisemmissa koe-
tuksissa. Työssä kuitenkin selvitettiin miten säätimen eri ominaisuuksien tulisi toimia ja miten ne vaikuttaisivat säätimen varsinaiseen toimintaan. Mahdollisen korvaavan säätimen käyttäminen on tämän selvitystyön jälkeen helpompaa.

Työssä esitellyt onnistuneet mittaukset kuten säätö- ja kuormituskäyrien määrittäminen ovat mainio lähestymistapa tahtikoneisiin. Mielenkiinto työtä kohtaan varmasti kasvaa, kun tahtikone tarvitsee ensin itsenäisesti tahdistaa verkkoon ja tämän jälkeen vasta suorittaa mittaukset tahdistetulla koneella. Tällöin tahdistus ei ole erillinen osa työtä vaan liittyy keskeisesti mittausten onnistuneeseen suorittamiseen. Säätö- ja kuormituskäyrämittauksilla voidaan myös havainnollistaa tahtigeneraattorin loistehonkompensointiominaisuutta käytännössä, jolloin asian ymmärtäminen on helpompaa.

LÄHTEET

Aura, L.;& Tonteri, A. (1986). *Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet*. Porvoo: WSOY.

Aura, L.;& Tonteri, A. J. (1996). *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. Porvoo: WSOY.

Heikkilä, S. (2007). Tutkintotyö. *Vieras magnetoitu generaattori muuttuvakierroksisena käyttönä*. Tampere, Suomi.

Hietalahti, L. (2011). *Muuntajat ja sähkökoneet* (Ensimmäinen painos p.). Vantaa: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

Mäkinen, E. (2012). *Tahtikoneen tutkiminen*. Tampere: TAMK.

Newage AVK SEG . (2006). *AS 440 AVR Specification and adjustments*. Lincilnshire, England: Stamford.

Newage AVK SEG. (2002). *BCA164A Technical Data Sheet*. Englanti: Newage International Limited.

Newage AVKSEG. (ei pvm). *Newage product training*. Newage AVKSEG.