

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

DIPLOMITYÖ

PIENITEHOISEN CHP-LAITOKSEN VERKKOONLIITYNTÄ

Diplomityön tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, TkT Tuomo Lindh

Diplomityön ohjaaja: TkT Tuomo Lindh

Lappeenrannassa 29.1.2008

Andrey Lana
Aivinakuja 5C 13
54110 Lampikangas
puh. 0442868705

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla osana PAKU-projektia. Projektin ovat rahoittaneet Tekesin Densy teknologiaohjelma, Lappeenrannan kaupunki sekä mukana olevat yritykset. Kiitän rahoittajia, jotka taloudellisesti mahdollistivat tämän työn tekemisen.

Haluan kiittää työni tarkastajia ja ohjaajia, professori Juha Pyrhöstä ja tekniikan tohtori Tuomo Lindhiä kannustuksesta ja asiantuntevista ohjeista.

Sähkötekniikan osastolle kiitokset mahtavasta työympäristöstä ja rennosta ilmapiiristä.

Lopuksi vielä erityiskiitokset vaimolleni Irinalle, pojalleni Leolle ja vanhemmille tuesta ja kannustuksesta.

Lappeenrannassa 29.1.2008

Andrey Lana

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

LIITELUETTELO

1.	JOHDANTO.....	11
1.1	TAUSTA	11
1.2	TYÖN TAVOITTEET	11
1.3	PAKU-CHP-VOIMALAITOS	12
1.4	TEHTÄVÄN RAJAUS JA MENETELMÄT.....	13
1.5	TYÖN RAKENNE	14
2.	GENERAATTORILAITTEISTOT	16
2.1	TAHTIGENERAATTORI	16
2.1.1	Tahtigeneraattorin pätötehon säätö.....	24
2.1.2	Tahtigeneraattorin loistehon säätö.....	25
2.2	EPÄTAHTIGENERAATTORI	28
2.3	TAAJUUSMUUTTAJA.....	31
3.	VERKKOONLIITYNNÄN SUOSITUKSET, STANDARDIT JA VAATIMUKSET.....	34
3.1	SUOSITUKSET JA STANDARDIT	34
3.2	HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJAUS.....	35
3.3	SÄHKÖN LAATUVAATIMUKSET HAJAUTETUN TUOTANNON VERKKOON LIITTÄMISESSÄ	38
3.4	OHJEET VOIMALAITOKSEN VERKKOONLIITYNNÄLLE	43
4.	PAKU-CHP-VOIMALAITOKSEN LIITÄMINEN JAKELUVERKKOON	47
4.1	SUORAAN VERKKOON KYTKETTY GENERAATTORI	48
4.1.1	Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori	49
4.1.2	Kestomagneettitahtigeneraattori.....	51
4.1.3	Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori	53
4.2	VERKKOVAIHTOSUUNTAAJAN AVULLA VERKKOON KYTKETTY GENERAATTORI	55
4.3	SUOJAUS	57
4.3.1	Ensiösuojaus.....	57
4.3.2	Toisiosuojaus ja toiminta häiriö-/laitevikatilanteissa	60
5.	VERKKOONLIITYNTÄLAITTEISTO	61
5.1	LAITOSAUTOMAATIO	62
5.2	SYNKRONOINTILAITE	64
5.3	SUOJARELEET	65
5.4	MITTAMUUNNIN	67
5.5	GENERAATTORIYKSIKÖN SÄÄTÖLAITTEET	67
5.6	SÄÄTIMIEN OHJAUS.....	68
5.7	KATKAISIJAT	70
5.8	KOMPENSOINTIPARISTO	70
5.9	TAAJUUSMUUTTAJA.....	72
5.10	JÄNNITTEENSÄÄDIN	72
5.11	NOPEUDENSÄÄDIN	73
6.	VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO	75
6.1	TAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION TOTEUTUSVAIHTOEHTOJA.....	81

7.	VERKKOONLIITYNTÄAUTOMAATION KUSTANNUKSET.....	86
8.	YHTEENVETO.....	89
	LÄHTEET JA VIITTEET	90

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Sähkötekniikan osasto

Andrey Lana

Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliityntä

Diplomityö

2008

91 sivua, 37 kuvaa, 12 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkistajina professori Juha Pyrhönen ja TkT Tuomo Lindh

Hakusanat: verkkoonliityntä, automaatio, CHP-laitos

Keywords: connection to grid, automation, CHP-plant

Työn tavoitteena on pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliitynnän suunnittelu. Laitos polttaa Einco Oy:n CFB-kuivurissa (Circulating fluidized-bed) termisesti kuivattua lietettä hönkäkaasujen kanssa Einco Oy:n CTC-reaktorissa (Constant temperature combustion). CFB-kuivuri ja CTC-reaktori on kytketty höyryvoimalaitosprosessiin, jonka turbogeneraattorista saadaan sähköenergiaa.

Työssä on tutkittu nykypäivän hajautetun tuotannon pienvoimalaitoksen verkkoonliitynnän suojausvaatimuksia, sähkönlaatuvaatimuksia, suosituksia ja mahdollisen verkonhaltijan ohjeita sekä generaattorilaitteistojen ominaisuuksia. Generaattorilaitteistot ovat vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tai itsemagnetoitu tahtigeneraattori, kestopalettitahtigeneraattori tai verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori. Lisäksi on tarkasteltu ja vertailtu generaattorilaitteistojen verkkoonliitynnässä tarvittavien eri automaatiolaitteiden ominaisuuksia. Verkkoonliitynnät on suunniteltu 400 kW generaattorilaitteistovaihtoehdoille kahdella tavalla: suoraan verkkoon kytkettynä ja taajuusmuuttajalla verkkoon kytkettynä.

Työn päätuloksia ovat suunnitellut sähköliittymät sekä suojaus- ja ohjauspiirit, ensiö- ja toisiosuojaukset, toteutustason piirustukset ja automaation toimintaselostus. Lisäksi suunnitelluille automaatiokokoonpanoille on laskettu hankintakustannukset. Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty suoravetoturbogeneraattori on todettu teknisesti ja taloudellisesti toimivaksi.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Department of electrical engineering

Andrey Lana

Connection to grid of small sized CHP-power plant

Master's thesis

2008

91 pages, 37 figures, 12 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen, D.Sc. Tuomo Lindh

Keywords: connection to grid, automation, CHP-plant

The research goal is to design the connection of a low power sludge treatment CHP power plant to electricity network. The CHP power plant consists of: Einco Oy's CFB dryer (circulating fluidized bed), Einco Oy's CTC reactor and turbo generator.

The power plant's electric systems and control equipment must be designed for stable operation with network and the electricity quality must satisfy the requirements of the network provider. In the beginning of the project today's network providers' equipments, recommendations and electricity quality demands have been analyzed and the results are used in the design process.

Two types of network interfaces have been designed. One connects a turbo generator running at constant speed to the network directly; the other connects a variable speed turbo generator by using frequency converters. The generator types used were the synchronous generator, asynchronous high-speed generator and permanent magnet generator. Every design option includes: main circuits, electric wiring, drawings, primary and secondary protection, automation equipment and operation instructions. Also prime costs for different network interfaces were calculated and asynchronous high-speed generator connected to the network by using frequency converter is found to be a technically and economically feasible.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

E	sähkömotorinen voima
e	sähkömotorisen voiman vektori
f	taajuus
I	virta
i	virtavektori
P	pätöteho
L	induktanssi
Q	loisteho
R	resistanssi
S	näennäisteho
t	aika
U	jännite
u	jännitevektori
X	reaktanssi
δ	tehokulma
φ	tehoerroinkulma
ω	kulmanopeus
ψ	käämivuo
Ψ	käämivuovektori

Alaindeksit

d	pitkittäissuuntainen
k	oikosulku
max	suurin
F, m	magnetointi

N, n	nimellinen
q	poikittaissuuntainen
v	verkon
g	generaattorin
lt	pitkäaikainen
st	lyhytaikainen
s	staattorin

Lyhenteet

CHP	combined heat and power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
TEKES	teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus
DENSY	distributed energy systems, hajautetut energiajärjestelmät
CFB	Circulating fluidized-bed, kiertoileijupoltto
CTC	Constant temperature combustion, vakiolämpötilapalaminen
IPSEpro	Integrated Project Support Environment
rpm	rotations per minute, kierrosta minuutissa
smv	sähkömotorinen voima
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
PWM	Pulse-width modulation, Pulssinleveysmodulaatio
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (International Council on Large Electric Systems)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (European Committee for Electrotechnical Standardization)
SENER	Sähköenergialiitto ry
HELEN	Helsingin Energia
ROCOF	Rate of Change of Frequency (islanding detection method for decentralized generation units), taajuusderivaattaan perustuva yksinsyöttö tilanteen tunnistamismenetelmä

LoM	Loss of Mains, eroonkytkentäsuojaus
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärökerroin.
YSE	yksinään syötön estosuojaus
CPU	Central Processing Unit
EM	Expansion Module
RTD	Resistance temperature detector
PLC	Programmable Logic Controller, Ohjelmoitava logiikka
AVR	Automatic Voltage Regulator
Digipot	digital potentiometer
DI, DO	Digital Input/Output, Digitaalinen Tulo/Lähtö
AI, AO	Analog Input/Output, Analoginen Tulo/Lähtö

LIITTEET

Liite I: Prosessimalli

Liite II: Automaation toimintaselostus (lyhennelmä)

Liite III: Kaaviot (lyhennelmä)

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

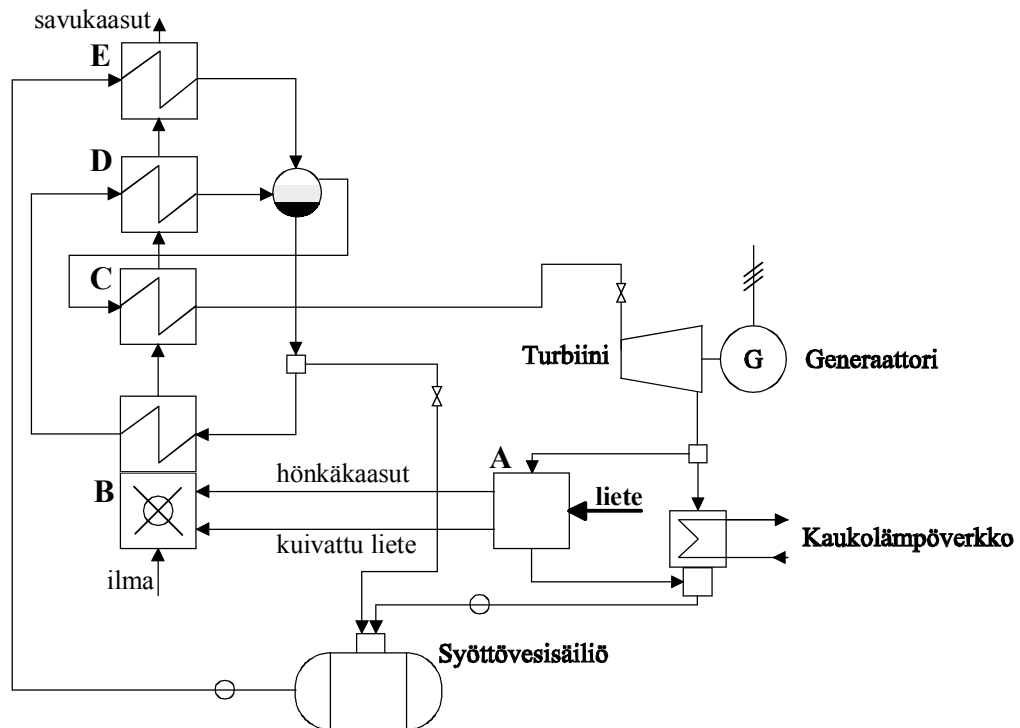
Työ on tehty osana ”PAKU - Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdiskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos” tutkimushanketta. Hanke tähtää yhdiskunnan sivuainevirtojen hyödyntämiseen hajautetussa energiantuotannossa ja puhdistamoliet- teiden käsittelyyn liittyvien ongelmien ratkaisuun. Hanke kuuluu TEKESin DENSITY- teknologiaohjelmaan ja muodostuu yliopiston tutkimushankkeesta ja rinnakkaisesta yri- tyshankkeesta. Tutkimuksen tarkoituksena on soveltaa poltto- ja voimalaitostekniikkaa yhdiskunnan sivuainevirtojen hyödyntämiseksi sähkön ja lämmön yhteistuotannossa pienitehoisessa CHP-laitoksessa.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliittynnän suunnittelu. Suun- nittelun tuloksia on tarkoitus käyttää pilottilaitoksen liittämiseksi jakeluverkkoon. Työs- sä tutkitaan nykypäivän hajautetun tuotannon pienvoimalaitoksen verkkoonliittynnän suojausvaatimuksia ja -suosituksia. Niiden mukaisesti suunnitellaan verkkoonliittynät kahdelle eri generaattorilaitteistovaihtoehdoille: suoraan verkkoon kytkettynä ja taa- juusmuuttajalla verkkoon kytkettynä. Tutkitaan generaattorilaitteistojen säätöomina- isuuksia ja säätömahdollisuuksia, ja niiden ohjaukseen tarvittavaa automaatiota. Määri- tellään automaation toimilaitteet ja verrataan eri laitteiden ominaisuuksia. Suunnitelluil- le automaatiokokoonpanoille lasketaan hankintakustannukset ja vaihtoehdoista pyritään löytämään teknisesti ja taloudellisesti toimivin. Työn päätuloksia ovat suunnitellut säh- köliittymät sekä suojaus- ja ohjauspiirit, ensiö- ja toisiosuojaukset, toteutustason piirus- tukset ja automaation toimintaselostus.

1.3 PAKU-CHP-voimalaitos

PAKU-CHP-voimalaitos on rakenteeltaan yksinkertainen, Rankine-höyryprosessiin perustuva, lieriökattilalla ja vastapaineturbiinilla varustettu vastapainevoimalaitos. Laitos polttaa CFB-kuivurissa (Circulating fluidized-bed) termisesti kuivatettu lietettä hönkäkaasujen kanssa CTC-reaktorissa (Constant temperature combustion). CFB-kuivuri ja CTC-reaktori on kytketty höyryvoimalaitosprosessiin, jonka turbogeneraattorista saadaan sähköenergiaa, kuva 1.



Kuva 1. PAKU hankkeen CHP-laitoksen prosessikaavio (A CFB kuivuri, B CTC reaktori, joka sisältää höyrystimen 1, C tulistin, D höyrystimen 2, ja E ekonomaiseri)

Laitoksen kiertoaineena on vesi. Kattilassa vesi on esilämmitetty, höyrystetty kahdessa peräkkäisessä vaiheessa ja tulistettu. Ensimmäinen höyrystimen on CTC reaktorissa ja toinen savukaasukanavassa. Kattilasta höyry johdetaan turbiinille, joka muuntaa termisen tehon mekaaniseksi tehoksi. Turbiini pyörittää generaattoria, jonka avulla mekaaninen energia muutetaan sähkötehoksi. Turbiinista poistuvan virtauksen lämpöä hyödynnetään kuivuriin saapuvan lietteen sisältämän veden höyryttämisessä. Lauhdehöyry turbiinista ja kondensoitunut höyry kuivurista johdetaan sekoitus-esilämmittimeen (syöttövesisäi-

liö), jota lämmitetään lieriöstä otettavalla kyllästetyllä vedellä. Syöttövesisäiliöstä vesi pumpataan takaisin CTC-reaktoriin ekonomaiserin kautta kierron sulkemiseksi. /1/

Kuivurin ja reaktorin simulointimallit ja niiden ohjelmoinnin on tämän tutkimusprojektin puitteissa tehnyt IPSEpro-ohjelmalla dosentti Juha Kaikko. Kaikko yhdisti tehdyt simulointimallit ja ohjelmassa olevat standardimallit ja laati PAKU-CHP-laitoksen mallin. PAKU-CHP-laitos suunnitellaan 150,000 asukkaan asuinyhteisön tuottamalle lietemäärälle. Laitoksen malli ja mallinnuksessa käytetyt arvot on esitetty liitteessä 1. Kaikon kehittämän PAKU-CHP-laitoksen mallin mukaisesti nettosähkötehoksi saadaan 410kW. Sen mukaisesti PAKU-CHP-laitoksessa on käytettävä 400kW generaattoria.

1.4 Tehtävän rajausta ja menetelmät.

Diplomityön aihealueen rajausta pohjautuu PAKU -projektissa asetettuihin tavoitteisiin ja rajauksiin. Verkkoonliityntä suunnitellaan pienen kokoluokan laitospuolelle ja turbo-generaattoreiden sähkötehoiksi on kiinnitetty 400 kW. Sähköteho käytetään osittain tai kokonaan lietteen kuivaukseen tai siirretään verkkoon. Verkkoonliityntä suunnitellaan niin, että laitos toimii yleisen sähköverkon kanssa rinnan.

Teoriaosassa ensin selvitetään kirjallisuuden avulla generaattorien teoreettiset toimintaperiaatteet, jotka ovat tärkeitä verkkoonliityntän suunnitteluun kannalta. Sitten tutkitaan ajankohtaisia pienvoimalan verkkoonliityntän standardeja ja suosituksia, sekä hajautetun tuotannon sähkön laatuvaatimuksia ja suojausvaatimuksia käyttäen alan tutkimuksia, raportteja ja julkaisuja, jotka kohdistuvat pienvoimalaitosten verkkoonliityntään.

Suunnitteluosassa käyttäen teoriaosassa selvitettyjä generaattorien toiminta- ja verkkoonliityntän suunnitteluperiaatteita suunnitellaan PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliityntä. Verkkoonliityntä suunnitellaan eri generaattorityypeille kahdella tavalla – joko suoraan verkkoon kytkettynä tai tehoelektroniikan avulla verkkoon kytkettynä. Käyttäen automaation valmistajien internet- sivuja selvitetään markkinoilla olevia verkkoonliityntätarvittavia laitteita ja niiden ominaisuuksia. Vertaillaan ja valitaan verkkoonliityntälaitteiston toimilaitteet ja automaatio kullekin vaihtoehdolle. Käyttäen AutoCad-

vektorigrafiikkaohjelmaa piirretään verkkoonliityntäautomaation pääkaaviot, keskuskaaviot, sijoittelukaaviot, johdotus- ja piirikaaviot. Lisäksi kirjoitetaan automaation toimintaselostus, joka sisältää automaation logiikan signaalien tulo/lähtölistat, komponenttien ja laitteiden listat sekä toimintaselostukset kullekin verkkoonliitynnän vaihtoehdolle. Toimintaselostusta laadittaessa piirretyt kaaviot tarkistetaan. Automaation toimintaselostus on diplomityön liitteenä. Verkkoonliityntävaihtoehdoille lasketaan hankintakustannukset ottamalla yksittäisten laitteiden maahantuojaan yhteyttä tai muuten selvittämällä hinta-arviot.

1.5 Työn rakenne

Työn rakenne on seuraava:

Luvussa 2 selvitetään hajautetun sähkötuotantoon PAKU-CHP-laitoksen mahdolliset generaattorilaitteistojen tyypit. Esitetään pienvoimalaitoksen sähköjakeluverkkoon liittämissä kannalta generaattorilaitteistojen erikoisominaisuudet ja säätömahdollisuudet. Lisäksi selvitetään verkkoonliitynnän laitteistotarpeet jokaiselle tyypille ja esitetään laitteiston laitteiden rakenne- ja toimintaperiaatteet.

Luvussa 3 tarkastellaan pienvoimalan verkkoonliityntään kohdistuvia vaatimuksia suosituksista, standardeista ja ohjeista ja määritellään PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliitynnän suunnittelun periaatteet ja reunaehdot.

Luvussa 4 selvitetään verkkoonliitynnän tyypin ja generaattorin valinnan tekijät. Suunnitellaan generaattorilaitteistojen tyypeille verkkoonliityntä sähköjakeluverkkoon ja esitetään voimalaitoksen suojauskaaviot ja selostetaan generaattorilaitteistojen käyttöä.

Luvussa 5 määritellään ja valitaan eri valmistajien laitteista PAKU-CHP-laitoksen tulevat verkkoonliityntälaitteiston toimilaitteet ja laitosautomaatio.

Luvussa 6 esitetään PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliitynnän vaihtoehtojen automaatioita ja vertaillaan tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaation eri vaihtoehtoja.

Luvussa 7 lasketaan verkkoonliityntävaihtoehtojen kustannukset ja valitaan PAKU-CHP-laitokseen taloudellisesti ja teknisesti toimiva verkkoonliitynnän ratkaisu.

Luvussa 8 esitetään yhteenveto.

2. GENERAATTORILAITTEISTOT

Tarkastellaan generaattorilaitteistotyyppien ominaisuuksia, jotka ovat merkityksellisiä hajautetun tuotannon pienvoimalaitoksen liittämisessä sähköjakeluverkkoon. Tutustutaan myös generaattorilaitteiston säätötapoihin, joita käytetään sähkötuotantolaitosten verkkoonliittymän hallinnassa.

Käsitellään seuraavia generaattorilaitteistotyyppisiä, jotka voivat olla käytössä hajautetuissa CHP sähkötuotantolaitoksissa:

- tahtigeneraattori
 - vierasmagnetoitu tahtikone
 - kestmagneettitahtikone
- verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori

Koska generaattori voi liittyä sähköverkkoon suoran verkkoliittymän sijasta myös tehoelektronikan välityksellä, käsitellään myös taajuusmuuttajaa ja sen ominaisuuksia.

2.1 Tahtigeneraattori

Tässä kappaleessa esitetään tahtikoneiden perusominaisuuksia ja säätömahdollistuksia, jotka ovat merkityksellisiä hajautetun tuotannon pienvoimalaitoksen verkkoonliittymän kannalta.

Verkkoon kytketty tahtikone pyörii tahtinopeudella, eli sen roottori pyörii samalla nopeudella koneen sisäisen magneettikentän ja syöttävän verkon kanssa. Tahtikoneen pyörimisnopeus n on sidoksissa syöttävän verkon taajuuteen f ,

$$n = \frac{f}{p} \text{ eli } n = 60 \cdot \frac{f}{p} \text{ [r/min]} \quad (1)$$

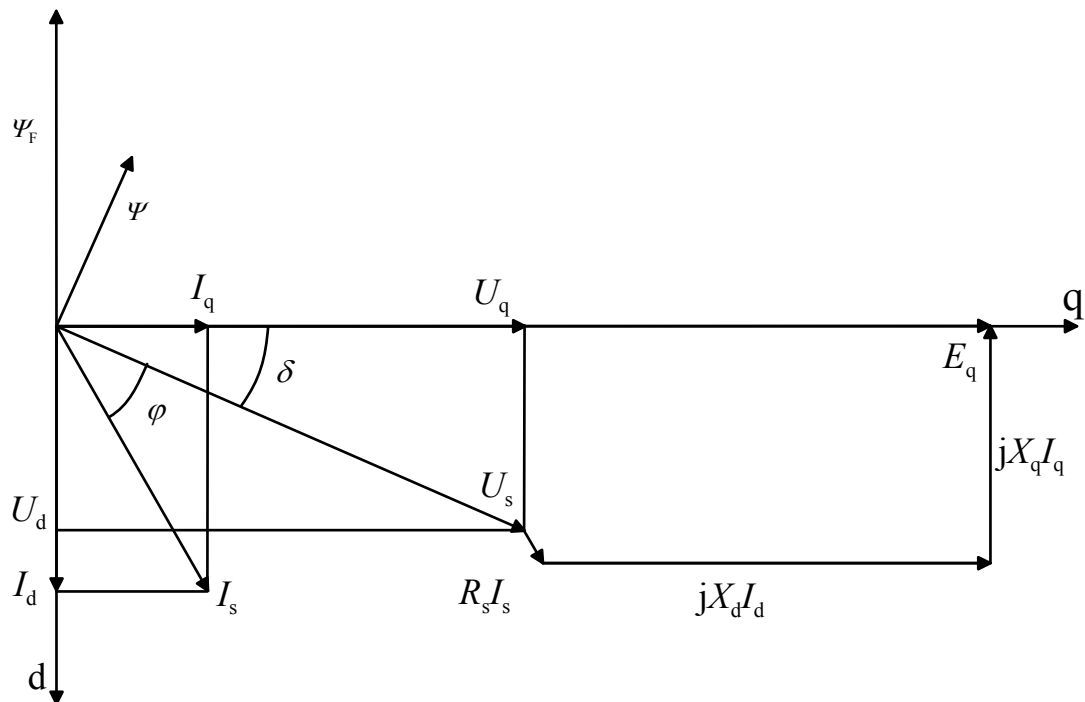
jossa p on generaattorin napapariluku.

n on generaattorin pyörimisnopeus.

Roottorin, eli napapyörän, rakenteen puolesta tahtikoneet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: avonapaisiin ja umpinapaisiin tahtikoneisiin. Tahtikoneen ominaisuudet määrittävät suuressa määrin reaktanssit. Avonapakoneella on erilaiset ilmavälit pitkittäis- ja poikittaissuunnassa ja vastaavasti erilaiset reaktanssit X_d pitkittäis- ja poikittaissuunnassa X_q . Umpinapakoneella reaktanssit X_d ja X_q ovat likimain yhtä suuret.

Avonapaisia koneita käytetään hitaasti pyörivissä käytöissä, joissa nopeudet ovat luokka 75 - 500 rpm ja umpinaparakennetta käytetään nopeasti pyörivissä käytöissä, jossa nopeudet ovat luokkaa 1500 - 3000 rpm. Suurissa CHP-höyryvastapainevoimalaitoksissa tulee käyttää umpinapatahtigeneraattoria, koska siihen kuuluu nopeasti pyörivä turbiini. Pienitehoisessa CHP-laitoksessa myös 1500 rpm nelinapainen avonapatahtigeneraattori voi tulla kyseeseen.

Kuva 2 esittää avonapageneraattorin osoitus suureita tehokertoimen ollessa $\cos \varphi = 0.7$, jolloin kuormitusvirta I on napajännitteestä U_g kulman $\varphi = 45^\circ$ jäljessä.



Kuva 2. Avonapatahtigeneraattorin tehollisarvo-osoitinpiirros induktiivisella kuormitusvirralla I_s . Kulmaa δ , joka on smv:n $E=E_q$ ja napajännitteen U_s välillä, kutsutaan sisäiseksi tehokulmaksi. R_s on staattorikäminresistanssi, ψ_F on tasamagnetointikäminvuo, ψ on kokonaiskäminvuo. /5/, /6/

Avonapatahtigeneraattorille tuottamalle pätöteholle voidaan lausua tehokulmayhtälö

$$P = \frac{EU_s}{X_d} \sin \delta + U_g^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta \quad (2)$$

missä E on koneen sisäinen vaiheiden välinen sähkömotorinen voima

U_s on koneen vaiheiden välinen napajännite, verkon pääjännite.

Umpinapatahtigeneraattorille ($X_d = X_q$) tehokulmayhtälö yksinkertaistuu

$$P = \frac{EU_s}{X_d} \sin \delta \quad (3)$$

Ja loisteholle pätee seuraava yhtälö

$$Q = \frac{EU_s}{X_d} \cos \delta - \frac{U_s^2}{X_d} \quad (4)$$

Tehokulmayhtälöistä (2 ja 3) voidaan nähdä, että umpinapageneraattorin suurin teho saavutaan tehokulmalla $\delta = 90^\circ$ ja avonapageneraattorin suurin vääntömomentti ja teho saavutetaan tehokulmalla joka on pienempi kuin 90° .

Generaattorin verkkoon syöttämän tehon kasvaessa koneen vääntömomentti kasvaa myös, jolloin roottori jää edelleen pyörimään verkon kanssa samalla taajuudella mutta suuremmalla tehokulman δ arvolla. Jos voimakoneen tehoa kasvatetaan liikaa, kasvaa $\delta > 90^\circ$, staattorin ja roottorin erinimisten magneettinapojen välinen yhteys katkeaa ja kone putoaa tahdistasta, jolloin se on irrotettava verkosta.

Koska teho on vääntömomentin ja mekaanisen kulmanopeuden tulo ($P = T\Omega$), tehokulmayhtälöstä (2) voidaan nähdä, että koneen vääntömomentti on pyörimisnopeuden pysyessä vakiona suoraan verrannollinen termiin $\sin \delta$, joten pätötehoa säädetään voimakoneen liike-energian avulla, joka vaikuttaa saatuun vääntömomenttiin ja sitä kautta kulmaan δ . Yhtälön (4) mukaan loistehoa säädetään roottorin magnetointivirralla, mikä muuttaa sähkömoottorisen voiman E suuruutta.

Umpinapatahtigeneraattorit jaetaan kestmagneettitahtigeneraattoreihin, joiden roottoreissa on kestmagneetit ja vierasmagneetoituihin tahtigeneraattoreihin, joiden rootto-

reissa on magnetointikäänitys. Magnetoimismenetelmien perusteella vierasmagnetoidut koneet voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. Vierasmagnetoitu tahtikone tarvitsee tasavirtaa napapyörän magnetointiin. Harjallisessa tahtikoneessa tasavirta syötetään ulkopuoliselta magnetointilaitteelta hiiliharjojen ja liukurenkaiden kautta napapyörään. Harjattoman tahtikoneen akselille on rakennettu pieni vaihtovirtageneraattori, jonka pyörivästä ankkurista saadaan diodisillan kautta magnetoimisvirta. Tämän apukoneen magnetointinavat ovat kiinteät (staattorissa) ja syötettävissä suoraan ulkopuolelta. Tarvittava ulkopuolinen magnetoimisteho on pieni.

Vierasmagnetoiduissa generaattoreissa käytetään aina magnetoinnin säätölaitetta, jännitteensäädintä. Säädin pitää generaattorin jännitteen asetteluarvossaan halutulla tarkkuudella riippumatta kuormituksen, lämpötilan tai taajuuden vaihteluista. Rinnankäytössä verkon tai toisten generaattoreiden kanssa säädin säätää koneen reaktiivista tehoa verkon jännitteestä ja asettelustaan riippuen.

Kestomagneetti- tahtigeneraattorissa on pysyvä magnetointi, jota ei voi säätää, eli kestopagnetoidulla generaattoreilla ei voida vaikuttaa loistehon tuotantoon kestopagnetivuota muutamalla, siksi kestopagnetitahtikoneen magnetointitilaa muutetaan staattorijännitteen suuruutta muutamalla.

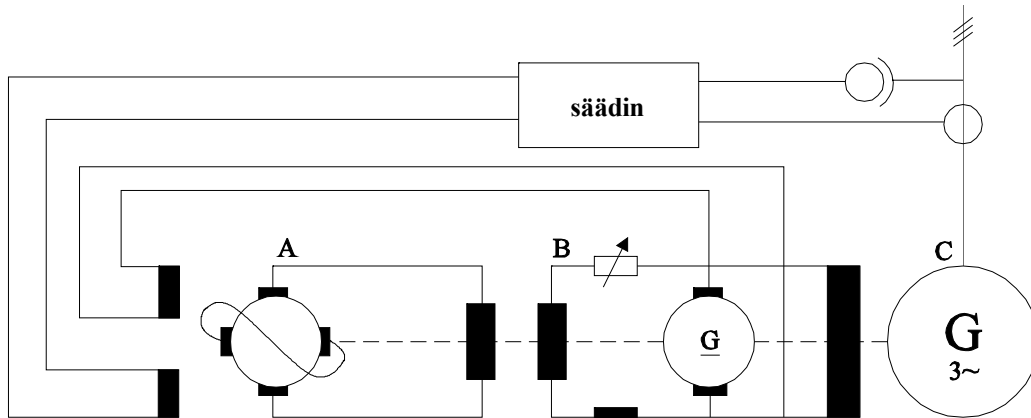
Vierasmagnetoitugeneraattorin magnetointijärjestelmä jaetaan toiminnallisesti kolmeen osaan:

1. magnetointilaitteisto
2. säädin
3. käsinohjauslaitteisto

Magnetointilaitteiston tehtävänä on muuttaa vaihtosähköteho tai mekaaninen teho tasasähkötehoksi, jolla tahtikoneen roottoria magnetoidaan. Säädin käsittelee tahtikoneesta mitattuja suureita ja ohjaa magnetointilaitteistoa. Säätohjeena voivat olla tapauksesta riippuen generaattorin napajännite, magnetointivirta, tehokerroin, lois- tai pätöteho. Magnetointilaitteistot voidaan jakaa pyörivällä herätinkoneella toteutettuun magnetointiin, staattiseen tai harjattomaan magnetointiin.

Magnetointi pyörivällä herätinkoneella

Tämä on harjallinen perustyyppi, joka perustuu tasavirtageneraattorin käyttöön. Menetelmää pidetään jo vanhentuneena, koska se on monivaiheinen, hidas ja sisältää suuren määrään kuluvia komponentteja. Kuvassa 3 on esitetty pyörivän herätinkonemagnetoinnin periaate.

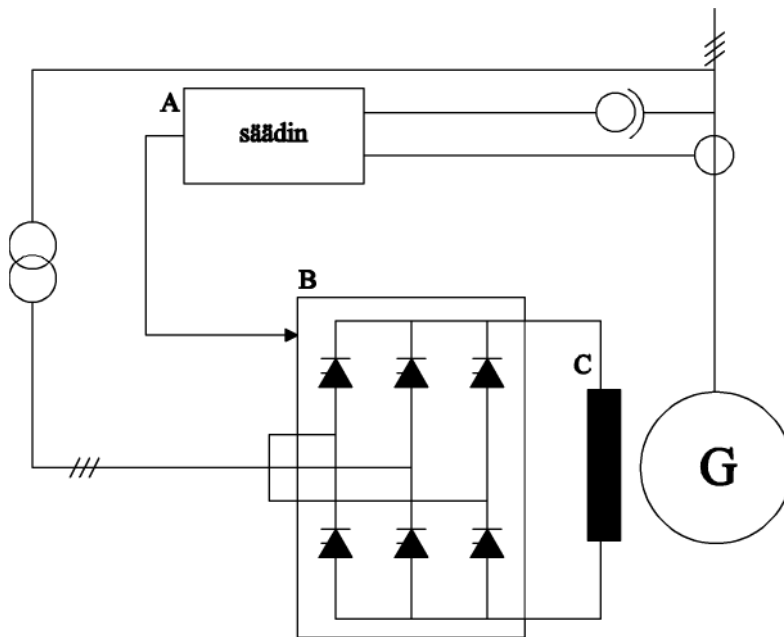


Kuva 3. Pyörivän herätinkonemagnetoinnin periaate. /3/

Kuvan 3 mukaisesti, magnetointitehoa saadaan samalla akselilla pääkoneen kanssa pyörivästä tasavirtageneraattorista (B). Tämän herätinkoneen (A) magnetointia säätämällä suoritetaan tahtikoneen säätö. Magnetointivirta johdetaan roottoriin liukurenkaiden ja hiiliharjojen avulla. /3/

Staattinen magnetointi

Staattinen magnetointi on harjallinen magnetointi, jota käytetään nykyisissä tahti-generaattoreissa. Staattisessa magnetoinnissa magnetointitehoa otetaan generaattorin navoista tai pienjännitekeskuksesta. Kuvassa 4 on esitetty staattisen magnetoinnin periaate.

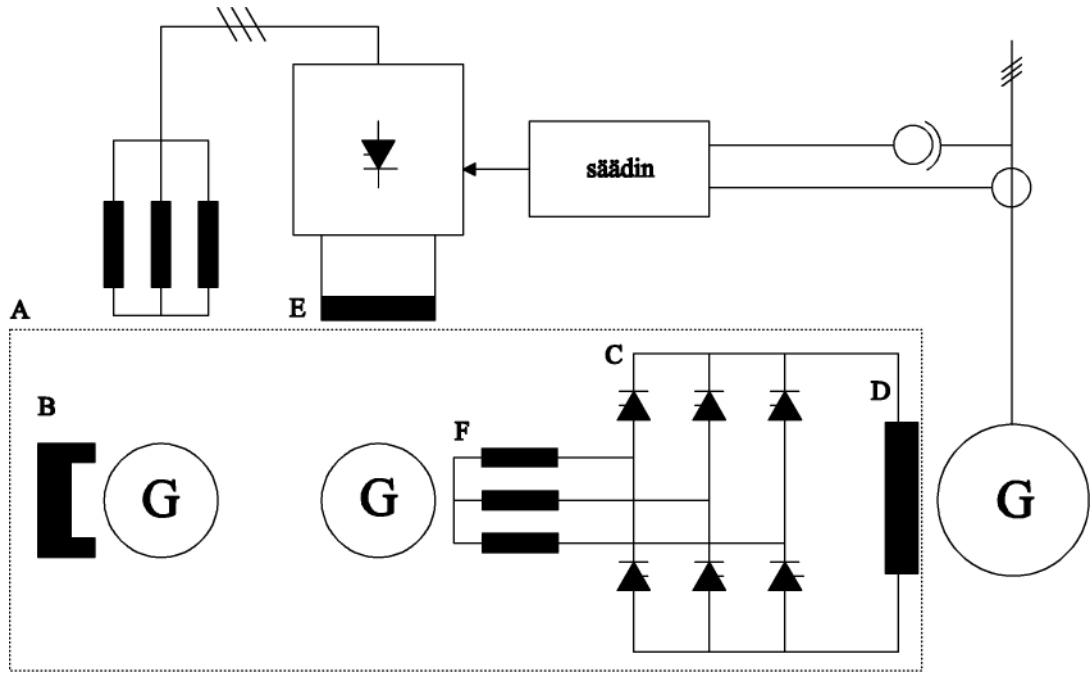


Kuva 4. Staattisen magnetoinnin periaate. /3/

Kuvan 4 elektroninen säädin (A) ohjaa tyristorisiltaa (B). Ohjeen mukainen tasasuunnattu magnetointivirta johdetaan roottorin magnetoimiskäämeille (C) hiiliharjojen kautta. /3/

Harjaton magnetointi

Harjaton magnetointi ei sisällä kuluvia osia, kuten liukurenkaita tai harjoja. Kuvassa 5 on esitetty harjattoman magnetoinnin periaate.

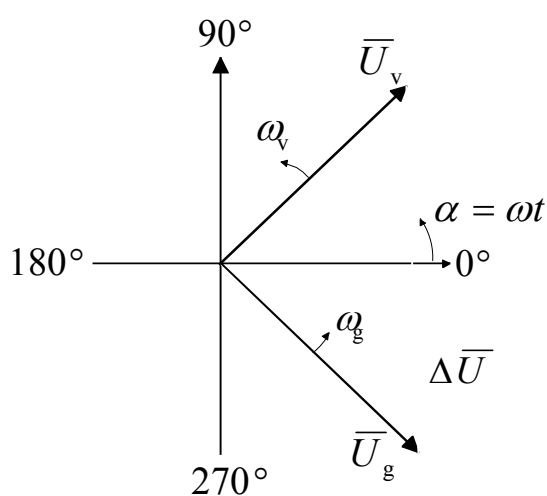


Kuva 5. Harjattoman magnetoinnin periaate. /3/

Kuvan 5 mukaisessa järjestelmässä pääkoneen roottorille (A) on koottu kestopagneettiherätinkone (B), päämagnetointikone (F), tasasuuntaus (C) ja varsinaisen pääkoneen napakäämit (D). Päämagnetointikone kolmivaiheinen umpinapainen tahtigeneraattori (F), jonka napa- eli magnetoimiskäämit (E) ovat staattorissa ja kolmivaihekäämit (F) roottorissa. Magnetointikoneen vaihtojännite tasasuunnataan tasasuuntaajalla (C) ja syötetään päägeneraattorin magnetoimiskäämiin (D). Itsemagnetoidun generaattorin tapauksessa magnetointiteho otetaan samalla akselilla pyörivästä kestopagneettiherätinkoneesta (B), jolloin laitteiston tuottama jännite on verkkojännitteestä riippumaton. Verkkomagnetoidun generaattorin tapauksessa magnetointiteho otetaan syötettävästä verkosta, esimerkiksi pj-keskuksesta, jolloin magnetointijännite on riippuvainen verkkojännitteestä staattisen magnetoinnin tavoin. Liukurenkaita tai hiiliharjoja ei tarvita, koska tasasuuntaajasilta (C), joka syöttää päägeneraattorin magnetointipiiriä (D), pyörii akselin mukana. /3/, /4/

Tahdistus

Konetta käynnistettäessä roottorin pyörimisnopeus ei ole sama kuin mitä verkon taajuus edellyttäisi, mistä seuraa, ettei tahtikonetta voida kytkeä verkkoon oikosulkukoneen tavoin. Kun tahtigeneraattoria aiotaan käyttää rinnan jakeluverkon kanssa, se on tahdistettava verkkoon. Generaattori kytketään verkkoon katkaisijalla, joka voidaan sulkea tilanteessa, jossa katkaisijan verkon puoleisten ja generaattorin puoleisten napojen välinen jännite on lähes nolla, jolloin kytkentävirtasäyksestä muodostuu pieni, kuva 6.



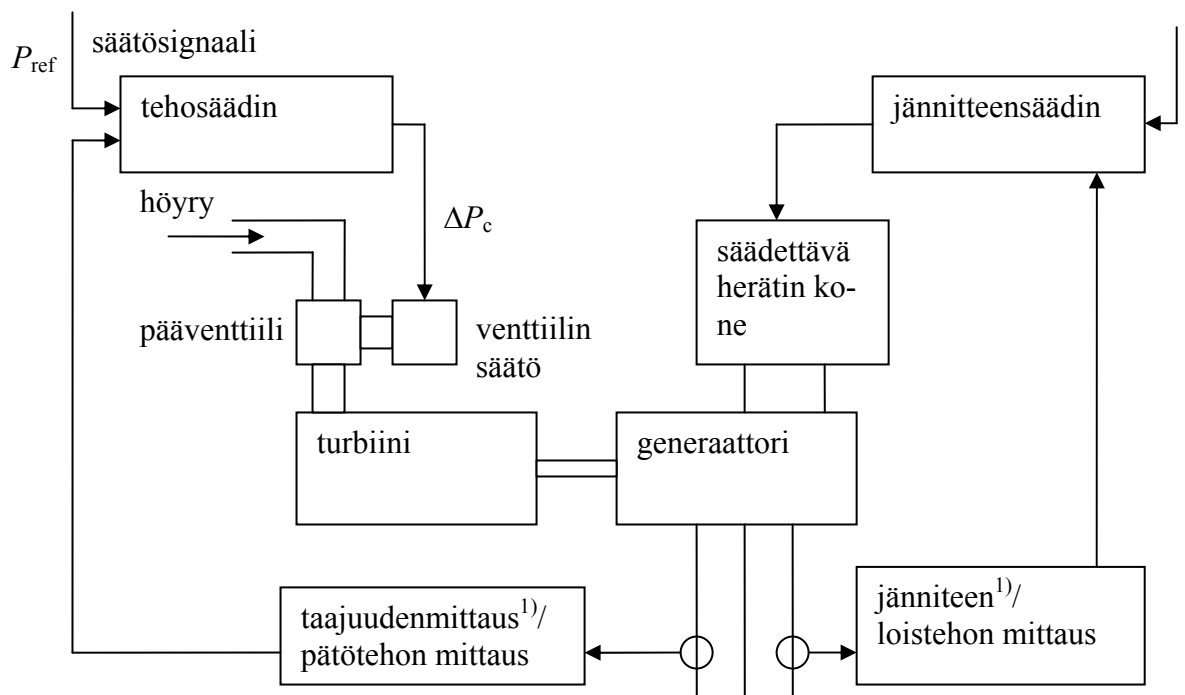
Kuva 6. Oikean tahdistushetken määrittäminen. $\Delta \bar{U} = 0$, \bar{U}_g :n ja \bar{U}_v :n on oltava päällekkäin. /4/

Tämä tilanne saavutetaan, kun tahdistuskatkaisijan molemmiin puolin jännitteiden itseisarvot ovat lähes yhtä suuret, jännitteiden vaihekulmat ovat samat eli jännitteet ovat samanvaiheiset ja jännitteiden taajuudet ovat yhtä suuret. Jos tahdistus suoritetaan tarkasti, ei tahtikone anna eikä ota sähköverkosta virtaa. Tahdistus on helpointa tehdä automaattisella tahdistuslaitteistolla. Silloin generaattorin automatiikka yhteistyössä tahdistusreleen kanssa säätää generaattorin nopeutta ja jännitettä niin, että tahdistusrele voi sulkea katkaisijan juuri oikealla hetkellä. /4/ Näitä toimenpiteitä kutsutaan tässä työssä taajuussovitus- ja jännitesovitusfunktioiksi.

2.1.1 Tahtigeneraattorin pätötehon säätö

Tässä kappaleessa tarkastellaan pätötehon säätöä pienvoimalaitoksissa, joissa tahtigeneraattoria käytetään sähköverkon rinnan.

Kun pienvoimalan generaattori käy jäykässä verkossa, sen roottorin pyörimisnopeuden määrää verkko eikä generaattorin toiminta suuresti vaikuta verkon tilaan. Tästä johtuen turpiinin tehon lisäys ei johda generaattorin roottorin pyörimisnopeuden kasvamiseen, vaan generaattorin sisäisen $smv:n$ ja sähköverkon välisen kulman δ (tehokulma) kasvuun ja sitä kautta generaattorin tuottaman pätötehon kasvuun (yhtälö 2). Sähköverkon generaattorien pätötehoja ohjataan säätämällä niitä pyörittävien voimakoneiden mekaanisia tehoja ja voimakoneen tehonsäädöllä tarkoitetaan siis käytännössä koneen akselille vaikuttavan mekaanisen vääntömomentin säätämistä. Turpiinilla on nopeussäädin, jonka tehtävä on pitää turpiinin teho tai höyryverkon vastapaine asetetussa ohjearvossaan. /4/ Pätötehon säätöä yksittäisen generaattorin osalta esittää kuva 7. Referenssisäätösignaali P_{ref} viedään nopeussäätimelle, jota piengeneraattorin tapauksessa, voidaan kutsua myös tehonsäätimeksi, koska sen tehtävä tahdistuksen jälkeen on säätää tehoa. Tehosäädin säätää generaattorin pätötehoa ohjaamalla turbiinin höyryventtiiliä.



Kuva 7. Generaattorin pätö- ja loistehonautomaattinen säätö /5/

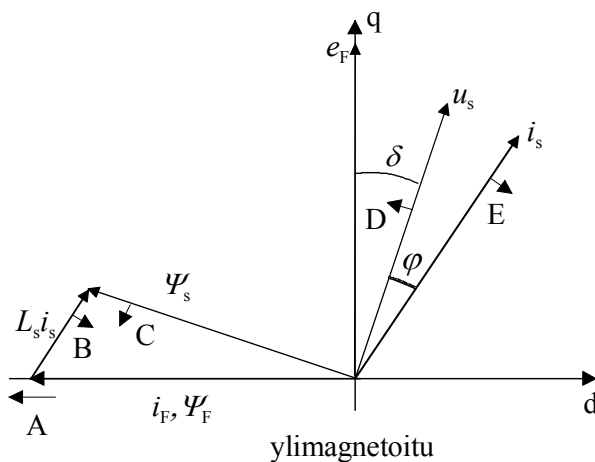
1) Taajuuden ja jännitteen säätö tehdään ennen tahdistusta, tahdistuksen jälkeen piengeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää verkko.

2.1.2 Tahtigeneraattorin loistehon säätö

Tässä kappaleessa tarkistellaan, miten toteutetaan loistehon säätöä pienvoimalaitoksessa, jossa tahtigeneraattoria käytetään sähköverkon rinnalla.

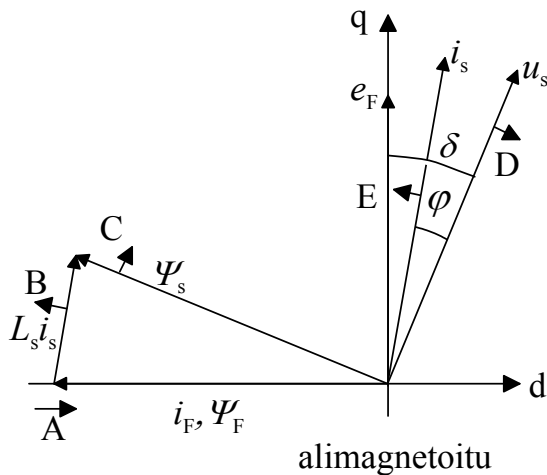
Verkosta irti olevan generaattorin jännitteen määräävät magnetointivirta ja pyörimisnopeus. Saarekekäytössä, ennen tahtigeneraattorin tahdistusta tai suuren koneen tapauksessa jännitteensäädön tehtävä on pitää generaattorin napajännite annetussa ohjearvossa. Jäykässä verkossa generaattorin jännitteen säätäminen vaikuttaa vain loistehon suuruuteen. Generaattorille annetaan loisteho-ohje, jota generaattorin jännitteensäädin pyrkii toteuttamaan [8]. Loistehon säätöä toteutetaan säätämällä magnetoimisvirtaa.

Tarkastellaan yksinkertaistetun umpinapaisen tahtikoneen vektoripiirroksen avulla loistehon säätöä jäykässä verkossa. Kuvissa 8 ja 9 suuret kuvattu suhteellisarvoilla ja kuvissa jännite ja staattorin virta ovat nimelliset ($i_s = u_s = 1$). Koska staattorikäämivuo ψ_s on staattori jännitteen aikaintegraali (häviöt jätetään huomiotta) määräytyy se suoraan napajännitteestä. Toisaalta staattorikäämivuo $\psi_s = \psi_F + L_s i_s$, jolloin ψ_F :n muuttaminen muuttaa i_s ja ψ_s välistä kulmaa, joka määrätään siis u_s :n kulman. Tehokerroin taas määräytyy i_s :n ja u_s :n välisestä kulmasta.



Kuva 8. Ylimagnetoidun tahtigeneraattorin yksinkertaistettu vektoripiirros.

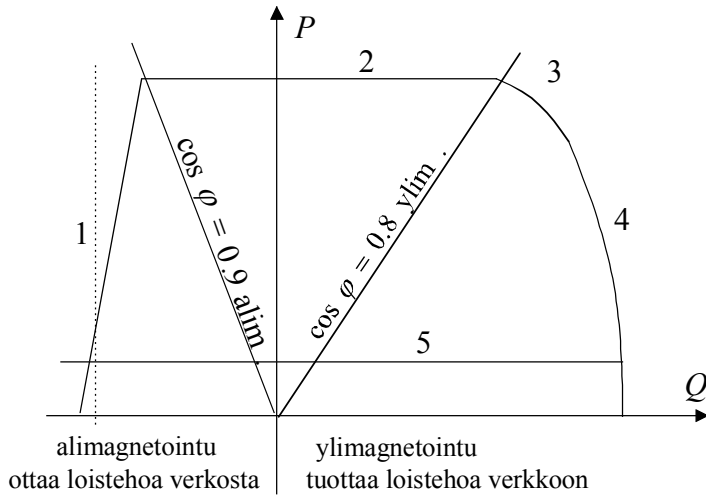
Kun magnetointivirtaa i_F kasvatetaan (A) magneettivuo ψ_F kasvaa. Ja koska vektorin pituus ψ_s ei muutu, dq-koordinaatistossa sen suunta muuttuu (C), samalla $L_s i_s$:n suunta muuttuu (B), kun virran itseisarvo pidetään tarkastelussa vakiona. Koska staattorikämmivon ψ_s ja jännitteen u_s välinen kulma on 90 sähköastetta, u_s :n suunta muuttuu (D), ja tehokulma δ pienenee. $L_s i_s$:n suunta muuttuu (B) ja samalla i_s :n suunta muuttuu (E), tehokerroinkulma φ kasvaa ja tuotettavan loistehon määrä kasvaa.



Kuva 9. Alimagnetoidun tahtigeneraattorin yksinkertaistettu vektoripiirros.

Kun magnetointivirtaa i_F pienetään (A) magneettivuo ψ_F pienenee. Ja koska vektorin pituus ψ_s ei muutu, dq-koordinaatistossa sen suunta muuttuu (C), samalla $L_s i_s$:n suunta muuttuu (B), kun virran itseisarvo pidetään tarkastelussa vakiona. Koska staattorikämmivon ψ_s ja jännitteen u_s välinen kulma on 90 sähköastetta, u_s :n suunta muuttuu (D), ja tehokulma δ kasvaa. $L_s i_s$:n suunta muuttuu (B) ja samalla i_s :n suunta muuttuu (E), tehokerroinkulma φ kasvaa ja tarvittavan loistehon määrä kasvaa.

Magnetoinnin muutos näkyy generaattorin sisäisessä smv:ssä e , mutta ulkoisesti generaattorin tuottaman tai kuluttaman loistehon määrässä (yhtälö 4). Mitä suurempi on ylimagnetointi, sen suurempi on verkkoon syötettävä loisteho. Eli ylimagnetoitu tahtikone tuottaa loistehoa sähköjakeluverkkoon. Jos tahtigeneraattori alimagnetoidaan, sen sisäinen smv on napajännitettä pienempi ja generaattori vastaavasti ottaa loistehoa verkosta korvatakseen puuttuvan magnetoinnin./4/ Kuvan 10 ns. PQ-diagrammi ilmaisee tahtigeneraattorin säätörajoja.



Kuva 10. Tahtigeneraattorin PQ -diagrammi /7/

Raja 1 on staattisen stabiilisuden raja, jota ei saa alittaa, jottei generaattori irtoa tahdistasta. Turbiinin maksimi tehoraja ($P = P_{\max}$) on 2 ja minimitehoraja ($P = P_{\min}$) on 5. Raja 3 on staattorin kuormitettavuus ($S = S_{\max}$) ja raja 4 on magnetointivirtaraja ($I_m = I_{m,\max}$, ts. $E_g = E_{\max}$).

Loistehon säätöä yksittäisen generaattorin osalta esitettiin kuvassa 7. Jänniteensäädin toimii jänniteensäätömoodissa ennen tahdistusta verkkoon ja loistehosäätömoodissa tahdistuksen jälkeen. Loisteho-ohje viedään jännitesäätimelle. Jännitesäädin säätää generaattorin loistehoa magnetoimisvirtaa muuttamalla.

Koska generaattorin sähköisen vääntömomentin suuruus riippuu magnetoinnista, alimagnetointi saattaa johtaa siihen, että turpiinin mekaaninen vääntömomentti ylittää sähköisen tahdistavan vääntömomentin, jolloin generaattorin stabiilius on vaarassa. Tämä pyritään estämään alimagnetoinnin rajoittimella, joka estää magnetointivirran pienenevän staattisen stabiiliusrajan alapuolelle. /6/

2.2 Epätahtigeneraattori

Tässä kappaleessa tarkastellaan epätahtikonetta ja sen periaatetoimintaa, määritellään epätahtikoneen verkkoonliityntään tarvittavaa laitteistoa ja esitetään laitteiston toimintaperiaatteet.

Epätahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikämmityksen kehittämän pyörivän magneettikentän kanssa. Epätahtikoneet ovat umpinapakoneita, ja ne jaetaan tavallisesti kahteen pääryhmään riippuen roottorikämmityksestä: oikosulku- ja liukurengaskoneisiin. Oikosulkugeneraattorissa roottorikämmityksessä oikosuljetaan roottorin kummassakin päässä oikosulkurenkain ja näin saadaan häkki-
kämmitys. Liukurengasgeneraattorissa roottorikämmityksen päät tuodaan liukurenkaiden avulla roottorista ulos.

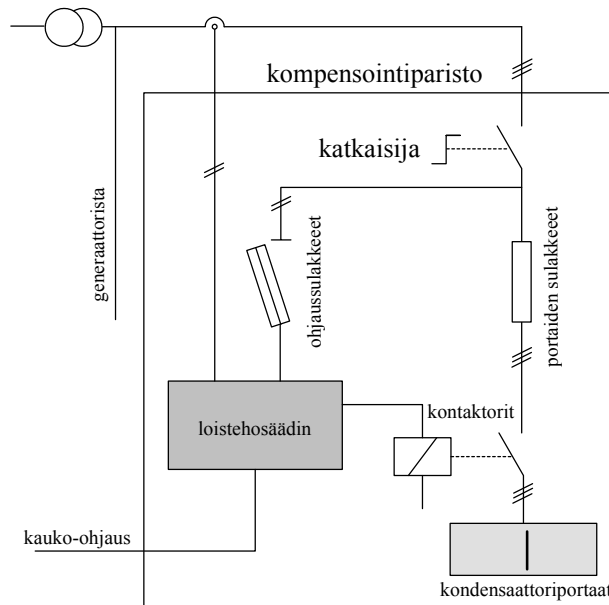
Generaattorikäytössä roottorin nopeus on kentän nopeutta suurempi. Tällöin sähkömotorisen voiman (smv) ja virran suunta roottorissa muuttuu päinvastaiseksi kuin moottorikäytössä ja kone rupeaa syöttämään tehoa verkkoon. Epätahtikoneessa ei ole erillistä magnetoimintakämmitystä ja se toimii alimagnetoituna generaattorina, joka ottaa magnetoimisvirran verkosta. /4/

Magnetoinnin lähteestä riippuen epätahtigeneraattorit jaetaan: verkkomagnetoitunut epätahtigeneraattorit ja kondensaattorimagnetoitunut generaattorit. Verkkomagnetoitunut epätahtigeneraattorit ottavat magnetoimisvirran sähköverkosta. Kondensaattorimagnetoitunut generaattorit ottavat magnetoimisvirran koneen liittimiin asennetuista magnetoimiskondensaattoreista, joten ne pystyvät periaatteessa toimimaan täysin itsenäisinä generaattoreina.

Verkkomagnetoitunut epätahtigeneraattorin tehokerrointa voidaan saada nostetuksi liittämällä generaattorin napojen läheisyyteen paikallinen kondensaattorilaitteisto. Tässä tapauksessa generaattori saa osittain tai kokonaan magnetoimisvirran kondensaattorilaitteistosta ja mahdollisesti loppuosan verkosta.

Kondensaattorilaitteisto

Epätahtigeneraattorin tuottaman pätötehon ja sen kuluttaman loistehon suhdetta ei voi muuttaa. Mutta epätahtigeneraattorin verkosta ottamaa loistehoa voidaan kompensoida eli pienentää paikallisilla kompensointi-kondensaattoriyksiköillä, kuva 11.



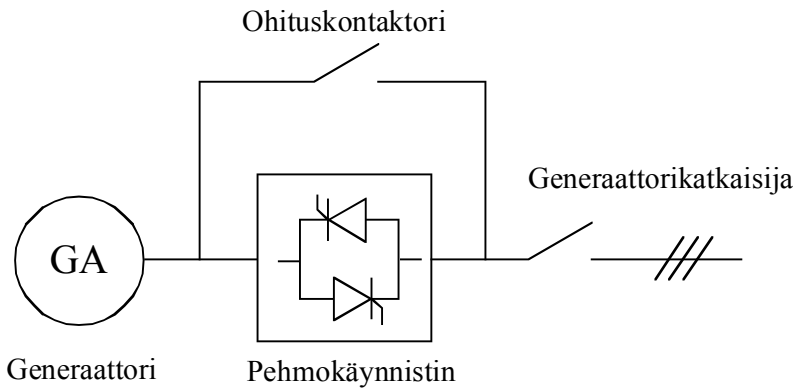
Kuva 11. Kompensointiparisto

Yksittäisistä kondensaattoreista kootaan kondensaattoriyksikköjä, jotka mitoitetaan ja joita ohjataan tarpeen mukaan. Loistehosäädin mittaa virran ja jännitteen välistä vaihekulmaa. Siihen on aseteltu induktiivinen ja kapasitiivinen havahtumisraja, joiden sisällä se pyrkii pitämään loistehon kytkemällä yksikköjä päälle ja pois loistehotilanteen mukaan. Säätoporras koostuu moduulista, joka muodostuu kontaktorista ja sulakkeista. Moduulit on usein asennettu kaappiin, jonka ovesa on loistehosäädin.

Käynnistysvirran rajoitus

Epätahtigeneraattoria ei tarvitse tahdistaa verkkoon. Suorassa käynnistyksessä oikosulkugeneraattori ottaa kuitenkin hyvin suuren käynnistysvirran, joka voi olla nimellisvirtaan nähden 3–12 kertainen. Verkkoon kytkettäessä on epätahtigeneraattorin magneettivo nolla, ja heti verkkoon kytkemisen jälkeen kone ottaa verkosta runsaasti virtaa

magnetointiin. Tämän takia epätahtigeneraattorien kanssa käytetään tehoelektronisia pehmokäynnistimiä, kuva 12 (myös sarjavastukset tai kelat ovat mahdollisia).



Kuva 12. Pehmokäynnistimen viivakaavio

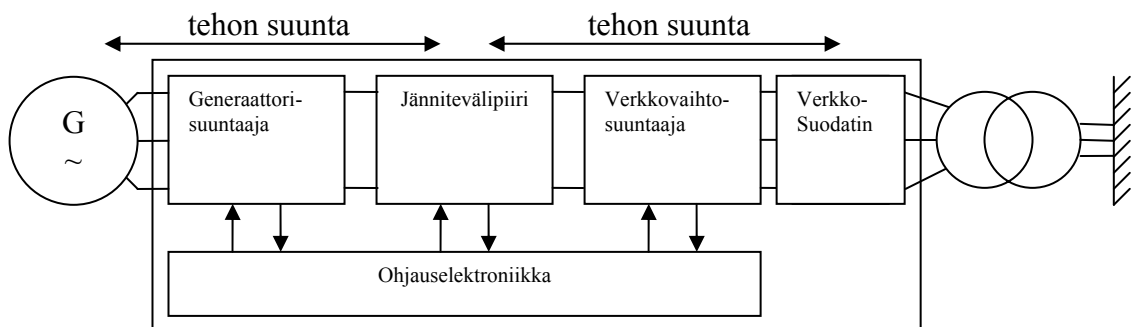
Pehmokäynnistimet nostavat asteittain jännitettä generaattorin yli pienentäen siten virran amplitudia. Virta rajoitetaan yleensä enintään nimellisvirran suuruiseksi. Pehmokäynnistimet ovat verkossa yleensä vain muutamia sekunteja, jonka jälkeen ne ohitetaan kontaktoreilla. Mikäli voimalaa ei useita kertoja irroteta ja kytketä verkkoon lyhyen ajan sisällä, ei se muutaman sekunnin verkossa olollaan vielä aiheuta mainittavaa haittaa sähkön laatuun. Käynnistysvirran kestoa voidaan lyhentää kytkemällä generaattori verkkoon mahdollisimman lähellä tahtinopeutta. /7, 8/

2.3 Taajuusmuuttaja

Tässä kappaleessa esitetään taajuusmuuttaja ja sen perustoimintaperiaatteita, jotka ovat merkityksellisiä verkkoonliitynnän kannalta, koska PAKU-CHP-laitoksen generaattori voi liittyä sähköverkkoon tehoelektronikan välityksellä.

CHP-laitoksissa tehoelektronikkaa käytetään yleisesti liukuvan paineen ajotapaa varten. Liukuvan paineen käyttö on taloudellisempaa osakuormilla parantuneen turbiinin sisäisen hyötysuhteen vuoksi. Silloin kattilan käynnistäminen voidaan suorittaa nopeammin ja pienemmin kustannuksiin, koska kattila ja turbiini voidaan ajaa osittain rinnakkain ylös. PAKU-projektissa tehoelektronikkaa käytetään muun muassa suoraveto-turbogeneraattorin käytön mahdollistamiseksi. Taajuusmuuttajalla verkkoon kytketty suurnopeusturbogeneraattori ei vaadi vaihteistoa mekaanisen pyörimisnopeuden muuttamiseen verkontaajuutta vastaavaksi, koska generaattorin tuottama korkeataajuinen vaihtosähkö muunnetaan verkkotaajuiseksi taajuusmuuttajalla. Samalla generaattorin pyörimisnopeus ei ole enää riippuvainen verkon taajuudesta tai generaattorin napaluvusta.

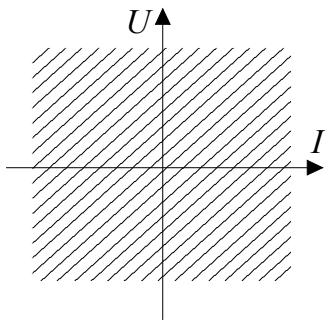
Yleisin taajuusmuuttajatyyppe on kolmivaiheinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, jolla saavutetaan hyvin monipuoliset verkkoliityntäominaisuudet, kuten tehon siirtokyky kumpaakin suuntaan ja loistehon säätömahdollisuus. Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa sähkö muutetaan ensin tasasähköksi ja sitten välipiirin jälkeen vaihtosuuntaajassa vaihtosähköksi. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja muodostuu kolmesta pääpiirin osasta: generaattorisuuntaajasta, välipiiristä ja verkkovaihtosuuntaajasta, sekä lisäksi ohjauselektronikasta ja verkkosuodattimesta, kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13. Generaattori kytkettynä jakeluverkkoon taajuusmuuttajalla.

Generaattorisuuntaaja ja verkkovaihtosuuntaaja ovat aktiiviset, niiden kuuden kytkimen suuntaussillat on toteutettu IGB – Transistoreilla (insulated gate bipolar transistor). Ohjauksena käytetään pulssinleveysmodulointia (PWM). Kullekin sillalle on oma ohjauksensa. Generaattorisuuntaajan ohjauksen tavoite on generaattorin pyörimisnopeuden tai vääntömomentin säätö ja generaattorin tuottaman tehon siirto jännitevälipiiriin. Verkkovaihtosuuntaajan ohjauksen tavoite on syöttää teho välipiiristä verkkoon, taajuusmuuttajalle annetun tehokertoimen tai pätö- tai loisteho-ohjeen mukaisesti. /7/

Koska generaattorivaihtosuuntaaja ja verkkovaihtosuuntaaja ovat aktiiviset, jännitteen ja virran suunta ja suuruus voivat vapaasti muuttua toisistaan riippumatta, jolloin virtajännitetasen kaikki neljännekset ovat mahdollisia kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Virta-jännite-tason kvadrantit. Nelikvadranttikäyttö /8/

Koska jännite ja virta voivat vaihtaa suuntaa toisistaan riippumatta, voi myös teho verkkosillan läpi vaihtaa suuntaa, koska teho on jännitteen ja virran tulo. Näin ollen aktiivisella vaihtosuuntaussillalla voidaan syöttää tehoa taajuusmuuttajasta generaattoriin päin. Induktiogeneraattorin tapauksessa tämä tarkoittaa, että taajuusmuuttajalla voidaan hoitaa generaattorin magnetoinnin säätö halutun jännitteen synnyttämiseksi. Tällä ominaisuudella varustettua taajuusmuuttajaa kutsutaan verkkoonjarruttavaksi (regenerative drive).

Taajuusmuuttajassa suuri osa häviöstä tapahtuu vaihtosuuntaussilloissa ja ne koostuvat puolijohdekytkimen kytkentähäviöistä ja päästötilan jännitehäviöstä. Taajuusmuuttajan hyötysuhteeseen vaikuttavat myös häviöt välipiirissä ja verkkosuodattimessa sekä oma-käyttöteho, jota viedään ohjauselektronikalle ja jäähdytyspuhaltimelle. Erittelemättä

tässä häviöitä tarkemmin, nykyaikaisen IGBT-taajuusmuuttajan hyötysuhde on suuruusluokkaa 97 – 98 % nimellisteholla toimittaessa.

Tämän kappaleen yhteenvedona voidaan sanoa että PAKU-projektin CHP-laitoksessa taajuusmuuttajaratkaisulla saadut hyödyt ovat:

- mahdollisuus liikusäätöön,
- parempi hyötysuhde osakuormalla,
- ei tarvetta käyttää mekaanista vaihteistoa,
- verkkoon kytketty generaattorilaitteisto ei vaadi synkronointia.

3. VERKKOONLIITYNNÄN SUOSITUKSET, STANDARDIT JA VAATIMUKSET

Verkkoonliityntä edellyttää selkeää ohjeistusta sekä tarkkaa sopimusta sähköverkon haltijan ja pienvoimalan omistajan kanssa. Pienvoimalan suojaukset on suunniteltava jakeluverkon ja itse voimalan suojaamiseksi. Suunnittelussa on otettava huomioon pienvoimalan vaikutus jakeluverkkoon.

Tässä kappaleessa tarkastellaan pienvoimalan verkkoonliitynnän standardeja ja suosituksia, sekä hajautetun tuotannon sähkönlaatuvaatimuksia ja erityisesti suojausvaatimuksia, jotka määrittelevät hajautetun tuotannon verkkoonliitynnän suunnittelun periaatteet ja reunaehdot. Lisäksi katsotaan, millaisia voimalaitoksen verkkoonliityntään kohdistuvia ohjeita verkkonhaltija antaa.

3.1 Suositukset ja standardit

Sitovia kansavälisiä standardeja verkkoon liittämiseen ei ole olemassa. Vaatimukset ja suositukset verkkoon liittämiseen Euroopassa ovat usein yrityskohtaisia. Viitteessä CIGRE /10/ löytyy yhteenveto eri maiden vaatimuksista. Eurooppalaista standardia mikroluokan generaattoreiden verkkoon liittämiseksi EN 50438 /11/, "Requirements for the connection of micro-cogenerators in parallel with public low voltage distribution networks", yritetään luoda CENELEC: n johdolla. Standardin julkaisua odotellaan 2007 ja se otettaneen käyttöön kokonaisuudessaan kaikissa EU- maissa. Suomessa hajautetun tuotannon verkkoon liittämiseen käytetään yhtiöiden omia ohjeita, esim. Helsingin Energian laatimia ohjeita "Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helsingin Energian sähkönjakeluverkkoon" /12/. Käytettävissä on myös yleinen Senerin ohje "Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon" /13/.

3.2 Hajautetun tuotannon suojaus

Selektiivisyys, aukottomuus ja luotettavuus eli toimintavarmuus ja virheettömyys ovat suojaukselle asetettavia perusvaatimuksia. Toimiva suojaus turvaa sen, että voimalan käyttö jakeluverkossa ei aiheuta häiriöitä/vaaraa verkolle, kuluttajille tai verkolla työskenteleville henkilöille. Myös toimiva suojaus suojaa itse voimalaa verkon vikoja vastaan. Voimalan generaattorilla ja generaattoria pyörittävällä turbiinilla on omat suojauksensa.

Pienvoimalan suojaukselle on esitetty tiettyjä perusvaatimuksia, joiden on aina täyttyttävä. Sähköenergialiiton suosituksen /13/ ja tutkimuksen /14/ mukaisesti voidaan esittää joitakin tärkeimpiä ehtoja:

- Suojauksen on erotettava voimala verkosta, jos verkkoa ei syötetä muualta tai jännite liittymispisteessä katoaa kokonaan tai osittain.
- Suojauksen on erotettava voimala verkosta, jos verkon jännite tai taajuus liittymispisteessä poikkeavat normaaliarvoista.
- Uudelleen syöttämisen aloittamisen on oltava mahdollista ilman voimalaitokseen kohdistuvia toimenpiteitä.
- Pienvoimala ei saa kytkeytyä uudelleen verkkoon, elleivät kaikki verkon vaiheet ole jännitteisiä.
- Turhia verkosta erottamisia on vältettävä.
- Verkon, jossa tuotantoyksikkö on kiinni, vikaantuessa tuotantoyksikön on lopetettava tehonsyöttö.
- Vikatilanteen jälkeinen takaisinkytkentä on sallittavissa vasta, kun verkon taajuus ja jännite ovat olleet tiettyjen rajojen sisällä tietyn aikaa.
- Takaisin verkkoon kytkeytyminen pitää tehdä tahdistetusti.

Perusvaatimuksena suojaukselle verkon kannalta ehtojen täyttämiseksi voimala on varustettava seuraavalla suojilla:

Pienvoimala on varustettava yli- ja alijännitesuojilla, joiden on toimittava niin, että jännite pysyy aina sallittavissa rajoissa. CHP laitokselle asetetut rajat on esitetty luvussa 4.3. Jännitereleet tarvitaan jokaiselle vaiheelle, jolloin vältetään epäsymmetrisiä syöttötilanteita.

Pienvoimala on varustettava yli- ja alitaajuussuojilla, joiden on toimittava niin, että jännitteen laatu pysyy aina sallittavissa rajoissa. CHP laitokselle asetetut rajat on esitetty luvussa 4.3. Alitaajuus aiheutuu verkon ja generaattorin ylikuormituksesta. Alitaajuusrele erottaa voimalan verkosta taajuuden laskiessa alle määritellyn raja-arvon. Ylitaajuustilanne on seurausta kuorman nopeasta katoamisesta. Tällöin liian nopeaksi kiihtyvä pyörimisnopeus voi aiheuttaa vaurioita generaattorissa. Voimalan nopeuden säädin tai turbiinin pikasulku estävät liian suuret pyörimisnopeudet, mutta ylitaajuusrelettä käytetään varasuojana.

Pienvoimala on varustettava ylivirtasuojalla, jotta oikosulkutilanteessa voimala voidaan erottaa verkosta. Näin vältetään voimalan generaattorin vauriot ja sen vikaantuneelle verkolle aiheuttamat lisäongelmat.

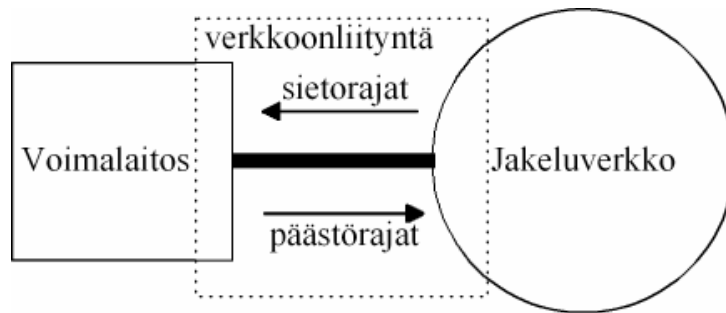
Turvallisuuden kannalta päävaatimuksena on yksinsyötön esto. Pienitehoisen voimalan tapauksessa yksinsyöttö estetään käyttäen vähintään jännite- ja taajuusrelettä. Jänniterele havahtuu loistehon muutoksen seurauksena ja taajuusrele pätötehon muutoksen seurauksena. Lisäksi voidaan käyttää ROCOF - taajuuden muutokseen perustuvaa suojausta ja vector shift - vaiheen siirtymään perustuvaa suojausta. Sähköenergiailiiton suosituksen mukaan yksinään syötön estämiseksi tarvitaan seuraavat suojaavat laitteet: jänniterele, laukaisu, jos jännite alle 85% tai yli 115% nimellisarvosta tai taajuusrele, joka laukaisee 3Hz:n poikkeamalla nimellisestä. Maasulkutilanteessa voimala erotetaan verkosta yksinsyötön estosuojauksen perusteella. Lisäksi turvallisuuden kannalta on suoritettava seuraavat toimenpiteet. Pienvoimalaan kytketyt johtolähdöt ja muuntajat on merkittävä varoituskyltillä. Pienvoimala on aina varustettava laitteilla, joilla se voidaan erottaa yleisestä verkosta, ja verkonhaltijalla on oltava aina mahdollisuus käyttää sitä ja lukita pysyvästi aukiasentoon. /13/

Voimalaitoksen koneita on myös suojattava seuraavilla suojilla. Turbiini varustetaan nopeudensäätimellä, joka turvaa turbiinin suojaukset mm. ylinopeussuojaus. Generaattorilaitteiston suojaus riippuu generaattorin tyypistä. Tahtigeneraattorin tapauksessa pe-

russuojauksena on aina ylivirta- ja maasulkusuoja sekä tarvittaessa epäsymmetria-, jännitteenousu-, takateho-, magnetointisuojaus. Epätahtigeneraattorissa tarvittavien suojien määrä on pienempi. Tarkemmat suojat ovat oikosulku-, ylikuormitus- ja alijännitesuojat. /14/

3.3 Sähkön laatuvaatimukset hajautetun tuotannon verkkoon liittämisessä

Sähkön laatua ajatellen tuotantoyksikölle tulee asettaa päästörajat, joiden puitteissa sen on toimittava. Vastaavasti tuotantoyksikön tulee sietää verkossa olevia epäideaalisuuksia tai tapahtuvia vikatilanteita. Verkon ja tuotantoyksikön välinen vuorovaikutus on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Verkon ja tuotantoyksikön välinen vuorovaikutus. /13/

Tarkistellaan seuraavasti hajautetun tuotannon verkkoon liittämisessä huomioon otettavia tekijöitä ja niiden reunaehtoja:

- Jännitetason pysyvä muutos

Standardi EN 50160 asettaa reunaehdot jännitteen ominaisuudet asiakkaiden liittämiskohdassa. Jännitetasosta pienjänniteverkon osalta se määrittää seuraavaa: ”Normaaleissa olosuhteissa, pois lukien vikatapaukset ja keskeytykset jokaisen viikon aikana 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla välillä $U_n \pm 10\%$ ”. Sähköenergialiiton suosituksen mukaan standardia ei tule soveltaa pienvoimaloihin, koska nykyaikaisilla laitteistoilla on pyrittävä saavuttamaan parempi jännitteen laatutaso.

- Jännitteen nopea muutos kytkentätilanteissa.

Sähköenergialiiton suosituksen mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa nopea jännitemuutos ei yleensä ylitä arvoa $\pm 5\% U_n$, mutta lyhytaikainen muutos, jonka suuruus voi olla jopa $\pm 10\% U_n$, voi tapahtua muutamia kertoja päivässä joissain olosuhteissa. Esimerkiksi pienvoimalan käynnistyksessä voidaan sallia noin 5% muutos, kun käynnistys tapahtuu korkeintaan 2-3 kertaa tunnissa. /13/

- Jännitteen muutos ja välkyntä

Jännitevaihtelut aiheuttavat häiritsevää välkyntäilmiötä. Standardin mukaan jännitteen muutosten ja välkyntän tulee täyttää taulukossa 1 esitetyt raja-arvot.

Taulukko 1. Raja-arvot jännitteen muutoksille ja välkyntälle

P_{lt} , pitkäaikainen häiritsevyysindeksi	P_{st} , lyhytaikainen häiritsevyysindeksi	dc , jatkuvan tilan jännitemuutos	dc_{max} , suurin sallittu jännitteen muutos
0.65	1	3,3 %	4 %

Lisäksi jännitteen muutos saa olla suurempi kuin 3,3 % enintään 500 ms ajan.

- yliaallot ja *THD*

Voimala, joka sisältää tehoelektroniikka, voi kasvattaa jännitteen särötasoa. Harmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrattuna. Standardissa SFS-EN 50160 on asetettu harmonisten yliaaltojännitteiden enimmäisarvot liittämiskohdassa. Yliaaltojen määrät on syytä antaa myös virtoina, koska verkon jännitteen säröytyminen riippuu kussakin verkon osassa kulkevista yliaaltovirroista. Senerin suosituksen mukaan sallittu kokonaissärö 5 % on hyvä suunnittelun pohjaksi. Helsingin Energian ohjeiden mukaisesti kokonaissärökerroin (*THD*, Total Harmonic Distortion) nimellisvirraltaan yli 200A laitteilla saa olla enintään 8 % perusaallon amplitudista, mutta kuitenkin vähintään 20A sallitaan Tuotantolaitteen tai liittymän nimellisvirrasta riippuen sitä kumpi on suurempi, käytetään referenssivirtana. Sallitut arvot yksittäisten yliaaltojen osalta on ilmoitettu taulukossa 2.

Taulukko 2. Virran yliaaltokomponenttien suurimmat sallitut arvot, kun nimellisvirta yli 25 A (HELEN)

Yliaallon järjestysluku	Sallittu arvo nimellisvirrasta, %
$h < 11$	7 %
$11 \leq h < 17$	3,5 %
$17 \leq h < 23$	2,5 %
$23 \leq h < 35$	1 %
$h \geq 35$	1 %

- Virran DC-komponentti

Standardi IEEE 1547 “Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System” esittää, että DC-komponentti ei saa ylittää arvoa 0,5 % nimellisvirrasta I_n

- Jännitteen yliaaltokomponentit ja *THD*

Generaattorilaitoksen ollessa käynnissä jännitteen yliaaltopitoisuus ei saa olla merkittävästi suurempi kuin generaattorilaitteiston ollessa pois käytöstä. Sähkön laatukriteerit eivät saa muuttua (EN50160 ja SENERin laatumääritelmät)

- Tahdistaminen

Pienvoimalan verkkoonkytkennän suunnittelulähtökohtana sähköenergialiiton suosituksen mukaan kannattaa käyttää 4 % jännitemuutosta ja standardin mukaisesti verkkoonkytkeminen saa aiheuttaa jopa 5 %:n hetkellisen jännitemuutoksen. Suunnittelussa käytetään sähköenergialiiton suositusta, eli tahdistuminen verkkoon saa aiheuttaa jännitteeseen korkeintaan 4 % heilahduksen. Suosituksen mukaisesti tahdistamiseen tulee käyttää automaattisia tahdistuslaitteita.

Helsingin Energia antaa seuraavanlaiset tahdistus ehdot:

- Tahtigeneraattori: $\Delta U < \pm 8\% U_N$, $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$, $\Delta \varphi < \pm 10^\circ$
- Epätahtigeneraattori: Tahdistamaton verkkoonkytkentä on sallittu, jos kierroslukuero $\Delta n < \pm 5\% n_N$. Muutoin sovelletaan synkronigeneraattoreille annettuja arvoja.
- Vaihtosuuntaajalaitteet: Vaihtosuuntaaja voidaan kytkeä verkkoon ilman erillistä tahdistinta, jos verkko-osa synkronoituu automaattisesti ja kytkeminen ei aiheuta haitallista käynnistysvirtasysäystä. Muutoin sovelletaan synkronigeneraattoreille annettuja arvoja.
- Vaikutukset verkon ohjaussignaaleihin
Verkkoonkytkennän laitteisto ei saa estää ohjauksiin käytettävien signaalien kulkeutumista verkossa. /14/
- Epäsymmetriset kytkennät
Vain kolmivaiheiset kytkennät ovat sallittuja yli 25 A nimellisvirrallisissa laitteistoissa. Kytkettäessä laite verkkoon jännite-epäsymmetrian laatukriteerit eivät saa muuttua liityntäpisteestä tarkasteltuna. Liityntälaitteen täytyy

kuitenkin sietää verkon epäsymmetriaa. Standardissa SFS-EN 50160 annetaan raja-arvot pj-verkkojen jännitteen epäsymmetrialle. Standardin mukaan 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvojen keskiarvoista tulee olla enintään 2 % myötäkomponentista.

- Vikasietoisuus ("Ride Through" -ominaisuus)
 Vikasietoisuus, eli kyky pysyä verkossa tietyn aikaa, vaikka jännite ja taajuus poikkeavat normaaliarvojen ulkopuolelle, antaa lisäarvoa tuotantoyksikölle. CIGRE:n (2005) raportissa on esitetty näkemys, että tuotantoyksiköt voidaan jakaa kahteen luokkaan:
 - yksiköt, jotka irrottautuvat verkosta aina havaitessaan häiriötilanteen ja
 - yksiköt, jotka tukevat järjestelmää ja tarjoavat lisäarvopalveluja.
- Takaisinkytkentä verkkoon
 Pienjänniteverkkoon kytketyllä hajautetulla tuotannolla on oltava verkkoyhtiön vaatimusten mukainen erotuskytkin, joka on ympärivuorokautisesti käytettävissä ja lukittavissa. SFS-standardeissa esiintyy määräyksiä erotuskytkimestä. Automaattinen verkkoon uudelleenkytkentä on varustettava riittävällä hidastuksella esim. 5...20 min.
- Tehokerroin
 Sähkölaitteiston tulee toimia siten, että liityntäpisteen perusaallon tehokerroin on $\cos(\varphi) = 0,95 \dots 1$ (ind. tai kap.), loistehon ei saa ylittää 10 % laitteen nimellinäennäistehosta tehokertoimella 1.
- Liityntälaitteet ja ohjaussignaalit
 Ohjauksiin käytettävien signaalien kulkeutumista verkossa ei saa estää, laitteet eivät saa aiheuttaa resonansseja signaalien kanssa. Verkkokäskyohjauksiin käytetään taajuuskaistaa $\sim 100 \text{ Hz} \dots \sim 1350 \text{ Hz}$. Tällä taajuuskaistalla liityntälaitteen tuottama jännitehäiriö ei saa ylittää arvoa 0,1 % U_n signaalin taajuudella. Taajuuksilla, jotka ovat $\pm 100 \text{ Hz}$ signaalin taajuudesta, jännitehäiriön suuruuden täytyy olla alle 0,3 % U_n .

- Lähdön suodattimet ja resonanssitilanteet

Liityntälaitteen lähtösuodattimet eivät saa aiheuttaa resonanssitilanteita muun verkon kanssa, eivätkä ulkopuoliset reaktanssit saa aiheuttaa suodattimen virityksen muuttumista siten, että sen toiminta häiriintyy.

3.4 Ohjeet voimalaitoksen verkkoonliittynnälle

Tässä kappaleessa katsotaan, mitkä Helsingin Energian verkkoonliittynnän ohjeista voimalaitokselle soveltuvat suunnittelukohteenä olevalle CHP-laitoksen verkkoonliittynnälle ja millaisia sopimuksia liitteineen tulee voimalan omistajan olla valmis tekemään verkkohaltijan kanssa.

Sener Sähköenergialiitto ry:n julkaiseman suosituksen mukaan jakeluverkkoon liitetyt voimalaitokset jaotellaan neljään ryhmään seuraavasti:

Luokka 1. Voimalat, joita ei ole liitetty yleiseen jakeluverkkoon, ts. ne ovat aina erossa yleisestä jakeluverkosta.

Luokka 2. Voimalat, jotka toimivat vaihtoehtona yleiselle jakeluverkolle, ts. automaattisella tai manuaalisella syötönvaihdolla toteutetut varavoimalaitteistot.

Luokka 3. Voimalat, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa ilman, että tuotettua sähköä siirretään yleiseen jakeluverkkoon.

Luokka 4. Voimalat, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa niin, että tuotettu sähkö voidaan siirtää osin tai kokonaan yleiseen jakeluverkkoon.

Suunnittelukohteenä oleva CHP-laitos suunnitelman mukaan toimii rinnan jakeluverkon kanssa ja osa tuotetusta sähköstä aiotaan siirtää yleiseen jakeluverkkoon. Eli se on luokan 4 voimala. Katsotaan seuraavassa, millaisia ohjeita antaa Helsingin Energia Oy luokan 4 voimalaitokselle.

Yleiset vaatimukset

Ohjeiden mukaan tämän luokan generaattorilaitteisto voidaan liittää joko keski- tai pienjänniteverkkoon. Liittymispisteen sähköisen jäykkyyden, oikosulkutehon, on oltava vähintään 25-kertainen generaattorilaitteiston nimellistehoon verrattuna. Jos generaattori-

laitteiston käynnistysvirtasysäys on nimellisvirtaa suurempi, kasvaa vastaavasti liittymispisteen jähkyysvaatimus yhtälön 5 mukaisesti.

$$S_k = 25 \cdot S_n \cdot \frac{I_{\text{käynnistys}}}{I_n} \quad (5)$$

missä $I_{\text{käynnistys}}$ on generaattorilaitteiston käynnistyshetkellä ottama virta [A]

I_n on laitteiston nimellisvirta [A]

S_k on liittymispisteeltä vaadittava oikosulkuteho [kVA]

S_n on laitteiston nimellinäennäisteho [kVA].

Seuraavat ohjeet kohdistuvat generaattorilaitteistoon ja suojuuksiin:

Generaattoreiden tulee rinnankäytön aikana toimia suuremmalla tai yhtä suurella tehokertoimella kuin $\cos \varphi = 0,95$ (ind. tai kap.) ellei muuta ole erikseen sovittu. Generaattorilaitteisto on varustettava suojalaitteilla, jotka kytkevät laitteiston tai tuotantolaitteiston syöttämän saarekkeen irti yleisestä verkosta, jos verkkosyöttö katkeaa tai jännite tai taajuus laitteiston liitännänoissa poikkeaa normaaliverkon ilmoitetuista arvoista. Verkkosyötön katkeaminen voidaan todeta esim. seuraavilla yksinsyötön estoreleillä: taajuuden muutosnopeusrele df/dt , myötä-alijänniterele $U1 <$, impedanssirele dZ tai muu soveltuva, jakeluverkon haltijan hyväksymä rele. Releiden tulee olla kolmivaiheisia.

Helsingin Energia Oy suosittelee generaattorilaitteiston suojuukselle ja rakenteelle asetettavan sellaisia vaatimuksia, että laitteisto sietää rinnankäyntitilassa rikkoutumatta yleisen jakeluverkon käyttöhäiriöt, kuten oikosulut, maasulut pikajälleenkytkentöineen ($t = 0,4$ sekuntia), jännitekuopat ja taajuushäiriöt.

Generaattorilaitteistoa ei saa kytkeytyä yleiseen jakeluverkkoon, elleivät jakeluverkon jännite ja taajuus pysy vaadittujen suojalaitteiden asettelurajojen sisäpuolella. Yleisen jakeluverkon jännitteen palatessa saa generaattorilaitteisto kytkeytyä yleiseen jakeluverkkoon sen jälkeen, kun jakeluverkon jännite on ollut normaaliarvossaan vähintään 10 min.

Helsingin Energia Oy:n ohjeessa on myös mittaussuureiksi. Suojareleiden ja jakeluverkon jännitteellisyyttä osoittavat mittaussuureet tulee mitata liittymän verkosta, pääkatkaisijan alapuolelta jakeluverkosta päin katsottuna. Tuottajan jakelulaitteistoon tulee

sisältyä lukittava erotuskytkin, jolla voidaan tarvittaessa estää tahaton sähkön syöttö ulkopuoliseen verkkoon. Kytkimen tulee sijaita sellaisessa paikassa, johon jakeluverkon haltijan edustajalla on helppo pääsy, esim. pääkeskuksessa pääkytkimen tai mittarikeskuksen välittömässä läheisyydessä. Selkeät opastetarrat tulee asettaa, jotta kytkin on yksiselitteisesti ja helposti tunnistettavissa. Tuotantoliittymän tai -paikan energiamittauksen tulee perustua tuntimittaukseen ja kaksisuuntaisuuteen. Jakeluverkon haltijan loismaksuperiaatteesta johtuen mittarilta voidaan edellyttää myös kaksisuuntaista loistehon mittausta. Lisäksi tuottajan vastuulla on toteuttaa tuotannon ja muun sisäisen kulutuksen mittausta. /12/

Yllä olevat Helsingin Energian Oy:n luokan 4 pienvoimalaan kohdistuvat käytännön ohjeet täydentävät kappaleessa 3.2 esitetyt voimalaitoksen suojausvaatimukset ja kappaleessa 3.3 esitetyt sähkölaadun vaatimukset ja niiden on oltava PAKU-CHP-voimalaitoksen verkkoonliittymän suunnittelun lähtökohtana.

Suojareleiden asetteluarvot

Helsingin Energia suosittelee taulukon 3 mukaisia asetteluarvoja 3 ja 4 luokkien voimalaitosten suojarieleille.

Taulukko 3. Luokkien 3 ja 4 tuotantolaitteistojen ja yleisen jakeluverkon välisen rajapinnan suojarieleiden asetteluarvot /12/

Parametri	Kokonaisaikahidastus, s	Laukaisun raja-arvot
Ylijännite (porras 1)	1.5	$U_n + 10\%$
Ylijännite (porras 2)	0.15	$U_n + 15\%$
Alijännite (porras 1)	5	$U_n - 15\%$
Alijännite (porras 2)	0.15	$U_n - 50\%$
Ylitaajuus	0.2	51.0 Hz
Alitaajuus	0.5	48.0 Hz
YSE	0.15	*)
*) Laukaisuraja-asettelut sovitaan jakeluverkon haltijan kanssa riippuen valitusta		

YSE-suojatyypistä

Taulukon aikahidastus muodostuu releen ja katkaisijan yhteenlasketusta toiminta-ajasta; Releiden tulee olla 3-vaiheisia, paitsi taajuusreleiden, jotka voivat olla yksi-vaiheisia; Generaattorilaitteistoille joiden teho on ≥ 1 MVA, edellytetään sähkölaistyyppisiä releitä; Pienemmille laitteistoille hyväksytään teollisuusreleet.

Tuotantolaitteiston omaan sisäiseen suojaukseen liittyvien suojareleiden asetteluarvot määrittelee laitteiston toimittaja. Helen Sähköverkko Oy suosittelee, että yllä olevan taulukon suojareleitä ei integroida tuotantolaitteistoautomaatiikkaan releiden helpon vaihdettavuuden ja koestettavuuden vuoksi. /12/

Sopimukset

Suunnitelma, johon sisältyvät teknisten tietojen lisäksi selvitykset voimalan verkkoon liittymisautomaatiikasta ja suojauksesta, sekä voimalaitoksen pää- ja suojauskaaviot, tulee hyväksyttävä jakeluverkonhaltijalla ennen laitteiston käyttöötoa. Esimerkiksi Helsingin Energia antaa seuraavat ohjeet sopimuksen tekemisestä: ”Liittymis- ja Verkkosopimukset tehdään perustuen yleisiin Energiamarkkinaviraston hyväksymiin tuotannon liittymis- ja verkkopalveluehtoihin, TLE05 ja TVPE05. Tuotantolaitteistosta on ilmoitettava jakeluverkon haltijan perustietolomakkeella (”Jakeluverkko on liitetyn tuotantolaitteiston perustietolomake”) kolme (3) kuukautta ennen laitteiston verkkoon kytkentää ja laitteiston tiedot pää- ja suojauskaavioineen on liitettävä liittymis- ja verkkosopimukseen. Tuotannon liittymis- ja verkkosopimus sitovine liittymismaksusopimuksineen tehdään ennen jakeluverkon haltijan laitteiston liittämisen edellyttämien verkkoinvestointien aloittamista tai aiemmin olemassa oleva liittymis- ja verkkosopimus päivitetään vastaamaan syntyvää uutta tilannetta. Ennen laitteiston hyväksymistä verkkoon jakeluverkon haltijalle tulee toimittaa relesuojauksen toiminnan testauspöytäkirja (”Jakeluverkkoon liitetyn tuotantolaitteiston käyttöönoton testauspöytäkirja”) josta ilmenee myös releiden asetteluarvot. Sopimus mahdollisista poikkeavista mittausjärjestelyistä ja ilmoitus sähkön ostajasta/myyjästä toimitetaan jakeluverkon haltijalle ennen, kun tuotantolaitteisto saadaan kytkeä jakeluverkkoon (huom. tuotetun sähkön ostaja voi olla muu taho kuin tuotantopaikkaan sähköä myyvä).” /12/

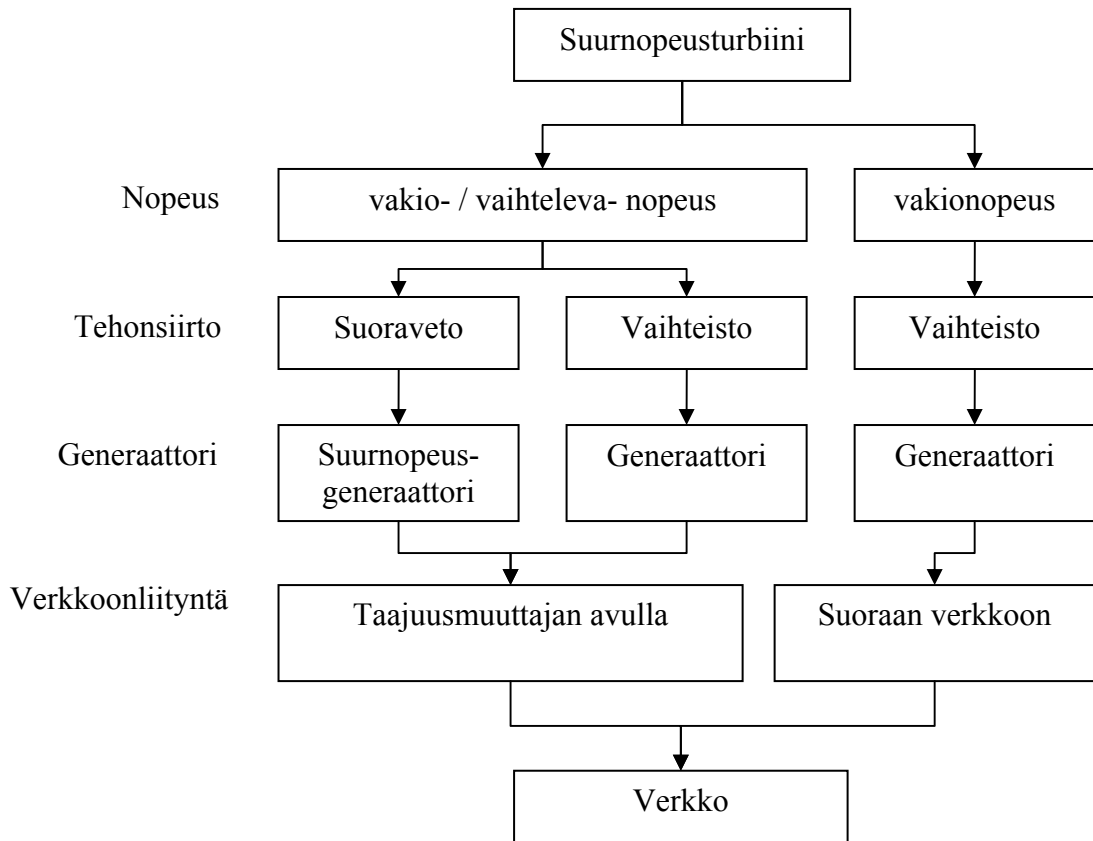
4. PAKU-CHP-VOIMALAITOKSEN LIITÄMINEN JAKELUVERKKOON

Tässä kappaleessa suunnitellaan PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliityntä 400kW generaattorilaitteistolle. Mahdolliset PAKU-CHP-laitokseen tulevat generaattorilaitteistot on käsitelty kappaleessa 2. Ne ovat vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tai itsemagnetoitu tahtigeneraattori, kestmagneettitahtigeneraattori tai verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori. Generaattorilaitteisto voidaan kytkeä suoraan verkkoon tai tehoelektronii-kan eli taajuusmuuttajan avulla.

Suunnittelun kohteiksi tulee siis kuusi erilaista generaattoriliityntävaihtoehtoa:

- vierasmagnetoitu tahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- kestmagneettitahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä,
- kestmagneettitahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä,
- epätahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä.

Kuvassa 16 on esitetty verkkoonliitynnän valinnan tekijät:

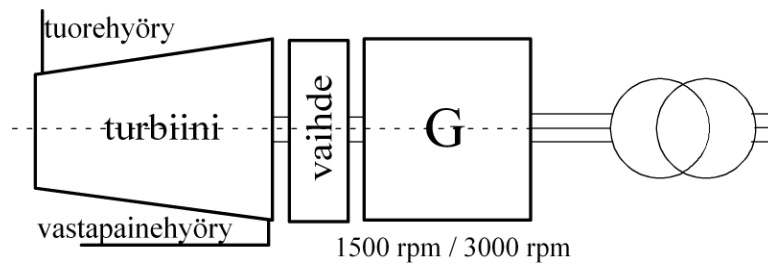


Kuva 16. Kaavio mekaanisen energian muunnosprosessista turbiinista sähköiseksi energiaksi verkkoon eri verkkoonliityntävaihtoehdoilla.

Suunnittelun pohjaksi on teoriaosassa koottu tietoa generaattorien toimintaperiaatteista. Käyttö- ja suojausmenetelmät riippuvat generaattorilaitteistosta. Generaattorilaitteiston käyttöä on suunniteltava kappaleessa 2 esitettyjen toimintaperiaatteiden mukaisesti. Verkkoonliityntään on oltava kappaleessa 3 asetettujen vaatimuksien, suositusten ja esitettyjen ohjeiden mukainen sekä suojauksen että sähkön laadun kannalta.

4.1 Suoraan verkkoon kytketty generaattori

Vakionopeudella toimiva generaattori, joka on liitetty turbiinin akselille alennusvaihteen välityksellä, voidaan kytkeä suoraan verkkoon. Generaattorista saadaan lähtönä verkkotaajuista sähköä. (kuva 17).



Kuva 17. Suoraan verkkoon liitetty generaattori, joka on kytketty turbiinin akselille alennusvaihteen välityksellä.

Suoraan verkkoon voidaan kytkeä epätahtigeneraattori ja vierasmagnetoitu- ja kestopagneetti- tahtigeneraattori.

4.1.1 Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori

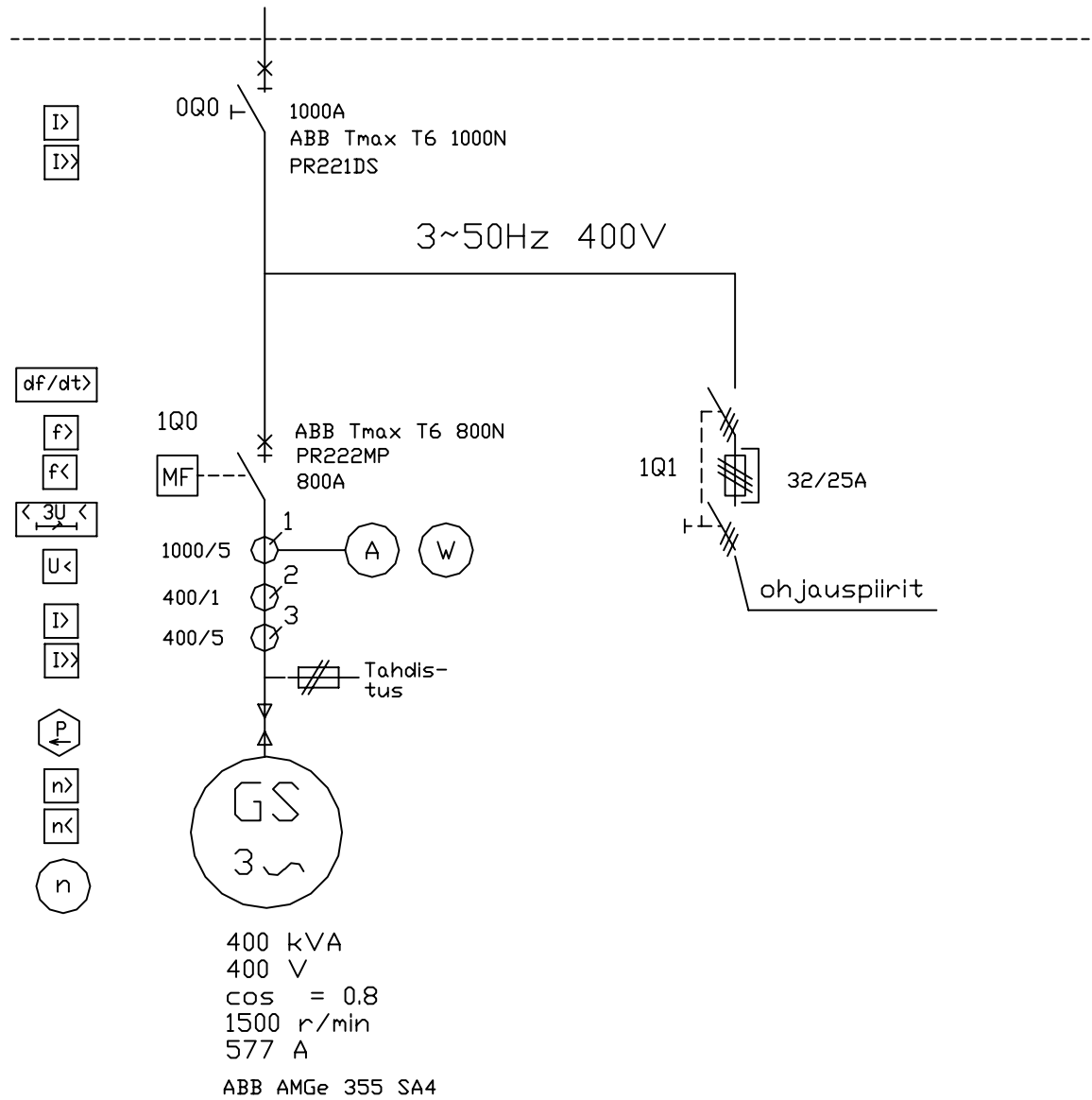
Tahtigeneraattorin toimintaperiaatteet on esitetty kappaleessa 2.1. Ja tarkemmat niistä PAKU - CHP - laitoksen verkkoonliittymän kannalta ovat:

- tahtigeneraattori on tahdistettava kytkettäessä suoraan verkkoon.
- tahtigeneraattori on magnetoitava, ja magnetoinnin tavoitteena ennen kytkemistä verkkoon on jännitteensäätö ja tahdistuksen jälkeen on loistehon säätö.
- suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää jäykkä verkko

Tahtigeneraattori tahdistetaan verkkoon automaattisella synkronointilaitteella. Tahdistuskäsite esitettiin kappaleessa 2.1 ja synkronointilaitte esitetään kappaleessa 5.2.

Jännitteensäädin säätää tahtigeneraattorin magnetointia. Magnetointimenetelmiä ja loistehonsäätöä esitettiin kappaleessa 2.1 ja jännitteensäädin esitetään kappaleessa 5.10. Tahtigeneraattorin pätötehoa säädetään nopeudensäätimellä, jota esitetään kappaleessa 5.11, ja säädön periaate on esitetty kappaleessa 2.1.1.

Kuvassa 18 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin suojauskaavio.



Kuva 18. Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin suojauskaavio.

Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon, kun tahdistusehdot on täytetty. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 4.3.

4.1.2 Kestomagneettitahtigeneraattori

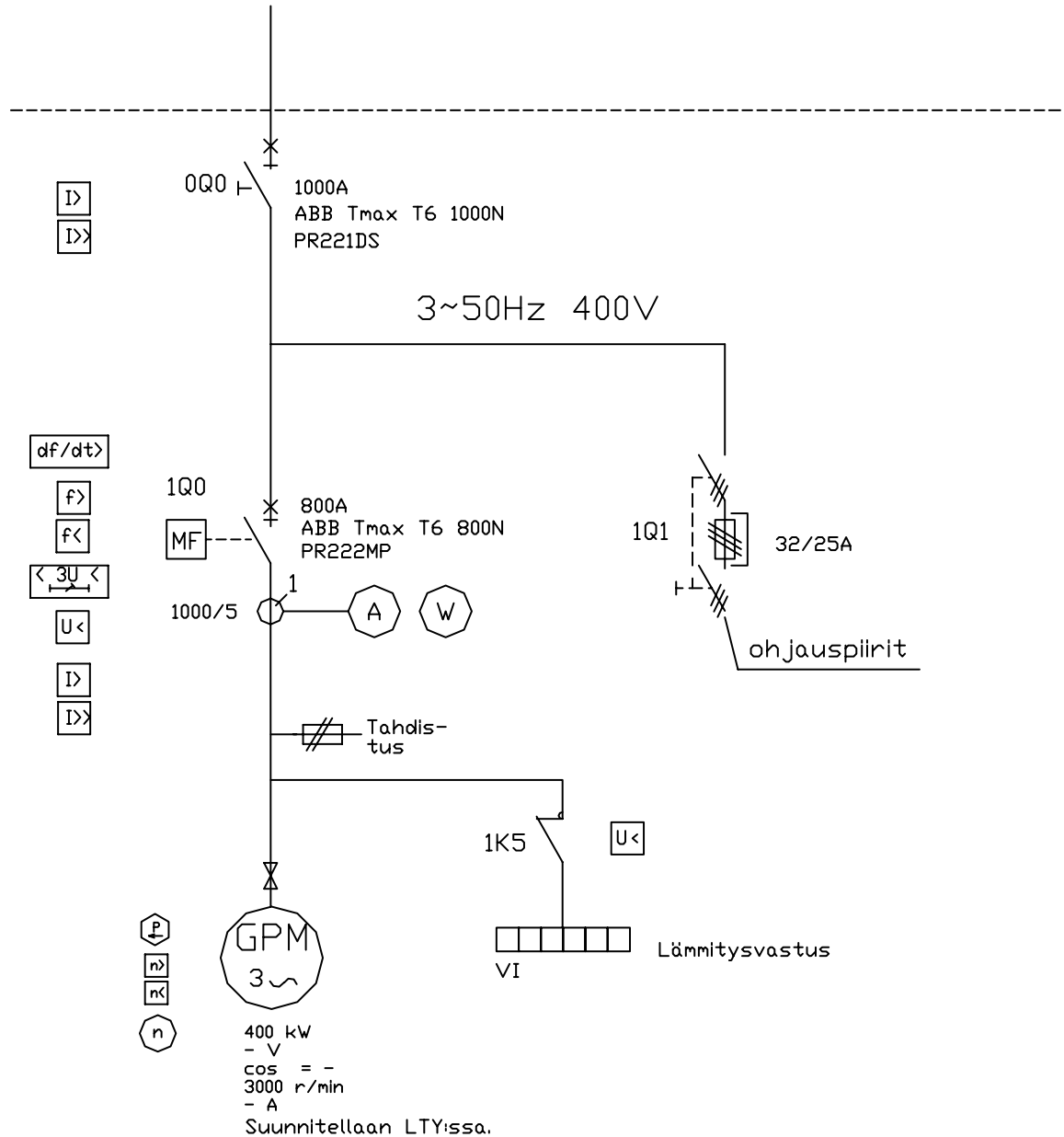
Tahtigeneraattorin toimintaperiaatteet on esitetty kappaleessa 2.1. Ja tarkemmat niistä PAKU - CHP - laitoksen verkkoonliittymän kannalta ovat:

- tahtigeneraattori on tahdistettava kytkettäessä suoraan verkkoon.
- suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää jäykkä verkko
- kestmagneettigeneraattori ei tarvita erillistä magnetoimisvirtaa
- kestmagneettigeneraattorin vuota ei ole mahdollista säätää
- kestmagneettigeneraattori on oltava suunniteltu suoraan verkkoon kytkettäväksi. Viitteessä [15] löytyy ohjeita ja vaatimuksia suoraan verkkoon kytkettävän kestmagneettigeneraattori suunnitteluun.

Tahtigeneraattori tahdistetaan verkkoon automaattisella synkronointilaitteella. Tahdistuskäsite esitettiin kappaleessa 2.1 ja synkronointilaitte esitetään kappaleessa 5.2.

Tahtigeneraattorin pätötehoa säädetään nopeudensäätimellä, jota esitetään kappaleessa 5.11, ja säädön periaate on esitetty kappaleessa 2.1.1.

Kuvassa 19 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn kestmagneettitahtigeneraattorin suojauskaavio.



Kuva 19. Suoraan verkkoon kytketyn kestoprojektigeneraattorin suojauskaavio.

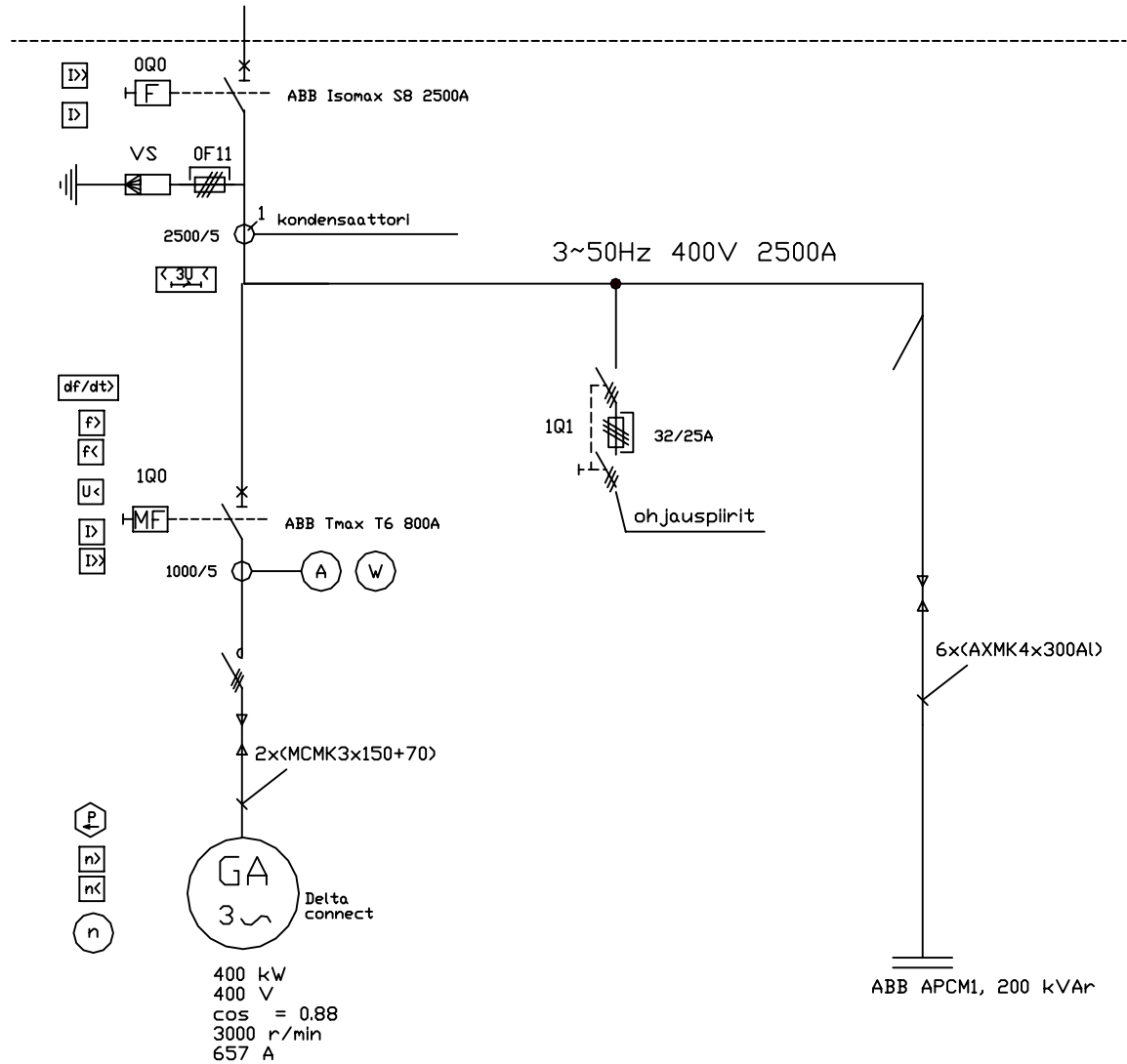
Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon, kun tahdistusehdot on täytetty. Jännitteenoususuojana (ryntäyssuoja) on kontaktorin 1K5 kautta kytketty lämmitysvastus, kontaktori 1K5 on auki kun jännite on saalituissa rajoissa. Tarkempi suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 4.3.

4.1.3 Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori

Epätahtigeneraattorin toimintaperiaatteet on esitetty kappaleessa 2.2. Ja tärkeimmät niistä PAKU - CHP - laitoksen verkkoonliittymän kannalta ovat:

- suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää verkko
- generaattori ottaa magnetointinsa verkosta
- laitoksen tehokerroin kompensoidaan kompensointiparistolla
- epätahtigeneraattoria ei tarvitse tahdistaa verkkoon
- generaattori kytketään verkkoon mahdollisimman lähellä tahtinopeutta käynnistysvirran kestoajan minimoimiseksi

Kuvassa 20 on esitetty suoraan verkkoon epätahtigeneraattorin suojauskaavio.

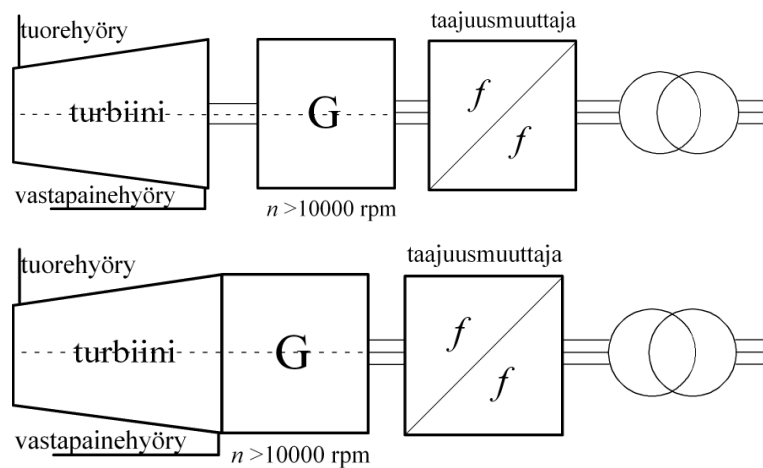


Kuva 20. Epätahtigeneraattori suoralla verkkoliitännällä, suojauskaavio.

Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon mahdollisimman lähellä tahtinopeutta. Verkkomagnetoidun epätahtigeneraattorin tehokerrointa nostetaan käyttäen kompensointikondensaattorilaitteistoa. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 4.3.

4.2 Verkkovaihtosuuntaajan avulla verkkoon kytketty generaattori

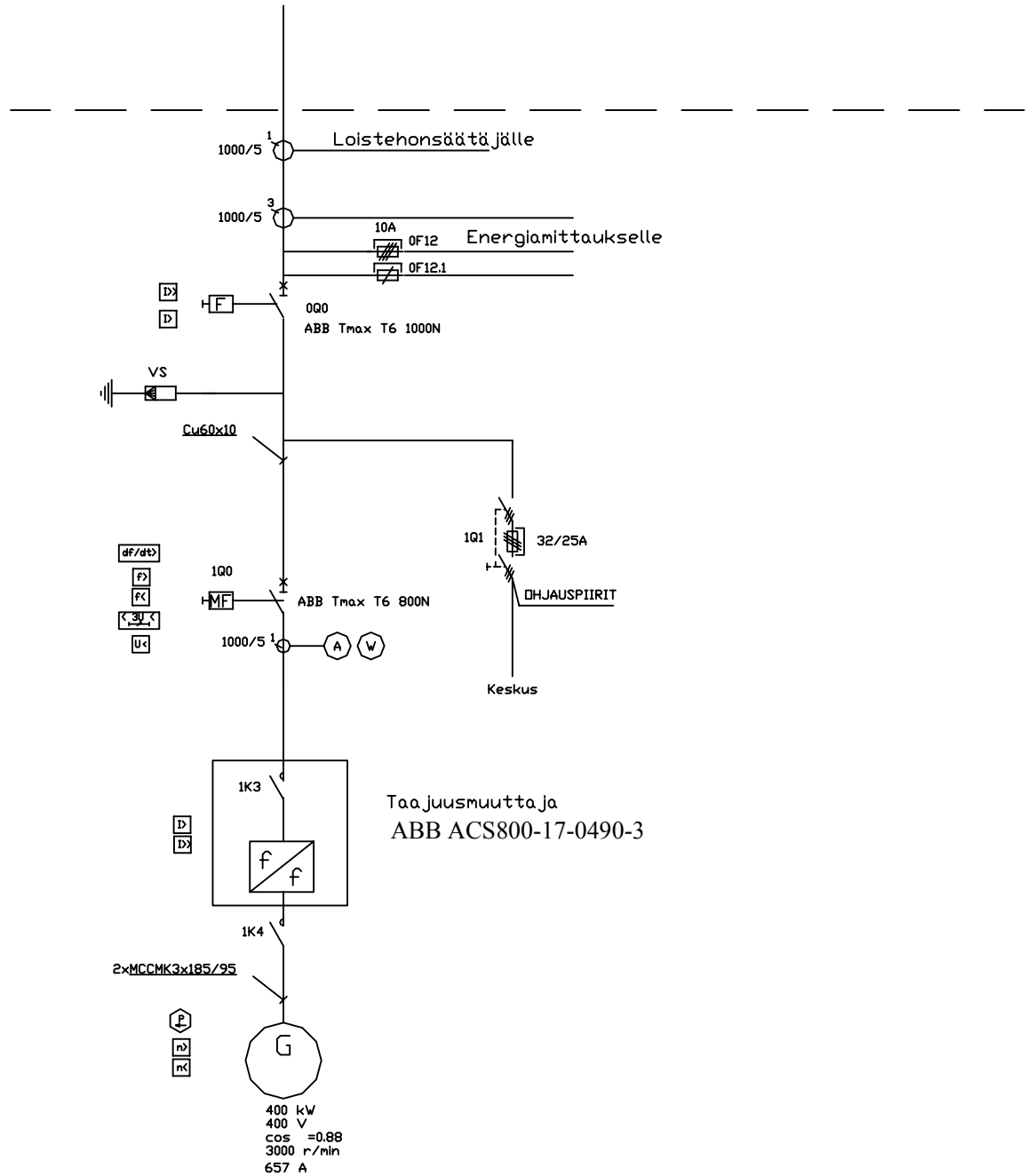
Sekä suurnopeusturbogeneraattorin käyttöön että vaihtelevalla nopeudella pyörivän turbiinin käyttöön tarvitaan verkkovaihtosuuntaajaliityntä, koska taajuusmuuttajan välityksellä sähköverkkoon kytketyn epätahti- tai tahtigeneraattorin tuottama liian matala - tai korkeataajuinen vaihtovirta voidaan muuttaa verkkotaajuiseksi. Tehoelektronikalla verkkoon voivat olla kytkettyjä perinteisten tahtigeneraattorien ja epätahtigeneraattorien lisäksi modernit generaattorit, kuten suurnopeusgeneraattorit ja hermeettiset suurnopeusgeneraattorit. (kuva 21)



Kuva 21. Turbogeneraattori tehoelektronikalla. a) Suurnopeusgeneraattori, b) Hermeettinen suurnopeusturbogeneraattori.

Taajuusmuuttaja sisältää normaalisti tietyt suojaukset vikatilanteiden varalta. Näitä ovat ylivirrat generaattorissa, muuttajan välipiirissä tai verkon syöttöpisteessä, verkkojännitteiden muutokset tai epäsymmetria, ylijännite sekä muuttajan kytkinkomponenttien ylikuormitus. Laskemalla verkkorajapinnan yli siirtyvää tehoa voi taajuusmuuttaja suorittaa takatehosuojauksen itsenäisesti muuttamalla generaattorin taajuutta ja lopettamalla moduloinnin, jos tehon suunta ei säädöstä riippumatta pysy oikeana.

Käsitellään tässä kaikki PAKU – CHP – laitoksen mahdolliset taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyt generaattorit yhdessä. Suojauserot huomataan suojauskaavion selostuksessa. Kuvassa 22 on esitetty taajuusmuuttajakäyttöisen generaattorin suojauskaavio.



Kuva 22. Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn generaattorin suojauskaavio.

Ylivirtasuojus toteutetaan taajuudenmuuttajan sisäisellä ylivirtasuojauksella. Takatehosuojus toteutetaan taajuudenmuuttajan teho- tai vääntömomenttiohjeen avulla. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 4.3.

Taajuusmuuttajana on esimerkissä ABB:n ACS800-17-0490-3 verkkoonjarruttava taajuusmuuttaja. Taajuudenmuuttaja ja siihen liittyvä automaatio diagnosoi vikatilanteet ja hallitsemattomassa tilanteessa kytkevät suuntaajan irti verkosta tai generaattorista.

Generaattorin puolella olevaa kontaktoria 1K4 tarvitaan vain kestopagneettigeneraattorin verkkoonliittymän tapauksessa. Silloin vikatilanteessa voidaan erottaa taajuusmuuttaja generaattorista, jos generaattorisuuntaaja ei toimi. Samalla on huolehdittava turbiini pikasulkuun, jotta kestopagneettikone ei ylinopeudelle joutuessaan tuhoa taajuusmuuttajan välipiiriä tai itseään mekaanisesti. Taajuusmuuttajasta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 5.9.

4.3 Suojaus

Tässä kappaleessa esitetty ensiö- ja toisiosuojauksen selostus pätee voimalaitoksen kaikille generaattorivaihtoehdoille ja vastaa kuvan 18, 19, 20 ja 22 generaattoreiden suojauskaavioita.

4.3.1 Ensiösuojaus

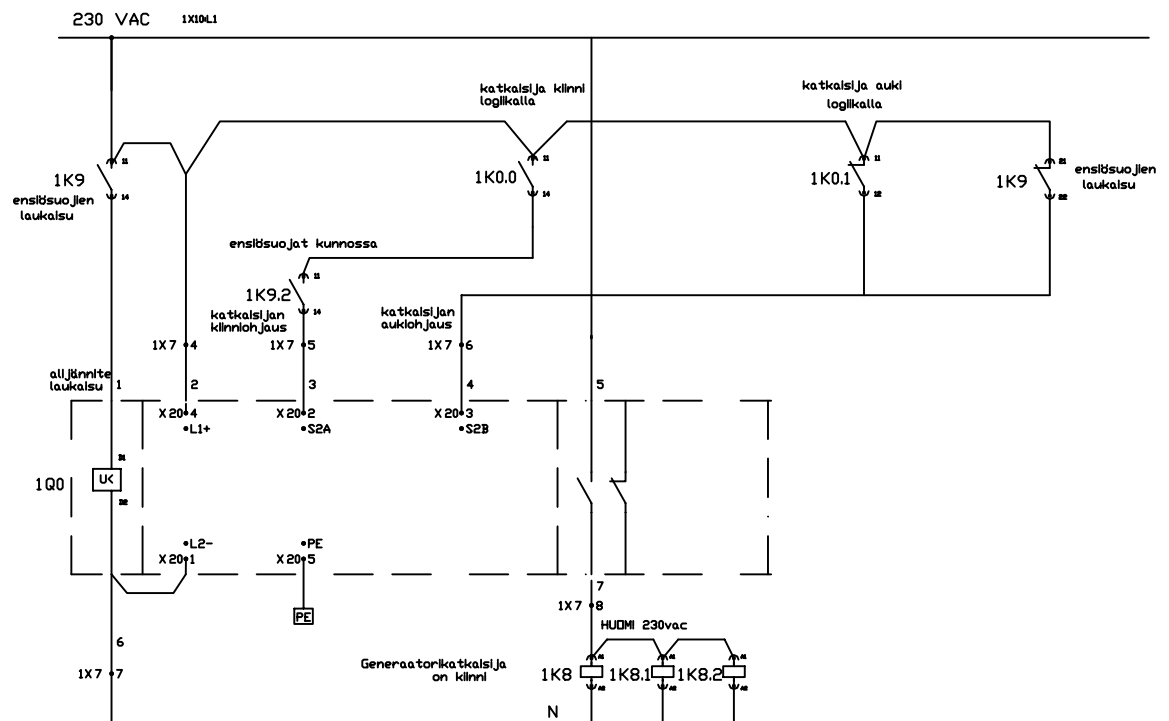
Ensiösuojaukset tarkoittavat suojauksia, jotka erilliset suojalaitteet toteuttavat ilman sovelluskohtaista ohjelmointia. Ensiösuojaukset ovat riippumattomia PLC - ohjelmista. Nämä suojaukset ovat välttämättömiä sähköiskulta suojauksessa ja palosuojauksessa. Ne myös takaavat vertikaalisesti selektiivisen suojauksen ylivirta- ja maasulkutilanteissa.

Ensiösuojaus muodostuu seuraavasti. Turbiinin ohjauskeskus on suojattu ylivirtaa vastaan pääkatkaisijalla 0Q0. Pääkatkaisijalla kytketään ja erotetaan voimalaitos verkosta. Pääkatkaisijan relesuojausyksiköt takaavat oikosulkusuojauksen ja ylikuormitussuojauksen. Pääkatkaisijan työvirtalaukaisin toimii generaattorikatkaisijan pettäessä, eli se takaa erottamiseen silloin, kun generaattorikatkaisija ei avaudu. Pääkatkaisijan on oltava erottamiseen hyväksytty ja oltava lukittavissa auki asentoon.

Kaikki ohjaus- ja säätöpiirit on suojattu ylivirtaa vastaan kytkinvarokkeilla (1Q1) ja johdonsuoja-automaateilla.

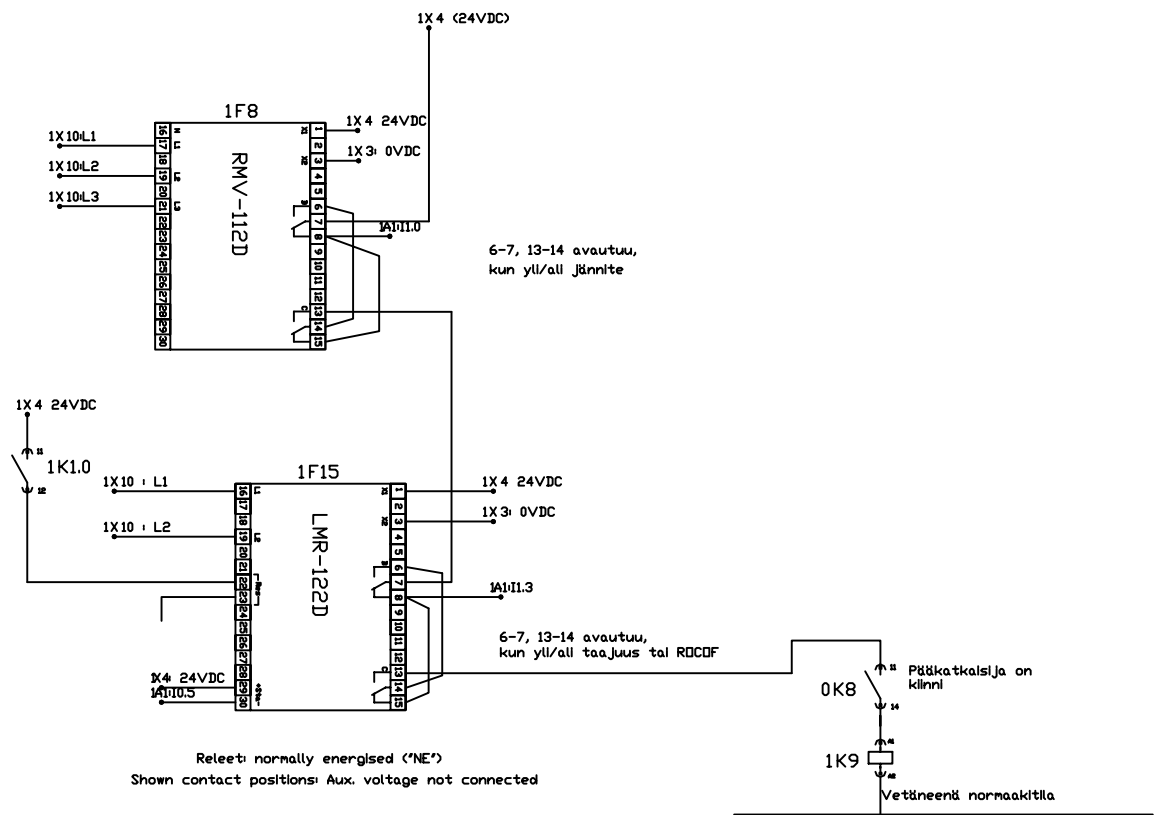
Generaattorikatkaisija (1Q0) on varustettu moottorisuojareleellä, joka takaa generaattorin ylivirta-, ylikuormitus-, oikosulku- ja maasulkusuojauksen. Generaattorikatkaisijalla on auki asennon ilmaisu ja lukitus.

Generaattorikatkaisijan alijännitelaukaisin kytketään jännite- taajuusreleiden laukaisupiiriin (kuva 23, 24). Verkkokatkoreleellä on tehty yli- ja alitaajuussuojaus. Jännitereleellä on tehty yli- ja alijännitesuojaus. Verkkokatko (yksinsyöttöesto suojaus) havaitaan jännitereleellä ja verkkokatkoreleellä. Jännitereleen ja verkkokatkoreleen laukaisupiirit on kytketty sarjaan. Jos toinen tai molemmat releet havahtuvat ja katkaisevat laukaisupiiriin, jää generaattorikatkaisijan alijänniterele jännitteettömäksi ja katkaisee pääpiiriin. Alijännitelaukaisimen käyttö työvirtalaukaisimen sijaan varmistaa, että aina apujänniteteiden hävittäessä tai suojauspiiriin katketessa riippumatta suojareleistä tai ohjausohjelmasta generaattorikatkaisija aukeaa.



Kuva 23. Generaattorikatkaisijan johdotus- ja piirikaavio.

Kuvassa 24 on esitetty jännitereleen ja verkkokatkoreleen johdotus- ja piirikaavio.



Kuva 24. Jännitereleen ja verkkokatkoreleen johdotus- ja piirikaavio.

4.3.2 Toisiosuojaus ja toiminta häiriö-/laitevikatilanteissa

Toisiosuojaus toteutetaan ohjelmallisesti. Toisiosuojauksen suojaustoimintoja ovat turpiinin takateho, vajaateho ja turbogeneraattorin paineistus. Toisiosuojustoiminnan proseduurit on koottu taulukossa 4.

Taulukko 4. Toisiosuojaus

Vikatilanne	Toiminta
Generaattorikatkaisija aukeaa, kun generaattori syöttää verkkoa	Kun PLC:n tulo "Katkaisija kiinni" tulee jännitteettömäksi, PLC antaa turpiinin höyryventtiilin sulkeutua. "Gen. häiriö" relelähtö sulkeutuu. Kyseinen häiriövalo vilkkuu.
Vajaateho	Generaattori ajetaan pois verkosta hallitusti. Häiriövalo vilkkuu.
Takateho	Generaattorin katkaisija aukaistaan, PLC antaa turpiinin höyryventtiilin sulkeutua. "Gen. häiriö" relelähtö sulkeutuu. Kyseinen häiriövalo vilkkuu.
Turbogeneraattorin paineistushäiriö	Generaattori ajetaan pois verkosta hallitusti. Häiriövalo vilkkuu.
Generaattorikatkaisija ei aukea	PLC laukaisee pääkatkaisijan 0Q0.
PLC vika tai apujännitevika	Generaattorikatkaisija aukeaa, turpiinin höyryventtiili menee kiinni. "Gen. häiriö" relelähtö sulkeutuu. Kyseinen häiriövalo vilkkuu.

5. VERKKOONLIITYNTÄLAITTEISTO

Verkkoonliityntälaitteistolla tarkoitetaan laitteistoa, joka mahdollistaa vaatimuksien ja suositusten mukaisen sähkötuotannon liittämisen yleissähköverkkoon. Se sisältää kaikki generaattorilaitteiston ohjaukseen tarvittavat tehtävät, joita on käsitelty kappaleessa 2 ja antaa mahdollisuudet suunnitella vaatimuksien ja ohjeiden mukaisen verkkoonliitynnän. Sen tarkoitus on koordinoita voimalaitoksen verkkoon liittämistä ja sähkötuotantoa sekä huolehtia sähkön laadusta ja turvallisuudesta.

Tässä kappaleessa esitetään ensin CHP-laitoksen mahdolliset generaattorilaitteistot, joiden pohjalta suunnitellaan verkkoonliityntä ja määritellään sekä valitaan CHP-laitoksen verkkoonliityntälaitteiston toimilaitteet, jotta saadaan toimiva automaattioratkaisu. Kappaleessa esitellään kootusti eri valmistajien laitteita ja vertaillaan laitteiden ominaisuuksia.

Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän suunnittelun pohjaksi on valittu AEM:n valmistama harjaton itsemagnetoitu tahtigeneraattori AEM SE 315 L4. Toinen vaihtoehto on esimerkiksi ABB:n AMGe 355 SA4. Generaattoreilla on samat parametrit: näennäisteho 400 kVA, pätöteho 320 kW, jännite 400V, tehokerroin $\cos \varphi = 0.8$, ind. pyörimisnopeus 1500 rpm, virta 577A. Generaattorit ovat itsemagnetoituja eivätkä vaadi ulkopuolista magnetointivirtaa.

Epätahtigeneraattorin verkkoonliitynnän suunnittelun pohjana on ABB:n valmistama oikosulkumoottori tyyppiä M2CA 400 MLA. Sen tärkeämmät parametrit verkkoonliitynnän näkökulmasta ovat pätöteho 400kW, jännite 400V, tehokerroin $\cos \varphi = 0.88$, pyörimisnopeus 3000 rpm, virta 657A.

5.1 Laitosautomaatio

Markkinoilla on useita kone- ja pienautomaatioon ratkaisuihin erikoistuneita ohjelmoitavien logiikkojen valmistajia. Logiikkasarjoja tarjoavat mm. Siemens, Omron, Schneider ja Allen-Bradley. PAKU-CHP-laitoksen laitosautomaatiolle sopivia logiikoita ovat esim. Siemensin S7-200, Omronin GJ1H, Modicon Premium, Allen-Bradleyn PLC5/1771.

Logiikat ovat periaatteitaan hyvin samanlaisia, mutta tässä automatiikan logiikaksi valittiin Siemensin S7-200 koska se on eniten käytetty. S7-200 sarjan CPU 224 moduuli on valittu CPU-yksiköksi. CPU 224 moduulilla ohjelmamuistin koko on 12 k-tavua ja tiedostomuistin koko 8 k-tavua. Nämä riittävät verkkoonliittynnän ohjaus- ja valvontalohkoille. Integroituna on 14 binäärituloa ja 10 binäärilähtöä, mitkä eivät riitä verkkoonliittynnän ohjaus- ja valvontakytkennöille, mutta CPU 224:n I/O-liitäntöjä voidaan laajentaa käyttämällä enintään 7 lisämoduulia. Automaation välisiin yhteyksiin on kommunikaatioliitäntä RS 485 ja käytettävät protokollat ovat: PPI ja MPI. Optioina moduulilla olevat liittymät: PROFIBUS DP tai AS-i, joita voidaan myös hyödyntää automaation kommunikoinnissa. Siemensin S7-200 logiikan ohjelmointityökaluna on STEP 7 ohjelmistopaketti.

Koska CPU 224 perusmoduulin tarjoama I/O-määrä ei ole riittävä, logiikan digitaalista I/O:ta laajennetaan käyttäen digitaalista tulo-/lähtömoduulia EM 223. Tässä moduulissa on 32 digitaalista tuloa ja 32 digitaalista lähtöä. Sen binäärilähtöjen avulla ohjataan generaattorikatkaisijaa, releitä, höyryventtiiliä, taajuusmuuttajaa, nopeudensäädintä, jännitteensäädintä ja hälytyslamppuja. Binäärituloja käytetään laitteiden ja prosessin tilojen seurantaan.

Sähköisten analogiasuureiden prosessista logiikan luettavaksi tarvitaan analoginen tulo-/lähtömoduuli EM 235. Moduulissa on analogialähtö ja nelikanavainen analogiatulo. EM235 saa tehon ja nopeuden analogiasignaalin mittamuuntimesta tai taajuusmuuttajasta, jos generaattorilaitteisto on kytketty verkkoon verkkovaihtosuuntaajalla. Analogialähtöä käytetään taajuusohjesignaalin taajuusmuuttajalle välittämiseksi.

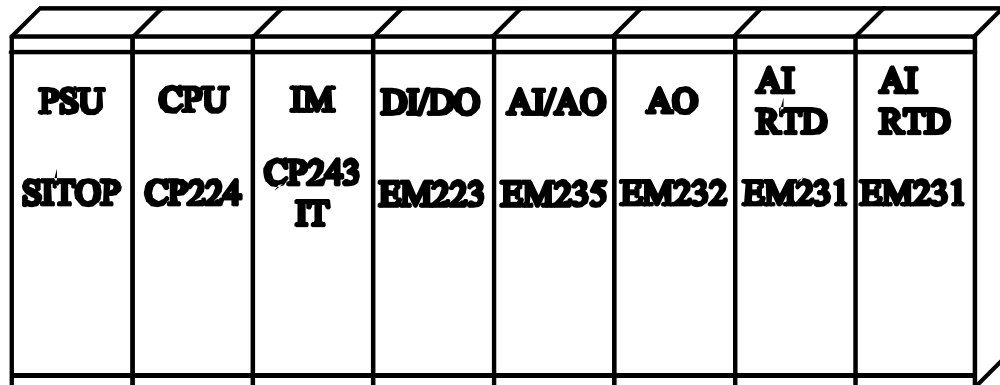
Kojeiston kaapin ovelle on asennettu tehon ja nopeuden mittarit. Analogiasignaalit niille saadaan analogialähtömoduulilla EM 232. Moduulissa on kaksi analogialähtöä, jotta yhdellä moduulilla voidaan viedä mittaussuureet kummallekin mittarille.

Generaattorin lämpötilan valvontaan käytetään lämpöparimoduuleja EM 231 RTD. Moduulissa on kaksi tuloa. Lämpöparimoduuli on yhteensopiva useiden generaattorilaitteistoissa olevien antureiden kanssa. Lämpöparimoduulien tarpeen määrää generaattorilaitteistossa olevien antureiden luku.

Laitosautomaation ja muiden automaation laitteistojen välisen nopean tiedonsiirron turvaa ethernetmoduuli CP 243-1 IT. Ethernetmoduulin avulla laitosautomaation konfigurointi, ohjelmointi ja huolto voidaan tehdä teollisuusethernetin kautta. Moduuli sisältää web-serverin, ja sitä käyttäen laitosautomaation prosessidata voi olla samanaikaisesti saatavissa web-selaimella, mikä voi hyödyntää kaukovalvonnassa. Moduuli antaa myös mahdollisuudet lähettää kaukovalvontajärjestelmään ilmoituksia sähköpostiviestinä.

Logiikka tarvitsee toimiakseen 24 V ulkoisen jännitesyötön teholahteelta. Teholähteenä käytetään Siemensin SITOP teholähdemoduulia.

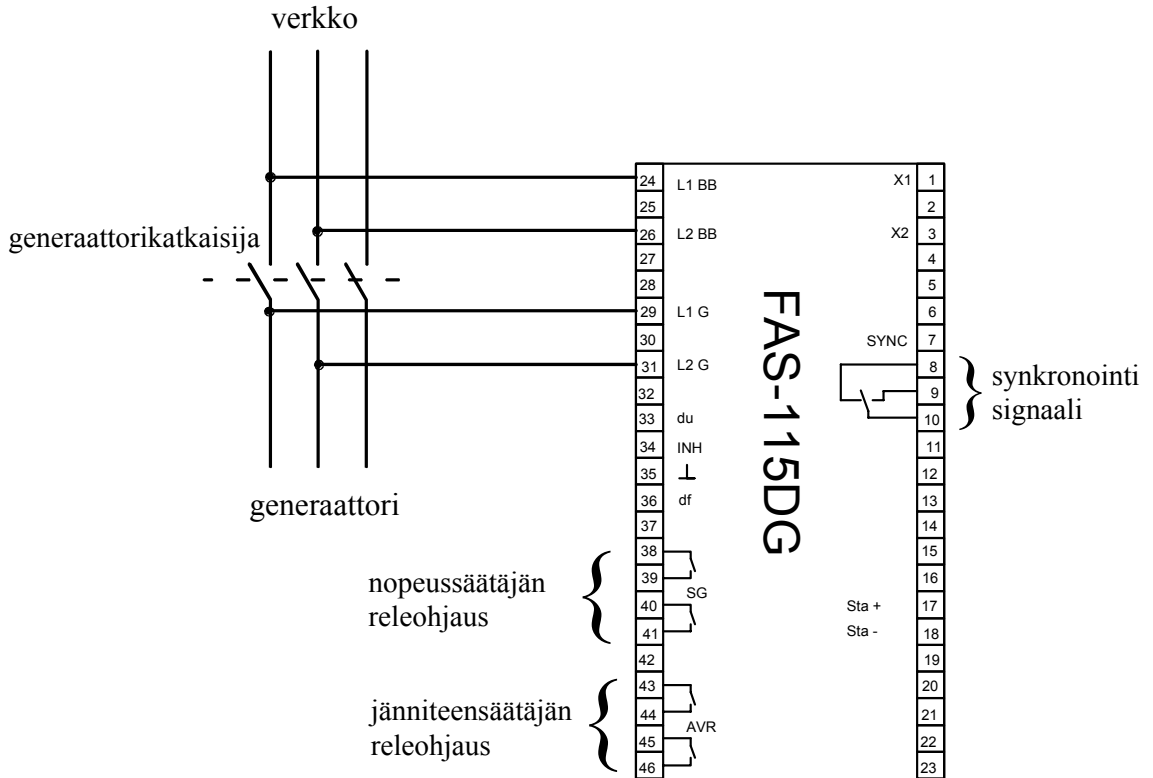
Kuvassa 25 on esitetty laitosautomaation kehikko.



Kuva 25. Laitosautomaation kehikko.

5.2 Synkronointilaite

Tahdistuksen periaate on käsitelty kappaleessa 2.2. Generaattorin tahdistukseen on vaihtoehtoja, tahdistusreleestä tahdistusjärjestelmään. Eri synkronointilaitteiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 5. Kuvassa 26 on esitetty synkronointilaitteen kytkentä.



Kuva 26. Synkronointilaitteen FAS-115DG kytkentä.

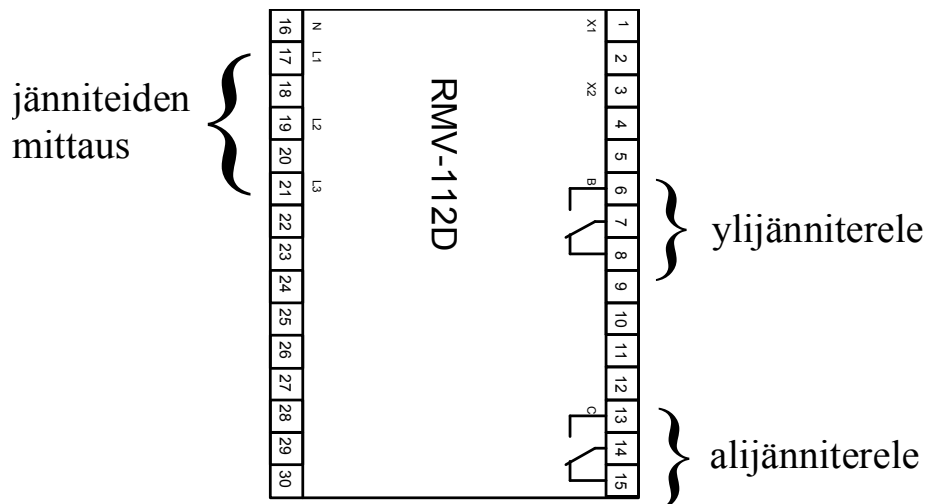
Synkronointilaite sisältää tahdistushetkeä ilmaisevan relälähdön, josta saadaan kytkentäviesti logiikalle. Synkronointilaite tarvitsee verkon ja generaattorin puolelta vaiheet L1 ja L2 pystyäkseen vertailemaan verkon ja generaattorin taajuutta ja vaihesiirtoa. Lisäominaisuuksina synkronointilaitteilla voi olla jännitesovitus- ja/tai taajuudensovitus-funktio, sillä synkronointilaite voi ohjata nopeudensäädintä ja/tai jänniteensäädintä saadakseen generaattoripuolen taajuuden, vaiheen ja jännitteen verkon puolen suureiden kanssa samansuuruiseksi.

Taulukko 5. Synkronointilaitteiden ominaisuuksia

Synkronointilaite	Deif CSQ-3	Deif FAS-113DG	Deif FAS-115DG	ABB Synchrotact CSS	ABB Synchrotact 5 SYN5201
Käsi käyttö	x			x	
Puoliautomaattinen käyttö	x			x	
Automaattinen käyttö		x	X	x	x
Katkaisijan viiveen kompensointi	x	x	X	x	x
Jännitteen sovitus			X	x	x
Taajuuden sovitus		x	X	x	x

5.3 Suojareleet

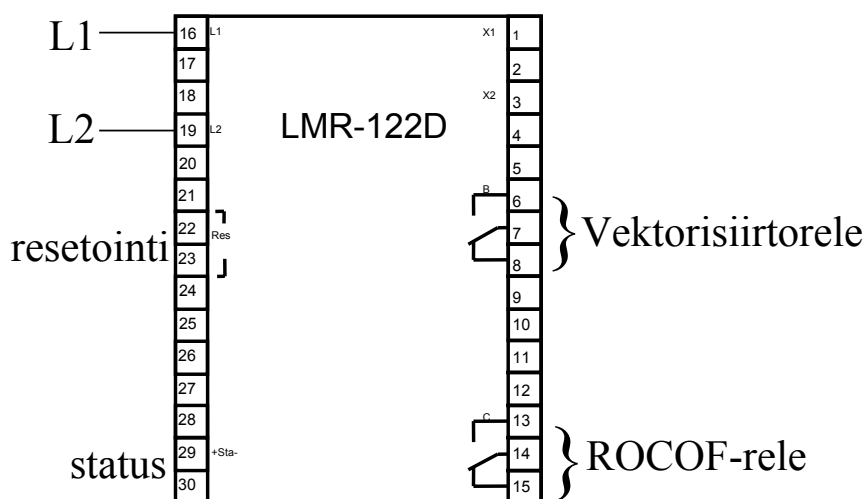
Perusvaatimuksena relesuojaukselle ovat yli- ja alijännitereleet jokaiselle vaiheelle ($3U>$ ja $3U<$) sekä yksivaiheiset yli- ja alitaajuusreleet ($f>$ ja $f<$). Releiden asetteluarvot pitää valita siten, että suojaus toimii. Luvassa 3.4 on esitetty taulukko 3, jossa on suuntaa antavia asetteluarvoja suojausreleille.

**Kuva 27. Jänniterele RMV-112D**

Yli- ja alijännitesuojarele on Deif RMV-112D. Jänniterele mittaa kolmen vaiheen jännitteet, ja kun jännite ylittää asetetut rajat rele katkaisee laukaisupiirin. Ylijännitteen

laukaisurajat voidaan asettaa $100...120\% U_n$, vastaavasti alijännitteen $80...100\% U_n$. Laukaisuviive voidaan asettaa $0..10$ sekunnin välille. Hystereesi, eli U_n ero releen aktiivoinnin ja deaktiivoinnin välillä, on säädettävä $1...10\%$. Releen vasteaika on maksimissaan 100 ms.

Yksinään syötön estosuojausta (YSE-suojausta) tarvitaan tilanteissa, joissa verkkojännite katoaa osittain tai kokonaan ja sähkötuotantolaitos jää yksinään syöttämään verkon osaa. Yksinään syötön estosuojaus (YSE) toteutuu LoM - releellä. Deif:n LoM – rele LMR-122DG on ROCOF-tyyppinen rele (Rate Of. Change Of Frequency), joka seuraa taajuuden muutosnopeutta.



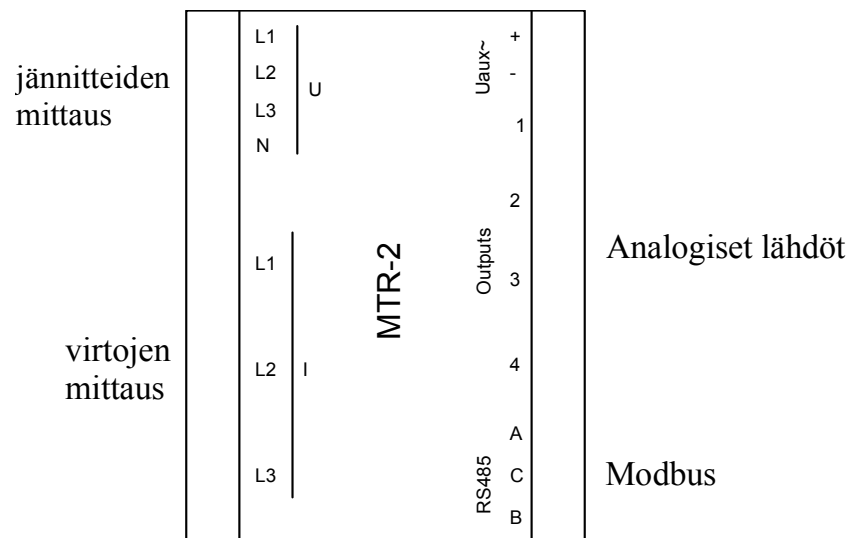
Kuva 28. Taajuusrele LMR-122D

Kantaverkosta erottuminen aiheuttaa nopean muutokseen generaattorin taajuudessa, sillä rele havaitsee kantaverkosta erotuksen. Kantaverkosta erottumisen havainnoinnin jälkeen rele lähettää aukiohjaussignaalin generaattorikatkaisijalle suojaten generaattoria vioittumiselta, jonka voi aiheuttaa automaattinen uudelleenkytkeminen verkkoon. Yli- ja alivektoriirtoarajat voidaan säätää $2...20$ elect. degr ja taajuusderivaatan laukaisuraja df/dt säädetään $0.3...5$ Hz/s. Vektorisiirron laukaisurajoille on vasteaika < 30 ms ja taajuusderivaatan laukaisurajoille erillinen vasteaika < 100 ms. Taajuusderivaatalle ja vektorisiirrolle on säädettävät initialisoinnin viiveet $0.5...5$ s RESET - signaalin saamisesta (generaattorikatkaisijan kiinniohjaamisesta).

5.4 Mittamuunnin

Voimalaitosprosessin sähköisten suureiden mittauksiin käytetään mittamuunninta.

Deif:n MTR-2 on modbus kenttäväylän kautta logiikkaan liitettävä mittamuunnin. Väylän kautta pystytään mittarista lukemaan lähes kaikki mahdolliset suureet. Kuitenkin tässä tapauksessa on tarpeen vain jännitteiden, virtojen, eri tehojen, taajuuden ja tehokertoimen eli kaikkien tarvittavien tietojen voimalaitosprosessista lukeminen.



Kuva 29. Mittamuunnin

Eri tyyppin MTR-2 mittamuuntimissa voi olla 0, 3 tai 4 analogialähtöä, joita käyttäen voidaan siirtää mittausarvot jännitteestä ja virrasta, analogiasignaaleina PLC:lle. Yhteys logiikkaan turvaa RS485 kommunikointiliitäntä, yhteysprotokolla on Modbus RTU, nopeus 1,200 - 115,200 bits/s. Mittamuuntimen vasteaika on maksimissaan 300 ms.

5.5 Generaattoriyksikön säätölaitteet

Tahtigeneraattoriyksikön taajuus-, tehokerroin-, teho- ja loistehosäätö voidaan toteuttaa säätölaitteilla, jotka ohjaavat nopeudensäädin ja/tai jännitteensäädintä. Tahtigeneraattorin säätöperiaatteet käsiteltiin kappaleessa 5.3.1.

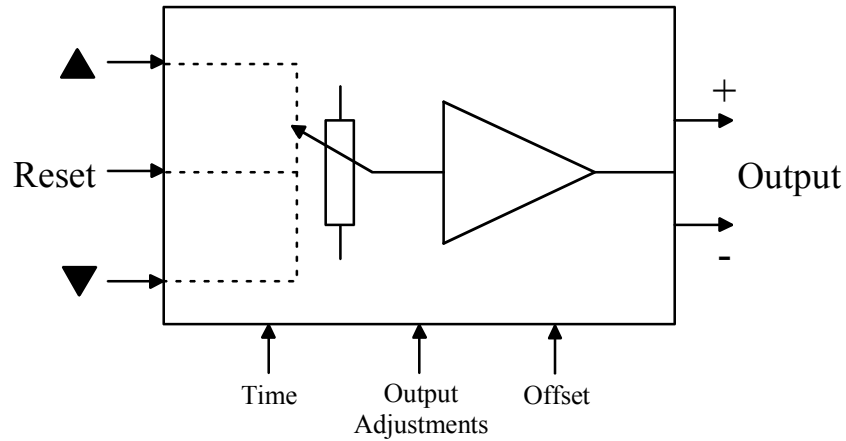
Deif LSU-112DG on säätölaite, joka ohjaa nopeudensäädintä tehonsyöttöyksikössä. Se voi ohjata nopeudensäädintä: saarekekäytössä (taajuussäätö), verkon kanssa rinnan (tehosäätö) ja muiden tehonsyöttöyksiköiden rinnan (taajuussäätö ja tehosäätö). Sitä voidaan käyttää mekaanisen nopeudensäätimen kanssa tai elektronisen nopeudensäätimen kanssa käyttäen digitaalista potentiometriä. LSU-112DG:ssa on sisäänrakennettu teho- ja taajuus- mittamuuntimet.

Deif LSU-122DG on säätölaite, joka ohjaa jännitteensäädintä tehonsyöttöyksikössä. Se voi ohjata jännitteensäädintä: saarekekäytössä (jännitesäätö), verkon kanssa rinnan (loistehosäätö) ja muiden tehonsyöttöyksiköiden rinnan (jännitesäätö ja loistehosäätö). Sitä voidaan käyttää moottoripotiometrin kanssa jännitteensäätimen ohjaukseen tai digitaalisen jännitteensäätimen kanssa käyttäen digitaalista potentiometriä. LSU-112DG:ssa on sisäänrakennettu loistehomittamuunnin.

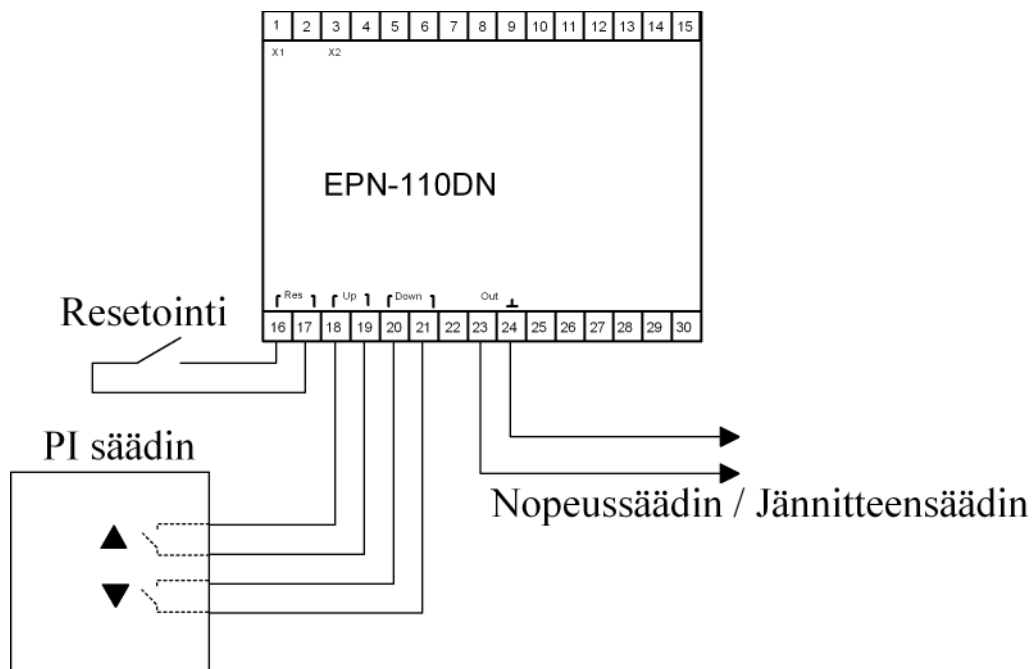
Basler Electric SPC 250 on loisteho/tehokerroin säädin. Se mittaa generaattorin lähtöjännitettä ja -virtaa, sekä ohjaa jännitteensäädintä. Kun säädetään loistehoa, jännitteensäädin säätää lähtöään, kunnes ohjelmoitu loisvirran arvo on saavutettu. Kun säädetään tehokerrointa, säädin ohjaa magnetointia, kunnes tehokertoimen arvo on saavutettu. Laitte on suunniteltu niin, että ennen generaattorikatkaisijan kiinnimenoa jännitteensäädin ohjaa generaattoria ja sen jälkeen SPC 250 ottaa magnetoinnin ohjaukseensa. Laitteessa on myös virranrajoitusominaisuus.

5.6 Säätimien ohjaus

Jännitesäätimien ja nopeussäätimien ohjaukseen käytetään digitaalista potentiometriä, sillä relelähtösignaali PI säätimestä (esim. synkronointilaite, PLC) konvertoidaan jännitesignaaliksi, jolla ohjataan joko nopeudensäädintä tai jännitteensäädintä.



Kuva 30. Digitaalinen potentiometri.



Kuva 31. Digitaalisen potentiometrin kytkentä

Valittu digitaalinen potentiometri on Deif:n EPN-110DN. Ohjelmoitavassa digitaalisessa potentiometrissa voidaan asettaa integrointiaika $2.5 \text{ s} \dots 25 \text{ s} \times 1$ tai $\times 10$ ja offset jännite $-25 \dots 0 \dots 25\%$ lähtöjännitesignaalista. Potentiometriä voidaan käyttää eri valmistajien nopeussäätäjien ja jännitesäätäjien kanssa asettaen lähtöjännitesignaaliaksi $0.. \pm 1 \text{ V DC} \times 1, \times 5$ tai $\times 10$. Laitteen vasteaika on maksimissaan 100ms tulosta lähtöön.

5.7 Katkaisijat

Pääkatkaisijalla kytkeydytään ja erotaan voimalan verkosta. Suunnittelussa käytetyt kompaktikatkaisijat on esitetty taulukossa 6. Pääkatkaisija on varustettu elektronisella suojareleellä PR221DS, joka turvaa laitoksen ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksen.

Taulukko 6. Katkaisijat

Liityntätapa	Pääkatkaisija	Nimellisvirta, A
Verkkosuuntaajaliityntä	ABB Tmax T6	800A
Suorat käytöt: Tahtikone	ABB Tmax T6	800A
Suorat käytöt: Epätahtikone	ABB Isomax S8	2500A

Generaattorikatkaisijalla kytketään generaattori verkkoon, kun kytkemisen ehdot on täytetty. Generaattorikatkaisija on ABB:n Tmax T6. Nimellisvirta on 800A. Generaattorikatkaisijalle on asetettu omat raja-arvonsa, joita ylitettäessä automaatio suorittaa aukiohjaukseen. Vastaavasti kiinniohjaus sallitaan toisilla asetuksilla ja verkkoon kytkennässä synkronointilaitteen tahdistusluvalla. Generaattorikatkaisija on varustettu elektronisella suojareleellä PR222MP, joka turvaa moottorin suojauksen. PR222MP moottorisuojareleellä on seuraavat suojausfunktiot: ylikuormitussuojaus (lämpösuojaus), lukittu roottori -suojaus (jumisuoja), oikosulkusuojaus, vaihe-epäsymmetriasuojaus.

ABB:n kompaktikatkaisijat ja niiden lisävarusteet ovat kansainvälisten IEC 60947-2 -standardien, EU:n pienjännitedirektiivin (LVD) nro 73/23 EEC sekä sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan direktiivin (EMC) nro 89/336 EEC vaatimusten mukaisia.

5.8 Kompensointiparisto

Kompensointiparistoa on esitetty kappaleessa 2.2. Seuraavassa tehdään tarvittavan loistehon kompensoinnin mitoittaminen. Pätö- ja loistehonsuhteelle on voimassa yhtälö:

$$Q = P \cdot \tan \varphi$$

ABB:n epätahtigeneraattorin nimellispisteen tehokerroin on 0.88, silloin maksimi kompensoitava loisteho on $Q = 400 \cdot \tan(\arccos(0.88)) \text{ kVAr} = 216 \text{ kVAr}$.

Verkkoonliitynnän vaatimuksien mukaan liityntäpisteen tehokertoimen pitäisi olla $\cos(\varphi) = 0,95 \dots 1$, eli ABB:n epätahtigeneraattorin tehokerrointa $\cos(\varphi) = 0,88$ pitää nostaa vähintään arvoon 0.95. Silloin minimi tarvittava loisteho:

$$Q = \frac{P}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 400 \cdot (\tan(\arccos(0.88)) - \tan(\arccos(0.95))) \text{ kVAr} = 85 \text{ kVAr}$$

missä η - kuorman höytysuhde, φ_1 - tehokerroinkulma ennen kompensointia, φ_2 - tehokerroinkulma kompensoinnin jälkeen.

Käyttämällä laskettuja arvoja valitaan automaatiikkaparisto.

Epätahtigeneraattorin suoraan verkkoon liitynnässä kompensointiparistoksi on valittu ABB:n automaattinen paristo APC. Sillä tehokerrointa voidaan säätää 0.7 induktiivisen - 0.7 kapasitiivisen välillä. Taulukossa 7 on esitetty kaksi APC pariston mallia.

Taulukko 7. ABB:n automaattinen paristo APC

Tyyppi	Teho, (kVAr) on 400V	Säätö, x×kvar
APCM1	200	12×16.7
APCM2	225	9×25

Paristolla on seuraavat suojaukset: yllämpötila, jännite, virta, THDV ja THDI. On mahdollisuus asettaa raja-arvot suojaukseen ylijännitteeltä, alijännitteeltä ja korkealta THDV:lta. APC:n suojaustaso on IP23D (ovi kiinni) ja suojattu suora- ja vahinkokosketuksesta (ovi auki). Kommunikaatioliitäntä on RS-485, yhteysprotokolla on Modbus. Yhteyden kautta pystytään valvomaan ja asettamaan pariston parametreja. Laitteistolla on tulokontaktorit: päivä/yö $\cos \varphi$, ulkopuolinen hälytys ja lähtökontaktorit hälytykselle ja tuulettimien releelle.

5.9 Taajuusmuuttaja

Verkkovaihtosuuntaajaliitynnän esimerkkitajuusmuuttaja on ABB:n ACS800-17 sarjan verkkoonjarruttava kaappiin asennettu taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajaa käsiteltiin kappaleessa 2.3 ja verkkovaihtosuuntaajaliityntää käsiteltiin kappaleessa 4.4.2

Taajuusmuuttajan malli valitaan generaattorien virtojen mukaan, tahtigeneraattori 577 A ja epätahtigeneraattori 675 A. Molempiin tapauksiin sopii ABB:n verkkoonjarruttavan taajuusmuuttajan malli ACS800-17-0490-3. Taajuusmuuttajan nimellisvirta on 704 A, maksimivirta on 963 A ja nimellisteho käytettäessä ilman ylikuormitusta on 400kW. Hyötysuhde nimellisteholla on 97%.

5.10 Jänniteensäädin

Jänniteensäädin pitää generaattorin jännitteen asetteluarvossaan halutulla tarkkuudella riippumatta kuormituksen, lämpötilan tai taajuuden vaihteluista. Rinnankäytössä verkon tai toisten generaattoreiden kanssa säädin säätää reaktiivista tehoa verkon jännitteestä ja asettelustaan riippuen. Tahtigeneraattorin jännitteen ja loistehon säätöä käsiteltiin kappaleessa 2.1.2.

Harjattomille tahtigeneraattoreille on olemassa eri jänniteensäätimen mallit, riippuen generaattoriyksikön tarvittavasta magnetointi virrasta ja ominaisuuksista. Vertailuun oli otettu kolme erilaista valittuihin generaattoreihin sopivaa jänniteensäädintä. Basler Electric AEC ja SSR SERIES ovat analogiset jänniteensäätimet. Basler Electric AEC SERIES jänniteensäädintä käytetään mm. ABB AMGe 355 tahtigeneraattorissa. Basler Electric DECS-100 on digitaalinen magnetointisäätöjärjestelmä, sillä saadaan käyttöön lisäominaisuuksia kuten tehokerroinsäätö, jännitteen sovitus ja generaattorin suojaukset. Kaikissa esitetyissä malleissa magnetointiteho otetaan kestromagneettigeneraattorista tai generaattorin navoista tai muista AC teholähdöistä.

Taulukko 8. Jännitteensäätimet harjattomille generaattoreille, tekniset tiedot

Jännitteensäädin (AVR)	Basler Electric AEC	Basler Electric SSR	Basler Electric DECS-100
Magnetointivirta	7A @ 63Vdc	12A @ 63 Vdc	7Adc @ 63Vdc
Tyyppi	Analoginen	Analoginen	Digitaalinen
Säädön tarkkuus parempi kuin	±1.0%	±0.25%	0.25%
Loisteho/ tehokerroinsäätö	Ei	ei	x
Jännitteen sovitus	Ei	ei	x
Yhteensopiva yksivaiheiseen PMG generaattorin kanssa (magnetoinnin teho lähde)	kyllä, 50 – 400Hz	kyllä, 50 – 240Hz	kyllä, 50 – 400Hz
Säädettävä taajuus kompensointi	X	x	x
Parallel droop or current compensation	X	x	x
Suojaukset	ylimagnetointi	ylimagnetointi	generaattorin ylijännite generaattorin jännite häviö kentän ylijännite ylimagnetointi alimagnetointi

Jos harjattoman 400kW generaattorin kanssa ei tule jännitteen säätäjää, yllä mainituista jännitesäätäjistä voidaan valita sopiva.

5.11 Nopeudensäädin

Nopeudensäätimellä säädetään turbiinin pyörimisnopeutta automatiikan avulla. Teho ja taajuussäätöä käsiteltiin kappaleessa 2.1.1.

Nopeuden säätimen funktiot voidaan integroida logiikkaan, esimerkiksi Dresser-Rand:n PLC-pohjainen ratkaisu. Nopeudensäätimen ohjausfunktiot on integroitu DI-TRONICS® IV ohjausjärjestelmään, joka on suunniteltu PLC pohjalle ja ohjaa höyryturbiinia. Funktiot on ohjelmoitu C ohjelmointikielellä ja ne sijaitsevat PLC:ssa. Nopeudensäätimen ohjausfunktiot ovat omassa ohjelmamoduulissa, jota ajetaan yhdessä

prosessisäätömoduulien kanssa, jotka on ohjelmoitu tavallista PLC:n Ladder Logic käyttäen.

Nopeuden säätöön voidaan käyttää erillistä säädinlaitetta. Esimerkiksi Woodward:n 2301D-ST mikroprosessoripohjainen säädin, joka on suunniteltu yksiventtiilisen höyryturbiinin ohjaamiseen, takaa pienen turbiinin pääohjaustehtävät. Tai Woodward:n 505/505E mikroprosessoripohjainen säädin, joka on suunniteltu ohjaamaan höyryturbiineja kaikki koot mukaan lukien. Laitteet ovat ohjelmoitavia ja ne voidaan asettaa toimimaan itsenäisesti tai hajautetun automaation osana.

Myös kaupallisen turbogeneraattorin osana tulee elektroninen nopeudensäädin, esimerkiksi KK&K:n SC800 takaa turbogeneraattorin ohjaus- ja suojaustehtävät.

Nopeussäätimien tekniset ominaisuudet on koottu taulukossa 9.

Taulukko 9. Nopeudensäätimet. Tekniset tiedot

Dresser-Rand:n PLC ratkaisu	KK&K SC 800	Woodward 2301D-ST	Woodward 505/505E
Käsiohjattava, puoli- ja automaattinen käynnistys ja pysähdys	Turbiinin käynnistys	Käsiohjattava, puoli- ja automaattinen käynnistys ja pysähdys	Nopeus/Taajuus säätö
Kaksi aluetta kriittisen nopeuden välttämiseen	Nopeuden tai taajuuden pito ohjeiden mukaisesti	Nopeuden hallinta	Turbiini tai generaattori kuormitus säätö/rajoitus
Droop ja isokroninen nopeussäätö	Lähtötehon hallinta kun generaattori on verkon rinnan	Ylinopeus suojaus	Turbiinin paineen säätö/rajoitus
Generaattorin/Verkon häviö havainnointi	Ylinopeus suojaus	Pysäytyslogiikka	Voimalaitoksen tehossäätö/rajoitus
Yksittäisen ohjaimen ja kaksoisohjaimen hallinta	Nopeuden näyttö	Hälytyslogiikka	Kriittisen nopeuden välttäminen (2 nopeuden aluetta)
		Diagnostiikka	Autostartti (kuuma- ja kylmäkäynnistys)
		Prosessisäätö	Venttiilien rajoittimet
		Kriittisen nopeuden välttäminen logiikka	
		Droop ja isokroninen nopeussäätö	
		Modbus	Modbus

6. VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO

Tässä kappaleessa esitetään suoraan verkkoon kytkettynä epätahtigeneraattorin ja tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatiota, sekä taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestromagneettiatahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatiota. Suunnittelussa käytetty verkkoonliityntälaitteisto on esitetty kappaleessa 5.

Koska tahtigeneraattorin verkkoonliityntä on monimutkaisempi kuin muut esitetyt verkkoonliitynnän vaihtoehdot, kappaleessa 6.1 kootaan yhteen erilaisia mahdollisia tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaation toteutusvaihtoehtoja, verrataan niitä ja esitetään mahdollisia automaation kokoonpanoja.

Taulukossa 10 esitetään laitoksen verkkoonliityntätapojen vaihtoehtoja.

Taulukko 10. Laitoksen verkkoonliitynnän automaatio

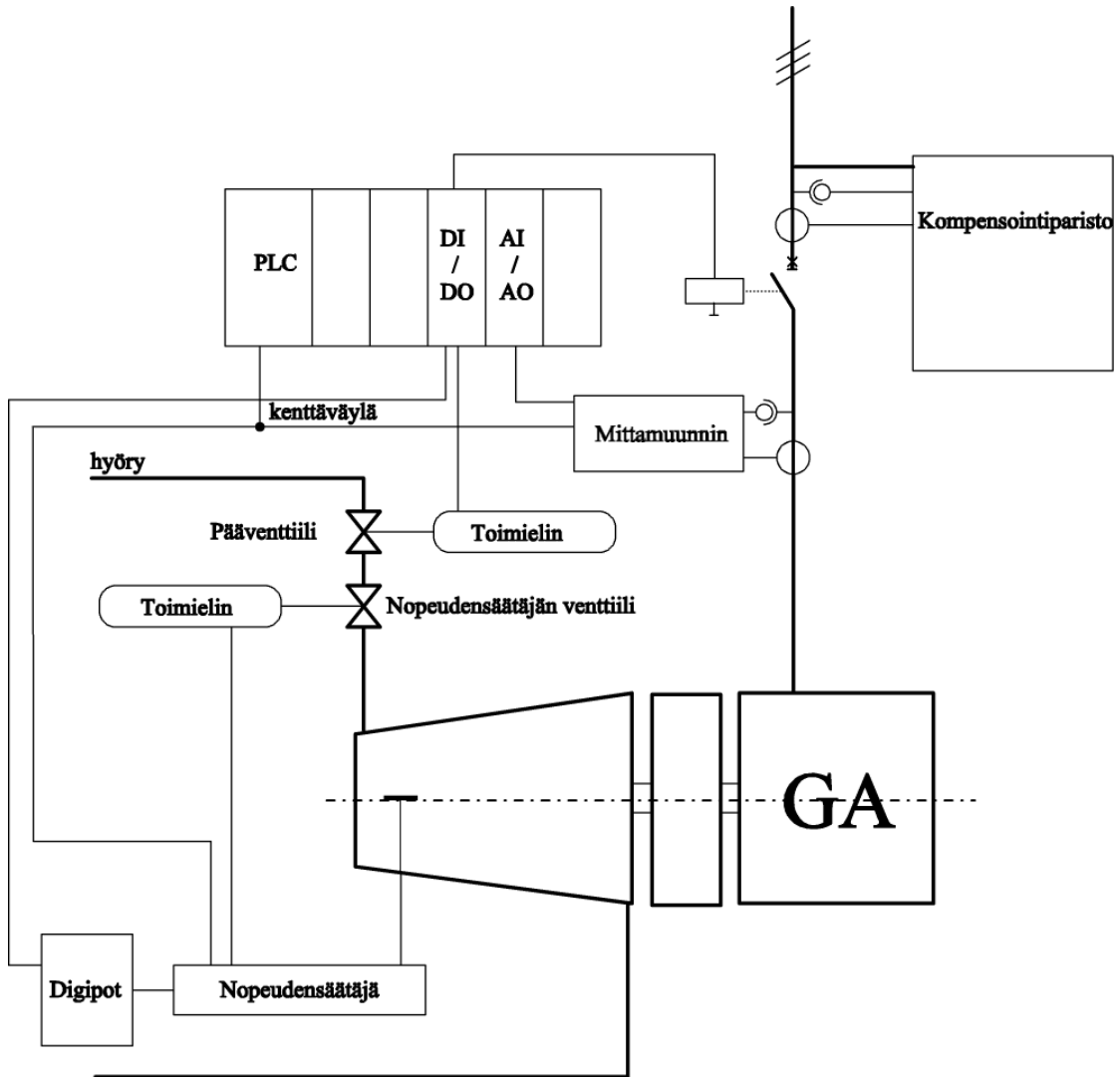
Liityntätapa	Epätahtigeneraattori	Tahtigeneraattori	
		Kestomagnetoitu	Vierasmagnetoitu
Suoraan verkkoon	esitetään kuvassa 32	esitetään kuvassa 34	esitetään kuvassa 33
Taajuusmuuttajan avulla	esitetään kuvassa 35	esitetään kuvassa 35	ei käsitellä

Taajuusmuuttajan avulla kytketyn vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin verkkoonliityntää ei käsitellä koska magnetointitarpeen ja turhan monimutkaisuuden takia tätä ratkaisua ei käytetä.

Jatkossa esitetyissä kaavioissa on yhteistä se, että logiikka ohjaa turbiinin pähöyryventtiiliä ja nopeudensäädin ohjaa omaa turbiinin höyryventtiiliä logiikalla asetettujen arvojen mukaisesti säätämällä turbiinin tehoa tai nopeutta. Nopeudensäädintä ohjataan jänniteviestillä, joka saadaan logiikan analogisesta lähtömoduulista tai logiikalla digitaalisesti ohjatusta digitaalipotentiometrillä. Esitetyissä kaavioissa on käytetty digitaalista potentiometriä.

Suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

Epätahtigeneraattori suoraan verkkoon kytkettynä on vaihtoehtoista yksikertaisiin. Kuitenkin epätahtigeneraattorin verkkoonliittymässä tehokertoimen nostamista varten on käytettävä kompensointiparistoa. Kuvassa 32 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

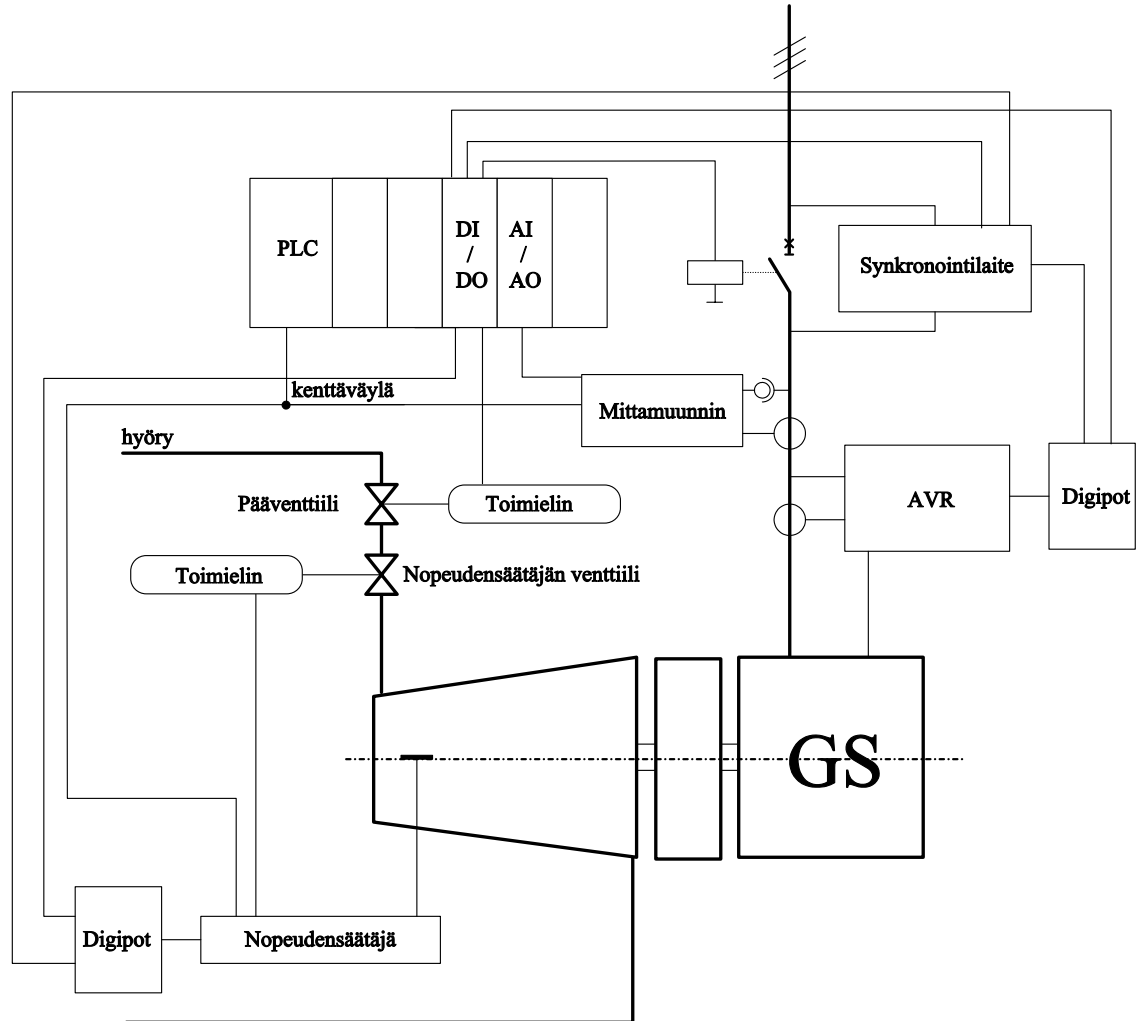


Kuva 32. Epätahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation lohkokkaavio.

Avataan pähöyryventtiili. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje (synkroninopeus) nopeudensäätimelle. Mitataan taajuus mittamuuntimen avulla ja logiikka (PLC) kytkee generaattorin verkkoon sulkemalla generaattorikatkaisijan synkroninopeudella. Epätahtigeneraattorin tehokerrointa säädetään arvoon 0.95 – 1 (ind. tai kap.) kompensointiparistolla. Turbiinin tehoa säädetään nopeussäätimellä.

Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

Tahtigeneraattorin verkkoonliittymä vaatii myös jännitteensäädön ja tahdistuksen. Kuvassa 33 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

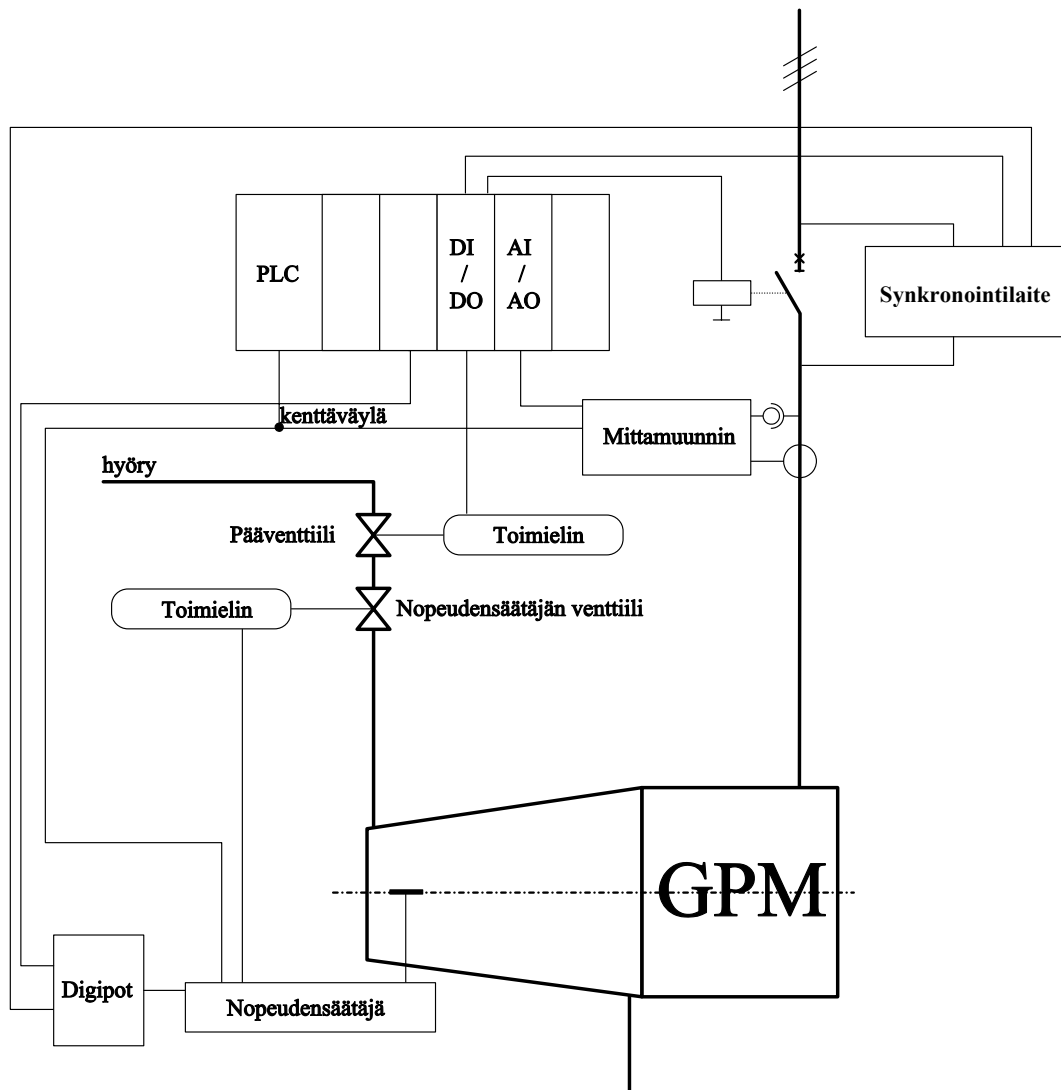


Kuva 33. Tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation lohkokkaavio.

Logiikka avaa pähöyryventtiilin. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje nopeudensäätimelle. Synkronointilaite pystyy ohjaamaan nopeussäädintä ja jännitteensäädintä tahdistukseen generaattorin jännite-, taajuus- ja vaihearvojen suuret verkon arvojen suureiden kanssa. Synkronointilaite tahdistaa generaattorin verkkoon ja antaa logiikalle synkronointisignaalin, jolloin logiikka (PLC) sulkee katkaisijan. PLC ohjaa jännitteensäädintä generaattorikatkaisijan sulkeutumisen jälkeen toteuttaen tehokerroin- ja loistehosäädön.

Suoraan verkkoon kytketyn kestmagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaatio.

Kestomagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittyntä vaatii tahdistuksen, mutta jännitteen-säätö ei ole mahdollista. Kestomagneettitahtigeneraattorin on oltava suunniteltu suoraan verkkoon kytkettäväksi. Kuvassa 34 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn kestmagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaatio.



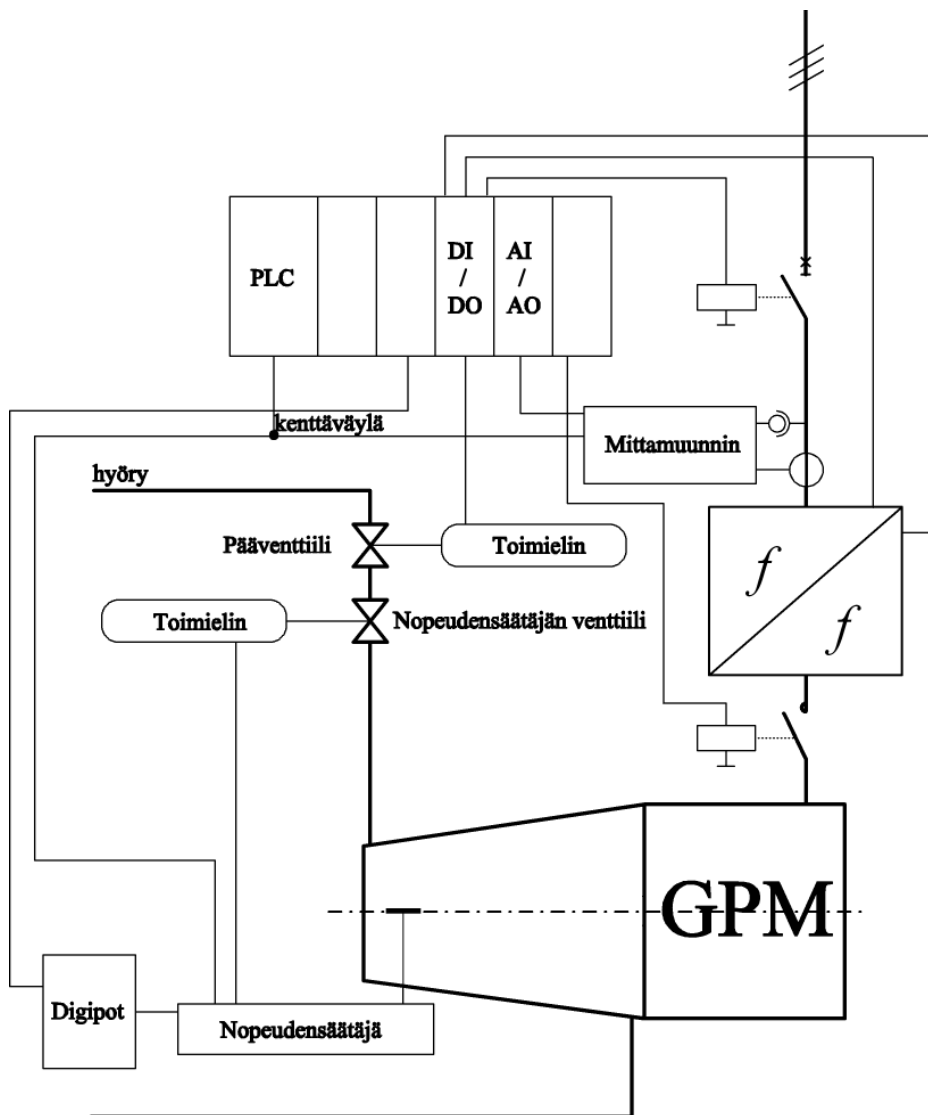
Kuva 34. Kestomagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaation lohkokkaavio.

Logiikka avaa pähöyryventtiilin. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje nopeudensäätimelle. Synkronointilaite pystyy ohjaamaan nopeussäädintä tahdistukseen generaattorin jännite-, taajuus- ja vaihearvojen suuret verkon arvojen suureiden kanssa. Synkronointilaite tahdistaa generaattorin verkkoon ja antaa logiikalle

synkronointisignaalin, jolloin logiikka (PLC) sulkee katkaisijan. Generaattorin jännitteen ja taajuuden määrää verkko, turbiinin tehoa säädetään nopeudensäätimellä.

Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.

Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytkettyä kestopagneettitahtigeneraattoria ajetaan nopeus- tai vääntömomenttisäädön avulla. Kuvassa 35 on esitetty taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.



Kuva 35. Verkkoonliityntä taajuusmuuttajalla, automaation lohkokkaavio.

Logiikka (PLC) sulkee verkkopuolen katkaisijan kytkettäessä taajuusmuuttaja verkkoon. Logiikka (PLC) käynnistää verkkovaihtosuuntaajan moduloinnin. Logiikka (PLC) sulkee generaattori -puolen kontaktorin kytkettäessä taajuusmuuttaja generaattorin. Avataan päänhöryventtiili. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky nopeudensäätimelle. Annetaan nopeus- tai vääntömomenttiohje generaattorisuuntaajalle. Käynnistetään generaattorisuuntaajan modulointi. Turbiinin tehoa säädetään nopeudensäätimellä.

6.1 Tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation toteutusvaihtoehtoja

Tahtigeneraattorin verkkoonliittymä vaatii magnetointia, tehokerroin- tai loistehosäätöä, tahdistusta mm. jännite- ja taajuussovitus. Tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation toteutusvaihtoehtoja on useita. On mahdollista käyttää yhtä laitetta tai käyttää useita edullisempia laitteita. Automaatiota voidaan myös toteuttaa ohjelmallisesti PLC:ssä. Nopeudensäätö, jännitesovitus, taajuussovitus ja tehokerroin- tai loistehosäätö voivat olla toteutetut ohjelmallisesti PLC:ssä.

Tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation toteutusvaihtoehtoja on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Verkkoonliittymän automaation toteutusvaihtoehdot

N	Tahtigeneraattori	Synkronointilaitte	Jännitteensäädin	Jännitesovitus	Taajuussovitus	Tehokerroin/Loistehosäätö
1	ABB AMGe 355	CSQ-3	Basler AEC	PLC	PLC	PLC
2	ABB AMGe 355	FAS-115DG	Basler AEC	FAS-115DG	FAS-115DG	PLC
3	ABB AMGe 355	FAS-115DG	Basler AEC	FAS-115DG	FAS-115DG	LSU122DG ja LSU112DG
4	ABB AMGe 355	FAS-115DG	Basler AEC	FAS-115DG	FAS-115DG	Basler SCP 250
5	TES GSH355L	CSQ-3	Basler AVC63-7	PLC	PLC	Basler SCP 250
6	TES GSH355L	FAS-113DG	Basler AVC63-7	PLC	FAS-113DG	Basler SCP 250
7	TES GSH355L	FAS-115DG	Basler AVC63-7	FAS-115DG	FAS-115DG	Basler SCP 250
8	-	CSQ-3	DECS-100	DECS-100	PLC	DECS-100
9	-	FAS-113DG	DECS-100	DECS-100	FAS-113DG	DECS-100

Käsiohjattavan tahdistuksen toteuttaa esimerkiksi ABB:n synkronointijärjestelmää CSS. Digitaalisen magnetointisäätöjärjestelmän Basler Electric DECS-100 käyttö, jolla on mm. jännitesovitus- ja tehokerroin-/loistehosäätöominaisuus, voi vähentää useampien

laitteiden tarvetta ja antaa mahdollisuuden käyttää edullisempaa synkronointilaitetta. Nopeudensäädön toteuttaa Woodward 2301D-ST nopeudensäädin.

Katsotaan tarkemmin automaation toimintaa ensimmäisen vaihtoehdon kokoonpanossa. Tässä käytetään perussynkronointilaitetta (CSQ-3) ja tahtigeneraattorin verkkoonliityntän tehtävät hoitaa logiikka (PLC). Toimintasekvenssi on seuraava.

Toimintaselostus CASE 1:

Mitataan taajuus mittamuuntimen avulla ja avataan päänhöyryventtiiliä, kunnes synkroninopeus saavutetaan. PLC (tarvittavat parametrit mittamuuntimelta) ohjaa jännitteensäädintä ja nopeudensäädintä. Synkronointilaite lähettää SYNC signaalin, kun generaattorin napajännitteen ja verkon jännitteen vaiheet ovat samat. PLC sulkee generaattorin katkaisijan. Mittamuuntimen avulla mitataan tehokerrointa/loistehoa ja PLC ohjaa jännitteensäädintä toteuttamalla tehokerroin-/loistehosäädön. PLC voi säätää tehoa ohjaamalla nopeudensäädintä. Jännitteensäädintä ja nopeudensäädintä ohjataan digitaalisen potentiometrin (digipot) kautta. Tässä kokoonpanossa on suunniteltava seuraavat säätöalgoritmit PLC:lle: nopeus-/taajuussäätö, jännitesäätö, jännite- ja taajuussovitus, tehokerroin-/loistehosäätö.

Seuraavassa katsotaan automaation toimintaa vaihtoehto 2:n kokoonpanossa. Tässä käytetään synkronointilaitetta (FAS-115DG) lisäominaisuuksilla: jännite- ja taajuussovituksella.

Toimintaselostus CASE 2:

Estetään synkronointilaitteen toiminta. Mitataan taajuus mittamuuntimen avulla ja avataan päänhöyryventtiiliä kunnes synkroninopeus on saavutettu. Poistetaan toimintaesto synkronointilaitteesta. Synkronointilaite ohjaa jännitteensäädintä ja nopeudensäädintä. Synkronointilaite lähettää SYNC signaalin, kun generaattorin napajännitteen ja verkon jännitteen vaiheet ovat samat. PLC sulkee generaattorikatkaisijan, samalla synkronointilaitte poistetaan käytöstä. Mittamuuntimen avulla mitataan tehokerrointa tai loistehoa ja PLC ohjaa jännitteensäädintä toteuttamaan tehokerroin- tai loistehosäädön. PLC voi säätää tehoa ohjaamalla nopeudensäädintä. Jännitteensäädintä ja nopeudensäädintä ohjataan digitaalisen potentiometrin (Digipot) kautta. Tässä kokoonpanossa on suunniteltava vain tehokertoimen säädön tai loistehosäädön säätöalgoritmit PLC:lle.

Seuraavassa automaation toiminta vaihtoehto 3:n kokoonpanossa. Tässä kokoonpanossa logiikka(PLC) ei osallistu säätöön, vaan kaikki tahtigeneraattorin verkkoonliittymän tehtävät hoitavat synkronointilaitte (FAS-115DG), jännitteensäätimen säätölaite (LSU122DG) ja nopeudensäätimen säätölaite (LSU112DG).

Toimintaselostus CASE 3:

Estetään synkronointilaitteen toiminta. Avataan päähöyryventtiiliä, kunnes synkroninopeus on saavutettu. Poistetaan toimintaesto synkronointilaitteesta. Synkronointilaitte ohjaa jännitteensäädintä ja nopeudensäädintä. Synkronointilaitte lähettää SYNC signaalin, kun generaattorin napajännitteen ja verkon jännitteen vaiheet ovat samat. PLC sulkee generaattorikatkaisijan, samalla synkronointilaitte poistetaan käytöstä. Generaattori toimii rinnan verkon kanssa tuottaen kiinteää tehoa ja kiinteää tehokerrointa. Tehosäädön suorittaa nopeudensäätimen säätölaite (LSU112DG) ja loistehosäädön jännitteensäätimen säätölaite (LSU122DG). Teho ja tehokerroin asetetaan potentiometreilla.

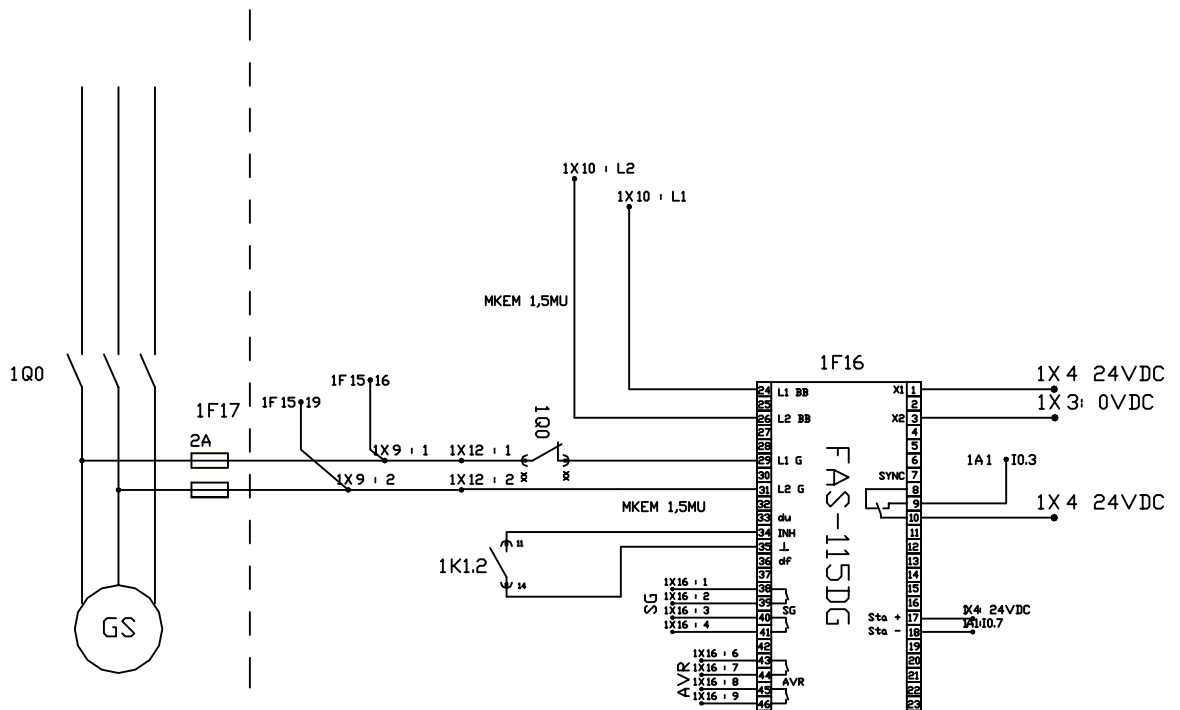
Muiden vaihtoehtojen tarkempaa toimintaselostusta ei esitetä, vaan kerrotaan lyhyesti niiden kokoonpanoista.

CASE 4 – CASE 7 on käytetty erillistä laitetta tehokerroin- ja loistehosäätöön, eli Basler SCP 250 tehokerroin- sekä loistehosäädin. Eri vaihtoehtoissa tehtävien realisointiin on käytetty PLC:tä tai muita laitteita. CASE 7 vaihtoehdossa ei käytetty PLC:tä vaan kaikki tahtigeneraattorin verkkoonliittymän tehtävät hoitavat synkronointilaitte FAS-115DG, jännitteensäädin Basler AVC63-7 ja tehokerroin- sekä loistehosäädin Basler SCP 250.

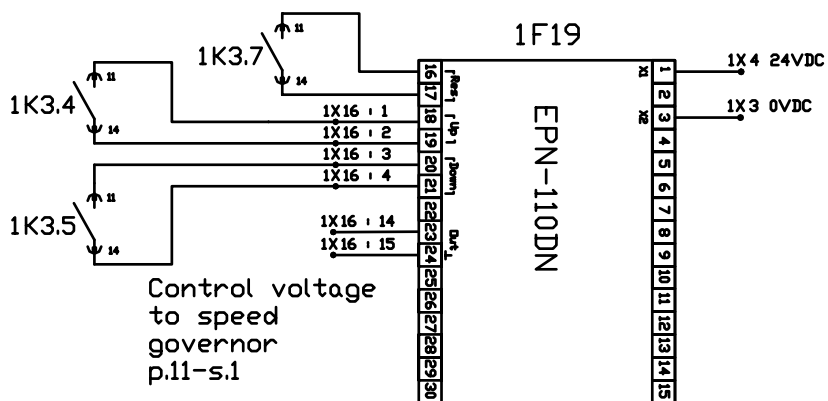
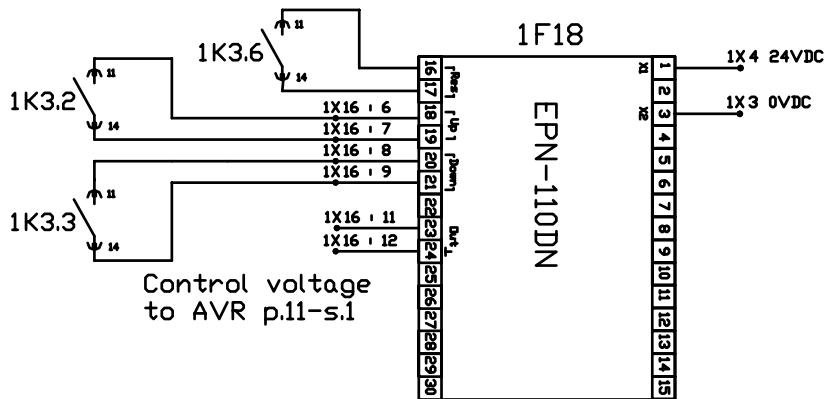
CASE 8 – CASE 9 on käytetty digitaalista magnetointisäätöjärjestelmää Basler Electric DECS-100, joka vähentää huomattavasti lisälaitteiden tarvetta. CASE 8 tapauksessa perustahdistusreleen CSQ-3 käyttö jättää taajuussovituksen PLC:n hoidettavaksi. CASE 9 tapauksessa digitaalinen magnetointisäätöjärjestelmä DECS-100 ja synkronointirele FAS-113DG taajuussovitusominaisuudella hoitavat yhdessä kaikki tahtigeneraattorin verkkoonliittymän vaativat tehtävät ilman PLC:n käyttöä.

PAKU-CHP-laitoksen suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliittymän suunnittelussa oli valittu CASE 2 automaation kokoonpano. Tästä kokoonpanosta on piirretty johdotus- ja piirikaaviot, joita esitetään seuraavassa. Kuvassa 35 on synk-

ronointilaite. Logiikka avaa 1K1.2 releen ja poistaa synkronointilaitteesta toimintaeston. Relelähstöjen avulla synkronointilaite ohjaa nopeudensäädintä ja jännitteensäädintä tahdistukseen generaattorin verkkoon. Kun tahdistusehdot on saavutettu, synkronointilaite lähettää synkronointisignaalin logiikalle. Katkaisija menee kiinni, ja normaalisuljettu 1Q0 kontaktori avautuu ja sillä synkronointilaite poistetaan käytöstä. Kuvassa 36 esitetään digitaaliset potentiometrit, jotka syöttävät logiikalla tai synkronointilaitteella asetettua ohjausjännitteen nopeudensäätimelle ja jännitteensäätimille.



Kuva 36. Synkronointilaite. Johdotus- ja piirikaavio.



Kuva 37. Digitaaliset potentiometrit. Johdotus- ja piirikaavio.

7. VERKKOONLIITYNTÄAUTOMAATION KUSTANNUKSET

Tässä kappaleessa lasketaan verkkoonliitynnän hankintakustannusarvot ja valitaan suunnitellun verkkoonliitynnän vaihtoehdoista taloudellisesti ja teknisesti toimiva ratkaisu.

Tarvittava verkkoonliityntälaitteisto kullekin generaattorilaitteistolle oli määritelty ja valittu eri vaihtoehdoista. Yksittäisien laitteiden hintojen, suunnittelun ja asennukseen tarvittavan ajan ja tuntipalkan perusteella verkkoonliitynnän kustannusarviot on laskettu ja koottu taulukkoon 12.

Suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliityntäautomaation hinta arvioitiin vaihtoehdossa 1. Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliityntäautomaation hinta arvioitiin vaihtoehdossa 2. Verkkovaihtosuuntaajalla verkkoon kytketyn generaattorin vaihdelaatikolla verkkoonliityntäautomaation hinta arvioitiin vaihtoehdossa 3. Verkkovaihtosuuntaajalla verkkoon kytketyn suoravetoturbogeneraattorin verkkoonliityntäautomaation hinta arvioitiin vaihtoehdossa 4. Suoraan verkkoon kytketyn turbiini-generaattorisetin, joka sisältää tahtigeneraattorin, vaihdelaatikon, turpiinin ja ohjausautomaation, verkkoonliityntäautomaation hinta arvioitiin vaihtoehdossa 5.

Generaattorien ja vaihdelaatikon hinta-arvio on saatu kaupallisesti saatavina olevista generaattorien malleista. Turbiinin hinta-arvio oli laskettu kaupallisesti saatavina olevista turbogeneraattorien malleista.

Suunnitteluun tarvittava aika-arvio on 100 tuntia. Ja suunnitteluinsinöörin tuntipalkaksi on asetettu 50 euroa. Silloin suunnittelun hinta-arvioksi tulee 5 000 euroa. Asennukseen tarvittava aika-arvio on 300 tuntia. Ja asentajan tuntipalkaksi on asetettu 50 euroa. Silloin asennuksen hinta-arvioksi tulee 15 000 euroa.

Vaihtoehdon 4 suunnittelun ja asennuksen hinta jää pienemmäksi, koska käytössä on kaupallinen turbiini-generaattorin setti, joka on valmiiksi suunniteltu, ja sisältää turbiinin ja generaattorin osalta asennusohjeet ja dokumentaation.

Taulukko 12. Verkkoonliityntäautomaation hankintakustannusarvot

Vaihtoehto	1	2	3	4	5
Liityntätapa	suoraan verkkoon		verkkovaihto-suuntaajaliityntä	verkkovaihto-suuntaajaliityntä	suoraan verkkoon
Generaattorityyppi	epätahtikone	tahtikone*	-	suurnopeus- epätahtikone	tahtikone
Generaattori	15 000 €	20 000 €	15 000 €	20 000 €	450 000 € **
Vaihdelaatikko	70 000 €	70 000 €	70 000 €	-	
Turbiini	150 000 €	150 000 €	150 000 €	150 000 €	
Verkkoonliityntälaitteiston hinta	35 000 €	30 000 €	90 000 €	90 000 €	25 000 €
Mekaaniset rakenteet	35 000 €	35 000 €	35 000 €	35 000 €	-
Suunnittelu	5 000 €	7 000 €	5 000 €	5 000 €	3 000 €
Asennus	15 000 €	17 000 €	15 000 €	15 000 €	5 000 €
YHTEENSÄ	325 000 €	329 000 €	380 000 €	315 000 €	483 000 €
* harjaton itsemagnetoitu tahtigeneraattori jännitteensäätimellä. ** turbiini-generaattori setti, jossa on tahtigeneraattori, vaihdelaatikko, turpiini ja ohjausautomaatio (myyntihinta).					

Kaupallisen turbiinigeneraattorisetin käyttö pienentää suunnittelun tarvetta ja asennuksen kustannuksia, mutta on omaa kokonaisratkaisua selvästi kalliimpi vaihtoehto.

Taajuusmuuttajan tekniikka antaa mahdollisuudet käyttää turbiinia vaihtelevalla nopeudella eli voimalaitoksen polttoprosessin mukaisesti. Vaihtoehdon 3 verkkoonliityntäautomaation kustannus on korkea, koska käytetään taajuusmuuttajan lisäksi vaihdelaatikkoa. Mutta jos käytössä on suoravetoturbogeneraattori, niin kuin vaihtoehdossa 4, päästään kohtuullisiin kustannuksiin. Tämä liityntätapa antaa mahdollisuudet liukusäätöön ja samalla päästään eroon vaihdelaatikossa tapahtuvista häviöistä.

Mikroprosessori- ja tahtigeneraattoritekniikan kehitys mahdollistavat korkeasti integroidut automaationratkaisut. Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliityntäautomaation kustannus on saatu melkein samaksi, kuin epätahtigeneraattorin verkkoonliityntäautomaation kustannus.

Jos PAKU-CHP-laitoksen generaattori kytketään suoraan verkkoon, silloin vaihtoehto 2 on ensisijaisesti toteutettava, koska käyttäen tahtigeneraattoria pystytään saamaan hyvä

tehokerroin. Mutta kaikista vaihtoehdoista vaihtoehto 4, eli taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty suoravetoturbogeneraattori, on voimalaitoksen lisäarvoa ja lisäasäätömahdollisuuksia tuova verkonliittymän ratkaisu.

8. YHTEENVETO

Tässä työssä on käsitelty PAKU-CHP-laitoksen generaattorilaitteistojen toimintaperiaatteita verkkoonliittynnän kannalta. Työhön on koottu pienvoimalaitokseen kohdistuvat ajankohtaiset suojausvaatimukset, hajautetun tuotannon sähkölaatuvaatimukset ja myös mahdolliset jakeluverkonhaltijan verkkoonliittynnän ohjeet.

Mahdollisille PAKU-CHP-laitoksen 400 kW generaattorilaitteistoille suoraan ja taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytkettynä on suunniteltu verkkoonliittyntä. Verkkoonliittyntälaitteiston toimi- ja suojauslaitteet on määritelty, niiden erilaisia vaihtoehtoja on vertailtu ja erilaisista vaihtoehdoista on valittu sopivimmat suunniteltavana olevalle verkkoonliittynnälle. On suunniteltu sähköliittymät sekä suojaus- ja ohjauspiirit. Ensiö- ja toisiosuojaukset on suunniteltu. Lisäksi on määritetty automaation toiminta vikatilanteissa. Verkkoonliittynnän kaaviot on piirretty toteutustasolle ja verkkoonliittynnän automaatiolle on laadittu toimintaselostus. Työn tuloksia voidaan käyttää PAKU-CHP-pilottilaitoksen liittämässä jakeluverkkoon.

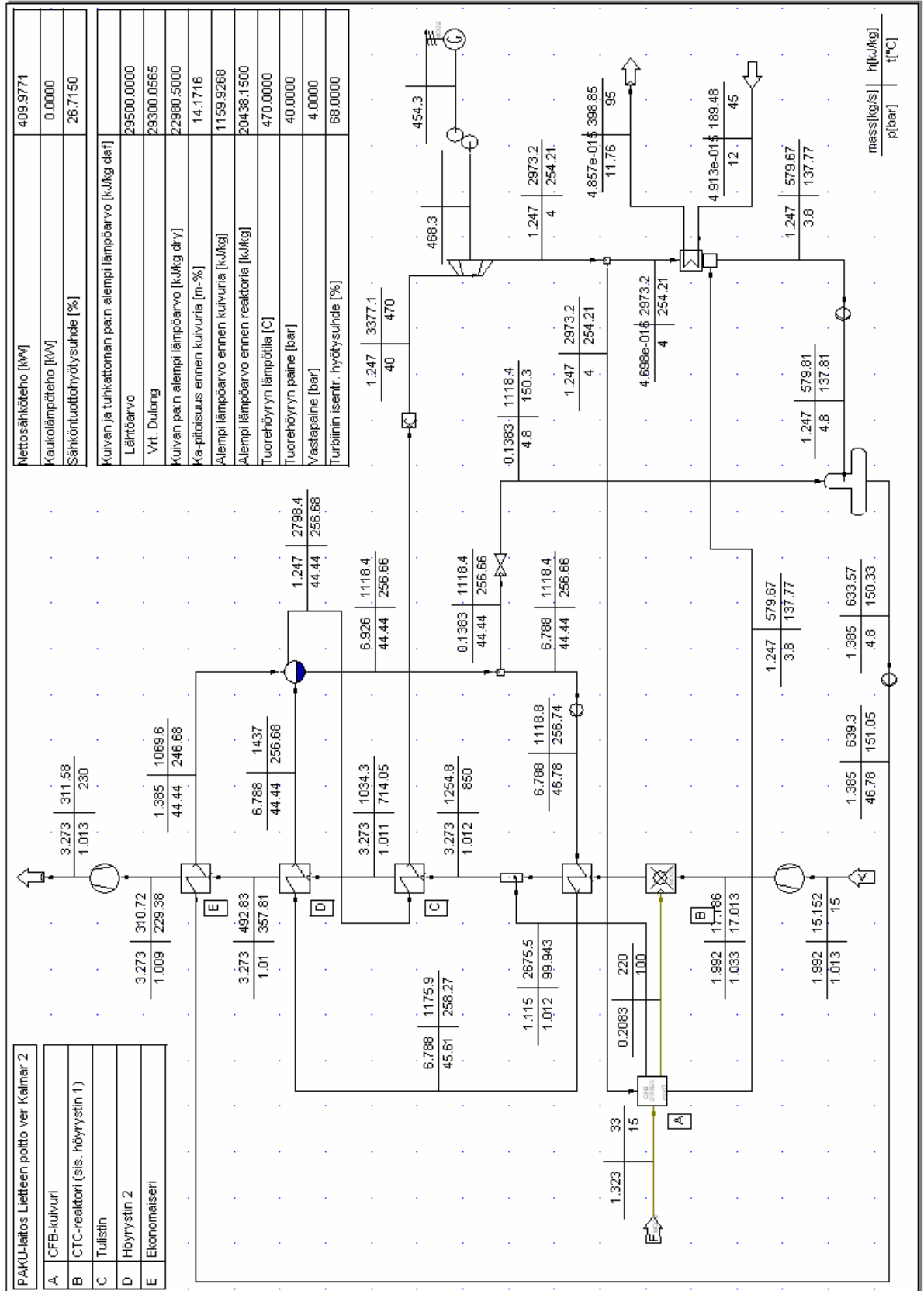
Työssä on esitetty suoraan verkkoon kytkettynä epätahtigeneraattorin ja tahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaatio, sekä taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn keskomagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaatio ja automaation toimintaselostettu. Lisäksi on käsitelty erilaisia mahdollisia tahtigeneraattorin verkkoonliittynnän automaation toteutusvaihtoehtoja ja esitetty mahdollisia automaation kokoonpanoja.

Verkkoonliittyntäautomaation hankintakustannukset on laskettu ja eri vaihtoehtoja on valittu PAKU-CHP-laitokseen parhaiten sopiva verkkoonliittynnän ratkaisu. Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty suoravetoturbogeneraattori on todettu teknisesti ja taloudellisesti toimivaksi.

LÄHTEET JA VIITTEET

- /1/ Juha Kaikko, *Advanced process for thermal treatment of wastewater sludge*. LUT, 2007.
- /2/ ABB Oy, *Teknisiä tietoja ja taulukoita –käsikirja*.
- /3/ *Turbogeneraattorin jännitteen säätö*. INSKO:n julkaisu 23-77, Luku XI.
- /4/ Aura, L. & Tonteri, A. *Sähkämiehen käsikirja 2*. WSOY, Porvoo 1986.
- /5/ Elovaara J, *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Otakustantamo, 1988.
- /6/ Juha Pyrhönen, *Sähkölaitostekniikan peruskysymyksiä*, LTKK, 1991.
- /7/ Mörsky, Janne ja Jorma. *Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka*. Helsinki. Otatieto Oy, 1994.
- /8/ Lindh, Tuomo. Niemelä, Markku. *Hajautetun voimantuotannon verkkoonliityntä ja koneet*. DENSY loppuraportti, LTY 2005.
- /9/ Juha Pyrhönen, *Sähkökäytöt*, luentomateriaali.
[Viitattu 27.4.2007] Saatavissa:
<https://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2721000/materiaalit.html>
- /10/ CIGRE, Task Force C6.04.01: *Connection criteria at the distribution network for distributed generation*. Draft, October 2005.
- /11/ CENELEC: European Standard (EN) - *Requirements for the connection of microgenerators in parallel with public low-voltage distribution networks*. CLC/TC8XWG2, prEN50438, August 17th, 2005.

- /12/ Helsingin Energia, *Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi HELEN Sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkkoon*. Helsingin Energia, 2006.
[Viitattu 27.4.2007] Saatavissa:
<http://www.helsinginenergia.fi/verkko/urakointiohjeet/SU6082006.pdf>
- /13/ Sener, *Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon*. Sähköenergialiitto ry SENNER, 2001.
- /14/ Lauri Kumpulainen, Ilari Ristolainen, *Sähköjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen*. Tutkimusraportti. VTT, 2006.
- /15/ Tuomo Lindh, *Permanent magnet generator designing guidelines*. LUT, 2007.



LIITE 2

VERKKOVAIHTOSUUNTAAJAN AVULLA VERKKOON KYTKETYN GENERAATTORIN AUTOMAATION TOIMINTASELOSTUS

Laitetaan kiinni pääkatkaisija (0Q0) ja kytkin (1Q1) jolloin logiikat ja automaatio saa käyttäjännitteen.

Sähkökeskuksessa on valintakytkin 1S2, josta voidaan valita automaattiajo tai käsiajo. Tältä kytkimeltä logiikka (I1.1 - generaattori automaatti/käsiikäyttö) saa käynnistysluvan. Sähkökeskuksessa on myös toinen painikekytkin 1S6, josta annetaan lupa kytkeytyä syöttämään energiaa verkkoon (I0.1 – generaattori irti verkosta / verkkoon). Tämän kytkimen vaikutus on säädeltävissä valvomosta (Laitos PLC, I1.5 - Laitos-ohjauksella verkkoon, I1.2 Laitos-ohjauksella irti verkosta).

Annetun käynnistysluvan jälkeen alkaa voimalan ylösajovaihe, jossa vaiheessa automaatio tarkistaa antureiden ja tärkeiden toimilaitteiden kunnan ja sallii käynnistymisen mikäli kaikki on kunnossa.

Toimintasekvenssit

Käynnistyssekvenssi

- Generaattorikatkaisija 1Q0 – kiinni,
Q0.1 -> (1K0.1 & 1K9.2) -> kiinniohjaus
- Taajuusohje vakio (generoiva moodi),
Sematic 1A3 EM235, M0,0 -> Taaj. muut. 1x11-2, 1x11-1
- Modulointi (VVS)
Q2.6 -> 1K2.6 kiinni
- Kontaktori 1K4 – kiinni
Q2.1 -> (1K2.1 & 1K9) -> 1K4 kiinni
- Avataan turpiinin päänhöyryventtiili
Q0.2 -> 1K0.2 kiinni
- Nopeusohje nopeudensäätäjälle Modbus
- Mitataan pyörimisnopeutta

Taaj. muut. (1x11:3, 1x11:4) -> 1A3 (C+,C-) tai

Deif MTR-2 (1U2) (5,6) -> 1A3 (D+, D-)

- Taajuusohje (taajuusohjetta vastaava vääntömomentti on saatavissa)
Simatic 1A3 EM235, M0,0 -> Taaj. muut. (1x11-2, 1x11-1)
- Modulointi (GVS)
Q2.7 -> 1K2.7 kiinni
- Nopeusohje nopeudensäätäjälle
Modbus

Pysähdyssekvenssi

- Pysähdysohje nopeussäätimelle Modbus
- Mitataan teho Taaj. muut. (1x11:5, 1x11:6)-> 1A3 (B+,B-) tai
Deif MTR-2 (1U2) -> 1P3 -> 1A3 (A+,A-)
- Kun 0, lopetetaan modulointi (GVS) Q2.6 -> 1K2.7 auki
- Suljetaan päähöyryventtiili kiinniasentoon Q0.2 -> 1K0.2 kiinni
- Kontaktori 1K4 – auki Q2.1 -> (1K2.1 & 1K9) -> 1K4 auki
- Haluttaessa jätetään verkkovaihtosuuntaaja syöttämään loistehoa verkkoon, muuten:
 - Lopetetaan modulointi, Q2.6 -> 1K2.6 auki
 - Generaattorikatkaisija 1Q0 – auki, Q0.1 -> 1K0.1 kiinni

Ensiösuojaukset

- Generaattorikatkaisija 1Q0 ohjaavat jänniterele (1F8, Deif RMV-112D) ja taajuusrele (1F15, Deif LMR-122D) (1K9, 7-6, 7-2)
- Ylivirtasuojaus – taajuudenmuuttajan sisäinen ylivirtasuojaus.
- Takatehosuojaus – taajuudenmuuttajan teho- ja vääntömomenttiohjeen avulla.

Pääkatkaisija 0Q0:

- oikosulkusuojaus
- ylikuormitussuojaus
- alijännitelaukaisin

Generaattorikatkaisija 1Q0:

- oikosulkusuojaus
- ylikuormitussuojaus
- alijännitelaukaisin

Proseduurit:

- Generaattorikatkaisija aukeaa kun generaattori syöttää verkkoa → hätäsulku
- Vajaateho → hallittu alasajo (pysähdyssekvenssi)
- Takateho → hallittu alasajo (pysähdyssekvenssi)
- Generaattorikatkaisija ei aukea → Häiriövalo. Jää verkossa kunnes pääkatkaisija 0Q0 aukaistaan manuaalisesti.
- PLC vika tai apujännitevika → 1K9 (ensiösuojaukset, kaavio 7-6) päästään ja generaattorikatkaisija (1Q0) aukeaa, turpiinin höyryventtiili menee kiinni.

SUORAAN VERKKOON KYTKETYN GENERAATTORIN AUTOMAATION TOIMINTASELOSTUS

Laitetaan kiinni pääkatkaisija (0Q0) ja kytkin (1Q1) jolloin logiikat ja automaatio saa käyttöjännitteen.

Sähkökeskuksessa on valintakytkin 1S2, josta voidaan valita automaattiajo tai käsiajo. Tältä kytkimeltä logiikka (I1.1 - generaattori automaatti/käsiikäyttö) saa käynnistysluvan. Sähkökeskuksessa on myös toinen painikekytkin 1S6, josta annetaan lupa kytkeytyä syöttämään energiaa verkkoon (I0.1 – generaattori irti verkosta / verkkoon). Tämän kytkimen vaikutus on säädeltävissä valvomosta (Laitos PLC, I1.5 - Laitos-ohjauksella verkkoon, I1.2 Laitos-ohjauksella irti verkosta).

Annetun käynnistysluvan jälkeen alkaa voimalan ylösajovaihe, jossa vaiheessa automaatio tarkistaa antureiden ja tärkeiden toimilaitteiden kunnan ja sallii käynnistykseen mikäli kaikki on kunnossa.

Pysähdyssekvenssi

- Pysähdysohje nopeussäätimelle, Modbus
- Mitataan teho, Deif MTR-2 (1U2) -> 1P3 -> 1A3 (A+,A-)
- Teho, lähes 0 → aukaistaan generaattorikatkaisija, Q0.1 -> 1K0.1 kiinni
- Suljetaan päähöyryventtiili kiinniasentoon, Q0.2 -> 1K0.2 kiinni

Ensiösuojaukset

Generaattorikatkaisija 1Q0 ohjaavat jänniterele (1F8, Deif RMV-112D) ja taajuusrele (1F15, Deif LMR-122D) (1K9, 7-6, 7-2)

SUORAAN VERKKOON KYTKETTY TAHTIGENERAATTORI

Käynnistys alkaa avaamalla turbiinia, generaattori alkaa kiihtyä.

Verkkoonkytkentä tapahtuu tahdistamalla generaattori verkkoon ja sulkemalla generaattorikatkaisija (1Q0).

Tahdistus tapahtuu ajamalla 50 Hz taajuutta kunnes oikea tahdistushetki löytyy ja logiikkaan asetellut ehdot täyttyvät ja verkkoonkytkentä on sallittu tahdistimen luvalla. (ABB:n SYNCHROTECT CSS (ABB SYN 520X) tahdistus järjestelmä tai Deif:n FAS-115DG tahdistin kytkettynä ABB:n generaattoriin (AVR) ja turpiinin governor:iin (SG)).

Käynnistyssekvenssi

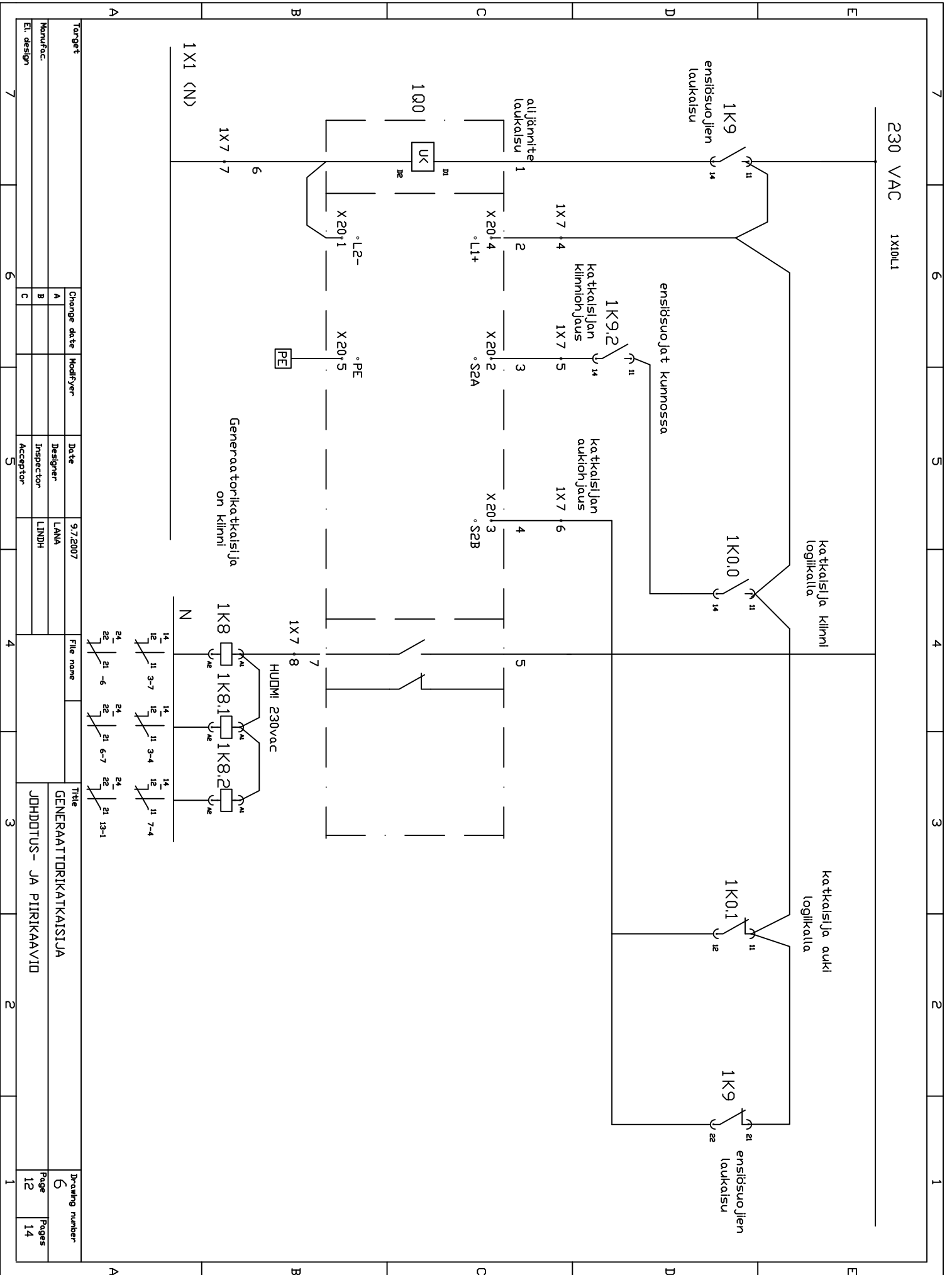
- FAS-115DG Inhibit, Q1.2 -> K1.2(kiinni) -> FAS-115DG (34,35)
- Mitataan pyörimisnopeutta, Deif MTR-2 (1U2) (5,6) -> 1A3 (D+, D-)
- Avataan päähöyryventtiiliä, Q0.2 -> 1K0.2 kiinni
- Nopeusohjaus nopeussäätimelle, Modbus
- FAS-115DG Inhibit, Q1.2 -> K1.2(auki) -> FAS-115DG (34,35)
- FAS-115DG säättää generaattoriin (AVR) ja turpiinin governor:iin (SG).
- Tahdistuslaitteen Deif FAS-115DG (1F16) avulla suljetaan generaattori katkaisija kun generaattorin napajännitteen ja verkon jännitteen vaiheet ovat sama,
1F16 (9,10) -> I0.3 (Synkronointi pulssi)
(Q0.0 -> 1K0.0) & 1K9.2 -> 1Q0 kiinniohjaus
- Samalla L1 (FAS-115DG, 29) menee auki ja kytkee pois käytöstä FAS-115DG
- Nopeusohjaus nopeussäätimelle (nopeussäätimen venttiili auki), Modbus
- Generaattorin tehokerrointa ja tehoa säädetään PLC avulla. (AVR(Q3.2, Q3.3), SG(Q3.4, Q3.5))
- Verkko määrää generaattorin taajuuden ja jännitteen

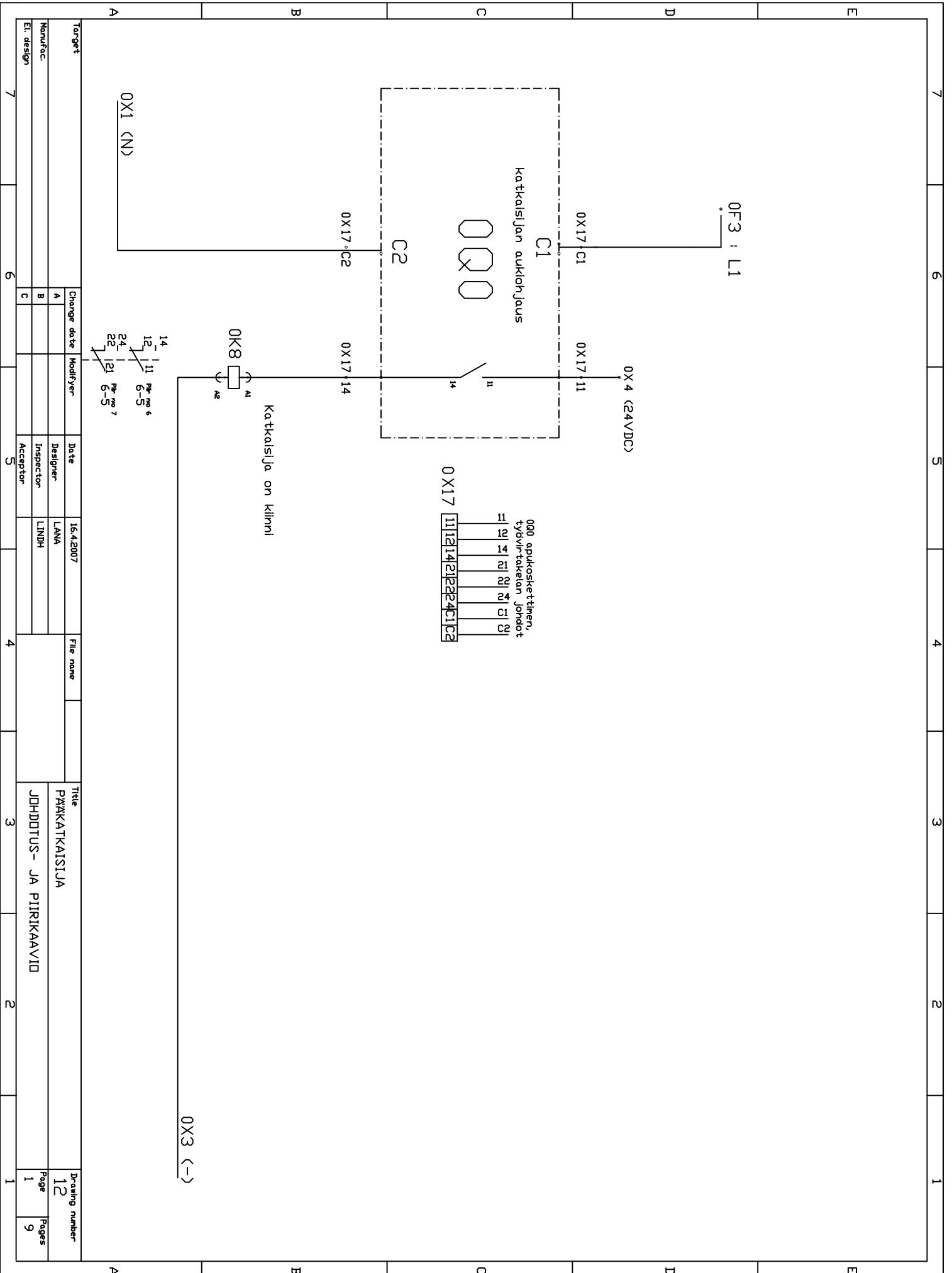
SUORAAN VERKKOON KYTKETTY EPÄTAHTIGENERAATTORI

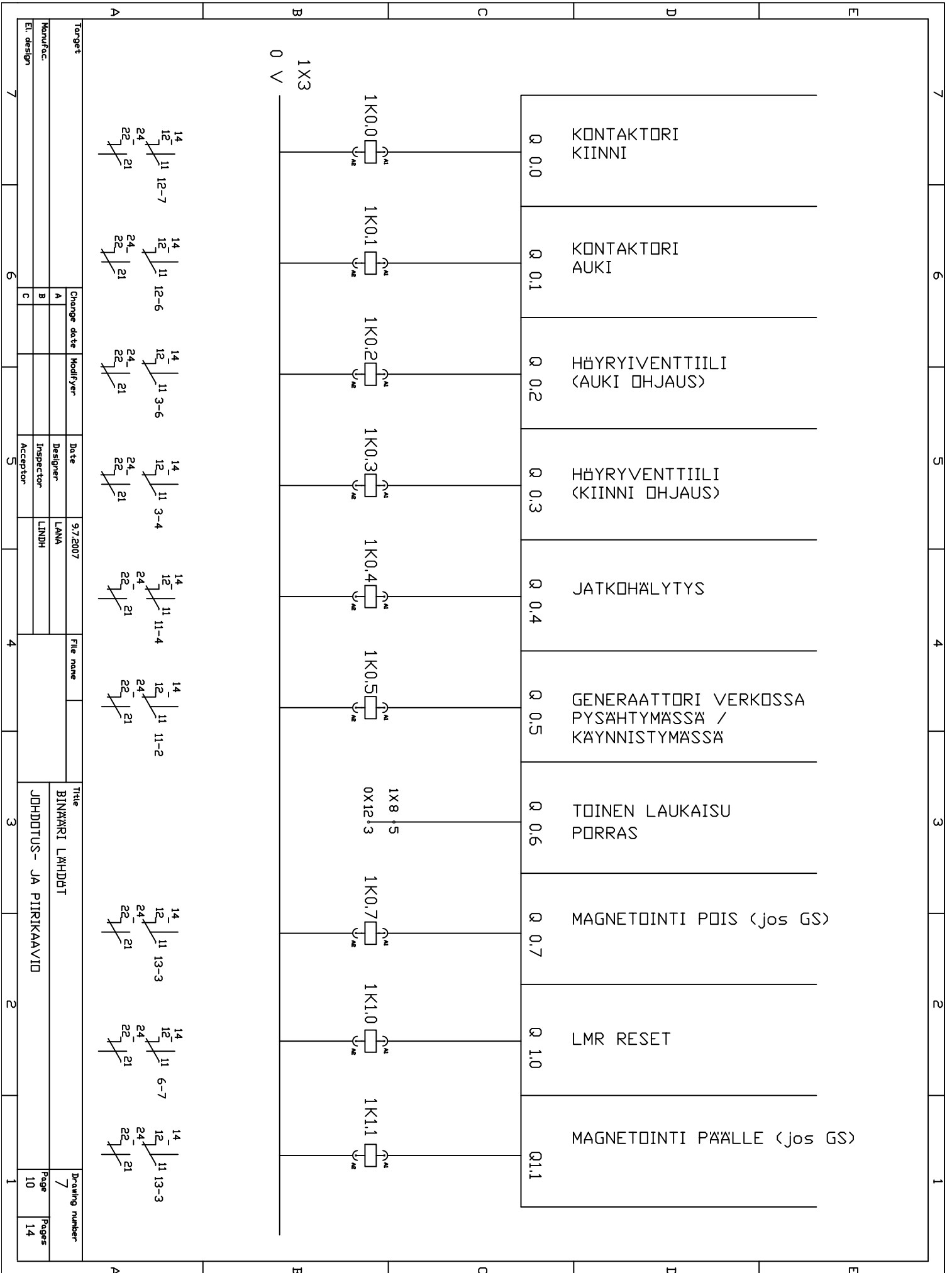
Automaatio toimii edellä esitetyllä tavalla. Verkkoon tahdistutaan verkkokatkaisijan avulla.

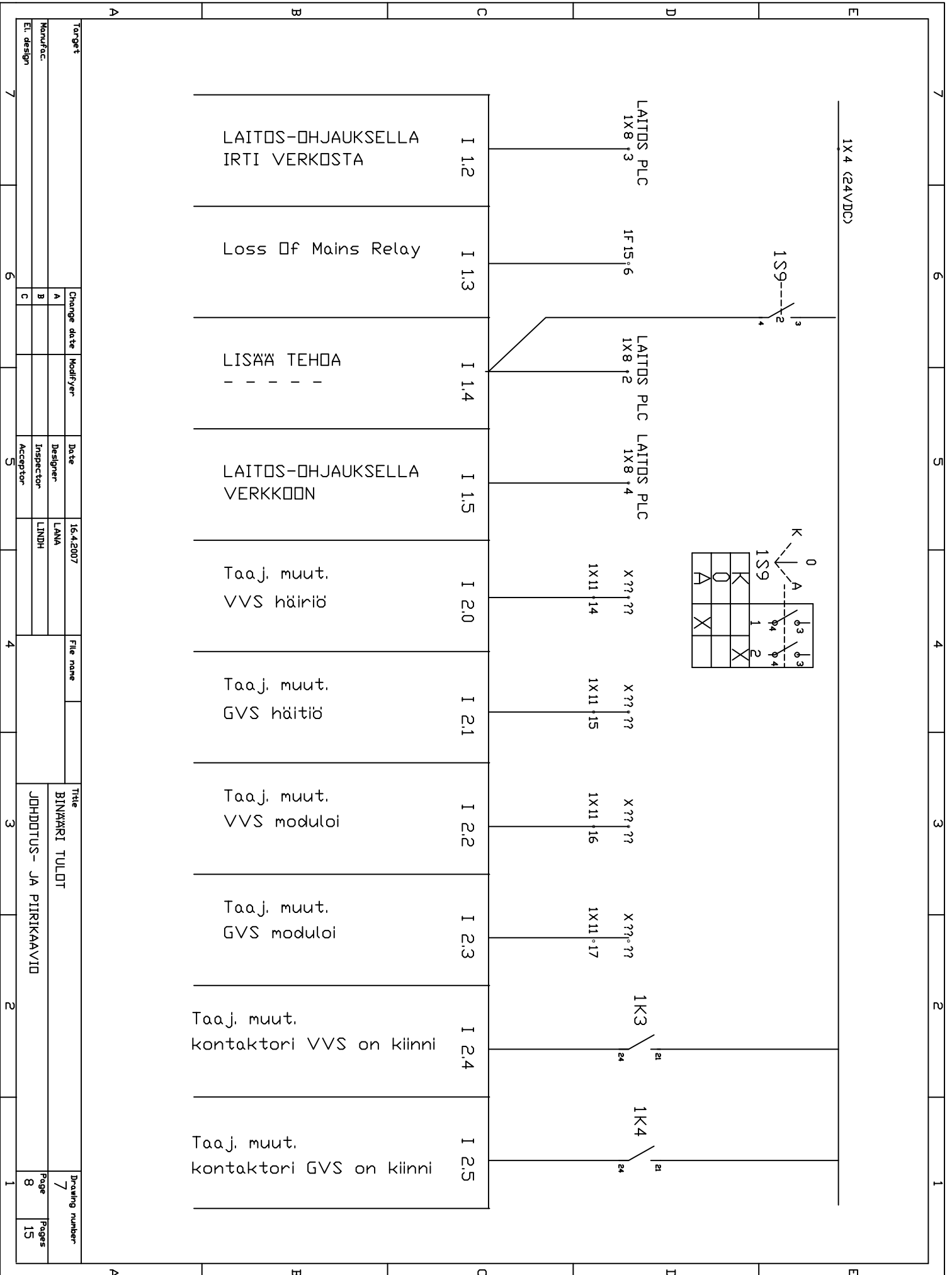
Käynnistyssekvenssi

- Mitataan pyörimisnopeutta, Deif MTR-2 (1U2) (5,6) -> 1A3 (D+, D-)
- Avataan päänhöyryventtiiliä, Q0.2 -> 1K0.2 kiinni
- Nopeusohjaus nopeussäätimelle, Modbus
- Synkroninopeudella suljetaan generaattori katkaisija
(Q0.0 ->1K0.0) & 1K9.2 -> kiinniohjaus
- Nopeusohjaus nopeussäätimelle (nopeussäätimen venttiili auki), Modbus



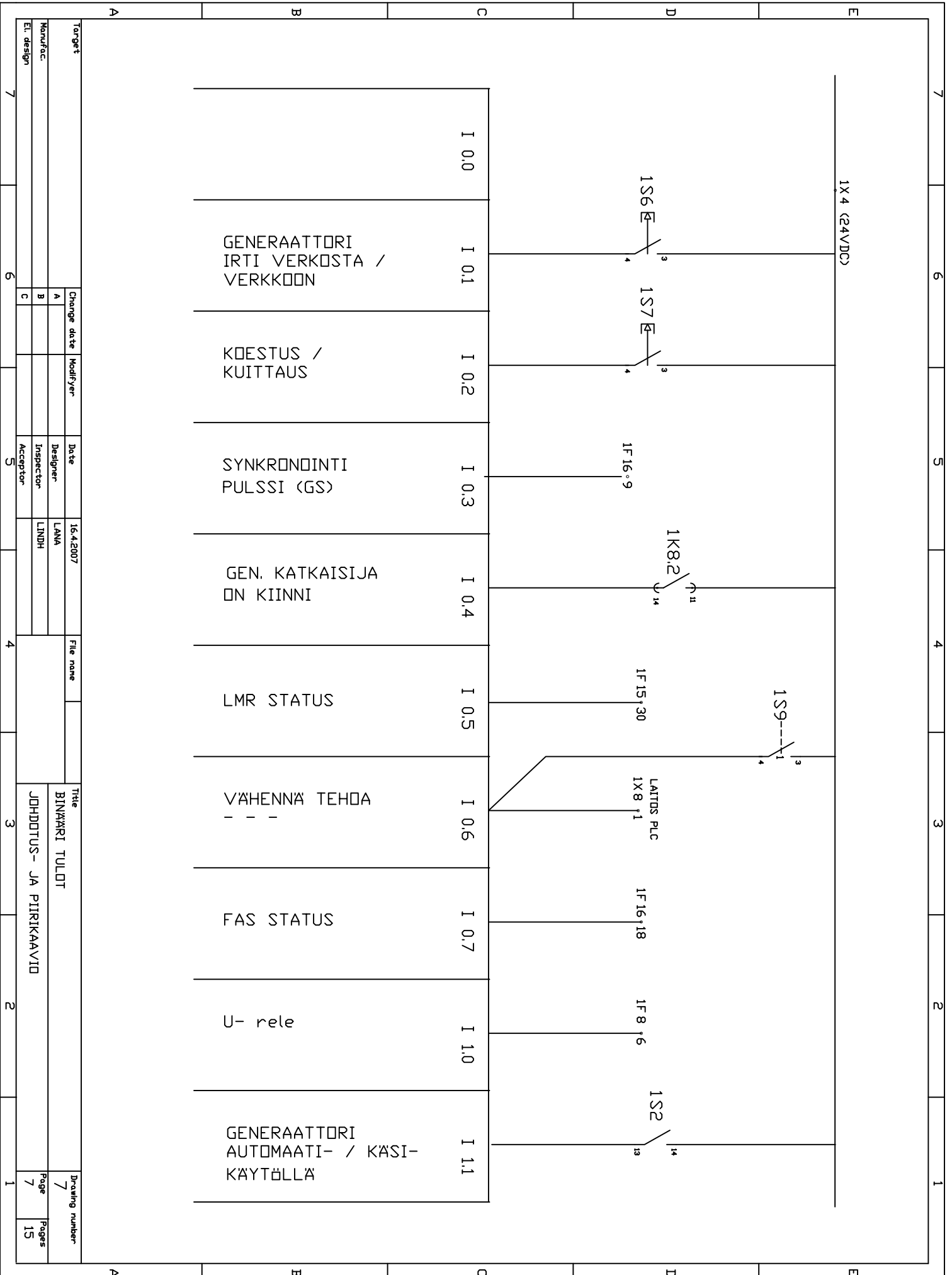


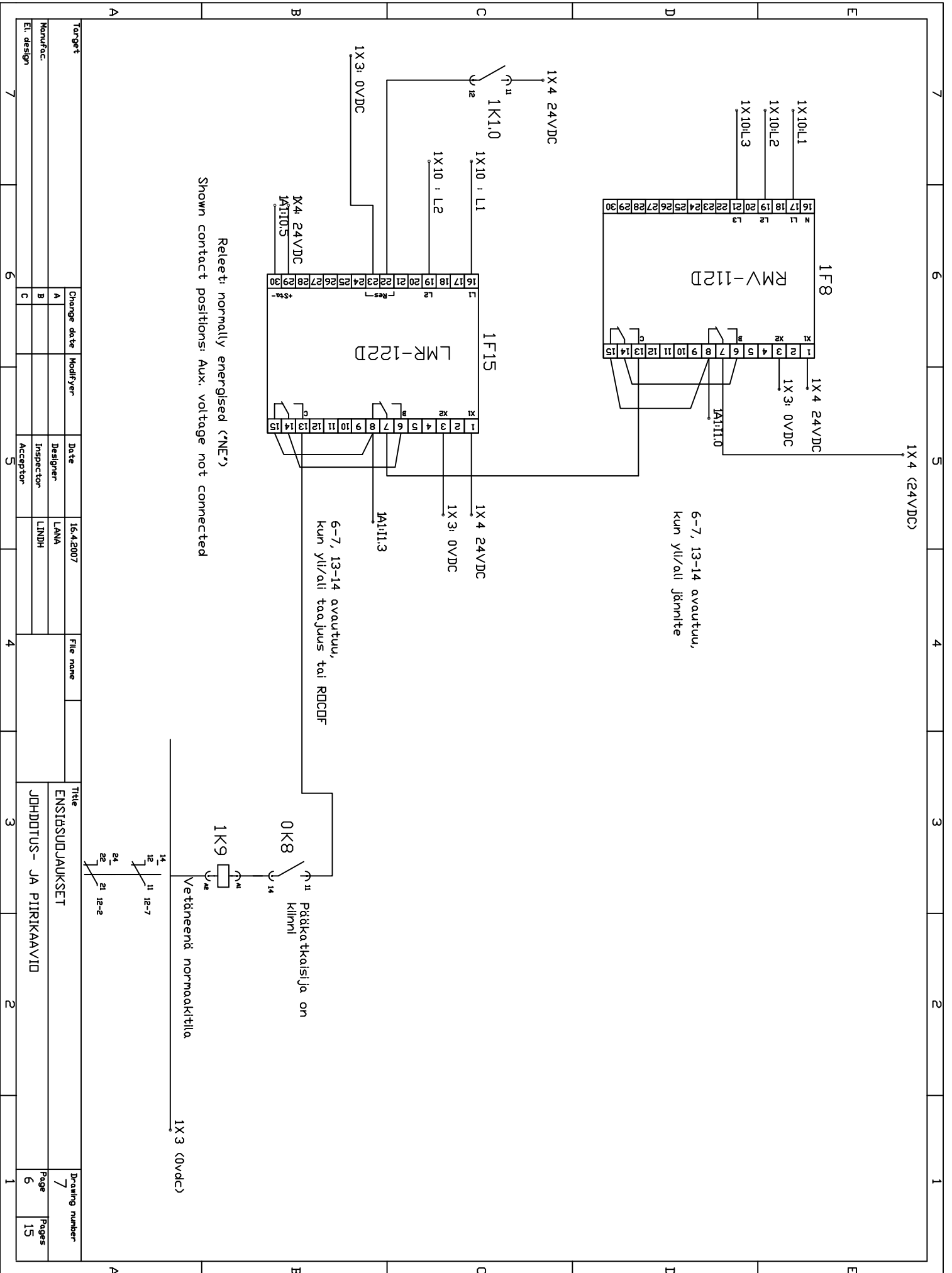




I 1.2	I 1.3	I 1.4	I 1.5	I 2.0	I 2.1	I 2.2	I 2.3	I 2.4	I 2.5
LAITOS-OHJAUKSELLA IRTI VERKOSTA	Loss of Mains Relay	LISÄÄ TEHÖÄ - - -	LAITOS-OHJAUKSELLA VERKKOON	Taaj. muut. VVS häiriö	Taaj. muut. GVS häitiö	Taaj. muut. VVS moduloi	Taaj. muut. GVS moduloi	Taaj. muut. kontaktori VVS on kiinni	Taaj. muut. kontaktori GVS on kiinni

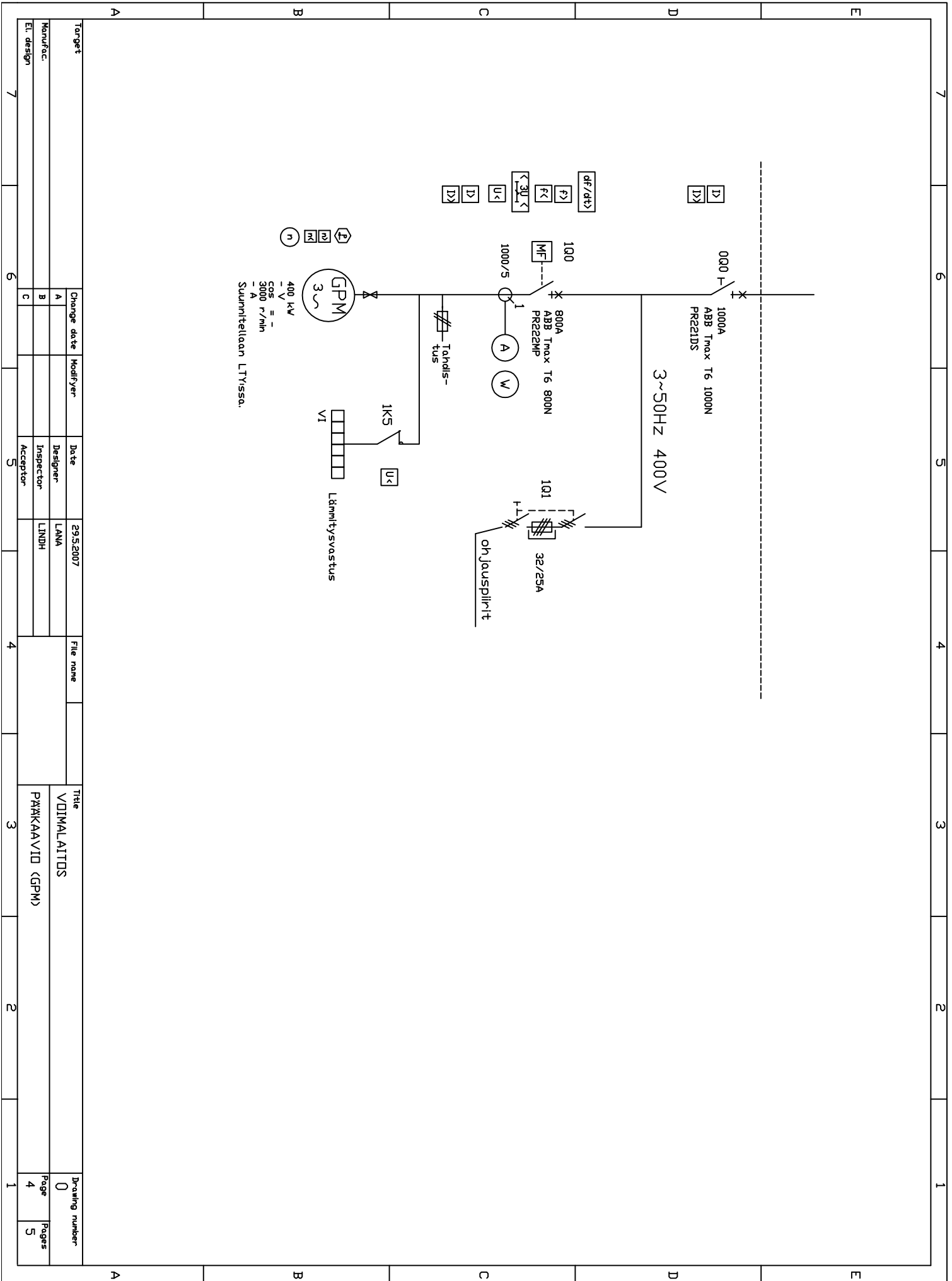
target	Change date	Modify/ver	Date	Designer	Inspector	Accepter	File name	Title	Drawing number
Manufac:	A		16.4.2007	LAMA	LINDH			BIVAKARI TULLOT	7
EI design	B							JOHDOTUS- JA PIIRIKAAVIO	8
	C								Pages
									15



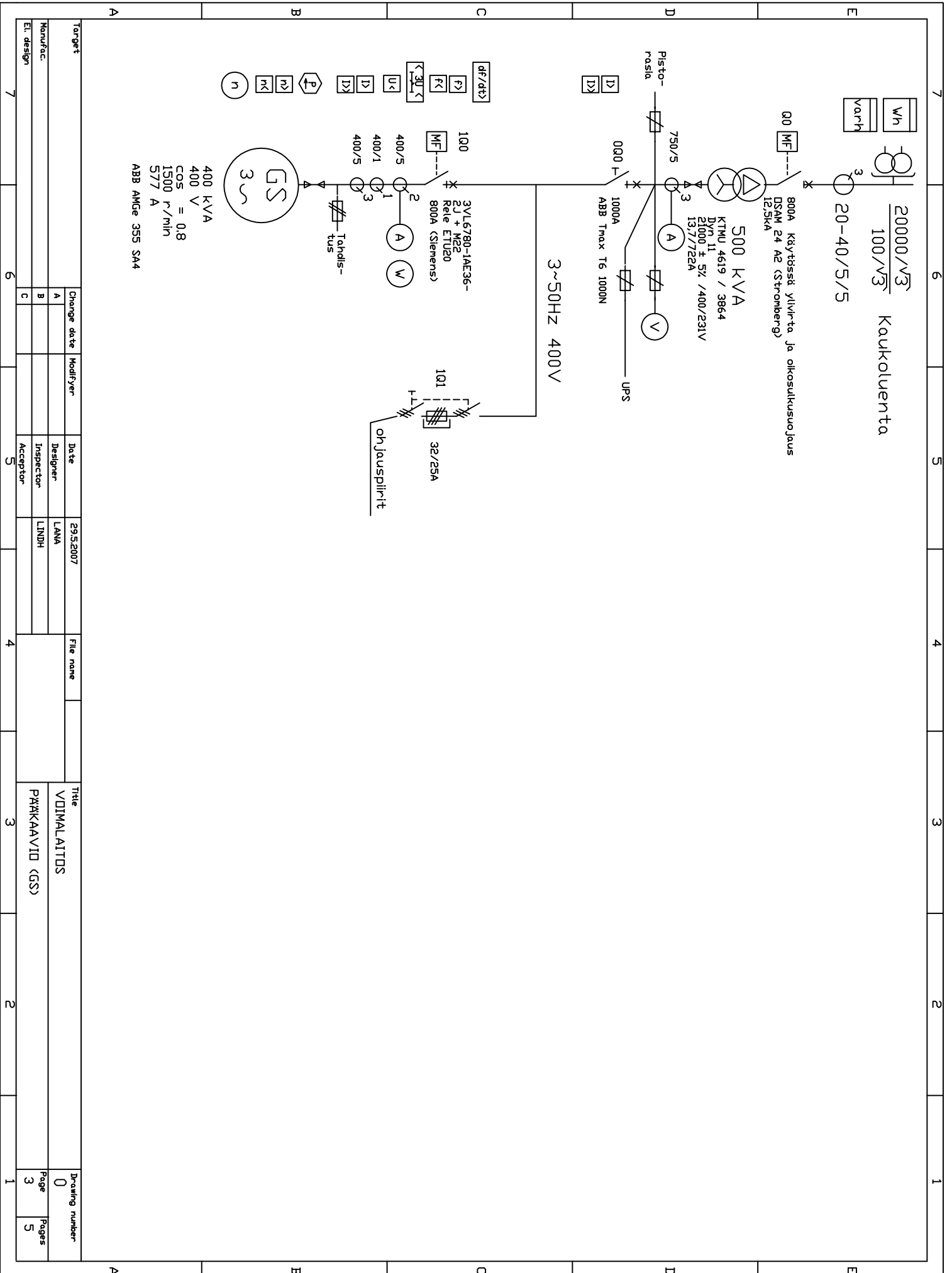


Releeti: normally energised ('NE')
Shown contact positions: Aux voltage not connected

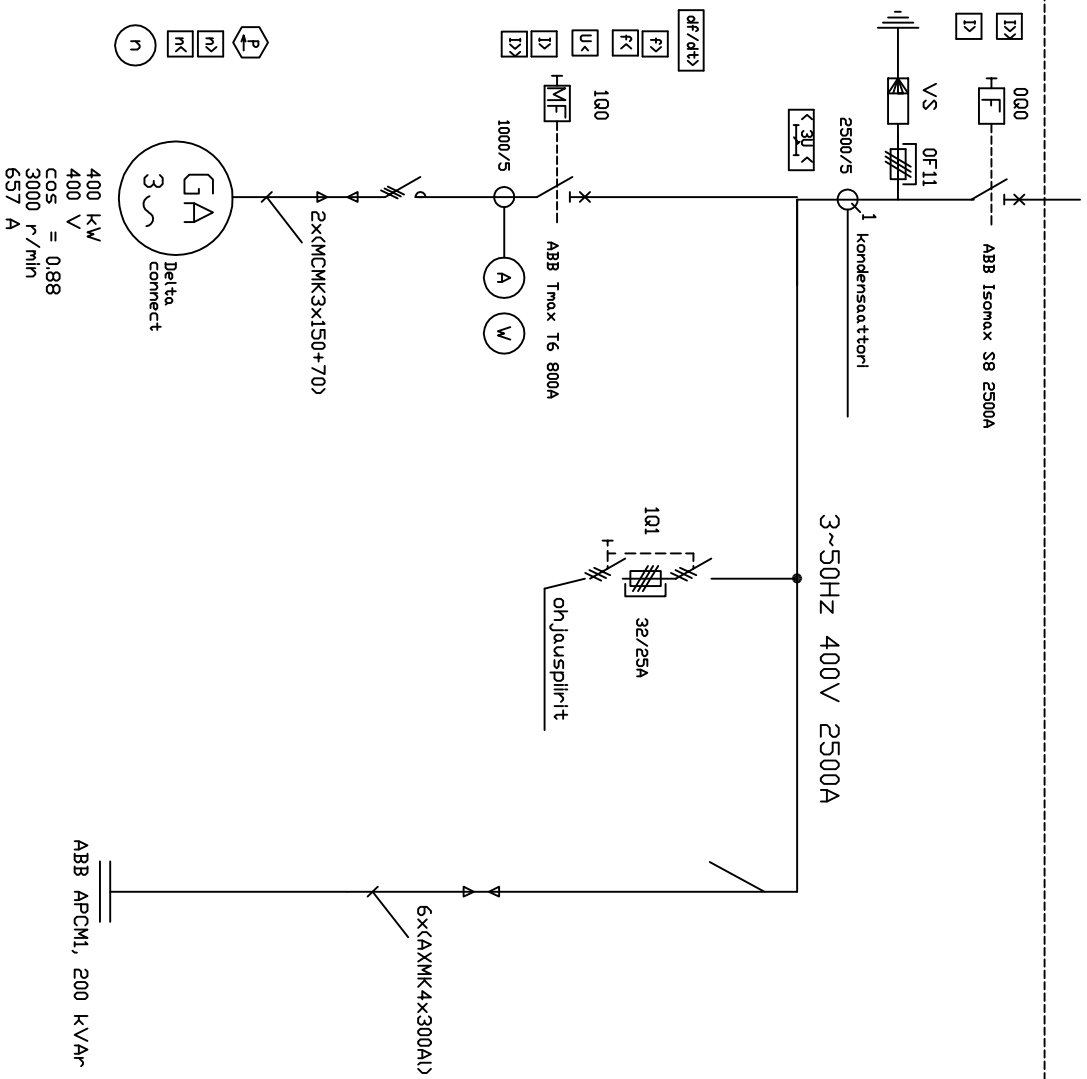
target	Change date	Modify/ver	Date	File name	Title	Drawing number
Manufac:	A		16.4.2007		ENSISUJAJUKSET	7
Elr design	B	Designer	LAMA		JOHDOTUS- JA PIIRIKAAVIO	6
	C	Inspector	LINDH			15
		Acceptor				



target	Change date	Modifyer	Date	29.5.2007	Title VOIMALAITOS	Drawing number 0	
	Manufacturer	A	Designer	LANA			
	Eur design	B	Inspector	LINDH			
		C	Acceptor				
File name						PAKKAAVIJO (GPM)	
Date				29.5.2007	Page 4		
Inspector				LINDH	Page 5		
Acceptor							



target	Change date	ModifYer	Date	File name	Title	Drawing number
Manufac:	A		Designer		VOIMALAITOS	0
Elr design	B		Inspector		PAKKAAVIIO (GSS)	3
	C		Acceptor			5



target	Change date	Modif/yer	Date	Designer	Inspector	Accepter	Title	Drawing number
	A		16.4.2007	LANA	LINDH		VOIDMALAITTOS	0
Manufac:	B						PAKKAAVIO (GA)	Page
Elr design	C							2
								5

