

Ilja Ilitchov

DIESELGENERAATTORIN JÄNNITESÄÄTÄJÄN  
KOESTUSLAITTEISTON SUUNNITTELU

Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka  
2012

# DIESELGENERAATTORIN JÄNNITESÄÄTÄJÄN KOESTUSLAITTEISTON SUUNNITTELU

Ilitchov, Ilja  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Joulukuu 2012  
Ohjaaja: Nieminen, Esko  
Sivumäärä: 67  
Liitteitä:

Asiasanat: generaattori, magnetointi, jännitesäätäjä, koestus

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella Teollisuuden Voima Oyj:lle varavoimajärjestelmän dieselgeneraattorin jännitesäätäjän koestusmenetelmä ja laitteisto, jolla todennettaisiin säätäjän kunto vastaanottotarkastuksissa ja myöhemmin käytönaikaisissa koestuksissa.

On ollut muun muassa sellaisia tapauksia, jolloin valmistajan toimittama uusi ja koestettu säätäjä on osoittautunut vialliseksi. Toisaalta jännitteensäätöjärjestelmän oikea toiminta vaatii säätäjän asetteluiden oikeaa määrittämistä. Tämän takia haluttiin selvittää säätäjän toimintaperiaate säätäjän kunnon ja varavoimajärjestelmän toimintavarmuuden varmistamiseksi.

Työssä tutustuttiin säätäjän toimintaperiaatteeseen koejärjestelyiden ja mittausten kautta, jolloin pyrittiin löytämään mahdollisimman selvä ja helppokäyttöinen koestusjärjestely. Koestuslaitteisto toteutettiin taajuusmuuttajakäytöllä, jota säädetään jännitesäätäjän ohjauskäskyllä. Lisäksi työssä selvitetään generaattoreiden toimintaperiaate ja säätömahdollisuudet sekä varavoimajärjestelmien pääpiirteet.

## TESTING PLAN FOR DIESEL GENERATOR'S VOLTAGE REGULATOR

Ilitchov, Ilja

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

December 2012

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 67

Appendices:

Keywords: generator, excitation, voltage regulator, testing

---

The purpose of this thesis was to design testing equipment for an automatic voltage regulator of emergency power system's diesel generator. This thesis was done for nuclear power plant operator Teollisuuden Voima Oyj. With this testing procedure it's possible to verify condition of the automatic voltage regulator at acceptance inspections and later at operation tests.

There have been situations when faulty regulators have been delivered by manufacturer. Voltage regulator needs right adjustment to function properly with generator. Because of this Teollisuuden Voima Oyj wished to find out operational principle of the regulator to assure emergency power system's reliability.

This thesis shows measuring arrangements which are made to explain the operational principle of the regulator. Purpose was to find as easy as possible regulator's testing method which can be made by an electrician. The testing equipment was carried out with a frequency converter which is regulated through the voltage regulator. This thesis also explains operational principle of generator and its regulation possibilities.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	TAHTIGENERAATTORI .....	7
2.1	Johdanto .....	7
2.2	Kuormitus .....	9
2.3	Tehotarkastelu ja stabiilisuus.....	10
2.4	Magnetointi.....	12
2.4.1	Harjaton magnetointi .....	13
2.4.2	Harjallinen magnetointi .....	15
2.4.3	Herätinkonemagnetointi.....	15
2.4.4	Magnetointiteho oikosulussa /1/.....	16
2.5	Generaattorin säädöt .....	17
2.5.1	Tehon ja taajuuden säätö /2/.....	18
2.5.2	Jännitteen säätö.....	18
2.5.3	Automaattinen jännitesäätäjä .....	20
2.5.4	Statiikkasäädöt.....	21
2.5.5	Generaattorin suojaus .....	24
3	DIESELKÄYTTÖINEN VARAVOIMAJÄRJESTELMÄ .....	26
3.1	Varavoimajärjestelmän suunnitteluperiaatteet .....	27
3.1.1	Kuormat /8/ .....	27
3.1.2	Suorituskyky /8/.....	28
3.1.3	Mitoitus /9/ .....	29
3.2	OL1/OL2-varavoimajärjestelmä /10/.....	31
3.2.1	Yleistä .....	31
3.2.2	Dieselmoottori .....	32
3.2.3	Generaattori.....	32
3.2.4	Magnetointijärjestelmä .....	33
3.2.5	Jännitteensäätöjärjestelmä.....	33
3.2.6	Apujärjestelmät.....	34
3.2.7	Käyttö ja ohjaus.....	35
3.2.8	Tekniset tiedot .....	36
4	ABB YXRU 201 JÄNNITESÄÄTÄJÄ .....	39
4.1	Rakenne .....	39
4.2	Toimintaperiaate .....	41
4.2.1	Yleistä .....	41
4.2.2	Jännitteen säätö.....	42
4.2.3	Sytytyspulssit .....	44

4.2.4	Kompensointi .....	48
4.3	Liitännät .....	53
4.4	Tekniset tiedot .....	54
5	MITTAUKSET JA LAITTEISTO .....	57
5.1	Omicron 156.....	57
5.2	Yokogawa SL1400 piirturi.....	58
5.3	Circuitmate FG2 funktiogeneraattori.....	58
5.4	Vacon NXS taajuusmuuttaja .....	59
5.5	Mittausjärjestelyt .....	60
5.6	Taajuusmuuttajan parametrien määrittely .....	64
6	YHTEENVETO .....	66
	LÄHTEET .....	67
	LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Voimalaitosten generaattoreiden oikea käyttö on tärkeä verkon stabiilisuden kannalta. Verkon vaihtelevat kuormitusolot vaativat generaattoreilta säätömahdollisuutta generaattorin käyttökunnon ja verkon sähkönlaadun takaamiseksi. Generaattoreiden säätö tapahtuu pääosin taajuuden ja jännitteen säätönä, jolloin vaihtelevan kuormituksen aiheuttamia vaikutuksia minimoidaan generaattorin pyörimisnopeutta ja magnetoinnin tehoa muuttamalla.

Sähkönlaadun kannalta yhtenä tärkeimmistä suureista pidetään jännitettä, jonka vaihtelulle on asetettu standardirajat. Generaattorin jännitettä ylläpidetään automaattisella jännitesäätäjällä, joka kuormituksen vaihdellessa ohjaa generaattorin magnetointia asetetun jännitearvon saavuttamiseksi. Näin ollen jännitesäätäjä muodostaa jännitteesäätöjärjestelmää ohjaavan elimen, jonka toimintahäiriö saattaa estää generaattorin käytön.

Diesikäyttöinen varavoimajärjestelmä koostuu useista osajärjestelmistä, joiden keskinäisen toiminnan on oltava moitteetonta. Koko järjestelmä saattaa olla hyödytön, mikäli jokin osajärjestelmä ei ole käyttökunnossa. Järjestelmän mitoituksessa on otettava huomioon muun muassa kuorman laatu, joka jossain tapauksissa saattaa rajoittaa kokonaiskapasiteettia tuntuvasti.

Korkean käyttövarmuuden saavuttamiseksi laitteiston kunnon tilaa on seurattava tekemällä koestuksia, joilla löytyvät olemassa olevien vikojen lisäksi myös alkavat viat.

## 2 TAHTIGENERAATTORI

### 2.1 Johdanto

Sähköä tuotetaan voimalaitosten tahtigeneraattoreissa, joiden roottoria pyörittää voimakone. Tahtikoneet jaetaan roottorirakenteen perusteella umpinapakoneisiin ja avonapakoneisiin.

Avonapakoneet ovat yleensä halkaisijaltaan suuria ja hitaasti vesivoimalla pyöriviä generaattoreita. Niiden hitauden takia napaparilukua on kasvatettava, jotta verkon 50 Hz:n taajuus saavutetaan. Avonapakoneen roottori ei ole sylinterimäinen vaan se koostuu erillisistä navoista, joiden ympärille magnetointikäänitys on käämitty. Napapariluku kuvaa tahtikoneessa olevien magneettisten napojen määrää. /3/

Höyry- ja kaasuturbiinilaitoksissa käytetään yleensä halkaisijaltaan pieniä ja pituudeltaan suuria, nopeasti pyöriviä umpinapakoneita. Tällaiset generaattorit ovat yleensä kaksinapaisia, ja niitä käytetään voimalaitoksissa, joiden tehoalue on tyypillisesti 500 - 2000 MVA. Umpinapakoneen magnetointikäänitys on sijoitettu roottoriin, jotta tehdään yleensä sylinterimäisestä rautatakeesta koneistamalla. /3/

Mekaaninen voima muutetaan generaattorissa lähdejännitteeksi pyörittämällä roottoria paikallaan pysyvän staattoriin nähden. Nimensä mukaisesti tahtigeneraattorin on oltava tahdissa verkon kanssa voidakseen syöttää sinne sähköä. Tahtigeneraattorin roottorin ja staattorin magneettikentät pyörivät samalla nopeudella.

Hätätilanteissa sähkönsaanti voidaan turvata varavoimageneraattoreilla, joiden roottorin mekaanisen akselivoiman tuottamiseen yleensä käytetään dieselmoottoreita. Tässä työssä keskitytään dieselgeneraattoreihin.

Tahtikoneen roottorin pyörimisnopeus määräytyy sen napapariluvun mukaan. Tällöin se voidaan laskea kaavan 1 mukaan. Mikäli laskennassa halutaan käyttää rpm-arvoja, voidaan kaavaa 1 johtaa edelleen.

$$n = \frac{f}{p} \text{ eli } n = \frac{60f/\text{Hz}}{p} \frac{r}{\text{min}}, \quad (1)$$

jossa  $p$  = generaattorin napapariluku,  
 $f$  = taajuus,  
 $r$  = kierrosta.

Jos halutaan jännitteen taajuudeksi 50 Hz, tulisi kaksinapaisen tahtikoneen roottorin pyöriä 50 r/s eli 3000 r/min.

Kun pyörivän roottorin käämeihin syötetään magnetointivirtaa (*tasavirta*), syntyy staattoriin nähden muuttuva magneettikenttä. Tämä pyörivä magneettikenttä indusoi staattorin käämeihin sinimuotoisen lähdejännitteen, jota kutsutaan myös sähkömotoriseksi voimaksi (*smv*).

Generaattorin staattoriin indusoitunut lähdejännite määräytyy suoraan verrannollisesti roottorin pyörimisnopeudesta ja magnetointivirrasta kaavan 2 mukaan. /3/

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

jossa  $f_k$  = käämityskerroin,  
 $f$  = taajuus,  
 $N$  = staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset,  
 $\Phi_m$  = yhden magneettinavan päävuoto, joka on sama kuin staattorivyöhyden maksimi- eli huippuvuoto.

Kaavasta 2 havaitaan, että päävuoto  $\Phi_m$  lukuun ottamatta kaikki lähdejännitteeseen  $E$  vaikuttavat tekijät ovat vakioita. Tällöin lähdejännite riippuu ainoastaan magnetointivirrasta  $I_m$ , ja kaava 2 voidaan yksinkertaistaa seuraavaan muotoon. /3/

$$E = k\Phi_m = kI_m \quad (3)$$

Tahtigeneraattorin pyörimisnopeuden muutos vaikuttaa lähdejännitteeseen. Roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa myös lähdejännite kasvaa. On kuitenkin huomattava,



että monet muutkin tahtigeneraattorin suureet ovat riippuvaisia pyörimisnopeudesta, mikä tekee koneen laskennallisesta mallintamisesta lähes mahdottoman koneen valmistajan antamien tietojen perusteella. Tällaisia suureita ovat muun muassa tahti- ja hajareaktanssi.

## 2.2 Kuormitus

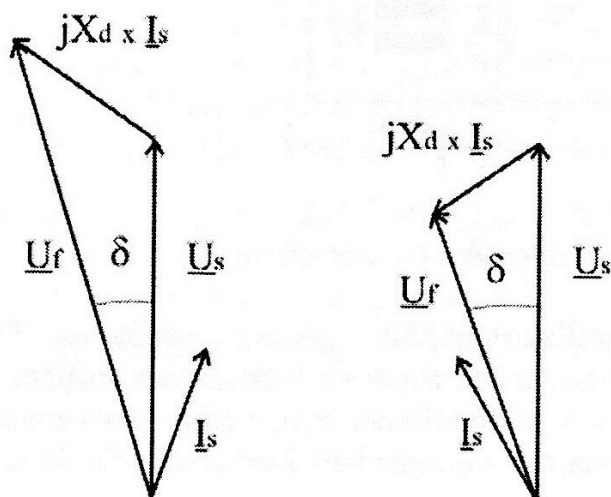
Tahtikoneen maksimivääntömomentti on riippuvainen koneen mitoituksesta, verkon jännitteestä  $U_s$  ja koneen lähdejännitteestä  $E$  nimellisellä magnetoinnilla kaavan 4 mukaisesti. /3/

$$T_{max} \approx k U_s E \approx (1,5 \dots 2,5)T_N, \quad (4)$$

jossa  $k =$  vakiokerroin,  
 $T_N =$  nimellismomentti.

Koneen maksimivääntömomentin ylittäminen johtaa tahdistaputoamiseen. Tämä voi johtua verkkojännitteen ja magnetointivirran alenemisesta tai liiallisesta kuormituksesta. /3/

Generaattorin napajännite  $U_s$  riippuu lähdejännitteen  $E$  lisäksi kuorman tyypistä. Kun generaattoria kuormitetaan, staattorissa kulkee kuormitusvirta  $I$ . Kuormitusvirta aiheuttaa jännitehäviön käämityksen sisäisessä impedanssissa. Kuormituksen aikana koneen reaktanssi (*tahtireaktanssi*) määrää napajännitteen suuruuden kuorman reaktiivisuudesta riippuen. Tarkastellaan tilannetta seuraavan osoitinpiirroksen avulla. /3/



**Kuva 1** Induktiivisen ja kapasitiivisen kuorman vaikutus napajännitteeseen /1/

Kuvasta nähdään, että napajännite  $U_s$  on pienempi kuin lähdejännite  $E$ , kun kuorma on induktiivinen ja suurempi, kun kuorma on kapasitiivinen. Lisäksi huomaamme sen, että lähdejännite pysyy napakulman  $\delta$  verran napajännitettä edellä staattorikäämin induktanssin takia. Käämityksen resistanssi on usein häviävän pieni reaktanssiin verrattuna, joten sitä ei huomioida tarkastelussa. /1/

Kuormitusvirrasta johtuva staattorikäämityksen magnetomotorinen voima synnyttää magneettikentän (ankkurikenttä), joka muuttaa magnetointivuota ja generaattorin kokonaiskenttä muuttuu. Tämä muutos vaikuttaa generaattorin napajännitteeseen  $U_s$ , jos koneen magnetointia pidetään vakiona. /1/

### 2.3 Tehotarkastelu ja stabiilisuus

Generaattorin tuottama pätöteho saadaan sitä pyörittävän voimakoneen mekaanisesta tehosta. Magnetointi puolestaan määrää generaattorin verkkoon syöttämän loistehon. Ylimagnetoitu generaattori toimii kuten kondensaattori ja syöttää verkkoon induktiivista loistehoa. Alimagnetoitu generaattorin on puolestaan verrattavissa käämiin, jolloin se ottaa verkosta induktiivista loistehoa. Umpinapaisen generaattorin pätötehon laskeminen kuvataan kaavassa 5, joka mahdollistaa tehon laskemisen myös napakulman perusteella.

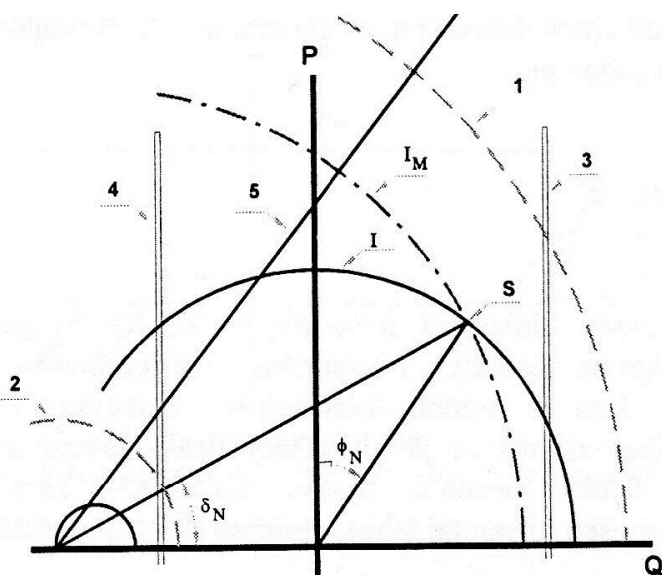
$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi = 3 \frac{EU_s}{X_d} \sin \delta \quad (5)$$

Nimellisesti kuormitetun generaattorin napakulma on 20...30 astetta. Tyhjäkäyvän koneen napakulma on lähellä nollaa, jolloin napa- ja lähdejännite ovat likimain yhtä suuret ( $E = U_s$ ). Generaattorin maksimiteholla napakulma on 90 astetta, mutta käytännössä koneen stabiilisuden raja menee alempana. Kun napakulma ylittää 90 astetta, koneen käyttäytyminen muuttuu epästabiiliksi, mistä seuraa tahdistaputoaminen.

/3/

Koneen pätö- ja loistehojen pitää olla tasapainossa niin, että koneen nimellinen näennäisteho ei ylitä. Mikäli generaattorin loistehon osuutta nostetaan, pätötehon osuutta on laskettava, jotta kuormitusvirta pysyisi nimellisenä. Näin koneen käyttö pysyy nimellispisteessä. Generaattorin tekniset ominaisuudet nähdään sen PQ-diagrammista muun muassa stabiiliusrajojen ja nimellisen toimintapisteen muodossa.

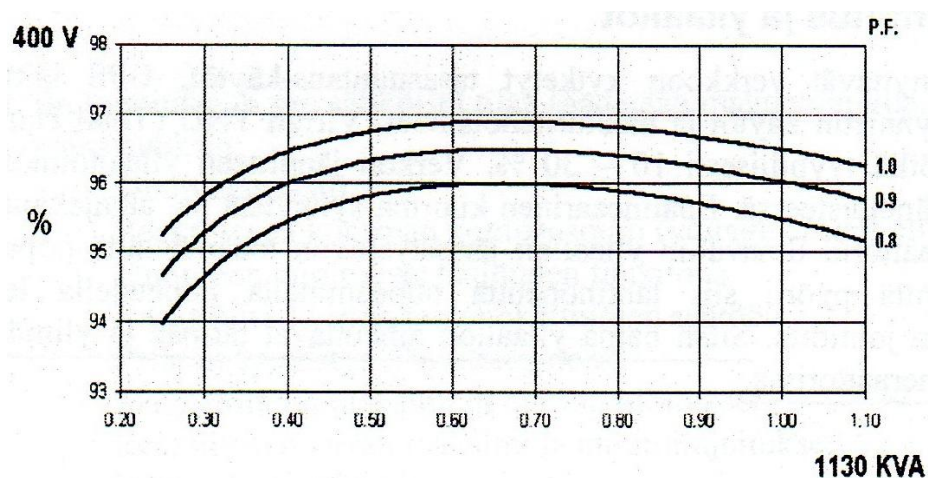
/1/



1	Maksimi magnetointi	S	Nimellinen piste
2	Minimi magnetointi	P	Pätötehoakseli
3	Maksimi reaktiivinen teho	Q	Loistehoakseli
4	Minimi reaktiivinen teho	I	Staattorivirta
5	Napakulmarajoitus	$I_M$	Magnetointivirta
$\delta_N$	Napakulma	$\varphi_N$	Vaihekulma

**Kuva 2** Generaattorin PQ-diagrammi /1/

Suurin osa generaattorin häviöistä syntyy koneen käämityksissä ja raudassa. Häviöt vaihtelevat tehokertoimen funktiona magnetoinnin muuttuessa. Magnetointitarpeen kasvu ylimagnetoinnissa johtaa roottorihäviöiden nousuun, jolloin roottorin käämityksessä kulkee suurempi virta ja raudan kyllästysaste kasvaa. Loistehon muutos ei kuitenkaan vaikuta staattorihäviöihin, sillä staattorikäämin kuormitusvirta pysyy samana tehojen ollessa tasapainossa. Loistehon kasvu kuitenkin laskee hyötysuhdetta, kun samalla virralla voidaan tuottaa pienempi pätöteho. /1;2/



**Kuva 3** Esimerkki 1130 kVA generaattorin hyötysuhteesta tehokertoimen ja kuormitusasteen funktiona /1/

## 2.4 Magnetointi

Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmä jaetaan toiminnallisesti kolmeen eri osaan:

1. magnetointilaitteisto
2. säätöjärjestelmä
3. käsiohjauslaitteisto

Generaattorin ankkurikäämin lähdejännitteen aikaansaamiseksi on synnyttävä magneettikenttä, eli päävuo, joka saadaan aikaan magneetolla roottori (napapyörä). Roottorin magneetoimiseksi tarvitaan tasavirtaa, joka syötetään magnetointilaitteiston avulla.

Jos magnetointivirta on nolla, generaattori kehittää vain pienen lähdejännitteen, joka johtuu niin sanotusta remanenssimagneettivuosta. /1/

Säätöjärjestelmän tarkoituksena on puolestaan ohjata magnetointilaitteiston syöttämää magnetointivirtaa generaattorin jännitteen perusteella. Säätöjärjestelmän tulisi sisältää seuraavia ominaisuuksia: /1/

1. Jännitteen säätö
2. Statiikka säätö
3. Jännitteen rajoitukset alitaajuudella
4. Reaktiivisen virran ja tehokertoimen säätö
5. Jänniteramppi, pehmökäynnistys
6. Magnetoinnin maksimi ja minimirajoitukset
7. Reaktiivisen virran maksimi ja minimirajoitukset
8. Napakulman rajoitus
9. Käsiohjaus
10. Rinnankäyttöominaisuudet

Generaattorin jännitteen ohjearvo voidaan asettaa käsiohjauslaitteistolla, jolloin säätäjä määrittelee magnetointivirran kyseisen ohjearvon saavuttamiseksi.

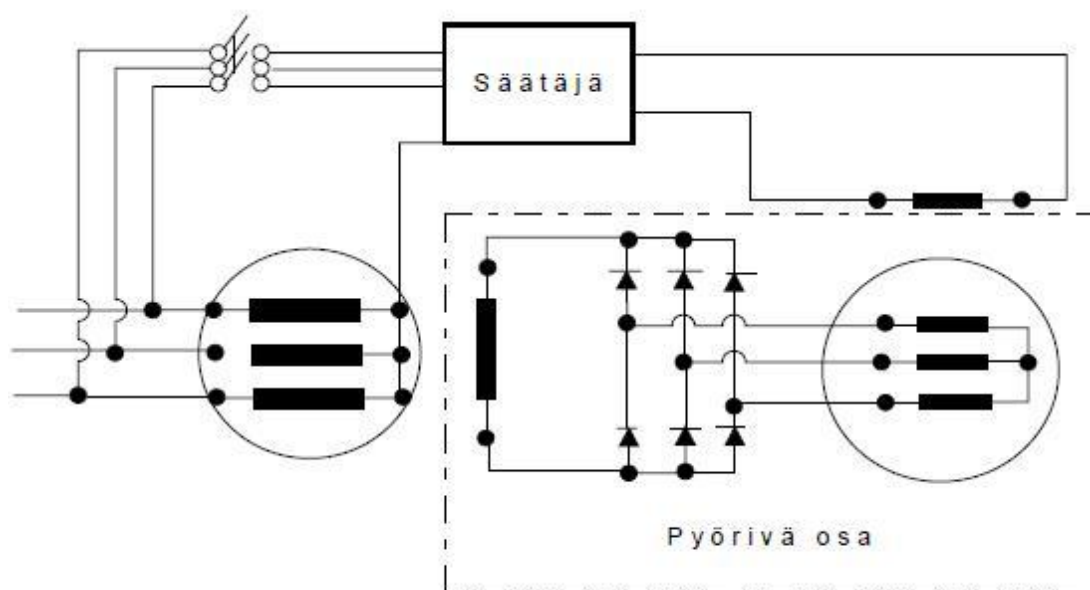
Generaattorit jaetaan magnetointitavan perusteella harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin.

#### 2.4.1 Harjaton magnetointi

Harjattoman generaattorin magnetoinnissa tarvittava tasavirta saadaan aikaan pienellä magnetointikoneella, joka on generaattorin kanssa samalla akselilla. Magnetointikoneessa pyörivä roottori toimii staattorina. Magnetointikoneen (*ulkonapainen tahtikone*) rungossa sijaitsevaan roottoriin tuodaan tasavirta jännitesäätäjän ohjaamana, jolloin akselilla pyörivälle staattorikämmitykselle indusoituu vaihtojännite. Generaattorin pyöriessä tämä magnetointikoneen pyörivä staattorikämmitys syöttää pääkoneel-

le magnetointivirtaa, joka tasasuunnataan samalla akselilla pyörivän diodisillan avulla. Tällöin pääkoneen roottorikäämi indusoi vaihtojännitteen staattorikäämiin. /3;6/

Magnetointikoneen roottorivirta tuodaan tyristoriohjatun tasasuuntaussillan kautta joko pääkoneen navoista verkkomuuntajalla tai samalla akselilla olevasta herätinkoneesta. Jännitesäätäjä määrittelee pääkoneen magnetointivirran suuruuden ohjaamalla tyristoreita magnetointikoneen roottorivirran säätämiseksi.



**Kuva 4** Harjattoman magnetoinnin periaatekuva /6/

Pääkoneen magnetointivirtaa voidaan vaihtoehtoisesti säätää ohjaamalla roottorissa pyörivää tasasuuntaussiltaa. Tällöin sillan on oltava tyristoriohjattu ja magnetointikoneen roottorivirran vakio. Jännitesäätäjän ohjaukseen välitetään siltaan pulssimuuntajan avulla.

Harjattoman magnetoinnin hyvänä puolena pidetään sen huoltovapautta, sillä siinä ei ole hiiliharjoja eikä näin ollen myöskään mekaanista kosketuspintaa. Haittapuolena pidetään sen hidasta säätödynamiikkaa. /7/

Säätödynamiikan hitaus perustuu siihen, että magnetointikäämyksessä on suuri kierrosmäärä magnetointikäämiä, jolloin käämin induktanssi on kohtuullisen suuri.

Induktanssi tunnetusti vastustaa virran muutosta, mikä tarkoittaa sitä, että magnetointivirran säätöaikavakiot ovat pitkiä, noin 0,5 - 2,0 sekuntia. /1;7/

#### 2.4.2 Harjallinen magnetointi

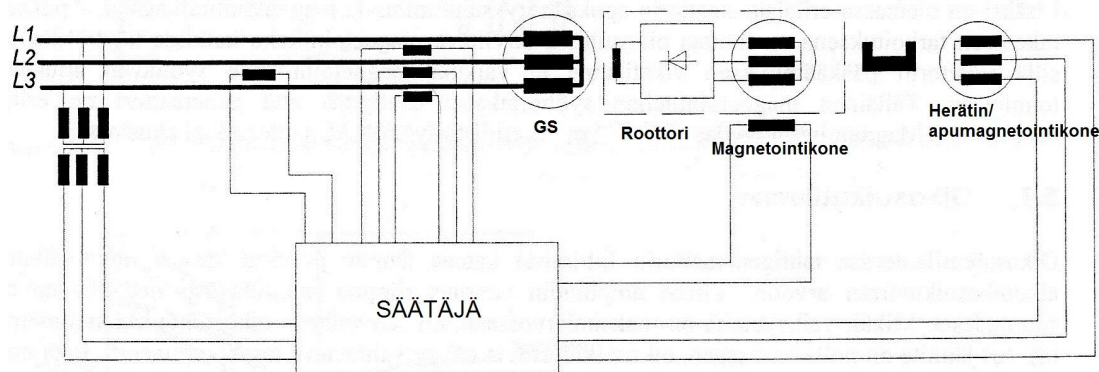
Harjallisessa tahtikoneessa magnetoinnissa tarvittava tasavirta viedään roottoriin useimmiten grafiitista valmistettujen hiiliharjojen kautta. Hiiliharjat puristetaan joussilla liukurenkaisiin, jotka ovat yhteyksissä roottorikäimitykseen. Tällöin magnetointivirta voidaan ottaa verkkomuuntajan välityksellä verkon syötöstä tai roottorin kanssa samalla akselilla pyörivältä herätinkoneelta. Verkkomuuntajan jälkeen magnetointivirta tasasuunnataan ja siirretään hiiliharjojen välityksellä pääkoneen roottorikäymiin. Tällöin staattorikäymiin indusoituu vaihtojännite roottorin pyöriessä. /1;3;7/

Harjallisen magnetoinnin huonona puolena pidetään sen huoltotarvetta, sillä hiiliharjat ja liukurenkaat ovat kuluvia osia, ja niitä pitää huoltaa säännöllisesti. Hiiliharjojen vaihtovälit ovat kuitenkin jatkuvassakin käytössä vuosia. Hyvänä puolena pidetään magnetoinnin nopeaa säätödynamiikkaa. Harjallisen koneen hiiliharjat korvaavat magnetointikoneen, jolloin magnetointivirran säätö on nopeampaa pienemmän induktanssin seurauksena. Harjallisella magnetoinnilla saavutetaan 0,15...0,3 s generaattorin napajännitteen nousuaika. /1/

#### 2.4.3 Herätinkonemagnetointi

Pääkoneen magnetointiteho voidaan tuottaa herätinkoneella (*vaihtosähkögeneraattori*), joka sijoitetaan samalle akselille pääkoneen roottorin kanssa. Kummatkin magnetointitavat, harjaton ja harjallinen magnetointi, voidaan toteuttaa herätinkoneen avulla. Tällöin riippuvuus verkon syötöstä vähenee, ja säätäjä kykenee ylläpitämään suojareleiden tarvitsemaa jatkuvaa oikosulkuvirtaa. /1/

Herätinkoneen roottori voidaan rakentaa kestmagneeteista, jotka muodostavat magnetoinnissa tarvittavan tasavuon. Tasavuon pyöriessä staattorikäymiin indusoituu vaihtojännite. Vaihtojännite syötetään tasasuunnattuna magnetointikoneen tai hiiliharjojen välityksellä pääkoneen roottorikäymiin.



**Kuva 5** Herätinkoneella magnetoitu tahtikone /1/

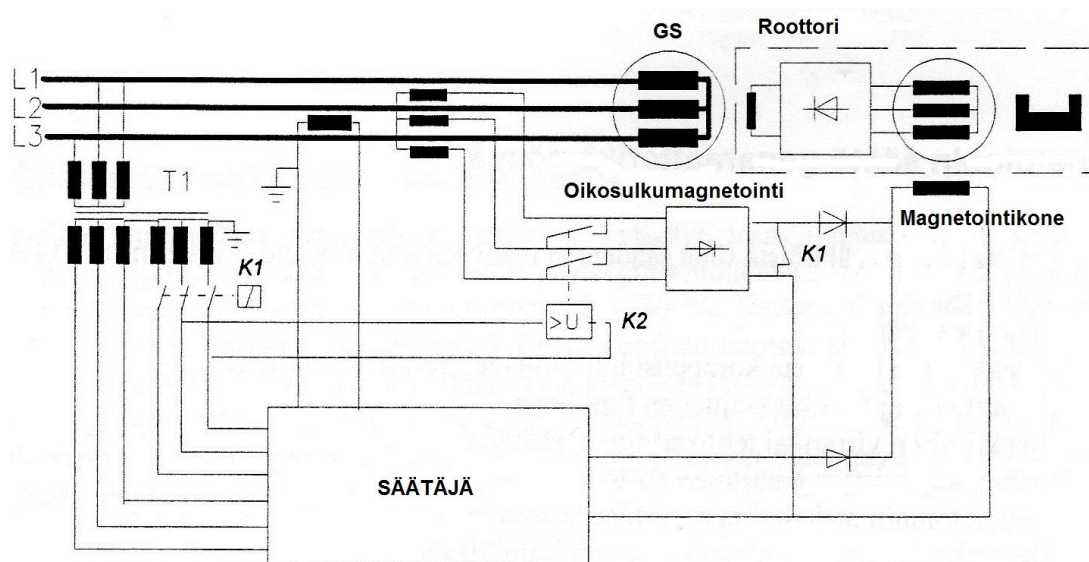
#### 2.4.4 Magnetointiteho oikosulussa /1/

Generaattorin on pystyttävä tuottamaan riittävän suurta oikosulkuvirtaa, jonka suoja-releet tarvitsevat toimiakseen oikein. Mikäli magnetointia syötetään vain verkko-muuntajalla, generaattori ei pysty verkon vikatilassa tuottamaan tarvittavaa oikosul-kuvirtaa. Tällöin magnetointiteho on varmistettava verkon oikosulkutilanteiden va-ralta muun muassa generaattorin erikoisrakenteilla ja kyllästyvillä virtamuuntajilla tai herätinkoneen avulla.

Virtamuuntajat syöttävät pääkoneelle magnetointivirran, joka mahdollistaa vähintään 250 % oikosulkuvirran 10 sekunnin ajan. Pääkoneen staattoriin voidaan myös sijoit-taa apukäämityksiä, joiden tarkoituksena on tuottaa oikosulussa tarvittava magne-tointiteho. Tällöin staattorin pääkäämityksen vikaantuminenkaan ei vaikuta magne-tointiin, sillä apukäämitys syöttää magnetointitehoa staattorikäämityksestä riippumat-ta.

Magnetointiteho saadaan varmistettua myös herätinkoneen avulla, sillä se tuottaa magnetointipiirin tarvitseman tehon roottorin pyöriessä. Herätinkoneen magnetointi saadaan aikaan kestopagneeteilla, mikä taas vähentää riippuvuutta verkon syötöstä. Magnetointitehon varmistaminen onnistuu myös akuston avulla.





**Kuva 6** Virtamuuntajalla ja apukäämityksellä magnetoitu tahtikone

## 2.5 Generaattorin säädöt

Verkon sähkönlaadun ja stabiilisuden takaamiseksi generaattorin on toimittava oikein kaikissa tilanteissa. Generaattorin toimintavarmuus hoidetaan oikeaoppisella operoinnilla ja säätöjärjestelmien asettelulla. Säätöjärjestelmät pitävät generaattorin käytön turvallisena ja käyttöasteen korkealla niin, että generaattorin tai verkon virhetilanne ei aiheuta vaaraa voimalaitokselle tai sähköverkon käyttäjälle. Säätöjärjestelmien ohjearvot on asetettava käyttötarkoitusta vastaaville rajoille ja määräaikaistarkastukset on tehtävä ammattitaitoisella henkilökunnalla.

Sähköverkkoa on yleensä syöttämässä useita rinnakkaisia generaattoreita, mikä asettaa niiden yhteensopivuudelle tietynlaisia vaatimuksia. Generaattoreiden on kyettävä tuottamaan yhdenmukaista jännitettä samalla taajuudella ja jakamaan kuormat generaattoreiden kapasiteettien mukaisesti. Säätöjärjestelmät hoitavat jännitteen ja taajuuden säädön sekä pätö- ja loistehotasapainon ylläpitämisen. Dieselgeneraattorikäytössä stabiilisuutta ylläpidetään generaattorin automaattisilla jännitteensäätäjillä sekä voimakoneen nopeudensäätö- ja kuormantasausjärjestelmien avustuksella.

### 2.5.1 Tehon ja taajuuden säätö /2/

Generaattoreiden ohjaus tapahtuu automaattisilla säätäjillä, jotka säätävät taajuutta sekä pätö- ja loistehoa. Generaattorin pätötehoa ja taajuutta säädetään voimakoneen pyörimisnopeutta muuttamalla. Loistehon säätö puolestaan tapahtuu generaattorin magnetointivirtaa säätämällä. Voimakoneen tehon muutos aiheuttaa generaattorin sisäisen jännitteen napakulman muutoksen, kun taas magnetoinnin muutos muuttaa generaattorin sisäisen jännitteen itseisarvoa.

Generaattorin taajuuden säädön tarkoituksena on sähköverkon taajuuden ylläpito, lyhytaikaisten kuormitusmuutosten vaikutusten minimointi sekä generaattoreiden rinnankäytön mahdollistaminen. Voimajärjestelmän taajuuden on pysyttävä likimain vakiona, jotta se voisi toimia hyvin. Sähköverkon taajuutta säädetään voimakoneiden pyörimisnopeutta muuttamalla, mikä dieselkäyttöisissä voimalaitoksissa toteutetaan dieselmoottorin polttoainesyöttöä säätämällä.

Kun verkon pätötehon kulutus kasvaa suuremmaksi kuin sen tuotanto, kuorma ottaa tehonsa generaattorin pyörivän akselin liike-energiasta. Tämä hidastaa generaattoria, ja verkon taajuus pienenee. Jos taas kuorman teho laskee tuotetun tehon alapuolelle, generaattorin liike-energia, pyörimisnopeus ja taajuus kasvavat.

Normaalitilanteessa kuormien muutokset ovat pieniä koko verkon generaattoreiden liike-energiaan verrattuna, ja näin ollen verkon taajuuden muutokset pieniä. Normaalikäytössä verkon taajuus pidetään välillä 49,9 - 50,1 Hz, mutta häiriön ja heikon verkon tilanteessa taajuus voi käytännössä vaihdella enemmänkin.

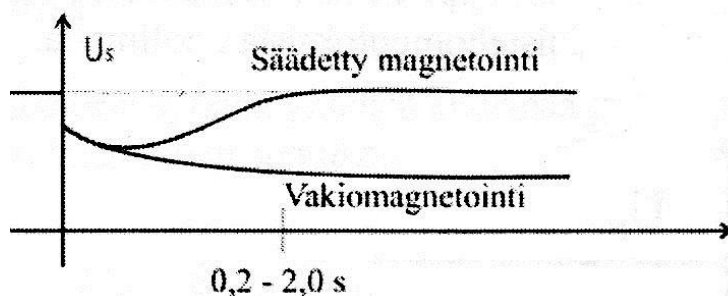
### 2.5.2 Jännitteen säätö

Säädön tarkoituksena on pitää jännite vakiona kuormituksesta riippumatta, jolloin hyvän sähkönlaadun myötä käyttövarmuus pysyy korkeana. Generaattorin tuottamaa lähdejännitettä voidaan säätää vain taajuutta ja magnetoinnin suuruutta muuttamalla. Sähköverkon taajuuden on kuitenkin oltava vakio, joten käytännössä jännitteensäädön ainoaksi vaihtoehdoksi jää magnetoinnin säätäminen. Generaattorin säätöjärjes-

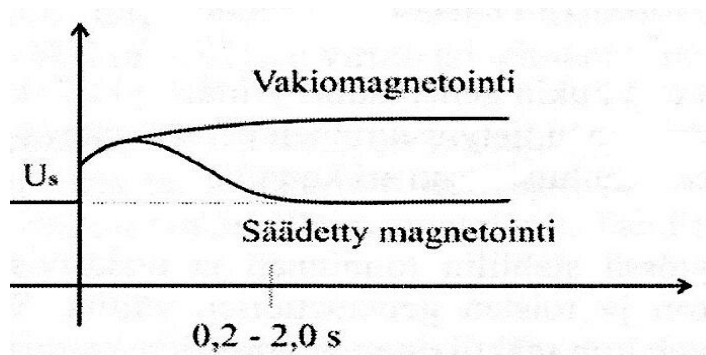
telmä mittaa joko generaattorin jännitettä tai vaihtoehtoisesti generaattorimuuntajan yläjännitepuolen jännitettä, jota verrataan ohjearvoon ja säädetään loistehon tuotantoa siten, että jännite pysyy halutussa arvossa. /2/

Loistehoa tuottavat laitteet nostavat ja loistehoa kuluttavat laitteet laskevat jännitettä. Magnetointivirtaa säätämällä saadaan generaattori joko ali- tai ylimagnetoitumaan. Alimagnetoimalla saadaan generaattori kuluttamaan loistehoa (*induktiivinen*) ja jännite laskemaan, kun taas ylimagnetoimalla generaattori saadaan tuottamaan loistehoa (*kapasitiivinen*) ja jännite nousemaan. /2/

Säätöpiirin on toimittava niin, että jännite käyttäytyy järkevästi kuormituksen vaihdeltaessa. Tällöin on asteltava jänniteramppi, jolla estetään jännitepiikit ja värähtelyt asettelemalla säätödynamiikan vasteaika riittävän pituiseksi. Virran äkillinen muutos aiheuttaa jännitteen värähtelyä, jota voidaan vähentää käyttämällä sopivan loivaa jänniteramppia. Seuraavissa kuvissa näemme kuormituksen muutokset jännitteen ja magnetoinnin kannalta.

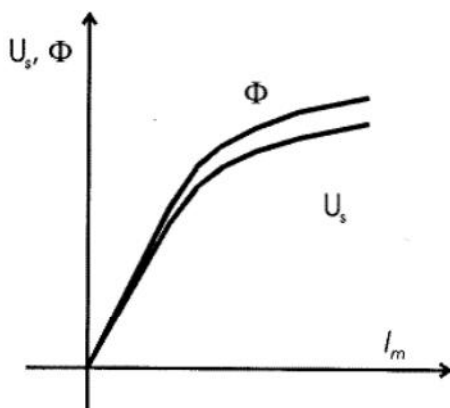


**Kuva 7** Kuorman kytkeytyminen generaattoriin /1/



**Kuva 8** Kuorman poiskykytyminen generaattorista /1/

Lähdejännitettä voidaan säätää lineaarisesti magnetointivirtaa muuttamalla koneen kyllästysalueen alapuolella. Koneen raudan kyllästyessä, jännitteen nosto vaatii huomattavasti suurempia magnetointivirtoja kuin kyllästysalueen alapuolella, mikä voi vaurioittaa magnetointikäämiä. Koneen kyllästyminen näkyy kuvassa 9.



**Kuva 9** Magnetointivirran vaikutus lähdejännitteeseen

Verkon jännitettä voidaan säätää muuntajien käämikytkimien sekä verkon kompensointilaitteistojen (*kondensaattoriparisto*) avulla, mutta generaattorin osalta säätö hoidetaan pääosin automaattisella jännitteesäätäjällä.

### 2.5.3 Automaattinen jännitesäätäjä

Generaattoreiden ohjauksessa käytetään automaattisia jännitesäätäjiä AVR (*Automatic voltage regulator*), joka huolehtii jännitteen pysymisestä vakiona tehon ja taajuuden vaihdellessa. Säätäjä voi huolehtia myös loistehokuorman jakamisesta generaattoreiden kesken. Automaattinen säätäjä tunnistaa generaattorin jännitteen ja säätää sen perusteella magnetoinnin voimakkuutta. Näin ollen se pystyy säätämään generaattorin lähdejännitettä sekä tehokerrointa voimajärjestelmän stabiilisuden takaamiseksi.

Häiriöiden minimoimiseksi generaattorin jännite olisi hyvä kytkeä säätäjään galvanisen erotusmuuntajan välityksellä, jolloin säädin ja generaattori ovat erillään toisistaan, ja häiriöt eivät siirry säätäjästä generaattorin liitinjännitteeseen. Säätäjässä voi olla joko isokroninen säätö tai loistehostatiikka (*voltage droop*). /3/

Nykyaikaiset säätäjät ovat useimmiten digitaalisia, jolloin niiden käyttäytymistä voidaan helposti seurata ja määritellä tietokoneen ohjelmiston välityksellä. Tällöin säätäjien koestuskin onnistuu siihen tarkoitukseen tehdyillä ohjelmilla.

#### 2.5.4 Statiikkasäädöt

##### 2.5.4.1 Loistehostatiikka (jännitestatiikka)

Jännitesäätäjissä käytetään loistehostatiikkaa (*Voltage droop*), jolla muutetaan jännitteen ohjearvoa generaattorin kehittämän loisvirran mukaan. Verkon loistehokuorman kasvaessa pienennetään generaattorin jänniteohjetta verrannollisesti loisvirran muutokseen. Statiikasta johtuen verkkojännite pienenee reaktiivisella kuormituksella.

Loistehostatiikkaa voidaan käyttää yksittäisen generaattorin sekä rinnankäyvien generaattoreiden säädössä. Yksittäisen generaattorin tapauksessa säädön ainoa tehtävä on pitää lähdejännite asetetuissa rajoissa, eikä jännitettä muuteta loistehokuorman funktiona. Useamman generaattorin tapauksessa loistehostatiikka huolehtii jännitesäädön lisäksi generaattoreiden välisestä loistehotasapainosta, jolla taataan generaattoreiden stabiili toiminta. Tällöin generaattoreiden tyhjäkäyntijännitteiden on oltava samat. Jos esimerkiksi kolme generaattoria syöttää yhteistä kuormaa, voidaan loistehojen suhde määrittää kaavalla 6. /1;7/

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 = \frac{Q_{N1}}{S_1} : \frac{Q_{N2}}{S_2} : \frac{Q_{N3}}{S_3} \quad (6)$$

jossa  $Q_{N1}, Q_{N2}, Q_{N3}$  ovat generaattoreiden nimelliset loistehot.

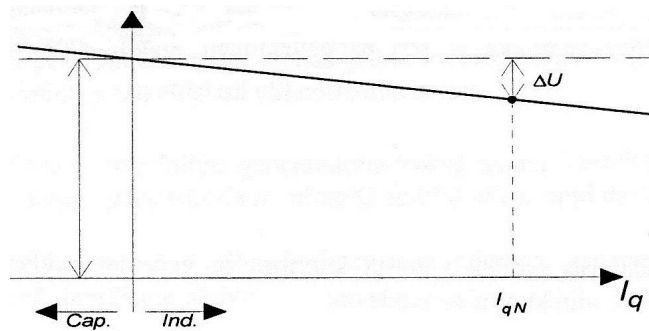
$S_1, S_2, S_3$  ovat generaattoreiden loistehostatiikat.

Generaattoreiden rinnankäytössä verkon kuorman tulisi jakaantua tasan kaikkien koneiden kesken. Stabiilisuden kannalta ei ole mahdollista, että kukin generaattori yrittäisi pitää verkon jännitteen omien ohjearvojensa mukaan. Tällöin generaattorin on joustettava niin, että sen jännite alenee loistehokuorman kasvaessa. Loistehokuorma

jakaantuu kaikkien generaattoreiden nimellisloistehojen suhteessa, kun rinnankäytilä generaattoreilla on sama statiikan ohjearvo. Statiikan ohjearvojen ollessa eri, kuormitus ei jakaudu tasan generaattoreiden nimellisloistehojen suhteessa. /1/

Mikäli generaattoreiden ominaisuudet poikkeavat huomattavasti toisistaan, voidaan loistehostatiikka asetella jokaiselle koneelle yksilöllisesti. Tällöin voidaan statiikkaa säätämällä vaikuttaa loistehokuormituksen jakautumaan. Generaattorin tuottamaa loistehoa pienennetään statiikka-arvoa kasvattamalla.

Statiikka on rinnankäytössä 0 - 10 % ja asetusrvo on tyypillisesti 5 - 6 %. Jos loistehostatiikan arvo on asetettu 3 %, putoaa lähdejännite niin, että nimellisen loisvirran kohdalla jännitteen lasku on 3 %. /1/



**Kuva 10** Verkon jännite loistehon funktiona /1/

Saarekekäytössä generaattorin jännite pidetään vakiona loistehomuutoksista huolimatta. Tällöin säätäjän statiikka-arvo asetellaan 0 %, jolloin jännite ei laske loistehokuorman kasvaessa. /1/

#### 2.5.4.2 Pätötehostatiikka /1/

Generaattoreiden rinnankäytössä voimakoneen nopeussäätö vaatii vastaavaa joustavuutta kuin loistehostatiikan jännitesäätö, jolloin pätehostatiikan periaatteellinen toimintaidea on sama kuin loistehostatiikassa.

Pätötehostatiikan (*speed droop*) asetteluilla voidaan hoitaa generaattoreiden tehon jakaminen. Rinnankäyvät generaattorit kuormittuvat epätasaisesti, mikäli niiden jännitteen ohjearvot ovat eri suuret. Pätötehokuorma jakaantuu kaikkien generaattoreiden nimellistehojen suhteessa, kun rinnankäyvillä generaattoreilla on sama statiikan ohjearvo. Rinnankäyvien generaattoreiden tyhjäkäyntinopeudet on säädettävä samoiksi, kun niiden ohjaamiseen käytetään pätötehostatiikkaa. Jos esimerkiksi kolme generaattoria syöttää yhteistä kuormaa, voidaan tehojen suhde määrittää seuraavalla yhtälöllä:

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{P_{N1}}{S_1} : \frac{P_{N2}}{S_2} : \frac{P_{N3}}{S_3}, \quad (7)$$

jossa  $P_{N1}, P_{N2}, P_{N3}$  ovat generaattoreiden nimellistehot.  
 $S_1, S_2, S_3$  ovat generaattoreiden pätötehostatiikat.

Tässä menetelmässä generaattorin voimakoneen (*dieselmoottori*) pyörimisnopeusohjetta muutetaan verkon pätötehotarpeen mukaan. Pätötehon kasvaessa pienennetään generaattorin voimakoneen pyörimisnopeusohjetta niin, että nimellisen pätötehon kohdalla nopeuden lasku on statiikan määräämän prosenttiluvun verran. Tästä seuraa se, että sähköverkon taajuus vaihtelee kuormituksen mukaan, minkä takia taajuuden tasaamiseksi saatetaan käyttää lisäsäätöä. Pätötehostatiikan yleinen asetteluarvo on 4-5 %./1/

Tarvittaessa pätötehojakaumaan voidaan vaikuttaa säätämällä jokaisen koneen statiikkaa erikseen.

#### 2.5.4.3 Isokroninen säätö /7/

Isokroninen säätö pitää generaattoreiden pyörimisnopeuden vakiona kuormituksesta riippumatta. Säätötapaa voidaan käyttää yksinkäyvien generaattoreiden ohjaukseen sekä rinnankäytössä, kun generaattoreita ohjataan keskitetysti automaation avulla. Kuorman kasvaessa jänniteensäätäjä välittää tiedon dieselmoottorin polttoaineenohjauksyksikölle vääntömomentin nostamiseksi, jolloin taajuus ja jännite eivät laske kuormitusvirran kasvaessa niin kuin loistehostatiikassa.

Rinnankäytössä voimakoneiden säätäjien välillä on oltava tehontasausominaisuus, mikä mahdollistaa tehon jakamisen generaattoreiden kesken. Tällöin jokaisella generaattorilla on oltava oma ohjausyksikkö, joka välittää ohjauskäskyn voimakoneen säätäjälle vakiopyörimisnopeuden ylläpitämiseksi.

Tehonjako generaattoreiden välillä saadaan aikaan yhdistämällä voimakoneiden tehonvalvontapiirit yhteen, jolloin tehotarpeen muuttuessa jokainen säätäjä asettaa voimakoneelleen oman suhteellisen osuuden kokonaistehosta niin, että tehotasapaino saavutetaan.

### 2.5.5 Generaattorin suojaus

Generaattorin toimintakunnon ylläpitäminen vaatii koneen teknisten rajojen tuntemista, jolloin säätäjät osataan asettaa niin, että kone ei joudu epästabiliin tilaan. Tyypillisesti säätäjillä rajoitetaan magnetointia, reaktiivista tehoa ja napakulmaa.

Roottorin magnetointikään ja sitä syöttävän magnetointikoneen ylikuormittuminen vältetään asettelemalla magnetointirajoitukset, sillä liiallinen magnetointivirran nousu aiheuttaa käämityksen palamisen. Magnetointivirralla on aseteltava maksimi- ja minimirajat. Minimiraja suojaa generaattoria toimimasta epästabiliilla alueella alimagnetoituna, sillä kapasitiivisen kuorman kasvaessa tarvitaan vähemmän magnetointia. Tällöin rajoituksella ylläpidetään koneen vaatimaa minimi magnetointia. Myös napakulman rajoittaminen estää alimagnetoituneen generaattorin joutumasta epästabiliille alueelle. Maksimiraja rajoittaa generaattorin kykyä tuottaa loistehoa verkon vaatimuksiin, millä vältetään koneen ylikuormittumista. Maksimi magnetointivirta määräytyy sen magnetointitarpeen mukaan mikä tuottaa koneelle tarvittavan oikosulkuvirran. /1/

Mikäli generaattorin jännitteen halutaan pysyvän samana, on magnetointivirtaa kasvatettava generaattorin mentäessä alitaajuudelle. Taajuuden pienentyessä magnetointipiiri on kuitenkin suojattava ylikuormitukselta rajoittamalla virtaa. Tällöin jännite



pidetään vakiona maksimissaan 10 % alle nimellistaajuuteen saakka, minkä jälkeen jännitettä lasketaan taajuuden laskiessa edelleen. /1;3/

Säätäjien rajoitukset määritellään generaattorin PQ-diagrammin stabiilisuusrajojen ja nimellisen toimintapisteen perusteella.

### 3 DIESELKÄYTTÖINEN VARAVOIMAJÄRJESTELMÄ

Sähkökatkon sattuessa järjestelmän tarkoituksena on olla varavoimana voimalaitoksen ylläpitämisen kannalta tärkeille komponenteille, jolloin laitoksen turvallinen käyttö on mahdollista. Useimmiten turvallisuutta edistävät järjestelmät kuten hälytysjärjestelmät, poistumistievalot ja valvontalaitteet liitetään varavoimajärjestelmään. Dieselkäyttöisillä ratkaisuilla voidaan varmistaa kuormia kilovolttiampeerista useampaan megavolttiampeeriin saakka.

Dieselkäyttöinen varavoimajärjestelmä koostuu generaattorista, dieselmoottorista ja ohjausjärjestelmästä. Ohjausjärjestelmän tehtävänä on muun muassa voimakoneena toimivan dieselmoottorin nopeudensäätö, generaattorin jännitteen ja magnetoinnin ohjaus sekä järjestelmän käynnistäminen sähkönsyötön katketessa. /5/

Varavoimajärjestelmän on oltava mahdollisimman vähän riippuvainen muista verkon järjestelmistä, ja sen on kyettävä käynnistymään automaattisesti ilman ulkopuolisten järjestelmien apua verkon pimentyessä. /8/

Dieselgeneraattorin käynnistämiseen tarvitaan aikaa, sillä dieselmoottorin on saatettava roottori liikkeelle pysähdyksistä. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkökatkon sattuessa varavoimajärjestelmä käynnistyy tietyn viiveen kuluessa.

Varavoimajärjestelmä on mitoitettava varmennettavan kuorman mukaan huomioiden erityyppisten kuormien ominaisuudet, sillä muun muassa suuret moottorit ja yliaalto-pitoiset kuormat tuovat omat haasteensa järjestelmälle. /8/

Dieselkäyttöisten varavoimajärjestelmien hyvinä puolina voidaan pitää pitkää käyttöikää, luotettavuutta ja UPS-järjestelmiin verrattuna suurta tehoa. Järjestelmän huonona puolena pidetään sen käynnistysviivettä eli aikaa, joka kuluu dieselgeneraattorin käynnistämiseen. Tänä aikana varavoimajärjestelmään kytketyt laitteet ovat ilman jännitettä. Nykyaikaisilla UPS-järjestelmillä pystytään toteuttamaan katkeamaton sähkönsyöttö, sillä akusto saadaan kytkettyä kuormaan välittömästi sähkönsyötön katketessa.

sa. Suuret kuormat kuitenkin vaativat dieselgeneraattorin, koska UPS-järjestelmien tehoa rajoittaa akuston kapasiteetti.

### 3.1 Varavoimajärjestelmän suunnitteluperiaatteet

#### 3.1.1 Kuormat /8/

Dieselvarmennetun järjestelmän kuormat yleensä ryhmitellään alaryhmiin sallitun katkosajan ja kuorman tärkeyden mukaan. Ryhmitystä katkosajan perusteella tehdään silloin, kun kuormat on kytkettävä asteittain varavoimajärjestelmään. Ryhmitystä tärkeyden perusteella voidaan tarvita, kun varavoimajärjestelmää syötetään usealla rinnakkaisella dieselgeneraattorilla, jolloin tärkein kuorma kytketään kokoojakiskoon ensimmäisen generaattorin käynnistyessä. Toisaalta vähiten tärkein kuorma voidaan pudottaa pois ylikuormituksen välttämiseksi, kun jokin generaattoreista vikaantuu.

Kuorman tyyppi vaikuttaa järjestelmän sähkönlaatuun, mikä johtuu yleensä siitä, että varavoimajärjestelmän oikosulkuvirta on huomattavasti pienempi jäykän sähköverkon oikosulkuvirtaan verrattuna. Tällöin järjestelmän jännitteen vaihtelut ovat melko suuria. Järjestelmän kannalta hankalimmat ovat suuret oikosulkumoottorit sekä puolijohdetekniikkaa sisältävät kuormat kuten tyristorit.

Moottorit tarvitsevat suuren käynnistysvirran, mikä aiheuttaa ongelmia järjestelmän jännitejäykkyyden osalta. Jäykkään verkkoon verrattuna dieselgeneraattorin oikosulkuteho on melko pieni, jolloin jännitejäykkyys on vastaavasti huonompi. Tällöin oikosulkumoottorin käynnistysvirta aiheuttaa huomattavan jännitteen alenemisen. Varavoimajärjestelmän suurin mahdollinen oikosulkumoottori voidaan laskea varavoimailaitoksen pätötehosta seuraavan kaavan mukaan, jolloin sallitaan 30 % hetkellinen jännitteen aleneminen.

$$P_M = k P_{DG} , \quad (8)$$

jossa  $P_M$  on oikosulkumoottorin pätöteho.

$P_{DG}$  on dieselgeneraattorin pätöteho.

$k$  on moottorin ominaisuuksista riippuen 0.25–0.35.

Käynnistysvirtaa voidaan pienentää käyttämällä tähti-kolmiokäynnistystä, jolloin vaihevirta pienenee ja moottorin kokoa voidaan kasvattaa jopa 2,8-kertaiseksi. Pehmo- ja taajuusmuuttajakäytöissä käynnistysvirta saadaan pysymään jopa moottorin nimellisvirran suuruisena. Tällöin moottoria ei käynnistetä heti täydellä jännitteellä, vaan se voidaan käynnistää hitaasti loivaa käynnistysramppia käyttäen. Varavoimakoneen koon kasvattaminen on kallein ratkaisu käynnistysvirran aiheuttamien ongelmien poistamiselle.

Taajuusmuuttajakäyttö aiheuttaa jännitteen aaltomuodon vääristymistä, sillä sen suuntaajat sisältävät puolijohdetekniikkaa, kuten tyristöiteita. Puolijohdetekniikan myötä kuormituksesta tulee epälineaarinen yliaaltojen seurauksena. Tämä voi aiheuttaa ongelmia kuormalle ja generaattorin jänniteensäätäjälle. Nykyisin jännitteen aaltomuodon vääristyminen saadaan kuitenkin vaimennettua aktiivisilla suodattimilla.

### 3.1.2 Suorituskyky /8/

Järjestelmän suorituskyvyn suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa seuraavat asiat:

1. Käynnistysaika
2. Kuormanottoaika
3. Tehonantokyky
4. Sähkönlaatu
5. Käyttövarmuus

Käynnistysaika määräytyy kuorman sallitun katkosajan perusteella. Turhien käynnistysten estämiseksi käytetään yleensä noin kahden sekunnin käynnistysviiveä automaattisissa käynnistysjärjestelmissä. Tällöin laitteisto odottaa verkon syötön palautumista kahden sekunnin ajan, minkä jälkeen dieselgeneraattori käynnistetään verkon ollessa edelleen jännitteettömänä.

Koneiston tyypistä riippuen käynnistyminen kestää 4 - 10 s, jonka jälkeen kytketään kuormat asteittain, ensin 60 - 100 % kuormasta ja loput muutamien kymmenien sekuntien kuluttua. Näin ollen tärkeimmät kuormat saavat syöttönsä 6 - 12 sekunnin kuluttua sähkökatkoksesta. On myös otettava huomioon järjestelmän tahdistukseen kuluva aika, mikäli järjestelmä koostuu useammasta rinnakkaisesta koneistosta.

Vähintään 60 % kuormasta on pystyttävä kytkemään dieselgeneraattorin syöttöön 12 sekunnin kuluttua verkkojännitteen katkeamisesta niin, että taajuus ja jännite pysyvät määritellyissä rajoissa.

Dieselmoottorin ahtausaste vaikuttaa koneiston kuormanottokykyyn. Mitä voimakkaammin moottori on ahdettu, sitä vähemmän kuormaa voidaan kerralla kytkeä, jolloin kuormat on kytkettävä asteittain pienemmissä ryhmissä. Kuormanottokykyä saadaan parannettua käyttämällä ahtamatonta tai ylimitoitettua ahdettua moottoria.

Järjestelmä mitoitetaan niin, että se riittää kattamaan omakäyttötehon ja verkon huippukuorman suunnitellun käyttöjakson ajan. Omakäyttöteho (3–7 % nimellistehosta) käytetään pääosin koneiston jäähdyttämiseen. On myös huomioitava riittävä kasvuvара tulevaisuuden tarpeita varten. Ulkoilmalla jäähdytetyn koneiston on pystyttävä antamaan jatkuvasti nimellistehonsa ulkoilman ollessa enintään +30 °C. Jos lämpötila on korkeintaan +20 °C, koneistoa on pystyttävä ylikuormittamaan 10 % 1 h:n ajan.

Käyttövarmuuden suurin tekijä on dieselmoottori ja sen polttoaine, sillä varmuus perustuu pitkälti käynnistysvarmuuteen. Järjestelmässä on käytettävä suoraruiskutteista nelitahtista dieselmoottoria, joka ei vaadi hehkutusta ennen käynnistystä. Moottorin käynnistymistä helpotetaan pitämällä varavoimahuoneen lämpötilaa yli +10 °C:ssa. Laitoksen seisoessa moottoria pidetään esilämmitettynä valmistajan sallimassa lämpötilassa, mikä nopeuttaa käynnistymistä.

### 3.1.3 Mitoitus /9/

Järjestelmän mitoituksessa on tärkeää arvioida tapauskohtaisesti varmennettavan kuorman ominaisuudet, jotta generaattori ei toimisi ääriarjoilla. Kuorman laatu mää-

rää varavoimajärjestelmän kokonaistehon ja suojalaitteiden valinnan. Järjestelmän kokonaistehoa kasvattavat muun muassa käynnistysvirrat, jotka ovat usein moninkertaiset nimellisvirtaan verrattuna. Lisäksi rajallinen oikosulkuvirta, epälineaariset kuormat sekä yliaallot olisi hyvä huomioida mitoitus tehdessä.

Kuormien aiheuttamia rasitteita voidaan pienentää mitoittamalla varavoimajärjestelmän kokonaisteho yläkanttiin käyttämällä riittävän suurta varmuuskerrointa. Tällöin esimerkiksi käynnistysvirtojen aiheuttamat jänniteheilahdukset ovat pienemmät ja sähkönlaatu parempi. Kuormien yhteenlasketun tehon on oltava riittävästi varavoimakoneen maksimitehoa pienempi, jolloin voidaan varautua myös mahdolliseen tehontarpeen kasvuun. Ylimoituksen myötä varavoimakoneen elinikä pitenee ja huollontarve vähenee. Varavoimakone on mitoittettava näennäistehon perusteella, kun siihen on kytketty reaktiivista kuormaa, kuten oikosulkumootorit. Kuormituksen tehontarve voidaan laskea kaavan 9 avulla.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \frac{P}{\cos \varphi} = \sqrt{3}UI, \quad (9)$$

jossa  $S$  on kolmivaiheinen näennäisteho, [VA].

$P$  on kolmivaiheinen pätöteho, [W].

$Q$  on kolmivaiheinen loisteho, [Var].

$\cos \varphi$  on tehokerroin

$U$  on pääjännite, [V].

$I$  on vaihevirta, [A].

Kun varavoimakoneen haluttu kuormituskerroin  $k$  on tiedossa, voidaan laskea yliimitettu maksimi näennäistehontarve  $S_{max}$  kaavan 10 mukaan.

$$S_{max} = \frac{S}{k} \quad (10)$$

## 3.2 OL1/OL2-varavoimajärjestelmä /10/

### 3.2.1 Yleistä

Varavoimajärjestelmän tehtävänä on syöttää dieselvarmennettua 660 V verkkoa syötön menetyksen aikana. Laitoksen verkko on jaettu neljään sähköisesti erotettuun osajärjestelmään, subtiin, joita normaalisti syötetään 6,6 kV verkosta muuntajan kautta. Jokainen osajärjestelmä varmennetaan omalla dieselgeneraattorilla, joka käynnistyy automaattisesti syötön katketessa.

Yksiköt on suunniteltu käynnistymään ja saavuttamaan täyden kierrosluvun 10 s kuluttua käynnistyskäskystä, minkä jälkeen kuormia kytketään asteittain kuormitussekvenssin mukaisesti.

Normaalissa käytössä kierrosluvun on pysyttävä vakiona  $\pm 1$  % sisällä. Kuormitussekvenssin aikana suurin sallittu moottorin kierrosluvun lasku on 10 % siirryttäessä askeleelta toiselle. Ensimmäisellä askeleella sallitaan 20 % ja muilla askeleilla 15 % generaattorin jännitteen lasku, jotka jännitteensäätäjä korjaa 0,3 sekunnissa.

Dieselgeneraattorit on suunniteltu jatkuvalle 1600 kW teholle tehokertoimen arvolla 0,8, kestoaltaan 300 h/vuosi. Yksiköt kestävät 10 % ylikuormaa yhden tunnin 12 tunnin jaksoissa. Jäähdytysjärjestelmä sallii moottorin käydä 30 s täydellä kuormalla ilman ulkoista jäähdytysveden syöttöä.

Stabiili käynti rinnakkaisen verkon kanssa varmistetaan asettelemalla kierroslukusäättäjän pätötehostatiikka noin 3 %:iin, jolloin dieselmootorin kierrosluku on 3 % alempi nimellisellä kuormalla kuin tyhjäkäynnillä.

Dieselgeneraattoriyksiköt on sijoitettu erillisiin tiloihin voimalaitosten apurakennuksissa, joissa jokainen dieselhuone muodostaa oman palo-osaston. Myös dieselgeneraattoriyksikön apulaitteet ja valvomo ovat huoneen yhteydessä. Huoneet on varustettu  $N_2$ -sammutusjärjestelmällä.

Jokainen dieselgeneraattoriyksikkö koostuu seuraavista laitteista:

1. dieselmoottori
2. dieselmoottorin apujärjestelmä
3. generaattori apujärjestelmiseen
4. yhteinen valvontalaitteisto

Dieselmoottori ja generaattori ovat samalla alustalla, joka on kiinnitetty joustavasti betonirakenteisiin. Generaattorin syöttökiskot on johdettu suoraan kaapelikerroksen kautta yläpuolella sijaitsevaan 660 V:n kytkinlaitokseen.

### 3.2.2 Dieselmoottori

Dieselmoottorit on valmistanut SACM, ja niiden tyyppimerkintä on A.G.O 195 V16 CSHR. Moottorit ovat nopeakäyntisiä, makeavesijäähdytteisiä nelitahtikoneita, joissa on 16 sylinteriä. Moottoreiden nimellinen pyörimisnopeus on 1500 rpm ja mekaaninen teho 1765 kW. Moottori on varustettu kahdella ahtimella, mikä hieman rajoittaa niiden kuormanottoa.

Jokaisella moottorilla on oma diesel-päiväsäiliö, joka sijaitsee erillisessä dieselgeneraattorihuoneeseen liittyvässä tilassa. Polttoaine virtaa omalla painollansa moottorin polttoaineruiskutuspumpeille, joita ohjaa kierroslukusäätäjä.

### 3.2.3 Generaattori

Generaattorit ovat ASEA:n valmistamia nelinapaisia tahtigeneraattoreita, joiden magnetointi on toteutettu harjattomasti. Generaattorit ovat GF/GBL laivageneraattorisarjan koneita ja tyyppiltään 630 MB. Ne ovat sisänapatyyppejä, joissa massiiviset navat on asennettu suoraan roottoriin.

Generaattorin ja magnetointikoneen ilmajäähdytys on toteutettu suoravetoisilla puhaltimilla. Ilma virtaa generaattorin läpi ja poistuu akselin puoleisesta päästä.

Generaattorin suojaus on toteutettu normaalin käytännön mukaisilla suojarieillä.



### 3.2.4 Magnetointijärjestelmä

Magnetointijärjestelmä on rakennettu kahdesta suoravetoisesta vaihtovirtaa tuottavasta magnetointikoneesta ja roottorissa pyörivästä ohjatusta tasasuuntaussillasta. Remanenssivuon ansiosta magnetointikoneet ovat itsemagnetoituvia ja, niiden generaattorille syöttämän virran säädöstä vastaa jännitesäätäjä, joka ohjaa roottorissa pyörivää tasasuuntaussiltaa.

Päämagnetointikone on ulkonapainen ja tyyppimerkinnältään LMF71. Apumagnetointikone on puolestaan sisänapainen ja tyyppimerkinnältään GLL450. Päämagnetointi- ja apumagnetointikone magnetoivat toisiaan tasasuuntaajan kautta.

Magnetointipiirin tasasuuntaussilta on puoliohjattu tyristorisilta, joka ohjautuu 18–162 asteen ohjauskulmalla. Suurin magnetointijännite saadaan 18 asteen ja pienin 162 asteen ohjauskulmalla. Puoliohjattu tyristorisilta sisältää kolmen tyristorin lisäksi myös kolme diodia, jotka antavat virralle paluutien. /4/

Magnetointipiirissä on myös nolladiodi, jonka tarkoituksena on estää jännitteen liiallista kohoamista roottorissa. Kytkentätilanteissa nolladiodin kautta pääsee kulkemaan estosuuntainen virta ja näin jännite ei kohoja roottorissa hallitsemattomasti. /4/

### 3.2.5 Jänniteensäätöjärjestelmä

Jänniteensäätöjärjestelmän komponentit ovat jännite- ja virtamuuntaja, magnetointikontaktori, ABB YXRU 201 jännitesäätäjä sekä asetusarvopotentimetri.

Kyseistä jännitesäätäjää käytetään generaattorin antaman lähdejännitteen ohjaamiseen tuottamalla sytytyspulsseja magnetoinnin säätämiseksi. Pulssit ohjataan pulssimuuntajan kautta puoliohjattuun tyristorisiltaan, joka säätää generaattorin magnetointivirran suuruutta jännitesäätäjän ohjauksen mukaan. Magnetointivirtaa säätämällä saadaan generaattori tuottamaan tarvittavaa jännitettä ja loistehoa. Mittatietonaan säätäjä tarvitsee generaattorin vaiheiden jännitteet, sekä yhden vaiheen virtatiedon.

Jännitemuuntaja muuntaa generaattorin jännitteen säätäjän jännitemittauspiirin vaatimalle tasolle. Virtamuuntajalla puolestaan saadaan virran takaisinkytkentäsignaali loistehon mittausta varten.

Turvallisuuden takia jännitteensäätöjärjestelmässä on oltava apu- ja päämagnetoinnin kenttäkäämityksien välissä magnetointikontaktori, joka avautuu generaattorin laukaisevan vian yhteydessä. Kontaktorin avautumisen jälkeen pääkoneen magnetointiteho katoaa.

Järjestelmään kuuluu myös asetusarvopotentiometri, jolla generaattorin antamaa jännitettä voidaan säätää. Potentiometri on varustettu moottoritoimilaitteella, joten sitä voidaan säätää myös valvomosta.

Jännitteensäätö on esitetty kuvassa 11.

### 3.2.6 Apujärjestelmät

Jokaisella dieselgeneraattorilla on oma valvontalaitteisto, joka koostuu viidestä valvontakaapista. Valvontalaitteiston ohjaustaulu sisältää dieselgeneraattorin valvontaja ohjauslaitteiston lisäksi apujärjestelmien valvontalaitteet. Tällöin ohjaustaulu toimii myös dieselvarmennetun verkon varaohjauspaikkana, josta voidaan painonapeilla ohjata dieselgeneraattorikatkaisijaa ja verkon syöttökatkaisijaa. Katkaisijoiden ja erottimien asennot nähdään asennonosoittimista.

Ohjaustaulussa on mittareita jännitteelle, virralle, pätö- ja loisteholle, taajuudelle sekä generaattorikäämin lämpötilalle. Lämpötilamittaus voidaan kytkeä käämin eri kohtiin.

Dieselgeneraattorin automaattinen käynnistysautomaatiikka sisältää käynnistysreleen, joka toimii vaihtokytkenä automatiikan ja reaktorin suojausjärjestelmän signaaleista, mutta sitä voidaan ohjata myös keskus- ja paikallisvalvomon ohjaustaulusta.

Tahdistus tapahtuu tahdistuskytkimen, kaksoisjännitemittarin, kaksoistaajuusmittarin ja synkronoskoopin avulla. Tahdistus voidaan suorittaa käsin ja puoliautomaattisesti keskusvalvomosta tai vain käsin paikallisvalvomosta.

Laukaisujärjestelmä koostuu kahdesta ehdosta: välittömästi laukaisevat ja viivästetysti laukaisevat ehdot. Välitön laukaisu tapahtuu dieselmoottorin tai generaattorin vakavissa vikatilanteissa. Välittömästi laukaiseva piiri laukaisee generaattorikatkaisijan ja joissain tapauksissa magnetointikontaktorin. Samalla moottorin polttoaineensyöttö katkeaa ja uudelleenkäynnistyminen estetään lukituksella. Viivästetyssä laukaisussa generaattorikatkaisija laukeaa ja joissain tapauksissa myös magnetointikontaktori, mutta moottori saa jatkaa käyntiään ilman kuormaa. Aikarele kuitenkin pysäyttää myös moottorin, mikäli laukaisupiiriä ei ole palautettu 60 s aikana. Vähemmän vakavat viat antavat vikahälytyksen paikalliseen valvontalaitteistoon ja keskusvalvomoon.

Kierrosluvun valvontajärjestelmä koostuu kahdesta, toisiaan varmentavasta induktiivisesta kierroslukuanturista, ohjauskortista sekä käyttötuntimittarista.

### 3.2.7 Käyttö ja ohjaus

Diesलगeneraattori ei ole normaalisti käynnissä, mutta se on käynnistysvalmiudessa odottamassa käynnistyskäskyä. Korkeaa valmiusastetta pidetään yllä esilämmittämällä ja voitelemalla moottoria.

Ulkoisen verkon irrotessa ja laitoksen omakäyttöajoon siirtymisen epäonnistumisessa dieselvarmennetun verkon jännite häviää. Kaikissa dieselvarmennetuissa kiskoissa on erillinen alijännitesuoja, joka toimiessaan antaa yksittäisen käynnistyskäskyn vastaavalle dieselgeneraattorille.

Yksiköitä koekäytetään kuukausittain käyttöohjeiden mukaan. Tällöin dieselgeneraattori tahdistetaan rinnakkain 6,6 kV verkon kanssa.

### *Käynnistys*

Automaattisessa käynnistyksessä käynnistyskäsky menee käynnistysreleelle, jos yksikkö on valmiudessa eli toisin sanoen mikään laukaiseva vika ei ole aiheuttanut lukitusta. Käynnistysrele antaa ohjauskäskyn käynnistysaikareleelle. Käynnistysmoottori pyörittää dieselmoottoria 100 rpm saakka, minkä jälkeen dieselmoottori käynnistyy ja kiihtyy täyteen käyntinopeuteen. Kytchentä verkkoon tapahtuu vaihtokytkentä-automatiikan logiikkaehtojen mukaan. Käsikäynnistys ja pysäytys voidaan suorittaa keskus- ja paikallisvalvomosta tai suoraan moottorilta.

### *Tyhjäkäynti*

Tietyissä laitoksen käyttötilanteissa, kuten kuormanpudotus ja alle 10 sekunnin sähkökatkoksissa saa dieselgeneraattori käynnistyskäskyn ilman, että dieselvarmennettu verkko on jännitteetön. Tällöin yksikkö jää tyhjäkäynnille, kunnes se pysäytetään. Yli puolen tunnin tyhjäkäyntiä on vältettävä moottorin nokeutumisen takia. Nokeutumista vähennetään kuormittamalla generaattoreita tyhjäkäynnin jälkeen.

### *Koestus*

Rutiinikoestukset:

- Kuormituskoe kerran kuukaudessa 75...100 % kuormalla, 2...3 h ajan.
- Automatiikan ja apujärjestelmien koestus vuosihuoltojen aikana.

### 3.2.8 Tekniset tiedot

#### *Mitoitustiedot:*

- |                    |            |
|--------------------|------------|
| • Jatkuva pätöteho | 1600 kW    |
| • Nimellisteho     | 2000 kVA   |
| • Jännite          | 690 V      |
| • Taajuus          | 50 Hz      |
| • Apujännite       | 110 V (DC) |

*Dieselmoottori:*

- Max. teho 1765 kW
- Pyörimisnopeus 1500 rpm
- Sylinterin halkaisija 195 mm
- V-öljymäärä 270 l
- Käynnistysaika max. 9s
- Max. melutaso 115 dB
- Paino 9 tn

*Generaattori:*

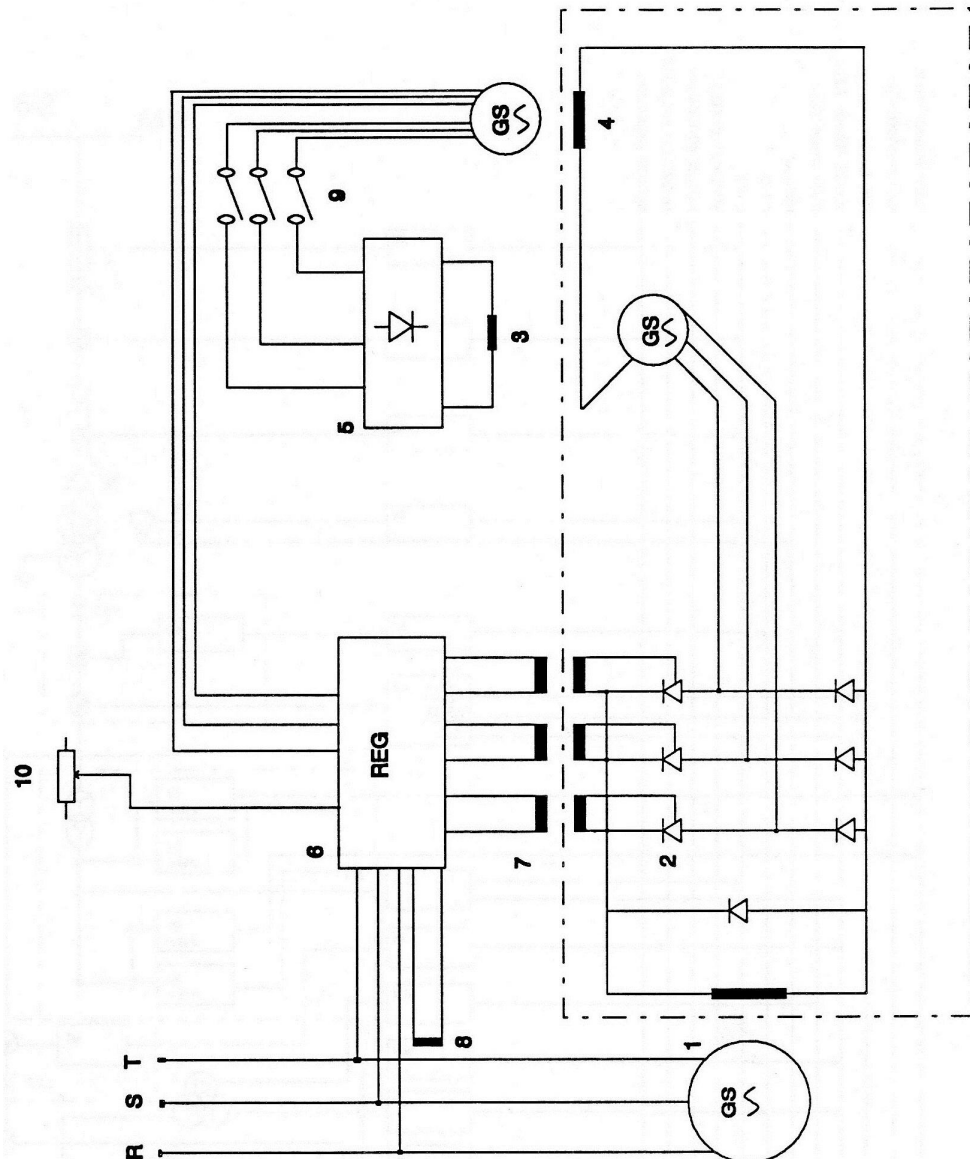
- Tyyppi OL1/OL2 GF630MB/GBL630MB
- Nimellisteho 2000 kVA
- Tehokerroin 0,8
- Nimellisjännite 690 V
- Nimellisvirta 1674 A
- Taajuus 50 Hz
- Pyörimisnopeus 1500 rpm
- Ylikuormituskyky 110 % / 2 h

*Magnetointikone:*

- Tyyppi OL1/OL2 LMF71/GLL450
- Nimellisjännite 55 V
- Nimellisvirta 182 A

*Kiskot:*

- Valmistaja/tyyppi CANALIS/KH9
- Nimellisjännite 750 V
- Nimellisvirta 1935 A



1. Pääkoneen staattori
2. Puoliohjattu tasanuntaaja
3. Päämagnetointikone
4. Apumagnetointikone
5. Staattinen tasanuntaaja
6. Jännitesäätäjä
7. Pulssimuuntaja
8. Virtamuuntaja
9. Magnetointikontaktori
10. Jännitteen asetusarvopotentiometri

**Kuva 11** Jänniteensäätöjärjestelmä

## 4 ABB YXRU 201 JÄNNITESÄÄTÄJÄ

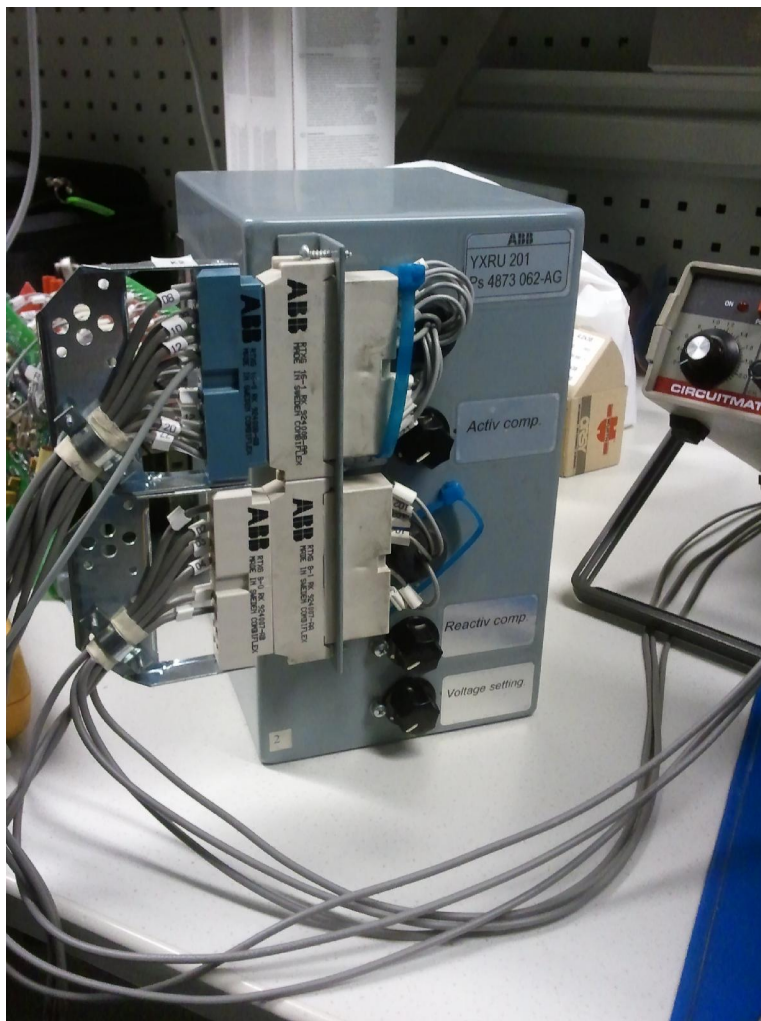
### 4.1 Rakenne

Jännitesäätäjä koostuu kahdesta virtapiirikortista ja kahdesta SLMA 2020 -tyypin jännitemuuntajasta. Virtapiirikorteista yksi sisältää ohjausyksikön ja toinen pulssiyksikön. Muuntajien tarkoituksena on laskea generaattorin jännite säätäjän jännitemittaukselta varten sopivalle tasolle. Säätäjän pääpiirteinen rakenne nähdään kuvassa 24.

Säätäjä on asennettu teräskoteloon, jonka pinnalla on kolme potentiometriä, ja niillä on seuraavat käyttötarkoitukset:

1. Aktiivinen kompensointi
2. Reaktiivinen kompensointi
3. Jännitteen asettelu

Kytkeä on toteutettu kahdella RTXG -tyyppisellä moninapaliittimellä, joista yksi kahdeksanosainen generaattorin mittatietoja varten ja yksi 16-osainen säätösignaaleja varten. Mittatietonaan säätäjä tarvitsee tiedon generaattorin vaiheiden jännitteistä ja yhden vaiheen virrasta.



**Kuva 12** ABB YXRU 201 jännitesäätäjä

### *Ohjausyksikkö*

Ohjausyksikkö koostuu jännitteenmittaus- ja asetusarvoelimestä. Jännitteenmittauselin tunnistaa generaattorin syöttämän jännitteen suuruuden ja vertaa sitä jännitteen asetteluarvoon, minkä jälkeen asetusarvoelin asettelee säätötarvetta vastaavan ohjausjännitteen pulssiyksikköä varten. Jännitteen lisäksi mittauselin saa tiedon generaattorin staattorin kuormitusvirrasta, joka syötetään virtamuuntajan välityksellä.

### *Pulssiyksikkö*

Pulssiyksikkö tuottaa sytytyspulsseja asetusarvoelimen ohjearvon ohjaamana. Kolmivaihepulssit syötetään pulssimuuntajaan, jonka toisio sijaitsee generaattorin root-



torin tasasuuntaussillassa. Säättäjän käyttöjännite tuodaan pulssiyksikön kautta korkeille.

## 4.2 Toimintaperiaate

### 4.2.1 Yleistä

YXRU 201 analoginen jännitesäättäjä on ensisijaisesti tarkoitettu käytettäväksi ASEA:n GBL ja GAE -tyypin generaattoreiden ohjaamiseen. TVO:n dieselgeneraattorit ovat GBL -tyypisiä. Tällaisissa generaattoreissa jännitesäättäjä ohjaa tasasuuntaajaa, joka syöttää generaattorin magnetointia. Tasasuuntaaja pyörii magnetointikäilyksen mukana roottorissa. Myös pulssimuuntajan toisiokäämi sijaitsee roottorissa. Periaatekuva GBL -tyypin generaattorin ohjaamisesta näkyy kuvassa 11.

Säättäjä tunnistaa generaattorin jännitteen ja antaa ohjauksikäskyn jännitteen asetusarvon mukaan joko jännitteen nostamiseksi tai laskemiseksi. Ohjauksikäsky muodostetaan jännitteen asetusarvon ylläpitämiseksi. Säättäjän elektronisen rakenteen ansiosta säätö on hyvin nopeaa. Hetkelliset noin 20 %:n jännitteen laskut korjaantuvat 0,2-0,3 sekunnissa.

Säättäjän sytytyspulssit ohjaavat magnetointijärjestelmän pyörivän tasasuuntaajan tyrystoreiden ulostuloa pulssimuuntajan välityksellä. Näin pystytään pääkoneen magnetointivirtaa ja sen kautta generaattorin jännitettä säätämään.

Säättäjä saa syöttönsä apumagnetointikoneelta, joten sen toiminta käynnistyy roottorin pyöriessä. Säättäjä herää henkiin, kun generaattori saavuttaa 34 Hz taajuuden. Tämän taajuuden alapuolella säättäjä ei osallistu jännitesäätöön ollenkaan. Syöttöjännite on suuruudeltaan 3 x 47 V, jota syötetään pulssiyksikön kautta koko säättäjän käyttöön. Kun apumagnetointikone saavuttaa säättäjän vaatiman jännitetason, alkaa pulssiyksikkö tuottaa pulsseja. Tällöin tasasuuntaajan ulostulo kasvaa ja pääkone magnetoituu.

Pulssien syntymistä ohjataan säätöyksikön ohjearvolla, joka vaihtelee -13,5 ja +13,5 V välillä. Pulssien muodostumisen kannalta merkityksellinen osuus ohjearvosta on välillä -8,5...+8,5 V.

Virtamuuntaja antaa jännitesäätäjälle staattorin virrasta takaisinkytkentäsignaalin, joka vaikuttaa säätäjän jännitteen asetusarvoon loistehon ja pätötehon sekä valitun kompensointiasteen mukaan.

Syöttöjännitteestä muodostetaan säätäjän  $\pm 15$  V ja  $\pm 21$  V käyttöjännitteet kaksisuuntaisella 6-pulssisuuntaajalla. Jännitteen stabilointi tapahtuu transistoreiden ja zenerdiodien avulla. Säätöyksikön käyttöjännite saadaan  $\pm 15$  V jännitteestä ja pulssiyksikön  $\pm 21$  V jännitteestä.

#### 4.2.2 Jännitteen säätö

Jännitteen säätö perustuu staattorin jännitteen takaisinkytkentään. Tällöin generaattorin jännitteestä saadaan referenssijännite jännitteen vertailua varten alentamalla jännite muuntajien kautta.

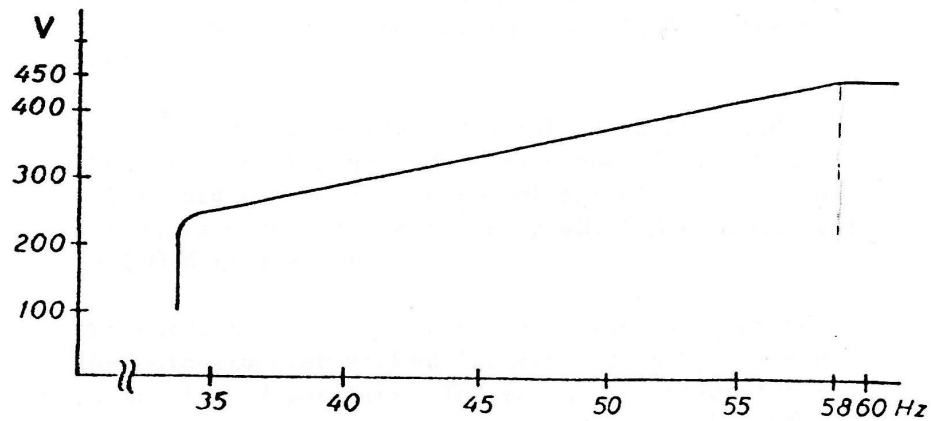
Generaattorin jännitteen tasoa säädetään asetusarvopotentimetrillä, jonka muodostama jännite johdetaan operaatiovahvistimeen. Operaatiovahvistin vertailee jännitteen asetus- ja referenssiarvoja keskenään. Vertailun tuloksena muodostetaan ohjearvo pulssiyksikköä varten vahvistuksen ja rajauksen kautta.

Operaatiovahvistin toimii PI-säätäjän tavoin. PI-säätäjän P-osuus mittaa asetusarvon ja oloarvon eroa. Mitä suurempi on niiden ero, sitä suurempi ohjaus. I-osuutta puolestaan käytetään häiriöiden poistamiseen, sillä se ei ole herkkä pienille heilahteluille.

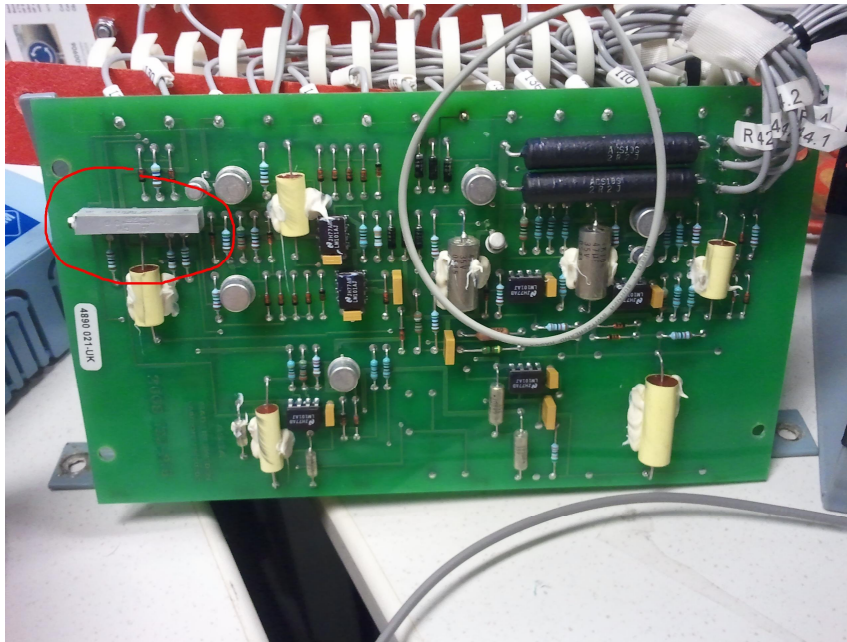
Generaattorin käynnistyksen yhteydessä säätäjän operaatiovahvistimen referenssijännite otetaan käynnistysreferenssistä (Starting Reference). Kun generaattori saavuttaa 34 Hz taajuuden, säätäjä alkaa muodostaa sytytyspulsseja ja kone magnetoituu. Tällöin referenssijännite otetaan taajuus diskriminaattorista, ja generaattorin jännite

saadaan nousemaan taajuuden funktiona taajuuskynnykseen saakka kuvan 13 mukaisesti. Diskriminaattorin referenssjännite on generaattorin taajuudesta riippuvainen, ja se on vakio niin kauan kuin generaattorin taajuus pysyy taajuuskynnyksen yläpuolella, eli normaalisti yli 97 % nimellisestä. Kun taajuuskynnys alittuu, staattorin jännitettä pudotetaan taajuuden funktiona magnetointipiiriä säästääkseen kuvan 13 mukaisella kulmakertoimella.

Taajuuskynnys voidaan asettaa välille 34...71 Hz säätäjän sisäisen pulssiyksikön potentiometrin R43 avulla. Säädetarkkuus on 1,5 Hz kierrosta kohti. Näin ollen kynnyks asetellaan 50 Hz kohdalle kiertämällä potentiometriä noin 9 täyttä kierrosta myötäpäivään. Vastaavasti 16 kierrosta asettelee kynnykseksi 60 Hz kohdalle.



**Kuva 13** Generaattorin jännite ja 60 Hz taajuuskynnys



**Kuva 14** Potentiometri R43 ohjausyksikön piirilevyllä

Referenssijännitteen syöttö saadaan alentamalla staattorin jännite noin 50 V:iin, josta  $\pm 15$  V referenssijännite muodostetaan vahvistimien ja vastuksien kautta.

Generaattorin jännitteen taso asetellaan säätäjän potentiometrillä (Voltage setting), jonka säätöalue on välillä  $-10 \% \cdot U_n \dots +10 \% \cdot U_n$  (nimellisjännite). Säätönappi sijaitsee säätäjän kannella. Jännitetason lisäsäätö on toteutettu ulkoisella  $1 \text{ k}\Omega$  potentiometrillä, joka sijaitsee dieselhuoneessa. Potentiometrin säätöalue on  $\pm 5 \%$ , ja se on varustettu moottoritoimilaitteella, jolloin jännitteen säätäminen on mahdollista myös keskusvalvomossa.

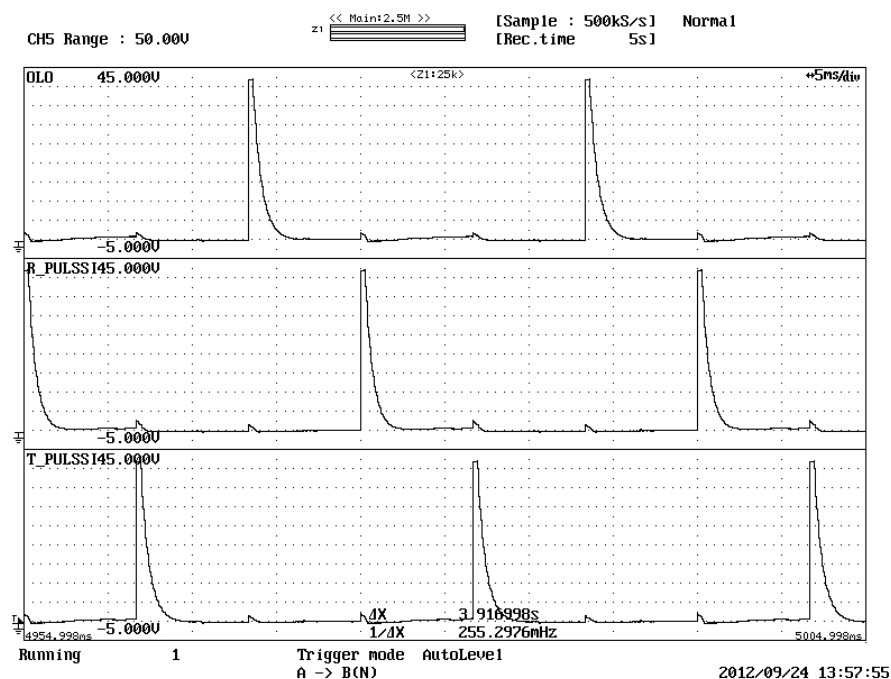
Kun molemmat potentiometrit ovat käytössä, yhteinen säätöalue on  $\pm 15 \%$ . Tällöin generaattorin jännitetaso voidaan asettaa välille 561–759 V nimellisen jännitteen ollessa 660 V, 50 Hz. Normaalisessa käytössä molemmat potentiometrit asetetaan keskiasentoon.

#### 4.2.3 Sytytyspulssit

Pulssiyksikön tuottamat sytytyspulssit ohjaavat tasasuuntaajan tyristoreita. Pulssien muodostumista ohjataan säätöyksikön ohjearvolla. Pulssit syötetään liittimien

K2.8A, K2.7B ja K2.7A kautta pulssimuuntajaan, jonka toisio sijaitsee generaattorin roottorin tasasuuntaajassa. Pulssimuuntajan muut liittimet kytketään liittimen K2.8B +21 V jännitteeseen.

Pulssiyksikkö tuottaa jokaisen vaiheen tyristorille oman pulssinsa, jolloin vaiheiden välisten pulssien ero on  $120^\circ$ . Pulssien pituus on noin  $200\ \mu\text{s}$  ja amplitudi noin 42 V. Kun säätäjä on kytketty pulssimuuntajaan, pulssin jännite on maksimissaan 25 V ja virta 0,7 A. Tällöin muuntajan toisiojännite on noin 7 V.



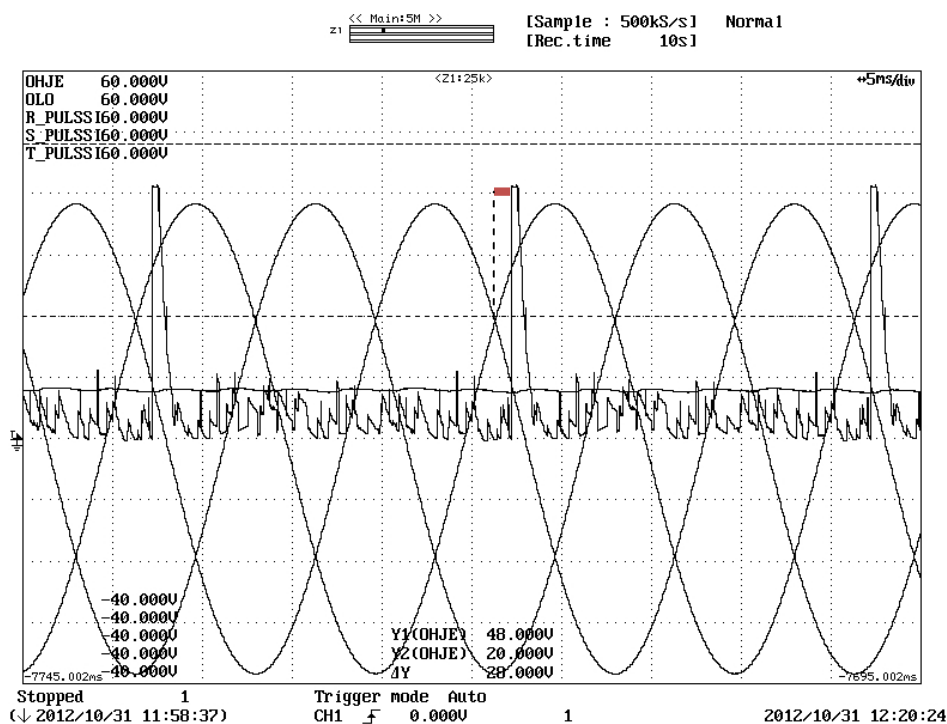
**Kuva 15** Pulssiyksikön pulssien muoto sekä vaiheiden välisten pulssien kulmaero

Pulssien muodostuminen perustuu säätöyksikön ohjearvon ja säätäjän syöttöjännitteen keskinäiseen vertailuun. Muuttamalla ohjearvoa voidaan viivästyttää pulssin syntymähetkeä teoriassa  $10\text{...}180^\circ$  säätäjän syöttöjännitteeseen nähden. Säätöyksikön ohjearvon suuruus määrää siis tyristorien ohjauskulman, joka on käytännössä noin  $18\text{...}177^\circ$ . Ohjauskulma määrää sytytysketken eli sen hetken, jolloin virta siirtyy tyristorilta toiselle. Tällöin muuttamalla ohjearvoa voidaan viivästyttää sytytysketkeä, jolloin tasasuuntaajan ulostulo pienenee, ja generaattorin jännite laskee. Tällä tavalla voidaan suoraan vaikuttaa magnetointitehoon ohjauskulman avulla.

Säätöyksikön ohjausjännitteen vaikutus ohjaukulmaan on seuraavanlainen. Kun ohjearvo on 8,5...13,5 V, ohjaukulma on 18 °. Tällöin tasasuuntaajan ulostulo, ja sen kautta magnetointiteho on suurimmillaan. Kun taas ohjausjännite laskee -8,5 V jännitteeseen, ohjaukulma on suurimmillaan, noin 177 °. Tällöin tasasuuntaajan ulostulo, ja sen kautta magnetointiteho on pienimmillään. Mikäli ohjausjännite on välillä -8,5...-13,5 V, pulssien muodostus loppuu ja magnetointiteho katoaa.

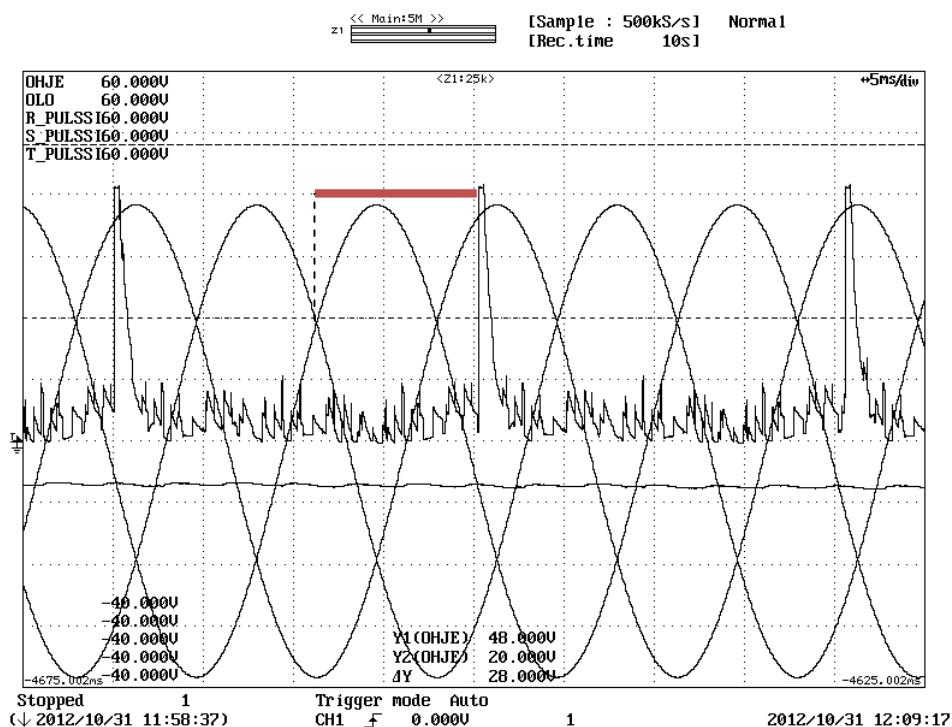
Apu- ja päämagnetointikoneet ovat samalla roottorilla ja yhteydessä toisiinsa, jolloin niiden jännitteet ovat samanvaiheiset. Tällöin tyristorien ohjauhetket pystytään määrittämään säätäjän syöttöjännitteestä, joka saadaan apumagnetointikoneelta.

Säätäjän syötön kolmivaihejännitettä tarkasteltiin samassa kuvassa ohjearvon ja yhden vaiheen sytytyspulssin kanssa, jolloin tyristorien sytytysketket pystyttiin määrittämään.



**Kuva 16** Ohjaukulma 18 °

Kuvan 16 tilanteessa ohjearvo on 8,5 V ja ohjaukulma pienimmillään (18 °), jolloin roottorin tyristorisilta antaa suurimman mahdollisen magnetointitehon.



**Kuva 17** Ohjauskulma  $177^\circ$

Kuvan 17 tilanteessa ohjearvo on  $-8,5\text{ V}$  ja ohjauskulma suurimmillaan ( $177^\circ$ ), jolloin roottorin tyristorisilta antaa pienimmän mahdollisen magnetointitehon.

Seuraava taulukko kuvaa ohjearvoa vastaavaa tyristoreiden ohjauskulmaa ja magnetointipiirin jännitettä. Puoliohjatun tasasuuntausillan magnetointijännite lasketaan tyristorisillan ulostulona kaavasta 11. /11/

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U (1 + \cos \alpha), \quad (11)$$

jossa  $U_d$  on tasasuuntaajan antama tasajännite.

$U$  on tasasuuntaajaa syöttävä jännite, joka on kyseisessä tapauksessa päämagnetointikoneen  $55\text{ V}$  jännite.

$\alpha$  on tyristoreiden ohjauskulma.

Ohjearvo [V]	Tyristorin ohjaus- kulma [astetta]	Magnetointijännite Ud [V]
8,5	18	89
8,0	20	88
7,0	30	85
6,0	40	80
5,0	50	75
4,0	60	68
3,0	70	61
2,0	80	53
0,5	90	46
-1,0	100	38
-2,5	110	30
-3,3	120	23
-4,0	130	16
-5,0	140	11
-6,0	150	6,1
-7,0	160	2,7
-7,0	162	2,2
-7,5	170	0,7
-8,5	177	0,1

**Taulukko 1** Generaattorin magnetointijännite säätäjän ohjearvon ja tyristoreiden ohjaukskulman funktiona

#### 4.2.4 Kompensointi

Säätäjän ominaisuuksiin kuuluu aktiivinen ja reaktiivinen kompensointi, joita säädetään säätäjän kannella olevista potentiometreistä. Kompensointi vaikuttaa jännitteen asetusarvon suuruuteen. Toimintaperiaate perustuu kahteen vahvistimeen, jotka mitaavat virran kulmaa. Tällöin saadaan tieto generaattorin kuorman laadusta. Aktiivi-

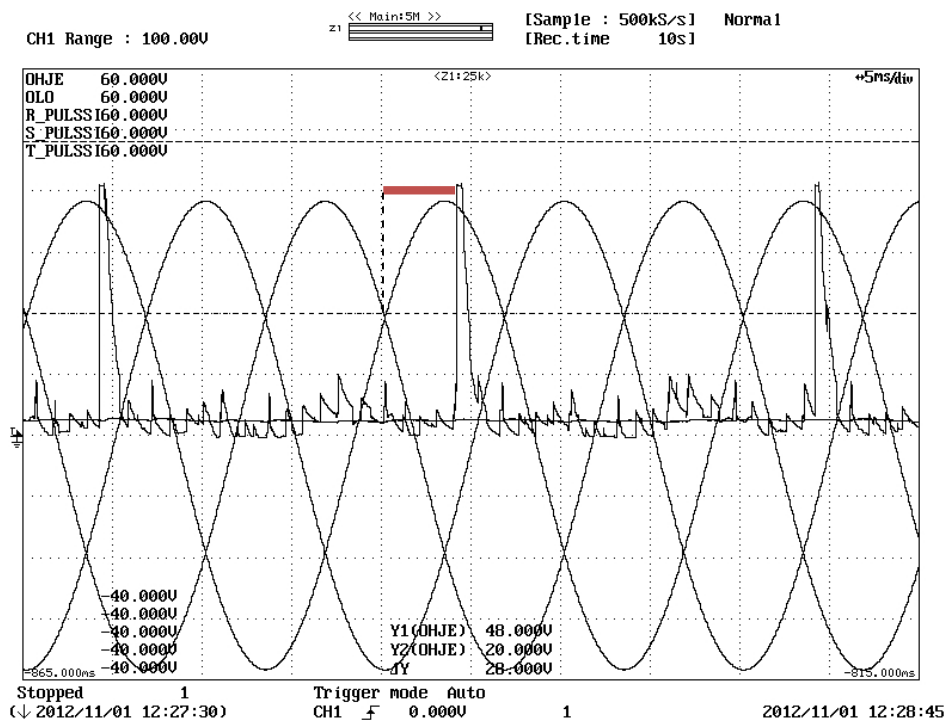


sen kompensoinnin vahvistin mittaa pätövirtaa  $I \cos \varphi$  ja reaktiivisen kompensoinnin vahvistin loisvirtaa  $I \sin \varphi$ .

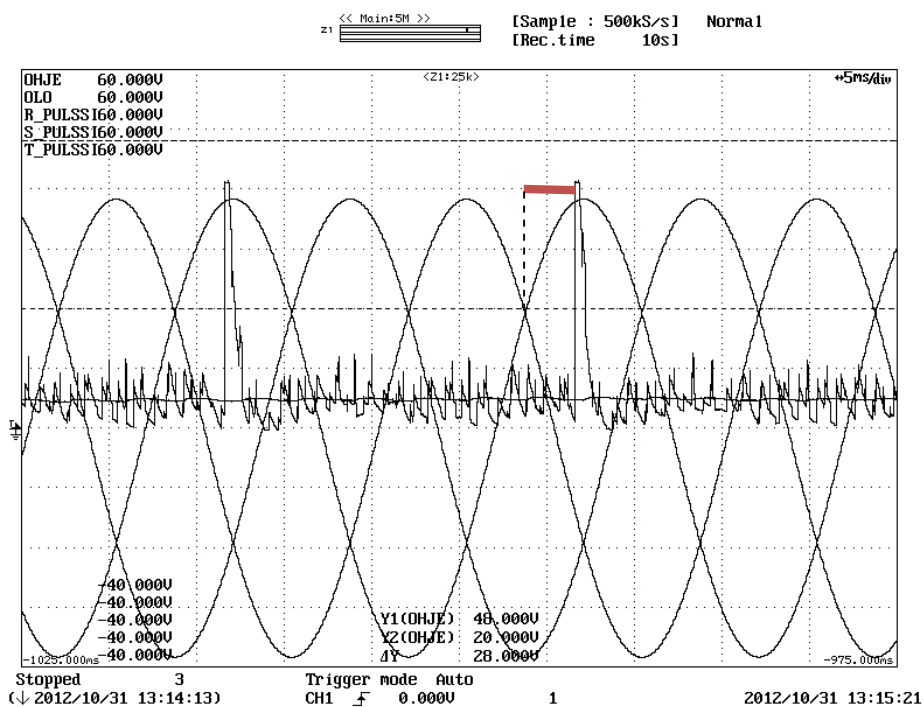
Kompensointipiirissä generaattorin jännite alennetaan ja tasasuunnataan. Tämän jälkeen muodostunut signaali johdetaan kompensoinnin asetusarvopotentimetrin kautta operaatiovahvistimeen, jossa kompensoinnin vaikutus huomioidaan ohjearvon muodostumisessa.

### Aktiivinen kompensointi

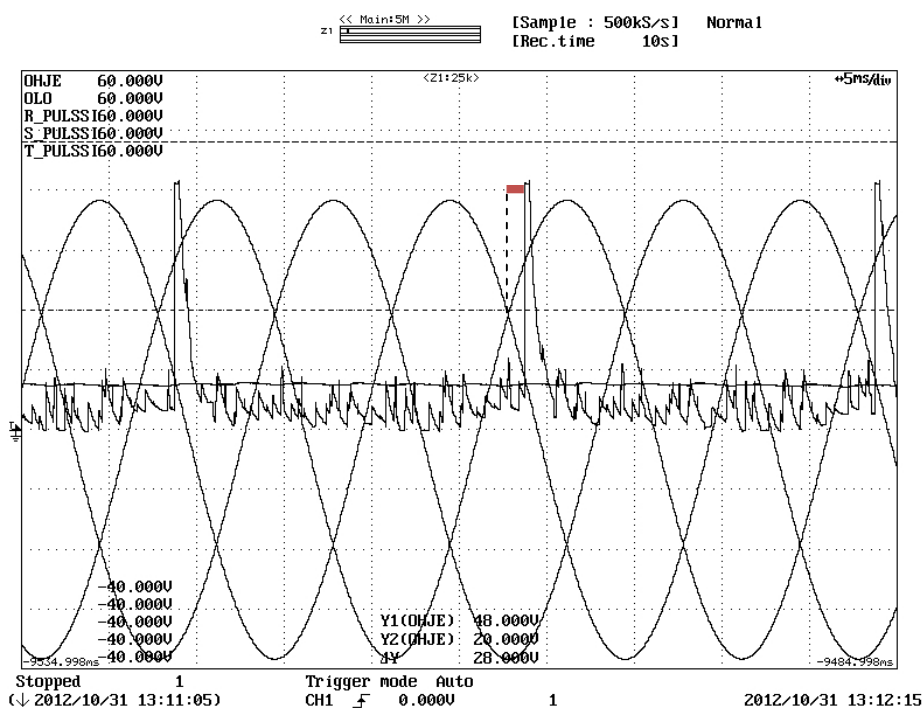
Aktiivisessa kompensoinnissa generaattorin jännitteen asetusarvo muuttuu suoraan verrannollisesti pätötehon funktiona. Tällöin magnetointitehoa on kasvatettava jännitteen nostamiseksi, kun pätöteho kasvaa. Potentiometrin asettelu siis määrää kuinka monta prosenttia jännite nousee pätötehon kasvaessa nimelliseen. Aktiivisen kompensoinnin säätöalue on 0...+10 % ja normaalikäytössä asettelu on +3,75 %. Seuraavaksi esitellään muutamaa esimerkkikuvaa aktiivisesta kompensoinnista:



**Kuva 18** Säätäjän toiminta 0 % aktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 76,5^\circ$



**Kuva 19** Säätäjän toiminta 5 % aktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 49,5^\circ$

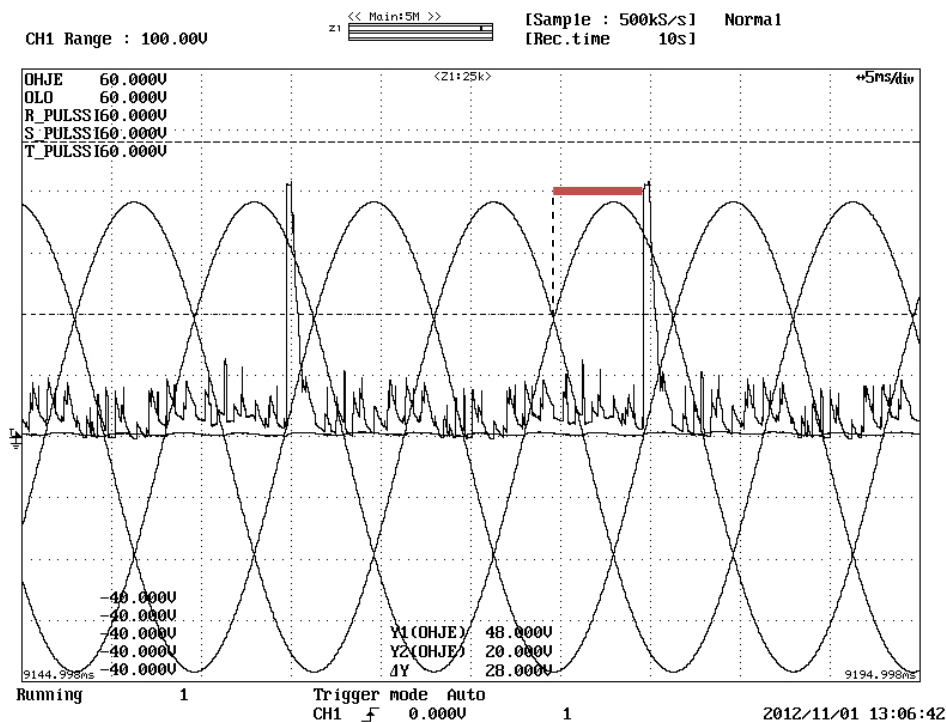


**Kuva 20** Säätäjän toiminta 10 % aktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 18^\circ$

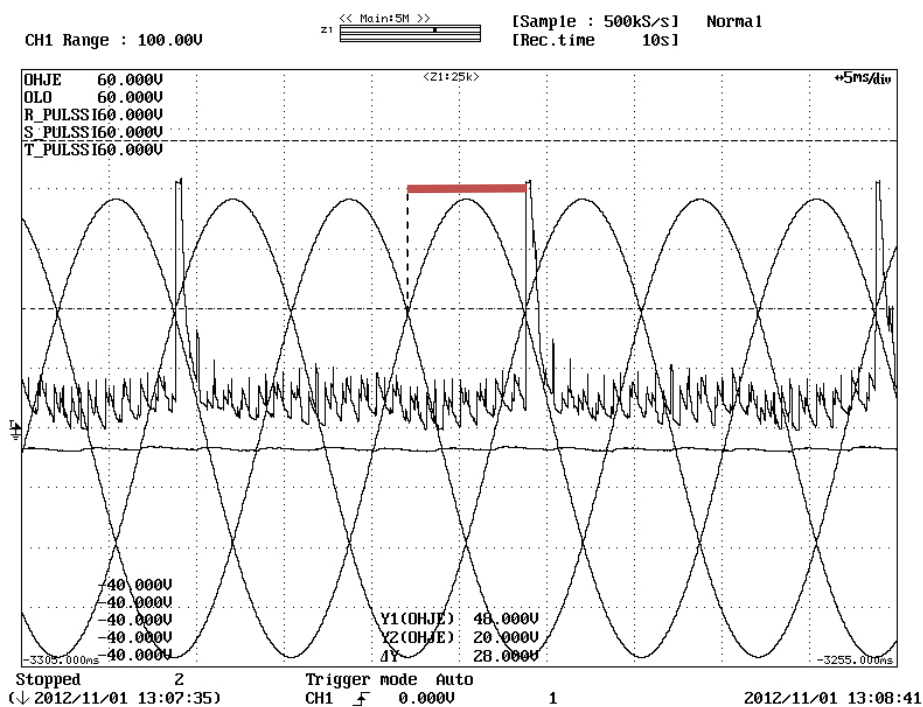
Kuvista 18, 19 ja 20 nähdään, miten ohjearvo ja pulssien ohjauskulma muuttuvat aktiivisen kompensointiasteen mukaan. Generaattorin jännitteen on noustava kompensointiasteen funktiona. Huomataan, että kompensoinnin nousu pienentää ohjauskulmaa ja näin ollen magnetointijännite kasvaa.

### Reaktiivinen kompensointi

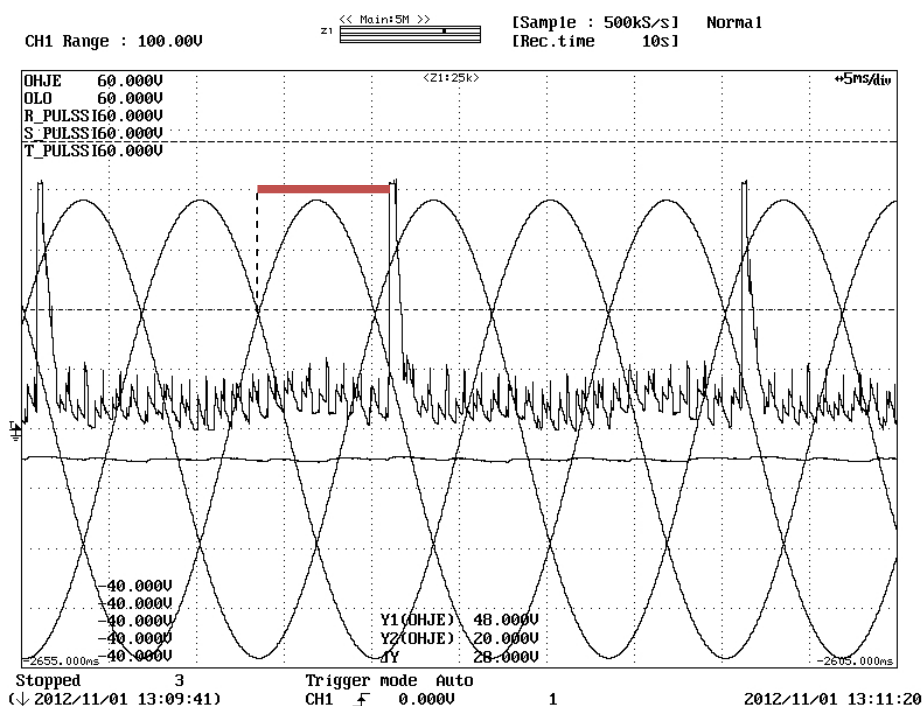
Reaktiivisessa kompensoinnissa generaattorin jännitteen asetusarvo muuttuu kääntäen verrannollisena loistehoon nähden. Tällöin magnetointitehoa on vähennettävä jännitteen laskemiseksi, kun loisteho kasvaa. Potentiometrin asettelu siis määrää kuinka monta prosenttia jännite laskee loistehon kasvaessa nimelliseen. Reaktiivisen kompensoinnin säätöalue on 0...-10 % ja normaalikäytössä asettelu on -5 %. Reaktiivinen kompensointi toimii siis kuten loistehostatiikka, jota käytetään muun muassa rinnakkaisten generaattoreiden stabiilisuden ja loistehotasapainon ylläpitämiseen. Seuraavaksi esitellään muutamaa esimerkkikuvaa reaktiivisesta kompensoinnista:



**Kuva 21** Säätäjän toiminta 0 % reaktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 95^\circ$



**Kuva 22** Säättäjän toiminta 5 % reaktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 120^\circ$



**Kuva 23** Säättäjän toiminta 10 % reaktiivisella kompensoinnilla,  $\alpha = 140^\circ$

Kuvista 21, 22 ja 23 nähdään, miten ohjearvo ja pulssien ohjaukulma muuttuvat reaktiivisen kompensointiasteen mukaan. Generaattorin jännite pienenee kompensointiasteen mukaan. Huomataan, että kompensoinnin nousu kasvattaa ohjaukulmaa ja näin ollen magnetointijännite pienenee.

### 4.3 Liitännät

Liitintoiminto	Vaihe	Liitin
Generaattorin jännitetieto, 50 Hz, 390 V	R	K1.2
	S	K1.3
	T	K1.5
Generaattorin jännitetieto 60 Hz, 450 V	R	K1.1
	S	K1.4
	T	K1.6
Virtatieto	N	K2.1A
	T	K2.1B
Syöttöjännite	R	K2.2A
	S	K2.2B
	T	K2.3A
	N	K2.3B
Sytetyspulssit	R	K2.8A
	S	K2.7B
	T	K2.7A
Pulssimuuntajan +21V		K2.8B
Ulkoisen jännitteen asetusr- vopotentimetri		K2.5A
		K2.5B
Ohjearvo		K2.4B
Nollapiste		K2.3B

#### Taulukko 2 Säätäjän liitännät

Generaattorin staattorista saadaan ohjausyksikölle jännitteen referenssiarvo jännitesäätöä varten. Liityntä on riippuvainen jännitteen kulmasta ja taajuudesta.

Generaattorin syöttämää virtaa käytetään aktiivisen ja reaktiivisen kompensoinnin ohjauksessa. Virtatieto saadaan staattorin T-vaiheesta virtamuuntajan välityksellä. Virtamuuntajan toision virta on 1 A, kun generaattoria on kuormitettu nimellisesti.

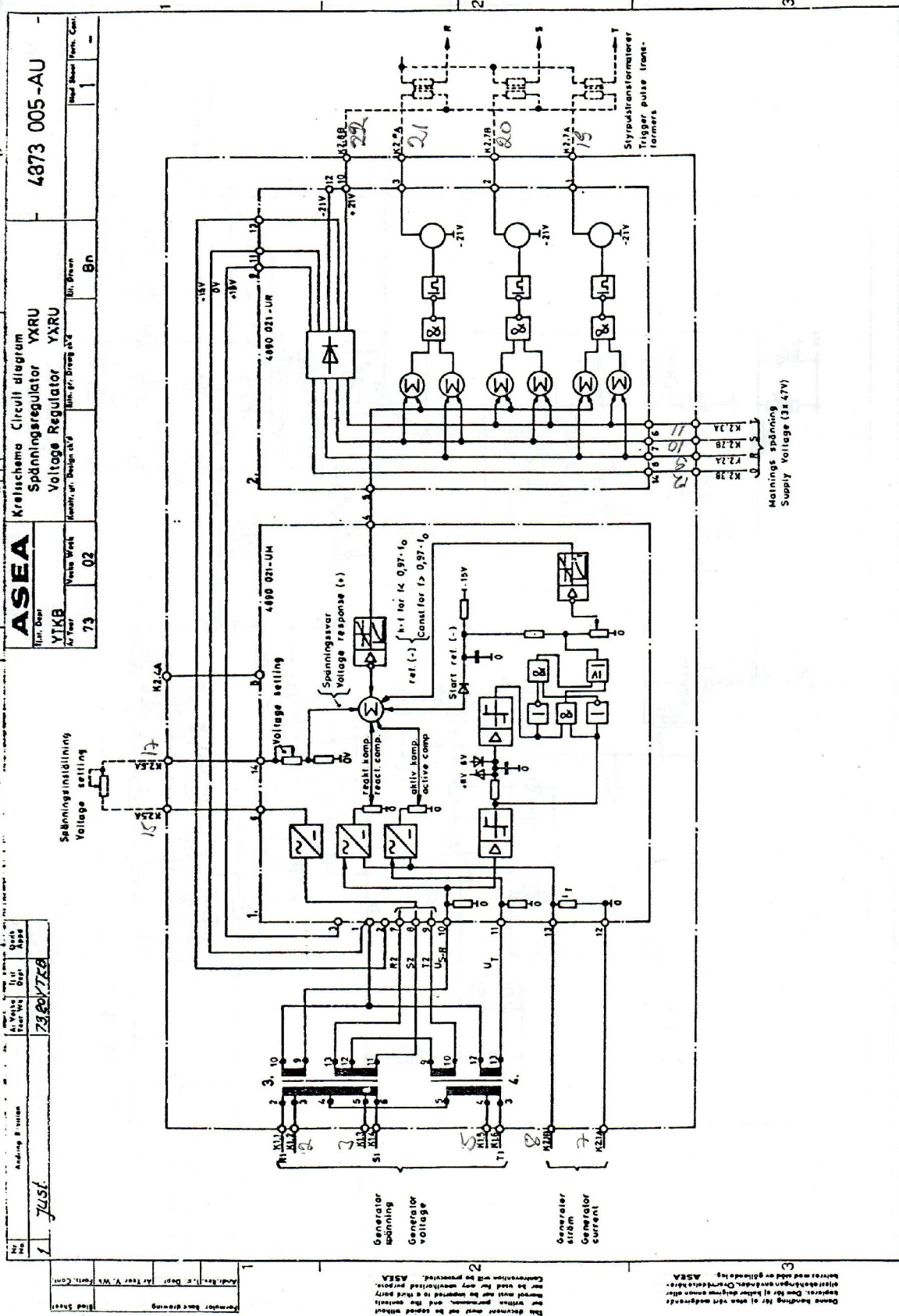
Generaattorin apumagnetointikone tuottaa säätäjän pulssiyksikölle 3 x 47 V:n käyttöjännitteen, jota käytetään mm. sytytyspulssien muodostamiseen.

Pulssit johdetaan säätäjän moninapaliittimen kautta pulssimuuntajaan, josta magnetointia ohjaavat tyristorit saavat sytytysviestinsä.

Säätäjään liitetään ulkoinen 1 k $\Omega$ :n paikallisen valvontalaitteiston asetusarvopotentimetri, jolla generaattorin antamaa jännitettä voidaan säätää  $\pm 5$  %. Potentiometri on varustettu moottoritoimilaitteella, joten sitä voidaan säätää myös valvomosta.

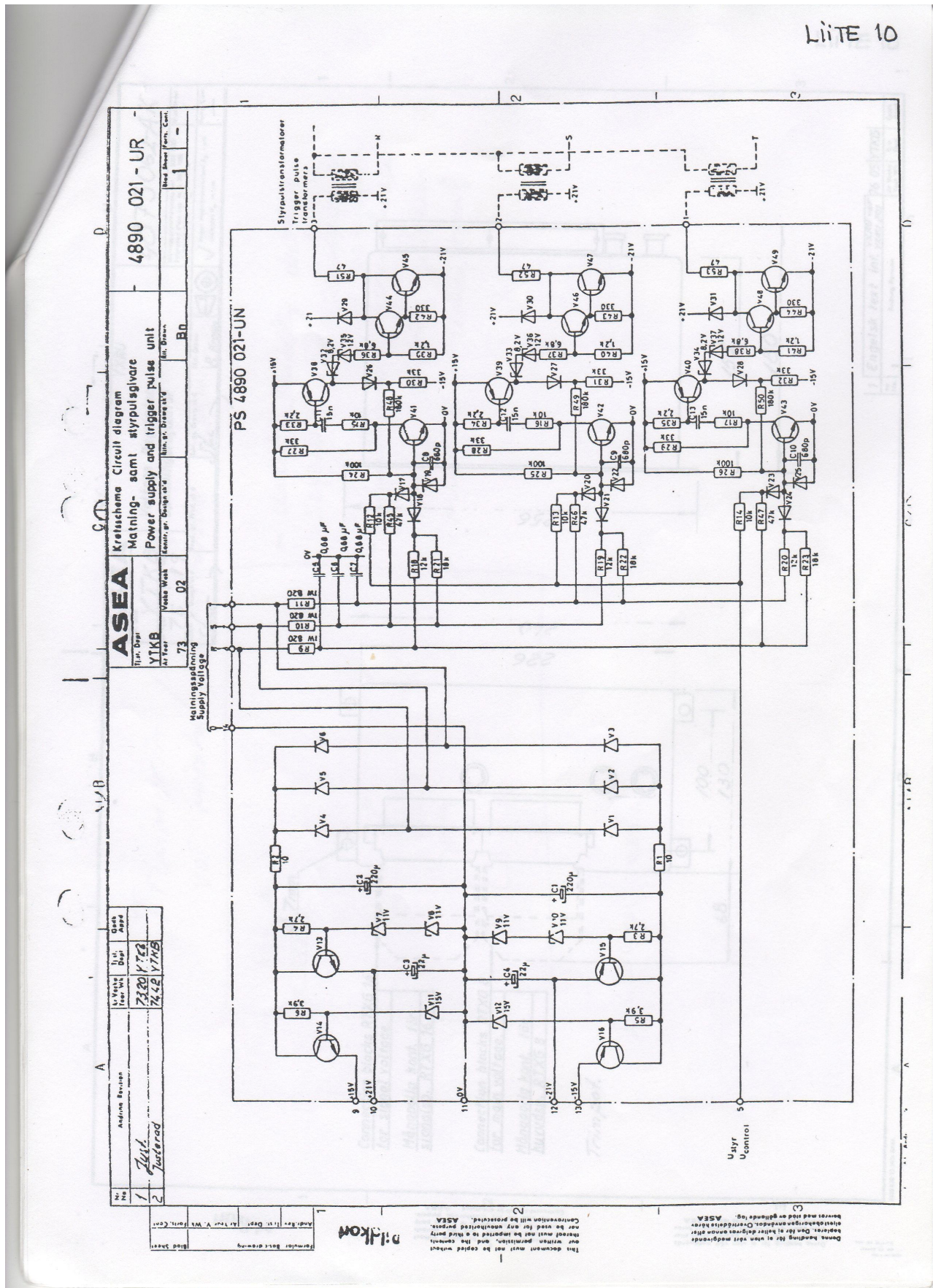
#### 4.4 Tekniset tiedot

Jännitetieto	3 x 390 V, 50 Hz 3 x 450 V, 60 Hz
Virtatieto	1 A
Syöttöjännite	3 x 47 V, nollapiste
Syöttöjännitteen taajuus	40...300 Hz $\pm 35$ Hz
Jännitteen asettelu	
sisäinen potentiometri	$\pm 10$ %
Ulkoinen potentiometri	$\pm 5$ %
Reaktiivinen kompensointi	0...-10 %
Aktiivinen kompensointi	0...+10 %
Taajuuskynnys	34...71 Hz
Jännitesäädön tarkkuus	$\pm 1$ %
Käyttölämpötila	-5...+50 °C



Kuva 24 ABB YXRU 201 jännitesäätäjän rakenne

The document must not be copied without the written permission, and the contents thereof must be kept in a safe place. Any use for any unauthorized purpose, reproduction or distribution is prohibited. ASEA Convention will be preserved.



Kuva 25 Pulssyyksikön piirikaavio



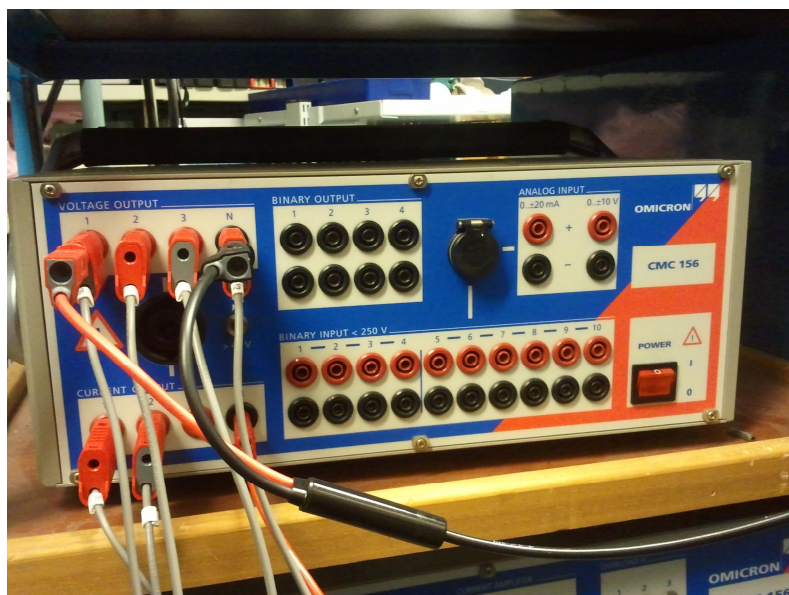
## 5 MITTAUKSET JA LAITTEISTO

Jännitesäätäjän toimintaperiaatetta pyrittiin tutkimaan mahdollisimman yksinkertaisin ja selvin mittauksin. Mittauslaitteistoksi valittiin Omicron 156 koestusvirtalähde, monikanavainen piirturi, Vacon NXS taajuusmuuttaja, Fluke yleismittareita sekä funktiogeneraattori.

### 5.1 Omicron 156

Omicron 156 on lähinnä suojareleiden testaukseen tarkoitettu koestuslaite. Omicron on laajalti käytössä oleva koestuslaite, sillä sen ominaisuudet ovat hyvin monipuoliset. Vaikkakin Omicron on tarkoitettu suojareleiden testaukseen ja laitteiden kalibrointiin, valittiin se yhdeksi mittausjärjestelyiden komponentiksi lähinnä säädettävyyden ja tarkkuuden takia.

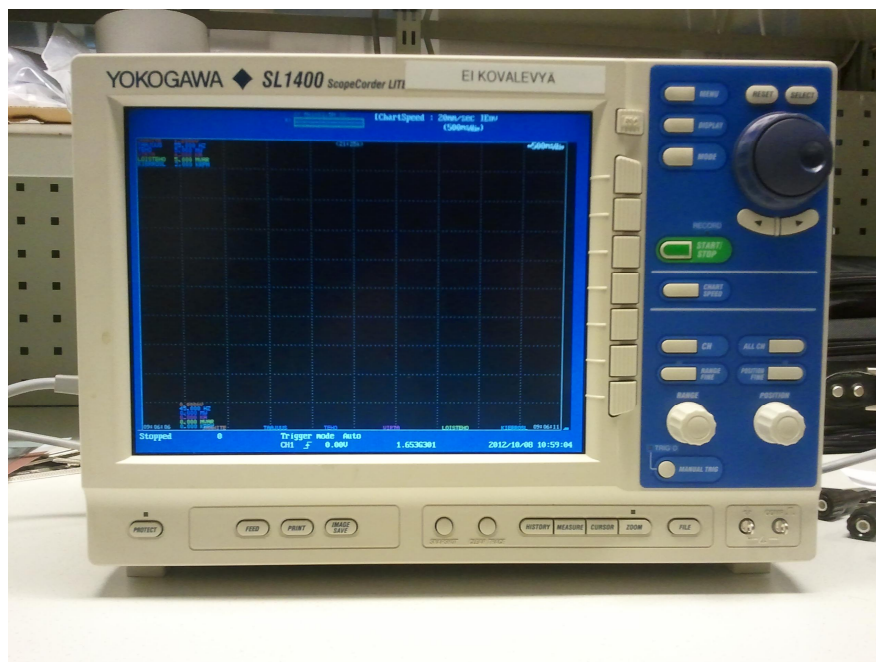
Laitetta ohjataan tietokoneelta Omicronin CMC-ohjelmistolla, joka tarjoaa lukuisia valmiita koestussovelluksia. Valmiit sovellukset eivät kuitenkaan olleet tarpeen, sillä mittausjärjestelyissä Omicronia käytettiin virtalähteenä.



**Kuva 26** Omicron 156 koestuslaite

## 5.2 Yokogawa SL1400 piirturi

Mittaustulosten seurantaan ja taltiointiin käytettiin Yokogawa monikanavaista piirturia. Oskilloskoopin suuri näyttö ja mahdollisuus monen signaalin samanaikaiseen mittaamiseen helpottavat säätäjän toiminnan tutkimista.



**Kuva 27** Yokogawa SL1400 piirturi

## 5.3 Circuitmate FG2 funktiogeneraattori

Funktiogeneraattori eli signaaligeneraattori on signaalilähde, jota käytetään lähinnä laboratoriokäytössä. Sen ulostulojännitteeksi voidaan valita sini-, kanti- ja kolmioaaltoa. Nämä signaalit ovat vaihtojännitettä, mutta funktiogeneraattorissa on mahdollisuus lisätä lähtösignaaliin myös tasajänniteosuus (DC offset). Funktiogeneraattorista voidaan säätää lähtösignaalin amplitudia, taajuutta ja tasakomponenttia.



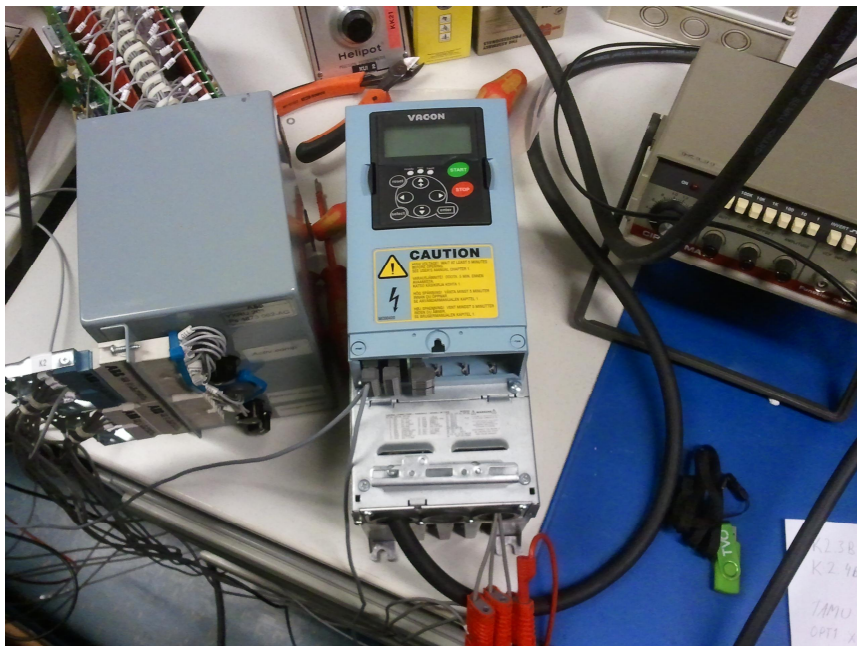
**Kuva 28** Funktiogeneraattori

Tekniset tiedot:

- Taajuusalue: 0,2...2 MHz
- Lähtösignaalin maksimitaso: 20 V
- Lähtöimpedanssi: 50  $\Omega$

#### 5.4 Vacon NXS taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajalla pyrittiin simuloimaan generaattorin toimintaa. Taajuusmuuttajan toimintaperiaate on samankaltainen kuin säätäjän pulssiyksikön ja generaattorin magnetointipiirin tasasuuntaajan muodostama kokonaisuus, sillä myös sen jännitettä ohjataan tasasuuntaajan tyrystoreiden sytytyksillä. Lisäksi taajuusmuuttajan säädettävyys ja analogiatulot ovat edukseen tämänkaltaisissa sovelluskohteissa. Taajuusmuuttajaksi valittiin NXS-malli, joka mahdollistaa muun muassa  $\pm 10$  V (sauvaohjaus) analogiatulon.



**Kuva 29** Vacon NXS taajuusmuuttaja

Tekniset tiedot:

- Malli: 0003 5A2H1
- Teho: 0,75 kW
- Jännite: 380...500 V, 50 Hz

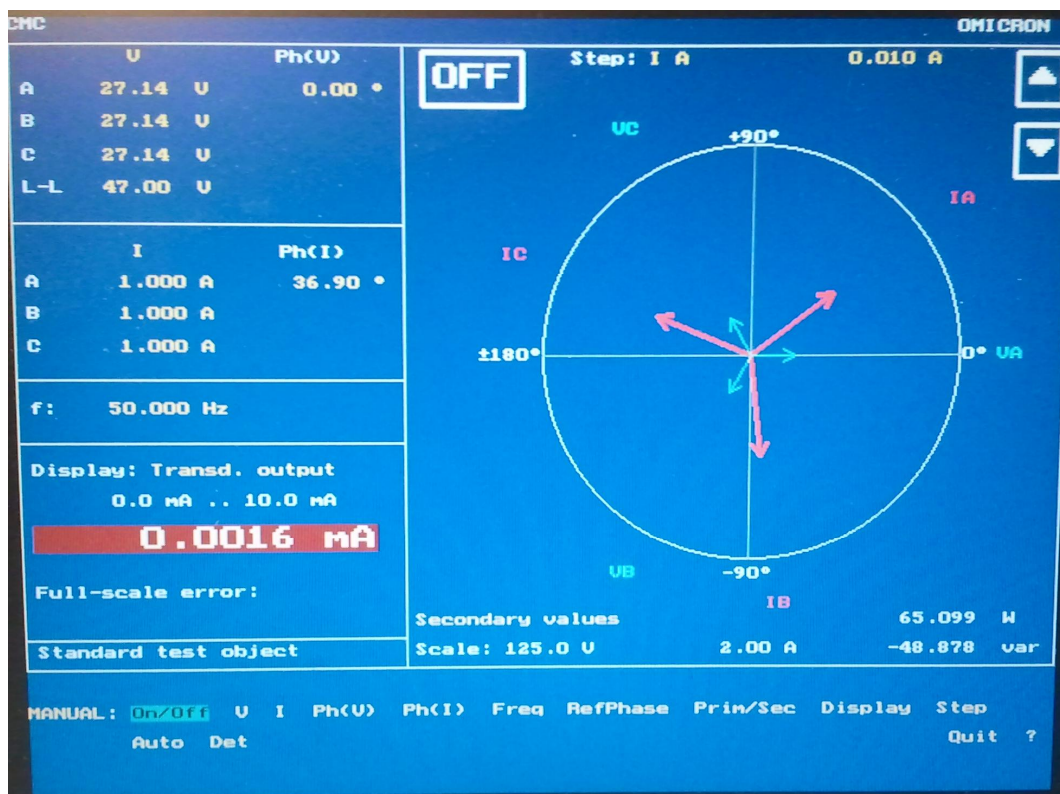
### 5.5 Mittausjärjestelyt

Säätäjän generaattorin jännitetieto syötettiin taajuusmuuttajan avulla, jolloin taajuusmuuttajaa poikkeuksellisesti käytettiin säädettävänä jännitelähteenä. Generaattorin jännite alennetaan säätäjälle niin, että generaattorin nimellisellä 660 V jännitteellä säätäjän jännitetieto on 390 V. Säätäjän ohjearvo kytkettiin takaisinkytkentänä taajuusmuuttajan analogiatuloon AI1, jolloin taajuusmuuttaja konfiguroitiin ohjaamaan jännitettään säätäjän ohjearvon funktiona niin, että suurin jännite saadaan 8,5 V ja pienin jännite -8,5 V ohjearvolla. Säätäjän jännitteen asetusarvoa voidaan potentiometrillä säätää  $\pm 10\%$ , joten taajuusmuuttaja määriteltiin niin, että sen suurin antama jännite on 429 V ja pienin 351 V. Säätäjän ohjearvo vaihtelee  $\pm 13,5$  V välillä, mutta merkityksellinen alue on  $-8,5...+8,5$  V, minkä takia taajuusmuuttajan analogiatulon jännite jouduttiin skaalaamaan vastaaviin arvoihin.

Säätäjän jännitetiedon taajuus saa pudota korkeintaan 3 % nimellisestä ilman, että säätäjä ohjaa generaattorin jännitettä alaspäin magnetointipiiriä säästääkseen. Tämän takia taajuusmuuttaja minimitaajuudeksi määriteltiin 50 Hz, jolloin sen jännite on 351 V. Maksimitaajuudeksi määriteltiin 70 Hz, jolloin sen jännite on 429 V.

Funktiogeneraattori kytkettiin syöttämään siniaaltoja sarjaan säätäjän ulkoisen asetusravopotentimetrin kanssa, jolloin jännitteen asetusarvoa voitiin tarvittaessa muuttaa siniaallon mukaisesti. Tällä pyrittiin simuloimaan generaattorin jännitteen asetusarvon vaihtelua säätöyksikön ohjearvon seuraamiseksi. Funktiogeneraattoria käytettiin vain säätäjän tutkimiseen, joten sitä ei tarvita myöhemmin koestusta tehtäessä.

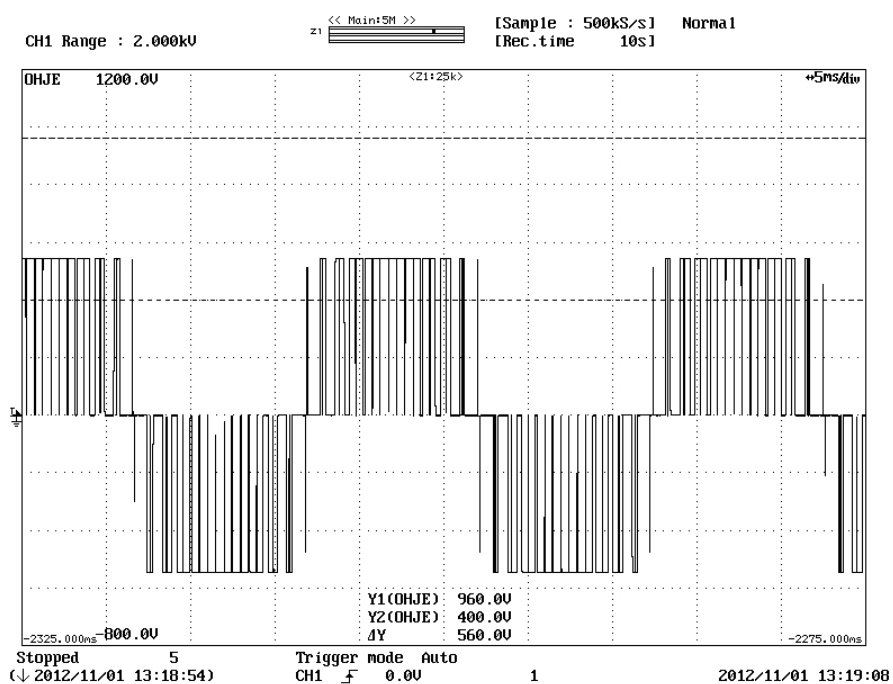
Omicronilla syötettiin säätäjän syöttöjännite ja kompensoinnin virtatieto. Syöttöjännitteenä käytettiin 3 x 47 V, 50 Hz ja virtatietona 1 A. Generaattorin nimellisvirralla virtatieto on mitoitettu 1 A suuruiseksi. Nimellinen tehokerroin  $\cos \varphi$  on 0,8, jolloin kulma on noin  $36,9^\circ$ . Omicronin ohjaamiseen käytetään CMC-ohjelmistoa, joka määriteltiin kuvan 30 mukaisilla parametreilla.



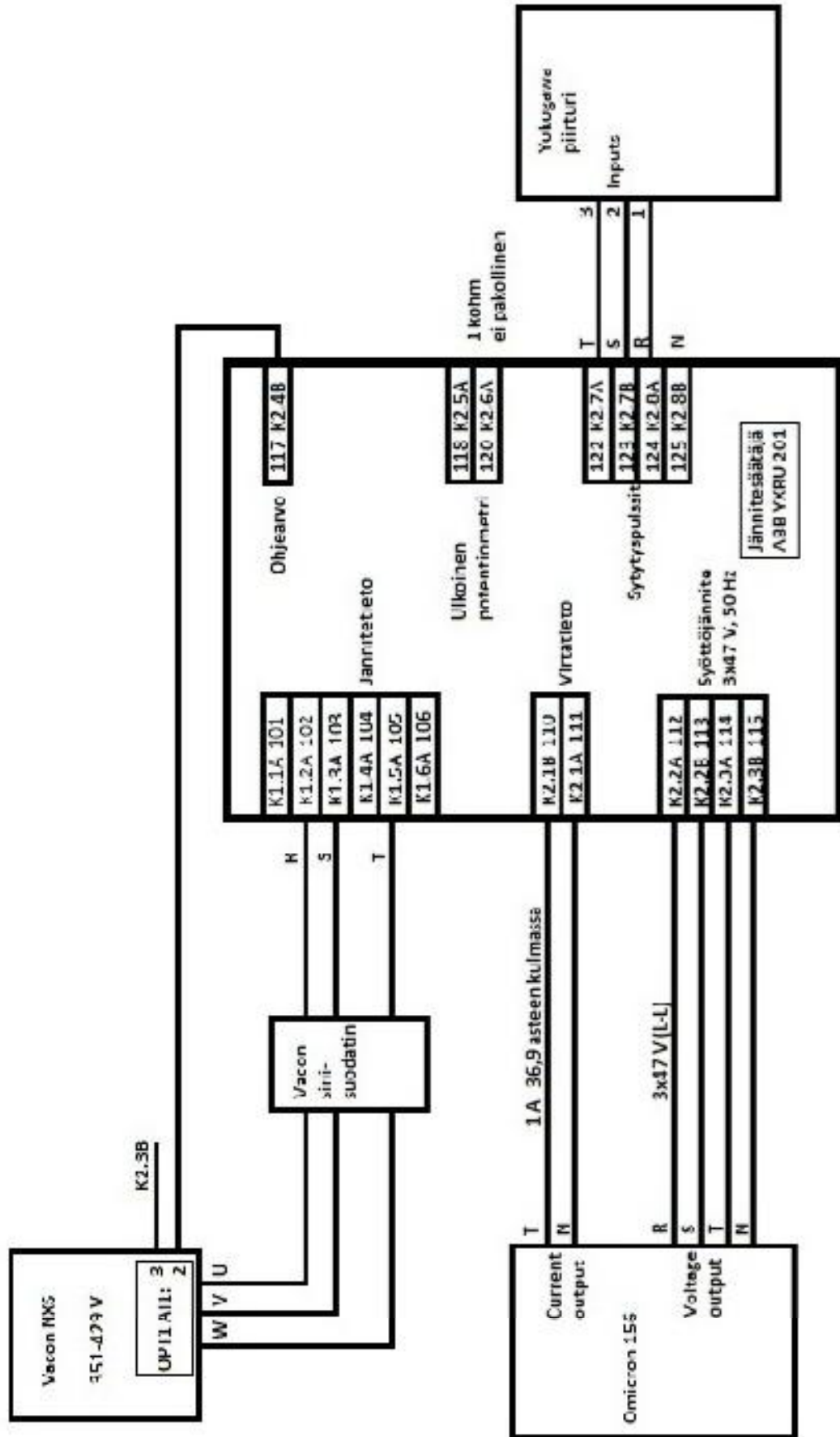
Kuva 30 Omicron virtalähteelle määritetyt parametrit

Säätöyksikön ohjearvo jouduttiin tuomaan säätäjän sisältä johdottamalla se liittimeen K2.4B. Säätäjän nolllapiste johdotettiin liittimeen K2.3B. Ohjearvon jännitettä mitattiin piirturin avulla kyseisistä liittimistä.

Taajuusmuuttajan PWM-tekniikalla muodostettu pulssimainen jännite aiheutti mittausepä tarkkuutta koejärjestelyissä. Säätäjä ei näe pulssimaista jännitettä siniaallon kaltaisena, mikä vaikeutti mittauksia. Asia voidaan ratkaista kytkemällä sinisuodatin taajuusmuuttajan lähtöön, jolloin jännite saadaan siniaallon muotoiseksi.



**Kuva 31** Taajuusmuuttajan jännite ilman sinisuodatinta



Kuva 32 Mittauslaitteiston kytkentäkuva

## 5.6 Taajuusmuuttajan parametrien määrittely

### M2 PÄÄVALIKKO:

#### G2.1 PERUSPARAMETRIT:

P2.1.1	Minimitaajuus	50 Hz
P2.1.2	Maksimitaajuus	70 Hz
P2.1.6	Moottorin nimellisjännite	429 V
P2.1.7	Moottorin nimellistaajuus	70 Hz
P2.1.11	Riviliittimen ohjearvopaikka	AI1 sauvaohjaus
P2.1.12	Paneeliohjauksen referenssi	AI1

#### G2.2 TULOSIGNAALIT:

##### G2.2.1 Perusasetukset:

P2.2.1.1	Käy/Seis-logiikka	Eteen - Taakse
P2.2.1.4	Säätötulo	AI1

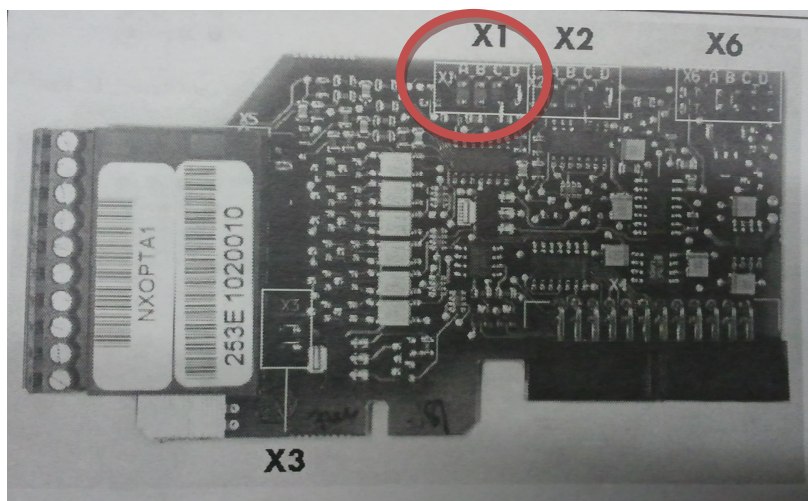
##### G2.2.2 Analogiatulo1:

P2.2.2.3	AI1 signaalialue	±10 V
P2.2.2.4	AI1 vapaasti valittava min.	-85%
P2.2.2.5	AI1 vapaasti valittava max.	85%
P2.2.2.6	AI1 taajuusalueen min.	50 Hz
P2.2.2.7	AI1 taajuusalueen max.	70 Hz

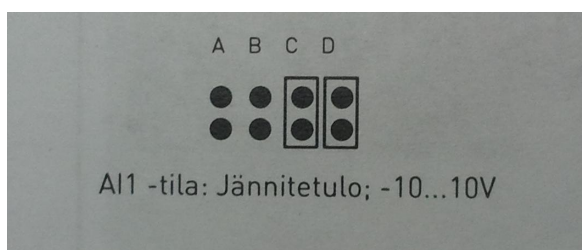
#### G2.6 Moottorin ohjaus:

P2.6.1	Moottorin ohjaustapa	Taajuusohje
P2.6.3	U/f -suhdevalinta	Ohjelmoitava
P2.6.4	Kentänheikennyspiste	70 Hz
P2.6.5	Jännite kh.pisteessä	100 %
P2.6.6	U/f -käyrän keskipisteen taajuus	50 Hz
P2.6.7	U/f -käyrän keskipisteen jännite	81.82 %
P2.6.9	Kytkentätaajuus	1.0 kHz

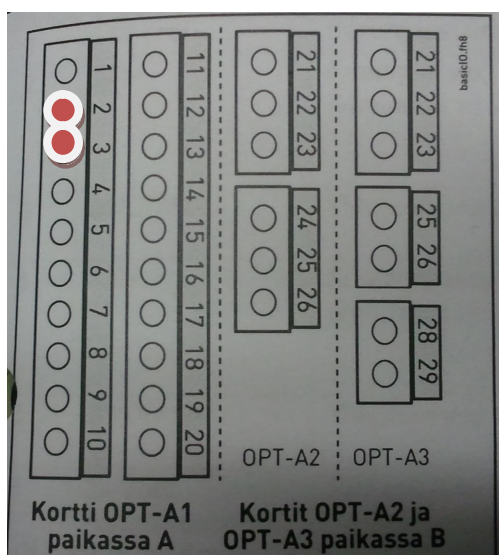




**Kuva 33** Pistikeryhmät OPT-A1 -kortissa



**Kuva 34** X1:n pistikevalinnat  $\pm 10$  V jännitetuloa varten



**Kuva 35** Kolmen peruskortin I/O-liittimet

OPT-A1 -kortin X1 pistikevalinnat on tehtävä kuvan 33 mukaisesti. Säättäjän ohjearvo kytketään analogiatulona OPT-A1 -kortin liittimiin 2 (AI1+) ja 3 (AI1-).

## 6 YHTEENVETO

Käytännöllisen koestuskeinon löytämiseksi oli tärkeää tutustua generaattorin ja jännitesäätäjän toimintaperiaatteeseen. Eteenkin generaattorin magnetointijärjestelmän tunteminen on tärkeää, kun puhutaan generaattorin jännitesäädöstä. Työssä kerrotaan generaattorin kannalta olennaiset ominaisuudet sekä perehdytään jännitesäätäjän toimintaperiaatteeseen.

Koestuslaitteistoon valittiin mahdollisimman tunnettuja ja ominaisuuksiltaan monipuolisia laitteita, joilla pystytään selvittämään sekä säätäjän ohjausyksikön että pulssiyksikön kunto.

Generaattoria simuloitiin Vacon NXS taajuusmuuttajalla, jota käytettiin poikkeuksellisesti säädettävänä jännitelähteenä. Taajuusmuuttajan jännitteen tasaamiseksi hankittiin sinisuodatin, jolla jännite saadaan muistuttamaan siniaaltoa ja sen myötä säätäjän mittaustarkkuus paranee. Taajuusmuuttaja jouduttiin kuitenkin vaihtamaan ominaisuuksiltaan monipuolisempaan NXP -malliin, jonka jännitettä pystytään säätämään ilman, että taajuus muuttuu. Uutta taajuusmuuttajaa ja sinisuodatinta ei kuitenkaan ehditty kokeilemaan käytännössä pitkän toimitusajan takia.

Jännitesäätäjän kunto pystytään todentamaan esitetyn koestuslaitteiston ja säätäjän toimintaperiaatteen avulla. Koestusohje tehdään opinnäytetyön pohjalta.

Haluan kiittää opinnäytetyön ohjaamisesta lehtori Esko Niemistä Satakunnan ammattikorkeakoulusta, sekä ohjaajia Matti Vaaherantaa, Jarkko Harjua ja Jori Honkanie-meä Teollisuuden voimasta.

## LÄHTEET

- /1/ Hietalahti, L. Muuntajat ja sähkökoneet. Tammertekniikka, 2010.
- /2/ Elovaara, J & Haarla, L. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto, 2011.
- /3/ Tonteri & Aura. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. WSOY, 1996.
- /4/ Simola, Veli-Pekka. ABB Oy. Sähköpostikeskustelu. 19.10.2012.
- /5/ D1. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. STUL ry. Espoo: Sähköinfo Oy, 2010.
- /6/ ABB TTT-käsikirja 2000-07. Luku 17. Moottorit ja generaattorit. Verkojulkaisu. Saatavissa:  
[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/17\\_Moottorit%20ja%20generaattorit.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/17_Moottorit%20ja%20generaattorit.pdf)
- /7/ Laiti, Petteri. Taajuusmuuttajaan perustuva voimantuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. 2010.
- /8/ ST-käsikirja 31. Varavoimalaitokset. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo Oy, 2000.
- /9/ ST-käsikirja 52.40. Pienjännitteisen siirrettävän moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon, s. 2-9. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo Oy, 2003.
- /10/ FSAR. Lopullinen turvallisuusseloste. TVO:n sisäinen dokumentti.
- /11/ Mohan, N; Undeland, T & Robbins, W. Power Electronics, Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons Inc, 1995.

