



SÄHKÖTEKNIIKAN LABORATO- RION GENERAATTORILAITTEISTO

Toni Rajala

Opinnäytetyö
Elokuu 2015
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

RAJALA, TONI:
Sähkötekniikan laboratorion generaattorilaitteisto

Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Elokuu 2015

Suomessa voimansiirtoverkkoon kytketyt generaattorit käyvät samalla sähköisellä kulmanopeudella siten, että verkkotaajuuden suuruus on vakio, 50 Hz. Tahtigeneraattori tulee aina tahdistaa muun verkon kanssa samaan tahtiin, jotta vältetään haitalliset vikavirrat, jotka voivat olla pahimmillaan kaksinkertaisia verrattuna 3-vaiheiseen oikosulkuun.

Opinnäytetyössä tavoitteena oli tehdä Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratorion tahtigeneraattorilaitteistolle käyttöönotto ja saada laitteistoista niin stabiili, että sitä olisi mahdollista käyttää opetuskäytössä. Laitteistolla on tarkoitus harjoitella generaattorien tahdistamista verkkoon manuaalisesti ja automaattisesti sekä opetella generaattorikäyttäjien tehon säätöä.

Kyseisen laitteiston tahtigeneraattorit on voitu aikaisemmin tahdistaa onnistuneesti verkkoon, mutta ongelmana on ollut tehonsäätö. Tässä opinnäytetyössä ongelmaa pyrittiin ratkaisemaan ulkopuolisten tehosäätimien avulla, jotka asennettiin osaksi generaattorilaitteistoa kontrolloimaan automaattisia jännitesäätäjiä ja parantamaan järjestelmän stabiiliutta.

Tehosäätimet tilattiin Norjasta Stamford-generaattorien varaosien jälleenmyyjältä. Asennus suoritettiin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Työn laajuuden vuoksi varsinainen käyttöönotto rajattiin lopulta opinnäytetyön ulkopuolelle. Käyttöönotosta on kuitenkin laadittu ohjeistus, jonka avulla laitteiston toiminta voidaan tarkistaa.

Asiasanat: jännitesäätäjä, tahdistus, tahdistuslaitteisto, tahtigeneraattori, tehosäädin

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

RAJALA, TONI:

The Generator Equipment of an Electrical Engineering Laboratory

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 4 pages

August 2015

Generators connected to the transmission grid operate at the same angular speed in Finland. Line frequency is constant in the order of 50 Hz. A synchronous generator must be synchronized with the same rate as the grid in order to avoid harmful fault currents. These currents could be double compared to that of three-phase short circuits.

The purpose of the thesis was to make commissioning to the generator system of the electrical engineering laboratory of Tampere University of Applied Sciences and make it stable for educational use. The purposes of the system use are to practice synchronizing generators both manually and automatically to the grid and learn power adjustment between alternators.

Paralleling of synchronous machines has been made successfully previously, but power adjustment is the main problem of the system. In this thesis the problem was tried to solve with external power factor controllers, which were installed as part of generator system to control automatic voltage regulators and to improve system stability.

Power factor controllers were ordered from a Stamford's Norwegian aftermarket part dealer. Installation was made as per the instructions of the manufacturer. Because of the extent of the thesis actual commissioning was excluded from the scope of the thesis. However, instructions for commissioning were created, which can be used to check operation of the system.

Key words: automatic voltage regulator, power factor controller, synchronization, synchronization equipment, synchronous generator

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TAHTIGENERAATTORI.....	7
	2.1 Roottorirakenne	7
	2.2 Staattorirakenne	8
	2.3 Pyörimisnopeus.....	9
	2.4 Tyhjäkäynti ja lähdejännitteen synty	9
	2.5 Magnetoimismenetelmät.....	12
	2.5.1 Harjallinen magnetointi.....	12
	2.5.2 Harjaton magnetointi.....	13
	2.6 Generaattorin tehotarkastelu	14
	2.7 Pätötehon ja loistehon tasapaino eli toimintarajat	16
	2.8 Hyötysuhde	18
3	KÄYTTÖ JÄNNITTEELLISESSÄ VERKOSSA.....	20
	3.1 Tahdistaminen.....	20
	3.2 Tahdistusehdot	21
	3.3 Pätötehon säätö generaattorien yhteiskäytössä	22
	3.4 Loistehon säätö generaattorien yhteiskäytössä	23
	3.4.1 Induktiivisen loistehon säätö.....	23
	3.4.2 Kapasitiivisen loistehon säätö	23
4	LABORATORION GENERAATTORILAITTEISTO.....	24
	4.1 Voimakoneet, tahtigeneraattorit ja taajuusmuuttajat	24
	4.2 Käyttöpaneeli	25
	4.3 Automaattinen tahdistin ja jännitevertailijarele	29
	4.4 Synkronoskooppi	30
	4.5 Automaattinen jännitesäätäjä	31
5	PFC3 -TEHOSÄÄDIN.....	35
	5.1 Taustatietoa	35
	5.2 Tehosäätimen toiminta- ja kytkentäperiaate	36
	5.3 Erilaiset säätötavat	37
	5.3.1 Dynaaminen säätö ja vastealuesäätö	37
	5.3.2 Tehokertoimen kontrollointi (Power Factor Control Mode).....	39
	5.3.3 Loistehomäärän kontrollointi (VAr Control Mode).....	39
6	Säätimien asentaminen	40
	6.1 Yleistä	40
	6.2 Käyttöpaneelin asennukset	41
	6.2.1 Jännitesyöttö E1 ja E2 kontaktoriohjauksella	41

6.2.2	Katkaisijatiedot CB1 ja CB2.....	42
6.2.3	Jännitteen sovitus (Voltage Matching).....	43
6.3	Generaattorin kytkennät.....	43
6.3.1	Riviliitinkytkennät	44
6.3.2	Virtamuuntajakytkennät S1 ja S2.....	46
6.3.3	Jännitesäätäjän ja tehosäätimen väliset kytkennät	46
6.3.4	Valmis asennus	47
7	KÄYTTÖÖNOTON OHJEISTUS.....	48
7.1	Esivalmistelut.....	48
7.1.1	Jännitesäätäjän droop-asetukset	48
7.1.2	Tehosäätimen asetukset.....	49
7.2	Tehosäätö käytännössä	50
8	POHDINTA.....	51
8.1	Työn onnistuminen	51
8.2	Kehitysmahdollisuudet ja lisäselvitykset.....	52
	LÄHTEET.....	53
	LIITTEET	55
	Liite 1. Tehosäätimien asennukseen laadittu piirikaavio	55
	Liite 2. Käyttöpaneelin toiminnot	56
	Liite 3. PFC3-tehosäätimen tiedot.....	57
	Liite 4. Kytkentäkuva asentamista varten	58

1 JOHDANTO

Sähköenergian tuotannossa käytetään yleisesti tahtigeneraattoreita. Suomessa voimansiirtoverkkoon kytketyt generaattorit käyvät samalla sähköisellä kulmanopeudella siten, että verkkotaajuus on 50 Hz. Verkkoon syötetyn pätötehon generaattori saa voimakoneeltaan, joka voi olla esimerkiksi vesi- tai höyryturbiini. Generaattori muuttaa siis voimalaitoksen antaman mekaanisen energian sähkötehoksi. Sähköverkossa kulutuksen ja tuoton tulee olla tasapainossa, joten voimalaitoksissa käytetään pääasiassa vierasmagnetoituja generaattoreita, joissa on automaattinen jännitteen säätö. (Elovaara & Laiho, 1988, 89)

Oleellista tahtigeneraattorin verkkoon kytkemisen kannalta on sen tahdistaminen samaan tahtiin muun verkon kanssa. Mikäli generaattori kytkettäisiin verkkoon suorakäynnistyksellä ilman tahdistusta, vaarana olisi, että kytkeytyminen tapahtuisi hetkellä, jolloin generaattorin ja muun verkon jänniteosoittimet olisivat vastakkaiset eli vaiheoppositiossa. Tämä tilanne aiheuttaisi 3-vaiheiseen oikosulkuun verrattuna jopa kaksinkertaisen virran, minkä seurauksena generaattori ja verkko voisivat vaurioitua. (Thompson, 2, 2010)

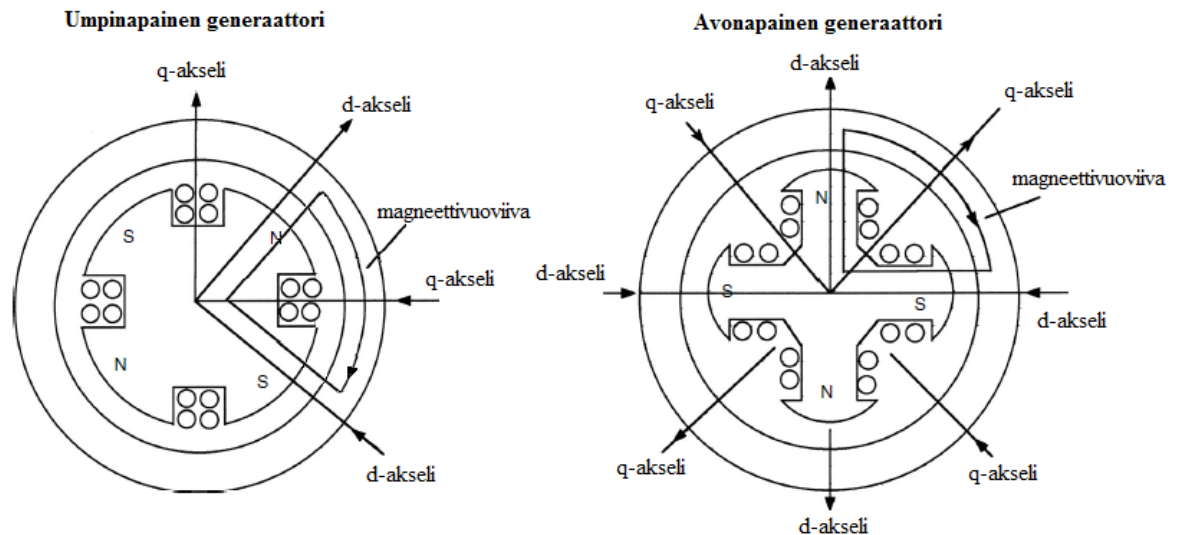
Tahdistuksen tarkoituksena on siis pienentää verkon ja generaattorin välisten jännite-erojen aiheuttamia virtatransientteja ja suorittaa tahdistus hetkellä, jolloin jännite-ero on nolla. Ennen tahdistus suoritettiin manuaalisesti, mutta nykyään tahdistusprosessi on hyvin pitkälti automatisoitu. Automaattinen tahdistuslaitteisto voidaan käynnistää paikalliset tai kauko-ohjauksella. (Thompson, 2, 2010)

2 TAHTIGENERAATTORI

2.1 Roottorirakenne

Tahtikone on vaihtosähköllä toimiva sähkömoottori ja tärkein konetyyppi generaattori-käytöissä. Sen roottori eli napapyörä, pyörii staattorin eli seisijan ankkurikäännyksen synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa tahdissa. Tällöin nopeudet ovat samat, joten jättämää ei ole ($s=0$). Tahtikoneen staattorirakenne on samantyyppinen kuin epätahtikoneessa, mutta roottori poikkeaa rakenteellisesti. Oikosuljetun häkkikäännyksen sijasta roottorirakenne on joko avo- tai umpinapainen ja magnetoitu ulkoisesti tasasähkölähteellä. (Hietalahti, 2011, 87)

Umpinapakoneessa käännyksien sijainnissa roottorin akselin suuntaisissa urissa. Urat eivät ole tasaisesti koko kehällä, vaan niiden välissä on lisäksi urattomia alueita, joita kutsutaan magneettinavoiksi (kuva 1). Tätä sylinterimäistä roottorirakennetta käytetään suurinopeuksissa käytöissä, kuten esimerkiksi höyryvoimalaitosten generaattoreissa. (Korpinen, 1998, 2)



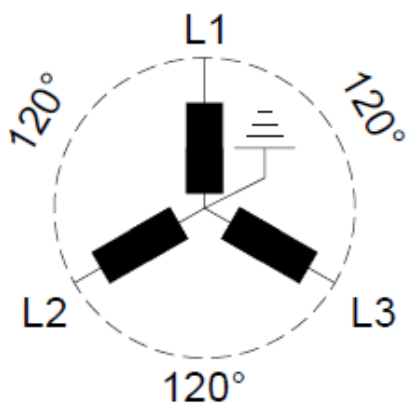
KUVA 1. Vasemmalla on esitetty umpinapakoneen roottorin poikkileikkaus, oikealla vastaavasti avonapakoneen (Reimert, muokattu, 2006, 20)

Avonaparoottorissa akselille on sijoitettu koneen napalukua vastaava määrä magneetti-napoja eli avonapoja, joiden ympärille käänmitään magnetointikäännyksien lattakuparista tai

muotolangasta (kuva 1). Avonapaisen koneen roottori on magneettisesti epäsymmetrinen, joten roottorin asennon vaihdella staattorin suhteen myös sen magneettivuon johtavuus vaihtelee. Navan suuntaisesti magneettivuon johtavuus on hyvä, kun taas napavälissä suuri ilmaväli heikentää johtavuutta. Tämä tahtikonetyyppi on tyypillinen hitaammin pyörivissä käytöissä kuten vesivoimageneraattoreissa. (Hietalahti, 2011, 87–88)

2.2 Staattorirakenne

Tahtigeneraattorin staattorirakenne koostuu symmetrisestä kolmivaiheisesta vaihtovirtakäämityksestä aivan kuten epätahtikoneissakin. Staattori- eli ankkurikäämitys on tehty aina samalle napapariluvulle kuin roottorikin. Käämitykset on sijoitettu rakenteellisesti siten, että ne muodostavat kolme ankkurikäämistä kuvan 2 mukaisesti. (Ahokas, 2011, 6)



KUVA 2. Tähtipistemaadoitetun staattorin kolmivaihekäämitys (Ahokas, muokattu, 2011, 6)

Staattorikäämityksille muodostetaan tähtipiste kytkemällä käämien päät yhteen. Tällöin staattorikäämityksiin indusoituneisiin jännitteisiin syntyy 120° vaihe-ero. Tämän kytkennän avulla toteutetaan myös generaattorin maadoitus vikatilanteiden aiheuttamien transientijännitteiden pienentämiseksi. (Ahokas, 2011, 6)

2.3 Pyörimisnopeus

Sähköverkkoon liitetyn tahtigeneraattorin pyörimisnopeus määräytyy verkon nimellistaajuudesta. Generaattori voi siis tuottaa energiaa ainoastaan yhdellä nopeudella, mutta nopeuteen voidaan vaikuttaa tahtigeneraattorin napapariluvulla kaavan (1) mukaisesti.

$$n = \frac{f}{p}, \quad (1)$$

jossa n on generaattorin pyörimisnopeus
 f on järjestelmän taajuus
 p on tahtigeneraattorin napapariluku.

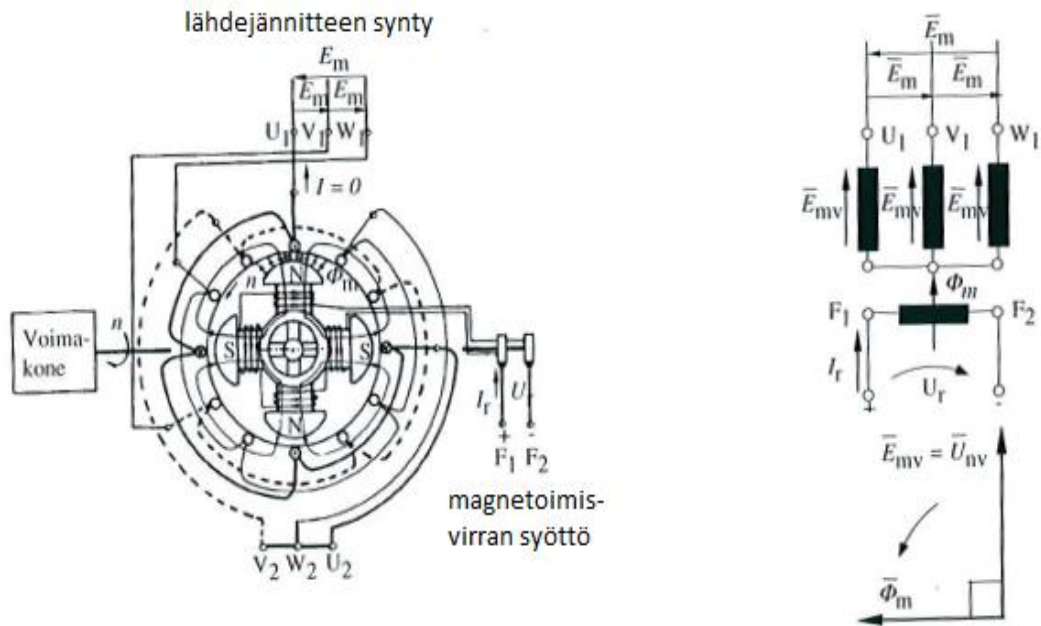
Esimerkiksi sähköverkossa, jonka nimellistaajuus on 50 Hz, nelinapaisen generaattorin nopeus on 1500 kierrosta minuutissa, koska napapariluku on kaksi. Generaattori, jonka napapariluku on kolme, pyörii vastaavasti samassa verkossa nopeudella 1000 rpm, kuten taulukossa 1 on esitetty. (Aura & Tonteri, 2009, 346-347)

TAULUKKO 1. Generaattoreiden pyörimisnopeudet, kun verkkotaajuus $f = 50$ Hz

p	$\frac{n}{r/min}$	p	$\frac{n}{r/min}$	p	$\frac{n}{r/min}$
1	3000	11	272 8/11	26	115 5/13
2	1500	12	250	28	107 1/7
3	1000	13	230 1/13	30	100
4	750	14	214 2/7	32	93 3/4
5	600	15	200	34	88 4/21
6	500	16	187 1/2	36	83 1/3
7	427 4/7	18	166 2/3	38	78 18/19
8	375	20	150	40	75
9	333 1/3	22	136 4/11		
10	300	24	125		

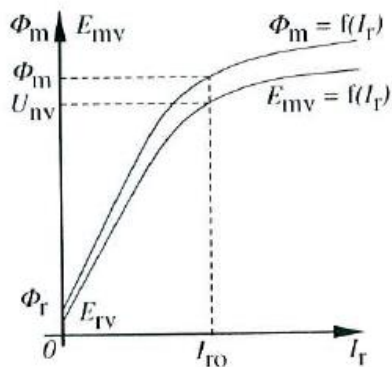
2.4 Tyhjäkäynti ja lähdejännitteen synty

Tahtigeneraattori käy tyhjäkäynnillä, kun sen staattori on kuormittamaton eli staattorin (ankkurin) virta on nolla. Roottori eli napapyörä magnetoidaan roottoriin sijoitetun magnetointikäimityksen avulla, jonne syötetään tasavirtaa I_r . Erilaisia magnetoimismenetelmiä on käsitelty kappaleessa 2.5. (Aura & Tonteri, 1996, 215-216)



KUVA 3. Avonapainen tahtigeneraattori tyhjäkäynnissä. Vasemmalla kytkentäkuva, oikealla osoitinpiirros (Aura & Tonteri, 2009, 345–347)

Magnetoimisvirta synnyttää roottorin magneettinapaan pysyvään magneettivuon eli päävuon Φ_m . Kuvassa 4 on esitetty päävuon Φ_m magnetoimisvirran I_r funktiona $\Phi_m = f(I_r)$, kun taajuus f on vakio. (Aura & Tonteri, 2009, 346)



KUVA 4. Päävuon magnetoimisvirran funktiona (Aura & Tonteri, 2009, 346)

Magnetoimisvirta käyttäytyy aluksi lähes lineaarisesti, koska alussa magnetointikäänin magnetomotorinen voima (mmv) kuluu koko ilmavälin reluktanssissa. Raudan vuontiheys on tällöin niin pieni, että sen vaikutus ei näy. Magneettisen kyllästymisen seurauksena lähdejännitteen kasvu hidastuu, kun magnetointivirta ylittää tietyn rajapisteen. Kuvassa 4 I_{r0} on magnetoimisvirran nimellisarvo ja U_{nv} kuvaa generaattorin nimellistä liitinjännitettä. (Korpinen, 1998, 4)

Generaattorin roottoria pyöritettäessä roottorivuoviivat leikkaavat staattorikäimityksiä. Tämän seurauksena staattoriin indusoituu sinimuotoinen lähdejännite E_{mv} , jota kutsutaan päälähdejännitteeksi. Staattorin ja roottorin magneettikentät pyörivät tällöin täsmälleen samalla nopeudella. Nimellisuopeudella käyvän generaattorin päälähdejännite voidaan määrittää seuraavasti kaavasta 2:

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

jossa f_k on käämityskerroin,
 f on järjestelmän taajuus
 N on staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset.
 Φ_m on yhden magneettinavan päävuo.

Tahtigeneraattori kytketään käytännössä aina verkkoon, jossa taajuus on f vakio. Tämän lisäksi käämityskerroin f_k ja johdinkierrokset N ovat generaattorin rakenteellisia vakioita. Tästä seuraa, että päävuo Φ_m on ainut tekijä joka muuttuu. Kaava 2 voidaan tällä perusteella yksinkertaistaa seuraavasti:

$$E_{mv} = k \cdot \Phi_m \quad (3)$$

Tästä seuraa, että päälähdejännite E_{mv} noudattaa samaa muotoa kuin päävuo $\Phi_m = f(I_r)$ roottorin magnetoimisvirran muuttuessa. Toisin sanoen generaattorin lähdejännite on riippuvainen magnetoimisvirran suuruudesta. (Aura & Tonteri, 2009, 347)

Tyhjäkäynnissä magnetointivirta I_r asetetaan yleensä siten, että generaattorin aikaansaama lähdejännite E_{mv} sen napoihin on yhtä suuri kuin generaattorin kilpiarvoissa ilmoitettu nimellinen liitinjännite U_{nv} taajuuden ollessa nimellistaajuus. Kuvassa 4. tätä magnetoimisvirran nimellisarvoa on merkitty tunnuksella I_{r0} . Ilman magnetoimisvirtaa kone luo roottorin remanenssivuosta lähdejännitteen E_{rv} . (Aura & Tonteri, 2009, 347)

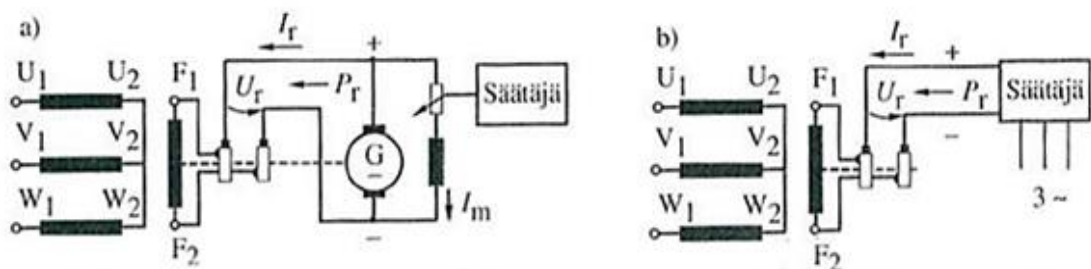
Tahtikone käynnistetään ilman varsinaista magnetoimisvirtaa herätinmagnetoinnilla, koska vuo aiheuttaisi jarruttavan vastamomentin. Magnetointivirtaa nostetaan vasta lähellä generaattorin tahtinopeutta. Generaattorin tyhjäkäynnissä staattorissa ei kulje kuitenkaan virtaa, koska staattorivirran vuota ei ole. Kuormittamalla saadaan aikaiseksi staattorivirta. (Haarla, 2014, 8-9)

2.5 Magnetoimismenetelmät

Kuten kappaleessa 2.4 todettiin, tarvitsee tahtigeneraattorille luoda magnetointivirta tasavirralla staattorin liitinjännitteen säätämiseksi. Magnetoimismenetelmien perusteella tahtikoneet voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin (Aura & Tonteri, 2009, 348).

2.5.1 Harjallinen magnetointi

Harjallisessa magnetointimenetelmässä magnetoimisvirta I_r tuodaan hiiliharjojen ja teräksestä tai messingistä tehtyjen liukurenkaiden avulla roottorikäämiin, joka on merkitty kuvassa 5 liittimiin F_1 ja F_2 (Aura & Tonteri, 2009, 348).



KUVA 5. Harjallinen magnetointimenetelmä a) tasasähkölähteellä b) vaihtosähkölähteellä (Aura & Tonteri, 2009, 348)

Pääkoneen (tahtikoneen) magnetoimisteho P_r harjallisessa magnetoinnissa on

$$P_r = U_r \cdot I_r, \quad (4)$$

jossa U_r on magnetoimisjännite

I_r on magnetoimisvirta.

Harjallisessa magnetoinnissa pääkoneen magnetoimisteho P_r otetaan joko ulkoisesta tasasähkölähteestä (kuva 5a) tai vaihtosähkölähteestä (kuva 5b). Tasasähkölähteenä voidaan käyttää pääkoneen kanssa samalle akselille sijoitettua magnetointigeneraattoria (kuvassa 5a oikealla) tai erillistä DC-lähdettä. Magnetointigeneraattorin magnetoimisvirtaa

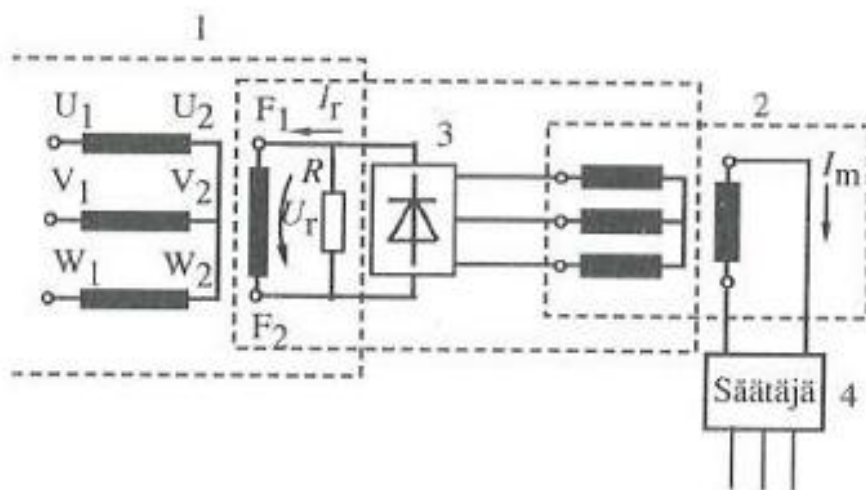
I_m säätämällä vaikutetaan magnetointigeneraattorin kehittämään jännitteeseen U_r , jonka muuttuminen säätää pääkoneen roottoriin magnetoimisvirtaa I_r . (Aura & Tonteri, 2009, 348)

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vaihtosähkölähde ja säätäjä –yhdistelmää (kuva 5b), joka säätää ja tasasuuntaa magnetoimisvirran I_r sopivasti. Teholähteenä magnetoinnille voidaan käyttää ulkoista AC-lähdettä tai itse pääkonetta. (Aura & Tonteri, 2009, 348)

Harjallisen magnetoinnin etuna voidaan pitää kykyä säätää napakäämivirtaa nopeasti dynamiikkaa vaativissa tehtävissä. Hiiliharjallinen magnetointi aiheuttaa kuitenkin hiiliharjojen kulumista, mikä vaatii säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa. (Ilitchov, 2012, 15)

2.5.2 Harjaton magnetointi

Huomattavasti yleisempi tapa on käyttää harjatonta magnetointia, jossa magnetointienergia tuotetaan generaattorin akselilla erillisellä magnetointikoneella. Energia tasasuunnataan tasasuuntaajasillalla, joka sijaitsee roottorissa. Harjattoman magnetoinnin periaate on esitetty kuvassa 6. (Aura & Tonteri, 2009, 348)



KUVA 6. Tahtigeneraattorin harjaton magnetointi. 1. Pääkone. 2. Magnetointikone. 3. Diodisilta 4. Säädin. R = diodien suojaresistanssi (Aura & Tonteri, 2009, 349)

Pääkoneen (1) kanssa samalla akselilla on erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori herätinmagnetointikoneena (2). Tämän magnetoimisgeneraattorin magnetoimisvirta I_m otetaan vaihtosähkölähteestä säätäjän (4) avulla. Ulkonapakoneen magneettinavat sijaitsevat kolmivaihestaattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, sijaitsee puolestaan roottorissa. Magnetointigeneraattorin staattoriin indusoituva lähdejännite tasasuunnataan diodisillan (3) avulla DC-jännitteeksi U_r . Tämä vaikuttaa pääkoneen roottorin magnetoimiskäämiin F_1 - F_2 synnyttämällä magnetoimisvirran I_r . (Aura & Tonteri, 2009, 348–350)

Verkkomagnetoidussa generaattorissa magnetointiteho tasasuuntaussillalle voidaan ottaa myös syötettävästä verkosta esimerkiksi verkkomuuntajalta tai kyllästyvältä virtamuuntajalta. Tällöin magnetointi on riippuvainen verkkojännitteestä. Magnetointiin on mahdollista käyttää myös erillistä akustoa tai AC-hakkuriteholähdettä. (Hietalahti, 2011, 101–102)

2.6 Generaattorin tehotarkastelu

Generaattorin tuottama sähköinen pätöteho P saadaan sitä pyörittävän voimakoneen mekaanisesta tehosta. Umpinapaisen generaattorin antama sähköinen pätöteho voidaan kuvata seuraavasti tehokulmayhtälöllä (Hietalahti, 2011, 92–93)

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot \frac{U_f U_s}{X_d} \cdot \sin \delta, \quad (5)$$

jossa P on generaattorin tuottama sähköinen pätöteho
 U_f on sisäinen vaihelähdejännite
 U_s on napa- eli staattorivaihejännite
 X_d on generaattorin pitkittäinen tahtireaktanssi
 δ on napakulma.

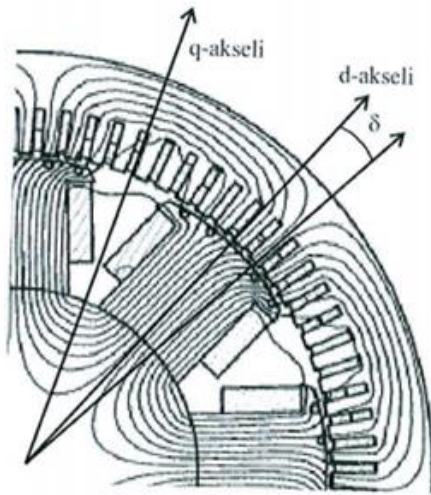
Avonapaisella generaattorilla tehokulmayhtälön muoto on seuraava

$$P = 3 \cdot \left[\frac{U_s U_f}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \right], \quad (6)$$

jossa X_q on generaattorin poikittainen tahtireaktanssi.

Kaavassa 6 ensimmäinen termi yhtälössä kuvaa magnetoidulla roottorilla saatavaa tehoa, kun taas jälkimmäinen kuvaa tehoa, joka saadaan roottorin epäsymmetriasta. Napakulma δ kuvaa staattorijännitteen ja sisäisen lähdejännitteen jänniteosoittimien kulmaeroa. Tämä kulmaero aiheuttaa kuormittavan vääntömomentin voimakoneelle.

Tahtigeneraattorin antama pätöteho on maksimissaan, kun napakulma on noin 90 astetta. Generaattoria, jota kuormitetaan nimellisillä arvoilla, napakulma on tyypillisesti noin 20–30 astetta. Tyhjäkäynnillä käyvän tahtikoneella kulma on lähellä nollaa, joten napa- ja lähdejännite ovat tällöin lähes yhtä suuret ($U_f \approx U_s$). (Hietalahti, 2011, 92)



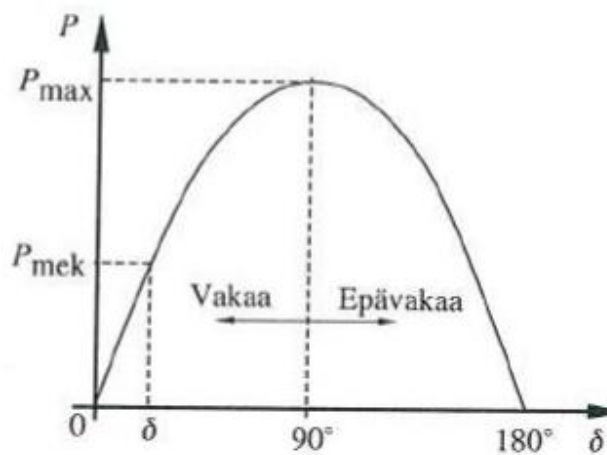
KUVA 7. Koneen napakulma (Hietalahti, 2011, 92)

Tahdissa pyörivän koneen magneettikentässä napakulma määritetään pyörivän roottorin d-akselin ja staattorivuon symmetriakohdan välisenä kulmana, kuten kuvassa 7 on esitetty (Hietalahti, 2011, 92).

Magnetointi määrää puolestaan tahtigeneraattorin verkkoon syöttämän loistehon suuruuden ja suunnan. Loisteho voidaan määrittää umpinapaiselle generaattorille kaavalla 7. (Lana, 2008, 18)

$$Q = 3 \cdot \frac{U_f U_s}{X_d} \cdot \cos \delta - \frac{U_s^2}{X_d} \quad (7)$$

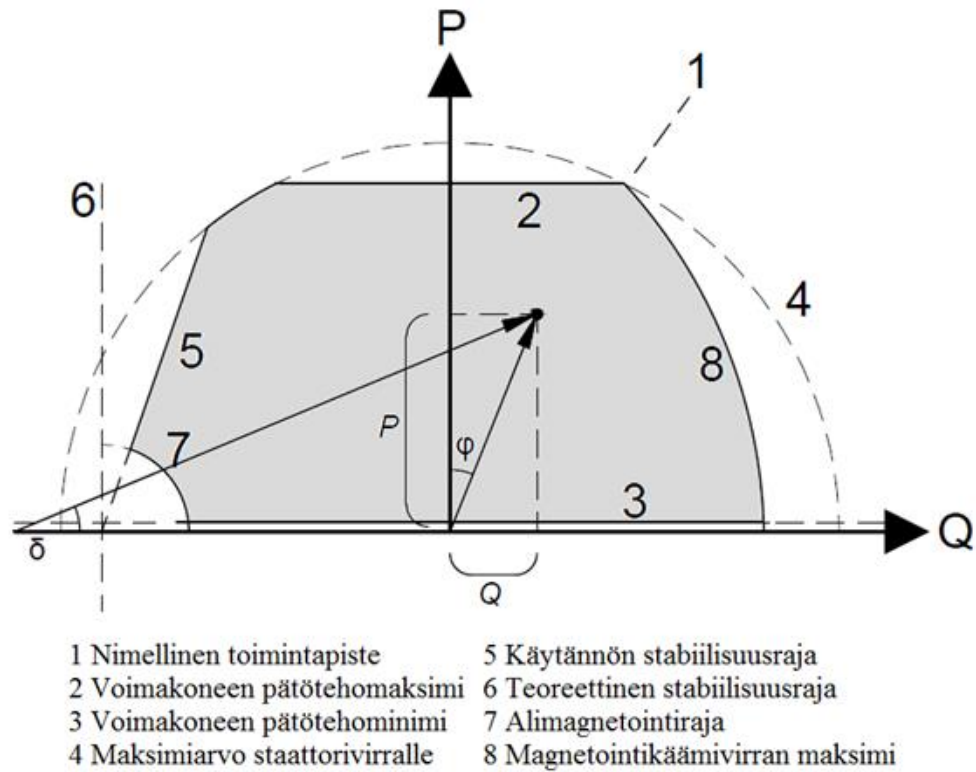
Mikäli voimakoneen tehoa kasvatetaan liikaa, tahtigeneraattorin napakulma ylittää kriittisen 90 asteen rajan ja tehotasapainon stabiilius häiriintyy. Tällöin staattorin ja roottorin magneettinapojen välinen yhteys katkeaa, minkä seurauksena kone alkaa toimia vuorotellen generaattori- ja moottorikäyttönä ja putoaa tahdistä. Sähköinen vääntömomentti jää mekaanista momenttia pienemmäksi. Verkolle tahtigeneraattori näkyy tällöin vuoroin kulluttavana ja tuottavana tehoyksikkönä, mikä voi aiheuttaa suuria jännite- ja tehovaihteita. Tällöin kone tulee välittömästi irrottaa verkosta. Napakulman vaikutusta tahtikoneen stabiiliuteen on kuvattu kuvassa 8. (Elovaara & Laiho, 1988, 89; Lana, 2008, 18)



KUVA 8. Tahtigeneraattorin pätöteho napakulman funktiona ja napakulman vaikutus tahtikoneen stabiiliuteen (Aura & Tonteri, 1996, 241)

2.7 Pätötehon ja loistehon tasapaino eli toimintarajat

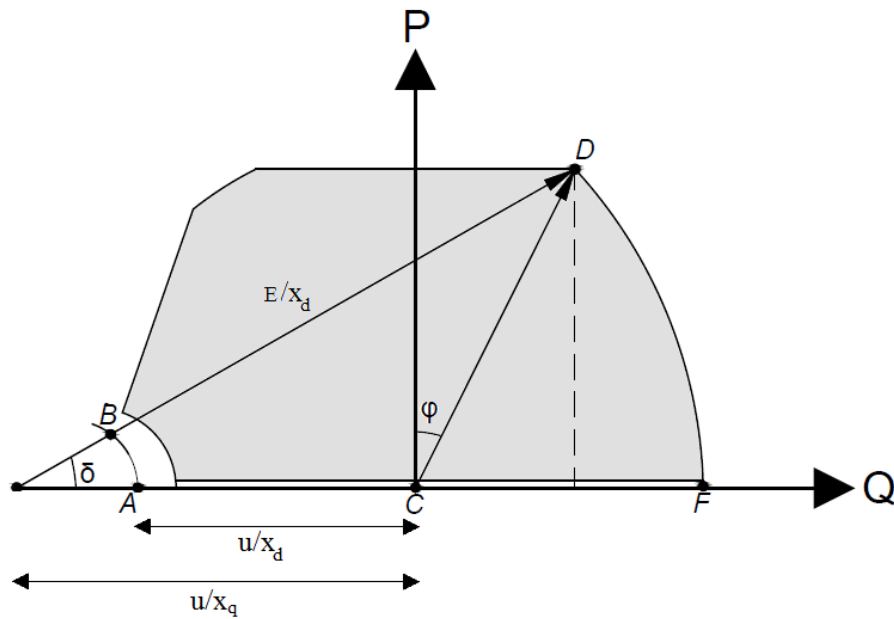
Tahtigeneraattoria pyörittävä voimakone määrittää aina generaattorin antaman pätötehon, kuten kappaleessa 2.6 on todettu. Magnetointi määrää puolestaan loistehon määrän, jonka generaattori syöttää verkkoon. Koneen pätö- ja loistehon tulee olla tasapainossa siten, että nimellinen näennäisteho ei ylitä. Tahtigeneraattorin PQ-diagrammista voidaan nähdä, kuinka paljon generaattorilla on mahdollista tuottaa pätö- ja loistehoa koneen toimintarajojen sisällä. PQ-diagrammi on esitetty kuvassa 9. Diagrammin vaaka-akselilla on esitetty loisteho Q ja pysty-akselilla pätöteho P . (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 luku 17, 2007, 17)



KUVA 9. Generaattorin PQ-diagrammi, generaattorin toimintarajat

Kuvassa 9 esitetty harmaa alue on stabiili toiminta-alue, jolloin generaattori on toimintarajojensa sisällä. Jos generaattorin loistehon määrää kasvatetaan, tulee vastaavasti pätötehon osuutta laskea. Tämä sen takia, että kuormitusvirta pysyisi nimellisessä arvossa ja generaattorikäyttö sen nimellispisteessä (1). (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 luku 17, 2007, 17)

Pätötehon maksimi- ja minimirajat on esitetty numeroilla (2) ja (3). Staattorikämmien virrankestoisuus asettaa ylärajan generaattorin näennäistehon tuottamiselle verkkoon, joka on esitetty katkoviivalla (4). Diagrammin vasemmalle puolelle on myös asetettu käytännön stabiilisuusraja (5). Magnetointivirrälle on myös määritetty minimiraja (7), jotta tahti-generaattori ei joutuisi kapasitiivisessa kuormituksessa epästabiiliin tilaan. Roottorin lämpeneminen asettaa magnetointikämmivirran maksimin (8). Rajoittamalla tahti-generaattorin napakulmaa, voidaan rajoittaa generaattorin toimintaa alimagnetoituna stabiiliuden säilyttämiseksi. PQ-diagrammi on kuvattu ja nimetty tarkemmin vektoritasolla kuvassa 10. Pätö- ja loistehon säätöä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3. (Hietalahti, 2011, 109–110)



\overline{AC} = tyhjäkäyntimagnetointivirta

\overline{CD} = staattorivirta

\overline{BD} = nimellismagnetointivirta

A = tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia

C = tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla

D = nimelliskuormituspiste

F = tyhjäkäyntipiste nimellismagnetoinnilla

δ = napakulma

φ = tehokulma

u = staattorijännite

x_d = pitkittäinen tahtireaktanssi

x_q = poikittainen tahtireaktanssi

E = tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla

KUVA 10. Generaattorin PQ-diagrammi, vektoreiden ja pisteiden merkitys

Kuvasta 10 voidaan nähdä, mistä komponenteista kuormituspisteen määrittävät vektorit koostuvat. Lisäksi kuvaan on nimetty tyhjäkäyntiin liittyvät toimintapisteet A, B, C ja E sekä nimelliskuormituspiste D.

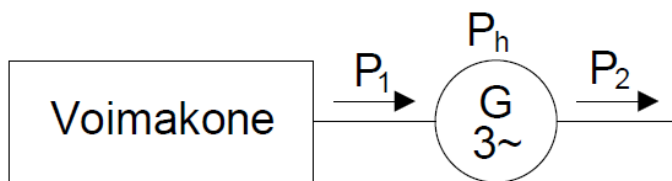
2.8 Hyötysuhde

Tahtigeneraattorin arvokilvessä ilmoitetaan teho nimellisenä näennäistehona S_n , koska generaattorin magnetoinnilla on mahdollista muuttaa loistehon suuruutta. Kilpiarvona on mainittu myös generaattorinen nimellinen tehokerroin $\cos \varphi_n$ eli generaattorin antama pätöteho voidaan ilmaista kaavalla 8. (Aura & Tonteri, 1996, 258)

$$P_2 = S_n \cdot \cos \varphi_n \quad (8)$$

Generaattorista on mahdollista ottaa koko nimellisen näennäistehon suuruinen teho täysin pätötehona eli $P_2 = S_n$. Tässä tapauksessa tehokerroin $\cos \varphi_n$ on 1. Magnetoimisvirta on siis pienempi kuin nimellisellä tehokertoimella, mikäli $\cos \varphi_n < 1$. (Aura & Tonteri, 1996, 258)

Kun tahtigeneraattori muuttaa voimakoneen sille antaman mekaanisen tehon P_1 sähköiseksi tehoksi P_2 , kuluu osa saadusta tehosta muutosprosessissa tehohäviönä, jota merkitään tunnuksella P_h . Nämä tehohäviöt aiheuttavat koneelle lämpenemistä. Tahtigeneraattorin hyötysuhde on esitetty kuvassa 11. (Aura & Tonteri, 1996, 258)



KUVA 11. Tahtigeneraattorin hyötysuhde.

Kaavamuodossa tahtigeneraattorin hyötysuhde voidaan esittää seuraavasti

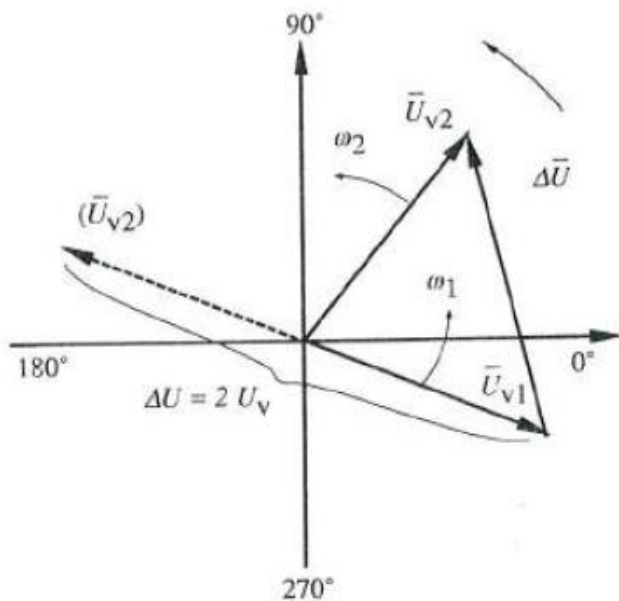
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_h} \quad (9)$$

Tahtigeneraattorin tehohäviöitä syntyy staattorin virtalämpöhäviöinä, rautahäviöinä, staattorikäämityksen lisähäviöinä, mekaanisina häviöinä ja magnetoimishäviöinä. Näiden summasta saadaan muutosprosessin koko tehohäviö P_h . (Aura & Tonteri, 1996, 258)

3 KÄYTTÖ JÄNNITTEELLISSÄ VERKOSSA

3.1 Tahdistaminen

Tahtigeneraattori tulee aina tahdistaa verkkoon liitettäessä. Generaattorin kytkeminen verkkoon ilman tahdistamista voi aiheuttaa vaaratilanteen, jossa kytkeytyminen tapahtuu hetkellä, jolloin verkon ja generaattorin jänniteosoittimet ovat vastakkaiset eli vaiheoppositiossa. Tämän seurauksena voi syntyä vikavirta, joka on 3-vaiheiseen oikosulkuvirtaan suhteutettuna kaksinkertainen. Tahdistus siis pienentää generaattorin ja verkon välisen jännite-eron seurauksena syntyviä virtatransientteja. Se suoritetaan hetkellä, jolloin tämä jännite-ero on lähellä nollaa. Oikean tahdistushetken määrittäminen on esitetty osoitinpiirroksena kuvassa 12. (Thompson, 2, 2010)

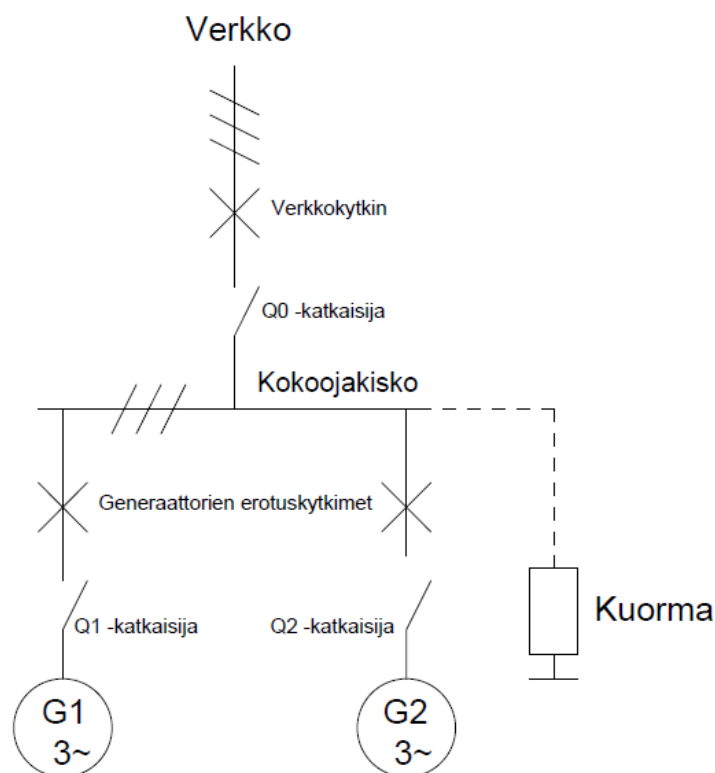


KUVA 12. Oikean tahdistushetken määrittäminen (Aura & Tonteri, 1996, 234)

Tahdistaminen siis edellyttää, että jännite verkkokatkaisijan molemmin puolin tulee olla vaihekulmiltaan, että itseisarvoltaan samat eli ($U_1 = \sqrt{3} \cdot U_{v1}$) ja ($U_2 = \sqrt{3} \cdot U_{v2}$). Tämän seurauksena jännite U_1 tulee olla yhtä suuri kuin U_2 ja vastaavasti α_1 samaa suuruusluokkaa kuin α_2 . Toisin sanoen U_{v1} ja U_{v2} jännitteiden tulee olla tahdistamishetkellä päällekkäin eli niiden jännite-ero $\Delta U = 0$. (Aura & Tonteri, 1996, 234)

Tahdistuksen periaatekuva on esitetty kuvassa 13. Verkkokatkaisija on kokoojakiskon ja generaattorin välinen katkaisija, joka voidaan sulkea vasta tahdistuksen jälkeen. Generaattoreiden ja kokoojakiskon välissä ovat lisäksi omat erotuskytkimensä ja katkaisijansa.

Saarekekäyttö kuvaa puolestaan käyttötilannetta, jossa osa jakeluverkosta on erillään muusta sähköverkosta, mutta voi toimia itsenäisesti paikallisen tuotannon avulla. Kuvan 13. mukaisessa tilanteessa verkkokatkaisija on tällöin auki ja generaattorit syöttävät kuormaa kokoojakiskon kautta keskinäisen pätö- ja loistehosuhteen mukaisesti. (Hydro One Networks Inc, 2010, 4)



KUVA 13. Verkkotahdistuksen periaatekuva

3.2 Tahdistusehdot

Tahdistamisen onnistuminen edellyttää, että seuraavat neljä ehtoa toteutuvat, ennen kuin katkaisija generaattorin ja verkon välissä ohjataan kiinni:

- Jännitetasojen itseisarvot generaattorin ulostulon ja verkon välillä pitää olla samat eli U_1 (gener.) = U_2 (verkko)

- Taajuustasojen tulisi olla myös lähes samat ($f_1 = f_2$). Takatehotilanne vältetään parhaiten niin, että pyritään pitämään generaattoripuolen taajuus verkkoa hieman suurempana.
- Verkkojärjestelmän ja generaattorin eli tahdistettavien laitteistojen vaihejärjestykset tulee olla samat
- Generaattorin ja verkon vaihekulmaero tulee olla lähes sama (Aura & Tonteri, 2009, 354)

Kun tahdistus on suoritettu onnistuneesti, tahtigeneraattori käy tyhjäkäynnillä. Tällöin virtaa ei kulje kumpaakaan suuntaan. Verkkokatkaisijan sulkeminen verkon ja generaattorin välillä on sitä turvallisempaa, mitä lähempänä generaattorin ja verkon arvot vastaavat toisiaan. Suuret taajuuserot altistavat voimakoneen ja generaattorin mekaaniselle rasitukselle. Jännite-erot aiheuttavat transienttivirtoja, jotka vahingoittavat käämityksiä. Myös verkon kuorma voi altistua voimakkaalle jännitevaihtelulle heikosti suoritettun tahdistuksen seurauksena. (Ahokas, 13-14, 2011)

3.3 Pätötehon säätö generaattorien yhteiskäytössä

Generaattorien kehittämää sähköenergiaa ei ole mahdollista varastoida. Pätötehon siirto generaattorilta G_1 generaattorille G_2 voidaan suorittaa seuraavasti:

Tahdistetun generaattorin G_2 voimakoneen vääntömomenttia M_2 lisätään, jolloin pyörimisnopeus pyrkii lisääntymään. Tällöin generaattorin G_2 syöttää kiskolle pätövirran I_2 . Generaattorin G_1 pätövirta tulee tällöin vastaavasti pienentyä, koska kuorman sähköiset arvot ovat vakioita. (Aura & Tonteri, 354-355, 2009)

Generaattorin G_1 voimakoneen vääntömomentti M_1 pyrkii lisäämään taajuutta ja pyörimisnopeutta samalla kun G_1 sähköinen vääntömomentti ja pätöteho pienenee. Voimakoneen säätäjä saa tästä tiedon ja pienentää voimakoneen vääntömomentin M_1 vastaamaan generaattorin sähköistä vääntömomenttia, joten pyörimisnopeus taajuus säilyvät vakioina. Tahtigeneraattorikäytöissä pätötehon säätö tapahtuu siis voimakoneen vääntömomenttia muuttamalla. (Aura & Tonteri, 354-355, 2009)

3.4 Loistehon säätö generaattorien yhteiskäytössä

3.4.1 Induktiivisen loistehon säätö

Kun generaattori on tahdistettu, se on verkossa tyhjäkäyntitilaa vastaavassa tilassa ($\cos \varphi = 1$). Mikäli verkkoon halutaan syöttää induktiivista loistehoa ja $-$ virtaa, tulee tahtigeneraattoria ylimagnetoida. Generaattorin G_2 magnetointia lisättäessä, syöttää se verkkoon induktiivista loisvirtaa I_2 . Vastaavasti generaattorin G_1 magnetointi tulee pienentyä kuorman sähköisten arvojen pysyessä vakioina. (Aura & Tonteri, 355, 2009)

G_1 magnetointivirran on siis pienennyttävä, jotta verkkojännite ei kasvaisi. Jännitesäätäjä saa tiedon jännitteennoususta ja pienentää generaattorin G_1 magnetointivirtaa säätämällä verkon jännitteen nimelliseksi $U_1 = U_n$. Induktiivinen loistehosäätö toteutetaan tahtigeneraattorikäytöissä muuttamalla generaattorin ylimagnetointia. (Aura & Tonteri, 355, 2009)

3.4.2 Kapasitiivisen loistehon säätö

Jos verkkoon halutaan syöttää kapasitiivista loistehoa ja $-$ virtaa, tulee generaattorin magnetointia pienentää demagnetoimalla. Generaattorin G_2 magnetointia pienentämällä, syöttää se verkkoon kapasitiivista loisvirtaa I_2 . Tämän seurauksena verkkojännite pyrkii pienemään. Generaattorin G_1 jännitesäätäjä saa tiedon jännitelaskusta ja kasvattaa sen magnetointivirtaa siten, että verkkojännite pysyy nimellisenä $U_1 = U_n$. Kapasitiivinen loistehosäätö tapahtuu tahtigeneraattorikäytöissä alimagnetoimalla generaattoria. (Aura & Tonteri, 355, 2009)

4 LABORATORION GENERAATTORILAITTEISTO

4.1 Voimakoneet, tahtigeneraattorit ja taajuusmuuttajat

TAMKin sähkölaboratorion opetuskäyttöön tarkoitettu tahdistuslaitteisto on kokonaisuus, johon on kytketty rinnan kaksi H-kuormitusluokan kolmivaiheista harjatonta Stamfordin tahtigeneraattoria. Molemmille generaattoreille on pyrittävänä voimakoneena omat VEM motorsin -voimakoneet, jotka mallintavat turbiinikäyttöä. Tahtigeneraattorien kilpiarvot on esitetty kuvassa 14 ja voimakoneiden vastaavasti kuvassa 15.



KUVA 14. Stamfordin BC184 E2 -tahtigeneraattorin kilpiarvot

Type	P_B	P_B	M_B	n_B	η_B	$\cos j_B$	I_B	I_A/I_B	M_A/M_B	M_S/M_B	M_K/M_B	J	m
	GL RRS	BV DNV LR ABS CCS					380 V					kq ^{m2}	kq
	kW	kW	Nm	rpm	%	-	A	-	-	-	-		
Synchronous speed 1500 rpm – 4-pole version													
K11R 180 L4	22	22	143	1465	90.5	0.84	44	6.5	2.0	1.8	2.6	0.138	170

KUVA 15. VEM motorsin K11R 180 L4 –voimakoneen kilpiarvot (Special catalogue, VEM motors, 2009, 14)

Kumpaakin voimakonetta nopeusohjataan omilla taajuusmuuttajillaan. Taajuusmuuttajat ovat Vaconin CX-tyyppiä. Tahtigeneraattorit sijaitsevat erillisessä konehuoneessa laboratorion alapuolella. Generaattorien tahdistuslaitteiston varsinainen käyttöpaneeli on asennettuna sähkölaboratorion tiloihin, mikä on esitelty kappaleessa 4.2. Kuvassa 16 on nähtävissä konehuoneessa sijaitseva generaattori G1, sen keskus ja voimakonetta ohjaava taajuusmuuttaja.



KUVA 16. Generaattori G1 ja sen voimakonetta ohjaava Vacon CX –taajuusmuuttaja

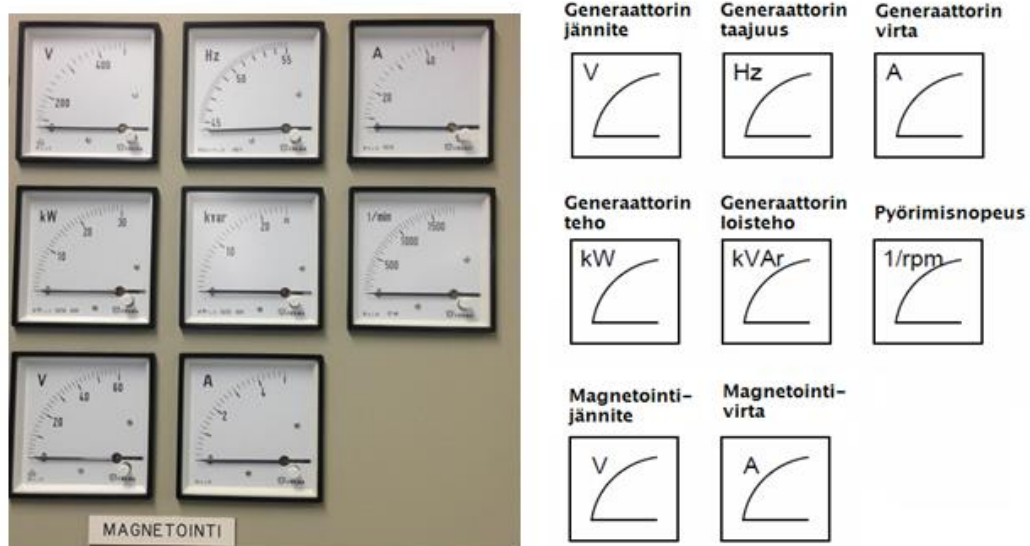
4.2 Käyttöpaneeli

Tahtigeneraattorilaitteistoa varten on valmistettu käyttöpaneeli mittareineen TAMKin sähkölaboratorioon, joka on esitelty kuvassa 17. Tämän avulla generaattoreita on mahdollista käyttää etänä sähkölaboratoriosta käsin.



KUVA 17. TAMKIn sähkölaboratorion generaattorilaitteiston käyttöpaneeli

Jokaisella generaattorilla on paneelissa oma mittaristonsa (kuva 18), jonka ensimmäinen rivi näyttää generaattorin liitinjännitteen, taajuuden ja virran. Toisella rivillä on generaattorin tuottama pätö- ja loisteho, sekä roottorin pyörimisnopeus. Viimeiseltä riviltä löytyvät arvot magnetointivirrälle ja -jännitteelle. Tämän lisäksi on mahdollista kytkeä ulkopuolinen mittaus pääjännitteelle U_{12} mittamuuntajan avulla.



KUVA 18. Käyttöpaneelin mittaristo

Tahtigeneraattorille on myös omat erotuskytkimensä erottamista varten. Laitteisto sisältää myös verkkokytkimen, jolla generaattorijärjestelmä yhdistetään osaksi verkkoa tai vastaavasti voidaan erottaa siitä saarekekäytön ajaksi (kuva 17).



KUVA 19. Verkkokatkaisijan Q0 ohjaaminen ja tahdistuksen valinta

Kuvassa 19 on esitetty painikkeet, joilla verkkokatkaisijaa Q0 voidaan ohjata kontaktoreiden välityksellä. Tahdistuslaitteistossa on mahdollista valita käsi- tai automaattitahdistus tahtigeneraattoreille. Lisäksi voidaan kontrolloida syötetäänkö generaattorin teho verkkoon vai säädetäänkö generaattorien tehotasapainoa yhteiskäytössä (saarekekäyttö).

Kuvassa 20 vasemmalla ovat painikkeet, joilla generaattorin voimakone käynnistetään ja pysäytetään. Nopeuden ja tehon säätöä varten on oma potentiometrinsä ja sen arvoja voidaan seurata mittaristosta säädettäessä. Jokaisella generaattorilla on myös painikkeensa oman katkaisijan Q ohjaamiseen kiinni ja auki.



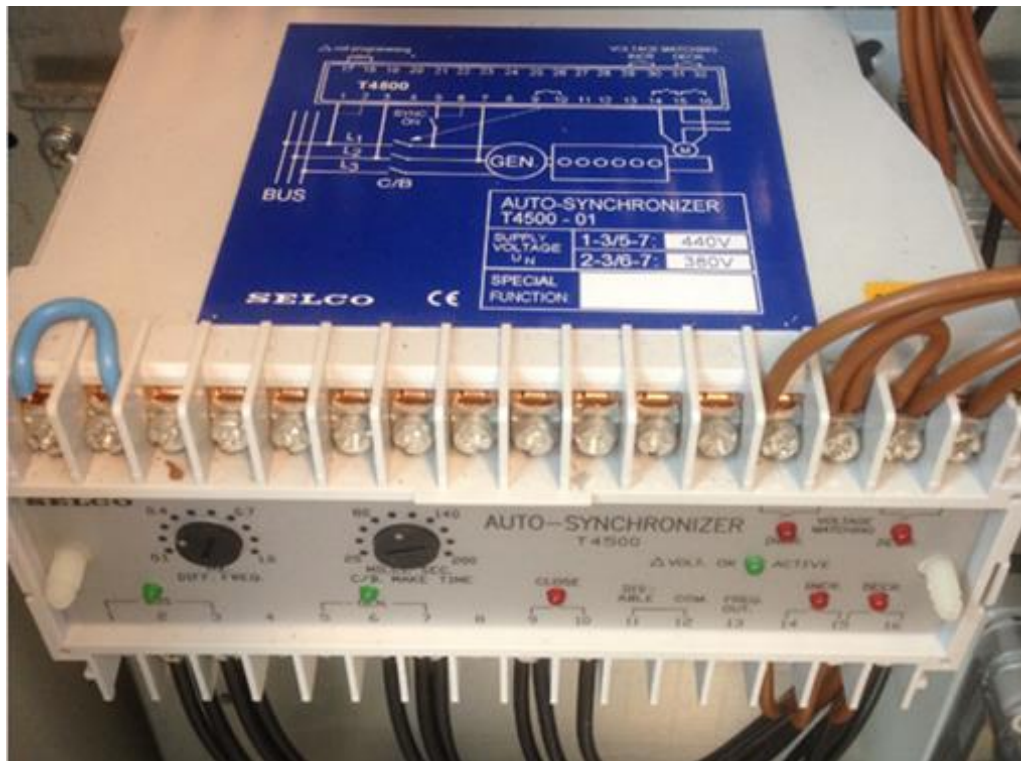
KUVA 20. Generaattorin käynnistuspainikkeet ja säätökytkimet

Generaattorin tahdistus valitaan käyttöön kääntämällä halutun generaattorin ”tahdistuksen valinta” -avainkytkin asentoon 1. Sen oikealla puolella sijaitsee kytkin, jolla voidaan kytkeä ulkoinen magnetointi päälle. Mikäli ulkoinen magnetointi ei ole kytkettynä päälle, generaattorilaitteisto käyttää magnetoinnissa hyödykseen samalla akselilla sijaitsevaa magnetointikonetta. Tällöin magnetointivirran suuruutta lasketaan ja nostetaan avainkytkimen alapuolella olevalla ”magnetointi” -potentiometrillä.

Kun käytetään ulkopuolista magnetointia, magnetointitasavirta tahtigeneraattorille syötetään kauko-ohjattavasta 50 VDC, 5 A -hakkuriteholähteestä. Paneelissa on erikseen ”ulkopuolinen magnetoinnin säätö” -potentiometri tätä säätötoimintoa varten. Paneelissa on myös hälytysmerkkivalot, jotka varoittavat ylivirrasta ja takatehosta. Laitteistossa on lisäksi liitännät myös ulkopuoliselle kolmannelle tahtigeneraattorille.

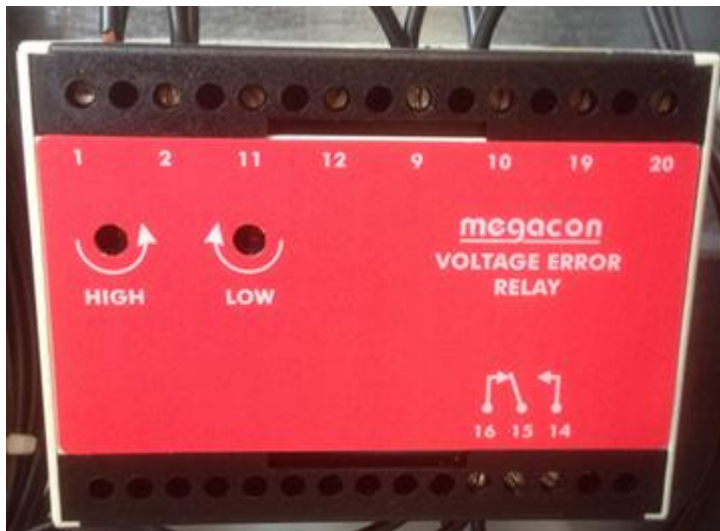
4.3 Automaattinen tahdistin ja jännitevertailijarele

Automaattisena tahdistimena laitteistossa toimii SELCO:n T4500-01, jonka toiminta on kuvattu kuvassa 21. Megaconin KRV43B jännitevertailijarele (kuva 22) vertailee jännitetasoja generaattorikatkaisijan molemmin puolin ja vie tiedon tästä automaattiselle tahdistimelle. (Megacon, 1)



KUVA 21. Automaattinen tahdistinlaitteisto Selco T4500

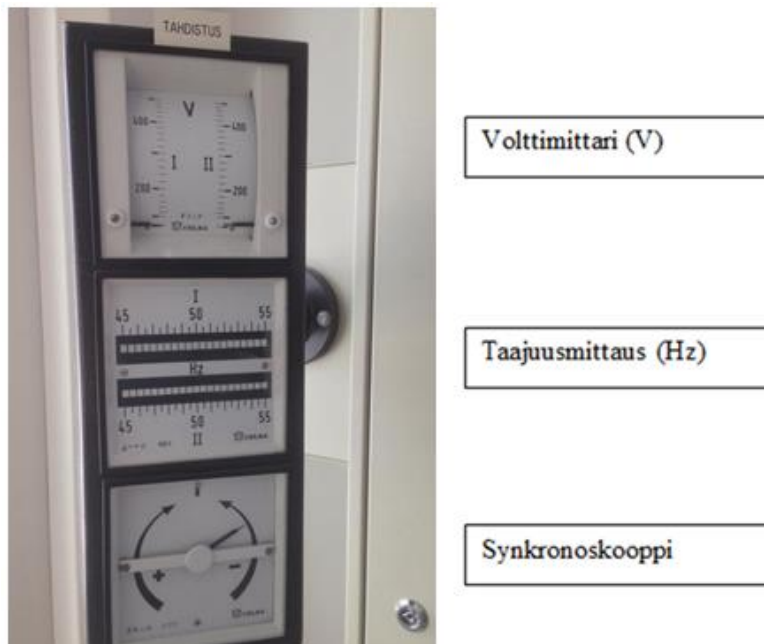
Kytkehetkellä generaattorin taajuuden on oltava sama tai aavistuksen verkkotaajuutta suurempi, jotta haitallinen takateho vältetään. Automaattitahdistin siis huolehtii, että generaattorin napajännitteen ja verkkojännitteen vaihe- ja suuruusero sekä generaattorin ja verkon taajuusero säätävät automaattisesti aseteltuihin rajoihin eli toisin sanoen valvoo, että tahdistusehdot toteutuvat. Tahdistin ohjaa myös generaattorikatkaisijat sekä verkko-
katkaisijan Q0 kontaktoriohjauksien avulla automaattisesti kiinni.



KUVA 22. Megaconin KRV43B -jännitevertailijarele

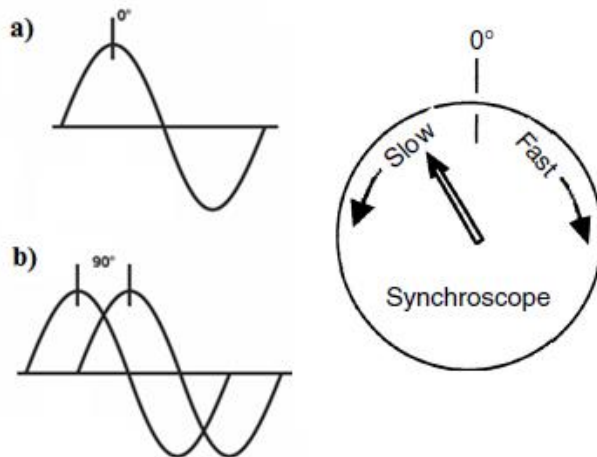
4.4 Synkronoskooppi

Tahdistusprosessia seurataan sähkölaboratoriossa synkronoskooppi –nimisestä laitteesta (kuva 23), joka näyttää pyörimisnopeuden eron. Synkronoskoopin tahdistuskellon viisari pyörii 360° , nopeudella, joka vastaa taajuuseroa generaattorin ja verkon välillä. (Reimert, 2006, 370)



KUVA 23. TAMK:n sähkölaboratorion tahdistuksen näyttöpaneeli

Se on suunniteltu siten, että jos tahdistettavan generaattorin pyörimisnopeus on liian suuri verkon taajuuteen nähden, se pyörii myötäpäivään. Mikäli tahdistettavan generaattorin taajuus (pyörimisnopeus) on pienempi kuin verkolla, se pyörii vastaavasti vastapäivään (kuva 24). Kun synkronoskooppi huomaa, että vaihekulmaero on 0° , se asettuu ylös ”kello kahteentoista” ja tahdistettava tahtigeneraattori on samassa vaiheessa verkon kanssa. (Reimert, 2006, 370)



KUVA 24. Synkronoskooppi. a) Generaattorien jännitteet samassa vaiheessa b) Generaattorien jännitteet 90° vaihe-erossa (Reimert, 2006, 370)

Tämän jälkeen tulee vielä tarkistaa, että kiskojännite vastaa tahdistettavan generaattorin jännitettä (kuva 23). Näin voidaan todeta tahdistusehtojen toteutuneen ja vasta tämän jälkeen tahdistettavan generaattorin katkaisija voidaan ohjata turvallisesti kiinni. (Reimert, 2006, 370)

4.5 Automaattinen jännitesäätäjä

Automaattinen jännitesäätäjä AVR (*Automatic voltage regulator*) vastaa automaattisesti magnetointilaitteiston tuottamasta magnetointivirrasta. Se siis pitää huolen, että generaattorin liitinjännite pysyy vakiona, vaikka teho ja taajuus vaihtelevat. Säätäjällä on tärkeä merkitys sähköverkon stabiilisuuden ylläpitämisessä. Koska kyseessä on harjaton magnetointi, säätäjä ohjaa tässä tapauksessa 50 VDC hakkuriteholähteen magnetointikämmityksille johdetun virran suuruutta. TAMKIn laitteistossa tahtigeneraattorien jännitesäätäjinä toimivat SA465-2 –tyyppiset automaattiset jännitesäätäjät (kuva 25). (Aura & Tonteri, 252-253, 1996)

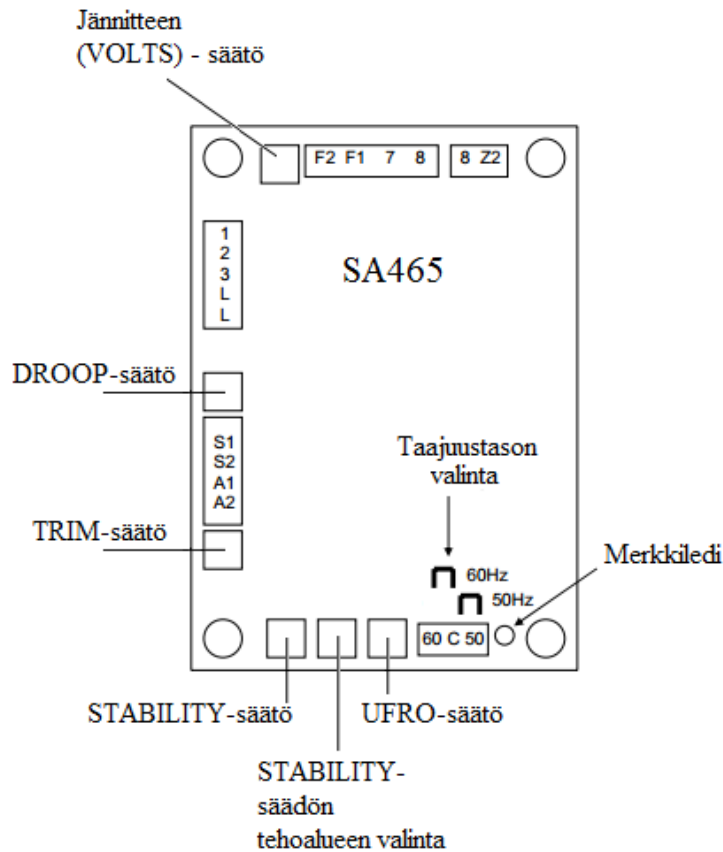


KUVA 25. Jännitesäätiäjä SA465-2

Jännitesäätiäjän tulee hoitaa seuraavat asiat:

1. Generaattorin herätys käynnistyksen yhteydessä.
2. Sopiva magnetointi myös oikosulkutilanteessa.
3. Pientää liitinjännite, mikäli taajuus laskee. (alitaajuusrajoitin)
4. Pitää liitinjännite vakioarvossa generaattorin yksittäiskäytössä
5. Säätiää generaattoria siten, että rinnakkaiskäyttö muiden generaattorien kanssa on mahdollista (Aura & Tonteri, 253, 1996)

Jännitesäätiäjän piirikortin osat on esitelty kuvassa 26. Lisäksi taulukossa 2 on yhteenveto säätiöistä, joita säätiäjälle voidaan suorittaa.



KUVA 26. SA465-2 –säätäjän piirikortin osat (Newage AVK SEG, muokattu, 2003, 4)

TAULUKKO 2. Yhteenveto jännitesäätäjän säädöistä

YHTEENVETO JÄNNITESÄÄTÄJÄN SÄÄDÖISTÄ		
SÄÄTÖ	TOIMINTA	SUUNTA
Volts	Generaattorin liitinjännitteen säätö	Myötäsuunta kasvattaa liitinjännitettä
Stability	Jännitteen vakavuudesta huolehtiminen	Myötäsuunta vähentää värähtelyä
Stability Switch	Säädön tehoalueen valinta	Katso erillinen taulukko
Ufro	Kulmapisteen (<i>knee pointin</i>) säätö	Myötäsuunta pienentää kulmapisteen taajuutta
Droop	Jännitteenaleneman raja-arvon säätö	Myötäsuunta kasvattaa raja-arvoa
V_{trim}	Jännitteen hienosäätö (ulk. potentiometri)	Myötäsuunta kasvattaa hienosäädön vaikutusta

VOLTS-säätimellä voidaan vaikuttaa generaattorin liitinjännitteeseen. Tämä säädin on aina tehtaalla valmiiksi aseteltu generaattorin nimellisjännitteen mukaan, mutta sitä on mahdollista myös muuttaa jälkeenpäin seuraamalla laitteen ohjeita. (Newage AVK SEG, 2003)

STABILITY-potentiometrin säätö kuvaa magnetoinnin säätäjälle asetettua vakavuutta. Tätä voidaan hyödyntää sähköverkon loistehon kompensoinnissa. Säädön optimaalinen kohta löydetään pyörittämällä tahtikonetta tyhjäkäynnillä ja säätämällä STABILITY-säädintä vastapäivään hyvin lähelle hälytysrajaa. (Newage AVK SEG, 2003)

STABILITY SELECTION –kytkimellä valitaan sopiva tehoalue sen mukaan, minkä tehoinen tahtikone säätimeen on liitetty. Kytkimen asentoon vaikuttaa lisäksi se, kuinka herkkä säätimen halutaan olevan. Tehoalueet on esitetty taulukossa 3. (Newage AVK SEG, 2003)

TAULUKKO 3. Säätimen tehoalueet

STABILITY SELECTION - kytkin		
Numero	Tehoalue	Herkkyys
0.	< 100 kW	Nopea
1.	100 - 550 kW	Nopea
2.	550 - 1000 kW	Nopea
3.	> 1000 kW	Nopea
4.	< 100 kW	Keskinopea
5.	100 - 550 kW	Keskinopea
6.	550 - 1000 kW	Keskinopea
7.	> 1000 kW	Keskinopea
8.	< 100 kW	Hidas
9.	100 - 550 kW	Hidas

UFRO (*Under frequency roll off*) on myös tehtaalla valmiiksi säädetty ja sen muuttaminen vaatii sinetin poistamista. Tässä tapauksessa voidaan vaikuttaa ainoastaan taajuustasoon, joka on joko 50 Hz tai 60 Hz. Jännitesäätimelle on asetettu kulmapiste (*knee point*), jossa säätäjä aloittaa staattorijännitteen pienentämisen pudottamalla magnetointia. Tällä estetään, että kone ei ajautuisi ylikuormitilanteeseen. Kun tahtikoneen nopeus putoaa alle asetellun nopeusarvon, UFRO-piiri käynnistyy ja merkkiledi syttyy. (Newage AVK SEG, 2003)

DROOP-säätö vaikuttaa tahtikoneen jännitejäykkyyteen. Tämän avulla määritellään sallittu jännitteenalenema kuormitustilanteessa. Tehdassäädöissä tämä on aseteltu niin, että se sallii viiden prosentin aleneman, kun täyden kuorman tehokerroin on nolla. Jännitesäädin saa signaalin, jonka tehokerroin määrittää. Tämän perusteella DROOP-säätö toteutuu. (Newage AVK SEG, 2003)

TRIM –analogiasäätöön (A1, A2) on mahdollista kytkeä lisälaitteita, kuten Newagen tehokertoimen säädin tai muita lisälaitteita. Se vastaa tasajännitesignaaleihin, joiden taso on ± 5 V. Kun säädintä käännetään vastapäivään, lisälaitteen vaikutus katoaa ja vastavasti myötäpäivään säädettäessä sen vaikutus kasvaa. Mikäli tehosäädintä käytetään jännitesäätimen rinnalla, TRIM-säädin on täysin myötäpäiväisessä asennossa. (Newage AVK SEG, 2003)

5 PFC3 -TEHOSÄÄDIN

5.1 Taustatietoa

Opinnäytetyössä tuli ottaa käyttöön TAMKIn sähkölaboratorion tahtigeneraattorien tahtistuslaitteisto, joka on esitelty kappaleessa 4. Laitteistossa olevat tahtigeneraattorit on aikaisemmin saatu jo tahtistumaan verkkoon, mutta generaattorien tehosäätö on ollut ongelma. Tahtikoneet putoavat tahdistusta, mikäli yritetään säätää niiden keskinäistä pätö- ja loistehosuhdetta.

Tätä varten suoritin taustatutkimusta, jossa selvisi, että laitteiston jänniteensäätäjiin on saatavilla erillinen lisälaitte, PFC (*Power Factor Controller*), joka osaa pitää tehotasapainon hallinnassa tehosäädön yhteydessä kontrolloimalla jänniteensäätäjää. Stamfordin norjalaisella Generator Solutions AS -jälleenmyyjällä oli tarjota PFC3 -tyyppisiä tehosäätimiä (kuva 27), jotka ovat yhteensopivia SA465-2 jännitesäätäjän kanssa. Näitä hankittiin TAMKIn generaattorilaitteistoa varten kaksi kappaletta, omat molemmille tahtigeneraattoreille.

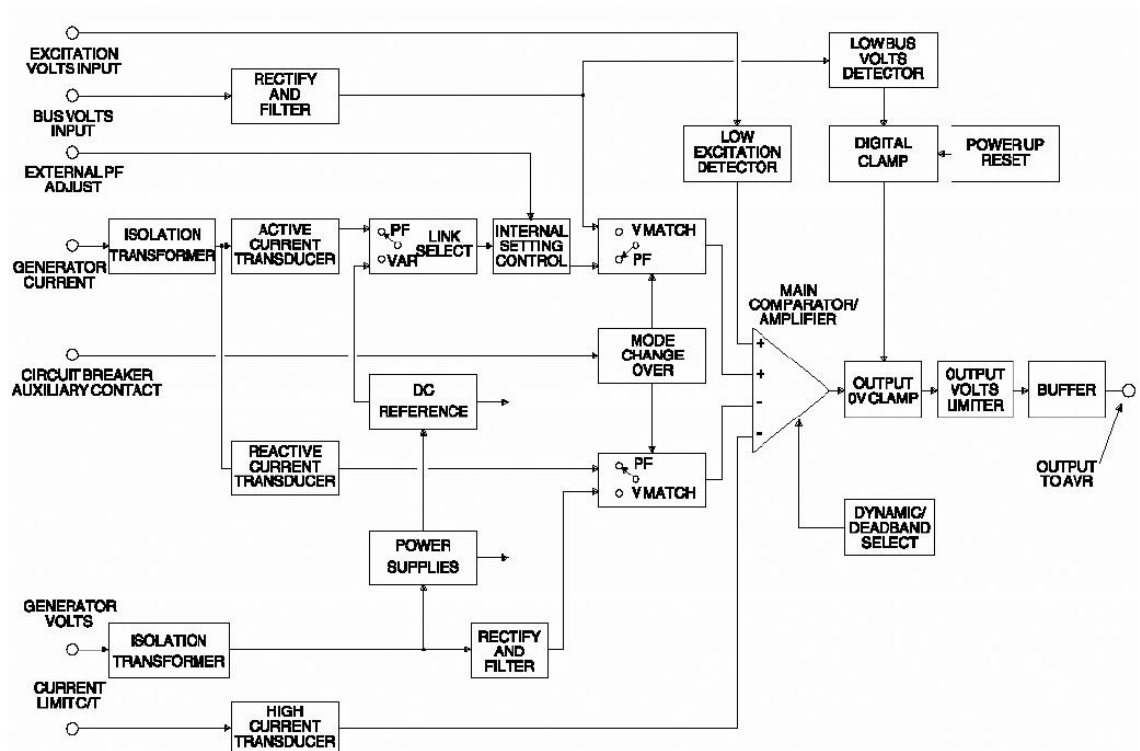


KUVA 27. PFC3 –tehosäädin

Toinen mahdollinen ratkaisu saattaisi olla taajuusmuuttajan mahdollinen uudelleenparametointi ja tarkemman nopeusohjeen antaminen voimakoneille esimerkiksi hyödyntäen tarkempaa nopeusanturia, mutta tässä opinnäytetyössä teho-ongelmaa lähestyttiin korjaamalla jännitesäätäjien asetusarvoa tehosäätimien avulla.

5.2 Tehosäätimen toiminta- ja kytkentäperiaate

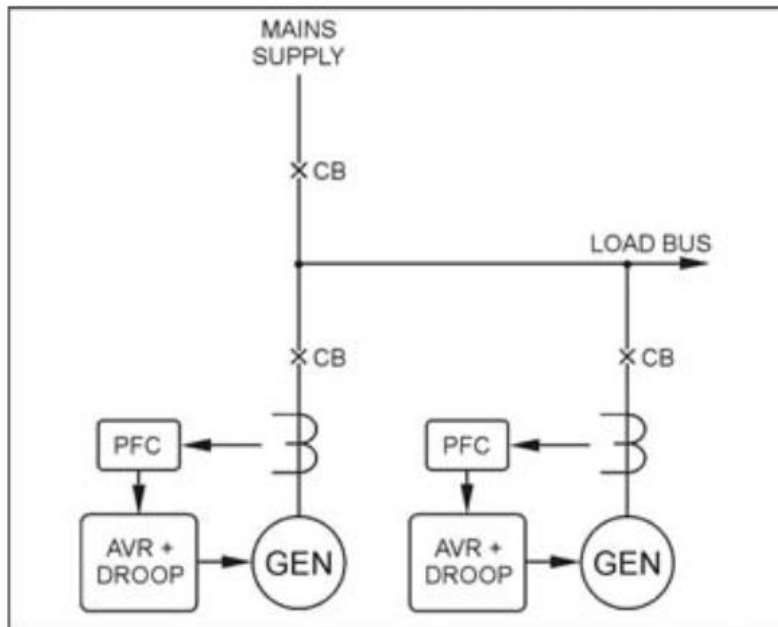
PFC3 -tehosäädin on siis tarkoitettu loistehon VAR ja tehokertoimen PF säätöön, kun generaattoreita käytetään rinnan verkon kanssa. Signaalit, jotka kuvaavat tietoa generaattorin jännite- ja virtatasoista, saadaan PFC3-säätimelle suojaerotusmuuntajien kautta. Mittauspiirit käyttävät näitä virta- ja jännitesignaaleja tuottaakseen sisäisen tasajännitereferenssin, joka on verrannollinen generaattorin tuottamaan pätö- ja loistehon määrään. Tehosäätimen toiminnan lohkokaavio on esitetty kuvassa 28. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 7)



KUVA 28. Tehosäätimen lohkokaavio (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 10)

Säädin sisältää myös jännitteen sovituksen (*Voltage matching*), joka tarvitaan automaattista tahdistuslaitteistoa varten. Muita lisätoimintoja eri sovellutuksiin ovat mm. generaattorin ulostulovirran rajoitus sekä alimagnetointivirran kontrollointi stabiiliuden ylläpitämiseksi. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 7)

Käyttöohjeessa on kuvattu kaksi erilaista perustapaa kytkeä tehosäätimet generaattoreille. Kuvassa 29 on esitetty tässä opinnäytetyössä käytetyn kytkennän yksinkertaistettu periaate. Lisäksi erilaiset sovellukset vaativat vielä omat lisäkytkentänsä, joista löytyy lisätietoa tehosäätimen asennus- ja käyttöohjeesta. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 7)



KUVA 29. Tehosäätimen kytkentäperiaate (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 7)

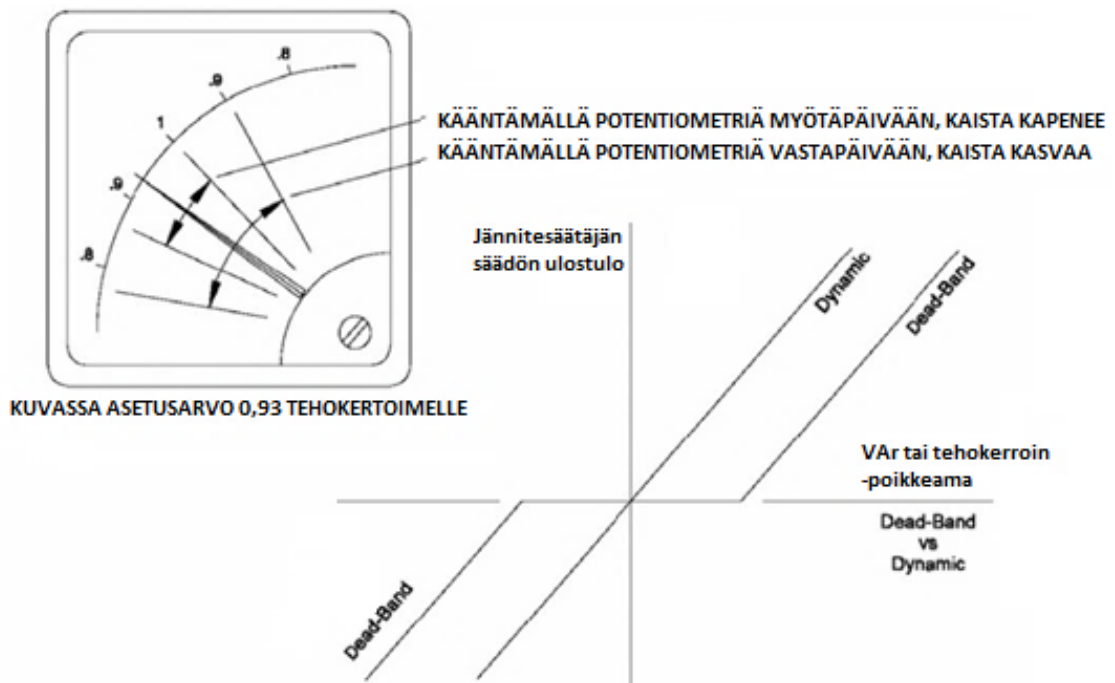
5.3 Erilaiset säätötavat

5.3.1 Dynaaminen säätö ja vastealuesäätö

PFC3 –säätimelle on valittavissa kaksi erilaista säätötapaa, jotka ovat nimeltään dynaaminen säätö (*Dynamic Control*) ja vastealuesäätö (*Deadband Control*). Dynaamisessa

säädössä PFC3:n ulostulo säätää jatkuvasti jännitesäätäjän asetusarvoa pienimpäänkin tehokertoimen (tai loistehon määrään) muutokseen reagoiden. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 12)

Dead-band –säädössä tehokerroin (tai loistehomäärä) voi vaihdella käyttäjän asettamien rajojen sisällä ennen kuin mitään asetusarvon muutosta tapahtuu takaisin asetettujen rajojen sisälle. Dead-band -säätö toimii epätarkemmin, mutta voi poistaa stabiiliisuusongelmia, koska ei ole läheskään niin herkkä kuin dynaaminen säätö. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 12)



KUVA 30. Säätötapojen havainnollistaminen (Cummins Generator Technologies Ltd., muokattu, 2013, 13)

Kuten kuvasta 30 nähdään, dead-band –säätö ei ole niin herkkä, koska sen toimintarajat ovat dynaamisen säädön molemmilla puolilla. Tämän kaistan leveyttä voidaan siis tarvittaessa muokata tehosäätimen BAND -potentiometrin avulla.

5.3.2 Tehokertoimen kontrollointi (Power Factor Control Mode)

Käytettäessä tehokertoimen säätöä (*Power Factor Control Mode*), mitatun lois- ja pätövirran suhdetta verrataan referenssitiasoon, joka on asetettu säätimen VAR/PF -potentiometrillä. Jos mitatun loisvirran suuruus nousee yli ”kW” -signaalin, PFC3 vähentää jännitesäätäjän sisäistä asetusarvoa (liittimien A1 ja A2 kautta) ja vie loistehon (ja siten tehokertoimen) oikealle kontrolloidulle tasolle. Mikäli mitattu loisvirta on liian pieni, tapahtuu päinvastainen toiminto. Näin saadaan aikaiseksi ns. suljettu silmukka generaattorin tehokertoimen ylläpitämiseksi (kuva 28). (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 11)

5.3.3 Loistehomäärän kontrollointi (VAr Control Mode)

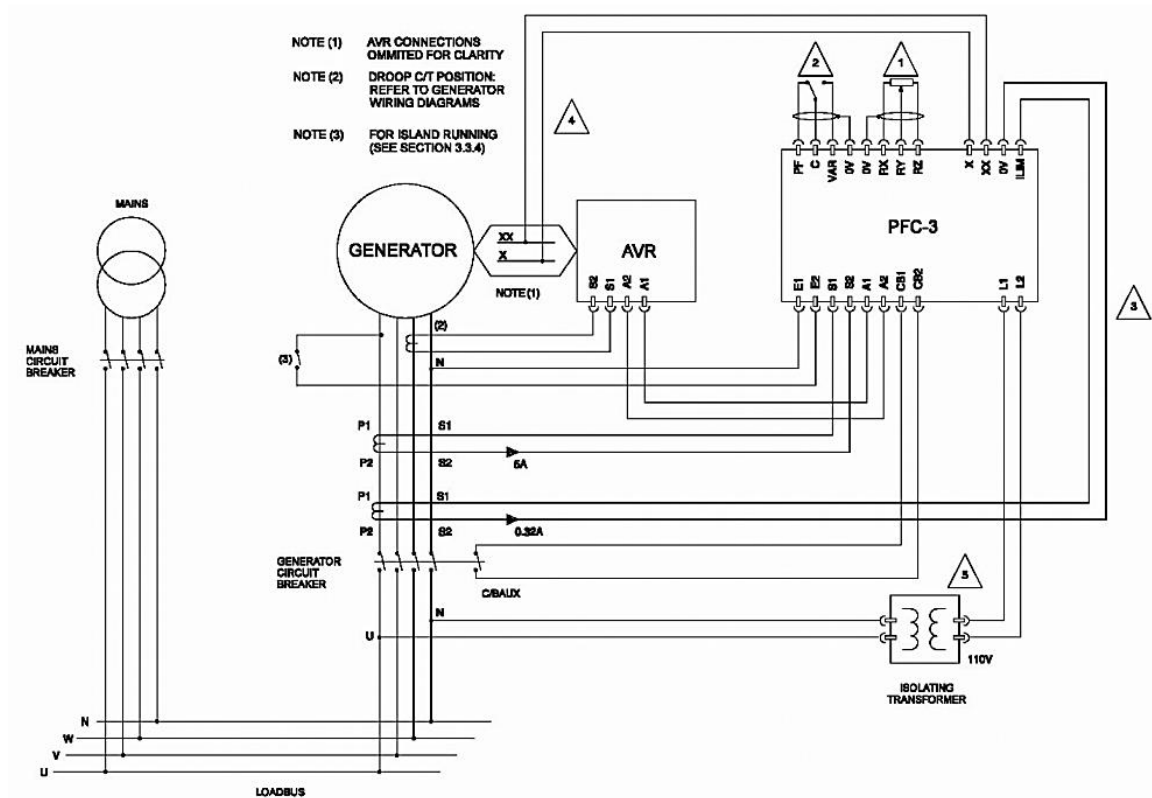
Tässä toimintatavassa (*VAr Control Mode*) mitattua loisvirtaa verrataan referenssitiasoon, joka on asetettu säätimen PF/VAr -potentiometrillä. Mikäli mitattu loisvirta nousee yli asetusarvon, PFC3 vähentää sisäistä asetusarvoa jännitesäätäjältä ja vie loistehon määrän kontrolloidulle tasolle. Jos mitattu VAr on pienempi kuin vaadittu arvo, tapahtuu päinvastainen reaktio. Näin saadaan vastaavasti aikaiseksi suljettu silmukka generaattorin loistehon ylläpitämiseksi (kuva 28). (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 11)

6 Säätimien asentaminen

6.1 Yleistä

Tässä opinnäytetyössä käytetyn PFC3-tehosäätimien manuaalin mukainen kytkentäkuva on esitetty kuvassa 30 ja yksityiskohtaisempi itse laadittu piirikaavio liitteessä 1. Kytkentä on käyttöohjeen mukainen tehokertoimen kontrolloinnin peruskäyttö, johon on lisätty 60 VA suojaerotusmuuntaja mittaamaan kiskojännitettä automaattista tahdistuslaitteista varten. Tämä lisäominaisuus on merkitty kuvassa 30 numerolla 5.

Numeroilla 1-4 merkityjä lisäominaisuuksia ei tässä sovellutuksessa tarvinnut ottaa käyttöön. Numeroiden 1 ja 2 mukaisilla liittimillä saataisiin ulkoiset potentiometrit käyttöön säätötapojen valitsemiseksi. 3 ja 4 ovat virta- ja jänniterajoituksia varten, joita ei tarvitse huomioida perussovelluksessa.



KUVA 31. Tehosäätimen kytkentäperiaate, jossa kaikki lisäominaisuudet 1-5 kytkettynä (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 20)

6.2 Käyttöpaneelin asennukset

Asennusjohtimina käytettiin pääasiassa 1,5 mm² ML- ja MKEM-johdinta. Asentamisessa sain tarvittaessa opastusta TAMKIn laboratorioinsinööriltä Matti Kohtalalta.

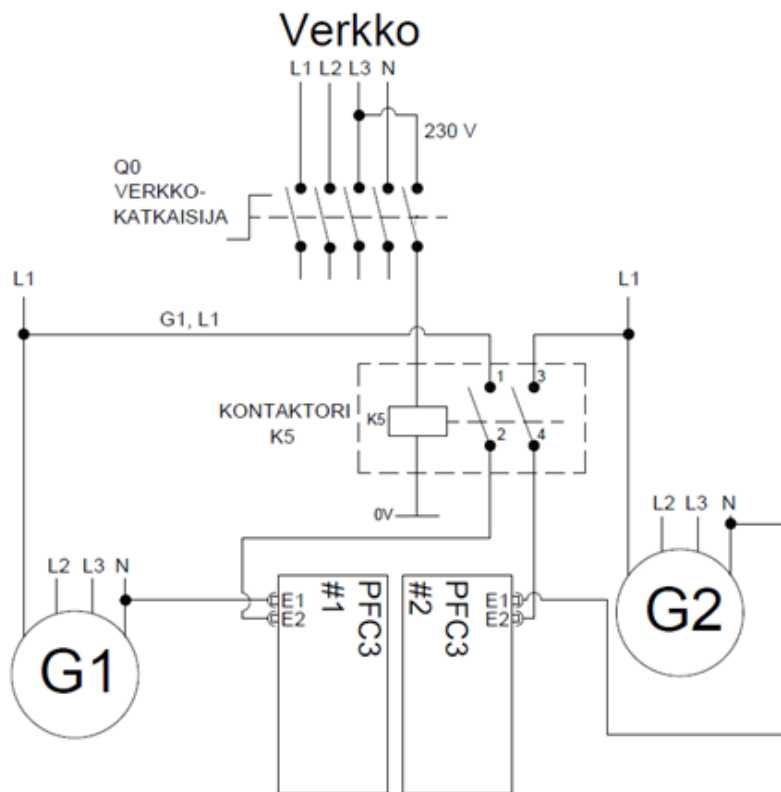
6.2.1 Jännitesyöttö E1 ja E2 kontaktoriohjauksella

PFC3 -säätimien E1 ja E2 -liittimet tuli kytkeä generaattorien ensimmäisen vaiheen ja nollan välille kytkentäkuvan 31 mukaisesti. Tämän generaattorilaitteiston tapauksessa tuli ottaa huomioon myös saarekekäytön mahdollisuus, joten tähän välille tarvitaan tieto verkkokatkaisijan asennosta. Tämä toteutettiin opinnäytetyössä kontaktoriohjauksena kontaktorin K5 avulla, joka ilmenee liitteestä 1 ja kuvista 32 ja 33. Tehosäädin saa siis syöttönsä vasta, kun generaattorit on tahdistettu ja verkkokatkaisija suljetaan. Saarekekäytössä jännitesovitus ei ole lainkaan käytössä.



KUVA 32. Kontaktoriohjaus, kuva asennustilanteesta

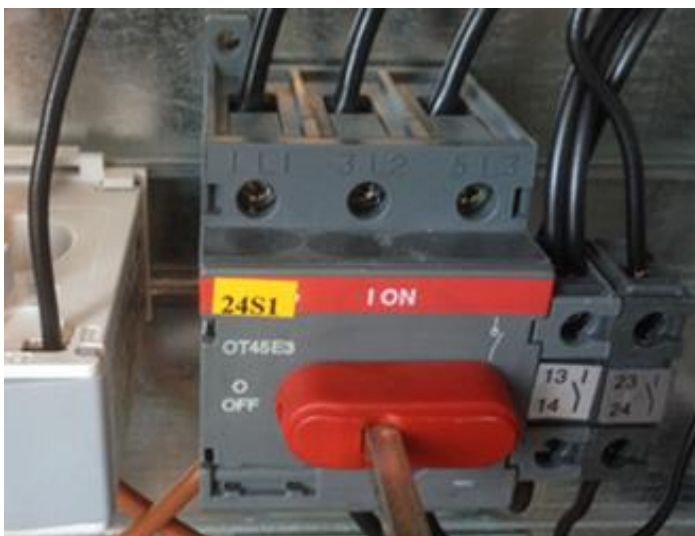
Kuten kuvasta 33 nähdään, kontaktorin kela vetää vasta verkkokatkaisijan sulkemisen jälkeen. Tämän myötä koskettimet sulkeutuvat ja tehosäätimen jännitesyöttöpiiri E1-E2 saa syöttönsä generaattorien ensimmäisestä vaiheesta tehosäätimien toimintaa varten. Alkuperäisistä asennuskuvista etsittiin siis sopivat potentiaalit syöttöä varten, jotka johdettiin kontaktorin kautta riviliittimille. Näiltä johdotukset lähtivät alakertaan generaattoritilaan tehosäätimille.



KUVA 33. Kontaktorin kytkentä- ja toimintaperiaate

6.2.2 Katkaisijatiedot CB1 ja CB2

CB1 ja CB2 –katkaisijat tuli liittää osaksi generaattorien omia OT45E3-katkaisijoita apukoskettimien avulla (kuva 34), jotta tehosäätimet saavat tiedon generaattorikatkaisijan asennosta. Nämä johdotettiin myös riviliittimien kautta alakertaan.



KUVA 34. Generaattorikatkaisija apukoskettimilla, kuva asennustilanteesta

6.2.3 Jännitteen sovitus (Voltage Matching)

PFC3 sisältää myös toiset valinnaiset sisääntuloliitännät (L1 ja L2) jännitesignaalia varten. Säätimelle voidaan tuoda tieto kokoojakiskon jännitteestä. Tätä varten säätimien ja kokoojakiskon väliin tuli kytkeä suojaerotusmuuntaja, jonka jännitetaso on noin 110 VAC. Erotusmuuntajaksi valittiin Block-nimisen valmistajan 60 VA –muuntaja, jonka tulojännite on 230 VAC ja lähtöjännite 2x115 VAC (kuva 35). Suojaerotusmuuntajan toisioin johtimet vietiin myös riviliittimien kautta alakertaan säätimille. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 11–12)



KUVA 35. Suojaerotusmuuntaja, kuva asennustilanteesta

Mikäli jännitesovitus on käytössä, kiskojännitteen ja generaattorijännitteen erosignaalin tieto menee tehosäätimen päävertailijalle, jonka toimesta jännitesäätäjän asetusarvo muuttuu vastaamaan automaattisesti kiskojännitettä (kuva 28). Tämä lisäominaisuus tuli asentaa käyttöön SELCO:n automaattista tahdistuslaitteistoa varten. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 11–12)

6.3 Generaattoritilan kytkennät

Yläkerran riviliittimiltä johtimet kulkivat alakertaan generaattoritilaan kahdelle sähkökaapille, jossa generaattorien kytkennät sijaitsevat. Tällainen keskus on esitetty kuvassa 36. Tehosäätimet kiinnitettiin näiden kaappien takapuolelle koteloituina.



KUVA 36. Vasemmalla generaattorin 1 taajuusmuuttaja ja oikealla sähkökaappi, jossa sijaitsevat kyseisen generaattorin kytkennät.

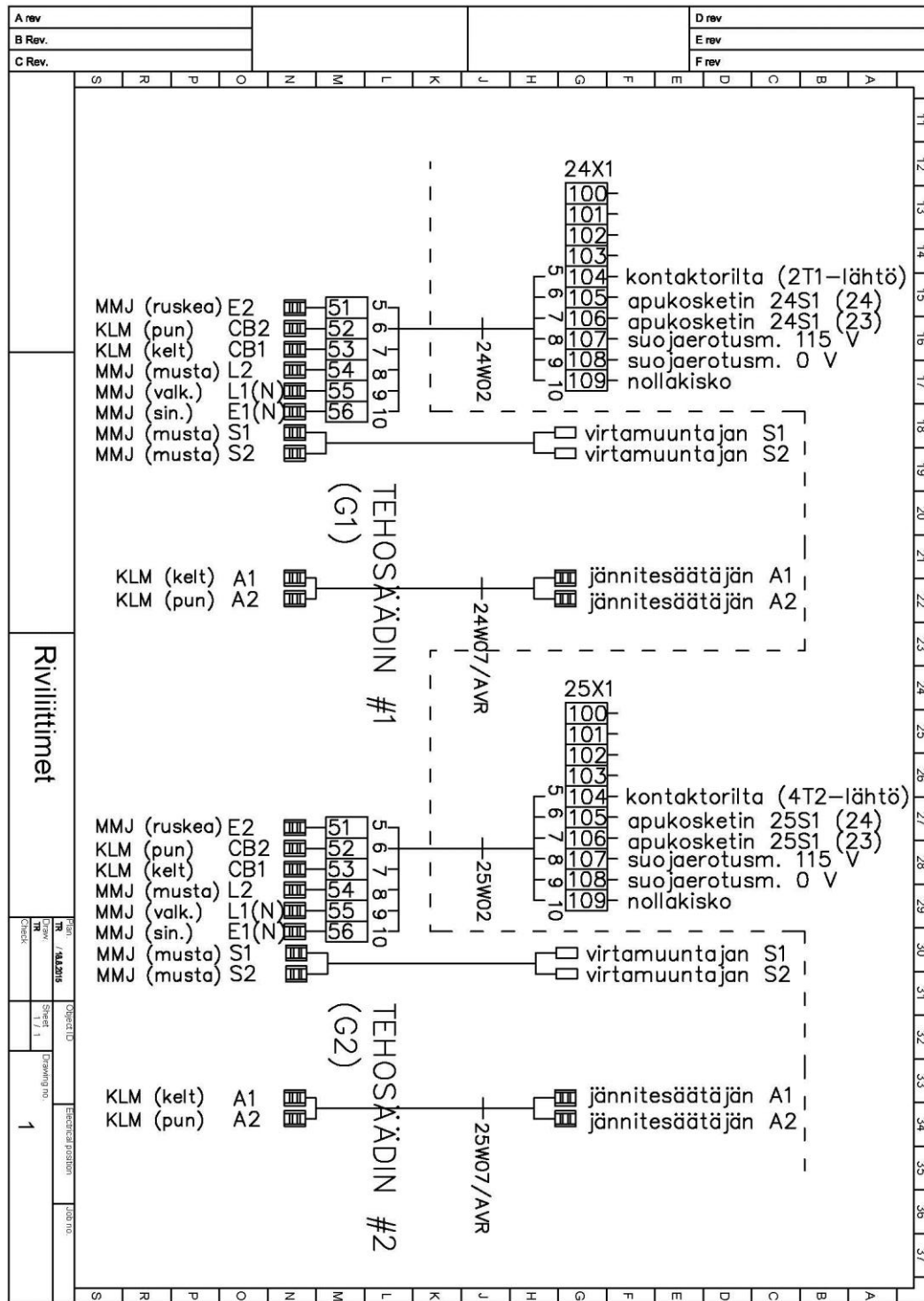
6.3.1 Riviliitinkytkennät

Yläkerrasta tuli yhteensä kuudelta johtimelta tiedot tehosäätimelle (CB1, CB2, E1, E2, L1 ja L2). Näitä varten molempiin kaappeihin asennettiin ylimääräiset riviliittimet, johon nämä signaalit tuotiin ja vietiin siitä edelleen PFC3-tehosäätimille lattaliittimillä (kuva 37).



KUVA 37. Riviliittimet, josta kytkennät vietiin tehosäätimelle.

Kytkennot tehosäätimille vietiin sekä KLM että MMJ-kaapeleilla. MMJ-kaapelia käytettiin suojaerotusmuuntajan ja jännitesyötön liitäntöjen kanssa. KLM on PVC-eristeinen ja PVC-vaipattu merkinantokaapeli. (Nexans, 2015) Laadin tehosäätimien kytkemisestä kuvan 38, josta käy ilmi johtimien värit ja riviliittimen numerot. Katkoviihvalla on merkitty kerrosten välinen raja.



KUVA 38. Riviliittimet ja johtimet, kytkentäkuva.

6.3.2 Virtamuuntajakytkennät S1 ja S2

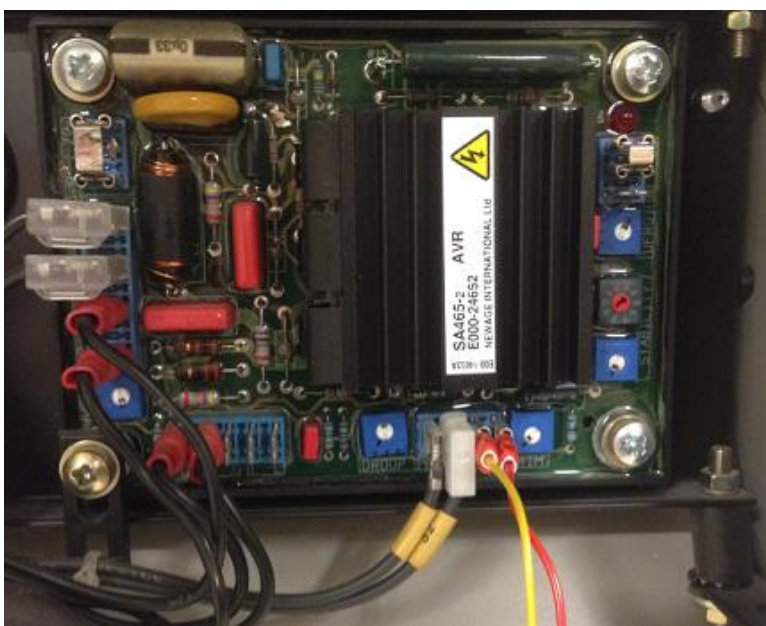
Tehosäätimien S1 ja S2 –virtasisäätulot asennettiin puolestaan kuvan 39 mukaisten 5 A:n virtamuuntajien toisioihin, joiden ensiöt ovat yhteydessä generaattorien ensimmäisiin vaiheisiin (kuva 31). Virtamuuntajat asennettiin generaattoreiden sähkökaappeihin ja toision johdotukset vietiin tehosäätimille.



KUVA 39. Virtamuuntaja CTD-1X.50.5A.XXX, kuva asennustilanteesta

6.3.3 Jännitesäätäjän ja tehosäätimen väliset kytkennät

A1 ja A2 -liittimet kytkettiin jännitesäätäjän vastaaviin liittimiin KLM-kaapelilla. Näin muodostetaan säätöyhteys tehosäätimen ja jännitesäätäjän välille (kuva 40).



KUVA 40. Jännitesäätäjän ja tehosäätimen välinen kytkentä KLM-kaapelilla

6.3.4 Valmis asennus

Kuvassa 41. on esitetty toinen tehosäätimistä asennettuna paikoilleensa koteloituna. Kotelointi kiinnitettiin paikoilleen kuitenkin vasta käyttöönoton jälkeen, koska sen yhteydessä tulee säätää vielä osaa tehosäätimen potentiometreista. Käyttöönoton ohjeistus on kuvattu tarkemmin kappaleessa 7.



KUVA 41. Tehosäädin koteloituna ja asennettuna paikoilleensa

7 KÄYTTÖÖNOTON OHJEISTUS

Varsinaista testausta ja laitteiston käyttäytymistä tehosäätimien asentamisen jälkeen ei sisällytetty kuitenkaan lopulta tähän opinnäytetyöhön. Laadin kuitenkin käyttöönnoton ohjeistuksen alkuperäisen tehosäätimen käyttöohjeen pohjalta.

7.1 Esivalmistelut

Ennen PFC3 -tehosäätimen käyttöönottoa tulee varmistaa, että jännitesovitusmuuntaja on suojaerotettu. Trim-säätö tulee puolestaan olla 0 % eli käännettynä vastapäiväiseen ääri-asettoon, joka tarkoittaa sitä, että tehosäädin ei vaikuta lainkaan jännitesäätäjän toimintaan. Jännitesäätäjän Droop- eli jännitejäykkyystoimintoa ei tarvitse tässä tapauksessa muuttaa, koska se on jo tehty aikaisemmin generaattorilaitteiston hankinnan yhteydessä. Käyttöönnotto-ohjeissa olisivat tarvittavat ohjeet sen optimoimiseksi, mikäli jännitesäätäjä ei olisi valmiiksi konfiguroitu. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 26-27)

Tehosäätimessä PF/VAR -potentiometri tulee olla keskiasennossa 50 % sekä ILIM-, GAIN, GAIN ja BAND asennoissa 0 %. Lisäksi käytössä tulee olla dynaaminen säätötapa ja oikea käyttöjännite. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 27)

Käyttöohjeen mukaisesti automaattiselle tahdistuslaitteistolle suositellaan seuraavia asetusarvoja (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 16):

- Generaattorin taajuuden vastaamattomuus 0,1 Hz
- Taajuuden säädön muutos 0,1 Hz/s maksimi
- Jännitteen vastaamattomuus $\pm 3\%$
- Katkaisijan sulkeutumiskulma ± 10 astetta
- Yli- ja alijännitesuojaus.

7.1.1 Jännitesäätäjän droop-asetukset

Ensimmäiseksi generaattori viedään nimellisnopeuteensa ja tahdistetaan verkkoon tarkkailemalla samalla ulostulojännitettä. Kun tahdistus on suoritettu onnistuneesti, kuorma tulee nostaa noin puoleen. Tällöin tehokertoimen tulisi pysyä lähellä yhtä. Jännitesäätäjän

S1 ja S2 -liittimien jännite-ero mitataan talteen, jotta voidaan määrittää optimiasento jännitesäätäjän droopille käyttöohjeen kaavan mukaisesti. Tässä tapauksessa generaattoreiden jännitesäätäjät olivat kuitenkin jo valmiiksi asennettu ja konfiguroitu, joten niihin ei tarvitse puuttua. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 27)

7.1.2 Tehosäätimen asetukset

Kun jännitesäätäjän droop-asetusarvo on kunnossa, tulee varmistaa, että säätäjän TRIM-asetus on 0 % eli käännettynä vastapäiväiseen ääriasentoon. Tämän jälkeen generaattori viedään nimellisnopeuteensa. Seuraavaksi tulee tarkistaa, että jännitesäätäjä antaa liitinjännitteen, joka vastaa ± 1 % tavoiteltua kiskojännitettä. Asetusta on mahdollista korjata jännitesäätäjän AVR VOLTS –potentiometrillä.

Lisäksi tulee varmistaa, että tehosäätimen L1 ja L2 –liittimissä jännite on väliltä 99-121 V. Myöskään katkaisijamerkkivalo (CB LED) ei saa tässä vaiheessa vielä palaa, koska generaattorikatkaisijaa ei ole suljettu eikä tahdistusta suoritettu. Jännitteensovitusledin (VMAT LED) tulee palaa, jotta voidaan varmistua, että kyseinen ominaisuus on käytössä.

Tämän jälkeen jännitesäätäjän TRIM-potentiometri säädetään hitaasti noin 30 prosenttiin. Tämän seurauksena generaattorijännite asettuu uuteen arvoonsa. Tehosäätimen BUSV-potentiometrillä säädetään generaattorin liitinjännite vastaamaan 2 %:n tarkkuudella verkkojännitettä. Seuraavaksi jännitesäätäjän TRIM asetetaan täysin ääriasentoon eli sataan prosenttiin ja BUSV säädetään uudestaan kuntoon vastaamaan prosentin tarkkuudella verkkojännitettä.

Tämän jälkeen generaattori pysäytetään ja käynnistetään uudestaan. Tahdistus suoritetaan normaalisti ja varmistetaan, että tehosäätimen CB-merkkivaloledi osoittaa, että katkaisija on suljettu. Näin saadaan varmistettua, että kytkentä generaattorikatkaisijan kanssa on tehty oikein. (Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 28) Tämä käyttöönotto-ope-raatio tulee suorittaa molemmille tehosäätimille erikseen. Tämän jälkeen käyttöönotto on valmis.

7.2 Tehosäätö käytännössä

Kuten aikaisemmissa kappaleissa on mainittu, tehosäätimellä on useita eri säätötapoja. Käyttönoton jälkeen säädetään haluttu tehokerroin käyttämällä tehosäätimen PF/VAR – potentiometriä. Keski-asennossa tehokerroin vastaa nimellistä. Vastaavasti vastapäivään suunnattuna se on tarkoitettu induktiivisemmalle kuormalle, jolloin virta on jäljessä jännitettä ja myötäpäiväisessä asennossa kapasitiiviselle kuormalle eli tällöin virta on vastaavasti jännitettä edellä.

Käyttöohjeen suositeltu asetusarvo on 0,8 -1,0 tehokerroin, jolloin virta on jännitettä jäljessä (*lagging power factor*). Potentiometrille sopiva asento löytyy kokeilemalla, koska tehokerroin on sovellutuskohmainen. Käytettäessä vastealuesäätöä, tulee lisäksi kaistanleveys ja säädön voimakkuus säätää kohdilleen.

8 POHDINTA

8.1 Työn onnistuminen

Opinnäytetyö osoittautui varsin haastavaksi, eikä itse tahtigeneraattorimaailma ollut kovinkaan tuttu opinnäytetyötä aloittaessa. Erityisesti erinäiset laitehankinnat viivästyttivät työntekoa paljon. Tehosäätimet tuli tilata Norjasta ja lisäksi niille tuli mm. myös teetättää omat kotelot, joilla ne saatiin kiinnitettyä osaksi generaattorikonaisuutta. Tein opinnäytetyön pääasiassa kesällä ja tämäkin osittain hidasti opinnäytetyön etenemistä, koska tavaroiden toimitusajat olivat pitkiä ja jouduin ottamaan huomioon esimerkiksi TAMKin henkilöstön kesälomat, koska koko työtä ei voinut tehdä täysin itsenäisesti.

Asennukset aiheuttivat myös oman haasteensa, koska itsellä ei hirveästi kokemusta ollut sähköasentamisesta. Itse kytkentä osoittautui kuitenkin suhteellisen suoraviivaiseksi, kunhan alkuperäisen generaattorilaitteiston piirustukset tulivat tutummiksi. Generaattorilaitteisto on iso kokonaisuus, joka koostuu monesta eri laitteesta, joten selvitystyötä tuli tehdä paljon.

Myöskään laitteiston alkuperäisen epävakaisuuden syyt eivät olleet täysin tiedossa, koska generaattorilaitteiston käyttöönotto oli aikoinaan jäänyt vähän puolitiehen erinäisistä syistä. Ongelmaa päätettiin kuitenkin lähestyä PFC3 –tehosäätimien avulla, koska vika ei ollut tahdistamisessa vaan tehosäädössä.

Koska laitehankinnat ja asentaminen veivät lopulta paljon aikaa, itse laitteiston testausta ei sisällytetty tähän opinnäytetyöhön ja se olisi lisännyt työn laajuutta entisestään. Omasta mielestäni opinnäytetyö on kuitenkin melko hyvin onnistunut ja tästä on hyvä jatkaa kohti lisäselvityksiä tahdistuslaitteiston toiminnan parantamiseksi ja sen saattamiseksi opetus- käyttöön sopivaksi.

8.2 Kehitysmahdollisuudet ja lisäselvitykset

Mikäli laitteisto ei toimisi tehosäätimien asentamisen jälkeen odotetulla tavalla, koetin pohtia muutamia mahdollisia lisäselvitystä vaativia asioita. Jännitesäätäjä olisi hyvä parametroida uudelleen, mikäli sen asetteluissa on jotain alun perin tehty väärin ja tämän jälkeen tehdä tehosäätimille uusi käyttöönotto. Myös alkuperäisessä generaattorilaitteistossa saattaa mahdollisesti olla jokin asennusvirhe, joka aiheuttaa laitteiston epästabiilin tilan.

Kuten jo aikaisemmin totesin opinnäytetyössäni, toinen mahdollinen ratkaisu saattaisi olla taajuusmuuttajan parametointi uudelleen, sekä tarkemman nopeusohjeen antaminen voimakoneille. Myös tehosäätimien manuaalissa mainittuja muita sovellustapoja voisi kokeilla ja selvittää miten tahdistuslaitteisto käyttäytyy niissä. Tämä tosin vaatisi tehosäädinkytkenän muuttamista uudelleen.

LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. 2007. 17 Moottorit ja generaattorit.

Ahokas, T. 2011. Voimalaitosgeneraattorien suojaus ja magnetointi. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkövoimatekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Aura, L. Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. 1. painos. Porvoo: WSOY.

Aura, L. Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6. painos. Porvoo: WSOYpro Oy.

Cummins Generator Technologies Ltd. 2013. Luettu 3.3.2015. Power Factor Controller, Installation and adjustments manual.

https://www.cumminsgeneratortechnologies.com/www/en/common/pdfs/manuals/pfc/A044C192_PFC_EN.pdf

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. 6. painos. Helsinki: Ota-tieto.

Haarla, L. 2014. S-18.3200 Sähkönsiirtojärjestelmät 1 Luennot: Kulmastabiilius, taajuusstabiilius, roottorin nopeusstabiilius. Luentokalvot. Luettu 6.3.2015.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hydro One Networks Inc. 2010. Technical Interconnection Requirements For Distributed Generation. Luettu 4.6.2015.

http://www.hydroone.com/Generators/Documents/Feed-In%20Tariff/microFIT_TIR_for_Distributed_Generation.pdf

Iltchov, I. 2012 Dieselgeneraattorin jännitesäätäjän koestuslaitteiston suunnittelu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkövoimatekniikka. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. SÄHKÖKONEET, osa2. Luettu 5.3.2015.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Lana, A. 2009. Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliityntä. Sähkötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Megacon. KRV43B -datasheet.

http://www.megacon.com/admin/uploads/Datasheet/Datasheet_KRV43B.pdf

Newage AVK SEG. 2003. SA465 Automatic Voltage Regulator (AVR) Specification, Installation And Adjustments.

Nexans. 2015. KLM-kaapeli.

http://www.nexans-fi.com/eservice/Finland-fi_FI/navigate-product_540149090/KLM_2x0_8.html

Reinert, D. 2006. Protective Relaying For Power Generation Systems. Taylor & Francis Group.

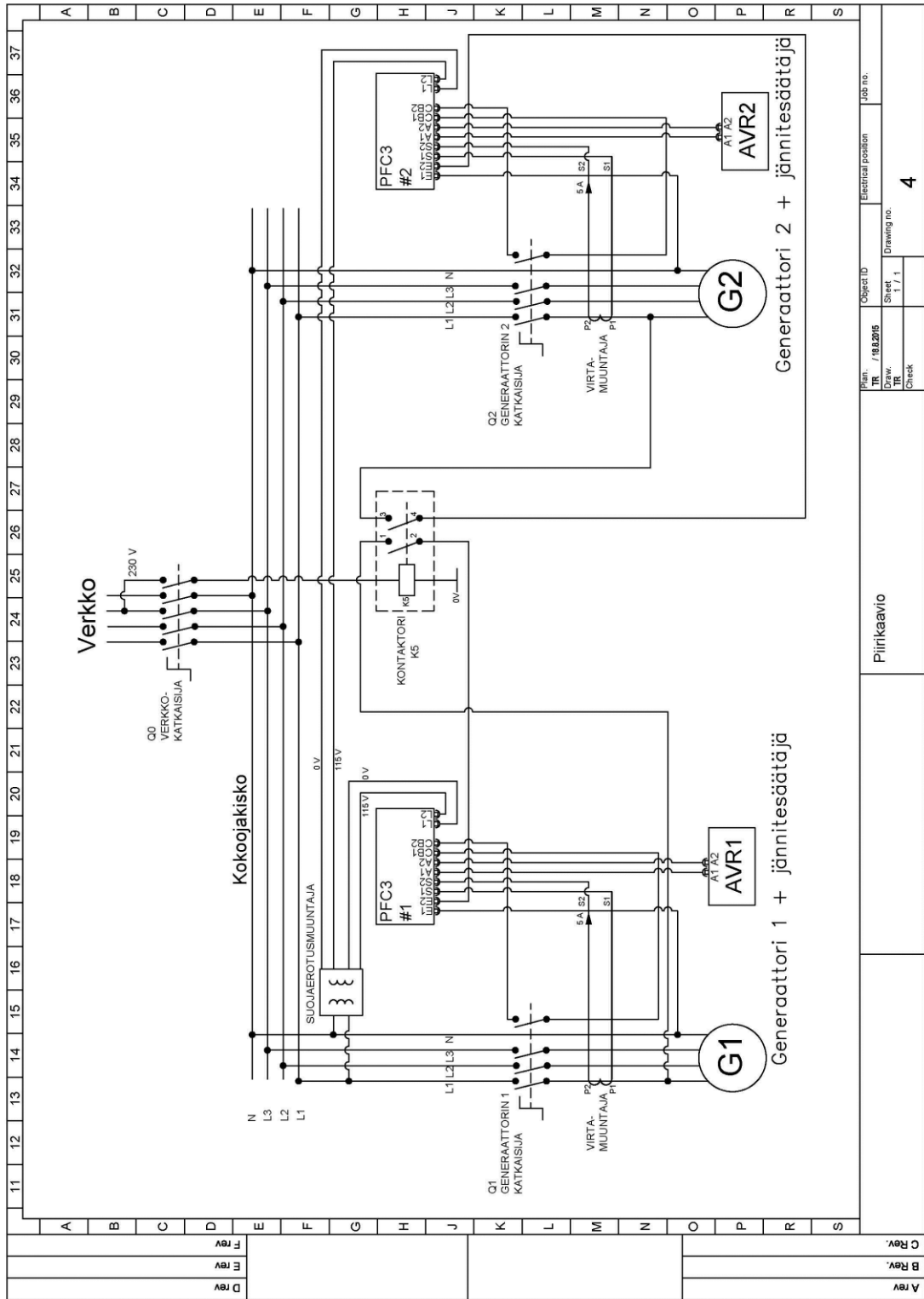
Selco. T4500 Auto Synchronizer -käyttöohje. Luettu 12.5.2015.
http://www.dijkman.com/bestanden/bijlagen/t4500_data_sheet.pdf

Thomson, M. 2010. Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Luettu 18.4.2015.

VEM motors. 2009. Low voltage asynchronous motors Marine motors. Special catalogue 01-2009. Luettu 17.3.2015.
http://www.vem-group.com/fileadmin/content/pdf/Download/Kataloge/Kataloge/schiff_spez_0109_en.pdf

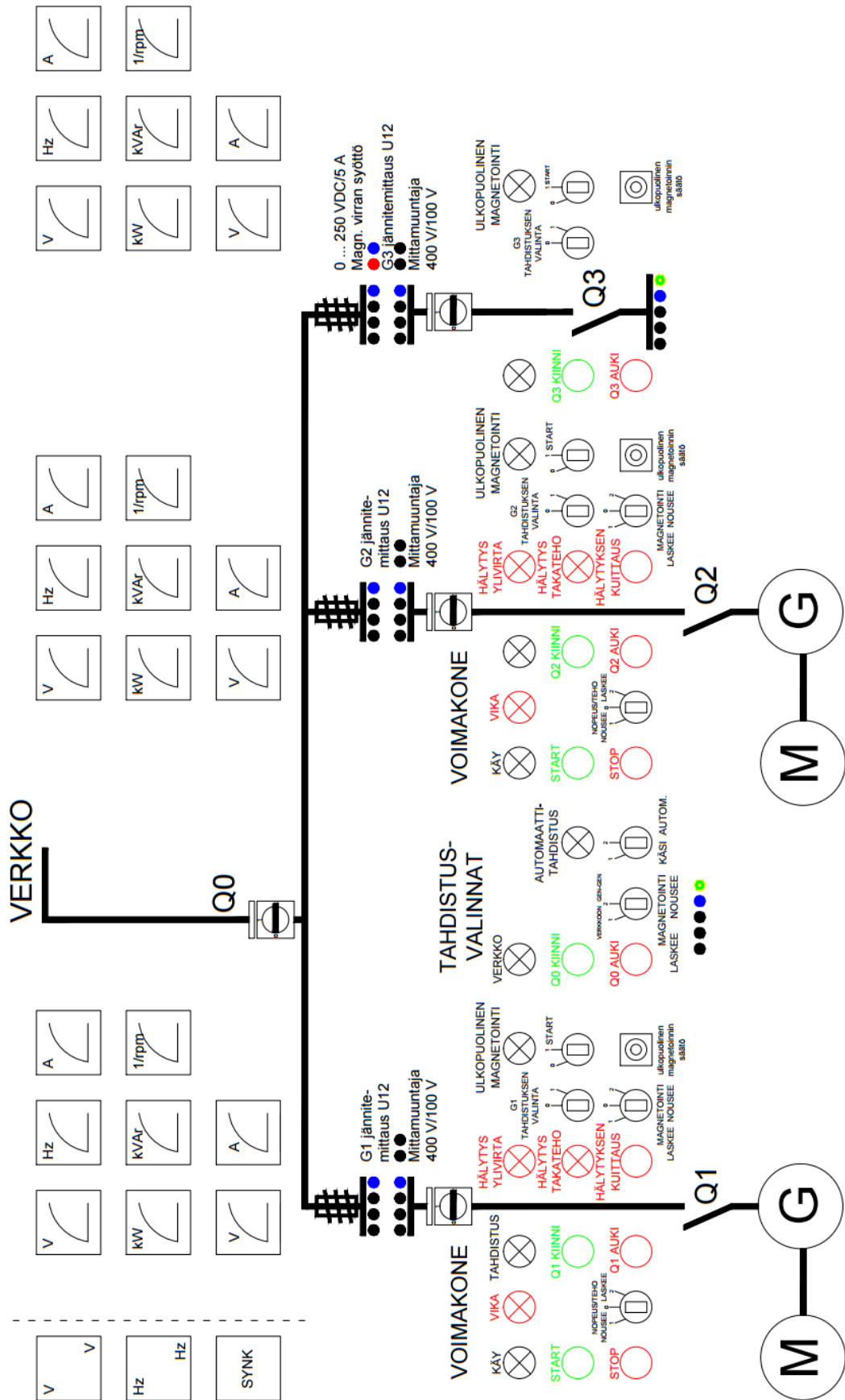
LIITTEET

Liite 1. Tehosäätimien asennukseen laadittu piirikaavio



Plan: TR / 18.8.2015	Object ID	Electrical position	Job no.
Draw: 1 / 1	Sheet	Drawing no.	
Check			4
Piirikaavio			

Liite 2. Käyttöpaneelin toiminnot

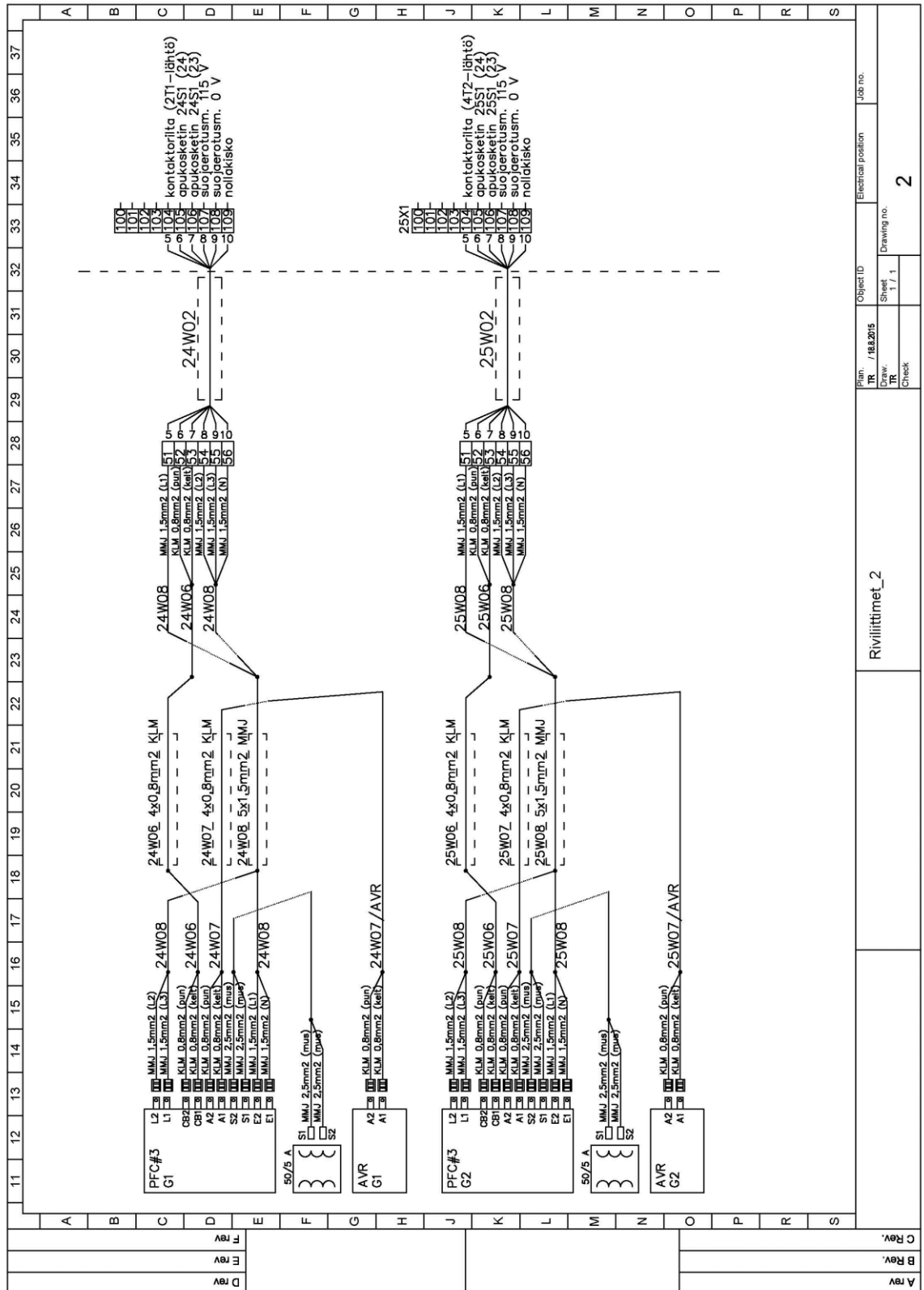


Liite 3. PFC3-tehosäätimen tiedot

Specification		Data
Input voltage (50-60Hz)		120 range 98-146VAC 5VA
		220 range 175-267VAC 5VA
		240 range 191-292VAC 5VA
		277 range 221-337VAC 5VA
Input current	PF/VAR sensing	5A CT 2.5VA
	Current Limit	330mA CT 2.5VA
Voltage matching input		110v ac \pm 10%
		5 vA nominal
Low excitation limit input		150 VDC Max
AVR control range (A1 A2)		\pm 3 VDC
Power Factor setting range (PF)		0.7 lag to 0.7 lead (see note 1)
Remote PF setting potentiometer value		10K ohms 1 watt
Reactive current setting range (VAR) generate/absorb		0-100% gen. current (see note 1)
Low excitation limit range		2-8 VDC
Current limit range		70-100% gen. current
Control accuracy	VAR	\pm 5% (see note 2)
	Power Factor	\pm 0.05 pf
	Voltage matching	\pm 2%
Reponse time constant		4 seconds
Generator output voltage limiting range		\pm 5% to \pm 15%
Environmental	Vibration 20-100 Hz	50 mm/s
	100-2 kHz	3.3 g
	Relative humidity	0-60 °C 95%
	Operating temperature	-40 to +70 °C
	Storage temperature	-55 to +80 °C

(Cummins Generator Technologies Ltd., 2013, 45)

Liite 4. Kytkentäkuva asentamista varten



Riviliittimet_2

Job no.

Electrical position

Drawing no.

Sheet

71822015

Plan.

DR

DR

Check

1.1.1

2

AVR

B Rev.

C Rev.