

Petri Hämäläinen

27.6.2008

0259805

Säte TKK N

BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari 10 op

KANDIDAATINTYÖ

Loistehon tuottaminen painehiomon tahtimoottoreilla

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Petri Hämäläinen

Loistehon tuottaminen painehiomon tahtimoottoreilla

Kandidaatintyö

2008

54 sivua, 34 kuvaa, 3 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: professori Jarmo Partanen

Hakusanat: loisteho, tahtikone, tahtimoottori, kompensointi, optimointi

Keywords: reactive power, synchronous machine, synchronous motor, compensation, optimization

Tämän työn tavoitteena on selvittää, millaisia häviöitä loistehon tuottaminen Stora Enson Anjalankosken tehtaiden hiomorakennuksessa sijaitsevilla kuudella 14 MW tahtimoottorilla aiheuttaa. Lähtötietoina käytettiin moottoreiden valmistajalta saatuja arkistotietoja ja niiden perusteella laadittiin päivitetty akselitehon ja loistehotuotannon tilaa kuvaava PQ-diagrammi digitaaliseen muotoon.

Saatujen tulosten avulla on mahdollista suunnitella kustannustehokas tapa käyttää painehiomon tahtimoottoreita koko tehdasalueen loistehon säätöön.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Degree program of Electrical Engineering

Petri Hämäläinen

Reactive power production with pressure groundwood plant's synchronous motors.

Bachelor's thesis

2008

54 pages, 34 figures, 3 tables and 4 appendices

Examiner: professor Jarmo Partanen

Keywords: reactive power, synchronous machine, synchronous motor, compensation, optimization

The aim of this thesis is to evaluate the extensiveness of the total losses that are being caused in the reactive power production by six 14 MW synchronous machines in the pressure groundwood plant at Stora Enso Anjalankoski Mill. Machine manufacturer's archives were used as initial data to form a digital PQ-diagram describing the correlation between shaft power and reactive power production.

By means of the obtained results it is possible to plan a cost-effective way to operate the above mentioned machines to adjust the reactive power balance at the mill area.

ALKULAUSE

Tämä tekniikan kandidaatintyö on tehty Stora Enso Anjalankosken tehtailla kesien 2006 ja 2007 aikana kerätyn lähtöaineiston pohjalta. Varsinainen työn kirjoittaminen ja analysointi tehtiin vuoden 2008 alussa. Työ käsittelee loistehon tuottamista hiomon tahtimoottoreilla sekä tämän aiheuttamia tehohäviöitä.

Hiomon tahtimoottoreiden magnetoitijärjestelmien uusinta on käynnissä, joten magnetoititapojen tarkempi tutkiminen, teknillisine ja taloudellisine näkökulmineen, nähtiin tarpeelliseksi.

Esitän suuret kiitokseni Stora Enson Anjalankosken tehtaiden sähkö- ja automaatio suunnitteluosaston henkilöstölle sekä työn ohjaajalle, suunnittelupäällikkö Harri Mörsärille heidän antamastaan tuesta sekä neuvoista. Kiitokset myös ABB Oy:n Seppo Pirhoselle. Hänen avullaan sain entisen Strömbergin arkistoista paikkansapitäviä arkisto- ja lähtötietoja.

Haluan kiittää myös työn tarkastajaa professori Jarmo Partasta sekä sähkönkäyttötekniikan professoria Juha Pyrhöstä heidän antamastaan avusta työn aikana ilmenneiden kysymysten ja ongelmien ratkaisemisessa.

Suuret kiitokset myös vaimolleni Päiville jaksamisesta sekä henkisestä tukemisesta.

Anjalankoskella

27.6.2008

Petri Hämäläinen

Asemankuja 5, 46400 KAIPIAINEN

+358 - (0)40 - 5540 468

SISÄLTÖ

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	8
1. JOHDANTO	10
1.1 Työn tavoite	10
1.2 Aiheen rajaus	11
1.3 Stora Enso Anjalankosken tehtaat	11
1.3.1 Paperikoneet ja kartonkikone	13
1.3.2 Painehiomo	14
1.3.3 Voimalaitokset	15
1.3.3.1 Lämpövoimalaitokset	15
1.3.3.2 Vesivoimalaitokset	16
2. TEHDASALUEEN SUURJÄNNITEJAKELU JA -KESKUKSET	18
2.1 110 kV ulkokenttä 12S101	18
2.2 10,5 kV pääkeskukset 12S104 ja 12S105	19
2.3 6,3 kV pääkeskus 12S102	20
2.4 Vesivoimalaitoksen 6,3 kV keskus 13S150	21
2.5 Paperi- ja kartonkitehtaan muut keskukset	22
2.6 Hiomon keskukset	22
2.7 Suurvirtajärjestelmät	23
3. TEOREETTINEN TARKASTELU	25
3.1 Osoitinpiirrokset	25
3.1.1 Kapasitanssi vaihtosähköpiirissä	25
3.1.2 Induktanssi vaihtosähköpiirissä	26
3.2 Näennäis-, päto- ja loisteho	27
3.3 Loistehon kompensointi	29
3.3.1 Yksittäiskompensointi	31
3.3.2 Kojeryhmien kompensointi	31
3.3.3 Keskitetty kompensointi	32
3.4 Tahtikone	33
3.4.1 PQ-diagrammi	35
3.4.2 Magnetoinnin säädön vaikutukset	36
3.4.2.1 Vakiotehokerroinsäätö	37
3.4.2.2 Vakioloistehosäätö	37
3.4.2.3 Vakiojännitesäätö	38
3.4.3 Loistehotuotannon ohjaus	39
3.4.4 Häviöt	40
3.5 Kapasitiivinen jännitteennousu	42
4. LOISTEHOTUOTANTO HIOMON TAHTIMOOTTOREILLA	44

4.1	10,5 kV verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä	44
4.2	Loistehotuotannon rajat	47
4.3	Loistehon tuottamisen ja siirron aiheuttamat häviöt	48
4.4	Euromääräisten kustannusten arviointi	51
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	53
	LÄHDELUETTELO	54
	LIITTEET	
I	Tehdasalueen suurjännitejakelun suppea yleiskaavio	
II	Verkon osissa syntyvät häviöt	
III	Hiomon tahtikoneiden PQ-diagrammi	
IV	Laskentataulukot	

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

C	kapasitanssi	F
f	taajuus	Hz
I	virta	A
j	imaginääriyksikkö	
L	induktanssi	H
n	pyörimisnopeus	min ⁻¹
p	napapariluku	
P	pätöteho	W
PDF	Package Derived Fuel	
Q	loisteho	VAr
R	resistanssi	Ω
S	näennäisteho	VA
SM	synkronimoottori	
U	jännite	V
X	reaktanssi	Ω
z	suhteellinen impedanssi	p.u.
Z	impedanssi	Ω

Kreikkalaiset

δ	kuormitus- eli napakulma	rad
φ	vaiheensiirtokulma, tehokulma	rad
ω	kulmanopeus	rad/s

Alaindeksit

C	kapasitiivinen
d	pitkittäinen (-reaktanssi), tahti (-reaktanssi)
fe	rautahäviö
k	oikosulku
kurist	kuristin
l	lisä
mag	magnetointi
mek	mekaaninen
mkaap	moottorikaapeli
N	nimellinen
q	poikittainen
r	resistiivinen
st	staattori
svj	suurvirtajärjestelmä

1. JOHDANTO

Teollisuuden käyttämästä sähköenergiasta suurin osa kulutetaan pyörivissä sähkökoneissa, jotka usein kuluttavat induktiivista loistehoa. Eräillä konetyypeillä voidaan kuitenkin myös tuottaa loistehoa. Tässä työssä on käsitelty Stora Enson Anjalankosken tehtaiden hiomon päämoottoreita sekä niillä tuotetun loistehon aiheuttamia kustannuksia.

1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena on ensinnä antaa yleiskuva loistehon tuotantomahdollisuuksista hiomon tahtimoottoreilla sekä tarkastella tämän aiheuttamia häviöitä itse moottorissa sekä sähköverkossa. Taustalla on tarve luoda moottoreiden käyttäjille työkalut loistehotaseen taloudelliseen ja tehokkaaseen hallintaan kehitettäessä koko tehtaan kattavaa loistehon säätöjärjestelmää.

Aiheen tekee ajankohtaiseksi hiomon päämoottoreiden magnetointien uusiminen, joka tapahtuu vaiheittain vuodesta 2007 alkaen. Uusilla magnetointilaitteistoilla on loistehon hallinta helppoa ulkoisin ohjein; vanhoissa magnetointilaitteissa loistehon tavoitearvot säädettiin potentiometreillä, mikä on erittäin epätarkkaa ja hankalaa eikä loistehon säätö ole ymmärrettävästikään ollut mahdollista reaaliaikaisesti. Uudet magnetointilaitteistot liitetään tehtaan automaatiojärjestelmään.

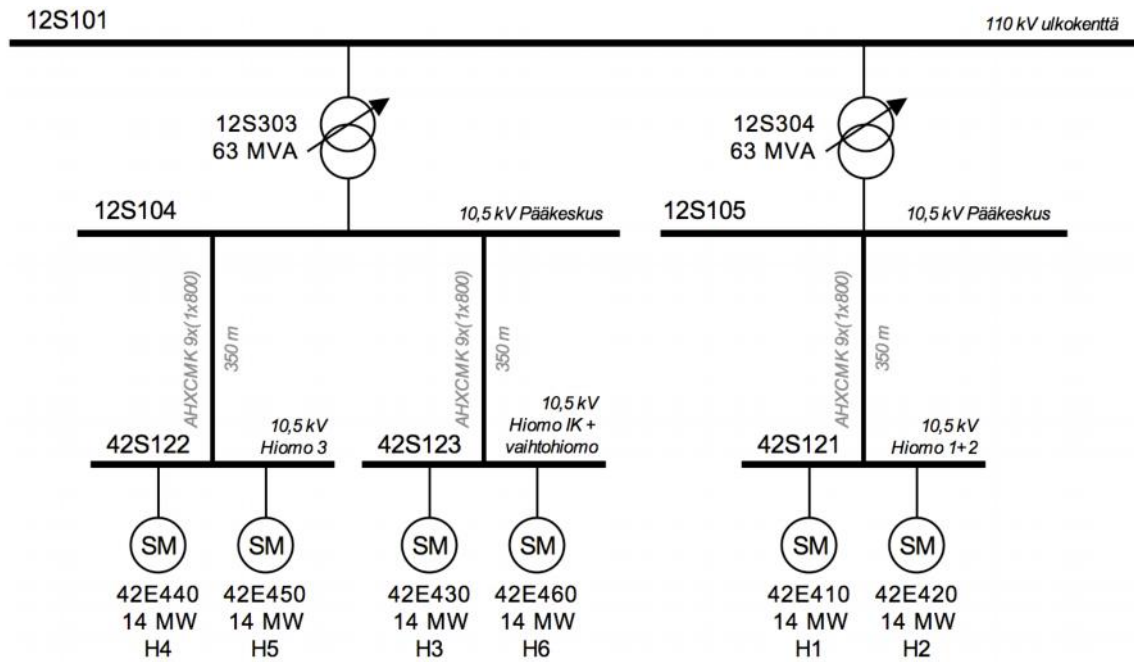
Samassa yhteydessä tarkastellaan rajoituksia, joita loistehon tuottamiseen liittyy.

Toinen tärkeä tavoite on selvittää moottorien nykyiset nimellisarvot, sillä valmistaja on nostanut koneiden nimellistehon 12 MW:sta 14 MW:iin.

1.2 Aiheen rajaus

Tässä työssä käsiteltävä aihe on rajattu koskemaan 10,5 kV verkkoa siihen liittyvine 110/10,5 kV muuntajineen.

Työhön liittyvä verkon osa käy ilmi kuvasta 1-1.



Kuva 1.1. Hiomon tahtimoottorit ja niitä syöttävä verkko

1.3 Stora Enso Anjalankosken tehtaat

Stora Enson Anjalankosken tehtailla on kolme paperikonetta, kartonkikone, maailman suurin painehiomo (PGW), termohiertämä (TMP) sekä kaksi voimalaitosta. Tehtaan välittömässä läheisyydessä on myös kaksi vesivoimalaitosta, jotka nykyisin omistaa Kemijoki Oy.

Anjalankosken tehtaiden tuotteita ovat kirja- ja mekaaniset erikoispaperit sekä taivekartonki. Paperitehtaan toiminnasta vastaa Stora Enso Publication Papers Oy Ltd ja kartonkitehtaan Stora Enso Ingerois Oy. Kunnossapito- ja tehdaspalveluista huolehtii Kymenso Oy.

Ilmakuvasa (kuva 1.2) näkyvät Kymijoen varressa, Anjalankosken Inkeröissä sijaitsevat paperitehtaat. Tehdastoiminta alueella alkoi vuonna 1872 sittemmin valjastetun Ankkapurhan kosken rannalla. Kuvassa (kuva 1.3) näkyy paperitehtaan eteläpuolella sijaitseva Inkeröiden kartonkitehdas. /Tampella Oy, 1972, s.28/



Kuva 1.2 Anjalankosken paperitehdas. /Myllyntausta, 2008/



Kuva 1.3 Inkeröiden kartonkitehdas. /Myllyntausta, 2008/

Vuonna 2006 kaikkien paperikoneiden yhteenlaskettu kapasiteetti oli 515 tuhatta tonnia ja kartonkikoneen kapasiteetti 210 000 tonnia. Kyseisenä vuonna tehtaas tuottivat 468 000 tonnia papereita sekä 189 000 tonnia taivekartonkia. Valtaosa tehtaiden tuotannosta menee suoraan vientiin. /Stora Enso Oyj, 2006, s.4/

Henkilöstöä tehtaalla oli vuoden 2006 lopussa 1067 liikevaihdon ollessa 488,2 M€ /Stora Enso Oyj, 2006, s.4/

Tehtaat käyttävät kuituraaka-aineinaan mekaanisia sekä selluloosamassoja. Mekaaniset massat valmistetaan alueen painehiomossa sekä termohiertämössä. Sellumassat tulevat Stora Enson konserniyhtiöiden tehtailta Enocell Oy:stä ja Sunila Oy:stä. Raakapuuta tehdas käyttää vuosittain yli 1 100 000 m³ sekä selluja yli 100 000 tonnia. /Stora Enso Oyj, 2006, s.4-8/

1.3.1 Paperikoneet ja kartonkikone

Paperikone yksi tuottaa kirjapapereita, joiden neliöpainot ovat välillä 60 – 90 g/m². Sen nopeus on 850 m/min ja trimmileveys 550 cm. /Myllyntausta, 2008/

Paperikone kahden tuotteita ovat päällystetyt hiokepitoiset aikakausilehtipaperit (MFC), joiden neliöpainot vaihtelevat välillä 54 – 80 g/m². Koneen nopeus on 1250 m/min ja trimmileveys 528 cm. Yhtiön suorittamien tuotantojärjestelyjen vuoksi paperikone yksi lopettaa tuotantonsa loppuvuodesta 2008 sen jälkeen, kun paperikone kahden muutostyöt valmistettavan tuotteen muuttamiseksi aikakausilehtipaperista kirjapaperiksi valmistuvat. /Myllyntausta, 2008/

Paperikone kolme on tehdasalueen nuorin kone. Käyttöönotto tapahtui 1983. Tuotteina ovat kirja-, jatkolomake- ja parannetut sanomalehtipaperit. Neliöpainot vaihtelevat välillä 45 – 65 g/m². Koneen nopeus on paperikone kahden tavoin 1250 m/min ja trimmileveys aiemmin mainittuja koneita huomattavasti leveämpi; 855 cm. /Myllyntausta, 2008/

Kartonkikonetta nimitetään KK4:ksi, sillä nykyisessä vanhassa kartonkitehdasrakennuksessa on toiminut aiemmin kolme erillistä kartonkikonetta. Nykyinen kartonkitehdas on käynnistynyt vuonna 1965. Tuotteena nykyisellä koneella on päällystetty taivekartonki, jonka tyypillisimmät käyttökohteet ovat esimerkiksi lääke- ja elintarvikepakkaukset. Koneen nopeus on 550 m/min ja trimmileveys 458 cm. Yksi

vanhoista kartonkikoneista on museoituna nähtävillä Ankkapurhan Tehdasmuseossa. /Myllyntausta, 2008/

1.3.2 Painehiomo

Painehiomo (PGW, *Pressure groundwood*) tuottaa mekaanista massaa paperi- ja kartonkitehtaiden tarpeisiin.

Hiomon keskeisimmät komponentit ovat kuusi neljäuunista hiomakonetta, joita pyörittää kuusi 14 MW tahtimoottoria. Kaikkiaan hiomo käsittelee yli miljoona kuutiota puuta vuosittain.

Kuvassa 1.4 näkyvät edellä mainitut päämoottorit.



Kuva 1.4. Näkymä painehiomon hiomasalista.

1.3.3 Voimalaitokset

Tehdasalueella on yhteensä viisi erillistä voimalaitosta: kombi-, vastapaine- ja lauhdevoimalaitos sekä kaksi vesivoimalaitosta.

1.3.3.1 Lämpövoimalaitokset

Edellä mainituista lämpövoimalaitoksista tuotannolla vuoden ympäri poislukien vuosihuollot ja muut poikkeustilanteet ovat kombi- ja vastapainevoimalaitos. Lauhdevoimalaa on aikaisemmin käytetty vain kantaverkkoyhtiön pyynnöstä, mutta vuonna 2008 toteutettavan investoinnin myötä lauhdevoimalan kattila saneerataan jatkuvaan ajoon.

Kombi- ja vastapainevoimalaitos huolehtivat tehtaiden tarvitseman höyryn tuottamisesta. Kumpikin kattila kykenee tarvittaessa yksin takaamaan höyryn riittävyyden poikkeustilanteissa. Kombivoimalaitoksen kattilaa voidaan ajaa myös ilman kaasuturbiinia välipoltoilla, mutta käytännössä tällaiselle ajotavalle ei ole tarvetta. Polttoaineena kombivoimalaitoksella on maakaasu.



Kuva 1.5. Kombivoimalaitos (vas.) ja vastapaine- ja lauhdevoimalaitokset (oik.).

Vastapainevoimalaitoksen kattila on niin sanottu monipolttoainekattila. Käynnistyksessä käytetään maakaasua, mutta tämän jälkeen polttoaineena voidaan käyttää öljyä, hiiltä, turvetta, kuorta tai erilliskerättyä pakkausjätettä, PDF:ää (*Package Derived Fuel*). Aiempana mainittu saneeraus nostaa PDF:n käyttöä polttoaineena entisestään, sillä laudevoimalaitoksen polttoaineena käytetään juuri PDF:ää sen edullisuuden vuoksi. Lauhdevoimalaitosta käytetään vain sähkön tuottamiseen.

Laitoksilta saatavaa hukkalämpöä käytetään Inkeröiden taajaman kaukolämmön tuottamiseen sekä omien tehdas-, toimisto- ja asuinrakennusten lämmittämiseen.

1.3.3.2 Vesivoimalaitokset

Kymijoen Ankkapurhan koskeen 1920-luvun alussa rakennettu voimalaitos pitää tänä päivänä sisällään kolme 5 MVA generaattoria, joissa on uusitut pysty akseliset Francis-turbiinit ja yhden laitoksen alkuperäisistä generaattoreista, jossa on alkuperäinen vaak akselinen kaksois-Francis-turbiini. Tämä vanha kone on täysin käyttökuntoinen, mutta sitä käytetään vain suurimpien tulvahuippujen aikoina. Siitä saatava teho on noin 2 MVA. Kaikki vanhat vastaavat generaattorit ovat nähtävillä Ankkapurhan teollisuusmuseossa. Voimalaitos oli valmistuessaan Suomen suurin. Aikalaiset virkkoivat, ettei Helsinki koskaan tulisi kuluttamaan niin paljon sähköä kuin Ankkapurha tuottaa. Inkeröistä kulki 1920-luvulta aina vuoteen 1961 asti 77 kV siirtojohto Helsinkiin. /Tampella Oy, 1972, s.187-190/

Normaalin vesitilanteen vallitessa vanhalla vesivoimalaitoksella on ajossa kaksi turbiinia kerrallaan.



Kuva 1.6. Vanha vesivoimalaitos alavedeltä päin nähtynä.

Padon länsipuolella sijaitsee uusi 1980-luvun alkupuolella rakennettu voimalaitos, ”AKVA”, jossa on yksi potkuriturbiini. Turbiinin akselille kytketyn generaattorin teho on 24 MVA normaalin tuotannon liikkeessä 15 – 16 MVA tietämällä.

2. TEHDASALUEEN SUURJÄNNITEJAKELU JA -KESKUKSET

Anjalankosken tehtaat ovat liittyneet Fingrid Oy:n Korja - Pernoonkoski -yhteyteen, jossa on kaksi 110 kV linjaa: itäinen ja läntinen. Normaalissa tilanteessa Anjalankosken tehtaat ovat ainoana tehtaana kiinni läntisessä linjassa. Itäisessä ovat kiinni puolestaan esimerkiksi Myllykosken tehtaat.

Tehdasalueen oma suurjänniteverkko rakentuu 110 kV ulkokentän, kolmen 6,3 kV ja kahden 10,5 kV keskuksen ympärille. Uudella kombivoimalaitoksella on myös pieni verkon osa jännitetasoltaan 11,5 kV. Jakeluverkon suppea yleiskaavio on esitetty liitteenä I.

Kaikkiaan 6,3 kV keskuksia on 14 kpl ja 10,5 kV keskuksia 8 kpl. Suurjännitekaapelien ja -kiskostojen yhteenlaskettu pituus on likimain 32 km. Pääosa jakelusta tapahtuu 6,3 kV jännitetasolla; painehiomon sähkönjakelu käyttää 10,5 kV jännitetasoa.

Verkko itsessään on varsin monimutkainen lukuisine vara- ja rengassyöttömahdollisuuksineen.

Sähkösopimuksen mukaan valtakunnan verkosta voidaan ottaa 18,5 MVar induktiivista loistehoa ja verkon suuntaan voidaan siirtää korkeintaan 4,6 MVar kapasitiivista loistehoa. Normaaleissa ajotilanteissa näiden rajojen sisällä pysytään ilman ylimääräisiä ponnisteluja.

10,5 kV ja 6,3 kV keskuksissa käytetään pääasiallisesti vähäöljykatkaisijoita, joista osa on kiinteitä ja osa vaunukatkaisijoita. 110 kV ulkokentän kentissä on tyhjökatkaisijat.

2.1 110 kV ulkokenttä 12S101

110 kV ulkokenttä käsittää kaikkiaan kahdeksan kenttää, joiden takana on koko tehtaiden sähkönjakelu lukuun ottamatta uuden vesivoimalan 110 kV liityntää tehdasalueen eteläpuolelle.

Kentällä on yksi kokoojakiskosto, joka on valmistettu 100/88 mm alumiiniputkesta. Kaikilla kentillä on nimellisvirraltaan 2500 A tyhjökatkaisijat sekä kattavat ylijännitesuojaukset venttiilisuojin.



Kuva 2.1. 110 kV ulkokenttä 12S101.

Kentän kiskoston nimellisvirta on 3700 A ja yhden sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus 31,5 kA.

2.2 10,5 kV pääkeskukset 12S104 ja 12S105

Keskukset 12S104 ja 12S105 liittyvät 110 kV kenttään kumpikin omalla 63 MVA päämuuntajallaan. Nämä keskukset muuntajineen huolehtivat tehdasalueen 10,5 kV jakelusta.

Keskuksessa 12S104 on viisi kennoa ja keskuksessa 12S105 neljä. Kennot on varustettu 4000 A vaunukatkaisijoin.



Kuva 2.2. 10,5 kV pääkeskukset 12S104 ja 12S105.

Molemmissa keskuksissa on vain yksi kiskosto. Keskuksen 12S105 nimellisvirta on 4000 A ja 12S104:n 3500 A yhden sekunnin oikosulkuvirtakestoisuuksien ollessa molemmilla 50 kA. Keskuksen 12S104 liittyy myös lauhdeturbiinin generaattori.

2.3 6,3 kV pääkeskus 12S102

Höyryvoimalaitoksella sijaitseva 6,3 kV pääkeskus 12S102 on suurjännitejakelun kannalta merkittävässä. Se on hiljattain uusittu ja se on myös rakenteiltaan 6,3 kV verkon vankin 4000 A nimellisvirrallaan ja 50 kA 1s oikosulkuvirtakestoisuudellaan. Keskusta syöttävät 40 MVA ja 31,5 MVA päämuuntajat.



Kuva 2.3. 6,3 kV pääkeskus.

Tämän keskuksen kautta energiansa saavat suoraan muun muassa paperikone 3, termohiertäjä sekä kartonkitehdas.

Keskuksessa on kaksi pääkiskostoa ja kolmas, lyhyempi apukisko, jonka avulla termohiertäjän sähkönsyöttö on erotettu toiselle päämuuntajalle. Pääkiskostojen kiskokatkaisijan yhteydessä on Is-rajoitin, jolla saadaan tehokkaasti rajoitetuksi oikosulkuvirtaa suojan nopeuden ansiosta. Myös vastapaineturbiinin generaattori liittyy keskukseseen 12S102.

2.4 Vesivoimalaitoksen 6,3 kV keskus 13S150

Vesivoimalaitoksella sijaitsevaan keskukseseen 13S150 liittyvät jo aiemmin mainitut kolme 1990-luvulla uusittua vanhan voimalaitoksen vesiturbiinien pyörittämää generaattoria sekä vanha museokone. Lisäksi keskukselta on yhteys uudelle vesivoimalaitokselle. Keskukseseen liittyvät myös Metson teknologiakeskuksen syötöt.

Keskuksessa on kaksi kiskostoa. Koska keskuksessa on 28 kennoa, se on jaettu tilankäytöllisistä syistä kahteen osaan, joita yhdistää yhdyskiskot. Normaalisissa ajotilanteissa keskuksen kiskokatkaisija on auki. Kuormitukset on jaoteltu siten, että I-

kiskossa on tehtaan toimintaan liittyvät syötöt kuten kartonkitehdas ja edellä mainitut generaattorit. II-kiskossa ovat puolestaan Metson teknologiakeskukseen liittyvät syötöt, joille energian syöttää uusi vesivoimalaitos. Täten II-kisko on täysin erossa tehtaan omasta sähköjärjestelmästä parantaen tehtaan sähkönjakelun varmuutta.

Keskuksen nimellisvirta on 2200 A yhden sekunnin oikosulkukestoisuuden ollessa 31,5 kA.

2.5 Paperi- ja kartonkitehtaan muut keskuksset

Paperitehtaan tehdasrakennuksessa sijaitseva keskus 23S112 syöttää paperitehtaan paperikoneiden 1 ja 2, massaosaston sekä vesienkäsittelyn keskuksia.

23S112:lla on oma 110/6,3 kV muuntaja teholtaan 40 MVA sekä 6,3 kV syöttö keskukselta 12S102. Itse keskus on kaksikiskoinen, nimellisvirraltaan 4000 A ja yhden sekunnin oikosulkukestoisuus on 40 kA.

Kartonkitehtaalla sijaitseva keskus 31S151 saa syöttönsä 6,3 kV pääkeskukselta 12S102 sekä vesivoimalaitoksen keskukselta 13S150. 31S151:ssä on muista keskuksista poiketen paineilmakatkaisijat. Keskuksessa on kaksi kiskostoa ja sen nimellisvirta on 2200 A. Yhden sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus on 31,5 kA.

2.6 Hiomon keskuksset

Painehiomolla sijaitsee viisi 10,5 kV keskusta. Kolme keskusta huolehtii eri osahiomoiden sähkönjakelusta, yksi valaistuksesta ja instrumentointisyötöistä sekä yksi uudemman valkaisurakennuksen syötöistä. Keskuksia syöttää järjestelmäkaapeloinnit höyryvoimalaitoksen pääkeskuksilta 12S104 ja 12S105.



Kuva 2.4. Näkymä hiomon suurjännitesähkötilasta.

Keskusten nimellisvirrat ovat 2500 A ja yhden sekunnin oikosulkukestoisuudet 40 kA.

2.7 Suurvirtajärjestelmät

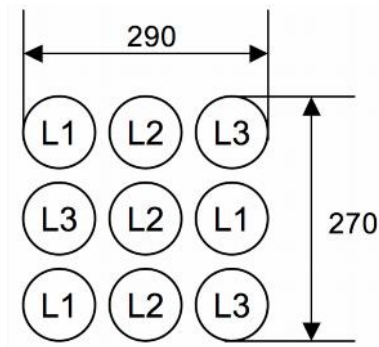
Hiomon suuren sähköntarpeen jakelusta huolehtii kolme raskasta 10,5 kV suurvirtajärjestelmää, jotka koostuvat kukin yhdeksästä 800 mm² alumiinikaapelista.



Kuva 2.5. Hiomoa syöttävät suurvirtajärjestelmät.

Järjestelmät ovat pituudeltaan 350 m. Terminen suurin sallittu siirtoteho järjestelmää kohden on 44,1 MVA (2424 A). Kaapelit ovat tyypiltään AHXCMK 1 x 800.

Suurilla johdinpoikkipinnoilla yksittäisen kaapelin impedanssi muodostuu pääasiassa reaktanssista. Mikäli saman vaiheen rinnankytkettyjä kaapeleita ei ryhmitellä sopivasti toisiinsa nähden, tulevat niiden impedansseista erisuuret ja kuormitusvirrat jakautuvat epätasaisesti. Tämä voi johtaa yksittäisen kaapelin ylikuormittumiseen ja pahimmassa tapauksessa tuhoutumiseen. Tehtailla käytetyt järjestelmät on ryhmitelty kuvassa 2.6 esiteltyyn järjestykseen. Tällä asennuskuvioilla virtojen suhteelliset arvot ovat välillä 0,92 - 1,13. /Nokia Oy/



Kuva 2.6. Käytetty suurvirtajärjestelmän asennuskuvio

Edellä mainitut virranjakaumat olettavat, että järjestelmä on koko syöttöyhteytensä mitalta samanmuotoinen, mutta jos muulla tavoin järjestellyn osuuden pituus jää alle 10 % koko yhteyden pituudesta, eivät sähköiset arvot yleensä merkittävästi muutu.

Järjestelmän sähköisiksi arvoiksi valmistaja ilmoittaa $R = 0,0216 \frac{\Omega}{\text{km}}$ ja $X = 0,038 \frac{j\Omega}{\text{km}}$

(kolmen vaiheen keskiarvo, johdinlämpötila 90 °C). /Nokia Oy/

3. TEOREETTINEN TARKASTELU

Tähän lukuun on kerätty lyhyesti työn aihepiiriä käsitteleviä sähkötekniisiä teorioita sekä työn kannalta merkittävä sähkökonetyyppi – tahtikone.

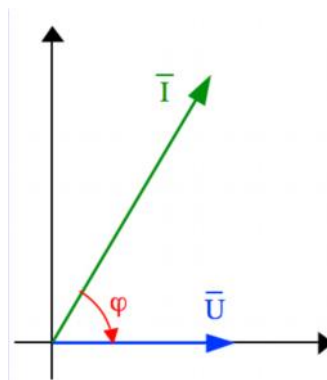
3.1 Osoitinpiirrokset

Vaihtosähkötekniikassa yleisesti käytetty tapa sinimuotoisten suureiden esittämiseen on osoitinpiirros, jossa esitetään kuvitellun generaattorin käämin mukana positiiviseen pyörimissuuntaan (vastapäivään) pyöriviä jännite- ja virtavektoreita. Pyörimisnopeudesta käytetään nimitystä kulmanopeus, ω , yksikkönä [rad/s]. Vektoripiirros on muutoin samanlainen osoitinpiirroksen kanssa, paitsi kuviteltua pyörimistä ei ole olemassa.

Osoitinsuureiden merkinä on viiva suuretunnuksen päällä, esimerkiksi \bar{i} . Osoitinsuureilla laskettaessa kuvataan osoittimet, joilla on siis suunta sekä suuruus, kompleksitasoon ja sovelletaan kompleksilaskennan sääntöjä. /Aura, 1986/

3.1.1 Kapasitanssi vaihtosähköpiirissä

Kapasitiivisen kuormituksen jännite on virtaa jäljessä. Ideaalisessa tapauksessa täsmälleen $\varphi = -90^\circ = -\frac{\pi}{2}$ rad. Kulma mitataan virtaosoittimesta jänniteosoitinta kohti.



Kuva 3.1. Kapasitiivisen kuorman virta- ja jännitevektorit

Kapasitanssin vaihtovirtavastus, kapasitiivinen reaktanssi, voidaan laskea yhtälöllä (3.1)

/Aura, 1986/:

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{2\pi f C}, \quad (3.1)$$

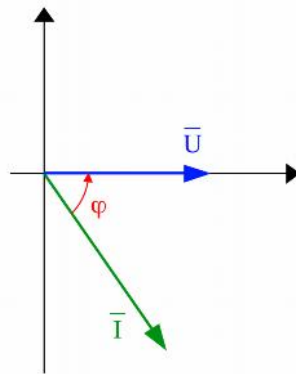
jossa C = Kapasitanssi

ω = Pyörimiskulmanopeus

f = Taajuus.

3.1.2 Induktanssi vaihtosähköpiirissä

Induktiivisen kuormituksen virta on jännitettä jäljessä. Ideaalisessa tapauksessa täsmälleen $\varphi = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ rad. Tämä johtuu käämiin syntyvästä vastasähkömotorisesta voimasta, joka pyrkii vastustamaan virran muutosta.



Kuva 3.2. Induktiivisen kuorman virta- ja jännitevektorit

Induktanssin vaihtovirtavastus, induktiivinen reaktanssi, voidaan laskea yhtälöllä (3.2)

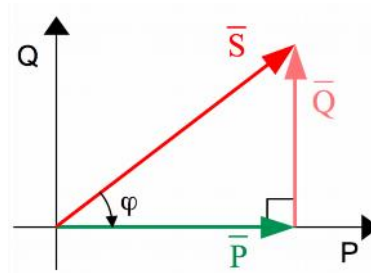
/Aura, 1986/:

$$X_L = j\omega L = j2\pi f L, \quad (3.2)$$

jossa L = Induktanssi.

3.2 Näennäis-, pätö- ja loisteho

Kolmivaiheisessa sähköverkossa siirretty teho muodostuu pätö- ja loistehosta. Näiden summa on näennäisteho. Pätö- ja loisteho ovat toisiinsa nähden 90° kulmassa. Tehojen suhtautuminen toisiinsa käy ilmi kuvasta 3.3.



Kuva 3.3. Pätö-, lois- ja näennäisteho

Pätötehon (*engl. active power*) suuretunnus on P ja yksikkö watti [W]. Loistehon (*engl. reactive power*) suuretunnus on Q ja yksikkö vari [VAr]. Näennäistehon (*engl. apparent power*) suuretunnus puolestaan on S ja yksikkö voltiampeeri [VA].

Trigonometriasta tiedetään, että näennäis-, lois- ja pätötehon välille pätee:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.3)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.4)$$

Pätöteho on se näennäistehon osuus, joka tekee työtä. Tämä teho siis muuttuu esimerkiksi resistanssissa lämmöksi.

Tehoa, joka ei osallistu työn tekemiseen kulutuskojeessa, nimitetään loistehoksi eli reaktiiviseksi tehoksi.

Pätötehon suhdetta näennäistehoon kutsutaan tehokertoimeksi:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (3.5)$$

jossa φ = vaiheensiirtokulma.

Vastaavasti loistehon suhdetta näennäistehoon kutsutaan loistehokertoimeksi:

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad (3.6)$$

Kun jokin laite, esimerkiksi oikosulkumoottori, on kytkettynä verkkoon, sen tehokerroin on induktiivinen - toisin sanoen oikosulkumoottori kuluttaa kapasitiivista loistehoa eli tuottaa induktiivista loistehoa.

Puhuttaessa loistehon kuluttamisesta, tarkoitetaan sillä laitetta tai komponenttia, joka näkyy verkon kannalta induktiivisena – tätä tilannetta myös merkitään loistehon positiivisena kulkusuuntana. Kun jokin laite, kuten verkkoon kytketty kompensointikondensaattoriparisto tai ylimagnetoitu tahtikone, tuottaa kapasitiivista loistehoa, käytetään tästä termiä loistehon tuottaminen. Loistehon tuottajat siis kuluttavat induktiivista loistehoa.

Epäselvissä tapauksissa selvennyksenä tehokertoimen perään voidaan merkitä *ind*, jos kyseessä on loistehoa kuluttava laite. Vastaavasti loistehoa tuottavan laitteen tehokertoimen perään voidaan merkitä *kap*.

Kolmivaiheinen näennäisteho voidaan laskea yhtälöllä (3.7):

$$S = \sqrt{3}UI \quad (3.7)$$

Yhtälöiden (3.5) ja (3.7) tulona saadaan kolmivaiheisen pätötehon yhtälö (3.8):

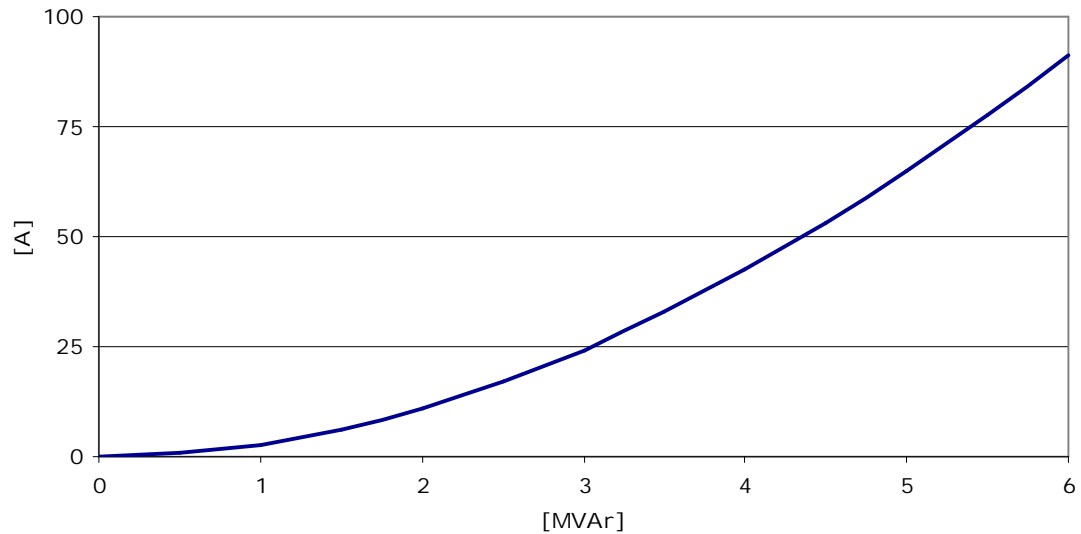
$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (3.8)$$

Kolmivaiheisen loistehon yhtälö (3.9) on puolestaan yhtälön (3.6) ja (3.7) tulo:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (3.9)$$

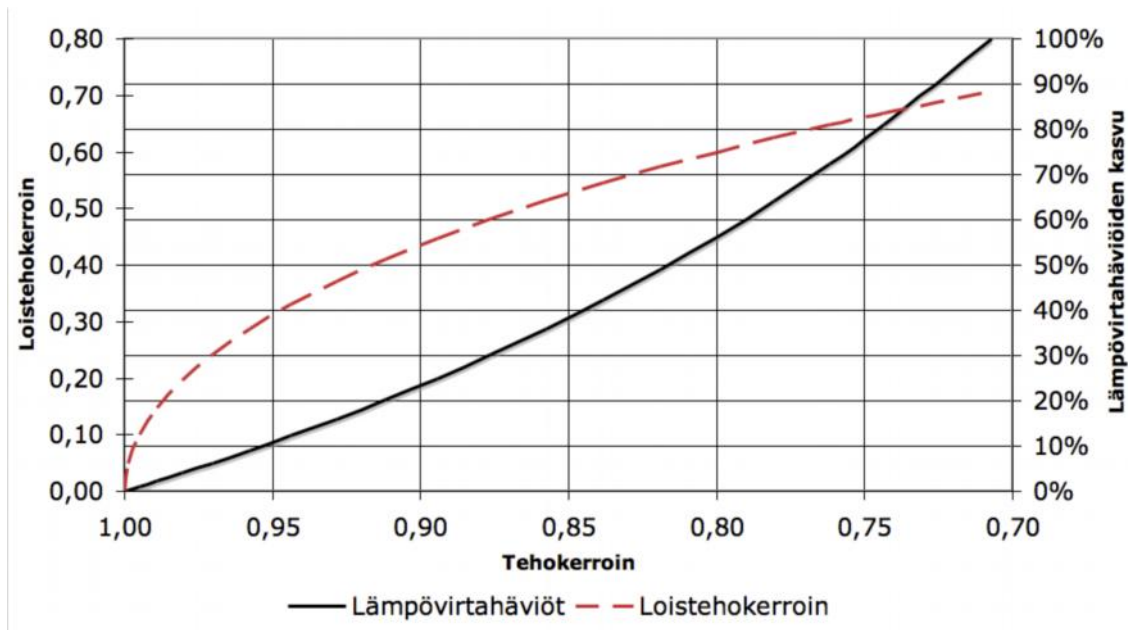
3.3 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensointi on teollisuudessa tarpeen, sillä ei ole taloudellisesti järkevää kuljettaa loistehoa kovin pitkiä matkoja. Verkossa siirretty loisteho kasvattaa näennäisvirran itseisarvoa lisäten lämpövirtahäviöitä, jotka ovat verrannolliset virran neliöön.



Kuva 3.4 Loistehon virtaa kasvattava vaikutus, kun $U = 10,5 \text{ kV}$.

Kuvassa 3.4 on esitetty johtimissa siirrettävän loistehon virtaa kasvattava vaikutus.



Kuva 3.5. Tehokertoimen vaikutus siirtoverkon lämpövirtahäviöihin.

Tehokertoimen laskemisen vaikutus verkossa syntyviin lämpövirtahäviöihin käy ilmi kuvasta 3.5.

Suurimpia loistehon kuluttajia ovat induktiomootorit, muuntajat, suuntaajakäytöt ja purkauslamput. Kaikkia näitä komponentteja esiintyy runsaasti teollisuusverkoissa, joten loistehon kompensoinnilla on suuri merkitys teollisuusverkon kuormitusten ja häviöiden hallinnassa.

Tässä luvussa jäljempänä käsitellyt kompensointitavat liittyvät pienjänniteverkkojen ($U \leq 1000V$) loistehon kompensointiin.

Taulukossa 3-1 on esitetty tehokertoimien tyypillisimpiä arvoja eri komponenteille.

Taulukko 3-1. Kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia /ABB, 2000, Luku 9, s.1/

Komponentti:	Tehokerroin
Oikosulkumoottori	0,7 - 0,85
Loisteputkivalaisin (ei kompensoitu)	0,5
Loisteputkivalaisin (kompensoitu)	0,9
Tyristorikäytöt	0,4 - 0,75
Resistiivinen kuorma	1

3.3.1 Yksittäiskompensointi

Yksittäiskompensoinnissa kompensoidun laitteen välittömään läheisyyteen kytketään kompensointikondensaattori. Tyypillisin käyttökohteet ovat loisteputki- ja purkausvalaisimet. Tätä tapaa voidaan hyödyntää myös esimerkiksi oikosulkumoottorien kuluttaman loistehon kompensointiin käyttämällä turvakytkintä, joka sisältää kondensaattorin. Tämä on erityisen edullista moottorikaapelin ollessa pitkä. /ABB, 2000, Luku 9, s.4/

Yksittäiskompensointia voidaan soveltaa ainoastaan, kun kompensoidun kojeen loistehon vaihtelu on käyttötilanteesta riippumatta pientä.

3.3.2 Kojeryhmien kompensointi

Kokonaisia kojeryhmiä voidaan kompensoida asentamalla keskuksen tai sen välittömään läheisyyteen kompensointiparisto, joka varustetaan kytkinvarokkeella. Tämä tapa on käyttökelpoinen, kun keskukselta lähtevien kojeiden syöttöjohdot ovat lyhyitä verrattuna keskuksen omaan syöttöön ja kompensointitarpeen vaihtelu on pienehköä. Kojeryhmittäistä kompensointia käytetään laajalti sen yksinkertaisuuden vuoksi. /ABB, 2000, Luku 9, s.4/



Kuva 3.6. Erään pienjännitekeskuksen kompensointiparistot.

3.3.3 Keskitetty kompensointi

Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointiparistot on sijoitettu pääkeskukseen. Paristot voidaan kytkeä keskukseen varokeytimin tai esimerkiksi tyrstorein. Tällaiset tyristoriohjatut automatiikkaparistot ovat suosittuja uudiskohteissa tehoelektronikan hinnan putoamisen ja paremman hallittavuuden ansiosta – automatiikka kytkee kulloinkin tarvittavan määrän paristoja kiinni verkkoon. /ABB, 2000, Luku 9, s.4/



Kuva 3.7. ABB:n tyristoriohjattu DynaComp-kompensointiparisto /ABB Pulp&Paper, s.24/

Automatiikkaparistolla estetään myös ylikompensoinnin vaara.

3.4 Tahtikone

Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahdissa. /Aura 1986, s.241/

Tahtikonetta käytetään usein tilanteissa, joissa tarvitaan suurta tehoa. Tahtimoottorin edut oikosulkumoottoriin nähden ovat seuraavat:

- Vakio pyörimisnopeus
- Kyky tuottaa tai kuluttaa loistehoa. Säätö helppoa ja melko nopeaa.
- Hyvä hyötysuhde

- Myös pienet pyörimisnopeudet mahdollisia

Haittoina voidaan pitää melko kallista hankintahintaa sekä erillisen magnetointilaitteiston tarvetta. /Aura 1995, s.355-356/

Tahtikoneen pyörimisnopeus noudattaa verkon taajuutta kiinteästi kaavan (3.10) mukaisesti:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (3.10)$$

jossa f = verkon taajuus

p = moottorin napapariluku /Aura 1995, s. 346/

Taulukko 3-2. Tahtimoottorin pyörimisnopeus eri napapariluvuilla.

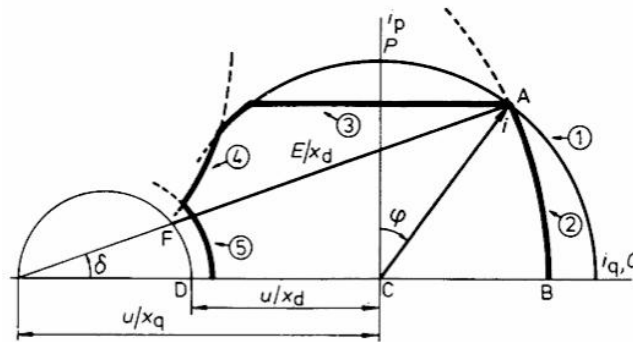
p	n [1/min]	p	n [1/min]
1	3000	11	272,7
2	1500	12	250
3	1000	13	230,1
4	750	14	214,3
5	600	15	200
6	500	16	187,5
7	428,6	18	166,7
8	375	20	150
9	333,3	22	136,4
10	300	24	125

Työssä tarkasteltujen moottoreiden pyörimisnopeus on $n = 300 \frac{1}{\text{min}}$, joten koneiden napapariluku on täten 10. Myös taulukossa 3-1 esitettyjä napaparilukuja suurempia napaparimääriä on käytössä esimerkiksi vesivoimalaitoksien generaattoreissa.

3.4.1 PQ-diagrammi

Tahtikoneen pätö- ja loistehotasetta voidaan tarkastella diagrammista, jonka vaakakselilla on koneen tuottama/kuluttama loisteho ja pystyakselilla koneen ottama/tuottama pätöteho. Tätä diagrammia kutsutaan PQ-diagrammiksi. Tällainen diagrammi esitetään usein jatkuvassa toiminnassa oleville tahtikoneille. /Pyrhönen 2005/

Koneen toimintapiste liikkuu diagrammin eri alueilla ja sitä rajoittavat diagrammiin piirretyt lämpenemä- ja stabiilisuusrajat. Esimerkki PQ-diagrammista on esitetty kuvassa 3.8.



Kuva 3.8. Tahtikoneen PQ-diagrammi. /ABB, 2000, luku 17, s.17/

Taulukko 3-3. Kuvan 3.7 merkintöjen selitykset.

- 1 = vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja
- 2 = vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja
- 3 = voimakoneen pätötehoraja
- 4 = käytännön stabiilisuusraja
- 5 = alimagnetointiraja
- A = nimelliskäyttöpiste
- B = tyhjäkäyntipiste nimellismagnetoinnilla
- C = tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla
- D = tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia
- \overline{CA} = staattorivirta = i
- \overline{FA} = nimellismagnetointivirta
- \overline{DC} = tyhjäkäyntimagnetointivirta
- u = staattorijännite
- P = pätöteho
- Q = loisteho

- I = staattorivirta
- E = tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla
- x_d = pitkittäinen tahtireaktanssi
- x_q = poikittainen tahtireaktanssi
- δ = kuormitus- eli napakulma
- φ = tehokulma

Diagrammia tulkiten on verraten helppoa ja havainnollista selvittää tahtikoneen toimintaan liittyviä ominaispiirteitä virtoineen ja rajoituksineen. Liitteessä II on ABB:n arkistotietojen perusteella piirretty, päivitetty työssä käsiteltävien tahtimoottoreiden PQ-diagrammi.

Diagrammissa käytetyt tehot, virrat, jännitteet ja reaktanssit ovat kaikki suhteellisia arvoja.

3.4.2 Magnetoinnin säädön vaikutukset

Verkkoon kytketyn tahtimoottorin magnetointivirtaa säätämällä voidaan moottorin tehokerrointa muuttaa. Suurentamalla magnetointia nimellisestä – eli ylimagnetoimalla – tahtikone tuottaa induktiivista loistehoa verkkoon eli toimii loistehon kompensoijana. Vastaavasti alentamalla magnetointia nimellisestä – eli alimagnetoimalla – tahtikone kuluttaa induktiivista loistehoa.

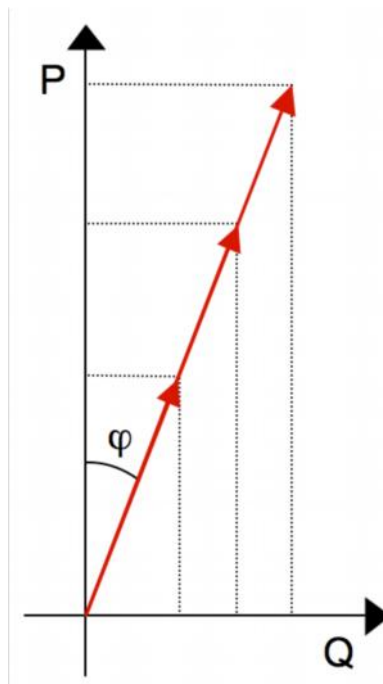
On myös huomattava, että magnetoinnin säätötoimenpiteet eivät muuta koneen sähköistä vääntömomenttia, joten yli- tai alimagnetointi ei vaikuta koneen mekaaniseen vääntömomenttiin ja siten pyörimisnopeuteen. /Aura 1986, s.168/

Tuotettaessa loisteho tahtikoneella, pyrkii koneen napajännite nousemaan. Vastaavasti koneen tehokertoimen ollessa induktiivinen napajännite laskee. Tämä on otettava huomioon magnetoinnin säätöä suunniteltaessa. Tätä ilmiötä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.5.

Seuraavissa kappaleissa on käsitelty kolme erilaista tahtikoneen magnetoinnin säätötapaa.

3.4.2.1 Vakiotehokerroinsäätö

Vakiotehokerroinsäädöllä moottorin verkosta ottaman tehon tehokerroin pidetään vakiona riippumatta syöttöpisteen jännitevaihteluista ja vaaditusta akselitehosta. Kone tuottaa tai kuluttaa valitun loistehokertoimen osoittaman määrän loistehoa kaikissa kuormituspisteissä.

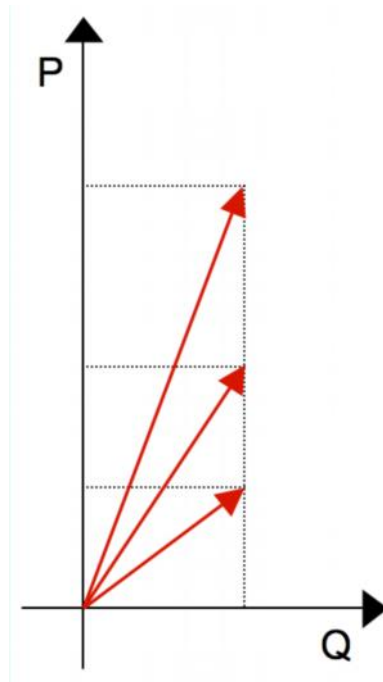


Kuva 3.9. Vakiotehokerroinsäädön PQ-diagrammi. /Shilling, 1996, s.94/

Loistehoa tuotetaan tai kulutetaan aina tietyllä suhteella kulutettuun pätehoon nähden. Täten vaikutukset ympäröivään sähköverkkoon ovat vähäisiä ja yllätyksettömiä käytettäessä tehokertoimen arvoja $\cos \varphi \approx 1$.

3.4.2.2 Vakioloistehosäätö

Vakioloistehosäätöä käytettäessä kone tuottaa tai kuluttaa tietyn, vakiona pidettävän määrän loistehoa riippumatta akselitehosta.

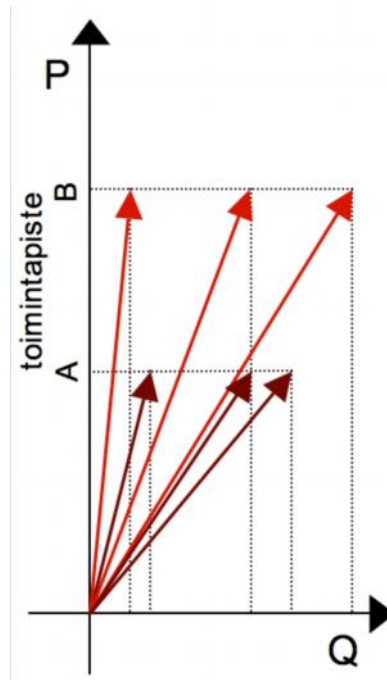


Kuva 3.10. Vakioloistehosäädön PQ-diagrammi. /Shilling, 1996, s.94/

Vakioloistehosäätö sopii tilanteisiin, joissa akselitehon vaihtelut ovat pieniä.

3.4.2.3 Vakiojännitesäätö

Vakiojännitesäätöä käytettäessä moottorin liitäntäjännite pidetään vakiona. Jos syöttöjännite laskee alle asetellun, magnetointia lisätään ja päinvastoin. Säätö kykenee pitämään jännitteen vakiona niin kauan kuin ei ole saavutettu roottorin tai staattorin lämpenemärajoja.

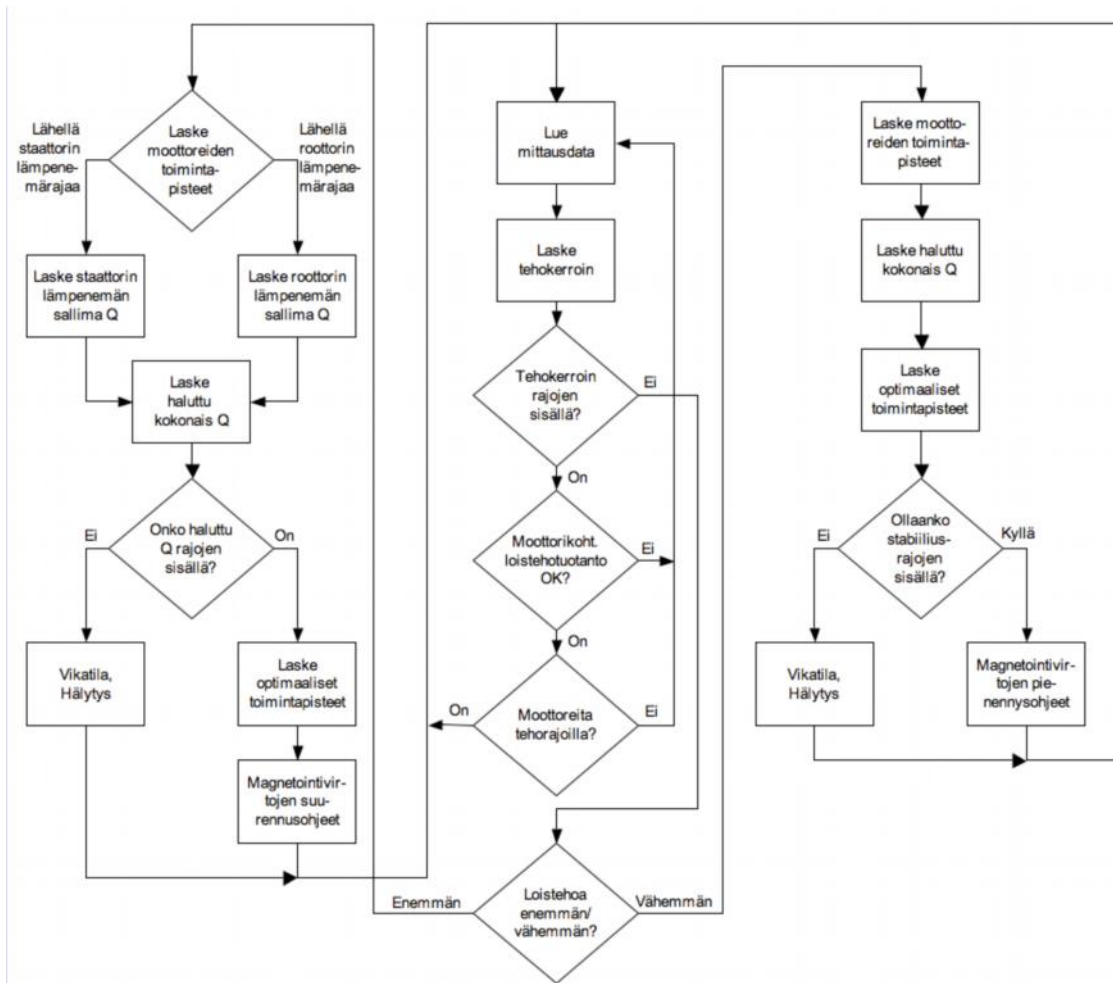


Kuva 3.11. Vakiojännitesäädön PQ-diagrammi. /Shilling, 1996, s.94/

Kuvassa 3.11 on kuvattu vakiojännitesäädön toimintaa kahdella eri akseliteholla.

3.4.3 Loistehotuotannon ohjaus

Automaatiojärjestelmää ja sen laskentatehoa apuna käyttäen on mahdollista hallita useita koneita sisältävän laitoksen loistehotasetta ja löytää taloudellisesti optimaalisimmat toimintapisteet kullekin tahtikoneelle. Ohjelmakierron periaatteellinen kulku on esitetty kuvan 3.12 virtauskaaviossa.



Kuva 3.12. Tahtikoneiden magnetoitien säädön virtauskaavioesitys. /Shilling, 1996, s.97/

Ohjelmakierrossa lasketaan kunkin koneen toimintapiste. Näiden verkosta saatavien mittaustietojen sekä syötettyjen vakioparametrien perusteella lasketaan koneiden uudet toimintapisteet siten, että ratkaisu on kokonaistaloudellisesti edullisin ottaen huomioon koneiden ja verkon rajoitukset. Laskentatavasta riippuen voidaan käyttää esimerkiksi kullekin koneelle mallinnettua PQ-diagrammia, jonka pohjalta laskelmat suoritetaan.

3.4.4 Häviöt

Tahtikoneissa syntyvistä häviöistä merkittävimmät ovat staattori- ja roottorikäymyksissä aiheutuvat tasavirtahäviöt. Työssä käsitellyillä moottoreilla näiden yhteenlaskettu osuus on nimellisteholla noin puolet.

Tahtikoneen tehohäviöitä kuvaa yhtälö (3.11):

$$P_h = P_{st} + P_{mag} + P_{fe} + P_l + P_{mek}, \quad (3.11)$$

jossa P_{st} = Staattorin häviöteho

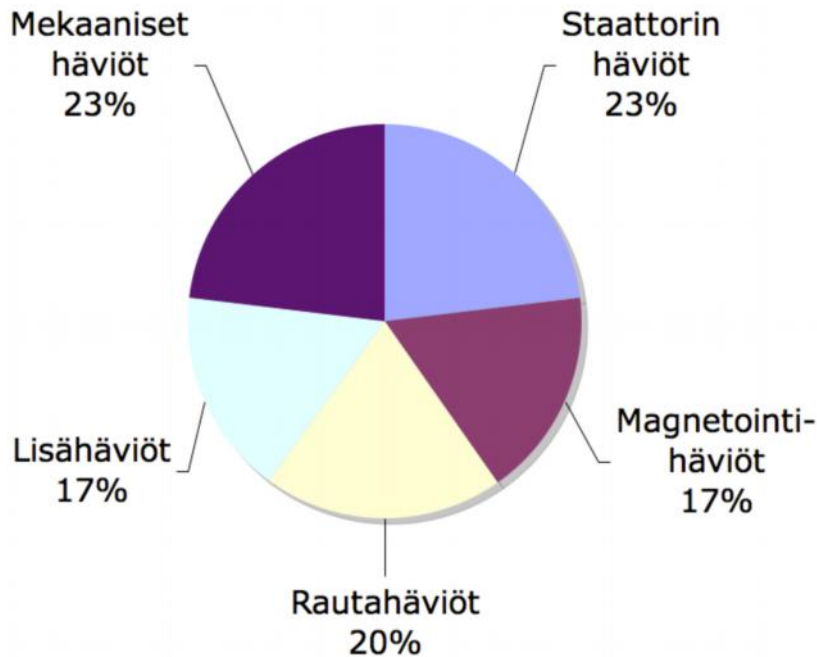
P_{mag} = Magnetointihäviöteho

P_{fe} = Rautahäviöteho

P_l = Lisähäviöteho

P_{mek} = Mekaanisten häviöiden teho

Staattorin häviöteho on staattorikäimityksissä tapahtuvien lämpövirtahäviöiden summa. Magnetointihäviöteho on magnetointinapakäämitysten lämpövirtahäviöiden ja magnetoinnin lisähäviöiden summa. Magnetoinnin lisähäviöitä muodostuu magnetointilaitteistossa itsessään sekä muun muassa hiiliharjoissa ja mahdollisissa kiinteissä käynnistysvastuksissa. Rautahäviöt taas syntyvät ainoastaan staattorin raudassa, sillä roottorissa magneettivuon ei vaihtelee sen pyöriessä magneettikentän kanssa samalla nopeudella. Lisähäviöt sisältävät staattorikäimityksessä virranahdon takia syntyvät lämpövirtahäviöt sekä kuormitusvirran aiheuttamien hajavoiden ja napakenkien pinnan urituksen takia tapahtuvien magneettivuon muutosten aiheuttamien rautahäviöiden summan. Mekaaniset häviöt puolestaan koostuvat ilmavälin ilmahankaushäviöistä ja laakerihäviöistä. Jos akselilla on tuulettimia, lasketaan myös niistä syntyneet tuuletushäviöt mukaan mekaanisiin häviöihin. /Aura1, 1986, s.288/



Kuva 3.13. Häviöiden jakautuminen, kun akseliteho on 9 MW.

Koneen akselitehon ollessa 9 MW kokonaishäviöteho on noin 200 kW. Yhtälössä (3.11) kuvatut eri osatehot jakautuvat tässä tilanteessa karkeasti tasan. Tämä käy ilmi kuvasta 3.11. /Pirhonen, 2007/

3.5 Kapasitiivinen jännitteennousu

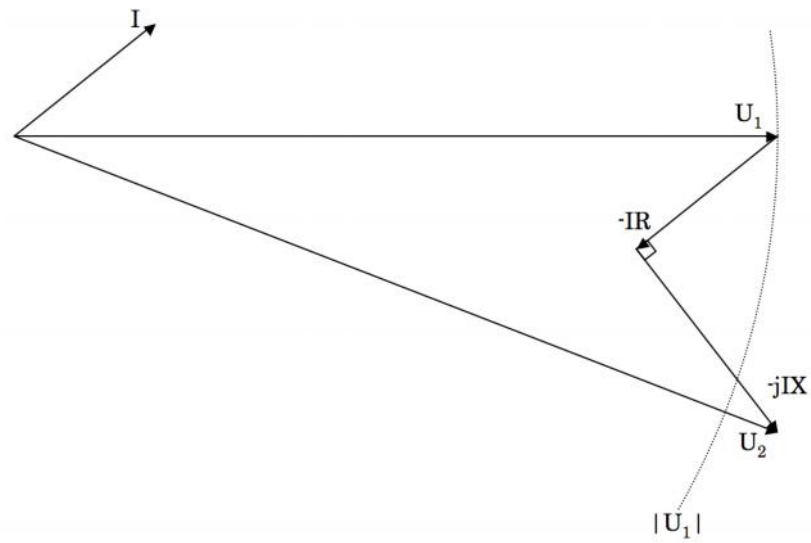
Tuotettaessa loistehoa johdon päässä enemmän kuin kuormitus kuluttaa ja syöttävä johdin tarvitsee, on kuormitusvirta kapasitiivinen. Johdon päässä vaikuttavalle jännitteelle U_2 pätee yhtälö (3.12).

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 - \bar{I}\bar{Z} = \bar{U}_1 - \bar{I}(R + jX), \quad (3.12)$$

jossa U_1 = Johdon alkupään jännite

Z, R, X = Syöttöjohdon impedanssi, resistanssi ja reaktanssi

j = Imaginääriyksikkö



Kuva 3.14. Jännitteen nousu kuormitusvirran ollessa kapasitiivinen.

Kuvassa 3.14 on piirretty edellä kuvatun kaltaista kuormitusilannetta kuvaava vektoripiirros, jossa pisteakaarella on kuvattu syöttävän jännitteen itseisarvoa. Tästä huomataan, että johdon loppupään jännite U_2 on itseisarvoltaan U_1 :stä suurempi.

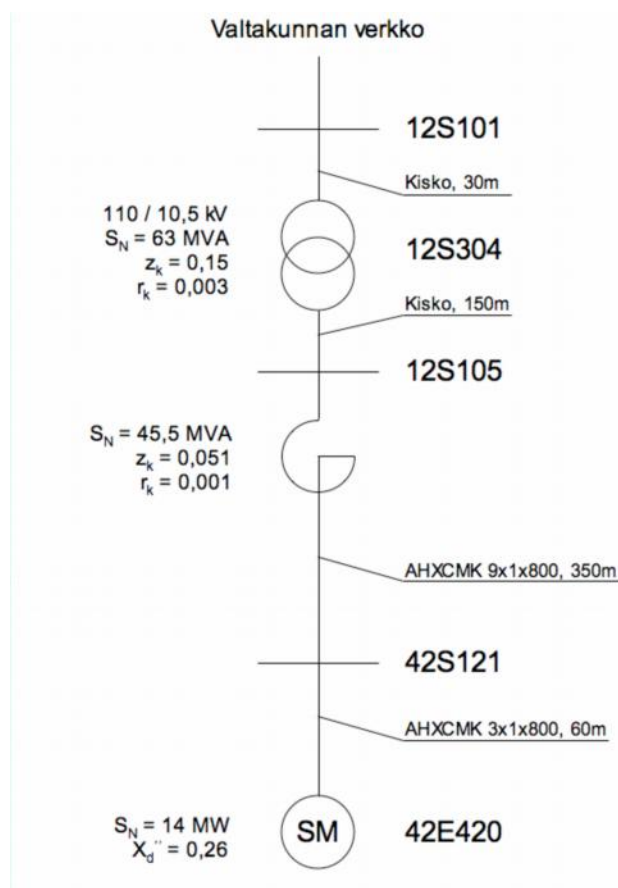
Tämä asia on otettava huomioon suunniteltaessa loistehotuotannon määriä keskustasolla. Jännitteestä tulee täten tuotantoa rajoittava tekijä, joka vaihtelee hyvinkin nopeasti keskuksen oman loistehon kulutuksen heilahdellessa.

4. LOISTEHOTUOTANTO HIOMON TAHTIMOOTTOREILLA

Loistehon tuottaminen verkkoon kytketyillä tahtikoneilla on verkon käyttäjälle yksinkertaista. Seuraavissa luvuissa paneudutaan hiomolla tuotetun loistehon aiheuttamiin kustannuksiin eli tuotannosta aiheutuviin häviöihin.

4.1 10,5 kV verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä

Tarkastellaan verkon osaa 110 kV kentältä 12S101 tahtimoottorille 42E420. Tämä osio pitää sisällään 63 MVA päämuuntajan, kaksi 10,5 kV keskusta, sarjakuristimen, kaksi kiskostoa sekä suurvirtajärjestelmän, jonka pituus on 350 m.



Kuva 4.1. Tahtimoottorin 42E420 10,5 kV syöttö

Yksivaiheisen sijaiskytkennän parametrit muuntajille ja kuristimille voidaan laskea lähtötietojen perusteella yhtälöillä (4.1) ja (4.2).

$$Z_k = z_k \frac{U^2}{S_N}, \quad (4.1)$$

jossa Z_k = oikosulkuimpedanssi,

z_k = suhteellinen oikosulkuimpedanssi,

U = nimellisjännite ja

S_N = nimellisteho.

$$R_k = u_r \frac{U^2}{S_N}, \quad (4.2)$$

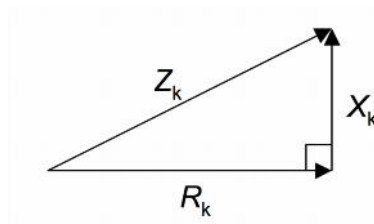
jossa R_k = oikosulkuresistanssi,

u_r = suhteellinen resistiivinen oikosulkujännite

Usein u_r :n arvoa ei ilmoiteta. Se voidaan kuitenkin näissä tapauksissa laskea ilmoitetusta kuormitushäviötehosta P_k yhtälöllä (4.3):

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \quad (4.3)$$

Z_k :n, R_k :n ja reaktiivisen komponentin X_k :n välille pätee kuvan 4.2 esittämä yhteys:



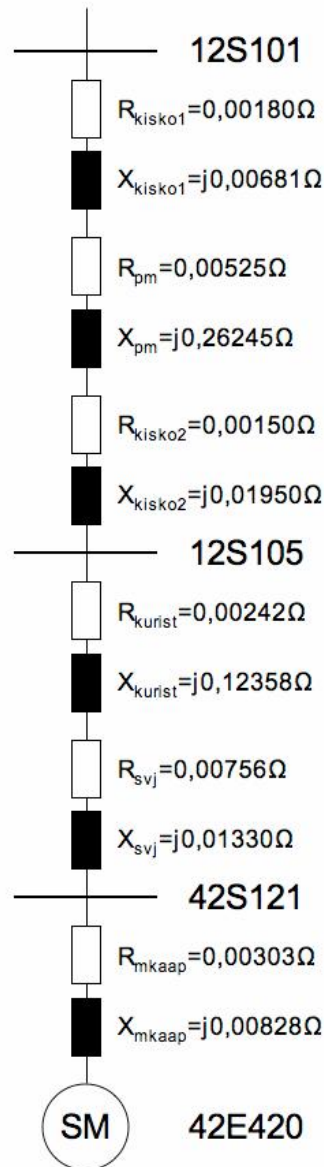
Kuva 4.2. Resistiivinen-, reaktiivinen- ja induktiivinen komponentti

Kun Z_k ja R_k tiedetään, voidaan X_k :n itseisarvo laskea yhtälöllä (4.4):

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (4.4)$$

Suurvirtajärjestelmien ja kiskostojen arvot lasketaan käyttämällä kyseisten komponenttien sähköisiä ominaisarvoja.

Kuvassa 4.1 esitetylle verkon osalle saadaan täten yksivaiheinen sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 4.3.



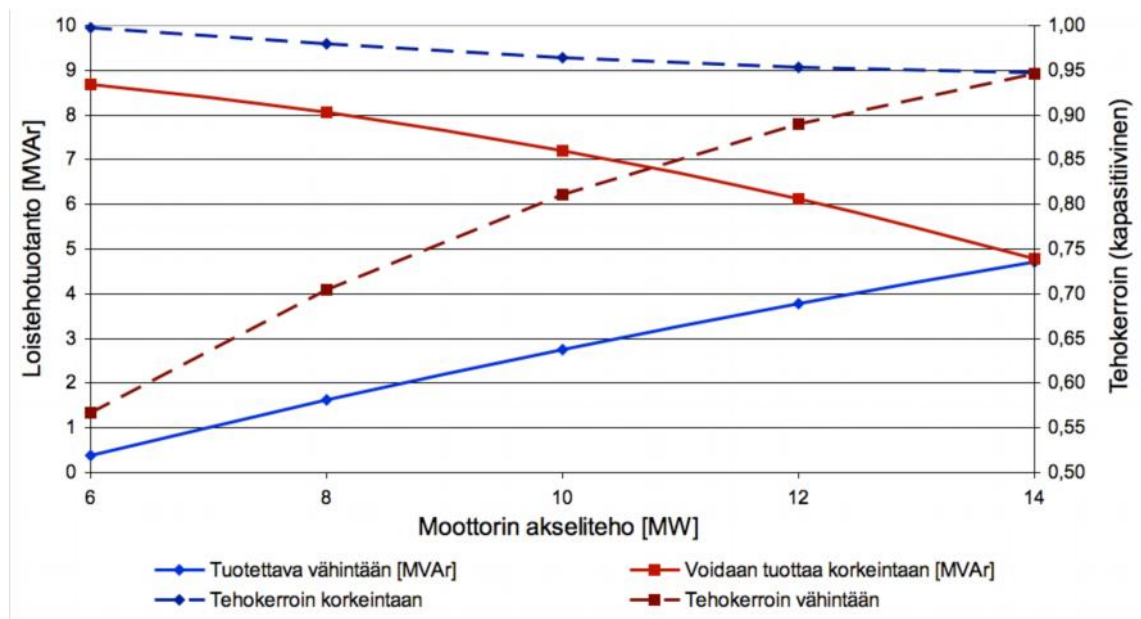
Kuva 4.3. Yksivaiheinen sijaiskytkentä kuvan 4.1 verkon osasta.

Yksivaiheisen sijaiskytkennän resistanssien avulla voidaan tarkastella moottorin 42E420 aiheuttamia lämpövirtahäviöitä moottoria syöttävissä komponenteissa yhdessä tai erikseen. Kun syöttävä virta tunnetaan, saadaan häviöt yhtälöllä (4.5):

$$P_{\text{häviö}} = 3I^2 \sum_i R_i \quad (4.5)$$

4.2 Loistehotuotannon rajat

Moottoreilla tuotettavissa olevan loistehon määrä riippuu vallitsevasta akselitehosta. Tuotantoa on joka tapauksessa hieman, sillä tehonheilahtelun ollessa suurta stabiilisuuskäyrä ulottuu pitkälti kapasitiiviselle puolelle PQ-diagrammia. Tuotannon maksimiraja tulee roottorin lämpenemäkäyrästä; kasvanut magnetointivirta lämmittää roottoria enemmän.



Kuva 4.4. Loistehotuotannon rajoitukset.

Kuvassa 4.4 käy ilmi mahdollinen loistehoikkuna akselitehon funktiona. Käyrän ”tuotettava vähintään” määrää siis edellä kuvatusti moottorin stabiilisuuskäyrä ja ”voidaan tuottaa korkeintaan” -käyrän roottorin suurin sallittu lämpenemä. Lisäksi

kuvassa on piirretty tehokerroin, jolla syöttävä verkko moottorin näkee. Tehokerroin on nyt siis kapasitiivinen.

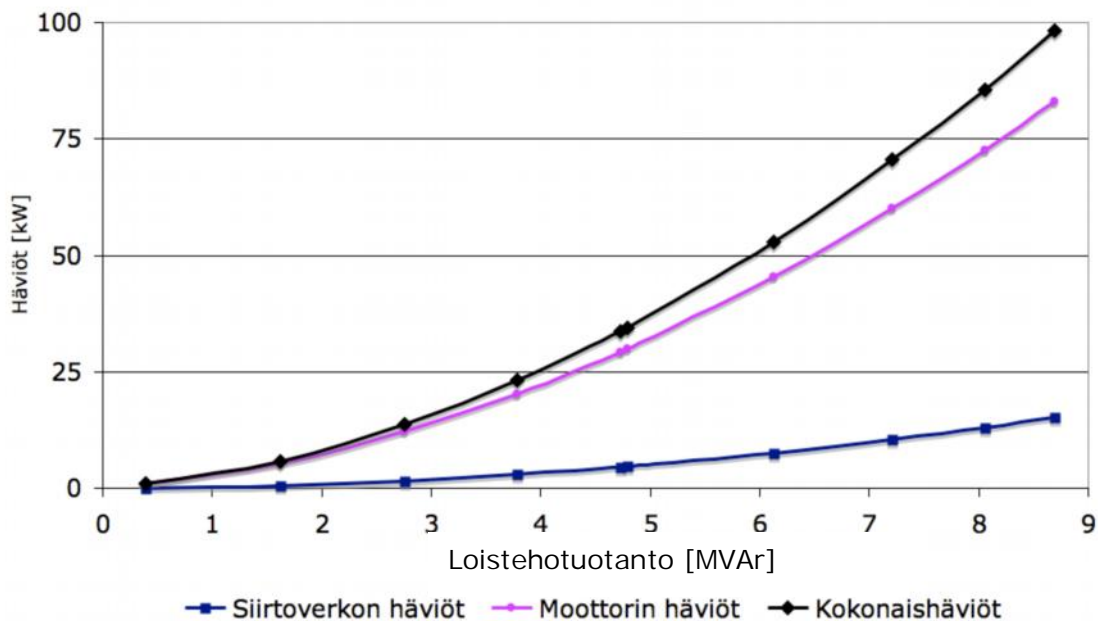
Sallitut toimintapisteet löytyvät kuvan 4.4 yhtenäisten käyrien välissä olevalta alueelta.

Toinen maksimituotantoa rajoittava tekijä on luvussa 3.5 kuvattu kapasitiivinen jännitteennousu, jonka vuoksi syöttävän keskuksen jännitteen noustessa liiaksi on loistehotuotantoa rajoitettava rikkoontumisten ja muiden ongelmien välttämiseksi.

4.3 Loistehon tuottamisen ja siirron aiheuttamat häviöt

Tuotettu loisteho kasvattaa virran itseisarvoa ja siten siirtoverkon resistansseissa syntyy häviötehoa enemmän verrattuna tilanteeseen, jossa kuormitus olisi täysin resistiivistä.

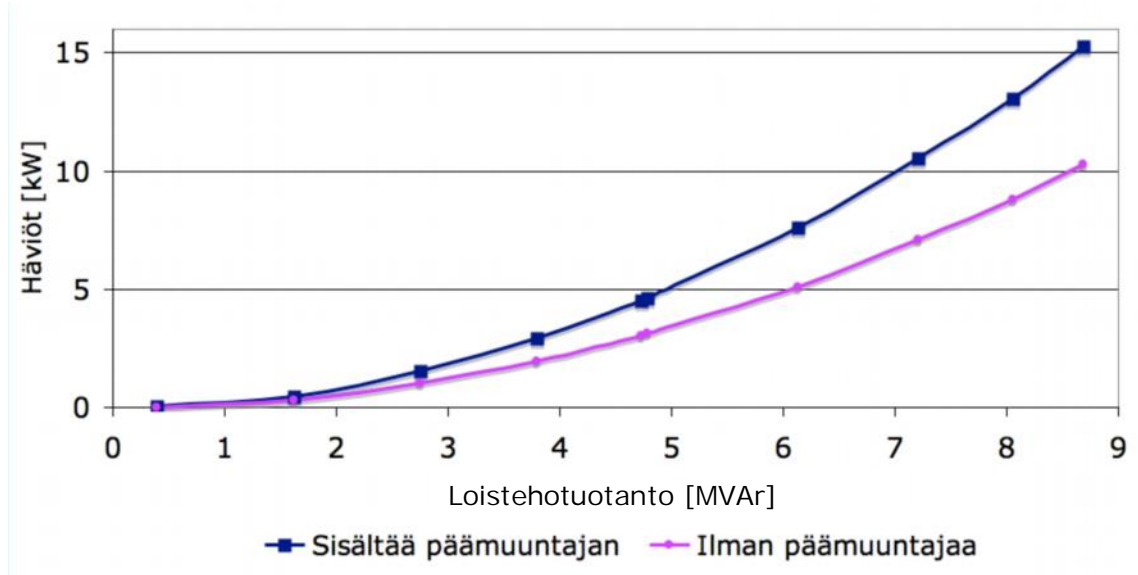
Siirtoverkon osuus kokonaishäviöistä on suurimmillaan 15 %.



Kuva 4.5. Loistehotuotannon aiheuttama häviöteho.

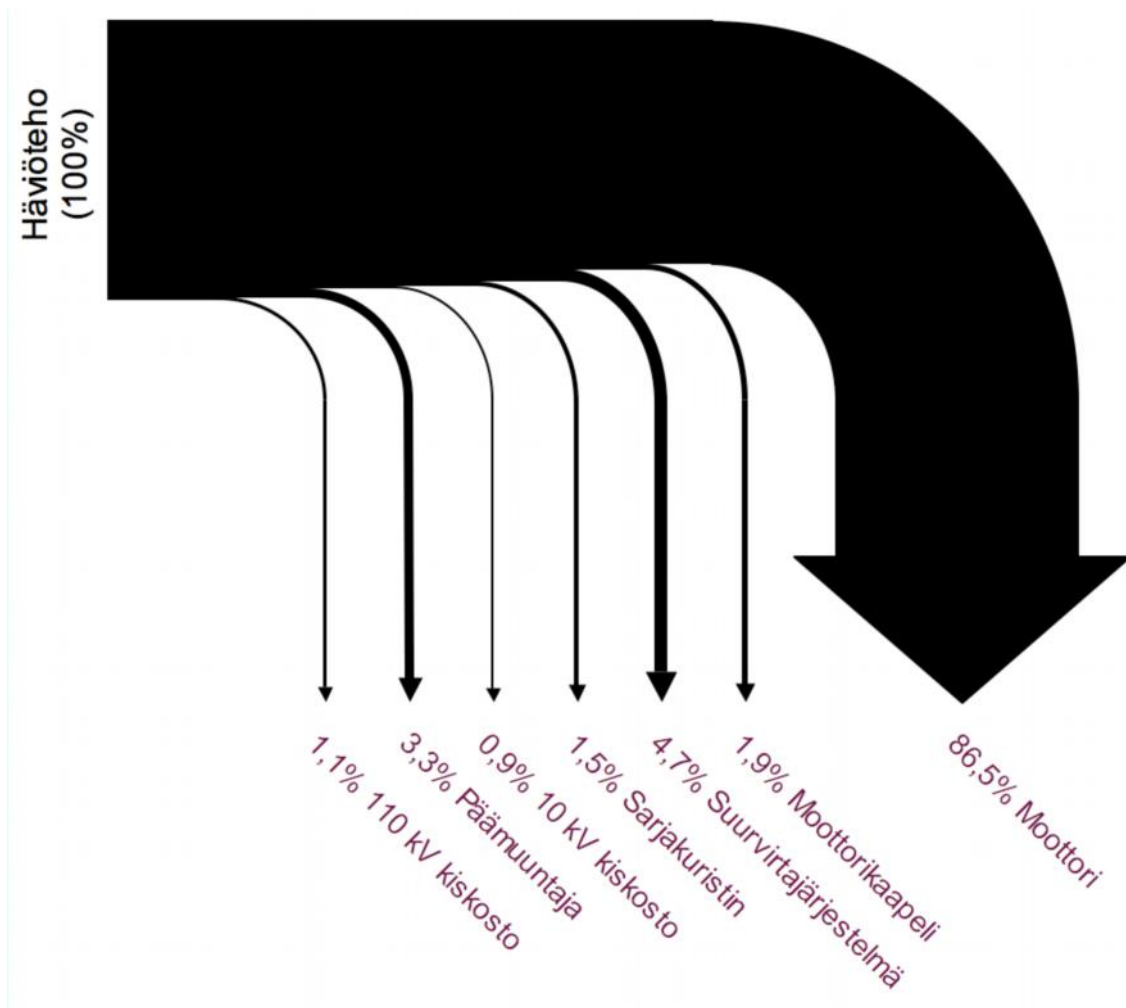
Kuvassa 4.5 on esitetty syntyneet häviöt tuotetun loistehon funktiona. Siirtoverkon häviöistä suurimmat ovat suurvirtajärjestelmässä (35 % siirtoverkon kokonaishäviöistä) ja päämuuntajassa syntyneet häviöt (24 %).

Kuvassa 4.6 on esitetty pelkästään siirtoverkossa aiheutuvat häviöt päämuuntajan kanssa sekä ilman.



Kuva 4.6. Loistehotuotannon aiheuttamat häviöt siirtoverkossa.

Kuvassa 4.7 on kuvattu koneen nimellispisteessä akseliteholla $P=14$ MW toimittaessa loistehotuotannosta aiheutuneiden häviöiden jakautuminen.



Kuva 4.7. Loistehotuotannon häviöiden jakautuminen moottorin toimiessa nimellispisteessään.

Kuvissa 4.5 ja 4.6 esiintyviä käyrästöjä voidaan käyttää syntyneiden kustannusten laskennassa. Esimerkiksi, jos verkossa siirretään 4 MVar loistehoa joko hiomolta höyryvoimalaitokselle tai päinvastoin, on häviöteho 3,25 kW ja vuotuinen häviöenergia siten yli 28 MWh. Tämä energiahukka on täysin turhaa tilanteessa, jossa kyseinen määrä loistehoa joudutaan siirtämään voimalaitokselta hiomolle päin. Yksinkertaisilla säätötoimenpiteillä on siis saavutettavissa selviä säästöjä.

Jos jollakin yksittäisellä hiomon tahtimoottorilla tuotetaan koko vuosi 4 MVar loistehoa ja se siirretään 110 kV jänniteportaaseen saakka, on tästä aiheutuva vuotuinen energiahäviö 219 MWh. Jos tämä loisteho on tuotettu tasan kahdella samaan keskukseseen kytketyllä moottorilla, energiahäviö putoaa - häviöiden riippuessa virrasta

neliöllisesti - tasolle 160 MWh. Jos taas tuotantoon käytetään kahta eri keskuksiin kytkettyä moottoria, energiahäviö on jälleen hieman pienempi: 146 MWh.

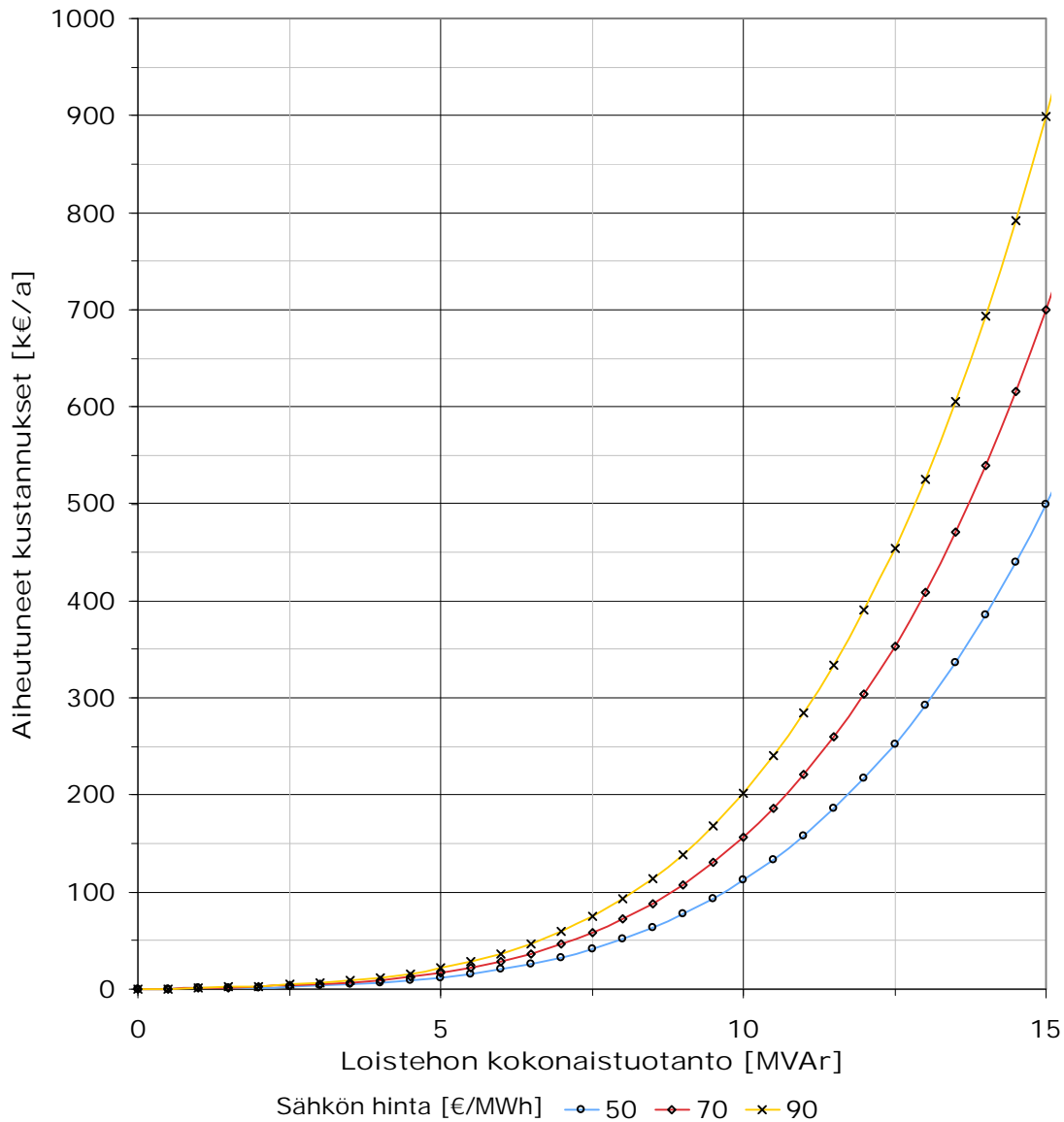
Näitä energiahäviöiden arvoja voidaan käyttää, jos halutaan selvittää, kannattaako hiomon tahtikoneita käyttää esimerkiksi sähköliityntäsopimuksessa määrättyssä loistehoikkunassa pysymiseen. Toinen vaihtoehto voisi olla esimerkiksi kiinteät kompensointiparistot.

Liitteessä II on taulukoituna kussakin siirtoverkon osassa syntyvät häviöt.

4.4 Euromääräisten kustannusten arviointi

Mikäli hiomon tahtimoottoreita on tarkoitus käyttää tehtaan loistehotasapainon hallintaan, on edullisinta jakaa tuotanto kaikkien käynnissä olevien moottoreiden kesken tasan. Tämä vähentää syntyviä häviöitä tuntuvasti. Kyseinen menettely on lisäksi helppo toteuttaa uusilla magnetointilaitteistoilla; tehdasautomaatiojärjestelmä laskee kulloinkin edullisimmat toimintapisteet, kuten luvussa 3.4.3 on kuvattu.

Kuvasta 4.8 voidaan tarkastella edellä mainitusti menettelemällä loistehotuotannosta aiheutuvia euromääräisiä kustannuksia. Laskennassa on käytetty vuotuisina tuotantotunteina $t = 7000$ h.



Kuva 4.8 Loistehotuotannon aiheuttamat kustannukset eri sähköenergian hinnoilla.

Kuvaa 4.8 laskettaessa on huomioitu, että kunkin moottorin tuottamaksi loistehoksi jää kuudesosa kokonaisohjearvosta ja että kukin suurvirtajärjestelmä kuljettaa tehtaalle kolmasosan tästä tehosta. Loistehon jakautuminen kuuteen osaan on otettu huomioon myös moottorikaapelin häviöiden laskennassa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Saatujen tulosten perusteella on mahdollista tarkastella hiomon päämoottoreilla tapahtuvan loistehotuotannon kustannuksia käyttäen hyväksi uusittujen magnetointilaitteistojen tarjoamia joustavilla säätömahdollisuuksia.

Työssä lasketut häviötehot vastasivat kohtuullisella tarkkuudella ABB:n arkistotietoina saatuja häviötehoja, joten laskelmia ja tehtyä PQ-diagrammia voidaan käyttää apuna erilaisia laskelmia suoritettaessa.

Normaalissa käyttötilanteessa on järkevää pitää hiomoiden alakeskusten 42S121, 42S122 ja 42S123 kuorma lähellä resistiivistä, kuitenkin hieman kapasitiivisen puolella. Siten järjestelmät syöttäisivät pientä määrää loistehoa muun tehtaan tarpeisiin ilman, että kustannukset lisääntyvät huomattavasti. Poikkeustilanteita on tarkasteltava erikseen; niissä voidaan käyttää työssä saatuja loistehotuotannon rajoituksia kuvaavia käyrästäjä sekä PQ-diagrammia.

Koko tehdasaluetta koskevaa loistehon säätöjärjestelmää suunniteltaessa voidaan pohjana käyttää luvussa 3.4.3 esitettyä mallia. Täten jokaiselle koneelle lasketut toimintapisteet ja niiden optimointi antaa kustannuksiltaan edullisimman ratkaisun. Malliin tulee vielä lisätä tuotantoa rajoittavaksi tekijäksi alakeskusten jännitetiedot sekä loistehon siirrosta aiheutuvat häviöt.

Kuten kuvaajasta 4.1 voidaan havaita, alkaa loistehon kokonaistuotannon ollessa yli 8 MVAr kustannukset kasvamaan merkillepantavan jyrkästi. Täten käyttökelpoinen loistehon tuotantoalue taloudellisessa näkökulmassa asettuu välille 0-10 MVAr. Merkitys korostuu sähköenergian hinnan kasvaessa.

Pyöriviä tahtikoneita käyttämällä voidaan luoda joustava ja dynaaminen loistehonhallintajärjestelmä nykyisten automaatiojärjestelmien laskentatehoa hyväksikäyttäen. Voimalaitosinvestoinnin valmistuttua lauhdevoimalaitoksen ollessa mukana loistehotaseessa, loistehotaseen optimoinnin ja kokonaistarkastelun tekeminen olisi ajankohtaista ja järkevää loistehosta aiheutuvien kustannusten minimoimiseksi.

LÄHDELUETTELO

ABB Oy. TTT-käsikirja. 2000.

ABB Pulp&Paper Oy. Willman, Juha. Sähkönjakelu prosessiteollisuudessa -esitelmä. 26.04.2006.

Aura, Tonteri. 1986. Sähkämiehen käsikirja 1: Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo WSOY. ISBN 951-0-13672-7.

Aura1, Tonteri. 1986. Sähkämiehen käsikirja 2: Sähkökoneet. Porvoo WSOY. ISBN 951-0-13479-1.

Aura2, Tonteri. 1986. Sähkämiehen käsikirja 3: Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö. Porvoo WSOY. ISBN 951-0-13473-2.

Aura3, Tonteri. 1995. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo WSOY. ISBN 951-0-20166-9.

Myllyntausta, Hanna. 26.3.2008. Sähköpostitse saadut kalvoesitelmät ja valokuvat. Stora Enson Anjalankosken tehtaat.

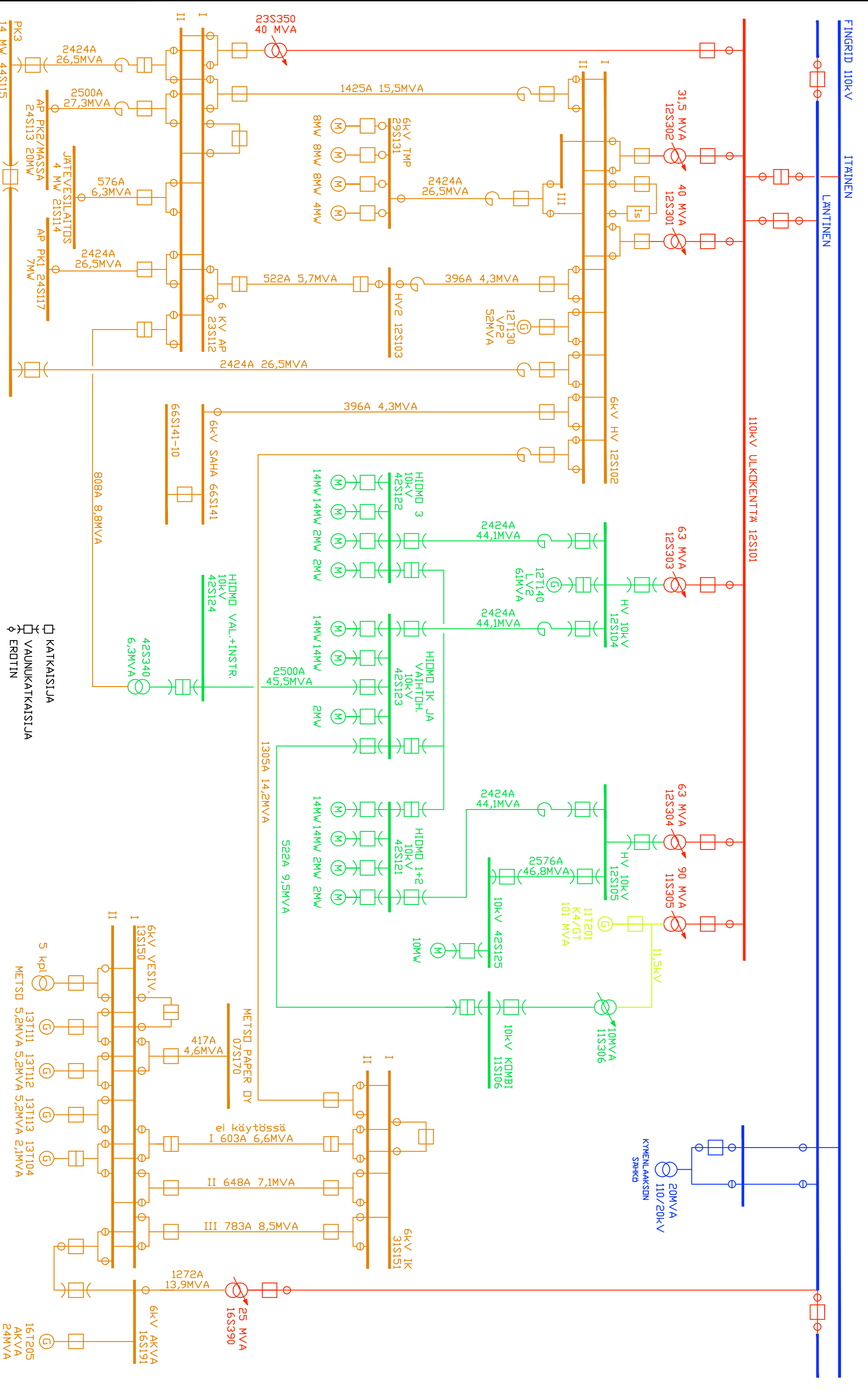
Nokia Oy, AHXCMK suurvirtajärjestelmien esite.

Pirhonen, Seppo. 7.8.2007. Häviötehoja koskeva sähköpostiviesti. Stora Enson Anjalankosken tehtaat.

Pyrhönen, Juha. 2005. Sähkökäytöt: luentomateriaali 2005 - 2006.

Shilling, P.E. 1996. A Practical approach to automating petrochemical facility var control. Verkkoasiakirja: ieeexplore.ieee.org. Viitattu 20.1.2008.

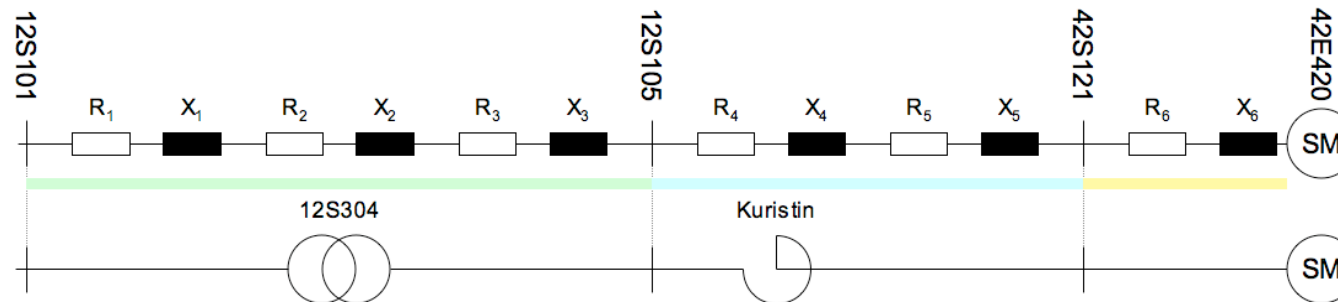
Stora Enso Oyj. EMAS Ympäristöselonteko 2006.



MAPPIRYHMÄ	SUUNNPM	20.09.95	SUUNN.	PB	PROSAS TAI KESKUS	OS. 09 YHTEISET SUURJÄNNITEJAKELUN SUPPEA YLEISKAAVIO	PIIR. N:O	316576	REV. NO	14
MAPPI	PIIRTPM	20.09.95	PIIRI	PB/SVN	TUNNUS	SUURJÄNNITEJAKELUN SUPPEA YLEISKAAVIO	OHJAUSKYS, PIIRI TAI RYHMÄ		LEHTI	14
VALLEHTI	MUUTSPM.	30.08.2007	MUUTT.	PeH	HAKEMISTO\TIEDOSTONIMI	JÄRJESTELMÄKAAVIOT\09S001_316576_01.DWG	JÄRJESTELMÄKAAVIOT		LEHTI	1



□ KATKAISIJA
 □ VAUNUKATKAISIJA
 □ ERDITIN



n	Kuvaus	Mistä	Mihin	Rn [Ω]	Xn [jΩ]
1	110kV Kisko	12S101	12S304	0,0018	0,0068
2	Päämuuntaja	12S304		0,0053	0,2625
3	10kV Kisko	12S304	12S105	0,0015	0,0195
4	Kuristin			0,0024	0,1236
5	Kaapelijärjestelmä	12S105	42S121	0,0076	0,0133
6	Moottorikaapeli	42S121	42E420	0,003	0,0083

	Ei loistehotuotantoa (vertailuarvot)					Minimituotanto					Maksimituotanto				
	43%	57%	71%	86%	100%	43%	57%	71%	86%	100%	100%	86%	71%	57%	43%
% * Pn															
Loistehotuot. [MVar]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,6	2,8	3,8	4,7	4,8	6,1	7,2	8,1	8,7
Tehokerroin	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	0,980	0,964	0,953	0,947	0,946	0,890	0,811	0,704	0,567
Kuormituspiste	-	-	-	-	-	O	Q	S	V	X	A	W	T	R	P
Staattorivirta [A]	335	448	558	670	780	336	456	579	703	824	825	753	689	634	590
110kV Kisko	0,61	1,08	1,68	2,42	3,29	0,00	0,04	0,13	0,24	0,38	0,39	0,63	0,88	1,09	1,28
Päämuuntaja	1,77	3,16	4,91	7,07	9,59	0,01	0,12	0,37	0,71	1,10	1,13	1,85	2,56	3,18	3,72
10kV Kisko	0,50	0,90	1,40	2,02	2,74	0,00	0,03	0,11	0,20	0,31	0,32	0,53	0,73	0,91	1,06
Kuristin	0,81	1,45	2,26	3,26	4,42	0,00	0,05	0,17	0,33	0,51	0,52	0,85	1,18	1,47	1,72
Kaapelijärjestelmä	2,54	4,54	7,07	10,18	13,81	0,01	0,17	0,54	1,02	1,59	1,63	2,67	3,69	4,58	5,36
Moottorikaapeli	1,02	1,82	2,83	4,08	5,53	0,00	0,07	0,22	0,41	0,64	0,65	1,07	1,48	1,84	2,15
Siirtoverkossa aiheutuvat häviöt päämuuntajan kanssa [kW]						0,03	0,48	1,54	2,91	4,52	4,64	7,60	10,52	13,07	15,28
Siirtoverkossa aiheutuvat häviöt ilman päämuuntajaa [kW]						0,02	0,32	1,03	1,96	3,04	3,12	5,12	7,08	8,80	10,28
Moottorissa aiheutuvat häviöt [kW]						0,88	5,28	12,15	20,24	29,18	29,83	45,33	60,00	72,51	82,98
Loistehotuotannon aiheuttamat kokonaishäviöt [kW]						0,92	5,75	13,68	23,15	33,70	34,47	52,94	70,52	85,59	98,26
siirtoverkon osuus kokonaishäviöistä						3,5%	8,3%	11,2%	12,6%	13,4%	13,5%	14,4%	14,9%	15,3%	15,6%

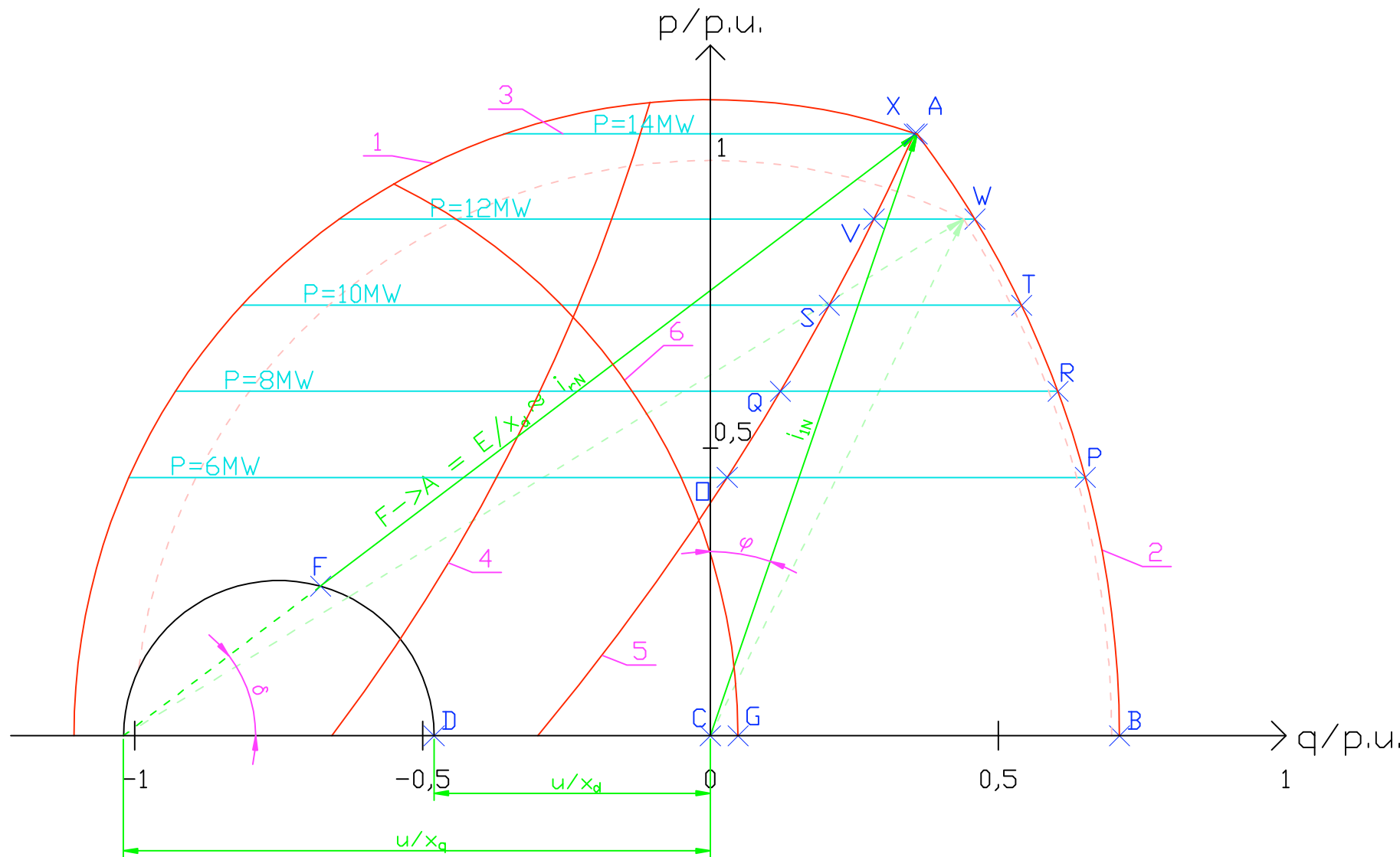
HSSDL 32/9010
(vanhat arvot sulkeissa)

$P_n = 14\text{MW}$ (12MW)
 $U_n = 10,5\text{kV}$
 $n = 300\text{rpm}$
 $\cos\varphi = 0,95$ (0,9)
 $f = 50\text{Hz}$
 $I_{ln} = 825\text{A}$ (746A)
 $I_{rn} = 430\text{A}$ (410A)
 (kuvasta mitattuna 425A) –PeH

A = Nimellinen kuormituspiste
 B = Tyhjäkäyntipiset nimellismagnetoinnilla
 C = Tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla
 D = Tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia
 □-W = Häviöläskennassa käytettyjä kuormituspisteitä

1 = Staattorin lämpenemiskäyrä (staattorivirran rajoitus)
 2 = Roottorin lämpenemiskäyrä (magnetoinnin rajoitus)
 3 = Nimellinen pätöteho
 4 = Stabiilisuusraja, kun $\Delta P=6\text{MW}$
 5 = Käytännöllinen stabiilisuusraja
 6 = Alimagnetointiraja ($1,1 \cdot IDGI = 1,1 \cdot I_{r0}$)

E = Tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla
 u = Staattorijännite
 x_d = Pitkittäinen tahtireaktanssi
 x_q = Poikittainen tahtireaktanssi
 δ = Kuormituskulma (napakulma)
 φ = Tehokulma
 $IDGI$ = Tyhjäkäyntimagnetointivirta (I_{r0})
 I_{FAI} = Nimellismagnetointivirta (I_{rn})
 I_{CAI} = Staattorivirta (i)



Pätö- ja Loisteholle:
 1 p.u. = 13,3 MW / 13,3 MVar

Staattorivirrälle:
 1,0 p.u. = 746A

Magnetointivirrälle:
 1,2541 p.u. = 410A \Leftrightarrow 1,0 p.u. = 326,93A

MAPPIRYHMÄ	SUUNNPVM 09.03.1983	SUUNN. ABB		PROS.AS TAI KESKUS	OS. 42 Hiomo Päämoottoreiden PQ-diagrammi	PIIR. NO	REV. NO
MAPPI	PIIRTPVM 17.08.2007	PIIRT. PeH		TUNNUS			00
VÄLILEHTI	MUUTOSPVM.	MUUTT.	HAKEMISTO\TIEDOSTONIMI			DHJAUSYKS., PIIRI TAI RYHMÄ	LEHTI

Yksikkömuunnimet (p.u.->A/MW jne)	Tehot: 13,3		MVA / MVA _r		Virrat:		staattori: 746		magnetointi: 326,927677		NIM.PISTE
Piste (ks. PQ-diagrammi)	O	P	Q	R	S	T	V	W	X	A	
Imagn [A]	211	395	265	400	319	407	372	415	424	425	
<i>Imagn [p.u.]</i>	<i>0,6449</i>	<i>1,2093</i>	<i>0,811</i>	<i>1,2242</i>	<i>0,9758</i>	<i>1,2439</i>	<i>1,1387</i>	<i>1,2692</i>	<i>1,2974</i>	<i>1,3006</i>	
Istaattori [A]	336	590	456	634	579	689	703	753	824	825	
<i>Istaattori [p.u.]</i>	<i>0,45</i>	<i>0,7913</i>	<i>0,6109</i>	<i>0,8504</i>	<i>0,7763</i>	<i>0,9232</i>	<i>0,9419</i>	<i>1,0088</i>	<i>1,1044</i>	<i>1,1059</i>	
Loistehon tuotto [MVA _r]	0,4	8,7	1,6	8,1	2,8	7,2	3,8	6,1	4,7	4,8	
<i>Loistehon tuotto [p.u.]</i>	<i>0,0293</i>	<i>0,6516</i>	<i>0,1218</i>	<i>0,604</i>	<i>0,2066</i>	<i>0,5407</i>	<i>0,2842</i>	<i>0,4596</i>	<i>0,3543</i>	<i>0,359</i>	
Akseliteho [MW]	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	
Akseliteho %	43%	43%	57%	57%	71%	71%	86%	86%	100%	100%	
<i>Imagn (cosφ=1) [p.u.]</i>	<i>0,6202</i>		<i>0,717</i>		<i>0,8297</i>		<i>0,9537</i>		<i>1,084</i>		
Imagn, kun cosφ=1 [A]	203		234		271		312		354		
<i>Istaat (cosφ=1) [p.u.]</i>	<i>0,449</i>		<i>0,6</i>		<i>0,7483</i>		<i>0,898</i>		<i>1,046</i>		
Istaat, kun cosφ=1 [A]	335		448		558		670		780		
Loistehosäätövara [MVA _r]	8,3		6,4		4,5		2,3		0,1		
Tehokulma, φ [°] (kuvasta)	3,74	55,43	11,50	45,25	15,43	35,85	17,56	27,11	18,71	18,94	
Tehokerroin, cos φ	0,998	0,567	0,980	0,704	0,964	0,811	0,953	0,890	0,947	0,946	

HÄVIÖTEHOT LOISTEHOTUOTANNON ÄÄRILAIDOILLA ERI AKSELITEHOILLA:

Akseliteho %	43%		57%		71%		86%		100%	
	Vähän	Paljon	Vähän	Paljon	Vähän	Paljon	Vähän	Paljon	Vähän	Paljon
Tuotanto"asento"	10,18	35,79	16,10	36,68	23,31	37,87	31,74	39,43	41,20	41,40
Roottorikäämityksen häviöt [kW]	10,18	35,79	16,10	36,68	23,31	37,87	31,74	39,43	41,20	41,40
Muut magnetointihäviöt [kW]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Magnetoinnin kokonaishäviöt [kW]	10,18	35,79	16,10	36,68	23,31	37,87	31,74	39,43	41,20	41,40
Kuparihäviöt [kW]	27,00	83,47	49,75	96,41	80,34	113,62	118,27	135,67	162,60	163,04
Vakiohäviöt ks ABB-välilehti	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77
Kokonaishäviöt [kW]	140,95	223,04	169,62	236,86	207,42	255,26	253,78	278,87	307,57	308,22

HÄVIÖTEHOT, KUN COS $\varphi=1.0$, ERI AKSELITEHOILLA:

Akseliteho %	43%	57%	71%	86%	100%
Roottorikäämityksen häviöt [kW]	9,41	12,58	16,85	22,26	28,76
Muut magnetointihäviöt [kW]	0	0	0	0	0
Magnetoinnin kokonaishäviöt [kW]	9,41	12,58	16,85	22,26	28,76
Kuparihäviöt [kW]	26,88	47,99	74,65	107,50	145,86
Vakiohäviöt ks ABB:n viesti	103,77	103,77	103,77	103,77	103,77
Kokonaishäviöt, kun cos $\varphi=1$ [kW]	140,06	164,35	195,27	233,54	278,39
Erotus minirajaan [kW]	0,9	5,3	12,1	20,2	29,2
Erotus maksimirajaan [kW]	83,0	72,5	60,0	45,3	29,8
Minimirajalla: kW/MVAr	2,3	3,2	4,4	5,3	6,2
Maksimirajalla: kW/MVAr	9,6	9,0	8,3	7,4	6,2

Loistehotuotannon aiheuttamat häviöt

Minimiasento [MVAr]	0,4	1,6	2,8	3,8	4,7
Tuotannon aiheuttamat häviöt [kW]	0,9	5,3	12,1	20,2	29,2
Maksimiasento [MVAr]	8,7	8,1	7,2	6,1	4,8
Tuotannon aiheuttamat häviöt [kW]	83,0	72,5	60,0	45,3	29,8

VAKIOT				
Suure	Tunn.	Arvo	Yks.	Huom.
Staattorin vaiheresistanssi	R1	0,079849667	Ω	Keskiarvo kaikista vaiheista
Roottorikäämin resistanssi	Rr	0,229	Ω	
Nimellisjännite	U1n	10500	V	
Nimellisvirta	I1n	825	A	
Nimellis magn. Virta	Im	430	A	
Nimellistehokerroin	Cos φ_n	0,95		Vanhalle koneelle
Nimellisteho	Pn	14	MW	
Magnetoinnin hyötysuhde	η_m	1		