



## **TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

## **INSINÖÖRITYÖ**

**Tahtigeneraattorin roottorin maasulkuvirran selvitys ja korjausehdotukset**

**Työn tekijä: Tuomo Pälvilä  
Työn valvoja:  
Lehtori, DI Arja Ristola  
Työn ohjaaja:  
Sähkömestari Jori Issakainen**

**Työ hyväksytty: 8. 3. 2011**

**Arja Ristola  
Lehtori, dipl.ins**



## **ALKULAUSE**

Tämä insinööri työ tehtiin Vantaan Energia Oy:lle. Haluan kiittää projektissa mukana olleita henkilöitä kuten sähkömestari Jori Issakaista ja dipl.ins. Sami Pasasta haasteellisesta aiheesta, ajasta ja panostuksesta työhöni. Lisäksi kiitän dipl.ins., lehtori Arja Ristolaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta opastuksesta ja hyvistä neuvoista.

Helsingissä 1.3.2011

Tuomo Pälvilä

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Tuomo Pälvilä	
<b>Työn nimi:</b> Tahtigeneraattorin roottorin maasulkuvirran selvitys ja korjausehdotukset	
<b>Päivämäärä:</b> 1.3.2011	<b>Sivumäärä:</b> 38 s. + 4 liitettä
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn ohjaaja:</b> dipl.ins. lehtori Arja Ristola <b>Työn ohjaaja:</b> sähkömestari Jori Issakainen	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Vantaan Energia Oy:n Martinlaakson voimalaitokselle. Työssä on selvitetty alan kirjallisuuden, mittausten sekä teoreettisen tarkastelun avulla, mistä tahtigeneraattorin roottorin suuret maasulkuvirrat normaalitilanteessa aiheutuvat. Roottorin maasulkuvirrat ovat aiheuttaneet roottorin maasulkusuojauksen komponenttien rikkoutumisia.</p> <p>Työn alkuvaiheessa selvitettiin lähdekirjallisuuden avulla tahtigeneraattorin, magnetoinnin ja roottorin maasulkusuojauksen toimintaa teoriassa. Seuraavaksi tehtiin käytännön mittauksia, simuloitiin käytännön tilannetta laboratorio-olosuhteissa ja laskettiin tulokset teorian pohjalta. Lopuksi vertailtiin käytännön, teorian ja simuloinnin tuloksia keskenään ja esitettiin johtopäätökset.</p> <p>Työssä tehtyjen mittausten ja simuloinnin perusteella saatiin tietoa tyristorisillan ja vanhan virransyöttömenetelmän yhteensopivuudesta. Mittausten perusteella selvisi, että roottorin maasulkusuojaukseen kulkevat häiriövirrat johtuvat magnetointilaitteiston tyristorisillasta ja suojauksen impedanssista. Virransyöttöyksikön rikkoontumiset ovat aiheutuneet ylitaajuisista häiriövirroista. Työssä tehtiin korjausehdotukseksi kolme eri vaihtoehtoa, joilla roottorin maasulkuvirtojen vaikutusta suojauspiirin toimintaan voidaan vähentää merkittävästi tai jopa kokonaan.</p>	
<b>Avainsanat:</b> yliaallot, magnetointi, tyristorisilta, roottorin maasulku	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Tuomo Pälvilä	
<b>Title:</b> Earth Fault Current of Synchronous Generator Rotor: Problem and Solutions	
<b>Date:</b> 1.3.2011	<b>Number of pages:</b> 38 + 4
<b>Department:</b> Electrical Engineering	<b>Study Programme:</b> Electrical Power Engineering
<b>Instructor:</b> Arja Ristola, M.Sc., Senior Lecturer (of Electrical Power Engineering)	
<b>Supervisor:</b> Jori Issakainen, Electricity Master, Vantaa Energy ltd	
<p>This work was carried out for the Martinlaakso power plant of Vantaa Energy ltd. The goal was to define through both theoretical analysis and measurements what causes the large currents in the rotor earth fault detection system. Rotor earth currents have caused detection system failures and breakdowns.</p> <p>This study first looked at the principles of synchronous generators and static excitation as well as the rotor earth fault detection system. Next the study focused on carrying out measurements, conducting a simulation at the laboratory and making calculations. Finally, the results thus obtained were examined and compared. Conclusions were made from the results.</p> <p>This study generated a great deal of information regarding the compatibility of thyristor-bridge and old AC injection. The measurements showed that the three phase thyristor bridge along with circuit impedances were causing harmonic currents to the rotor earth fault detection system and AC injection breakdowns.</p> <p>To avoid this problem this study proposes three different options to protect the earth fault detection system from harmonic currents</p>	
<b>Keywords:</b> harmonic currents, static excitation, thyristor bridge, rotor earth fault	

## SISÄLLYS

### ALKULAUSE

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LÄMMÖN JA SÄHKÖN YHTEISTUOTANTO</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>TURBOGENERAATTORI</b>	<b>2</b>
<b>3.1</b>	<b>Turbogeneraattorit historiasta nykypäivään</b>	<b>2</b>
<b>3.2</b>	<b>Turbogeneraattorin mekaaninen rakenne</b>	<b>3</b>
3.2.1	<i>Roottorin rakenne</i>	4
3.2.2	<i>Staattorin rakenne</i>	5
<b>3.3</b>	<b>Turbogeneraattorin magnetointi</b>	<b>6</b>
3.3.1	<i>Kolmivaiheinen tyristorisilta</i>	8
3.3.2	<i>Kolmivaiheinen tyristorisilta yliaaltolähteenä</i>	10
3.3.3	<i>Kolmivaiheisen tyristorisillan tasajännitepuolen yliaaltojen laskeminen</i>	11
<b>3.4</b>	<b>Turbogeneraattorin toiminta</b>	<b>14</b>
3.4.1	<i>Generaattorin toiminta tyhjäkäynnissä</i>	14
3.4.2	<i>Generaattorin toiminta kuormitettuna</i>	15
3.4.3	<i>Tahdistus</i>	16
3.4.4	<i>Tahtigeneraattorin pätötehon ja jännitteensäätö</i>	17
<b>4</b>	<b>ROOTTORIN MAASULKU JA KIERROSSULKU</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>TURBOGENERAATTORIN ROOTTORIN MAASULKUSUOJAUS</b>	<b>20</b>
<b>5.1</b>	<b>Roottorin maasulkusuojaus <math>f_N</math>-R-menetelmällä</b>	<b>20</b>
<b>5.2</b>	<b>Roottorin maasulkusuojaus 1...3 Hz -menetelmällä</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>G2-TURBOGENERAATTORI</b>	<b>22</b>
<b>6.1</b>	<b>G2-roottorin maasulkusuojausjärjestelmä</b>	<b>23</b>
<b>6.2</b>	<b>G2-roottorin maasulkuvirta ongelman tausta ja mahdolliset syyt</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>ROOTTORIN MAASULKUVIRRAN SELVITYS</b>	<b>24</b>
<b>7.1</b>	<b>Mittauslaitteisto ja menetelmät</b>	<b>24</b>
7.1.1	<i>Mittauslaitteisto</i>	24

7.1.2	<i>Magnetointipiirin tasajännitepuolen mittaukset</i>	25
7.1.3	<i>Kytkenän simulointi</i>	26
7.1.4	<i>Syöttöverkon harmonisten mittaukset</i>	26
<b>7.2</b>	<b>Mittaustulokset</b>	<b>26</b>
7.2.1	<i>Tyristorisillan tasajännitteen suodatinpiirin mittaustulokset</i>	27
7.2.2	<i>Tyristorisillan antama jännite</i>	28
7.2.3	<i>Roottorin maasulkusuojauksen mittaustulokset</i>	29
7.2.4	<i>Simuloinnin tulokset</i>	30
7.2.5	<i>Suuntaajan syöttöverkon yliaallot</i>	31
<b>7.3</b>	<b>Tulosten vertailu ja maasulkusuojauspiiriin kulkevan häiriövirran laskeminen teoreettisesti</b>	<b>32</b>
<b>7.4</b>	<b>Mittaustulospäätelmät</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>KORJausehdotukset</b>	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>35</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>37</b>
	Liite 1. Fourier´n vakion $a_n$ määrittäminen	
	Liite 2. G2:n tekniset tiedot	
	Liite 3. G2:n Suojauskaavio	
	Liite 4. Roottorin maasulkusuojaus A2K3 ja virransyöttöyksikkö	

## 1 JOHDANTO

Sähköntuotannon oleellisimpia komponentteja voimalaitoksissa ovat generaattorit. Generaattorilla muutetaan pyörivän akselin liike-energia sähköenergiaksi. Tämä kone on myös samalla sähköverkon kallein yksittäinen komponentti. Energian muodonmuutosprosessi tapahtuu generaattorin roottorin ja staattorin välillä.

Generaattorin roottorin suojaus on tärkeä osa suojausjärjestelmää, joka tarvittaessa kytkee generaattorin irti verkosta ja pysäyttää sitä pyörittävän voimakoneen eli turbiinin. Roottorin maasulkusuojaus on yksi osa generaattorin suojausta, joka tarvittaessa keskeyttää sähköntuotannon, jos maasulkuvirta on liian suuri. Tuotannon keskeytys tarkoittaa taloudellista menetystä tuotantolaitokselle.

Tutkimuksen kohteena oleva generaattori 2:lla on tärkeä asema Vantaan Energia Oy:n Martinlaakson voimalaitoksessa. Generaattorin nimellisteho on 100 MVA, ja se on siten suuritehoisin generaattori voimalaitoksella. Tässä insinööriyössä tutkitaan tahtigeneraattorin roottorista maahan ja suojausjärjestelmään kulkevaa liian suurta maasulkuvirtaa. Tutkitaan myös sitä, miksi roottorin maasulun havaitsemiseen tarkoitettu suojausjärjestelmä ei toimi niin kuin voitaisiin olettaa. Lisäksi selvitetään, mitkä ilmiöt aiheuttavat roottorista maahan kulkevan virran, ja minkälaiset komponentit suojaavat tältä ongelmalta. Ongelman luonteen takia, työn tutkittavat osat ovat tahtigeneraattori, magnetointi, yliaallot ja roottorin maasulkusuojauksen järjestelmät. Lopuksi esitellään tilanteeseen sopivat korjausvaihtoehdot.

## 2 LÄMMÖN JA SÄHKÖN YHTEISTUOTANTO

Lämmön ja sähkön yhteistuotanto (CHP; *Combined Heat and Power*) tarkoittaa sitä, että laitoksella tuotetaan päätuotantona lämpöä ja sivutuotteena sähköä. Lämpö johdetaan kaukolämmönsiirtimeen, joka lämmittää kaukolämpöveden. Loppukäyttäjät eli ihmiset saavat näin lämpöä asuintaloihinsa. Osa lämmöstä eli höyrystä johdetaan höyryturbiiniin. Turbiini pyörittää generaattoria, jonka avulla syntyy sähköä. [1.]

Martinlaakson voimalaitoksessa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä. Martinlaaksossa käytetään polttoaineina kivihiiltä ja maakaasua. [2.]

Suurten voimalaitosten generaattorit ovat yleensä tahtigeneraattoreita. Lämpövoimalaitosten turbiinin pyörimisnopeus on suuri, joten näissä tuotantolaitoksissa olevat generaattorit ovat pääasiassa umpinapaisia tahtigeneraattoreita eli turbogeneraattoreita. [3, s. 241.]

### 3 TURBOGENERAATTORI

Pyöriviä sähkökoneita on monenlaisia. Yleisimmät sähkökoneet ovat epätahtikoneet, tahtikoneet ja tasasähkökoneet. Lisäksi on myös joitain erikoiskoneita. Tahtikoneiden tunnusmerkki on se, että sen roottori pyörii staattoriin synnyttämänsä magneettikentän kanssa samalla nopeudella. Jotta kehitetyn sähkön taajuus saadaan valtakunnanverkkoon sopivaksi, koneella täytyy olla oikea napapariluku. Tahtikoneen eli tässä tapauksessa tahtigeneraattorin staattoriin indusoituvan sähkömotorisen voiman pyörimisnopeus noudattaa seuraavaa kaavaa napapariluvun suhteen:

$$n = \frac{60 \frac{s}{min} * f (\frac{1}{s})}{p} = \frac{60f}{p} rpm \quad (1)$$

,jossa  $p$  = generaattorin napapariluku  
 $f$  = taajuus [Hz]

Tahtigeneraattorit poikkeavat toisistaan juuri turbiinin määrittämän pyörimisnopeuden mukaan. Umpinapakoneita käytetään nopeakäyntisissä laitoksissa, mikä tarkoittaa sitä, että pyörimisnopeus voi olla jopa suurempikin kuin 3 000 rpm. Suuren pyörimisnopeuden aiheuttamien radiaalisten voimien pienentämisen takia roottori on pitkä, ja siinä on suhteellisen pieni halkaisija verrattuna avonapaisiin roottoreihin. Nopeakäyntisiä generaattoreita käytetään höyry- ja kaasuturbiinilaitoksissa. [3, s. 241, 243.]

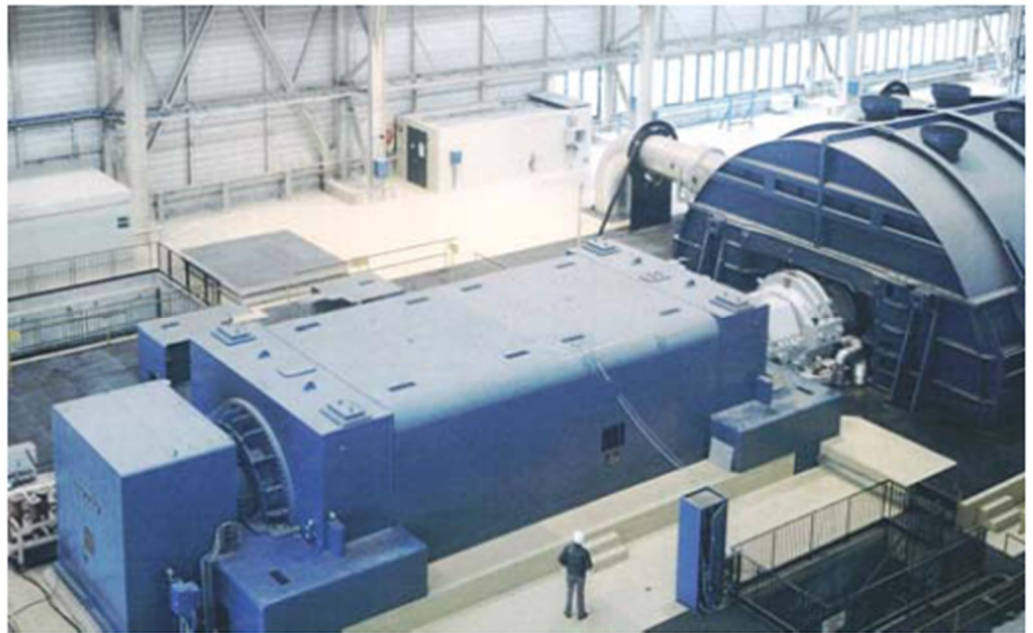
#### 3.1 Turbogeneraattorit historiasta nykypäivään

Siitä asti, kun sylinterimäinen roottori kehitettiin (Charles Brown v.1901) suurinopeuksisille tahtikoneille eli turbogeneraattoreille, ne ovat toimineet generaattoreina voimalaitosten kaasu- ja höyryturbiinien kanssa. 1930-luvulle asti turbogeneraattorit suunniteltiin 2-, 4- ja 6-napaisiksi, sen ajan turbiinien tarpeisiin. 1920-luvun voimalaitosten generaattorit olivat teholtaan n. 100 MVA ja jännite oli 12 kV. 1930-luvun alussa keksittiin vetyjäähdytys roottoriin ja staattoriin. Tämä keksintö johti siihen, että 1960-luvun alkaessa yksittäisten turbogeneraattoreiden tehot olivat kasvaneet 500 MVA:iin.



60-luvulla siirryttiin eristyksissä käyttämään synteettistä hartsikyllästystä, ja näin ollen lämpöluokat kasvoivat 155°:een. 60-luvun loppuessa tehopuolijohdot toivat mukanaan staattisen magnetoinnin ja magnetointikoneen. Näin ollen 70-luvulla tapahtui taas suurta kasvua generaattoreiden tehoissa. Ydinvoimaloiden mukana generaattorien tehot kasvoivat 1 200 MVA:iin 2-napaisissa koneissa ja 1 600 MVA:iin 4-napaisissa koneissa, jännitteen ollessa 27 kV. Roottorin halkaisijat alkoivat saavuttaa suurimman mahdollisen fyysisen mittansa. Tutkittiin myös  $\geq 2\,000$  MVA:n koneita, ja sen myötä suprajohdavia roottorikäimejä ja ilmavälikäimejä.

Nykyään koneet voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri teholuokkaan: pienet  $\leq 150$  MVA, keskikokoiset  $\leq 500$  MVA ja suuret  $\leq 2\,000$  MVA. Kuvassa 1 on esitetty suuren teholuokan turbogeneraattori. Koneet ovatkin nykyään joka osa-alueella kehittyneempiä, mikä mahdollistaa tehon kasvun. [4.]



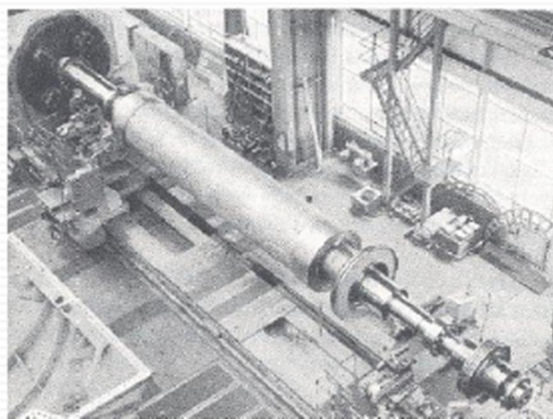
Kuva 1. 1 700 MVA ja 4-napainen turbogeneraattori ydinvoimalassa [4]

### 3.2 Turbogeneraattorin mekaaninen rakenne

Sähkökoneissa on kaksi pääosaa, pyörivä osa ja paikallaan pysyvä osa. Paikallaan pysyvää osaa sanotaan staattoriksi ja pyörivää osaa roottoriksi. Roottoria pyöritetään voimakoneen eli turbiinin avulla, ja roottori toimii siten energian välittäjänä. Staattoriin indusoituu sähköenergia, joka syötetään sähköverkkoon staattorin liittimistä.

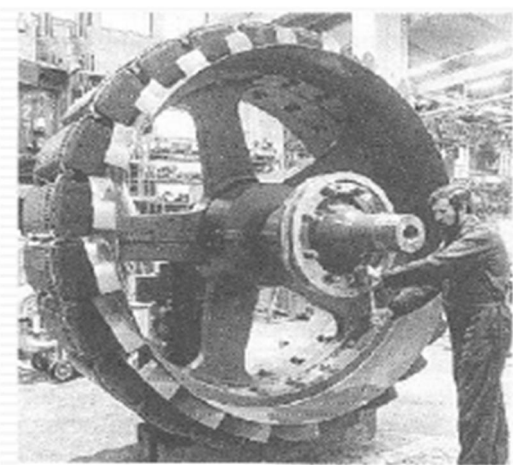
### 3.2.1 Roottorin rakenne

Roottorin muoto riippuu pääasiassa siitä, miten nopeasti voimakone pyörittää roottoria. Voimakoneen nopeus määrittää myös sen, kuinka monelle napaparille kone on rakennettu. Roottorin ja staattorin napaparilukujen on oltava samat. [3, s. 214.]



**Kuva 2. Umpinapakoneen roottori [3, s. 214]**

Kuvasta 2 nähdään suuritehoisen turbogeneraattorin roottorin mittasuhteet. Kun kuvaa 2 ja 3 verrataan toisiinsa, nähdään roottorityyppien rakenteelliset erot. Umpinapakoneen roottori on pitkä akselin suuntaisesti, ja sillä on pieni halkaisija. Avonapakone on taas päinvastainen rakenteeltaan, lyhyt akselin suuntaisesti ja suuri halkaisija.



**Kuva 3. Avonapakoneen roottori [3, s. 214]**

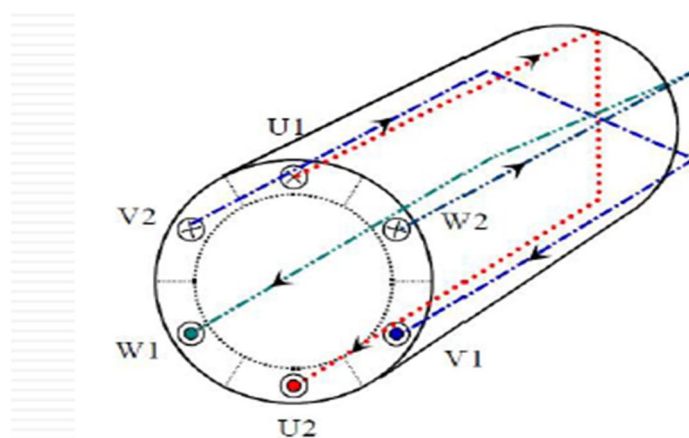
Turbogeneraattorin roottorissa on urat roottorikämmitykselle, johon roottorikämmitykset asennetaan. Sanotaan, että roottorissa on urakäämitys. Tätä roottorin urakäämitystä voidaan kutsua myös magnetointikämmitykseksi. [5.]

Yleensä 1- ja 2 -napapariset tahtikoneet ovat umpinapaisia, ja siitä suuremmat napapariluvut löytyvät avonapaisista koneista. Umpinapakoneen roottorissa voi olla pienemmät lisäurat häkkikämmitykselle ankkurireaktion ja mekaanisten värähtelyjen vaimennukseen. Materiaalina vaimennuskäämityksessä käytetään kuparia tai messinkiä. Umpinapakoneen suuren keskipaikoisvoiman takia, roottorin kenttäkäämien päätykytkennät on suojattu sitkeällä hartsista tehdyllä materiaalilla. Turbogeneraattorin roottorin runko on yleensä puhdasta rautaa mekaanisen kestävyuden ja lämmönsiirron takia. [6.]

### 3.2.2 Staattorin rakenne

Staattori on osa, joka pysyy paikallaan koko ajan. Staattori koostuu käämityksestä, jotka on asetettu symmetrisesti staattoriuriin. Koska sähkönjakeluverkossa sähkö on kolmivaiheista, jokainen vaihe on  $120^\circ$ :een vaihesiirrossa toisiinsa nähden, niin silloin myös staattorin rakenne täytyy olla senmukainen (kuva 4). Tämän takia jokainen vaihe on rakenteellisesti  $120^\circ$ :een päässä toisistaan akselin päästä katsottuna. Nämä rakenteelliset seikat takaavat sen, että tuotettu sähkö on symmetrisesti kolmivaiheista. [7.]

Staattorin runko tahtigeneraattoreissa on tehty laminoidusta piiteräksestä. Staattoriurien kolmivaiheinen käämitys on tehty yhdenmuotoisiksi edellä esitetyllä tavalla (kuva 4). Jos staattorin halkaisija on  $< 1$  m, niin se on tehty yhdestä osasta ja sitä suuremmat segmenteistä. Staattorikäämit voivat olla tyypiltään yksi- tai kaksikerroksisia ja yksi- tai monikerroksisia. [6.]

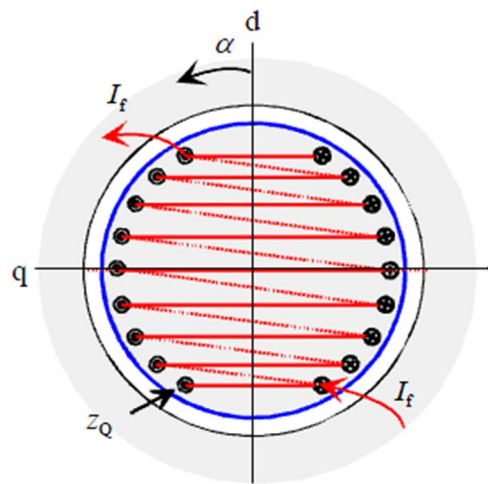


Kuva 4. Staattorin symmetrinen kolmivaihekäämitys [8]

Kuvasta 4 havaitaan, miten symmetrinen kolmivaiheinen käämitys on tehty. Kuvassa näkyy kolme vaihetta U, V ja W. Kuten aiemmin mainittiin (ks. 3.2.1), staattori on tehtävä samalle napapariluvulle kuin roottorikin. Kuvan tapauksessa jokaisella vaiheella on yksi napaparinsa, ja jokainen vaihe on  $120^\circ$ :een vaihesiirrosta keskenään. [7.]

### 3.3 Turbogeneraattorin magnetointi

Jännitteen staattorikämeihin indusoitumisen ehtona on suljettu silmukka ja muuttuva magneettikenttä. Magneettikenttä kehitetään tasavirralla. Magneettikentän luomista ilmapäliin voidaan kutsua magnetoinniksi.

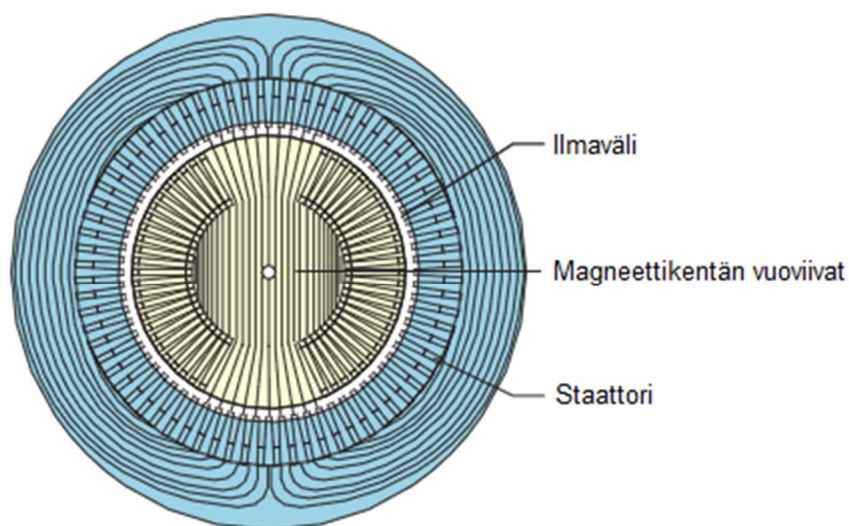


Kuva 5. Virtojen kulkusuunnat roottorissa [8]

Yhteistoiminnassa roottorin kanssa, magnetoinnilla kehitetään muuttuva magneettikenttä eli päävuo sähkökoneen sisälle. Koska roottoriin johdettu virta on tasavirtaa, joka aiheuttaa pysyvän magneettikentän, muuttuva magneettikenttä saadaan aikaan pyörivällä roottorilla. Kuvassa 5 on esitetty roottorin käämitys ja virran kulkusuunnat käämityksissä. Virtojen kulkusuunnista voidaan päätellä magneettikentän napaisuus oikean käden säännöllä. Kuvassa 5  $Z_Q$  tarkoittaa johdinten lukumäärää urassa,  $I_f$  virtaa,  $q$  poikittaisakselia ja  $d$  pitkittäisakselia. [7.]

Oikean käden säännössä, tartutaan kuvan 5 käämiin oikealla kädellä siten, että sormet ovat virran suuntaisesti. Tällöin peukalo näyttää magneettisen pohjoisnavan. Magneettikenttää kuvataan vuoviivoilla.

Kuvassa 6 on poikkileikkaus umpinapaisen koneen rakenteesta sekä kuvaus siitä, miten magneettikenttä kytkeytyy roottorin ja staattorin välillä. Kuvassa näkyvät ohuet viivat ovat päävuoviivoja, jotka kuvaavat, mitä kautta magneettivuo kulkee. Vuoviivat kulkevat magneettisesta pohjoisesta etelään. Kuvan 5 ja 6 perusteella voidaan vuoviivojen kuvitella kulkevan keskeltä ylös pohjoiseen ja ylhäältä alas etelään tehden silmukan. [8.]



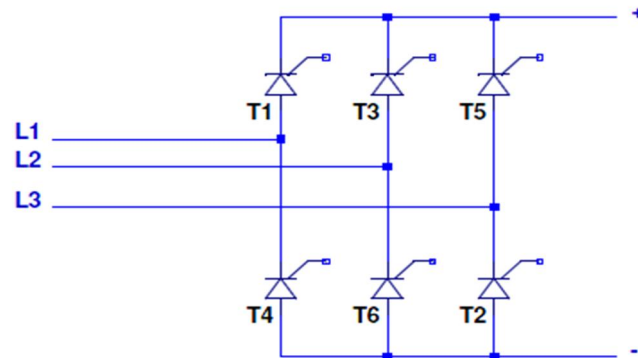
**Kuva 6. Turbogeneraattorin roottorin poikkileikkaus [9]**

Roottorin ilmaväli on tasainen, mikä tekee umpinapakoneesta magneettisesti symmetrisen (kuva 6). Umpinapaisilla tahtikoneilla on pääasiassa kaksi magnetointimenetelmää, jotka ovat harjallinen magnetointi ja harjaton magnetointi. Harjallinen magnetointi tarkoittaa sitä, että magnetointivirta kuljetetaan magnetointilähteestä hiiliharjojen ja liukurenkaiden välityksellä roottoriin. Magnetointilähteenä toimii vaihtovirtalähteestä syötetty tasasuuntaaja.

Magnetointivirta, joka on tasavirtaa, aiheuttaa pysyvän magneettikentän johtimensa ympärille oikean käden säännön mukaisesti. Tämä pysyvä magneettikenttä pyörivän roottorin akselin kanssa saa aikaan pyörivän magneettikentän. Magnetointiteho voidaan ottaa joko erillisestä tasasähkölähteestä tai vaihtosähkölähteestä tasasuuntaajan kautta. Tasasuuntaajana käytetään yleensä kolmivaiheista tyristorisiltaa. Jos koneessa olisi harjaton magnetointi, magnetointivirta otettaisiin koneen akselilla olevasta erillisestä magnetointigeneraattorista. [10, s. 217 - 218.]

### 3.3.1 Kolmivaiheinen tyristorisilta

Ohjattuja tasasuuntaajia käytetään hallittuun tehonsiirtoon vaihtosähköverkon ja säädettävän tasajännitelähteen välillä. Yksi tällainen suuntaaja on kolmivaiheinen tyristorisilta. Kolmivaiheinen täysin ohjattu tyristorisilta (kuva 7) on yleisesti käytetty tasajännitelähde suurille tehoille. Tyristorisilta toimii siis tasasuuntaajana vaihtosähköverkon ja tasasähköverkon välillä. [11, s. 154.]



**Kuva 7. Kolmivaiheinen tyristorisilta**

L1, L2 ja L3 esittävät kolmivaiheisen syöttöverkon vaihtojännitteitä, jotka syöttävät tasasuuntaussiltaa (kuva 7). Vaihtojännitelähteenä on yleensä muuntaja, mutta kytkentää voidaan syöttää myös suoraan verkosta. Plus- ja miinusnavoilta saadaan tasasuuntaussillalla vaihtojännitteestä suunnattu tasajännite. [10, s. 395.]

Sillan tuottaman tasajännitteen arvo eli tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo riippuu tyristorien hiloille annettavan virtapulssin ajankohdasta, eli tyristorien ohjauskulmasta. Tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo ideaalitapauksessa ohjauskulman funktiona voidaan laskea kaavasta 2, kun kommutointia ei oteta huomioon. [11, s. 140.]

$$U_{dia} = \frac{1}{T} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \hat{U} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * \cos \alpha * U$$

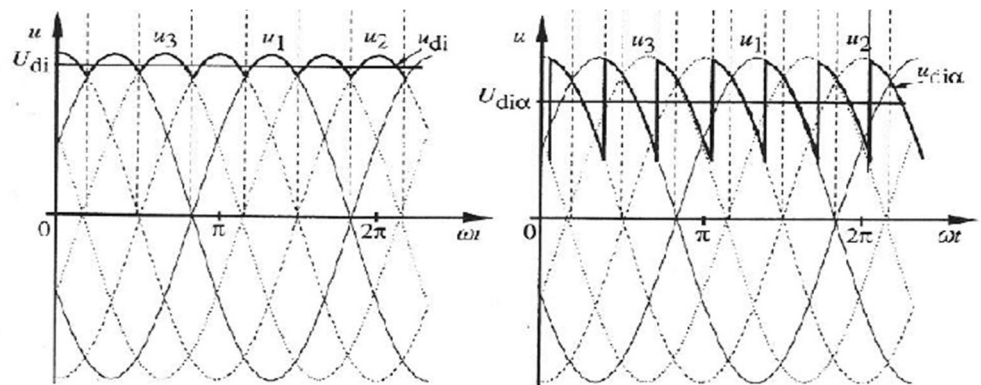
$$\approx 1,35 * \cos \alpha * U \quad (2)$$

,jossa  $U$  = syöttöjännitteen pääjännitteen tehollisarvo

$\alpha$  = ohjauskulma

$T$  = jaksonaika

Integrointirajat kaavaan 2 on valittu kuvan 8 mukaan. Funktion jaksonaika kuvassa 8 on  $60^\circ$ . Kuvasta nähdään myös, että funktio alkaa ajallisesti kohdasta  $\frac{\pi}{3}$ . Kuvassa 8 on esitetty tasajännitteen ajallinen vaihtelu kahdella eri ohjauskulman arvolla. Vasemmanpuoleisessa käyrästössä näkyy tasajännitteen keskiarvo  $U_{di}$  ja pääjännitteet  $u_1$ ,  $u_2$  ja  $u_3$ , kun ohjauskulma on nollastetta. Ohjauskulma  $0$  astetta tarkoittaa sitä, että tyristorien syttymistä ei ole viivästetty. Ohjauskulmalla  $0^\circ$  piiri toimii, kuten diodisilta. Esim. jos käytetään kaavaa 2 tasajännitteen laskemiseksi, kun ohjauskulma on  $0^\circ$ , tasajännitteen arvoksi saadaan  $1,35 * U$ .



**Kuva 8. Kolmivaiheisen tyristorisillan antaman tasajännitteen käyrämuodot ohjauskulmilla  $0$  (vasen) ja  $40$  (oikea) astetta [10, s. 398]**

Kuvan 8 oikeanpuoleisessa käyrästössä tyristorien ohjauskulma on säädetty  $40^\circ$ :een. Huomataan, että tasajännitteen keskiarvo  $U_{di\alpha}$  laskee, koska käyrän ja nolla-akselin väliin jäävä pinta-ala pienenee.

Tasasuuntaussilloista kerrotaan yleensä pulssiluku, joka kertoo huomattavan määrän tietoa piiristä. Pulssiluku voidaan määrittää, kun tiedetään suodatamattoman tasajännitteen jännitepulslien lukumäärä syöttöjännitteen jaksoa kohti. [10, s. 380.]

Pulssiluvun määritelmän mukaan voidaan päätellä, että kolmivaiheinen silta-kytkentä on kuusipulssisuuntaaja. Pulssiluku kertoo myös sen, kuinka laadukasta (tasaista) tasajännitettä saadaan kuormalle. Suuntaajan tuottama tasajännite ei kuitenkaan ole koskaan täysin tasoittunutta, vaan siinä on aina hieman aaltoisuutta. Aaltoisuus riippuu ohjauskulmasta ja pulssiluvusta. Mitä suurempi on pulssiluku, sitä pienempi on tasajännitteen aaltoisuus ohjauskulmalla  $0$ . Tasajännitteen käyrän minimiarvo on koko ajan suurempi kulmalla  $0^\circ$  kuin kulmalla  $40^\circ$ . Tämä johtaa siihen, että tasajännitteen aritmeettinen

keskiarvo on suurempi ja aaltoisuus pienempi. Mitä lähempänä tasaista viivaa tasajännite on, sitä pienempi aaltoisuus on. Kun ohjauskulmaa kasvatetaan nollasta eteenpäin, tasajännitteen käyrä muuttuu muotoaan kauemmaksi tasaisesta, joka taas lisää aaltoisuutta. Kun tasajännite poikkeaa tasaisesta, se voidaan jakaa kahteen pääkomponenttiin, tasajännitekomponenttiin ja vaihtojännitekomponentteihin eli yliaaltoihin. (kuva 8.)

### 3.3.2 Kolmivaiheinen tyristorisilta yliaaltolähteenä

#### *Syöttöverkon yliaallot*

Kolmivaiheinen tyristorisilta aiheuttaa verkkoon harmonisia yliaaltoja. Harmoniset yliaallot ovat syöttöverkon perustaajuuden (50 Hz) kerrannaistajuuksia. Nämä yliaaltovirrat aiheuttavat monenlaisia häiriöitä sähköverkossa. Häiriöihin kuuluvat esim. verkon komponenttien lisähäviöt, suojalaitteiden väärä toiminta, tele-, atk- ja automaatiojärjestelmien häiriöt, nollajohtimen ylikuormitus ja resonanssitilanteet loistehonkompensointilaitteistojen kanssa. [12.]

Tyristorisillan verkkoon aiheuttamat yliaallot riippuvat sen pulssiluvusta. Kun tyristorisilta on kolmivaiheinen, kuten aiemmin todettiin, kyseessä on kuusipulssisuuntaaja. Suuntaajien aiheuttamat yliaallot voidaan laskea kaavasta 3:

$$n = k * p \pm 1 \quad (3)$$

,jossa      n = yliaaltovirran järjestysluku  
               k = kokonaisluku 0,1,2,3...  
               p = pulssiluku = suuntaajan sykkeluku

Kaavan 3 avulla voidaan laskea, että kolmivaiheinen tyristorisilta tuottaa verkkoon järjestysluvultaan 5, 7, 11, 13, 17, 19 jne. yliaaltoja. Teoriassa kunkin yliaallon tehollisarvon suhteellinen osuus perustaajuuden nimellisarvosta on suoraan verrannollinen yliaallon järjestysluvun käänteisarvoon. Esim. viidennen virtayliaallon suuruus on 1/5 eli 20 % virran perustaajuudesta. Todellisuudessa yliaallot ovat kuitenkin pienempiä. [10, s. 426 - 427.]

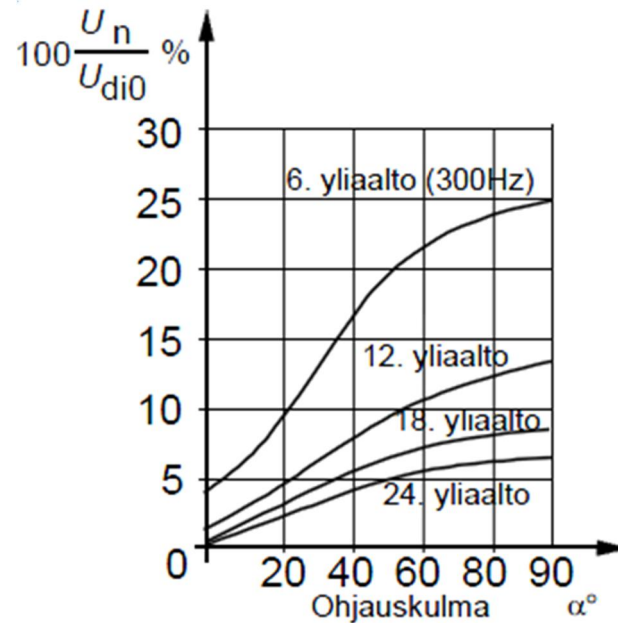
#### *Tasajännitepuolen yliaallot*

Tasasuuntaaja aiheuttaa yliaaltoja myös tasajännitepuolelle. Vaikka tyristorisuuntaajan tasajännitteen arvo on paljas luku, sen käyrämuoto ei ole täysin



tasaista. Tasajännite sisältää yliaaltoja. Yliaaltojen suuruus riippuu suoraan ohjauskulmasta  $\alpha$  kuvan 9 mukaisesti. [12.]

Kunakin yliaallon prosentuaalinen osuus voidaan laskea teoreettisesti, kun tiedetään, mistä funktiosta tasajännitteen aritmeettinen keskiarvo muodostuu. Laskeminen tehdään yleensä Fourier'n sarjojen avulla.



Kuva 9. Kolmivaiheisen tyristorisillan tasajännitteen yliaallot ohjauskulman funktiona [12, s. 9]

Yliaaltoja voidaan suodattaa tehokkaasti erilaisten imupiirien avulla. Tämä tarkoittaa sitä, että tietylle yliaallolle järjestetään sarjaresonanssi maahan nähden, joten yliaalto kulkee hallitusti verkosta pois. Sarjaresonanssissa kondensaattori, kela ja vastus kytketään sarjaan ja viritetään tietylle taajuudelle niin, että kapasitiivinen reaktanssi ja induktiivinen reaktanssi ovat yhtä suuria. Tämä aiheuttaa sen, että viritystaajuuden omaavat yliaallot imeytyvät kohti sarjaresonanssipiiriä. [12.]

### 3.3.3 Kolmivaiheisen tyristorisillan tasajännitepuolen yliaaltojen laskeminen

Kolmivaiheinen tyristorisilta oletettavasti aiheuttaa pulssiluvun kerrannaisia jänniteyliaaltoja tasajännitepuolelle. Tämä voidaan myös laskea käyttämällä Fourier'n sarjoja. Tasajännitteen aritmeettinen keskiarvohan laskettiin kaavalla 2. Yliaallot lasketaan lähes samalla tavalla kaavoilla 4, 5 ja 10. Yliaaltojen laskemisessa lähdetään liikkeelle Fourier'n vakioiden  $a_n$  ja  $b_n$  laskemisella.

Fourier'n vakiot voidaan laskea kaavoilla 4 ja 5:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) * \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) * \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt \quad (5)$$

[13, s. 143.]

, jossa T = funktion jaksonaika. Kun kaavaan 4 ja 5 sijoitetaan funktio, jolla kolmivaiheista tyristorisiltaa syötetään, yhtälöt voidaan muokata seuraavaan muotoon:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sin t * \cos(n6t) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sin t * \sin(n6t) dt \quad (7)$$

Yhtälöistä on jätetty tarkoituksella sinikäyrän huippuarvo lukuna pois, koska nyt on tavoitteena laskea suhteellista arvoa. Se, johon arvoa ollaan suhteuttamassa, on ideaalinen maksimitasajännite, kuten kuvassa 8 vasemmalla.

Kun integroidaan kaavat 6 ja 7 ja muokataan trigonometrian mukaan, tulokseksi saadaan seuraavat kaavat ohjauskulman ja kokonaisluvun n funktiona:

$$a_n = \frac{3*\cos(6an+\alpha)}{(6n+1)\pi} - \frac{3*\cos(6an-\alpha)}{(6n-1)\pi} \quad (8)$$

$$b_n = \frac{3*\sin(6an+\alpha)}{(6n+1)\pi} - \frac{3*\sin(6an-\alpha)}{(6n-1)\pi} \quad (9)$$

Kaavan 8 johtaminen on tehty liitteessä 1. Kaavan 9 johtamista ei ole esitetty tässä työssä, koska sen johtamisen periaatteet ovat juuri samanlaiset kuin kaavan 8. Kun vakioiden integraalit on laskettu, yliaaltokomponenttien amplitudit voidaan laskea kaavalla 10.

$$|c_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (10)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea molemmat Fourier'n vakiot kaavoja 8 ja 9 käyttäen. Vakion  $a_n$  tulokseksi saadaan taulukon 1 mukaiset arvot (seur. s.).

**Taulukko 1. Fourier'n vakion  $a_n$  arvot ohjauskulman  $\alpha$  ja  $n$ :n funktiona.**

	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Kulma $\alpha$ (°)	a1	a2	a3	a4	a5
0	-0,0546	-0,0134	-0,0059	-0,0033	-0,0021
30	0,0473	-0,0116	0,0051	-0,0029	0,0018
60	-0,0273	-0,0067	-0,003	-0,0017	-0,0011
74,16	-0,3142	-0,0311	-0,0968	0,0329	-0,0519
90	0	0	0	0	0

Yliaaltojen amplitudien laskemiseksi tarvitsee laskea enää kertoimien  $b_n$  arvot. Nämä arvot on laskettu kaavaa 9 käyttäen taulukkoon 2:

**Taulukko 2. Fourier'n vakion  $b_n$  arvot ohjauskulman  $\alpha$  ja  $n$ :n funktiona.**

	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Kulma $\alpha$ [°]	b1	b2	b3	b4	b5
0	0	0	0	0	0
30	-0,1637	0,0801	-0,0532	0,0399	-0,0319
60	0,2835	0,1388	0,0922	0,069	0,0552
74,16	0,0208	-0,1526	-0,0327	0,0691	0,0325
90	-0,3274	0,1603	-0,1064	0,0797	-0,0637

Taulukon 1 ja 2 arvojen negatiivisuudella ei ole merkitystä yliaaltojen amplitudeja laskettaessa, koska negatiivisuus supistuu pois kaavaa 10 käyttäessä.

Seuraavaksi voidaan laskea Fourier'n vakio  $c_n$ . Vakio  $c_n$  kuvaa yksittäisen yliaallon amplitudia suhteessa integroitavan funktion huippuarvoon. Tässä tapauksessa  $c_n$  on välivaihe suhteellisten arvojen laskemiseen.  $c_n$ :lle saatiin arvoiksi taulukon 3 mukaiset arvot.

**Taulukko 3. Fourier'n vakio  $c_n$  ohjauskulman  $\alpha$  ja  $n$  funktiona.**

kulma $\alpha$ (°)	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
0	0,05460	0,01340	0,00590	0,00330	0,00210
30	0,17040	0,08090	0,05340	0,04000	0,03200
60	0,28480	0,13900	0,09220	0,06900	0,05520
74,16	0,31490	0,15570	0,10220	0,07650	0,06120
90	0,32740	0,16030	0,10640	0,07970	0,06370

Laskettaessa yliaaltojen suhteellisiä osuuksia maksimitasajännitteestä, niin kerroin  $c_n$  täytyy kertoa vielä seuraavasti:

$$U_{6n\%} = c_n * \frac{\pi}{3} * \frac{1}{\sqrt{2}} * 100\% \quad (11)$$

, jossa  $\frac{\pi}{3}$  = suhde aritmeettiseen keskiarvoon

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \text{suhde tehollisarvoon}$$

Tämän jälkeen voidaan tehdä taulukko kunkin yliaallon suhteellisesta osuudesta kertomalla jokainen  $c_n$ :  $n$  kerroin kaavan 11 mukaisesti. Taulukkoon 4 on laskettu tasajännitepuolen kuudella jaollisten yliaaltojen suhteelliset osuudet maksimitasajännitteestä tehollisarvona.

**Taulukko 4. Yliaaltojen suhteelliset osuudet ohjauskulman  $\alpha$  ja  $n$ :n funktiona [%]**

kulma (°)	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
0	4,04	0,99	0,44	0,25	0,16
30	12,62	6,00	3,96	2,96	2,36
60	21,09	10,29	6,83	5,11	4,09
74,16	23,35	11,42	7,58	5,68	4,54
90	24,24	11,87	7,88	5,90	4,72

Yliaaltojen suhteellinen osuus on suurimmillaan, kun tyristorien ohjauskulma on 90°.  $n$  tarkoittaa yliaallon perustaajuuden (300 Hz) kerrointa. Esim. kun  $n = 3$ , yliaallon värähtelytaajuus on 900 Hz. Taulukon 4 ja kuvan 9 yhteneväiset tulokset ovat kiistattomat. (taulukko 4.)

### 3.4 Turbogeneraattorin toiminta

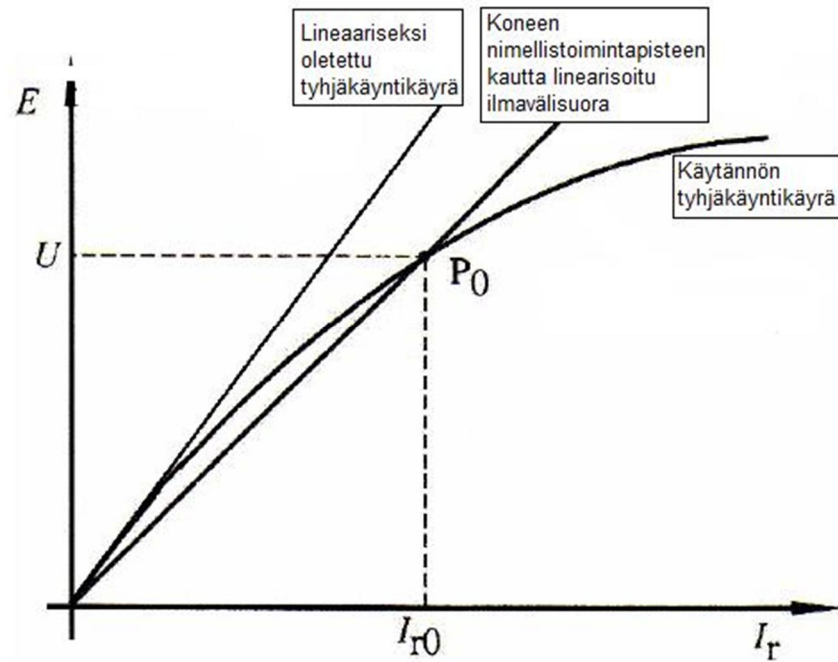
#### 3.4.1 Generaattorin toiminta tyhjäkäynnissä

Turbogeneraattorin roottorin muuttuvan magneettikentän luomisessa on kaksi pääosaa, magneettikenttä eli päävuoto ja voimakone. Näitä kahta pystytään myös säätämään tarvittaessa. Päävuoto muodostuu magnetointivirrasta ja taajuus muodostuu voimakoneen nopeudesta. Kehitetyn sähkönsäätimen taajuus muodostuu siten kaavan 1 mukaan.

Generaattorin kehittämää jännitettä voidaan kuvata tyhjäkäyntikäyrällä (kuva 10). Tyhjäkäyntikäyrä ilmaisee generaattorin tuottamaa jännitettä magnetointivirran funktiona. Ylimmäinen suora kuvassa ilmaisee teoreettisen lineaariseksi oletetun tahtikoneen tyhjäkäyntikäyrää. Koneen jännite käytännössä ei kuitenkaan käytäydy lineaarisesti.

Käytännön tyhjäkäyntikäyrästä nähdään, että aluksi jännite kasvaa lähes lineaarisesti magnetointivirrasta riippuen, mutta sitten tullaan alueelle, jossa kasvu heikkenee. Tällöin siirrytään kyllästysalueelle. Kyllästyminen on tilanne, jossa magneettivuon kasvu ei enää kasvata magneettivuontiheyttä

samassa suhteessa. Kyllästyminen aiheuttaa epälineaarisuutta, ja konetta siten hankalampi käsitellä matemaattisesti. Konetta voidaan linearisoida piirtämällä suora nimellistoimintapisteen kautta. Koneen linearisoiminen helpottaa generaattorin tuottaman jännitteen arviointia. Kuvassa pisteillä  $P_0$  ja  $I_{r0}$  tarkoitetaan nimellisarvojen  $U$  tyhjäkäyntimagnetointia. [10, s. 242 - 243.]



Kuva 10. Esimerkki tahtikoneen tyhjäkäyntikäyrästä [10, s. 243]

### 3.4.2 Generaattorin toiminta kuormitettuna

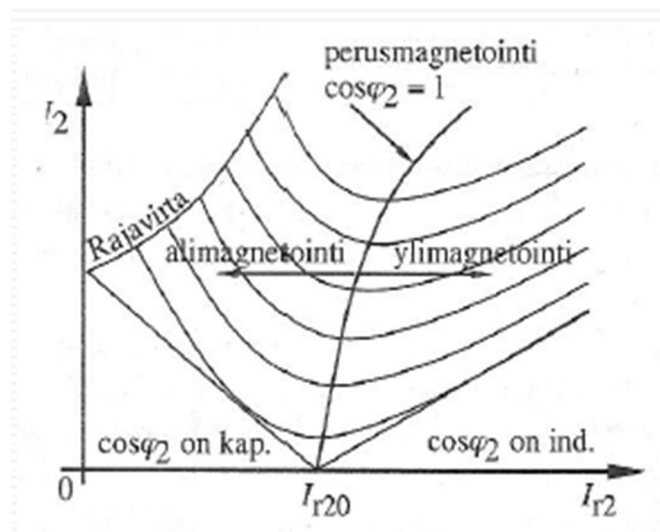
Tyhjäkäynnissä perusmagnetoinnin arvolla generaattorin navoissa on nimellisarvo. Kun generaattoria kuormitetaan, tilanne muuttuu. Tällöin ankkurin virta eli kuormalle menevä staattorin virta indusoi oman jännitteen staattoriin. Riippuen kuormituksen reaktanssista se joko vähentää tai lisää generaattorin liitinjännitettä. Tätä kutsutaan ankkurireaktioksi. Ankkurireaktion vaikutuksia on kuvattu taulukossa 5. [10; 4, s. 224 - 227.]

Taulukko 5. Ankkurireaktion vaikutus erilaisilla kuormilla sekä tilanteen hallinta

Kuormitus	Seuraus	Korjaus
resistiivinen	taajuus laskee	kasvatetaan voimakoneen momenttia
kapasitiivinen	jännite kasvaa	vähennetään magnetointia
induktiivinen	jännite laskee	lisätään magnetointia

Kun kuormitus on resistiivistä, ankkurivirta kehittää vastustavan momentin, joten voimakoneen momenttia on hieman lisättävä, jotta jännite pysyy vakiona. Magnetointivirtaankin se vaikuttaa, mutta ei merkittävästi. Kun kuormitus on taas induktiivista, ankkurireaktio kehittää vastasuuntaisen jännitteen lähdejännitteelle pienentäen sitä. Tämä voidaan kompensoida magnetointivirtaa kasvattamalla. Kapasitiivinen kuorma taas kasvattaa jännitettä magnetoiden konetta, joten itse magnetointivirtaa voidaan pienentää.

Kuormituksen vaikutusta staattorivirtaan ja magnetointivirtaan kuvataan myös V-käyrillä eli kuormituskäyrillä. Nämä käyrät on esitetty kuvassa 11. Kuvassa perusmagnetointi tarkoittaa sitä, että magnetointivirta on säädetty kompensoimaan ainoastaan pätötehon aiheuttaman lievän jännitteen laskun. Kuvan 11 pystyakselilta luetaan kuorman virta ja vaaka-akselilta magnetointivirta. Ylöspäin aukeavat paraabelit ilmaisevat kuormituskäyrästä prosenttiosuutta koneen nimellisestä pätötehosta. [10, s. 234 - 238.]



Kuva 11. Kuormituskäyrät eli V-käyrät [10, s. 234]

### 3.4.3 Tahdistus

Ennen kuin generaattori kytketään olemassa olevaan sähköverkkoon, se täytyy aina tahdistaa. Tahdistamisessa generaattorin jännite, taajuus, vaihekulma ja vaihejärjestys säädetään samalle tasolle kytkettävään verkkoon nähden. [10, s. 234.]

Tämä on erittäin yleinen toimenpide varavoimakoneiden käytössä, joka hoidetaan nykyaikaisissa koneissa pääasiassa automatiikan avulla. Toki käytössä on vielä vanhempiaakin koneita, joiden tahdistaminen hoidetaan manuaalisesti.

#### 3.4.4 Tahtigeneraattorin pätötehon ja jännitteensäätö

Tahtigeneraattorien pätötehoa ja loistehoa säättävät automaattiset järjestelmät, jotka seuraavat verkon tilannetta koko ajan. Pätötehon säätö järjestetään voimakoneen kautta ja loistehon säätö magnetoinnin kautta. Voimakoneen teho vaikuttaa generaattorin sisäisen jännitteen kulmaan ja magnetointi sisäisen jännitteen itseisarvoon. [14, s. 351.]

Automaattinen jännitteensäätö eli AVR (*Automatic Voltage Regulation*) on tärkeä osa generaattoria ja magnetointilaitteisto kuuluu olennaisena osana siihen. Jännitteensäätö taas liittyy olennaisena osana loistehon tuottoon/kulutukseen. Generaattorin kuormitus saattaa olla vaihtelevaa, kuten pätötehoa, loistehoa tai sekakuormia. Loisteho sitä vaativalle kuormitukselle täytyy tuottaa jotenkin. Yleensä pyritään siihen, että loisteho tuotetaan paikallisesti, jotta säästyttäisiin siirtojohdoissa tapahtuvilta siirtohäviöiltä.

Generaattorissa loistehon tuotto hoidetaan jännitteensäädön kautta. Jännitteensäätö taas tapahtuu magnetoinnin kautta. Tehon vaihtelua hallitaan automaattisella jännitteensäätöjärjestelmällä, joka säättää magnetointilaitteistoa. Loistehoa säädetään magnetointivirtaa muuttamalla, koska se vaikuttaa generaattorin liitinjännitteeseen eli säättää jännitettä. Magnetointivirtaa säädetään magnetointijännitteellä ja magnetointijännitettä muutetaan tyristorien ohjauskulmaa muuttamalla. [6.]

## 4 ROOTTORIN MAASULKU JA KIERROSSULKU

### *Roottorin maasulku*

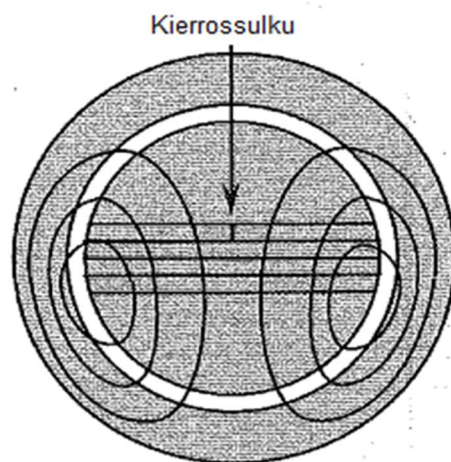
Magnetointipiiri, joka on tasajännitepiiri roottorissa, on normaalitilanteessa maasta erotettu. Normaalista poikkeava tilanne syntyy, kun tasajännitepiiri on yhteydessä maahan. Maasulku tapahtuu, kun esim. kenttäkäämin ja roottoriuran välillä on liian pieni resistanssi eli huono eristys. Roottorin maasulku voi tapahtua missä tahansa, jossa vierekkäin ovat kenttäkäämitys ja maapotentiaali.

Yksinkertainen maasulku ei vielä aiheuta mitään huomattavaa häiriötä koneen toiminnalle ja generaattori toimii kuten ennenkin. Yksi maasulku lisää kuitenkin toisen maasulun mahdollisuutta. Jos tapahtuu toinen maasulku ensimmäisen lisäksi, osa magnetointivirrasta alkaa kulkea näiden kahden maapotentiaalin välillä. Kone menee kaksoismaasulkuun maapotentiaalin kautta. Tämä aiheuttaa magneettisen epätasapainon, joka johtaa suuriin mekaanisiin voimiin ja roottorin kuumenemiseen ja aiheuttaa hyvin lyhyessä ajassa vakavia tai jopa korjaamattomia vahinkoja roottoriin ja sen ympäristöön. Yleensä onkin niin, että kierrossulku aiheutuu maasulun aiheuttamista virroista. [15, s. 375; 9; 16.]

Havaitsematon kaksoismaasulku tarkoittaa suuressa generaattorissa pitkää korjausaikaa tai kokonaan uutta konetta, joten suuri rahallinen menetys on väistämätön. Tämän takia roottorin suojausjärjestelmillä pyritään havaitsemaan ja korjaamaan ensimmäinen maasulku nopeasti, jotta suuria aineellisia vahinkoja, ja siten rahallisia menetyksiä ei pääsisi syntymään.

#### *Roottorin kierrossulku*

Kierrossulku on kahden samaan järjestelmään kuuluvan johtimen välinen oikosulku. Kierrossulku vääristää yleensä roottorin ilmvälissä olevaa vuota. Vääristyminen johtuu epäsymmetrisestä mmv:sta eli virroista napakäämityksessä. Jos vuo on hyvinkin pahasti vääristynyt, roottorissa voi olla voimakkaasti vääristyneitä voimia, koska voimat vaihtelevat neliöllisesti suhteessa vuontiheyteen.



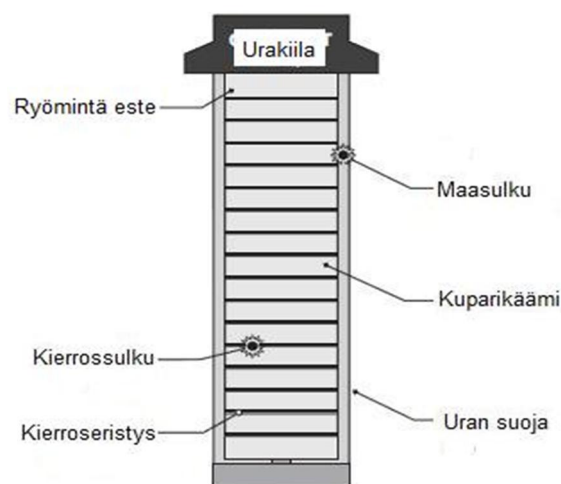
**Kuva 12. Kierrossulun vaikutus roottorin magneettikenttään [17, s. 728]**



Nämä voimat massan yksikkönä saattavat olla jopa 50 - 100 tonnia. Tämän suuruisilla voimilla on tapana vääntää roottoria. Joissain tapauksissa vääntyminen voi olla jopa niin suurta, että roottori koskettaa staattorin runkoa. Lisäksi nämä voimat aiheuttavat epänormaalia värinää, joka saattaa vahingoittaa laakereita. Tähän vikaan ei välttämättä ole erillistä suojausta, vaan se on hoidettu niin, että roottorin maasulkusuojaus havaitsee sen, kun kaksoismaasulku on kehittynyt kierrossulkuksi. [17, s. 728 - 729.]

Kuvassa 12 nähdään, miten kierrossulku vaikuttaa roottorin magneettikenttään. Kuvan sulkeutuvat ympyrät kuvaavat magneettikentän jakautumista roottorissa. Kuvassa 6 nähdään normaali magneettikentän jakautuminen roottorissa. Ero magneettikenttien jakautumisessa on huomattava.

Kuvassa 13 on esitetty roottorin yhden uran rakenne ja näytetty, missä kohdassa kierrossulkuvika ja maasulkuvika voi tapahtua. Maasulku tapahtuu napakäämin ja roottorirungon välillä.



**Kuva 13. Roottorin urakäämityksen rakenne [9]**

Huono eristys kahden eri potentiaalissa olevan elektrodin välillä mahdollistaa maasulun aiheutumisen. Eristyksen huononemiseen vaikuttaa mm. seuraavat asiat:

- aika
- generaattorin käyttötapa
- eristeen pilaantuminen

- käytön vikatapaukset. [9; 16.]

## 5 TURBOGENERAATTORIN ROOTTORIN MAASULKUSUOJAUS

Tahtigeneraattorin roottorilla on useita suojausja. Jokainen suojaus valvoo roottoria tietynlaiselta vialta. Roottorin maasulkusuojaukseen on aiemmin käytetty kolmea erilaista tapaa, potentiometri-menetelmä, vaihtovirransyöttö-menetelmä ja tasavirransyöttö-menetelmä. [17, s. 730.]

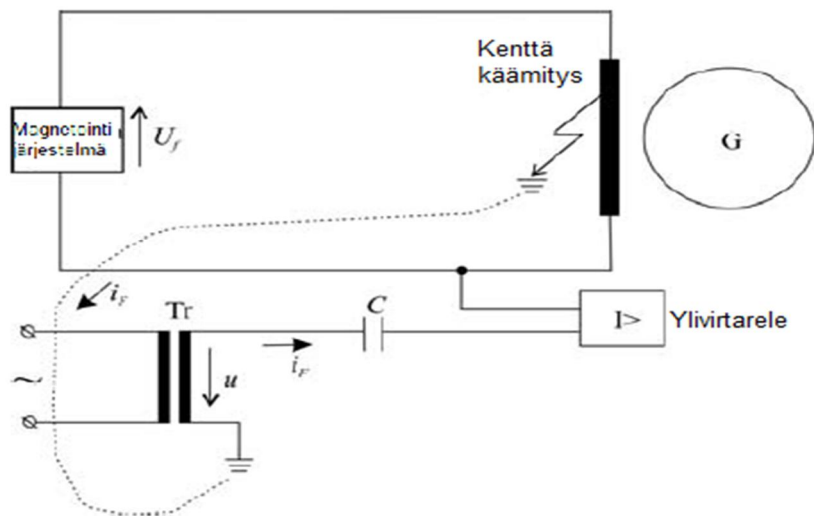
Uutena mittaustapana tähän joukkoon on otettu kanttiaaltoon perustuva menetelmä. Kanttiaalto-menetelmä perustuu pienitaajuisen tasajännitteen syöttöön magnetointipiirissä. Tutkittavassa generaattorissa menetelmänä käytetään vaihtovirransyöttöä, ja koska potentiometrinen menetelmä ja tasavirransyöttömenetelmää ei enää juuri käytetä, niin tässä työssä tutkitaan vain kanttiaalto-menetelmää ja vaihtovirransyöttö-menetelmää.

Harjallisen magnetoinnin tasasuuntaajan yliaaltojen takia releenä joudutaan käyttämään tavallisen releen sijasta verkkotaajuudella toimivaa relettä. Verkkotaajuinen virtarele on immuuni yliaalloille. [18, s. 158 - 159.]

### 5.1 Roottorin maasulkusuojaus $f_N$ -R-menetelmällä

$f_N$ -R-menetelmässä eli vaihtovirransyöttö-menetelmässä käytetään mittaus- ja laukaisukäskykomponenttina vakioaikaista ylivirtarelettä. Mittausvirran syöttöön käytetään ulkoisena apuvaihtojännitteenä muuntajaa  $T_r$ . Muuntaja kehittää 50 Hz:n taajuudella vaihtelevan jännitteen, joka kehittää piiriin mittausvirran. Jos roottorissa tapahtuu maasulku, suojausjärjestelmän virtapiiri sulkeutuu kuvan 14 mukaisesti. [16.]

Vian myötä maasulkupiirissä kulkee releen asetteluarvon ylittävä virta. Tämän johdosta rele antaa käskyn generaattorin suojaustoimenpiteille, jotka on esitetty edellä (liite 3). Releen mittauspuolella on itsessään yliaaltoja vaimentava komponentti (kaistanpäästösuodin 50 Hz:lle). Tässä menetelmässä suojausjärjestelmä on erotettu magnetointijärjestelmästä kondensaattorin avulla. Kondensaattori C ja muuntaja voivat olla erillisen virransyöttöyksikön sisällä. Menetelmän huono puoli on se, että osa virrasta kulkee roottorin ja rungon välisen kapasitanssin ja laakereiden kautta maahan.



**Kuva 14.**  $f_N$ -R-menetelmän periaatekaavio [16]

Tästä aiheutuu laakerivirtoja, jotka vähentävät laakereiden käyttöikää, mikäli virta on riittävän suuri aiheuttaakseen kipinöintiä, joka vahingoittaa laakerin metallia. [19.]

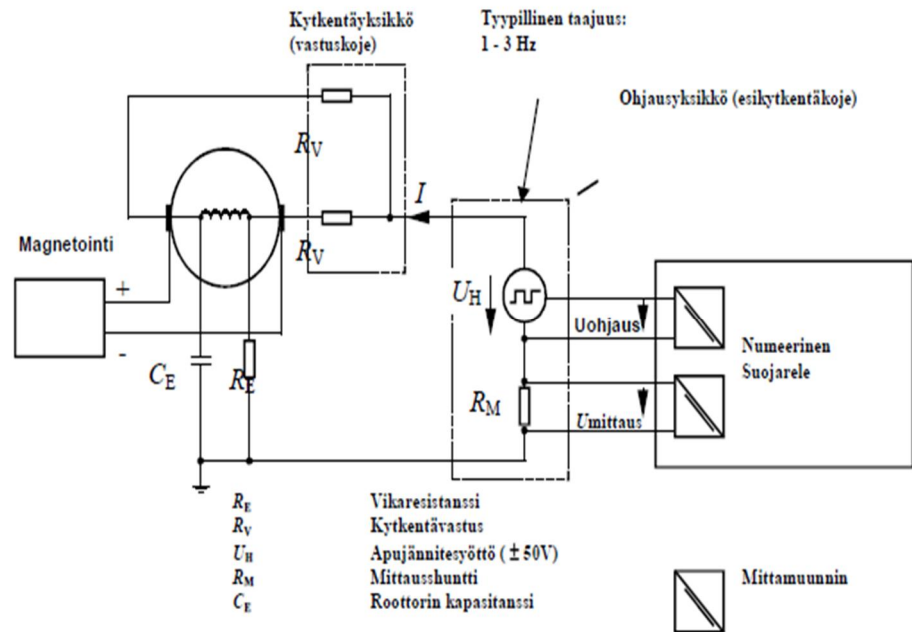
## 5.2 Roottorin maasulkusuojaus 1...3 Hz -menetelmällä

Kuvassa 15 on esitetty miten mittaus, suojaus ja vikavirtapiirit kytkeytyvät toisiinsa kanttiaalto-menetelmässä eli 1...3 Hz -menetelmässä. Tässä menetelmässä syötetään pienitaajuisia kanttiaaltoista tasajännitettä magnetointipiiriin, jonka napaisuutta vaihdetaan 1 - 3 kertaa sekunnissa. Tämä tasajännite muodostetaan kuvan 15 esikytkentäkojeessa. Kanttiaaltainen jännite siirtyy seuraavaksi vastuskojeen läpi magnetointipiiriin.

Vastuskojeen kautta kytkeytyminen on symmetrinen suuriresistanssisten kytkentävastusten kautta. Jännite on samaan aikaan kytkeytynyt maahan matalaresistanssisen mittausshuntin eli mittausvastuksen kautta. Ohjausjännite ja mittausjännite syötetään numeeriselle releelle mittamuuntajien kautta. Ohjausjännite on suhteutettu syötettävään jännitteeseen amplitudin ja taajuuden osalta. Mittausjännite vastaa roottorista maahan kulkevaa mittausvirtaa.

Aina kun kanttiaallon polariteettia vaihdetaan, virta  $I$  kulkee roottorin maakapasitanssin  $C_E$  kautta maahan. Tämä aiheuttaa samassa suhteessa mittausjännitteen pienenemisen. Kun maakapasitanssi on latautunut, virta pienenee

nollaan. Jos virta ei mene nollaan, roottorissa on maasulku, jonka vikavirran suuruus riippuu vikaresistanssista  $R_e$ . Tämä menetelmä eliminoi maakapasitanssin vaikutuksen ja magnetointilaitteiston häiriöiden vaikutuksen mitaussuureisiin. [20.]



Kuva 15. 1...3 Hz-menetelmän periaatekaavio [19]

## 6 G2-TURBOGENERAATTORI

Martinlaakson voimalaitoksessa on 3 päägeneraattoria, joiden tehot ovat 75 MVA, 100 MVA ja 71,25 MVA. Tutkittava generaattoriyksikkö G2 on niistä suuritehoisin. Generaattorin voimakoneena toimii höyryturbiini. G2-turbogeneraattorin teknisissä tiedoissa (liite 2) on mainittu mm. seuraavia asioita:

- pyörimisnopeus on 3 000 rpm
- kone on nimellisteholtaan 100 MVA ja  $\cos \varphi = 0,8$ .
- napaluku 2 eli napapariluku  $p = 1$
- nimellinen pätöteho on 80 MW, mikä saadaan myös tehokertoimen avulla.

Generaattori käyttää harjallista magnetointia. Harjallisen magnetoinnin tasajännite on toteutettu kolmivaiheisella tyristorisillalla.

Tyristorisillan syöttöjännitteen nimellinen arvo on 440 V, joka on saatu generaattoriyksikön G2 pääkaaviosta. Tyristorien syttymistä säättää oma jännitteensäätöyksikkönsä.

Tutkitun generaattorin teknisissä tiedoissa (liite 2) magnetoinnille on ilmoitettu myös seuraavat arvot:

- tyhjäkäynnin magnetointijännite  $U_{F0} = 75V$
- tyhjäkäynnin magnetointivirta  $I_{F0} = 433A$
- nimellinen magnetointijännite  $U_{FN} = 263V$
- nimellinen magnetointivirta  $I_{FN} = 1167A$ .

Magnetointipiiriin on kytketty RC-suodin, jonka tarkoitus on poistaa suurimmat vaihtokomponentit tasajännitteestä.

### 6.1 G2-roottorin maasulkusuojausjärjestelmä

G2-generaattorin roottorin maasulkusuojaus järjestelmänä toimii  $f_N$ -R-menetelmä (AC injection method), jonka toimintaperiaate on selitetty aiemmin (ks. 5.1). Siihen kuuluu virransyöttöyksikkö SPMK 1C40 C2 ja 2 vakioaikavirtarelettä mallia SPAJ 1B1 J3.

Suojauskaaviosta (liite 3) nähdään, että rele A2K3 antaa pelkän hälytyskäskyn. Rele A5K3 taas antaa käskyt seuraaville toiminnoille:

- hälytys
- generaattorin erottaminen verkosta
- magnetoinnin katkaisu
- turbiinin pysäyttäminen.

Voidaan päätellä, että roottorin maasulkusuojauksen oikea toiminta on ensiarvoisen tärkeää. Jos suoja toimii väärin, se aiheuttaa turhia generaattorin ja turbiinin alasajoja.

## 6.2 G2-roottorin maasulkuvirta ongelman tausta ja mahdolliset syyt

Maasulkusuojausjärjestelmän aiheuttamat ongelmat huomattiin, kun virransyöttöyksikön muuntaja oli mennyt rikki. Virransyöttöyksikön muuntaja oli mennyt rikki todennäköisesti ylivirrasta. Tämän jälkeen vika korjattiin vaihtamalla uusi samanlainen virransyöttöyksikkö ja lisäämällä suojauspiiriin resistanssia mahdollisten yliaaltojen vaimentamiseksi. Kun näiden toimenpiteiden jälkeen suojauspiiriin kulkeva virta mitattiin, huomattiin, että virran arvo oli edelleen liian suuri. Suojauspiiriin kulki releen asetteluarvon ylittävä virta, ja silti rele ei laukaissut. Generaattori toimi kuten ennenkin. Roottorin eristykset oli mitattu joitain kuukausia ennen näitä mittauksia, ja niiden oli todettu olevan kunnossa. Tästä johtuen ainakin roottorin maasulun vaihtoehto voitiin sulkea pois.

Ongelmaa lähdettiin tutkimaan olettaen, että syyt johtuvat todennäköisesti roottorin suojauspiiriin kulkevista virtayliaalloista. Seuraavaksi selvitetään, mikä on todennäköinen virtayliaaltojen aiheuttaja (ks. 7).

## 7 ROOTTORIN MAASULKUVIRRRAN SELVITYS

### 7.1 Mittauslaitteisto ja menetelmät

Mittauksia tehtiin lukuisia, mikä onkin joskus tarpeellista, jotta vian aiheuttaja voidaan selvittää ja mittaustulosten virhemarginaalia pienentää. Mittaukset tehtiin generaattorin ollessa käynnissä, koska konetta ei voitu pysäyttää suuren sähkönkulutuksen takia. Mittauksilla pyrittiin selventämään ongelman luonnetta ja rajattiin ongelman aiheuttajia pois.

#### 7.1.1 Mittauslaitteisto

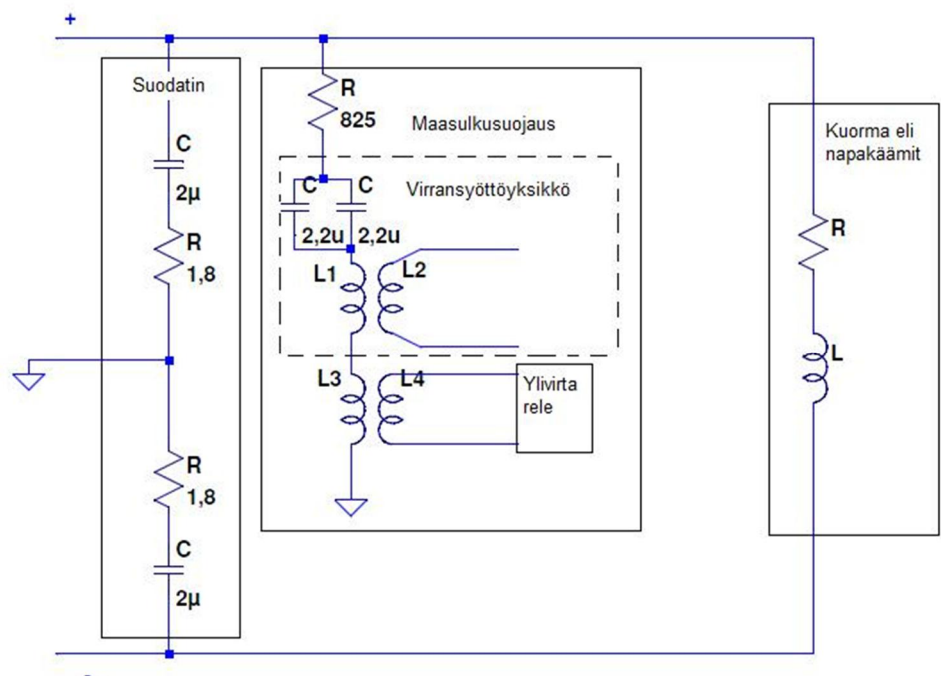
Yliaaltojen mittaamiseen kentällä käytettiin sähkönlaadun FLUKE 1735 Three-Phase Power Logger -mittaria, jolla näkee yliaaltojen taajuuden ja amplitudin sekä myös signaalin käyrämuodon. Pikaiseen virranmittaukseen käytettiin pihtimittaria, joka näyttää vain johdossa kulkevan virran tehollisarvon. Mittaukset simuloitiin myös hallituissa olosuhteissa ammattikorkeakoulun laboratoriossa.

Simuloinnissa mittauslaitteistona käytettiin seuraavia komponentteja:

- kolmivaiheinen täysinohjattu tyristorisilta
- oskilloskooppi tyristorisillan ohjauksulman mittaukseen
- säädettävät kondensaattorit 3 kpl
- vastukset 4 kpl
- teholähdevaunu
- induktanssi 200 mH.

### 7.1.2 Magnetointipiirin tasajännitepuolen mittaukset

Suurin osa mittauksista tehtiin tyristorisillan tasajännitepuolella, koska roottorin suojauspiiri sijaitsee juuri DC-puolella. DC-puolen mittauksiin kuului sillan antama jännite, roottorin maasulkusuojauspiirin mittaukset ja tasajännitteen suodatinpiirin mittaukset. Kaikki nämä kolme piiriä sijoittuvat tyristorisillan tasajännitepuolelle kuvan 16 (seur. s.) mukaisesti.



**Kuva 16. Tyristorisillan tasajännitepuolen yksinkertaistettu sijaiskytkentä**

Mittaukset aloitettiin roottorin maasulkusuojauspiiristä mittauspisteen 86 vierestä (liite 4). Suojauspiirin virta mitattiin ensin pihitimittarilla ja sen jälkeen

yliaaltomittarilla. Tämän jälkeen mitattiin myös suojauspiirin yli vaikuttavat yliaaltojännitteet. Kuvassa 16 suojauspiiri on virransyöttöyksikköön päin lähtevä haara. Suojauspiirimittausten jälkeen edettiin mittaamaan tyristorisillan tasajännitteen arvoja eli kuvassa 16 plus- ja miinusnavan ylitse olevia jännitteitä. Tasajännitteestä mitattiin yliaaltojen tehollisarvot ja tasajännitteen käyrämuoto. Suodatinpiiristä mitattiin yliaaltovirrat ja yliaaltojännitteet. Suodatinpiirin mittauksilla pyrittiin tarkistamaan kondensaattorin kunto, koska se voi vaikuttaa yliaaltovirtoihin kasvattaen niitä. Suodatinpiiri kytkeytyy tyristorisillan positiivisen ja negatiivisen välille (kuva 16.).

### 7.1.3 Kytkenän simulointi

Tyristorisillan tasajännitepuolen kytkentä (kuva 16) rakennettiin samanlaisiksi ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Mittaukset pyrittiin toistamaan samanlaisena kuin kentällä. Tässä tapauksessa tilannetta testattiin tyristorisillan ohjauskulman muutoksilla. Mittauksella pyrittiin selvittämään, kuinka hyvin kolmivaiheisen tyristorisillan tasasuuntauspuolen yliaaltoteoria vastaa käytäntöä. Mittauksissa käytettiin kytkentäkaaviota, joka on samanlainen kuin kuvassa 16, lukuunottamatta virransyöttöyksikön muuntajaa.

### 7.1.4 Syöttöverkon harmonisten mittaukset

Kolmivaiheinen tyristorisilta aiheuttaa syöttöverkkoon harmonisia yliaaltoja kaavan 3 mukaisesti. Mittauksilla tarkistettiin, vastaako teoria käytäntöä eli onko tilanne suuntaajalle ominainen. Jos tilanne oli suuntaajalle ominainen, syöttöverkko suhteessa suuntaajaan on normaali. Syöttöverkosta mitattiin virtayliaallot ja niiden suuruudet.

## 7.2 Mittaustulokset

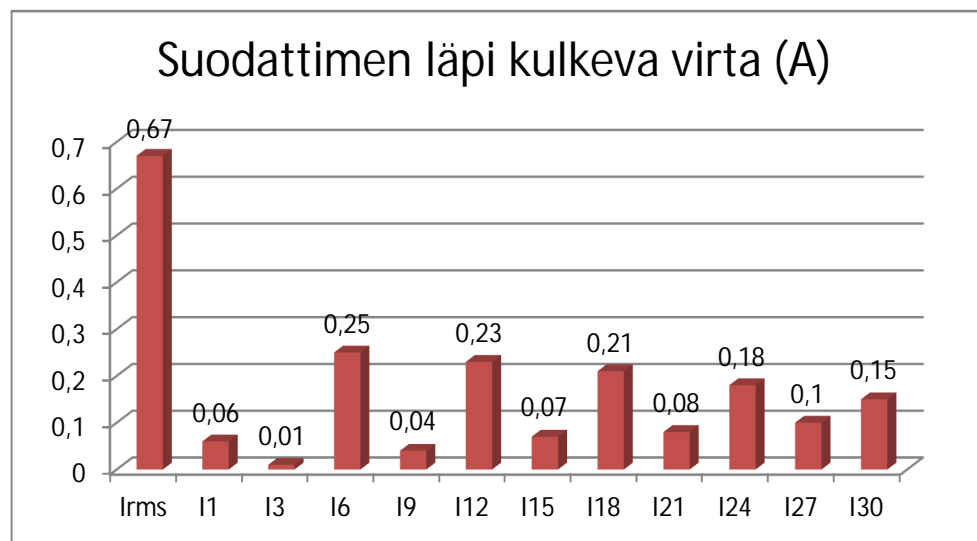
Tässä luvussa esitellään, minkälaisia mittaustuloksia saatiin. Lisäksi verrataan teoriaa ja käytäntöä toisiinsa ja esitetään tuloksista tehtyjä johtopäätöksiä. Tasajännitepuolen mittauksiin kuului suodatinpiiri, suojauspiiri ja sillan antama tasajännite. Yliaaltojännitteiden mittaustulosten muuttamisessa suhteellisarvoiksi on käytetty kaavaa 12. Alaviite  $n$  tarkoittaa yliaallon perustajuuden kerrannaistaajuutta.

$$U_{n\%} = \frac{U_{n\text{mitattu}}}{U_{dia}} * 100\% = \frac{U_{n\text{mitattu}}}{1,35 * U_{syöttö}} * 100\% \quad (12)$$



### 7.2.1 Tyristorisillan tasajännitteen suodatinpiirin mittaustulokset

Suodatinpiiristä mitattiin, minkälaisia harmonisia virtoja kulkee piirin läpi maahan. Lisäksi mitattiin vastuksen ja kondensaattorin yli olevat jännitteet, jotta voitiin varmistaa niiden kunto. Kuvassa 17 on esitetty mittaustulokset, jotka on saatu, kun on mitattu suodatinpiirin läpi kulkevat virtayliaallot. Kuvan yliaaltovirran I:n kerroin kokonaislukuna ilmaisee harmonisen virran perustaajuuden (50 Hz) kerrannaisen. Esim. I<sub>6</sub> on 6 x 50 Hz = 300 Hz. Kuvasta 17 nähdään, että tyristorisillan aiheuttamat pulssiluvun 6 kerrannaiset virtayliaallot ovat merkittävästi suurempia kuin muut.

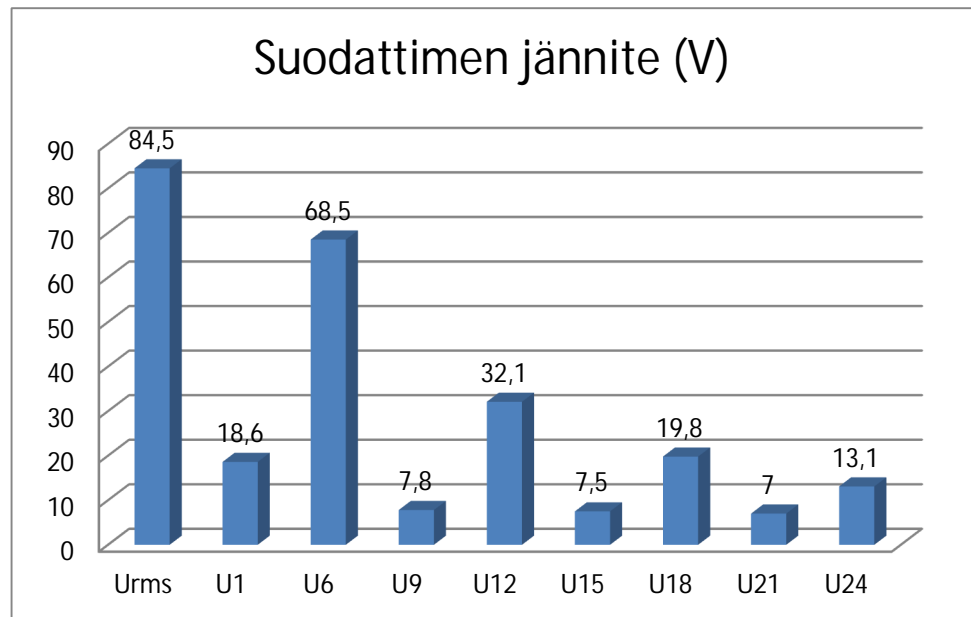


**Kuva 17. Suodattimen läpi kulkeva virta**

Seuraavaksi mitattiin suodattimen (RC-suodin) yli oleva jännite maahan nähden. Tulokset näkyvät kuvassa 18 (seur. s.). Kuvan 18 tulokset noudattavat samaa kuviota kuin kuvassa 17, eli pulssiluvun 6 kerrannaiset yliaallot ovat merkittävästi suurempia kuin muut. Koska nyt puhutaan tasajännitteen suodattimesta, niin tulokset ovat oikeat. Kolmivaiheinen tyristorisilta aiheuttaa pulssiluvun kerrannaisia jänniteylyliaaltoja, joiden suuruus riippuu tyristorin ohjauskulmasta.

Kun nyt tiedetään tietyn taajuisen jännitteen suuruus, voidaan tarkistaa, onko suodatinpiirin kondensaattori kunnossa. Vastuksen osuutta suodattimen jännitteissä ei tarvitse huomioida, koska sen arvo on paljon pienempi kuin kondensaattorin arvo. Kondensaattorin kunnontarkistus tehdään, määrittämällä sen kapasitanssi mittaustuloksista:

$$\frac{U_6}{I_6} = \frac{68,5V}{0,25A} = 274 \Omega = X_{c6} \quad (13)$$



**Kuva 18. Suodattimen yli oleva jännite**

Seuraavaksi lasketaan kondensaattorin kapasitanssi seuraavalla kaavalla:

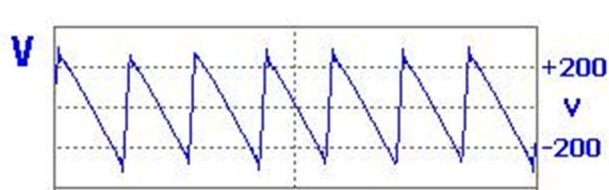
$$X_{c6} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_6 \cdot C} \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_6 \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 300 \text{ Hz} \cdot 274 \Omega} \approx 1,94 \mu\text{F}$$

Kun tätä tulosta verrataan kondensaattorin kyljestä saatuun arvoon  $2 \mu\text{F}$ , voidaan päätellä, että kondensaattori on kunnossa.

### 7.2.2 Tyristorisillan antama jännite

Tyristorisilta on se pääkomponentti, joka vaikuttaa magne-toinnin tasajännitteeseen ja sitä myötä magnetointivirtaan. Tasajännitettä muokataan tyristorien ohjaukulmaa säätämällä. Ohjaukulman vaikutus nähdään tasajännitteen käyrämuodossa ja siten yliaalloissa. Tutkittavan generaattorin tyristorisillasta mitattiin sen antama tasajännite plus- ja miinusnavan väliltä, plus- ja maanavan väliltä sekä tasajännitteen käyrämuoto. Kuvassa 19 on esitetty sillan antama tasajännitteen eli magnetointijännitteen käyrämuoto:



**Kuva 19. Magne-toinnin tasajännitteen käyrämuoto**

Niin sanotun tasajännitteen käyrälle saatiin yliaaltomittarilla tehollisarvoksi 162,1 V. Tasajännite ei ole kovin tasaista, kun tyristorien ohjauskulma menee suureksi (vrt. kuva 8). Tasajännitteen arvosta voidaan laskea kyseinen ohjauskulma kaavalla 2, kun tiedetään tyristorisillan syöttöverkon pääjännitteen suuruus. Pääjännitteen arvo 440 V saatiin pääkaaviosta. (kuva 19.)

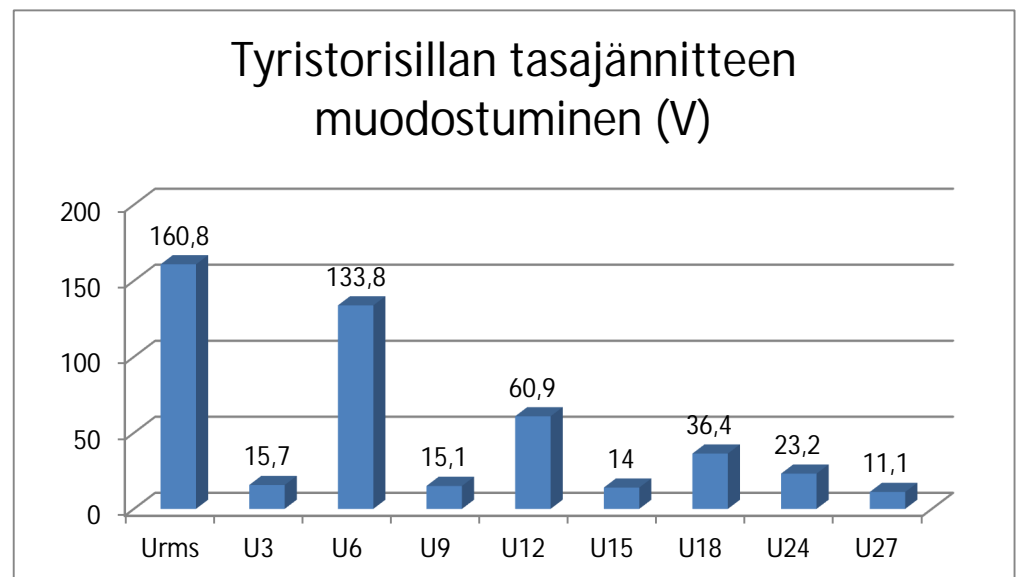
Seuraavassa on laskettu kuvan 19 mukaisen jännitekäyrän ohjauskulma:

$$U_{dia} = 1,35 * U * \cos \alpha$$

$$\rightarrow \cos \alpha = \frac{U_{dia}}{1,35 * U} = \frac{162,1V}{1,35 * 440V} = 0,272896$$

$$\rightarrow \alpha = \cos^{-1} 0,272896 \dots = 74,1634 \approx 74,16^\circ$$

Tämä ohjauskulman arvo on vertailun vuoksi otettu mukaan myös taulukkoihin 1 - 4. Tyristorien ohjauskulma on suhteellisen suuri. Tyristorisillan tasajännitteen tulokseksi saatiin kuvan 20 mukaiset tulokset. Tasajännite muodostuu useista eri taajuuksista. Samat taajuudet toistuvat, kuin aiemminkin esitetyissä tuloksissa. Merkittävät taajuudet ovat 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz, 1200 Hz jne. (kuva 20.)

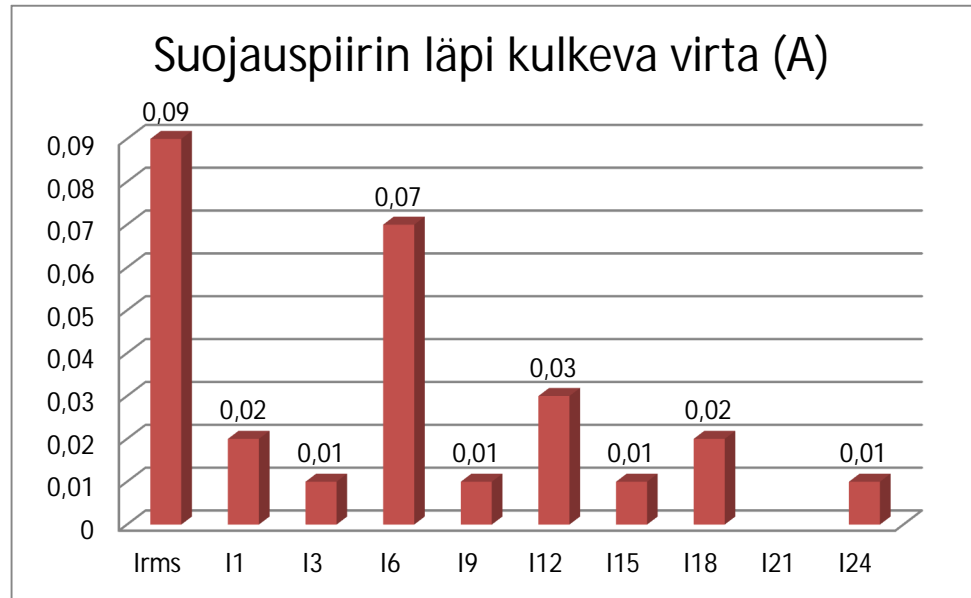


**Kuva 20. Tasajännitteen muodostuminen eri taajuisista vaihtojännitteistä**

### 7.2.3 Roottorin maasulkusuojausmittaustulokset

Roottorin maasulkusuojauspiiri kuuluu magnetoinnin tasajännitepiiriin. Suojauspiiriin voidaan ajatella olevan rinnankytketty suodatinpiiriin kanssa (kuva 16). Suojauspiiristä mitattiin sen läpi kulkeva virta ja suojauspiiriin yli oleva

jännite. Suojauspiirin läpi kulkevasta virrasta saatiin kuvan 21 (seur.s.) mukaiset tulokset. Kuvasta 21 havaitaan, mitkä harmoniset komponentit ovat merkittävässä osuudessa. Merkittäviä yliaaltoja ovat I6, I12 ja I18. Nämä ovat juuri kolmivaiheisen tyristorisillan pulssiluvun 6 määäämiä kerrannais-taajuuksia.



**Kuva 21. Roottorin maasulkusuojauspiiriin kulkevat virtayliaallot**

Kuvasta 21 nähdään myös, että suojauspiirin läpi kulkevan virran tehollisarvo 90 mA. Tämä arvo on liian suuri suhteessa releen asetteluarvoon, joka oli 40 mA. Ihmetystä aiheutti se, miksi rele ei lauennut vaikka virta oli suurempi kuin asetusarvo. Syy miksi rele ei lauennut, oli siinä, että releessä on kais-tanpäästösuodatin nimellistaajuudelle (50 Hz). Tämä tarkoittaa sitä, että rele huomaa ainoastaan nimellistaajuisen (50 Hz) virran kasvun. Rele ei lauennut, koska nimellistaajuinen virtakomponentti on 20 mA, ja siten releen aset-telun alittava virta.

#### 7.2.4 Simuloinnin tulokset

Simuloinnissa kytkentä rakennettiin vastaamaan oikeaa tilannetta. Simuloinnissa mitattiin tasajännitteen ja suojauspiiriin vaikuttavat yliaallot ohjauskulman funktiona. Suojauspiiriin jännitteet vaikuttavat oleellisesti suojauspiiriin kulkeviin virtoihin. Tasajännitteen tulokseksi saatiin taulukon 6 (seur. s.) mukaiset arvot. Taulukosta 6 nähdään, miten yliaaltojen amplitudit ja sen myötä tehollisarvot kasvavat, kun ohjauskulma kasvaa. Aiemmasta tiedetään myös, että tasajännitteen arvo laskee, kun ohjauskulma kasvaa. Tyristorisillan syöt-töjännite vaihteli välillä 50,6 - 52,7 V.

**Taulukko 6. Tyristorisillan tasajännitteen yliaallot ohjauskulman funktiona**

$\alpha$	U6	U12	U18	U24	U30
0	0	0	0	0	0
30	6,6	4,0	2,5	2,0	1,5
60	16,7	5,9	3,1	1,7	0,8
74	17,0	8,1	5,4	4,0	3,1

Taulukon 6 tuloksissa huomataan poikkeavuutta mitatuissa arvoissa, kun ohjauskulma on nolla-astetta. Tämä johtuu siitä, että yliaaltomittari ei kyennyt lukemaan tasasuuntaajan ohjauskulmalla 0° aiheuttamia yliaalloja.

Suojauspiirin jännitteistä tulokseksi saatiin taulukon 7 mukaiset arvot. Tuloksista voidaan päätellä, että tyristorisillan plus- ja miinusnavat ovat lähes symmetrisiä maan suhteen. Tästä tiedosta on hyötyä laskettaessa suojauspiirin oletettavia virtoja.

**Taulukko 7. Suojauspiiriin vaikuttavat jännitteen yliaallot.**

$\alpha$	Urms	U6	U12	U18	U24	U30
0	1,53	1,52	0,13	0,08	0,04	0,02
30	4,04	2,96	1,91	1,23	0,91	0,72
60	9,55	8	3,41	2,3	1,71	1,38
74	9,66	7,56	3,98	2,74	2,09	1,7

Taulukosta 7 voidaan laskea suhteelliset arvot, kun tiedetään tyristorisillan syöttävän verkon pääjännitteen suuruus. Suhteellisarvoiksi saatiin taulukon 8 mukaiset arvot. Suhteellisarvo saadaan, kun verrataan mitattua jännitteen arvoa ideaaliseen tasajännitteen arvoon (kaava 12). Simuloinnin suojauspiiriin vaikuttavien yliaaltojen suhteelliset osuudet tasajännitteen maksimi arvosta on esitetty taulukossa 8.

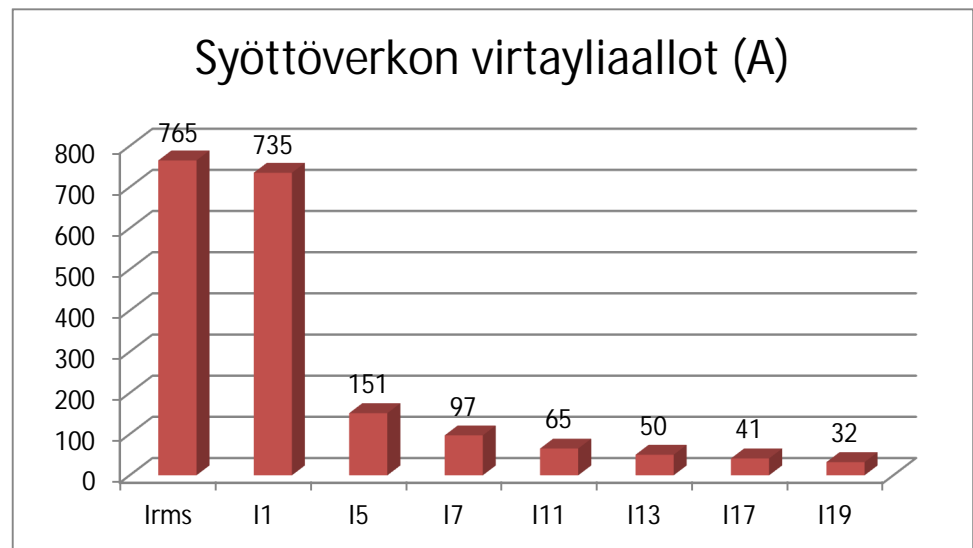
**Taulukko 8. Suojauspiiriin vaikuttavien yliaaltojen suhteelliset osuudet [%]**

$\alpha$	U6	U12	U18	U24	U30
0	2,23	0,19	0,12	0,06	0,03
30	4,28	2,76	1,78	1,32	1,04
60	11,35	4,84	3,26	2,43	1,96
74	10,63	5,59	3,85	2,94	2,39

### 7.2.5 Suuntaajan syöttöverkon yliaallot

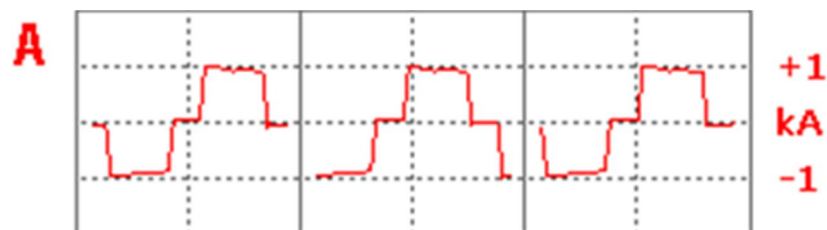
Tasasuuntaajan syöttöverkon yliaallot mitattiin, jotta nähtäisiin onko tilanne normaali suuntaajan syöttöverkon puolella. Tällä menetelmällä tarkistettiin, johtuvatko tasasuuntauspuolen yliaallot epänormaalista syöttöverkosta.

Syöttöverkon yliaallot näkyvät kuvassa 22. Kuvan 22 tuloksista voidaan päätellä, että tilanne on tasasuuntaajalle ominainen. Kolmivaiheinen tyristorisiltahan aiheuttaa verkkoon virtayliaalloja kaavan 3 mukaan. Lisäksi virtojen osuudet tehollisarvosta ovat suuntaajalle tyypilliset. Esim. 5.yliaallon osuus pitäisi olla 20 % tehollisarvosta, kun tässä tapauksessa se on 19,7 %. Tästä voidaan päätellä, että syöttöverkon tila on normaali tasasuuntaajan kannalta.



Kuva 22. Tasasuuntaajan syöttöverkon yliaallot

Suuntaajan ottamasta virrasta otettiin myös tehoanalysaattorin oskilloskopiilla kuva (kuva 23). Kun tätä kuvaa vertaa teoreettiseen suuntaajan ottamaan virtaan, voidaan todeta, että tilanne on suuntaajalle normaali.

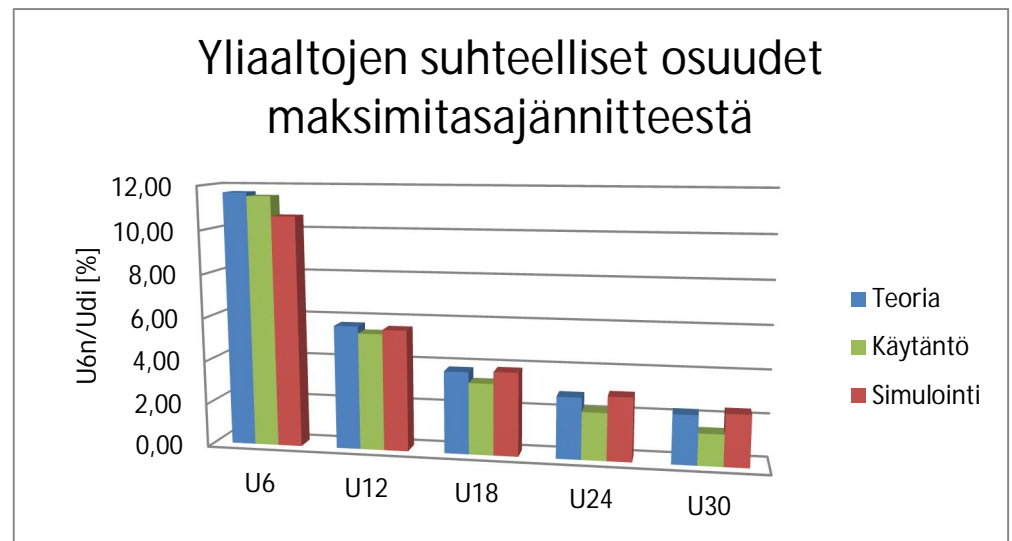


Kuva 23. Kolmivaiheisen tyristorisillan ottama virta

### 7.3 Tulosten vertailu ja maasulkusuojauspiiriin kulkevan häiriövirran laskeminen teoreettisesti

Nyt voidaan verrata maasulkusuojauspiiriin jännitteen tuloksia, kun tiedetään kolme eri tapausta. Tapaukset ovat simulointi, teoria ja generaattorin tulokset. Jotta tuloksia voidaan verrata, ne kannattaa muuttaa suhteellisarvoiksi. Se mihin suhteutetaan, on ideaalinen maksimitasajännite  $1,35 * U$ . Tulokseksi saadaan kuvan 24 mukaiset arvot. Kolmen eri tavan tulokset ovat

hyvin lähellä toisiaan. Voidaan todeta, että tasajännitteen yliaallot teoriassa vastaavat lähes todellista tilannetta käytännössä. Tuloksista voidaan laskea oletusarvo maasulkusuojaukseen kulkevalle häiriövirralle, jos tiedetään, mistä komponenteista reitti maahan koostuu. Oletetaan, että virransyöttöyksikön toisiokäämin ja releen induktanssit ovat niin pieniä, etteivät ne merkittävästi vaikuta tulokseen. Oletuksen perusteella tasajännitteen yliaalloilla on vain kaksi komponenttia sarjassa välillä plusnapa-maa. Komponentit ovat 2 rinnakkain kytkettyä tehovastusta, jotka on kuvassa 16 korvattu yhdellä vastuksella sekä 2 rinnakkain kytkettyä kondensaattoria.



**Kuva 24. Yliaaltojännitteiden suhteelliset osuudet eri tilanteissa**

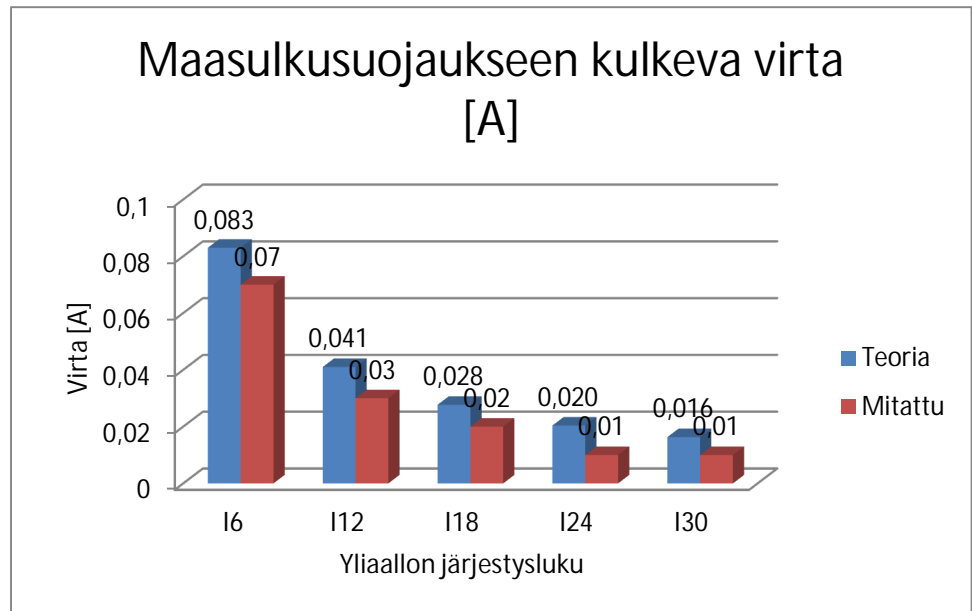
Kun tiedetään komponenttien yli vaikuttava jännite ja komponenttien vastusarvot sekä kapasitanssit, maasulkupiirissä kulkeva virta voidaan laskea teoreettisesti. Kaavoina yliaaltovirran laskennassa käytetään:

$$I_{6nmaa} = \frac{U_{6n}}{Z_{6n}} = \frac{U_{6n}}{\sqrt{X_{c6n}^2 + R^2}} \quad (15)$$

$$,jossa X_{c6n} = \frac{1}{2\pi f * 6 * n * C} \quad (16)$$

Kondensaattoreiden arvoiksi on ilmoitettu 2,2  $\mu\text{F}$ . Kondensaattorit rinnankytkennässä voidaan summata yhteen, joten yhteiseksi kapasitanssiksi tulee 4,4  $\mu\text{F}$ . Vastusten yhteiseksi resistanssiksi on ilmoitettu 825  $\Omega$ . Tämän jälkeen maasulkuvirtojen yliaallot voidaan laskea kaavaa 15 käyttämällä. Tulokseksi saadaan kuvan 25 (seur. s.) mukaiset tulokset, kun ohjauskulma on sama kuin generaattorin magnetointijärjestelmässä sillä hetkellä (74,16°).

Kuvaan on vertailun vuoksi piirretty myös maasulkusuojauksessa oikeasti kulkeva virta, joka saatiin kuvasta 21. Kuvasta 25 nähdään, että teoria ja käytäntö ovat hyvin lähellä toisiaan. Ne saattavat olla jopa vielä lähempänä, koska mittari pystyi mittaamaan ainoastaan 10 mA:n tarkkuudella.



Kuva 25. Roottorin maasulkusuojaukseen kulkeva virta (teoria vs. mitattu)

#### 7.4 Mittaustulospäätelmät

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että roottoriin kulkevat maasulkuvirrat johtuvat magnetointilaitteiston tasajännitelähteestä. Tässä tapauksessa tasajännitelähteenä oli kolmivaiheinen tyristorisilta. Useat eri mittaukset (simulointi, teoria ja käytäntö) osoittavat, että kolmivaiheinen tyristorisilta tuottaa pulssiluvun 6 kerrannaisia jänniteyliaaltoja tasasuuntauspuolelle. Näiden yliaaltojen amplitudit ja sen myötä tehollisarvot riippuvat oleellisesti tyristorien ohjauskulmasta. Jänniteyliaallot aiheuttavat vastuksissa, kondensaattoreissa ja käämeissä samantaajuisia virtoja, joiden suuruus riippuu jänniteyliaallon amplitudista ja piirin impedanssista.

## 8 KORJausehdotukset

Korjausehdotukseksi roottorin maasulkusuojauksen harmonisille yliaaltovirroille voidaan esittää kolme eri vaihtoehtoa.



Uudet roottorin maasulkusuojauksen vaihtoehdot ovat paremmuusjärjestyksessä:

1. Uusi magnetointijärjestelmä ja uusi roottorin suojaus 1...3 Hz menetelmällä
2. Uusi roottorin suojaus 1...3 Hz menetelmällä
3. Uusi kehittyneempi virransyöttöyksikkö

Paras vaihtoehto on kokonaan uusi harjallinen magnetointijärjestelmä ja uusi roottorin maasulkusuojaus 1...3 Hz menetelmällä, koska vanha magnetointijärjestelmä on iäkäs 23v. Magnetointijärjestelmien keskimääräinen käyttöikä on 20v. Tämä vaihtoehto lisää luotettavuutta ja toimintavarmuutta ja vähentää huollon tarpeita. Lisäksi uusi kanttiaaltainen roottorin maasulkusuojaus poistaa yliaaltojen aiheuttamat häiriöt suojauspiiristä. Uusia magnetointijärjestelmiä toimittaa esim. ABB (Unitrol).

Jos halutaan kuitenkin nopeampi ja halvempi pikaratkaisu ongelmaan, silloin voidaan hankkia uusi roottorin maasulkusuojaus 1...3 Hz -menetelmällä. Tämä suojaus, kuten aiemmin on esitetty, poistaa maakapasitanssin ja magnetointilaitteiston aiheuttamien häiriöiden vaikutukset suojaustoimintaan. Kanttiaaltoon perustuvia roottorin maasulkusuojauksia toimittaa esim. Siemens.

Jos halutaan hätäratkaisu uutta järjestelmää odotellessa, silloin voidaan hankkia pelkästään uusi kehittyneempi virransyöttöyksikkö REK510 esim. ABB:ltä. Tuoteselosteessa luvataan mm. parempi yliaaltojen suodatus kuin aiemmissa versioissa, kuten SPMK 1C40, joka nykyisin on käytössä. Käyttäjkokemukset ovat vahvistaneet tämän virransyöttöyksikön ainakin vähentävän yliaaltojen vaikutusta roottorin maasulkusuojauksen toimintaan.

Suosittelavin vaihtoehto on kokonaan uusi magnetointijärjestelmä ja uusi roottorin maasulkusuojaus. Uudet järjestelmät lisäävät toimintavarmuutta ja vähentävät huollon tarvetta.

## 9 YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin turbogeneraattoriin, magnetointijärjestelmään ja selvitetiin, mistä roottorin maasulkuvirta aiheutuu vaikka roottorikämmien eristykset

olisivat kunnossa. Voidaan sanoa, että maasulkusuojauksen yliaaltovirrat johtuvat magnetointilaitteiston aiheuttamista jänniteyliaalloista. Jänniteyliaaltojen suuruus riippuu tyristorisillan ohjauskulmasta.

Nämä jänniteyliaallot ovat aiheuttaneet maasulkusuojauspiirin impedanssin kanssa virtayliaaltoja. Erityisessä merkityksessä virtojen syntyyn on ollut virransyöttöyksikön kondensaattorit. Nämä kondensaattorit ovat arvoltaan suuremmat kuin suodatinpiirin kondensaattorit, jonka takia suojauspiiri vetää puoleensa suuritaajuisia virtoja. Voitaneen sanoa, että magnetointilaitteiston aiheuttamat jänniteyliaallot on aliarvioitu suunniteltaessa ja valittaessa nykyistä virransyöttöön perustuvaa roottorin maasulkusuojausta.

Kun toisiin aiemmin tehtyihin tutkimustuloksiin lisätään vielä tämän työn simuloinnin, teorian ja käytännön tulosten samankaltaisuudet, voidaan todeta, että tulokset ovat erittäin hyviä ja luotettavia. Tuloksia voidaankin käyttää aina hyväksi, kun suunnitellaan uutta magnetointijärjestelmää generaattorille, joka käyttää kolmivaiheista tyristorisiltaa magnetointijännitteen muodostamiseen.

Korjausehdotuksena piiriin tulevaksi moitteettomaksi toiminnaksi esitettiin kolme erilaista ratkaisua, jotka olennaisesti parantavat piirin toimintaa. Korjausehdotukset ovat magnetointijärjestelmän ja sen suojauksen uusiminen, roottorin suojaus 1...3 Hz -menetelmällä ja uusi virransyöttöyksikkö REK510. Näistä suositeltavin vaihtoehto on laajin korjausvaihtoehto eli kokonaan uusi magnetointijärjestelmä ja sen suojaus.

Jatkoa tälle tutkimukselle voi olla muiden kuin kuuden kerrannaisten yliaaltojen selvittäminen. Siinä täytyy todennäköisesti katsoa toiseen suuntaan eli staattorista roottoriin siirtyvät tapaukset.

## LÄHTEET

- [1] <http://www.energia.fi/fi/kaukolampo/yhteistuotanto>
- [2] <http://www.vantaanenergia.fi>
- [3] Aura, Lauri – Tonteri, Antti, *Sähkömiehen käsikirja 2*. Porvoo: WSOY. 1986.
- [4] Ginet, C – Joho, R, *IEEE The Turbogenerator – Continuous Engineering challenge*.
- [5] Pyrhönen, Juha. *Design of Rotating Electrical Machines*. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2006.
- [6] Boldea, Ion, *Synchronous Generators*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press. 2006
- [7] Ijäs, Jari. *Generaattorit*. Luentomoniste. Helsinki: Metropolia AMK. 2010
- [8] Pyrhönen, Juha. *Sähkökäytöt*. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2006.
- [9] Zawoysky, Ronald – Tomroos, Karl, *GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options*. Saatavissa: [http://www.ge-energy.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/generators.htm](http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/generators.htm)
- [10] Aura, Lauri – Tonteri, Antti, *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. Porvoo: WSOY. 1996.
- [11] Mohan, Ned – Undeland, Tore M, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. USA: John Wiley & Sons. 2003
- [12] ABB-TTT, *Luku 16: Tehoelektroniikka*. Saatavissa: [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/16\\_Tehoelektroniikka.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/16_Tehoelektroniikka.pdf)
- [13] Niiranen, Jouko, *Sähkösäätötekniikan digitaalinen ohjaus*. Helsinki: Otatieto. 1999
- [14] Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa, *Sähköverkot 1*. Helsinki: Otatieto. 2011
- [15] Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa, *Sähköverkot 2*. Helsinki: Otatieto. 2011
- [16] Belan, Anton – Eleschova, Zaneta – Janisek, Frantisek, *IEEE The Cause of False Operating of the Rotor Ground Fault Protection Based on the AC Injection Method*. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4524422>
- [17] Anderson, P.M, *Power System Protection*. New York, USA: IEEE Press, McGraw-Hill. 1999
- [18] Mörsky, Jorma, *Rele suojaustekniikka*. Hämeenlinna: Otatieto. 1992

- [19] Häsä, Sanna, *Generaattorisuojauksen uusinta*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo. 2009
- [20] Siemens AG, *Siprotec Multifunction Machine Protection 7UM62 V.4.61 Manual*. Saatavissa:  
[http://siemens.siprotec.de/download\\_neu/devices/7UM62x/Manual/7UM62xx\\_Manual\\_A5\\_V046101\\_EN.pdf](http://siemens.siprotec.de/download_neu/devices/7UM62x/Manual/7UM62xx_Manual_A5_V046101_EN.pdf).

## FOURIER'IN VAKION $a_n$ MÄÄRITTÄMINEN

Lähtötilanne on seuraava, funktio on  $\sin(t)$ :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sin t * \cos(n\omega t) dt$$

Muokataan integraalin sisällä olevaa kaavaa trigonometrian kaavalla seuraavasti:

$$\sin \alpha * \cos \beta = \frac{1}{2} * [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)]$$

Josta seuraa:

$$\sin t * \cos n\omega t = \frac{1}{2} * [\sin(t + n\omega t) + \sin(t - n\omega t)]$$

Kun yllä oleva kaava sijoitetaan integraaliin, niin saadaan kahden integraalin summa seuraavasti:

$$a_n = \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{1}{2} \sin(t + n\omega t) dt + \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{1}{2} \sin(t - n\omega t) dt$$

Valitaan sijoitusmenetelmä funktion laskemiseksi, josta seuraa:

$$\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{1}{2} \sin(t + n\omega t) dt$$

$$\rightarrow v = t + n\omega t \rightarrow \frac{dv}{dt} = 1 + n\omega \rightarrow dt = \frac{dv}{n\omega + 1}$$

Kun sijoitetaan nämä tiedot funktioon, täytyy muuttaa myös integraalin rajat, josta päästään seuraavaan integraaliin:

$$\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha+n\omega(\frac{\pi}{3}+\alpha)}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha+n\omega(\frac{2\pi}{3}+\alpha)} \frac{1}{2} \sin(v) * \frac{1}{n\omega + 1} dv =$$

$$\left[ -\frac{\cos v}{2(n\omega + 1)} \right]_{\frac{\pi}{3}+\alpha+n\omega(\frac{\pi}{3}+\alpha)}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha+n\omega(\frac{2\pi}{3}+\alpha)}$$

$$-\frac{\cos\left[\frac{2\pi}{3} + \alpha + 6n\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)\right]}{2(6n+1)} + \frac{\cos\left[\frac{\pi}{3} + \alpha + 6n\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)\right]}{2(6n+1)} =$$

$$-\frac{\cos\left[\alpha(6n+1) + 4n\pi + \frac{2\pi}{3}\right]}{2(6n+1)} + \frac{\cos\left[\alpha(6n+1) + 2n\pi + \frac{\pi}{3}\right]}{2(6n+1)} =$$

tämän jälkeen voidaan poistaa kaavasta  $4n\pi$  ja  $2n\pi$ , josta seuraa:

$$-\frac{\cos[\alpha(6n+1) + 2\pi/3]}{2(6n+1)} + \frac{\cos[\alpha(6n+1) + \pi/3]}{2(6n+1)} =$$

$$-\frac{\cos\left[\alpha(6n+1) + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{3}\right]}{2(6n+1)} =$$

$$\frac{\cos[\alpha(6n+1)]}{2(6n+1)}$$

Puolet on ratkaistu tähän mennessä. Seuraavaksi ratkaistaan summan jälkimmäinen osa soveltaen jo käytettyä sijoitusmenetelmää:

$$\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \frac{1}{2} \sin(t - 6nt) dt =$$

$$\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha - 6n\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha - 6n\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)} \frac{1}{2} \sin(v) * \frac{1}{-(6n-1)} dv =$$

$$\left[ \frac{\cos v}{2(6n-1)} \right]_{\frac{\pi}{3} + \alpha - 6n\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha - 6n\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)} =$$

$$\frac{\cos\left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - \frac{6n2\pi}{3} - 6n\alpha\right]}{2(6n-1)} - \frac{\cos\left[\frac{\pi}{3} + \alpha - \frac{6n\pi}{3} - 6n\alpha\right]}{2(6n-1)} =$$

$$\frac{\cos\left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - 6n\alpha\right]}{2(6n-1)} - \frac{\cos\left[\frac{\pi}{3} + \alpha - 6n\alpha\right]}{2(6n-1)} =$$

$$\frac{\cos[-\alpha(6n-1) + 2\pi/3]}{2(6n-1)} - \frac{\cos[-\alpha(6n-1) + \pi/3]}{2(6n-1)} =$$

$$\frac{\cos\left[-\alpha(6n-1) + \frac{2\pi}{3} + \pi/3\right]}{2(6n-1)} = \frac{\cos[\alpha(6n-1) + \pi]}{2(6n-1)} =$$

$$-\frac{\cos[\alpha(6n-1)]}{2(6n-1)}$$

Kun nyt tiedetään summan molemmat osat, niin tulokseksi saadaan seuraavaa:

$$a_n = \frac{2}{T} \left( \frac{\cos[\alpha(6n+1)]}{2(6n+1)} - \frac{\cos[\alpha(6n-1)]}{2(6n-1)} \right) =$$

$$\frac{6}{\pi} \left( \frac{\cos[6n\alpha + \alpha]}{2(6n+1)} - \frac{\cos[6n\alpha - \alpha]}{2(6n-1)} \right) =$$

$$\frac{3\cos[6n\alpha + \alpha]}{\pi(6n+1)} - \frac{3\cos[6n\alpha - \alpha]}{\pi(6n-1)} = \mathbf{a_n} \quad (8)$$

Vakion  $b_n$  johtaminen onnistuu samalla tavalla, joten se voitaneen jättää esittämättä.

## G2:N TEKNISET TIEDOT

## STRÖMBERG INDUSTRY

## Tekniset tiedot

## Koneen tekniset tiedot

## Yleiset arvot:

Valmistusnumero	:	HM 300 520
Koneen tyyppi	:	W 18L - 068 LLT
Napaluku	:	2
Vaiheluku	:	3
Staattorikäämin kytkentä	:	Stern
Staattorin eristysluokka	:	F
Roottorin eristysluokka	:	F
Suunnittelunormi	:	IEC
Lämpenemisluokka	:	B

## Suunnittelu-arvot:

Nimellinen näennäisteho	:	100	MVA
Nimellinen pätöteho	:	80,0	MW
Nimellinen tehokerroin cos phi	:	0,8	
Nimellisjännite (ketjutettu)	:	10,5	KV
Jännitealue	:	+5/-7,5	%
Nimellisvirta (vaihetta kohti)	:	5499	A
Nimellistaajuus	:	50	Hz
Nimelliskierrosnopeus	:	3000	min <sup>-1</sup>
Kylmäilman lämpötila	:	40	°C
Asennuskorkeus	:	20	m NN:n yläp.



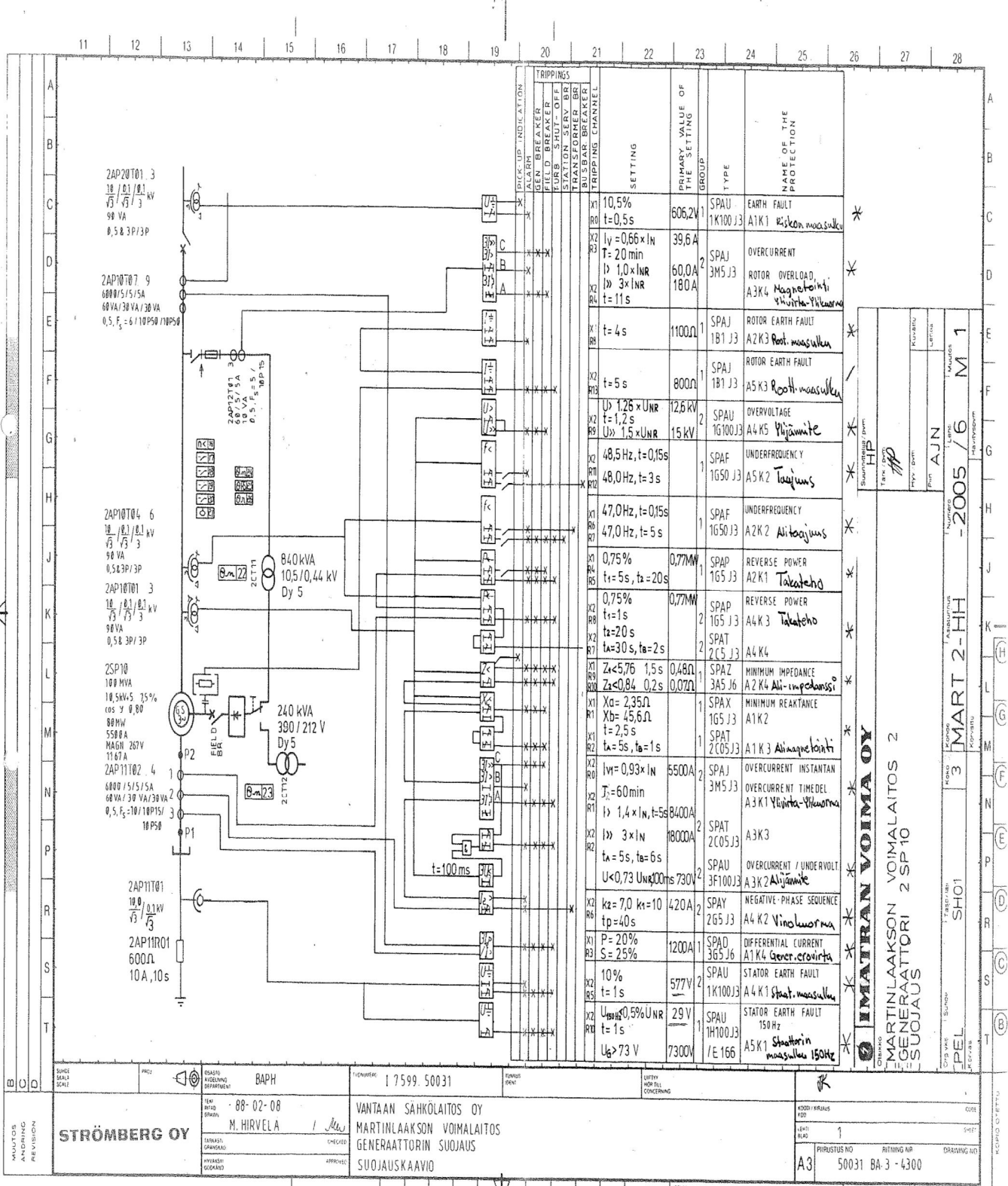
## STRÖMBERG INDUSTRY

## Tekniset tiedot

## M a g n e t o i n t i:

Tyhjäkäynnin magnetointijännite	:	$U_{F0}$	=	75	V
Tyhjäkäynnin magnetointivirta	:	$I_{F0}$	=	433	A
Nimellinen magnetointijännite	:	$U_{FN}$	=	263	V
Nimellinen magnetointivirta	:	$I_{FN}$	=	1167	A

SUOJAUSKAAVIO



STRÖMBERG OY

88-02-08  
M. HIRVELA

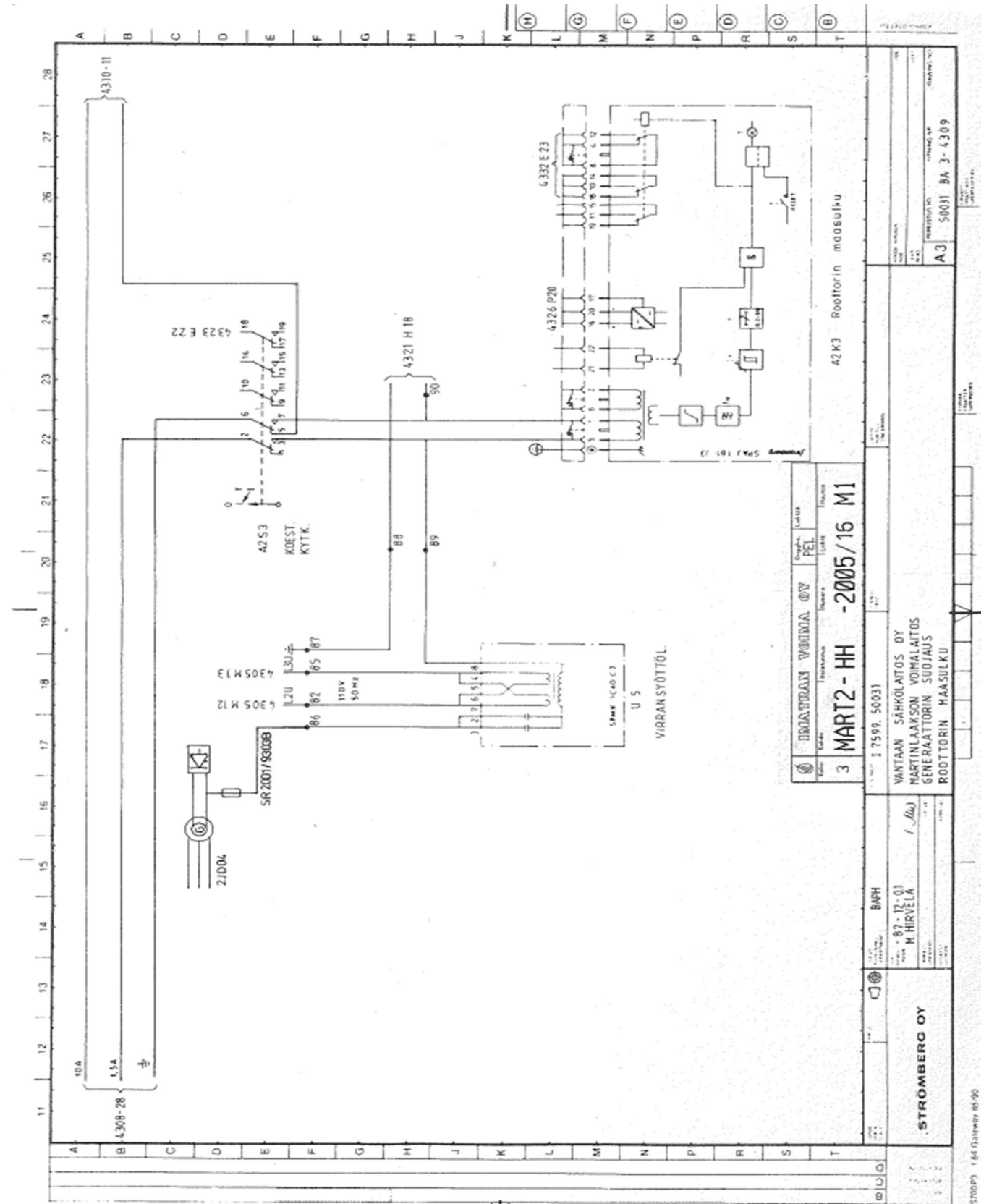
VANTAAN SÄHKÖLAITOS OY  
MARTINLAAKSON VOIMALAITOS  
GENERAATTORIN SUOJAUS  
SUOJAUSKAAVIO

A3  
PIIRUSTUS NO 50031 BA-3 - 4300

IMATRAN VOIMA OY  
MARTINLAAKSON VOIMALAITOS 2  
GENERAATTORIN SUOJAUS

REVISIONS  
NO. DATE BY  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130  
131  
132  
133  
134  
135  
136  
137  
138  
139  
140  
141  
142  
143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174  
175  
176  
177  
178  
179  
180  
181  
182  
183  
184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192  
193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338  
339  
340  
341  
342  
343  
344  
345  
346  
347  
348  
349  
350  
351  
352  
353  
354  
355  
356  
357  
358  
359  
360  
361  
362  
363  
364  
365  
366  
367  
368  
369  
370  
371  
372  
373  
374  
375  
376  
377  
378  
379  
380  
381  
382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428  
429  
430  
431  
432  
433  
434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444  
445  
446  
447  
448  
449  
450  
451  
452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511  
512  
513  
514  
515  
516  
517  
518  
519  
520  
521  
522  
523  
524  
525  
526  
527  
528  
529  
530  
531  
532  
533  
534  
535  
536  
537  
538  
539  
540  
541  
542  
543  
544  
545  
546  
547  
548  
549  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
560  
561  
562  
563  
564  
565  
566  
567  
568  
569  
570  
571  
572  
573  
574  
575  
576  
577  
578  
579  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637  
638  
639  
640  
641  
642  
643  
644  
645  
646  
647  
648  
649  
650  
651  
652  
653  
654  
655  
656  
657  
658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
770  
771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783  
784  
785  
786  
787  
788  
789  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
850  
851  
852  
853  
854  
855  
856  
857  
858  
859  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
900  
901  
902  
903  
904  
905  
906  
907  
908  
909  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
950  
951  
952  
953  
954  
955  
956  
957  
958  
959  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
970  
971  
972  
973  
974  
975  
976  
977  
978  
979  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
1000

ROOTTORIN MAASULKUSUOJAUS A2K3 JA VIRRANSYÖTTÖYKSIKÖ



Yhtiö	Yhteyshenkilö	Projekti	Luokka
3	MARTTAN VAINIO OY	PEL	PEL
3 MART2-HH -2005/16 M1			
1 7599 50031			
VANTAAN SÄHKÖLÄITÖS OY MARTTILAJOKSON VOIMALAITOS GENERAATTORIN SUOJAUS ROOTTORIN MAASULKU			

Yhtiö	Projekti	Luokka
STRÖMBERG OY	BAPH	
87-12-03 M. HIRVELÄ		
A3 50031 BA 3-4309		