

Tutkintotyö

Ismo Pitkänen

**EPÄTAHTIGENERAATTORI OSANA JÄTEVEDENPUHDISTAMON
SÄHKÖJÄRJESTELMÄÄ**

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2007

Diplomi-insinööri Lauri Hietalahti
Teoteam Oy, valvojana insinööri Reijo Ruohola

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikka

Pitkänen, Ismo

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Huhtikuu 2007

Hakusanat

Epätahtigeneraattori osana jätevedenpuhdistamon sähköjärjestelmää
57 sivua + 13 liitesivua

Diplomi-insinööri Lauri Hietalahti

Teoteam Oy, valvojana insinööri Reijo Ruohola

Epätahtigeneraattori, oikosulkugeneraattori, pienvesivoimala

TIIVISTELMÄ

Epätahtigeneraattori on varsin yleinen generaattoriratkaisu pienvesivoimalassa. Orimattilan Vääräkosken jätevedenpuhdistamolla on vuodesta 1983 käytetty epätahtigeneraattoreita laitoksen läheisessä pienvesivoimalassa. Vuosien saatossa laitoksessa on kuitenkin ollut ongelmia sähkölaitteiden rikkoutumisien kanssa. Tässä työssä on tarkoituksena ollut selvittää, mikä on aiheuttanut ongelmia laitoksen sähköjärjestelmässä ja etsiä parannusehdotuksia, joilla ongelmat saataisiin ratkaistua.

Työssä on suoritettu sähköverkon laatuanalysointimittauksia, joilla on pyritty selvittämään sähköverkon toimintaa eri kytkentätilanteissa. Lisäksi sähköverkosta rakennettiin OrCAD PSpice -simulointimalli, jolla tutkittiin jakeluverkon jälleenkytkentöjen vaikutusta laitoksen sähköverkon toimintaan. Tämän lisäksi Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa tutkittiin epätahtigeneraattorin käyttäytymistä eri kompensointitasoilla.

Tutkimusten päätyttyä selvisi, että generaattoreita suojaava releistys ei toiminnaltaan ole enää ajan tasalla, minkä vuoksi sähkökatkon sattuessa laitos voi jäädä saarekkeelle. Tällaisessa tilanteessa voi syntyä esimerkiksi transienttiylijännite jälleenkytkennän tapahtuessa, jolloin sähkölaitteet saattavat häiriintyä. Tällöin lisäksi kuormitusten poiskytketyymisissä ja kompensointitehon muutoksissa saattaa syntyä vaarallisia ylijännitteitä. Mittausten lisäksi huomattiin esimerkiksi pääkeskuksessa kupariliitosten tummentumista, joka todennäköisesti johtuu laitoksesta vapautuvien ammoniakista ja rikkihaposta. Näillä on suuri merkitys esimerkiksi taajuusmuuttajien toimintaan.

Parannusehdotuksina suositellaan generaattoreita suojaavan taajuus- ja jännitereleistyksen uusimista, ettei epätoivottavaa saarekekäyttötilannetta pääsisi tapahtumaan. Lisäksi tulevaisuudessa kannattaa kiinnittää huomiota laitteiden kotelointiin, jotta ilmasto ei pääsisi vaikuttamaan laitteiden toimintaan. Vääräkoskella on myös mietitty voimalan uusimista kestopagneettigeneraattoreilla. On erittäin suositeltavaa tutkia tätä vaihtoehtoa tarkemmin ja tehdä aiheesta esimerkiksi kannattavuuslaskelmia.

TAMPERE POLYTECHNIC

Electrical Engineering

Electrical Power Engineering

Pitkänen, Ismo

Asynchronous generator as a part of sewage treatment plant's electric system

Engineering Thesis

57 pages, 13 appendices

Thesis Supervisor

Lauri Hietalahti (MSc)

Commissioning Company

Teoteam Oy. Supervisor: Reijo Ruohola (BSc)

April 2007

Keywords

asynchronous generator, induction generator, hydroelectric power plant

ABSTRACT

Asynchronous generators are quite commonly used in small hydroelectric power plants. Those are used since 1983 in Vääräkoski sewage treatment plant in Orimattila. However, during years there has been a problem with several electrical devices which have broken probably because of overvoltage. In this thesis the purpose is to examine the cause for these problems. During the work of the thesis there has been a power quality analysis measurements of the network, OrCAD Pspice modelling, and asynchronous generator tests in Tampere Polytechnic's electric laboratory. After studies the conclusion was that generator protection relays does not correspond the today's standards. During distribution network's power failure it is possible that the facility will run as an isolated network. In this situation, for example transient overvoltage can be found when electrical devices can be disturbed. In addition to measurements, there were found dark copper connections, for example in main switchboard. The cause for this is probably sulphuric acid and ammonia, which are vaporized to air from the facility. As proposal for improvement is recommended to renew the frequency and voltage relays for the generator protection to avoid an isolated network situation. Also in future it is important to pay attention to encapsulation of the electrical devices to avoid the problems of the climate. In Vääräkoski, there has been a discussion if the asynchronous generators would be replaced to permanent magnet generators. Hence it could be recommended if someone studied this matter for example in a way of profitability calculation.

ALKUSANAT

Tämä tutkintotyö on tehty opinnäytteeksi Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan osastolle. Tutkintotyö käsitteli Orimattilan Vääräkosken jätevedenpuhdistamon sähköverkon ongelmaa, jota tutkin syksystä 2006 lähtien. Työ oli erittäin mielenkiintoinen, vaiherikas ja sen tekeminen oli mielekästä.

Haluan esittää lämpimät kiitokseni ohjaajalleni Lauri Hietalahdelle ja työn teettäjä Reijo Ruoholalle. Lisäksi haluan kiittää Nokian Capacitorsia avustuksista mittauksissa ja Kymenlaakson Sähkö Oy:tä hyvin sujuneesta yhteistyöstä. Kiitokset myös puhdistamon hoitaja Markku Ahlstedtille joustavista aikatauluista, kavereilleni avustuksista laboratoriomittauksissa sekä avopuolisolleni Johannalle kannustuksesta työn aikana.

Tampereella 18. huhtikuuta 2007

Ismo Pitkänen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

1 JOHDANTO	7
1.1 Orimattilan Vesi Oy	8
1.2 Teoteam Oy	8
2 LAITOKSEN SÄHKÖVERKKO	9
2.1 Vesivoimalaitos	10
2.1.1 Voimalan yleinen toimintaperiaate	10
2.1.2 Vesivoimageneraattorit	11
2.1.3 Voimalaitoksen teoreettinen teho ja vuotuiset energiasäästöt	11
2.2 Jakeluverkko	12
2.3 Pääkiskosto ja jakokeskukset	13
2.4 Loistehon kompensointi /2/	13
2.4.1 Estokelaparisto	14
2.4.2 Loistehonsäädin	14
2.4.3 Laitoksen kompensointilaitteisto	15
2.5 Sähkömoottorikäytöt	15
2.5.1 Suorakäytöt	15
2.5.2 Taajuusmuuttajakäytöt	15
2.6 UPS-laitteisto	16
2.7 Ohjelmoitavat logiikat	16
3 TEOREETTINEN TARKASTELU JA SIMULOINNIT	17
3.1 Epätahtikoneen toiminta generaattorina /1; 5/	17
3.1.1 Generaattoritoiminnan mallintaminen /5; 25/	18
3.1.2 Toiminta jakeluverkkoon liitettynä	21
3.1.3 Toiminta saarekekäytössä	21
3.1.4 Simulointimallin rakentaminen	22
3.2 Muuntajan mallintaminen	24
3.3 Loistehon kompensointi	27
3.4 Pääkiskosto ja jakokeskukset	28
3.4.1 Mittaukset	28
3.4.2 Mallintaminen	29
3.5 Valmis simulointimalli ja simulointitulokset	30
3.5.1 Jälleenkytkentätilanteen mallinnus	30
3.5.2 Kompensointitehon vaikutus	32
4 MITTAUKSET	34
4.1 Verkkoanalysointi	34
4.1.1 Mittalaitteiden spesifikaatiot	34
4.1.2 Laitoksen maadoituksen mittaus	35
4.1.3 Jakeluverkon poiskytkennät	36
4.2 Laboratoriokoe oikosulkukoneella	43
4.2.1 Sijaiskytkennän parametrien määrittäminen	43
4.2.2 Magnetoitikkondensaattoreiden mitoitus	44
4.2.3 Generaattorin herääminen saarekekäytössä	45
4.2.4 Jakeluverkon poiskytkentä	46
4.2.5 Epäsymmetria- ja resonanssitilanteet	48
4.2.6 Jakeluverkon jälleenkytkentä	49

5 TULOSTEN TARKASTELU JA ARVIOINTI	51
5.1 Saarekekäytön vaikutukset	51
5.2 Tuuletuksen vaikutukset	52
5.3 Tulosten luotettavuuden arviointi	53
6 YHTEENVETO JA RATKAISUEHDOTUKSET	54
6.1 Kestomagneettigeneraattorit	54
6.2 Releistyksen uusiminen	55
LÄHDELUETTELO	56

1 JOHDANTO

Epätahtigeneraattori on varsin yleinen pienvesivoimalassa, koska se on yksinkertainen rakenteeltaan, varmatoiminen ja lisäksi hankintahinnaltaan edullinen voimalaitoksissa yleisesti käytettyyn tahtigeneraattoriin verrattaessa. Jakeluverkkoon liitetyn epätahtigeneraattorin taajuus ja jännite pysyvät lisäksi oikean suuruisina automaattisesti, kunhan varmistetaan generaattorille riittävä magnetoinnin syöttö. /5, s. 31./

Orimattilan Vesi Oy:n Vääräkosken jätevedenpuhdistamon vesivoimalassa käytetään kahta epätahti-, eli tässä tapauksessa oikosulkugeneraattoria. Voimala on otettu käyttöön vuonna 1983, jolloin vanhaan vesivoimalaitokseen (kuva 1) rakennettiin kaksi erikokoista generaattori-turbiini -yhdistelmää tuottamaan osan laitoksen sähköstä jakeluverkon rinnalla.



Kuva 1 Vääräkosken voimalaitos

Vuosien saatossa puhdistamolla on kuitenkin ilmennyt ongelmia tilapäisten hetkellisten ylijännitteiden kanssa, jotka ovat aiheuttaneet huomattavan määrän sähkölaitteiden rikkoutumisia. Työn tehtävänä oli selvittää, mitkä aiheuttavat kyseessä ole-

via ylijännitteitä ja mitkä ovat mahdolliset parannusehdotukset ongelman ratkaisemiseksi.

1.1 Orimattilan Vesi Oy

Orimattilan Vesi Oy on Orimattilan kunnallinen vesilaitos, joka hoitaa asukkailleen talousveden jakamisen. Vääräkosken jätevedenpuhdistamo on otettu käyttöön vuonna 1981, ja kaksi vuotta tämän jälkeen otettiin puhdistamon pienvesivoimala käyttöön.

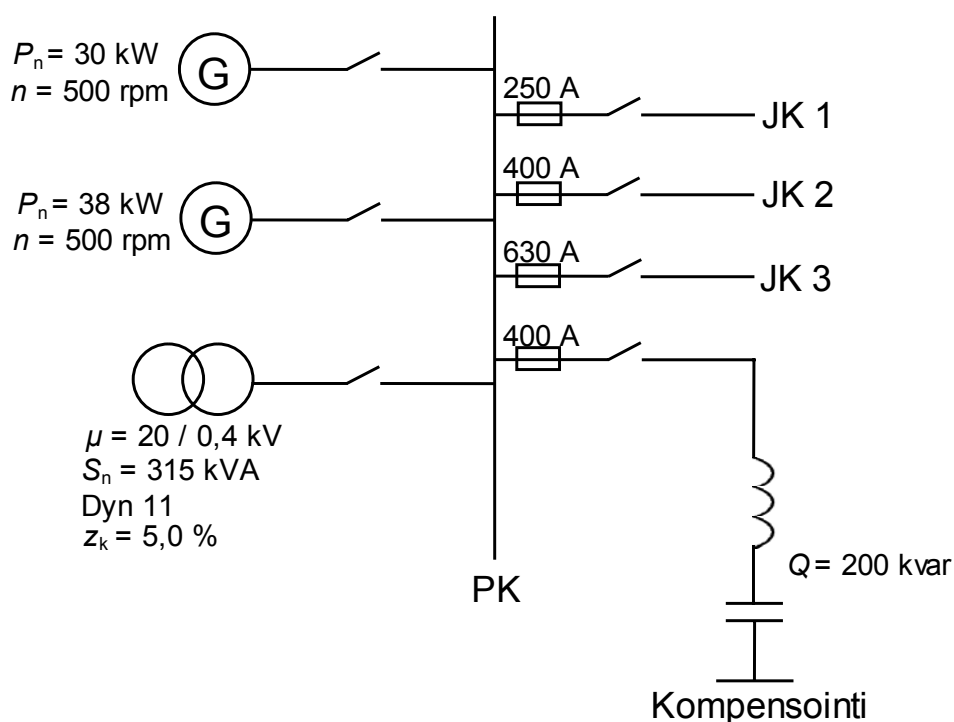
1.2 Teoteam Oy

Työn teettäjä Teoteam Oy on Lahdessa sijaitseva teollisuusautomaatioon erikoistunut yritys. Teoteam on insinööritoimisto, joka toimittaa kokonaisia automaatiojärjestelmiä suunnittelusta aina toimituksiin asti, esimerkkinä useat kunnallisten vesilaitosten kaukovalvontajärjestelmät. /27./

Teoteam Oy on rakentanut Vääräkosken jätevedenpuhdistamolle automaatio- ja kaukovalvontajärjestelmän. Toimitusjohtaja Reijo Ruoholan idea oli teettää tutkintotyö, jossa tutkittaisiin laitoksen sähköverkkoon liittyvää ongelmaa, josta yrityksen toimittamat automaatio- ja elektroniikkalaitteet ovat kärsineet.

2 LAITOKSEN SÄHKÖVERKKO

Jätevedenpuhdistamon sähköjärjestelmän perusta on se, että laitos on liitetty sähkölaitoksen verkkoon lähellä sijaitsevan jakelumuuntajan kautta. Lisäksi osana sähkönsyöttöjärjestelmää on kaksi potkuriturbiinityyppistä epätahtigeneraattoria, jotka sijaitsevat viereisessä Porvoonjoen Vääräkoskessa. Kuvassa 2 on esitettyä laitoksen periaatteellinen sähköjärjestelmän pääkaavio.



Kuva 2 Pääkaavio laitoksen sähköjärjestelmästä

Kuvan 2 pääkaavio on sikäli puutteellinen, että generaattoreiden sähköisiä suoritearvoja ei enää löytynyt. Näin ollen pääkaaviossa usein esitettävä generaattorin tehokerroin $\cos\varphi$ puuttuu ja kierrosnopeus n vastaa generaattoreiden synkronista nopeutta n_s .

Koska laitoksessa on useita vedenkäsittelyprosesseja, se sisältää runsaasti sähkömoottorikäyttöjä, joita ovat erilaiset taajuusmuuttaja- ja suorakäytöt. Generaattoreiden ja moottorikäyttöjen takia laitoksessa on loistehon kompensointiyksikkö, joka tässä tapauksessa on estokelaparistotyyppinen.

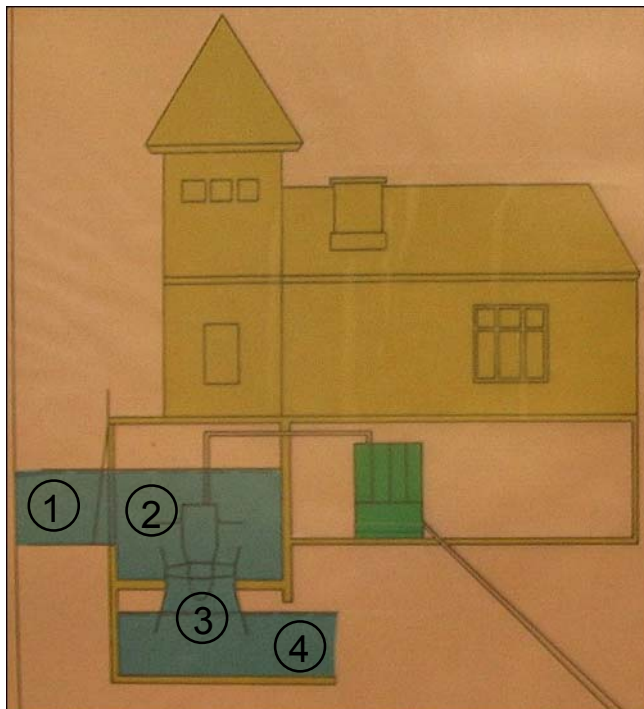
Tässä luvussa esitetään laitoksen sähköjärjestelmän lisäksi sähkönjakelun häiriöille alttiit komponentit ja tarkastellaan niiden käyttäytymistä verkon vikatilanteissa.

2.1 Vesivoimalaitos

Vääräkosken vesivoimageneraattorit ovat toimintaperiaatteeltaan potkuriturbiinityyppisiä, joissa kiinteäsiipinen, täysin pystymallinen generaattori-turbiini - yhdistelmä on asennettuna kuvan 3 mukaisesti voimalaitoksessa. Putouskorkeutta koskessa on 3 - 3,5 metriä vesitilanteen mukaan.

2.1.1 Voimalan yleinen toimintaperiaate

Kuvasta 3 selviää voimalaitoksen keskeinen toimintaperiaate. Vesi johdetaan vasemmalla olevien välppien (1) läpi, jotka estävät suurempien roskien ja esineiden pääsyn turbiineihin. Tämän jälkeen vesi kulkeutuu turbiinikammioon (2), josta se jatkaa matkaansa kiinteäsiipisen turbiinin (3) läpi poistokanavaan (4).



Kuva 3 Vesivoimalaitoksen periaatekuva (kuva: Waterpumps WP Oy)

2.1.2 Vesivoimageneraattorit

Vesivoimageneraattoreina käytetään epätahtikoneita (tässä tapauksessa oikosulkukoneita), joissa on vahvistetut roottorit turbiinin ryntäysnopeutta vastaavaksi ja vahvennetut laakerit. Näin ollen mikä tahansa epätahtikone ei vastaavaan käyttöön todennäköisesti suoraan sovi. Vesivoimageneraattorit on asentanut Waterpumps WP Oy vuonna 1983. Generaattoreiden rakenne perustuu Strömberg Motors Oy:n toimittamiin staattori-roottori -paketteihin, joiden päälle Waterpumps WP Oy on kasannut potkuriturbiinit. Generaattoreiden mitatut tehot ovat 30 kW ja 38 kW, ja tehoero perustuu turbiineiden kokoeroihin. Molemmissa generaattoreissa turbiini on suoraan kiinnitetty koneen akseliin ja synkroninen pyörintänopeus on 500 rpm, eli kone on 12-napainen.

2.1.3 Voimalaitoksen teoreettinen teho ja vuotuiset energiasäästöt

Kulloinenkin vesitilanne vaikuttaa siihen, juoksetetaanko vettä ohijuoksutusaltaan läpi vai kulkeeko koko vesimassa turbiinikammioitten kautta. Toisin sanoen koko potentiaalista vesimäärää ei Vääräkoskessa voida täysin hyödyntää. Teoriassa voimalaitoksen teho P_{vl} saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä:

$$P_{vl} = \eta g \rho Q H \quad (1)$$

missä η on voimalaitoksen kokonaishyötysuhde, g on painovoiman kiihtyvyys, ρ on veden tiheys, Q on virtaama ja H on putouskorkeus.

Voimalaitoksen kokonaishyötysuhde η sisältää generaattoreiden hyötysuhteen η_g :n, turbiinien hyötysuhteen η_t :n ja putouskorkeuden käyttöasteen η_p :n seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\eta = \eta_g \eta_t \eta_p \quad (2)$$

Ilman tarkkoja lähtöarvoja on hyötysuhteen arvioiminen vaikeaa. Waterpumps WP Oy:n toimitusjohtaja Heikki Pirttiniemi esitti kuitenkin arvion, jonka mukaan Vääräkosken voimalaitoksen tyyppisissä pienvesivoimaloissa kokonaishyötysuhde on noin 70 % /18/. Tällä perusteella saadaan yhtälön (1) avulla laskettua voimalaitoksen yhden generaattorin teoreettinen teho. Suuremmalla generaattorilla virtaama $Q = 1300 \text{ l/s}$ /22/ ja laskussa oletetaan putouskorkeuden olevan maksimi 3,5 m.

$$P_{\text{vl},38\text{kW}} = \eta_g \rho Q H = \eta_t \eta_p \eta_g g \rho Q H \\ = 0,70 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 3,5 \text{ m} = 31,2 \text{ kW}$$

Vastaavalla tavalla laskettuna pienemmän generaattorin tehoksi saadaan $P_{\text{vl},30\text{kW}} = 28,8 \text{ kW}$, kun pienemmän generaattorin virtaama $Q = 1200 \text{ l/s}$ /22/. Tällöin voimalaitoksen kokonaisteho on generaattoreiden osatehojen summa.

$$P_{\text{vl}} = P_{\text{vl},38\text{kW}} + P_{\text{vl},30\text{kW}} = 31,2 \text{ kW} + 28,8 \text{ kW} = 60,0 \text{ kW} \quad (3)$$

Vuosienergiaksi W_h muutettuna tämä on arviolta:

$$W_h = P_{\text{vl}} \cdot t_k = 60 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} = 526 \text{ MWh} \quad (4)$$

missä t_k on laitoksen käyttöaika tunteina.

Käytännössä todellinen voimalaitoksella tuotettu vuosienergia on huomattavasti pienempi, mikä johtuu käyttökatkoksista ja tilanteista, jolloin vedenpinta on keskimääräistä alhaisempi. /5, s. 10 - 12./

2.2 Jakeluverkko

Vääräkosken jätevedenpuhdistamo on liitetty Kymenlaakson Sähkö Oy:n jakeluverkkoon, jonka periaatteellinen rakenne on esitetty liitteessä 1. Muuntamossa on kaksi liittymää, joista toinen on Vääräkosken jätevedenpuhdistamo ja toinen AMKA-riippukierrekaapelilla liitetty omakotitalo. Jätevedenpuhdistamon liittymä-

kaapelointi on 4 x AMCMK 3 x 185 + 56 Cu. Verkko on nimellisjännitteeltään $U_N = 400 \text{ V}$.

2.3 Pääkiskosto ja jakokeskukset

Pääkeskuksen PK pääkiskosto sisältää jakokeskuslähdöt, kompensoinnin ja sähkönsyötön sekä jakeluverkosta että generaattoreilta. Lisäksi PK:ssa on ylijännitesuojat ukkosylijännitteiden varalta jakeluverkon liitäntäpisteessä.

JK 1 on väli- ja jälkiselkeytyksen jakokeskus. JK 1:n etukojelähtöihin kuuluu n. 1 - 3 kW teholuokassa olevia suorakäyttöjä; rejektivesipumput, ylijäämälietepumput, potkurisekoittimet ja kemiallisen lietteen pumput. Keskusalueella on lisäksi palautuslietepumppuja, jotka ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä ja teholtaan 3 kW.

JK 2 on esikäsitteilyn jakokeskus, jonka lähtöihin sisältyy huomattava määrä taajuusmuuttajakäyttöjä. Taajuusmuuttajien kokoluokat ovat 11 - 75 kW:n välillä. Kojeita ovat muiden muassa ilmastuskompressori, poistoilmakoje, sakeutin, lietteenkäsittelylinko ja polymeeripumppu. Lisäksi keskus sisältää yhden suorakäyttöisen 45 kW ilmastuskompressorin.

JK 3 -jakokeskus sisältää pääasiassa lämmityskuormaa, jota on maksimissaan noin 200 kW. Lisäksi keskuksessa on tuloilmakoje ja kiertovesipumppu.

2.4 Loistehon kompensointi /2/

Loistehon siirto vähentää pätötehon siirtokykyä ja lisää johtojen ja muuntajien jännite-, teho- ja energiahäviöitä. Tämän vuoksi loisteho tulisikin tuottaa paikallisesti laitoksissa, jotka sitä käyttöönsä tarvitsevat. Tähän käytäntöön ohjataan myös jakeluverkkoyhtiöissä, jotka ovat hinnoitelleet loisenergian kalliimmaksi kuin pätöenergian, mikäli tietty loisenergian raja-arvo ylitetään. Kaiken takana on luonnollisesti se, ettei kantaverkkoja käytettäisi loistehon siirtoon siitä aiheutuvien häviöi-

den takia. Näin ollen kantaverkkoyhtiöt pyrkivät ohjaamaan $\tan\phi = 0,16$ ylimenevältä osalta kompensointia keski- ja pienjänniteverkkoon.

Loistehon kompensointiin on olemassa useita erilaisia ratkaisuja. Käytännössä loistehon kompensointilaitteiston tulee olla säädettävä, koska esimerkiksi teollisuudessa, jossa kompensointitarvetta pääasiassa esiintyy, kuormitukset muuttuvat jatkuvasti.

2.4.1 Estokelaparisto

Vääräkoskella käytetään loistehon kompensointiin estokelaparistoa, jonka etuna tavalliseen kondensaattoreilla toteutettuun automatiikkaparistoon verrattuna on se, että kondensaattoreiden kanssa sarjassa olevat kelat estävät vaarallisten yliaaltojen pääsyn itse kondensaattoreille. Kelat ja kondensaattorit muodostavat sarjaresonanssiin, joka on viritetty alemmalle taajuudelle kuin verkon alin harmoninen yliaaltotaajuus f_0 . Tästä syystä kondensaattoreiden ”vanheneminen” hidastuu ja vältytään kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välille muodostuvilta resonansseilta.

2.4.2 Loistehonsäädin

Estokelaparistoa ohjaa automatiikkasäädin, joka kytkee kondensaattoriportaita päälle tarpeen mukaan tarvittavan loistehon tuottamiseksi. Portaiden jälleenkytkentäaikaan vaikuttaa asetusarvojen lisäksi kondensaattoreiden purkautumisaika. Perustoimenpiteenä säätimeen asetellaan tavoite $\cos\phi$ -arvo. Säädin mittaa pääkiskoston vaihevirtoja, joiden perusteella kytkee sopivan kombinaation kondensaattoriportaita päälle tavoitteen saavuttamiseksi. Portaiden kytkeminen tapahtuu aina tietyllä viiveellä, toisin sanoen nopeissa kuormitusmuutoksissa kestää aina jonkin verran, kunnes haluttu loistehotasapaino on saavutettu.

2.4.3 Laitoksen kompensointilaitteisto

Laitoksen estokelapariston tyyppi on viisiportainen Nokian Capacitors D200, jonka spesifikaatio on esitettyinä liitteessä 2. Estokelapariston kompensointiteho on 200 kvar ja viritystaajuus 189 Hz, jolloin kyseessä on Suomessa usein käytetty niin sanottu 7 %:n estokelaparisto. Loistehonsäätimen tyyppi on Nokian Capacitors A12, joka kytkee portaita päälle 30 s:n viiveellä. Tämä johtuu edellä mainitusta kondensaattoreiden purkautumisajasta. Kompensoinnin irtikytkentä tapahtuu jännitetason muuttuessa $\pm 15\%$ nimellisestä. Käytännössä laitoksen kompensointilaitteisto ei rikkoudu suurestakaan ylijännitteestä, koska estokelaparisto koestetaan 2,1-kertaisella nimellisjännitteellä 10 sekunnin ajan.

2.5 Sähkömoottorikäytöt

Vääräkosken jätevedenpuhdistamo sisältää runsaasti sähkömoottorikäyttöjä, joita on eri vedenkäsittelyprosesseissa. Näitä ovat taajuusmuuttaja- ja suorakäytöt.

2.5.1 Suorakäytöt

Laitoksen suurin suoraan käynnistyvä oikosulkumoottori on 45 kW ilmastuskompressorin moottori. Tämän kokoluokan moottori ottaa varsin suuren käynnistysvirran, mutta ei ole kovin herkkä nopeille jännitetransienteille. Yleisesti suorakäytöt eivät ole kovin herkkiä sähköverkon jännitemuutoksille, koska niissä ei ole elektronisia ohjainlaitteita.

2.5.2 Taajuusmuuttajakäytöt

Taajuusmuuttaja laitteena koostuu tasasuuntaussillasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Riittävän suuren ylijännitteen kytkeytyessä, taajuusmuuttajan ylijännitesuojana oleva varistori rikkoutuu ja oikosulkee taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan, minkä jälkeen laitteen etusulake toimii. Laitteen ylijännitekestoisuus perustuu

tehopuolijohteiden mitoitukseen. Yleisesti käytettyjä mitoituskokoja ovat esimerkiksi 1200 VAC ja 1600 VAC.

Vaikkei sähköverkon ylijännite ylittäisikään tehopuolijohteen mitoitusta, voi pienemmilläänkin ylijännitteillä aiheutua erilaisia toimintahäiriöitä. Kaiken lisäksi taa-juusmuuttajalle olennaista ovat hyvät ympäristöolosuhteet, koska laite on täynnä herkkää elektroniikkaa.

2.6 UPS-laitteisto

UPS-laite (Uninterruptible Power Supply) on tehoelektroniikan laite, joka akkujensa turvin takaa katkottoman sähkönsyötön kriittiselle kuormalle /24/. UPS-laite sisältää yleisesti tasasuuntaussillan, varaajan, akuston ja vaihtosuuntaajan. Ylijännitteiden kannalta kriittisin osa on tasasuuntaaja, jonka jännitekestoisuuteen vaikuttaa tehopuolijohteiden mitoitus. Kuitenkin nyttemmin uusittavana oleva yleinen koneiden laitestandardi SFS-EN 60204-1 määrittelee vaihejännitteen 1 sekunnin kestoajan olevan vähintään 1 kV /8/.

Vääräkosken puhdistamalla UPS-laitteisto on asennettu prosessinohjauslogiikan ja päätietokoneen sähkönsyötön turvaamiseksi.

2.7 Ohjelmoitavat logiikat

Jätevedenpuhdistamon eri prosessit sisältävät huomattavan määrän erilaisia ohjelmoitavia logiikoita. Näitä ovat esimerkiksi Siemens S7 -sarjan logiikat. Logiikoiden teholahteet asettavat omat vaatimuksensa sähkönsyötölle. Niin ikään standardia SFS-EN 60204-1 voidaan soveltaa määriteltäessä jännitekestoisuuksia, jolloin periaatteessa ylijännitekestoisuuden tulisi olla sama kuin UPS-laitteissakin, eli vaihejännitteellä 1 kV 1 sekunnin ajan.

3 TEOREETTINEN TARKASTELU JA SIMULOINNIT

Tässä luvussa tehdään laitoksen sähköverkosta OrCAD PSpice -simulointimalli ja lasketaan muuntajan, generaattoreiden, kompensoinnin ja jakokeskusten sijaiskykennät tätä mallia varten. Oletuksena mallille annettiin seuraavia lähtötietoja:

- Jokaista sähkömoottorikäyttöä ei mallinneta erikseen, koska mallista tulee muutoin liian laaja.
- Generaattorit mallinnetaan vakiotilan analyysillä, toisin sanoen dynaamisen tilan niin sanottua kaksiakselimallia ei käytetä.
- Kuormituksena on pelkästään induktiivis-resisttiivistä staattista kuormaa.

3.1 Epätahtikoneen toiminta generaattorina /1; 5/

Epätahti- eli asynkronikoneen generaattorikäyttö perustuu siihen, että roottori pyörii epätahdissa pyörivän magneettikentän kanssa. Tällöin roottorin nopeus on suurempi kuin magneettikentän nopeus, eli puhutaan negatiivisesta jättämästä. Koska epätahtigeneraattori luonnollisesti tarvitsee magnetointia magneettikentän ylläpitämiseen, tulee se syöttää ulkoisesta lähteestä. Epätahtikoneet voidaan täten jakaa kahteen eri ryhmään, eli verkko- ja kondensaattorimagnetoituihin generaattoreihin.

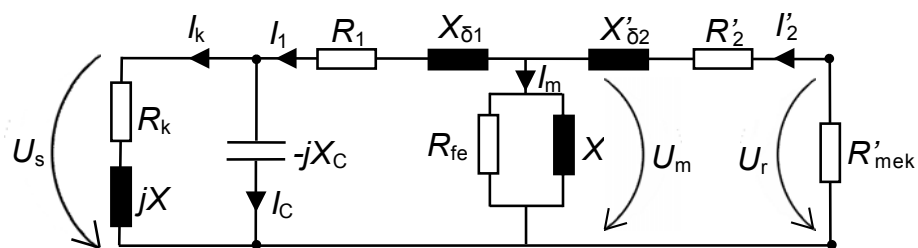
Verkkomagnetoitu generaattori ottaa magnetoinnin suoraan sähköverkosta, jolloin verkon tulee olla jännitteinen. Tällöin generaattori ei ole itseheräävä. Sen sijaan kondensaattorimagnetoitu generaattori ottaa magnetointivirran generaattorin napoihin asennetuista kondensaattoreista, jolloin generaattori on itseheräävä ja voi toimia itsenäisenä generaattorina.

3.1.1 Generaattoritoiminnan mallintaminen /5; 25/

Kun tarkastellaan epätahtikoneen toimintaa generaattorina, on helpointa lähteä liikkeelle moottoritoiminnasta. Yksinkertaisena epätahtikoneen peruseriaatteena on se, että moottorikäytössä kolmivaiheinen staattorikäänitys (jäljempänä olevan kuvan 4 komponentit R_1 ja $X_{\delta 1}$) synnyttää tahtinopeudella pyörivän magneettikentän. Staattorin eli seisojan napojen vaihekäämejä syötetään kolmesta 120° :n ajallisessa vaihesiirrossa olevasta jännitelähteestä. Näin staattorikäämeihin syntyy kuhunkin toisistaan 120° :n ajallisessa vaihesiirrossa olevat virrat. Koska navat sijaitsevat vielä fyysisesti 120° :n paikallisessa vaihesiirrossa, syntyy virtojen vaikutuksesta pyörivä magneettikenttä.

Roottorissa eli pyörijässä on oikosulkukäänitys. Koneen käydessä kuormassa staattorin pyörivä kenttä leikkaa roottorin sauvoja. Roottorin oikosuljettuihin virtapiireihin syntyy induktiovirta oikosulkukäänityksen vuoksi. Ilmavälivuo syntyy jatkossa staattori- ja roottorivirtojen yhteisvaikutuksesta. Koneen virrallisiin sauvoihin vaikuttaa vääntömomentti Lorentzin voiman perusteella. Tahtinopeus määräytyy koneen napapariluvun mukaisesti. Jotta induktio säilyisi, tulee roottorin pyörimisnopeuden olla hitaampi kuin magneettikentän. Tästä tulee nimitys ”epätahtikone”. /25./

Kuten epätahtimoottorin, myös epätahtigeneraattorin toimintaa voidaan tarkastella yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla (kuva 4). Roottoripuolen suuret on redusoitu staattorista päin katsottuna, jota selvennetään yläpilkulla roottorisuureissa.



Kuva 4 Kuormitetun kondensaattorimagnetoidun epätahtigeneraattorin yksivaiheinen sijaiskytkentä

Kuvassa 4 niin sanotut pitkittäishaaran komponentit ovat seuraavat: R_1 on staattorin resistanssi ja $X_{\delta 1}$ staattorin hajareaktanssi, R'_2 on roottorin resistanssi ja $X'_{\delta 2}$ roottorin hajareaktanssi. Yksivaiheisen sijaiskytkennän niin sanotussa poikittaishaarassa R_{fe} on rautahäviöresistanssi ja X_m magnetointireaktanssi. Lisäksi kuvassa on esitetty magnetointikondensaattori $-jX_C$, staattoriin kytketty kuormitus $R + jX$ ja koneen akselitehoa mallintava komponentti R'_{mek} . U_s on staattorin jännite, U_r on roottorin jännite ja U_m on magnetointijännite. Virtoja kuvaavat suureet ovat seuraavat: I'_2 on roottorin vaihevirta, I_1 on staattorin virta ja I_m magnetointivirta. Lisäksi kuorman virta on I_k ja kondensaattorin virta I_C .

Koska generaattori tarvitsee magnetointivirtaa magneettikentän ylläpitämiseen, tulee sitä syöttää ulkoisesta lähteestä. Tällainen voi olla kondensaattori tai tietynlainen kehittynyt pakkokommutoitu suuntaaja. Jotta generaattori heräisi, tulee sen roottorissa olla remanenssivuota eli jäännösmagnetismia tai magnetointikondensaattoreissa pieni alkuvaraus. Remanenssivuon tapauksessa syntyy kondensaattoreiden ja generaattorin välille pieni virta, jolloin kondensaattoreihin syntyy jännite. Näin magnetointivirta alkaa kulkea kondensaattoreilta generaattorille. Täten staattoriipiiri on resonanssissa magnetointikondensaattoreiden kanssa.

Generaattorin herääminen on tilanne, jossa staattorin navoissa alkaa vaikuttaa riittävän suuri jännite. Näin käy, kun kondensaattori pystyy syöttämään niin sanotun tyhjäkäyntikäyrän $U_0 = f(I_m)$ edellyttämän magnetointivirran, missä U_0 on tyhjäkäyntijännite. Tyhjäkäyntikäyrä määritetään yksivaiheisen sijaiskytkennän komponenttien avulla. Kondensaattoreiden tähtikytkennässä magnetointivirta I_m on sama kuin tähtikytkentäisen kondensaattorin virta I_C :

$$I_m = I_C = \frac{U_C}{X_C} = \omega C_0 U_0 \quad (5)$$

missä U_C on kondensaattorin jännite, X_C on kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi, C_0 on kondensaattorin kapasitanssi generaattorin tyhjäkäynnissä, U_0 on generaattorin tyhjäkäyntijännite ja $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus.

Tyhjäkäynnissä koneen toimintapiste asettuu tyhjäkäyntikäyrän $U_0 = f(I_m)$ ja kondensaattorisuoran $I_m = 2\pi f C_0 U_0$ leikkauspisteeseen /26/. Tästä saadaan magnetointikondensaattorin kapasitanssille arvo

$$C_0 = \frac{I_m}{2\pi f U_0} \quad (6)$$

Mikäli magnetointivirtaa I_m ei ole tiedossa, voidaan magnetointikondensaattorit mitoitaa yksivaiheisen sijaiskytkennän perusteella, kun tiedetään kondensaattoreiden ja staattoriin resonanssitaajuus f_r . Tämä taajuus on samalla staattorijännitteen taajuus. /11, s. 24 - 25./

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_m + L_{\delta 1}) \cdot C_0}} \quad (7)$$

missä L_m on magnetointi-induktanssi ja $L_{\delta 1}$ on staattorin hajainduktanssi.

Kun epätahtikonetta pyöritetään ulkoisella voimakoneella tahtinopeutta suuremmalla nopeudella, jättämä muuttuu negatiiviseksi ja roottorikäämiin induoituvan jännitteen suunta päinvastaiseksi kuin moottorikäytössä. Tämän vuoksi roottorin pätövirta muuttuu negatiiviseksi eli staattoriin päin. Tällöin pätötehon suunta muuttuu, eli kone alkaa syöttää tehoa verkkoon toimien täten generaattorina. Tällöin voidaan puhua alimagnetoidusta generaattorista, koska magnetointi otetaan jännitteisestä verkosta.

Generaattorin tuottamaan jännitteeseen vaikuttaa sekä roottorin pyörimisnopeus että magnetointivirran suuruus. Pyörimisnopeuden ollessa vakiona, staattorikäämiin induoituvan lähdejännitteen suuruuteen vaikuttaa suoraan kondensaattoreiden kapasitanssin suuruus.

3.1.2 Toiminta jakeluverkkoon liitettynä

Jakeluverkkoon liitettynä epätahtigeneraattorin toiminta on varsin yksinkertaista. Suuren oikosulkutehon omaava jäykkä verkko määrää käytännössä laitoksen jännitteen ja taajuuden, ja generaattori ottaa magnetointinsa verkosta, yleensä kompensointikondensaattoreilta.

Jakeluverkkoon liitäntä asettaa kuitenkin tietyt vaatimukset generaattorikäytölle. Näitä ovat esimerkiksi generaattorin suojaus- ja mittauslaitteisto, jottei laitoksesta aiheutu haittaa muille kytketyille sähkölaitteille. /5, s. 35./

Ongelmatilanteet

Mahdollisia ongelmia voi syntyä siinä vaiheessa, kun jakeluverkkoon tulee häiriö. Tällöin tilanteessa, jossa kuormitus on pieni, generaattori saattaa rynnätä, jolloin voi syntyä haitallisia ylijännitteitä. Lyhyen sähkökatkon aikana saattaa tulla tilanne, jossa laitos käy hetkellisesti saarekkeessa. Tällöin takaisin kytkeytyvä verkko saattaa aiheuttaa kytkentätransientin. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi jakeluverkon pikajälleenkytkennän (PJK) tai aikajälleenkytkennän (AJK) aiheuttamana.

3.1.3 Toiminta saarekekäytössä

Saarekekäyttö-termillä tarkoitetaan tilannetta, jossa tietty verkon osa on erillään ympäröivästä sähköverkosta ja tätä tiettyä verkkoa syöttää jokin ulkopuolisesta verkosta erillään oleva laite. Epätahtigeneraattorin saarekekäytössä tulee kulutetun ja tuotetun tehon olla koko ajan yhtä suuri, mikäli ei käytetä erillistä tähän tarkoitettua nopeaa taajuuden ja jännitteen säätäjää. Muutoin sähkön laadun kannalta saattaa syntyä ongelmia, varsinkin kuormitusten nopeissa muutoksissa. Yleisen jakelujännitteen ominaisuuksia käsittelevä SFS-EN 50160 -standardi ei ota kantaa saarekekäyttötilanteisiin, mutta käyttäjän kannalta tilanne on kuitenkin usein ongelmallinen.

Mikäli tällainen tilanne syntyy hetkellisesti laitokseen, joka ei ole saarekekäyttökelpoinen (taajuuden- ja jännitteensäätäjällä varustettu), tulisi saarekekäyttötilanne poistaa mahdollisimman nopeasti. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että suojalaitteiston tulee havahtua välittömästi ja kytkeä generaattorit irti verkosta.

Ongelmatilanteet

Saarekekäytön ongelmatilanteita ovat kuormitusten nopeat poiskytketytymiset, jotka aiheuttavat sen, että generaattorin nopeus alkaa nousta. Tällöin magnetointia tulisi nopeasti vähentää, jottei synny vaarallisia ylijännitteitä. Lisäksi tilanteissa, joissa pelkkä generaattori syöttää verkkoa, jännitteen käyrämuoto saattaa vääristyä verkon yliaaltolähteiden vaikutuksesta. Tämä tosin on täysin riippuvainen kuormalaitteista. /5, s. 37 - 38./

3.1.4 Simulointimallin rakentaminen

Epätahtigeneraattoreiden mallintamisesta muodostui erittäin hankala operaatio, koska Strömberg Motors Oy:n rakentamista staattori-roottori -yksiköistä ei löytynyt minkäänlaisia sähköisiä arvoja. Tiedossa oli ainoastaan, että koneiden napapari-luku $p = 6$ ja teholuokat ovat 30 kW ja 38 kW. Oma hankaluutensa asiassa oli myös se, että generaattorit ovat rakenteeltaan hieman nykyaikaisesta tavanomaisesta epätahtikoneesta poikkeavia vahvennetuilla roottoreillaan.

Simulointityössä käytettiin ABB Motors Oy:ltä saatuja eräiden epätahtigeneraattoreiden sijaiskytkennän arvoja (liite 4), joilla saadaan suuntaa-antavia tuloksia laitoksen toiminnasta eri kytkentätilanteissa. Olennaista on kuitenkin se, että kytkentöjä pystytään mallintamaan eri ajanhetkillä, jolloin saadaan arvokasta tietoa siitä, kuinka sähköverkon kytkeytyminen eri kytkentävaihekuililla vaikuttaa tilanteeseen.

Generaattoreiden sijaiskytkennät ovat käytännössä kuvan 4 mukaiset, mutta roottorin resistanssi R'_2 ja akselitehoa mallintava komponentti R'_{mek} on korvattu roottorin kokonaisresistanssilla R'_2/s , jolloin:

$$R_2' / s = R_2' + R_{mek}' \quad (8)$$

Lisäksi tulee ottaa huomioon se, että jättämä on käytännössä hyvin pieni (tyhjäkäyntitilanteessa lähellä nollaa), jolloin roottorin virta on lähestulkoon nolla. Tämä voidaan mallintaa suurella roottorin kokonaisresistanssilla R_2'/s , jolloin myös roottorin reaktanssi voidaan jättää käytännössä huomioimatta. Näin ollen $I_2' \approx 0$.

Jännitelähde mallinnetaan Théveninin vastinpiirillä, jolloin lähde voidaan sijoittaa sijaiskytkennän magnetointihaaraan (kuva 5). Koska generaattorin herääminen vaatii virran syntymisen magnetointikondensaattorin $-jX_c$ ja staattorin induktanssien X_m ja $X_{\delta 1}$ välille, tapahtuu kytkennässä resonanssi näiden komponenttien välille, jolloin generaattorin herääminen on käytännössä mahdollista.

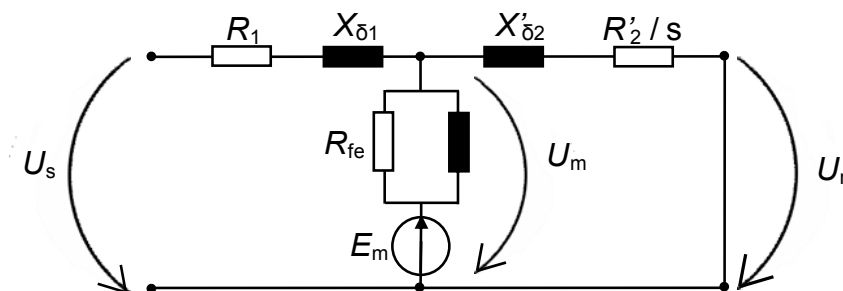
Seuraavassa taulukossa (taulukko 1) on laskettu simulointimallin parametrit vakiotilan analyysia varten, jolloin mallin tarvitsema reaktanssien muutos induktansseiksi toteutetaan 50 Hz:n taajuuden mukaisena. Tällöin yleisesti induktiivisille reaktansseille X_L pätee, induktanssin L ollessa vakiona:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (9)$$

Vakiotilan analyysillä tarkoitetaan siis generaattoritoimintaa liitettynä 50 Hz -vaihtovirtaverkkoon, jolloin eri pyörintänopeuksia ei huomioida. Mikäli mallinnetaan tilannetta, jossa generaattori ryntää, käytetään oletuksena Vääräkosken generaattoreiden kokemukseräistä ryntäysnopeutta $n_{rynt} = 750$ rpm. Tällöin sijaiskytkennän reaktiiviset komponentit suurenevät likimain suhteessa 750/500 rpm.

Taulukko 1 Epätahtigeneraattoreiden yksivaiheisen sijaiskytkennän parametrit

Epätahtigeneraattorit	P_n	38 kW	30 kW
Staattori-resistanssi	R_1	0,0466 Ω	0,0593 Ω
Staattorin hajainduktanssi	$L_{\delta 1}$	0,88 mH	1,13 mH
Rautahäviöresistanssi	R_{fe}	0,11 k Ω	0,14 k Ω
Magnetointi-induktanssi	L_m	9,23 mH	11,36 mH
Roottori-resistanssi	R'_2/s	suuri	suuri
Roottorin hajainduktanssi	$L'_{\delta 2}$	1,08 mH	1,36 mH



Kuva 5 Epätahtigeneraattorin simulointimalli

Kuvan 5 E_m -komponentti vastaa generaattorin Théveninin lähdejännitettä.

3.2 Muuntajan mallintaminen

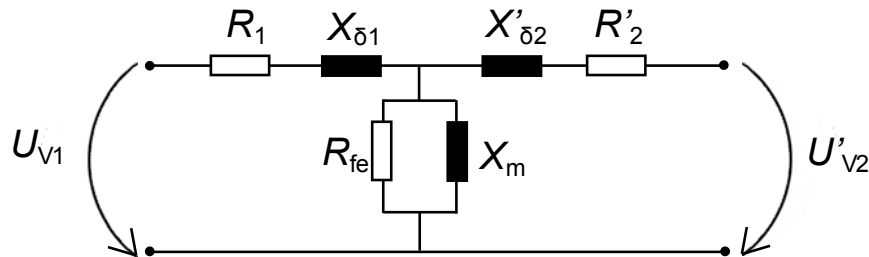
Muuntajan kilpiarvot saadaan sähköverkon liittymätietojen perusteella (liite 1).

Laitosta syöttävän jakelumuuntajan nimellisarvot ovat seuraavan taulukon mukaiset (taulukko 2).

Taulukko 2 Jakelumuuntajan nimellisarvot

Nimellisteho	$S_N = 315 \text{ kVA}$
Kuormitushäviöt	$P_K = 4350 \text{ W}$
Tyhjäkäyntihäviöt	$P_0 = 570 \text{ W}$
Muuntosuhde	$\mu = 20 \text{ kV} / 0,4 \text{ kV}$
KytKentäryhmä	Dyn11
Suht. oikosulkuimpedanssi	$z_k = 5,0 \%$
Suht. tyhjäkäyntivirta	$i_0 = 1,2 \%$

Jotta jakelumuuntajan tiedot saadaan syötettyä simulointiohjelmistoon, tulee ensiksi muodostaa muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä. Muuntajan sijaiskytkentään sisältyy pitkittäis- ja poikittaishaaran komponentit (kuva 6).



Kuva 6 Muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä

Kuvan 6 muuntajan yksivaiheisen sijaiskytkennän komponentit ovat seuraavat: Ensiökäämissä R_1 on käämiresistanssi ja $X_{\delta 1}$ hajareaktanssi, toisiokäämissä R'_2 on käämiresistanssi ja $X'_{\delta 2}$ hajareaktanssi. Sijaiskytkennän poikittaishaarassa R_{fe} on rautahäviöresistanssi ja X_m on muuntajan pääreaktanssi.

Koska piirimallia tarkastellaan pääkiskoston suunnalta, tulee muuntaja redusoida toision $U_{N2} = 400 \text{ V}$ -jännitetasoon. Aloitetaan laskemalla toision nimellisvirta I_{N2} , jonka perusteella päästään kiinni toision tyhjäkäyntivirtaan

$$I_{N2} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N2}} = \frac{315 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 454,66 \text{ A} \quad (10)$$

missä S_N on nimellisteho ja U_{N2} on toision nimellisjännite.

Toision tyhjäkäyntivirta I_{02} saadaan laskettua suhteellisen toision tyhjäkäyntivirran avulla:

$$i_{02} = 1,2 \% \quad (11)$$

$$I_{02} = i_{02} \cdot I_{N2} = 0,012 \cdot 454,66 \text{ A} = 5,456 \text{ A}$$

Tyhjäkäyntinäennäisteho S_0 ja tyhjäkäyntiloisteho Q_0 lasketaan seuraavasti:

$$S_{0,v} = I_0 \cdot \frac{U_{N2}}{\sqrt{3}} = \frac{5,456 \text{ A} \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 1,26 \text{ kVA} \quad (12)$$

$$Q_{0,v} = \sqrt{S_{0,v}^2 - \left(\frac{P_0}{3}\right)^2} = \sqrt{(1,260 \text{ kVA})^2 - \left(\frac{570 \text{ W}}{3}\right)^2} = 1,246 \text{ kvar} \quad (13)$$

Muuntajan yksivaiheisen sijaiskytkennän poikittaishaaran arvot X_m ja R_{fe} saadaan seuraavasti:

$$X_m = \frac{U_N^2}{3 \cdot Q_{0,v}} = \frac{(400 \text{ V})^2}{3 \cdot 1,246 \text{ kvar}} = 42,80 \text{ k}\Omega \quad (14)$$

$$R_{fe} = \frac{U_N^2}{P_0} = \frac{(400 \text{ V})^2}{570 \text{ W}} = 280,70 \Omega \quad (15)$$

Pitkittäishaaran arvojen laskenta:

$$Z_k = z_k \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 0,05 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{315 \text{ kVA}} = 0,0254 \Omega \quad (16)$$

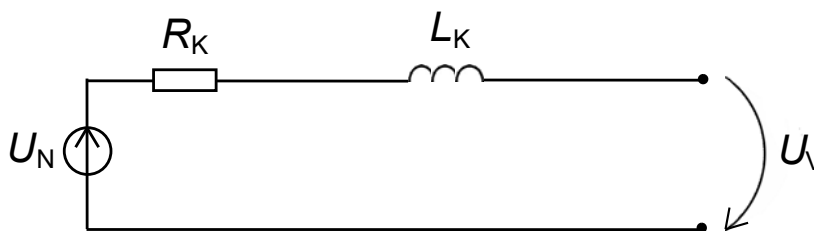
$$R_k = \frac{P_0 / 3}{I_N^2} = \frac{4350 \text{ W} / 3}{(454,66 \text{ A})^2} = 7,014 \text{ m}\Omega \quad (17)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(0,0254 \Omega)^2 - (7,014 \text{ m}\Omega)^2} = 24,2 \text{ m}\Omega \quad (18)$$

Koska simulointimalliin ei voida syöttää oikosulkureaktanssia sellaisenaan, muunnetaan se oikosulkuinduktanssiksi L_k :

$$X_k = 2\pi f L \Leftrightarrow L = \frac{X_k}{2\pi f} = \frac{24,4 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 77,7 \mu\text{H} \quad (19)$$

Koska poikittaishaaran komponentit ovat erittäin paljon suurempia, voidaan ne jättää huomioimatta, koska vaikutus itse simulointimallissa on vähäinen. Tällöin muuntajan yksivaiheisesta sijaiskytkennästä muodostuu seuraavan kuvan mukainen (kuva 7).



Kuva 7 Muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä, simulointimalli

3.3 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensoinnin mallinnus perustuu Vääräkosken estokelapariston Hämeen Sähkö Oy:n suorittamiin tarkastusmittaustuloksiin (liite 9). Verrattaessa mitaustuloksia Nokian Capacitorsin spesifikaatioon (liite 2), huomataan kondensattoriportaiden kapasitanssiarvoissa suuret erot. Tämä johtuu siitä, että estokelaparisito on kolmiokytkentäinen, mutta Nokian Capacitors ilmoittaa spesifikaatiossaan niin sanotun tähtikapasitanssin, joka on valmistajan mukaan kaksi kertaa niin sanottu kolmiokapasitanssi. Tällöin mittaustulokset ja pariston spesifikaatio täsmäävät varsin hyvin, kuten taulukosta 3 voidaan havaita.

Taulukko 3 Ilmoitettujen ja mitattujen kompensointiyksiköiden arvot

Portaat nro.	Teho Q kvar	Valmistaja		Mitattu	
		C_{Δ} μF	I_n A	C_{Δ} μF	I_n A
1	25	231	42,2	223	44
2	25	231	42,2	225	44
3	50	462,5	84,4	447	88
4	50	462,5	84,4	446	88
5	50	462,5	84,4	445	88

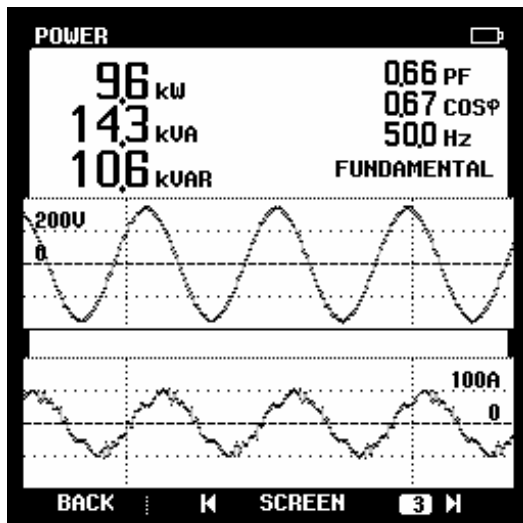
Taulukossa 3 on mitattujen kapasitanssien (mittaukset aina kahden vaiheen väliltä) arvoista laskettu keskiarvot. Koska mitatut ja valmistajan ilmoittamat kolmiokapasitanssin arvot vastaavat varsin hyvin toisiaan, voidaan simuloinnissa käyttää esimerkiksi mitattuja arvoja.

3.4 Pääkiskosto ja jakokeskukset

Mallinnettaessa jakokeskuksia, merkittävää on, että erilaisissa käyttötilanteissa keskusten sisältämät lähdöt eivät ole juuri koskaan samassa tilassa. Toisin sanoen esimerkiksi jakokeskuksen JK 1 taajuusmuuttajista tai muusta kuormasta vain osa saattaa olla käytössä. Tämän vuoksi esimerkinomaisesti otettiin Fluke 43 -analysointilaitteella eräästä käyttötilanteesta syyskuussa 2006 kytkentätilanne, jolloin mitattiin jakokeskusten kuormitukset. Tämän perusteella laskettiin jokaiselle jakokeskukselle reaktanssi- ja resistanssiarvot, joita voitiin myöhemmin hyödyntää simuloinnissa. Luonnollisesti eri käyttötilanteissa kyseessä olevat arvot muuttuvat kuormitusten mukaan.

3.4.1 Mittaukset

Esimerkkinä mallinnetaan jakokeskus JK 1. Pääkeskuksen JK 1 -lähdön kuormitus mitattiin Fluke 43 -analysointilaitteella ja todettiin, että kuormitus on käytännössä symmetrinen. Yhden vaiheen kuormitusmittaustulokset on esitettyä kuvassa 8.



Kuva 8 Jakokeskus JK 1:n kuormitusmittaukset, mittalaite Fluke 43

3.4.2 Mallintaminen

Kuormitusmittausten (kuva 8) perusteella voidaan määrittää JK 1:n resistanssi- ja reaktanssiarvot, toisin sanoen selvittää, kuinka keskus ”näky” pääkiskostosta katsottaessa. Kuvasta 8 selviää myös, kuinka taajuusmuuttajakäytöt rikkovat virran käyrämuodon, jolloin yliaaltopitoisuus muodostuu 6-pulssisillan periaatteiden mukaan. Tällöin varsinkin 5. yliaallon vaikutus näkyy. Seuraavassa esimerkissä lasketaan yksivaiheinen malli jakokeskuksesta. Kuormitusresistanssi R_{kuorm} saadaan laskettua yksivaiheisesta tehosta seuraavasti:

$$R_{\text{kuorm}} = \frac{U_{\text{v}}^2}{P} = \frac{(230 \text{ V})^2}{9,6 \text{ kW}} \approx 5,51 \Omega \quad (20)$$

Induktiivinen reaktanssi X_L lasketaan yksivaiheisen loistehon kautta:

$$X_L = \frac{U_{\text{v}}^2}{Q} = \frac{(230 \text{ V})^2}{10,6 \text{ kvar}} \approx 4,99 \Omega \quad (21)$$

Tämä muunnetaan käyttökelpoisempaan muotoon, eli induktanssiksi L yhtälön (9) perusteella.

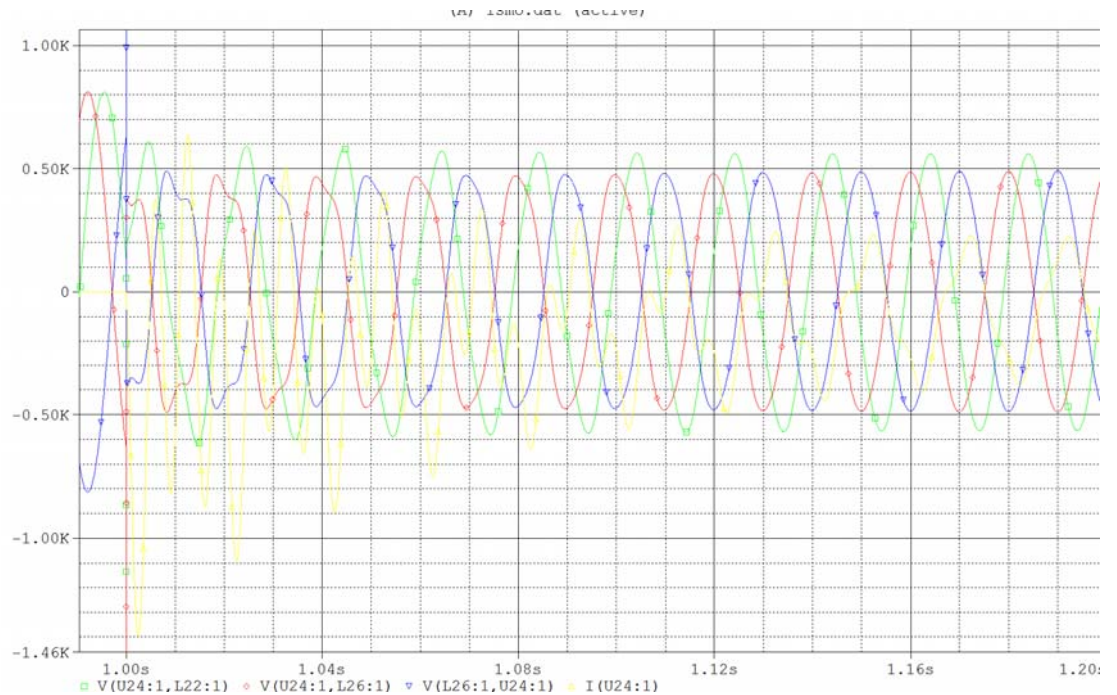
$$X_L = \omega L \Rightarrow L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4,99 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} \approx 15,89 \text{ mH}$$

3.5 Valmis simulointimalli ja simulointitulokset

Liitteessä 6 on esitetty valmis simulointimalli. Muuntajan mallinnuksessa käytettiin sijaiskytkennän komponenttien lisäksi rinnankytkettyinä sulkeutuvia ja avautuvia koskettimia, joilla saatiin mallinnettu verkon jälleenkytkentöjä.

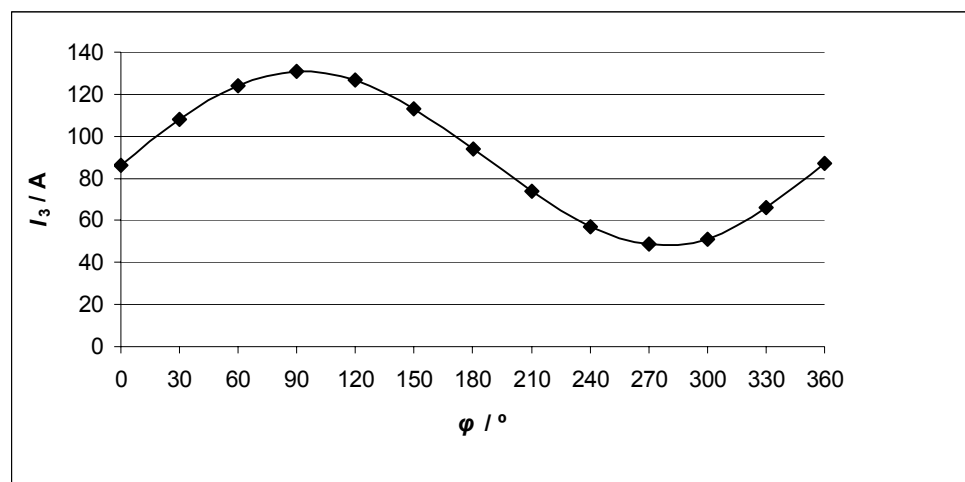
3.5.1 Jälleenkytkentätilanteen mallinnus

Simuloitaessa ongelmaksi muodostui verkon ideaaliset, jäykät jännitelähteet, jolloin transienttikytkentäilmiöitä ei tapahdu. Lisäksi induktanssit ovat lineaariset, vaikka todellisessa tapauksessa kyllästyksen vaikutus näkyy. Sen sijaan verkon jälleenkytkentätilanteessa mittauksissakin havaittu kolmas yliaalto näkyy selvästi (kuva 9). Kuvassa 9 on muuntajan ja verkon liittymispisteen yhden vaiheen virta (keltainen väri), jossa kyseessä oleva yliaalto näkyy. Tämä johtuu muuntajan reaktanssin magnetointivirrasta. Lisäksi jokainen vaihejännite säröytyy kytkentähetkellä, jonka jälkeen jäykät jännitelähteet ”puskevat” jännitteet väkisin sinimuotoisiksi. Tällöin virta säröytyy. Kompensointikondensaattoreiden kapasitanssit muodostavat tällöin resonanssipiirin verkon ja muuntajan induktanssien välillä.



Kuva 9 Verkon jälleenkytkentä. Kuvassa vaihejännitteet ja yhden vaiheen virta

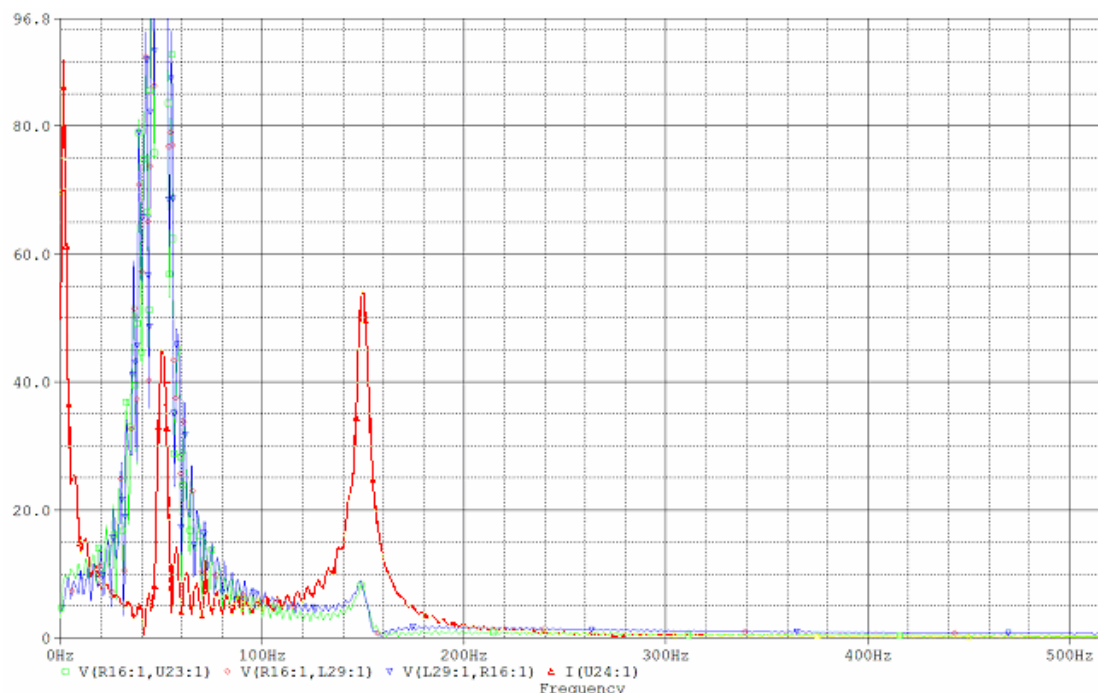
Verkon jälleenkytkentätilanteita tutkittiin eri nollavaihekulmilla. Seuraavassa esimerkitapauksessa kompensointiteho on 75 kvar ja kuormituksen teho noin 120 kW. Kuvasta 10 selviää kytkentävaihekulman (muuntajan ja generaattoreiden vaihekulmien ero) vaikutus yliaaltosäröön, jolla puolestaan on vaikutusta käytännössä jännitesäröön ja transienttiylijännitteen suuruuteen.



Kuva 10 Kolmannen yliaallon osuus vaihe-eron kasvaessa

Kuvasta 10 havaitaan, kuinka kolmannen yliaallon kytkentävirtasysäys on suurimmillaan saarekeverkon ja jakeluverkon vaihe-eron ollessa 90 astetta. Kuvan virta-

arvot ovat jälleenkytkentätilanteesta 200 ms asti Fourier-analyysillä otettuja keskiarvoja. Todennäköisesti nollavaihekulmalla oltaisiin minimiarvossa, mutta simuloitumallin generaattoreiden induktanssit viivästävät generaattoreiden todellista vaihekulmaa, jolloin malliin aseteltu nollavaihekulma on ideaalisen jännitelähteen vaihekulma. Näin ollen maksimiarvokin on todennäköisesti 180 astetta, vaikka kuvaajassa se onkin 90 asteen kohdalla. Seuraavassa kuvassa (kuva 11) on erään kytkentätilanteen Fourier-analyysi, josta näkyy kolmannen yliaallon osuus selvästi.



Kuva 11 Jälleenkytkentähetken yliaallot, punainen väri vaihevirta

3.5.2 Kompensointitehon vaikutus

Kompensointitehon vaikutusta tutkittiin tilanteessa, jossa vakiokuormitukseen kytkettiin kaksi eritehoista (50 kvar ja 100 kvar) kompensointia. Tällöin tehtiin pika-jälleenkytkentä 0,5 s, jonka aikana verkko oli saarekkeessa. Kuormitus oli molemissa sama, laskennallisesti noin 120 kW nimellisjännitteellä. Liitteen 7 kuvassa 1 on tilanne, jossa kompensointiteho on 50 kvar. Tällöin laskennallinen pääjännitteen tehollisarvo on noin 365 V, eli jännite putoaa hieman. Vastaavasti kompensointite-

hon ollessa 100 kvar (liitteen 7 kuva 2), pääjännitteen tehollisarvo nousee noin 1046 V:iin.

Ilman kompensointia pääjännitteen tehollisarvo laski noin 267 V:iin (liitteen 7 kuva 3). Todellisuudessa generattorit putoaisivat pois magnetoinnin katkeamisen takia, mutta simulointimallissa on ideaaliset jännitelähteet. Joka tapauksessa kondensaattoreiden ja generaattoreiden induktanssien välille muodostuva resonanssi jää näin ollen pois, jolloin jännitetaso putoaa huomattavasti.

Käytännössä tuloksiin ei voida täysin luottaa, koska kyseessä on ideaalisilla komponenteilla toteutettu simulointi. Kuitenkin ylikompensoinnin vaikutus näkyy jännitettä nostavana tekijänä, jolloin todellisessakin tilanteessa sillä on vaikutusta. Näin ollen tuloksia voidaan pitää suuntaa-antavina.

4 MITTAUKSET

Tässä luvussa raportoidaan tehdyt mittaukset, joita ovat verkkoanalysointimittaukset jätevedenpuhdistamolla ja laboratoriokoe oikosulkumoottorin generaattorikäytöstä.

4.1 Verkkoanalysointi

Jätevedenpuhdistamolla suoritettiin mittauksia, joissa jakeluverkko kytkettiin hetkellisesti pois. Tällöin mitattiin pääkiskostosta, kuinka jännite ja virta käyttäytyvät kytkentätilanteessa. Mittaukset suoritettiin Fluke 434 -kolmivaiheisella sähkönlaadun analyysointilaiteella sekä Lem Topas 1000 -analyysointilaiteella. Mittausajankohtina oli 1.12.2006, jolloin käytössä oli Fluke 434 -analyysointilaite ja 2.2.2007, jolloin käytössä oli Lem Topas 1000. Mittausajankohtina pelkästään toinen generaattori (38 kW) oli käytössä, koska pienemmästä generaattorista oli palaneet käämitykset keväällä 2006. Ensimmäisenä mittausajankohtana huomattiin Fluke 434:n näyttövirheiden riittämättömyys, jonka vuoksi mittaukset suoritettiin uudelleen Lem Topas 1000 -analyysointilaiteella.

Verkkoanalysointimittausten lisäksi haluttiin varmistaa, että laitoksen maadoituselektrodi on kunnossa, jonka vuoksi mitattiin kääntömenetelmällä maan ominaisresistanssi.

4.1.1 Mittalaitteiden spesifikaatiot

Fluke 434 -sähkönlaatuanalyysointilaite

Fluke 434 on kolmivaiheinen sähkönlaadun analyysointilaite, jota käytetään yleisesti sähköverkon häiriöiden ja kuormitusten mittaamiseen. Mittarin soveltuvuutta nopeisiin kytkentämuutoksiin voidaan arvioida siltä pohjalta, että jännitteen ja virran

nauhoitustoiminto päivittää tehollisarvot 10 ms välein. Tällöin erittäin nopeat kytkentätransientit saattavat jäädä taltioimatta.

Chauvin Arnoux 6425 -maadoitusresistanssin mittari /6/

Chauvin Arnoux 6425 -mittarilla voidaan mitata maadoitukset ja maan ominaisvastukset joko sarja- tai käännepistemittausmenetelmällä. Menetelmien soveltuvuutta on arvioitu lähteessä /6/, jonka perusteella voitiin olettaa että mittari on käypä rakennusten maadoitusten mittaamiseen.

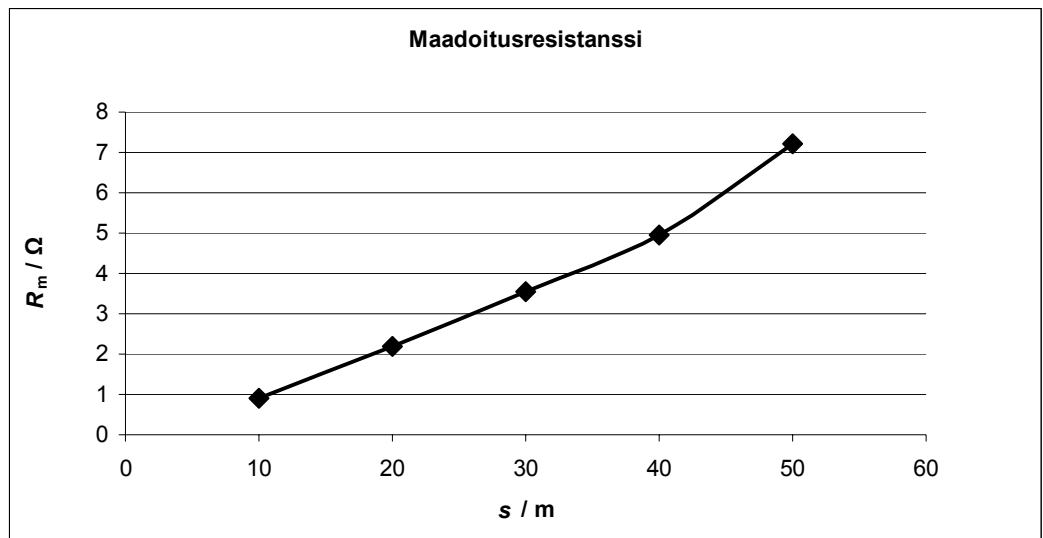
Lem Topas 1000 -sähkönlaatuanalysointilaite

Lem Topas 1000 on 8-kanavainen sähkönlaadun analysointilaite, jolla on erittäin nopea prosessori, näytteenottotaajuuden ollessa maksimissaan jopa 10 MHz /3/. Tällöin pystytään löytämään käytännössä kaikki sähköverkon ongelmatilanteet, mikäli vain mittausajankohta osoittautuu oikeaksi. Kytkennässä käytettiin kuitenkin muistiosilloskooppitoimintoa, jonka näytteenottotaajuus on 6,4 kHz / kanava. Tämäkin on käytännössä aivan riittävä nopeus (128-kertainen verrattuna 50 Hz -perustaaajuuteen), koska suuremmat näytteenottotaajuudet on tarkoitettu lähinnä signaalianalysointiin.

4.1.2 Laitoksen maadoituksen mittaus

Koska laitoksen ympärillä on huomattava määrä voimajohtoja (liite 1) ja maasto-olosuhteet hankalat mittausjärjestelyille, tehtiin maadoitusmittaus 50 m virta-apuelektrodilla. Suositeltava mittausjohtimien pituus olisi Suurosen /6, s. 27/ mukaan 100 m, koska virta-apuelektrodin etäisyyden tulisi olla 4 kertaa maadoituselektrodin pituus. Yleisesti maadoituselektrodi on pituudeltaan 25 metriä, jonka vuoksi kyseinen 100 m pituus olisi optimaalinen.

Maadoitusresistanssi mitattiin laitoksen pääkeskuksesta suuntaan etelä-lounas ja tulokset kirjattiin 10 m välein. Mittaustuloksista piirrettiin maadoitusresistanssin ominaiskäyrä $R_m = f(s)$ (kuva 12).



Kuva 12 Vääräkosken jätevedenpuhdistamon maadoitusresistanssin ominaiskäyrä

Kuvan 12 maadoitusresistanssin ominaiskäyrästä voidaan käännepistemethodän perusteella määrittää ominaisresistanssi, joka saadaan käyrän käännepisteestä. Tällöin voidaan arvioida resistanssin olevan $R_m \approx 5 \Omega$. Arvioitaessa tulosten luotettavuutta, on todettava että mahdollisia virhetekijöitä saattaa syntyä keskijänniteverkon ilmajohtojen takia, koska ne sijaitsevat varsin lähellä mittauskohdtaa. Joka tapauksessa tulos on suuntaa-antava; ainakin tuloksesta voidaan päätellä, että maadoituselektrodi on ehjä. Lisäksi lähteestä /9/ löytyy maininta: ”mikäli maadoitusolosuhteet sallivat, maadoituselektrodin resistanssin tulisi olla enintään 100Ω ”.

/9, s. 265./

4.1.3 Jakeluverkon poiskytkennät

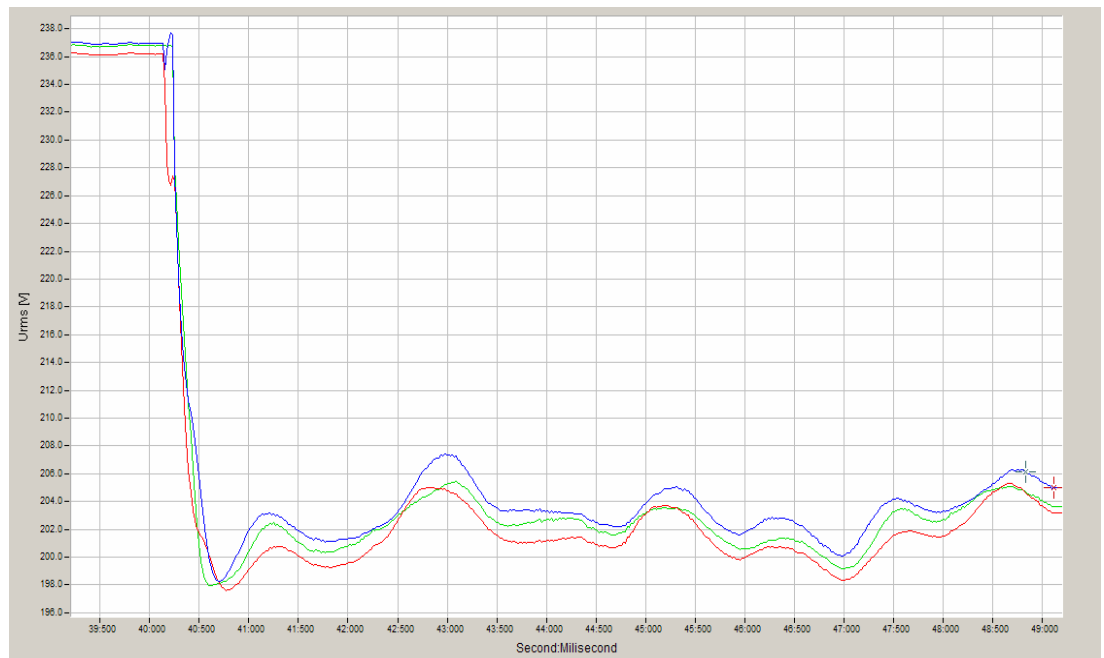
Varsinaiset verkkoanalysointimittaukset tehtiin tilanteissa, joissa jakeluverkon edustaja antoi muuntajalta katkon. Näissä tilanteissa tutkittiin 38 kW generaattorin (toinen generaattori oli tutkinta-ajankohtana pois käytöstä palaneiden käämitysten takia) käyttäytymistä jännitekatkon aikana.

Mittaukset suoritettiin siten, että Kymenlaakson Sähkö Oy:n edustaja antoi muuntajaerottimelta katkon, jonka aikana tutkittiin analysaattoreilla generaattorin käyttäytymistä. Analysaattorit kiinnitettiin pääkiskostossa generaattorin syöttöön.

Nokian Capacitors Oy avusti mittauksissa lainaamalla Lem Topas 1000 -analysaattoria ja mittausassistenttia. Mittauksissa simuloitiin erilaisia kuormitustilanteita kytkemällä tietynlaisia kuormituksia päälle eri mittaustilanteissa. Näitä olivat PJK:n simuloinnit, saarekekäyttötilanteet, kompensoinnin poiskytkennät ja epäsymmetriset kuormitustilanteet. Tehoelektroniikkalaitteet jouduttiin sammuttamaan, koska niille ei haluttu aiheuttaa ongelmia mahdollisissa häiriötilanteissa.

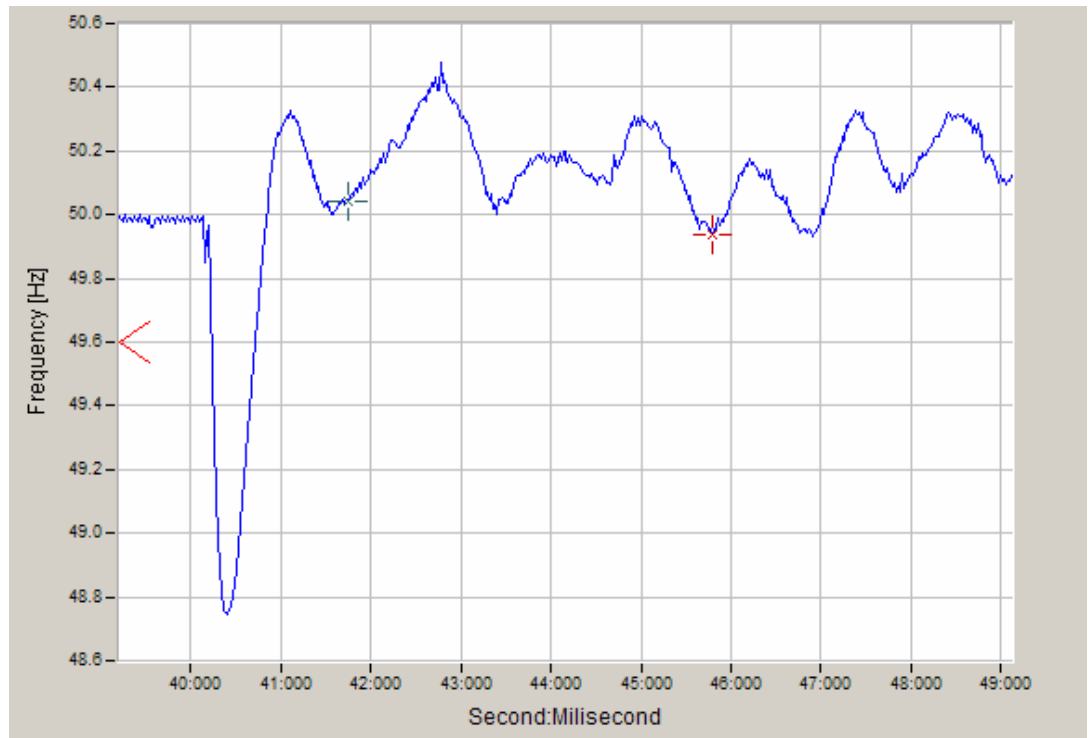
Saarekekäyttö

Saarekekäyttötilanteessa laitoksen verkko on irrallaan valtakunnan verkosta, jolloin ilman jännitteen- ja taajuudensäätöyksikköä oleva epätahtigeneraattori ei pysty pitämään nimellisjännitteen mukaista jännitetasoa kuormituksen muuttuessa. Kuviteltua saarekekäyttötilannetta simuloitiin tilanteessa, jossa sähköverkosta otettava teho oli 6 kW ja loput tuotettiin epätahtigeneraattorilla. Tällöin kompensointitehoa oli 75 kvar. Seuraavassa kuvaajassa (kuva 13) on tilanne, jossa muuntajaerottimelta tehdään katko hetkellä $t = 250$ ms.



Kuva 13 Vaihejännitteen tehollisarvo U_{rms} ajan funktiona, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvasta 13 havaitaan, kuinka jännitteen tehollisarvo U_{rms} muuttuu noin 236 voltista keskimäärin noin 200 volttiin. Suojalaitteet eivät havahdu näin suuresta jännitteen muutoksesta, vaan verkko jää käymään saarekkeelle.

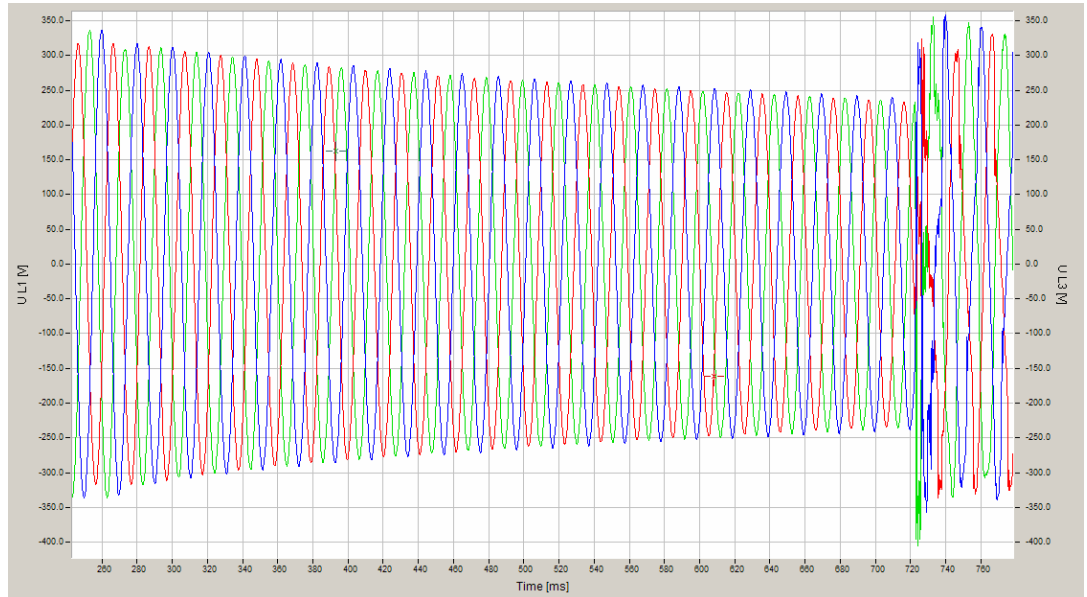


Kuva 14 Laitoksen sähköverkon taajuuden käyttäytyminen saarekekäyttötilanteessa, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvassa 14 on samaisen saarekekäyttötilanteen taajuuden käyttäytyminen. Kuvasta havaitaan taajuuden nopea lasku $f \approx 48,7$ Hz tasolle, joka johtuu generaattorin kokemasta nopeasta momentti-iskusta. Tämän jälkeen staattori vetää roottorin takaisin tahtiin, mutta taajuus jää silti värähtelemään noin $\pm 0,2$ Hz toleranssilla.

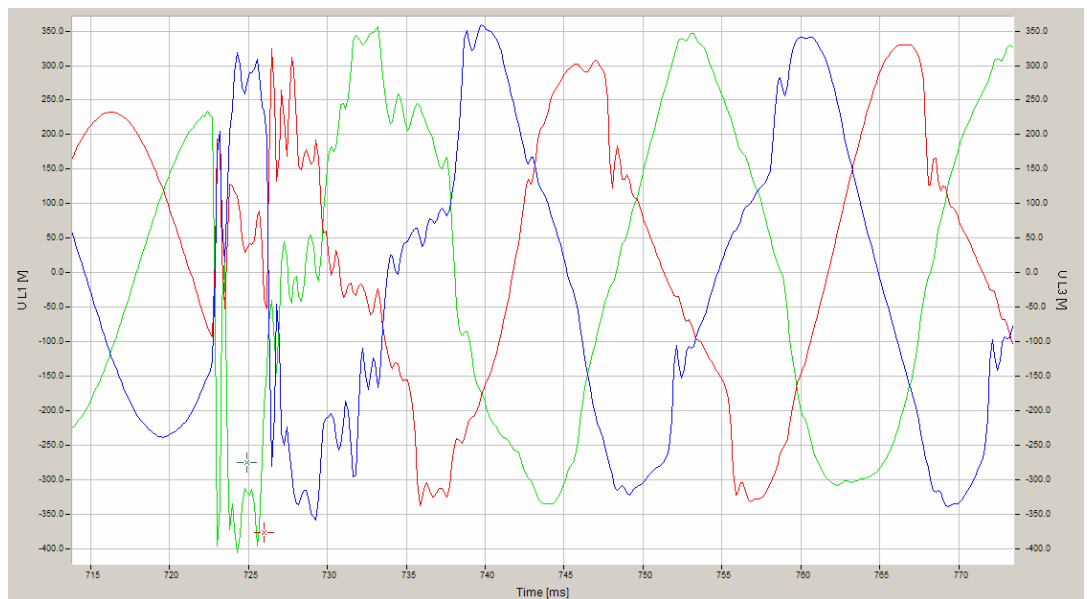
PJK:n simulointi

Sähköverkon PJK:n asetusarvo on Vääräkosken lähdössä 0,5 sekuntia (jännitteetön aika) /19/. Koska PJK:n tekeminen katkaisijalla on muiden samassa johtolähdössä olevien asiakkaiden vuoksi hankalaa, tehtiin PJK muuntajaerottimelta käsin, tavoitteena saada asetusarvon suuruinen jännitteetön aika. Käytännössä tässä päästiin varsin lähelle, kuten kuvasta 15 havaitaan.



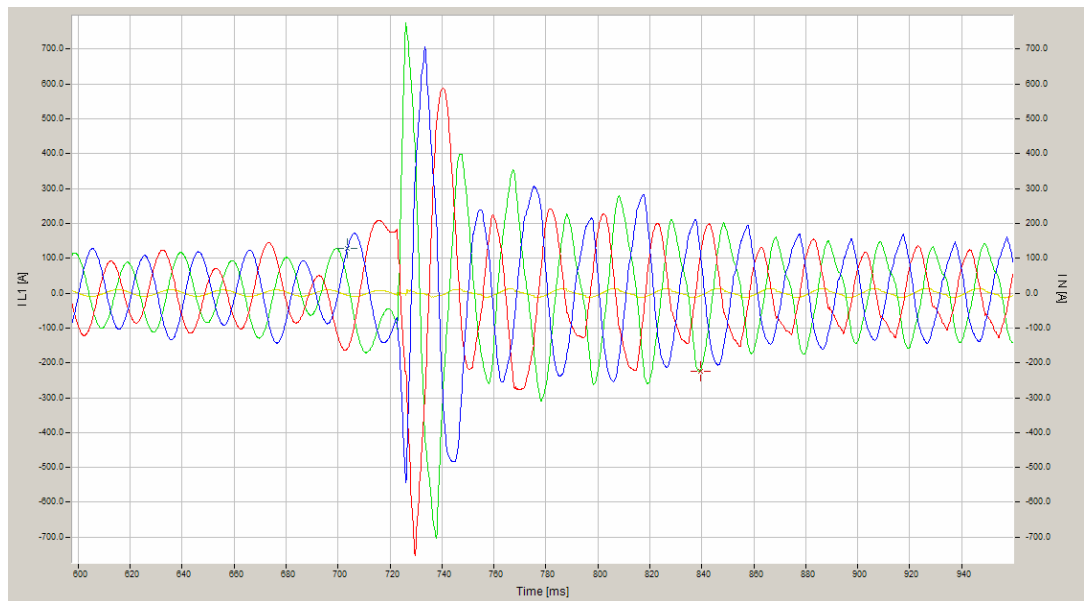
Kuva 15 PJK 460 ms. Vaihejännitteet ajan funktiona, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvassa 15 generaattori ei irtoa verkosta, jolloin jakeluverkon kytkeytyessä takaisin syntyy kytkentätransientti. Transientin suuruus on huippuarvoltaan $u_p \approx 415 \text{ V}$, joka vastaa 25 % ylijännitettä verrattuna normaaliin jakelujännitteen huippuarvoon $u_p = 325 \text{ V}$. Nokian Capacitorsin mukaan /16/ tämän suuruinen ylijännite voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi tehoelektronikkalaitteissa, jotka voivat häiriintyä ja joissa saattaa esiintyä virhetoimintoja.



Kuva 16 PJK 460 ms. Kytkentätransientit sähköverkon jälleenkytkennän tapahduttua, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvassa 16 on sama tilanne kuin kuvassa 15, mutta tarkennettuna jälleenkytkentä-ajanhetkeen $t = 723$ ms. Kuvassa havaitaan selkeitä kytkentätransientteja ja vaihejännitteen säröytyminen. Vielä usean jakson kytkentäajankohdan jälkeen jännitteen käyrämuodossa on havaittavissa kolmatta yliaaltoa. Yliaallon syy on todennäköisesti se, että 20 kV keskijänniteverkossa avattava muuntajaerotin ei sulje muuntajaa pois laitoksen verkosta. Tällöin muuntajan reaktanssien kautta kulkee magnetointivirta, joka jälleenkytkennän tapahtuessa saa aikaan resonanssin.

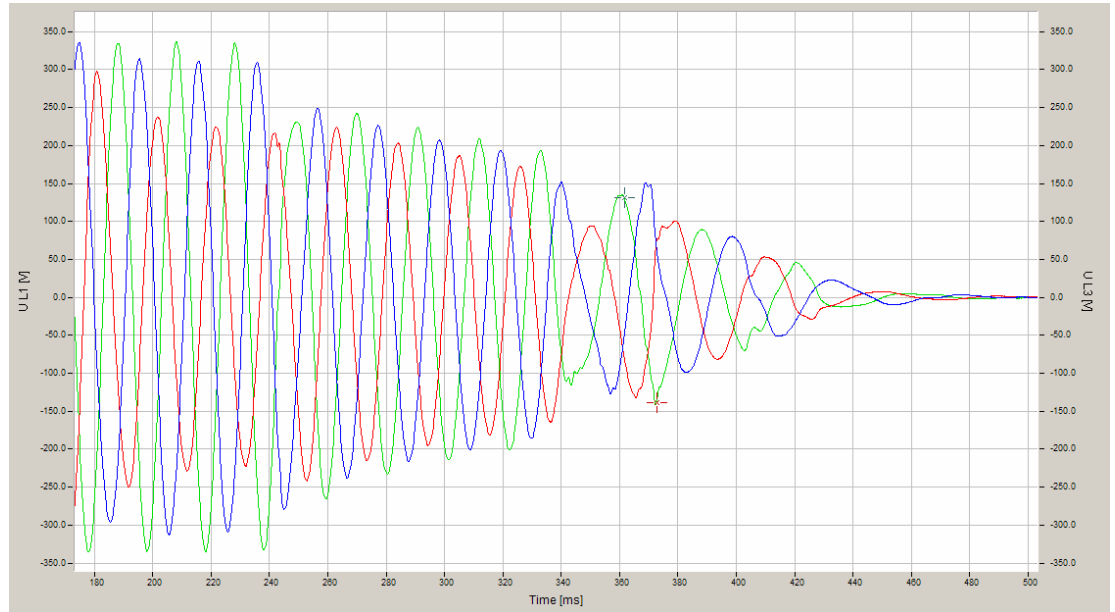


Kuva 17 PJK 460 ms. Jälleenkytkentähetken tasoitusvirrat

Kuvassa 17 on edelleen sama jälleenkytkentätilanne. Kuvasta voidaan havaita vaihevirtojen käyttäytyminen, jolloin kytkentähetkellä $i_p \approx 765$ A. Suuri virtasysäys johtuu jakelu- ja saarekeverkon vaihe-erosta, jolloin tasoitusvirran jälkeen generaattori on jälleen jakeluverkon tahdissa. Kuvaajassa on myös havaittavissa kolmatta yliaaltoa, kuten kuvassa 16.

Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrinen kuormitus saatiin aikaan siten, että osasta lämmitysryhmiä poistettiin sulakkeita, jolloin yhden vaiheen kuormitus oli selvästi pienempi. Kytkentätilanteessa kuormitus oli suuri, jolloin jakeluverkosta otettiin 60 kW (tämä siis generaattorin tuottaman tehon lisäksi) kompensointitehon ollessa 75 kvar.

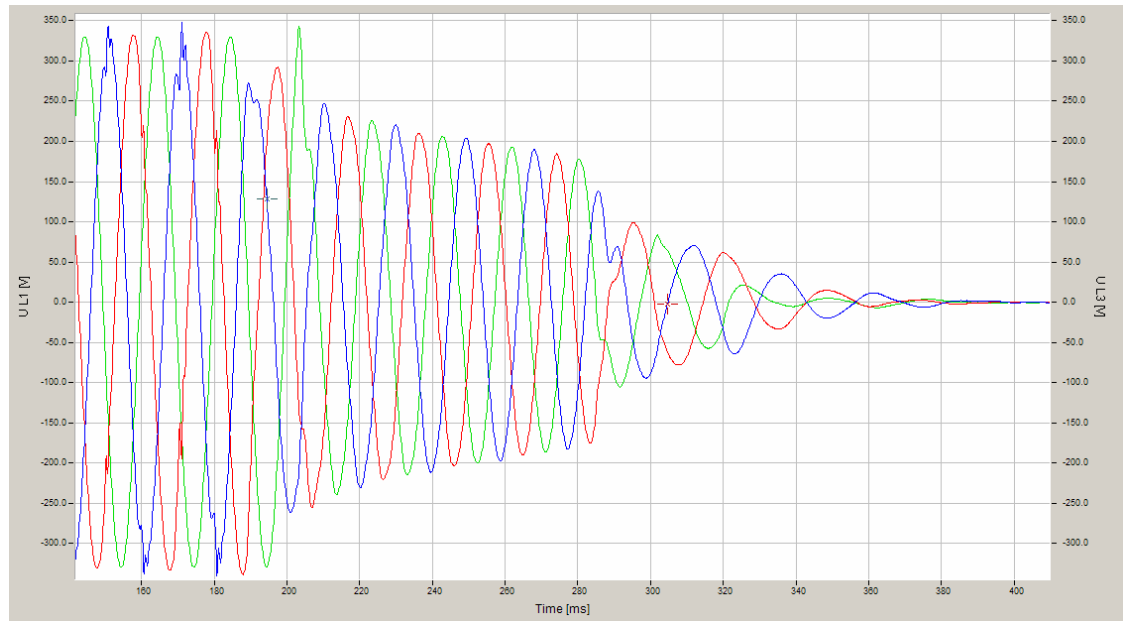


Kuva 18 Vaihejännitteet epäsymmetrisessä kuormitusilanteessa, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvassa 18 vaihe L2 (punainen) on epäsymmetriassa muihin vaiheisiin nähden. Suurella kuormituksella generaattori putoaa kuitenkin nopeasti verkosta.

Jännitekatkot kompensointi poiskytkettynä

Kompensoinnin poiskytkennän vaikutukset on esitetty kuvassa 19. Mittaustilanteessa kuormitus pidettiin erittäin pienenä, jolloin generaattori syötti tehoa jakeluverkkoon päin 11 kW. Muuntajaerottimelta annettiin jännitekatko alkaen hetkellä $t = 180$ ms.

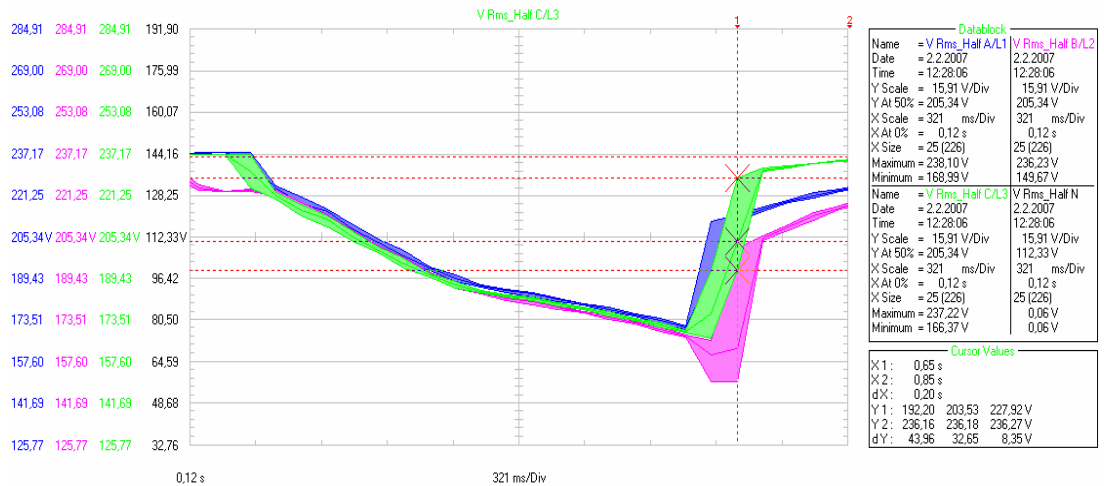


Kuva 19 Vaihejännitteiden käyttäytyminen kompensointi poiskytkettynä, mittalaite Lem Topas 1000

Kuvasta 19 havaitaan, kuinka generaattoreiden jännite alenee hallitusti kohti nollassa, joskin jännitetasolta $u_p \approx 160$ V alkaen jännitteen aleneminen kiihtyy mahdollisesti staattorin remanenssivuon kumoutuessa. Joka tapauksessa tuloksista voidaan päätellä, että generaattori ei voi ylläpitää jännitettä, koska tarvittavaa magneetointia ei saada kompensointikondensaattoreilta.

Verkkoanalysaattoreiden vertailu

Koska ensimmäisissä Fluke 434:lla tehdyissä mittausjärjestelyissä ei saatu vakuuttavia tuloksia, suoritettiin verkkoanalysaattoreiden vertailu toisessa koesarjassa. Varsinainen sähkönlaatuanalysaattori oli Lem Topas 1000, jonka verrokkina oli Fluke 435. Kyseessä oleva mittalaite on käytännössä sama kuin Fluke 434, muutamilla lisäominaisuuksilla varustettuna. Seuraavassa kuvassa (kuva 20) on täsmälleen sama mittaustilanne kuin kuvassa 15.



Kuva 20 PJK 460 ms. Vaihejännitteiden käyttäytyminen ajan funktiona, mittalaite Fluke 435

Kuvasta 20 havaitaan, kuinka Fluke piirtää vaihejännitteiden kuvaajat tehollisarvojen mukaisina, jolloin kytkentätransientit jäävät havaitsematta. Näin ollen tuli todistetuksi Lem Topas 1000:n ylivertauisuus Fluke 434/435:een verrattuna nopeissa kytkentämuutoksissa.

4.2 Laboratoriokoe oikosulkukoneella

Tässä luvussa on tarkoitus esittää Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa tehtyjä epätahtigeneraattorimittauksia. Laboratoriossa tutkittiin 2,2 kW:n oikosulkukonetta generaattorikäytössä erilaisilla kuormituksilla ja tehtiin jakeluverkon poiskytkentöjä. Kokeessa käytettiin hyväksi kevään 2006 ”Sähkökoneet” -opintojakson oikosulkumoottorimittauksia, joista saatiin määritettyä yksivaiheisen sijaiskytkennän parametrit.

4.2.1 Sijaiskytkennän parametrien määrittäminen

Epätahtikoneen yksivaiheisen sijaiskytkennän parametrien määrittäminen tehtiin kevään 2006 laboratoriomittausten pohjalta (liite 8). Kyseisissä mittauksissa tehtiin oikosulkukoneelle tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeet, joista saadaan laskettua tarvittavat arvot.

4.2.2 Magnetointikondensaattoreiden mitoitus

Jotta oikosulkugeneraattori tuottaisi vaadittavan jännitteen, kondensaattorien on pystyttävä syöttämään tyhjäkäyntikäyrän edellyttämä magnetointivirta /26/. Taulukossa 4 on esitettyä mittauksissa käytettävän SEW Eurodrive 2,2 kW -oikosulkumoottorin leimausarvot. Näiden perusteella voidaan määrittää tarvittava nimellismagnetointi.

Taulukko 4 Tutkittavan epätahtikoneen leimausarvot

Nimellisteho	$P_N = 2,2 \text{ kW}$
Nimellisjännite (Y)	$U_N = 400 \text{ V}$
Nimellisvirta	$I_N = 4,9 \text{ A}$
Tehokerroin	$\cos\varphi = 0,83$
Nim. pyörimisnopeus	$n_N = 1410 \text{ rpm}$

Lasketaan ensin generaattorin ottama magnetointivirta I_m nimellisjännitteellä

$U_N = 400 \text{ V}$:

$$Q_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sin\varphi}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{3} \quad (22)$$
$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 4,9 \text{ A} \cdot \sqrt{1 - 0,83^2}}{3} \approx 631,17 \text{ var}$$

$$I_m = \frac{Q_1}{U_v} = \frac{631,17 \text{ var}}{230 \text{ V}} \approx 2,74 \text{ A} \quad (23)$$

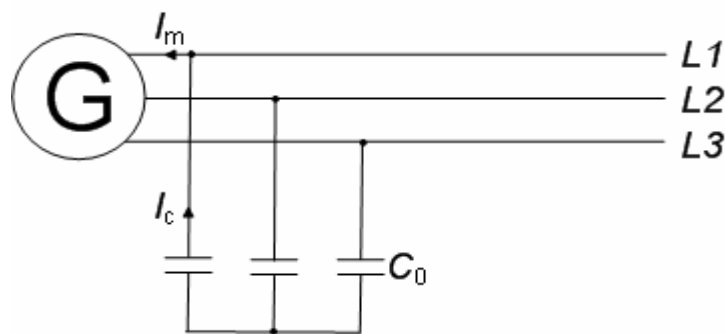
Kondensaattorille saadaan laskettua arvo yhtälöllä (6) perustuen oletettuun tyhjäkäyntivaihejännitteeseen $U_{0V} = 230 \text{ V}$ (koska kondensaattori on tähdessä, sen yli vaikuttaa vaihejännite).

$$C_0 = \frac{I_m}{2\pi f U_{0V}} = \frac{2,74 \text{ A}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 230 \text{ V}} \approx 37,9 \mu\text{F}$$

Kapasiivisena reaktanssina ilmoitettuna arvoksi tulee:

$$jX_c = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot C_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 37,9 \mu\text{F}} \approx j84 \Omega \quad (24)$$

Mikäli kondensaattorit kytkettäisiin kolmioon generaattorin rinnalle, tulisi niiden olla kolme kertaa pienempiä kapasitansseiltaan, tällöin niiden yli kuitenkin vaikuttaa pääjännite, jota sähkölaboratorion kondensaattorit eivät jatkuvana kestä. Edellä mitoitettujen kondensaattoreiden tähtikytkentä on esitettyä kuvassa 21.



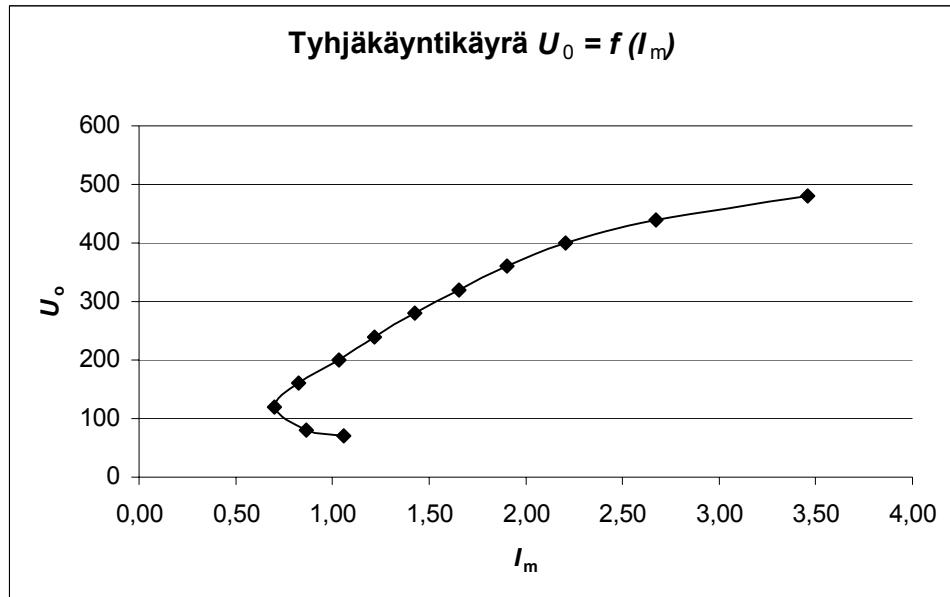
Kuva 21 Magnetoitokondensaattoreiden kytkentä epätahtigeneraattoriin

4.2.3 Generaattorin herääminen saarekekäytössä

Kuten aiemmin mainittiin (luku 3.1.1), remanenssivuo saa aikaan pienen virran kondensaattorien ja generaattorin välillä. Tämä puolestaan aikaansaa kondensaattorille jännitteen, jonka vaikutuksesta syntyy kondensaattorin ja generaattorin välille magnetoimisvirta I_m . Riittävän suurella magnetoimisvirralla generaattori herää ja alkaa tuottaa sähköä.

Aluksi tehtiin koe, jossa generaattori oli kuormittamaton. Laboratorion kondensaattoreilla ei saatu aivan edellä mitoitettun kondensaattorin reaktanssiarvoa aikaiseksi, mutta sopivalla kombinaatiolla löydettiin varsin lähellä oleva arvo, $j96,6 \Omega$. Tällöin generaattorin pääjännite nousi arvoon $U = 436 \text{ V}$ (liitteen 5 taulukko 1). Käytännössä generaattorin heräämisen määrää tyhjäkäyntikäyrä

$U_0 = f(I_m)$, joka tässä tapauksessa on kuvan 22 mukainen. Tyhjäkäyntikäyrä on määritetty liitteen 8 parametrien perusteella.



Kuva 22 Epätahtikoneen tyhjäkäyntikäyrä

Kuvan 22 perusteella voidaan havaita kyllästymisen yllättävä vaikutus pienillä tyhjäkäyntijännitteillä. Kuvasta voidaan havaita käänne piste $U_0 \approx 120$ V, jolloin tutkittavan oikosulkukoneen kohdalla magnetointivirta kasvaa. Tällöin tapahtuu magneettisen kyllästymisen vaikutuksesta parametrimuutoksia ($X_m, X_{\delta 1}, X'_{\delta 2}$) koneen reaktansseissa. TKK:lla on kokeellisesti todistettu, että malli pätee suuremmillakin koneilla. Tällöin piirimallin parametreihin tulee suhtautua varauksella, koska kyllästymistä ei oteta huomioon. /21, s. 100 - 101./

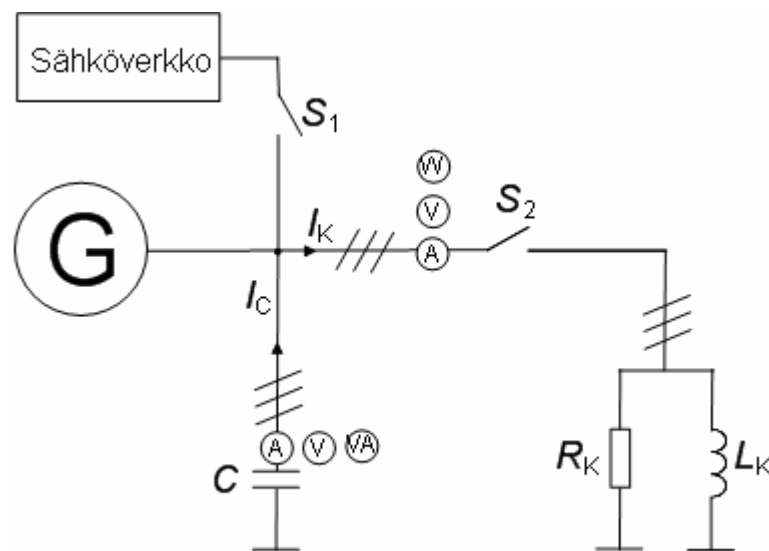
Kun magnetointikondensaattorin kapasitanssin arvoa suurennetaan, generaattorin liitinjännite nousee, jolloin tulee olla tarkkana, ettei laitteita vioiteta ylijännitteen vaikutuksesta.

4.2.4 Jakeluverkon poiskytkentä

Koska epäiltiin, että Vääräkosken ongelmat saattaisivat johtua kytkentäilmiöistä, kuten jakeluverkon jännitekatkotilanteista, tehtiin kokeita joissa jakeluverkko ajat-

tiin alas. Alkutilanteessa epätahtigeneraattoria ja jakeluverkkoa käytettiin kuormittuna rinnan, jolloin jäykkä verkko määräsi jännitetason. KytKentä oli kuvan 23 mukainen. Mittaustulokset ovat kokonaisuudessaan liitteen 5 taulukossa 1.

Erilaisilla kuormitustilanteilla pyrittiin simuloimaan tilanteita, joissa erilaisia käyttäjiä olisi kytkettynä Vääräkosken puhdistamolla ennen mahdollista jakeluverkon poiskytketymistä. Kokeessa kytkimellä S1 poiskytkettiin jakeluverkko, jolloin generaattori toimi saarekekäytössä. Mittaustuloksista voidaan päätellä, että kytkimen S1 avaamisen jälkeen generaattorin jännite nousee nopeasti kuormituksen ja magnetointikondensaattoreiden kapasitanssin määräämään tasoon (liitteen 5 taulukko 2). Nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että mitä pienempi kuormitus, sitä suurempi generaattorin liitinjännite.



Kuva 23 Jakeluverkon poiskytkentä generaattorin kuormitustilanteessa

Fluke 434:lla otettiin jännitteiden ja virtojen kuvaajia kytkentätilanteista, jolloin kytkin S1 avataan (liite 3).

Taulukko 5 Jakeluverkon poiskytkennät symmetrisellä kuormituksella

Vaihejännitteet		Kondensaattorit		Resistanssit	Induktanssit	Servo
U_{alku}	U_{loppu}	X_C	C	R	L	n
V	V	Ω	μF	Ω	Ω	rpm
233	253	70,8	45,0	800	106,3	1500
233	281	70,8	45,0	800	1060	1500
233	320	39,2	81,2	800	0	1500
233	0	70,8	45,0	53,3	1060	1500
233	285	70,8	45,0	800	106,3	1500
233	0	70,8	45,0	100	106,3	1500
233	278	70,8	45,0	400	106,3	1500

Taulukossa 5 on esitetty vaihejännitteiden muutos kytkimen S1 (kuva 23) avaamisen jälkeen. Liitteen 3 kuvassa 1 on esimerkkinä taulukon 5 mittaussarakkeen 2 jännitekäyrä, kun kytkin S1 suljetaan hetkeksi, ja avataan uudelleen ajanhetken $t = 3,2$ s jälkeen.

4.2.5 Epäsymmetria- ja resonanssitilanteet

Epäsymmetrinen kuormitus voi aiheuttaa nollajohtimeen ylimääräistä rasitusta kasvaneen virran myötä. Useimmissa käyttötilanteissa tästä ei kuitenkaan ole haittaa, mikäli kuormalaitteet eivät liiaksi sisällä kolmatta yliaaltoa tuottavia yliaaltoilaitteita. Kolmas yliaalto summautuu suoraan nollajohtimeen ja mikäli tämän lisäksi kuormitus on kovin epäsymmetrinen, nollajohdin saattaa termisesti ylikuormittua.

Erilaiset resonanssitilanteet ovat myös tavallisia sähköverkossa. Sarja- eli jännite-resonanssitilanteessa piirin reaktanssi on hyvin pieni, teoriassa $Z = R$. Tällöin resonanssikulmataajuudella ω_0 induktanssien ja kapasitanssien jännitteet saattavat nousta vaarallisen suuriksi. Mikäli keskijänniteverkossa on harmonisia yliaaltoja lähellä resonanssitaajuutta, pienjännitepuolella yliaallot moninkertaistuvat. Vastavasti rinnakkais- eli virtaresonanssissa piirin impedanssi on maksimiarvossaan. Tällöin verkon induktanssit ja kapasitanssit vahvistavat verkossa olevia yliaaltoja, jolloin jännitesärö vahvistuu ja vahvistuneet virrat kuormittavat termisesti verkkoa.

Resonanssimittaukset

Tilanteessa, jossa induktanssit ovat kapasitanssien kanssa rinnan kytkettyinä, on sarjaresonanssiipiiri. Tällöin jakeluverkon kytkeytyessä pois, generaattoreiden jännite nousi huomattavasti pienemmäksi kuin rinnakkaisresonanssiipiirissä (liitteen 5 taulukko 3, tilanteet A ja B). Tällöin myös nollajohtimen jännite jäi pienemmäksi. Tähän tosin saattoi vaikuttaa se, että kuormitus ei ollut täysin symmetrinen ja suurempi vaihejännitteen nousu nosti nollajännitteen tasoa samassa suhteessa, kun kyse oli rinnakkaisresonanssista. Liitteen 3 kuvassa 2 on sarjaresonanssiipiiristä kytkentäkuva ja kuvassa 3 rinnakkaisresonanssista.

Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrisenä kuormituksena käytettiin resistanssia $R = 200 \Omega$ yhteen vaiheeseen kytkettynä. Lisäksi jokaisessa vaiheessa oli resistiivinen kuormitus. Tilanteessa, jossa kapasitanssi on suurempi ja induktanssi pienempi (tilanne C), vaihejännitteen nousu on huomattavasti suurempi kuin tilanteessa E. Tällöin myös nollapisteen jännite nousee suuremmaksi. (Liite 5)

Nollajohtimen kuormitus

Edellä mainittujen kokeiden lisäksi tehtiin vielä yksi testi, jossa simuloitiin tilannetta, jolloin generaattorin tähtipisteeseen kytketty nollajohdin jostain syystä menee poikki. Tuloksista voidaan havaita, että tällöin kytkennän nollapisteen jännite nousee noin 41 voltista 52 volttiin saarekekäyttötilanteessa (liitteen 3 kuva 4). Täten voidaan todeta, että tähtipisteeseen kytketty nollajohdin stabiloi hieman tilannetta.

4.2.6 Jakeluverkon jälleenkytkentä

Jakeluverkon jälleenkytkentä on tyypillinen kytkentätransientteja aiheuttava tilanne. Jakeluverkon poiskytkentätesteissä tehtiin myös jakeluverkon jälleenkytkentöjä, joissa tarkasteltiin mahdollisia kytkentäilmiöitä. Huomattavaa olivat suuret kyt-

kentävirtasysäykset, jotka aiheutuvat tilanteista jolloin jakeluverkon ja saarekekäytön jännitteen nollavaihekulmat eivät ole täysin samassa vaiheessa. Tällöin generaattoriin verrattuna erittäin suuren oikosulkutehon omaava jakeluverkko määrää käytännössä jännitteen ja taajuuden.

Ongelmaksi muodostui Vääräkosken mittauksissakin havaittu Fluke 434:n näytteenottotaajuuden riittämättömyys kytkentätilanteiden tallentamiseen. Tällöin nopeista kytkentätransienteista ei saanut minkäänlaista käsitystä.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA ARVIOINTI

5.1 Saarekekäytön vaikutukset

Vääräkoskella tehdyissä mittauksissa saatiin viitteitä siitä, kuinka jakeluverkon jälleenkytkentä saattaa aiheuttaa kytkentätransientteja. Mittaukset suoritettiin ainoastaan yhdellä generaattorilla, mutta kahdella generaattorilla transientti saattaisi olla huomattavasti suurempikin kuin mitattu. Tähän viittaa kahden generaattorin suurempi yhteen laskettu oikosulkuteho yhteen generaattoriin verrattaessa. Mittauksissa huomioitavaa oli jännitteen säröytyminen jälleenkytkentäajanhetken jälkeen (erityisesti kolmannen yliaallon vaikutus). Sama todettiin myös piiriä simuloimalla. Kolmannen yliaallon jännitettä nostava vaikutus riippuu pitkälti kytkentäajanhetkestä, jolloin tietyllä vaihe-erolla sen vaikutus saattaa olla suurikin.

Laboratoriomittauksissa huomio kiinnittyi siihen, että magnetoinnin kasvattaminen eli kompensointitehon lisääminen nostaa varsin nopeasti generaattorin liitinjännitteitä. Näin ollen kompensointitehon muutokset saarekekäyttötilanteessa saattavat vaikuttaa nopeasti verkon jännitetasoon. Myös simuloitaessa saatiin viitteitä, kuinka kompensointitaso vaikuttaa verkon jännitteisiin ja lisäksi huomioitavaa oli kytkentäilmiön huomattava pienentyminen kompensoinnin ollessa poiskytkettynä.

Mahdollisessa saarekekäyttötilanteessa laitoksen generaattoreiden suojarleistys ei ole ajan tasalla. Releistys pitää sisällään jännite- ja taajuusreleen, jotka ovat toiminnaltaan perinteisiä sähkömekaanisia laitteita. Tarpeeksi pienellä kuormituksella generaattorit eivät irtoa jännitekatkon sattuessa verkosta ollenkaan, vaan laitos jää saarekkeelle. Pienjänniteasennuksia käsittelevän standardin SFS-EN 6000 kohdan 5-551.7.2 mukaan: ”generaattorilaitteisto on varustettava suojalaitteilla, jotka kytkävät laitteiston irti yleisestä verkosta, jos verkkosyöttö katkeaa”/7/. Täten suojauslaitteisto ei ole enää standardin mukainen.

Saarekekäyttötilanteessa on mahdollista, että alijännitteen ollessa vähintään 10 %, laitoksen taajuusmuuttajat irtoavat verkosta, jolloin syntyy äkillinen tehovaje. Ainakin Vaconin ja Danfossin taajuusmuuttajätietojen perusteella tämä on mahdollis-

ta (10; 20). Tällöin on mahdollista generaattoreiden turbiinien ryntääminen. Tämä taas nostaa laitoksen jännitetasoa vaarallisen korkeaksi. Tällaisessa tilanteessa tosin releistys todennäköisesti toimii, mutta toimintanopeus vanhalla sähkömekaanisella ylijännitesuojalla ei ole todennäköisesti riittävän suuri. Lisäksi osa verkon kuormituksesta on jaksoittaista, jolloin saarekekäyttötilanteessa äkillinen kuormitusten puuttaminen on siltäkin perusteella mahdollista.

Mikäli kuormitus on hieman suurempi kuin generaattoreiden tuottama teho, generaattorit joutuvat syöttämään hieman nimellistä suurempaa kuormitusvirtaa, jolloin generaattoreiden ennenaikainen vanheneminen on mahdollista. Nimellistehoa suuremmalla kuormituksella generaattoreiden lämpenemä on usein suurempi kuin nimellislämpenemä.

5.2 Tuuletuksen vaikutukset

Generaattoreiden saarekekäyttö ei todennäköisesti ole ainoa laiterikkoja aiheuttava tekijä Vääräkoskella. Mittauksia tehdessä havaittiin useiden liittimien tummentuminen esimerkiksi pääkeskuksessa (kuva 24), vaikka tämä ei itsessään ollut tutkimuksen kohteena. Jätevedenpuhdistamossa ilmaan vapautuu rikkihappoa ja ammoniakkia sisältäviä yhdisteitä, jotka ilmeisesti syövyttävät kuparia /14/. Ainakin läpituuletetut taajuusmuuttajat ovat erittäin herkkiä tuuletukselle ja kontaktipintojen huonontuminen saattaa aiheuttaa virhetoimintoja ja suoranaisia laitevikoja. Tulevaisuudessa kannattaakin kiinnittää huomiota taajuusmuuttajien valinnassa paremmin suojattuihin liitoksiin ja kotelointiin.



Kuva 24 Tummentunut liitos, pääkeskuksen PK etukojelähtö

5.3 Tulosten luotettavuuden arviointi

Arvioitaessa tulosten luotettavuutta, tulee huomioida mittalaitteiden luotettavuus ja kunto, koska päätelmät perustuvat ennen kaikkea niiden avulla saatuihin tuloksiin. Pääasiallisen analysaattorina käytetty Lem Topas 1000 on tarkkuudeltaan riittävä nopeisiin transienttianalyysiin ja tämän lisäksi se myös kalibroidaan säännöllisesti. Näin ollen laitteen luotettavuutta ei ole syytä epäillä. Sen sijaan OrCAD PSpice -simuloinnin tulokset ovat ainoastaan suuntaa-antavia, joten niitä ei voida yksinään käyttää johtopäätöksissä.

6 YHTEENVETO JA RATKAISUEHDOTUKSET

Tässä tutkintotyössä perehdyttiin epätahtigeneraattoreilla toteutettuun pienvesivoimalan toimintaan ja analysoitiin mahdollisia häiriötilanteita. Vääräkosken kaltaisissa pienvesivoimaloissa epätahtigeneraattori puolustaa hyvin paikkaansa, kunhan muistetaan verkkohäiriöissä suojausten riittävä toiminta.

Sähköverkon ongelmatilanteita kartoitettiin sähkönlaatumittauksilla ja lisäksi laitoksen sähköverkosta muodostettiin OrCAD PSpice -simulointimalli, jolla tutkittiin jakeluverkon jälleenkytkennän vaikutusta laitoksen sähköverkkoon.

Mahdolliset korjaustoimenpiteet ongelmien ratkaisemiseksi riippuvat pitkälti taloudellisista seikoista. On esitetty, että voimalaitos voitaisiin mahdollisesti uusita kokonaan, mutta tämä riippuu rahoituksesta ja ympäristöluvasta, koska turbiiniallasta jouduttaisiin mahdollisesti suurentamaan suuremman tehon aikaansaamiseksi. Suositeltavaa on, että tässä vaiheessa tehtäisiin väliaikaisratkaisu, jossa generaattoreiden suojaustaso vastaisi nykypäivän vaatimuksia.

6.1 Kestomagneettigeneraattorit

Kestomagneettigeneraattori on toimintaperiaatteeltaan lähellä tahtigeneraattoria, mutta koneen pienet kestopagneetit muodostavat magneettikentän, jolloin erillistä magnetointikäymistä ei tarvita. Kestomagneettigeneraattoreiden kehittyessä on markkinoille tullut ratkaisuja, joissa generaattori kytketään verkkoon taajuusmuuttajan kautta. Tällöin erillistä tahdistusta ei tarvita ja lisäksi verkkoon käynnistyminen tapahtuu taajuusmuuttajan takia pehmeästi. Pyörimisnopeuden muutoksista ei niin ikään ole haittaa taajuusmuuttajan säätöominaisuuksien takia.

Kompensointi on myös mahdollista tuottaa taajuusmuuttajalla, joten mikäli generaattoreiden tehoa kasvatettaisiin nykyiseen nähden, ei loistehon kompensointilaitteistoa tarvitsisi uusia.

Näiden edellä mainittujen argumenttien valossa voidaan todeta, että nykyaikainen taajuusmuuttajaohjattu kestopagneettigeneraattori on erittäin käypä ratkaisu pien-vesivoimalaan. Näin ollen suositeltavaa olisi, että tehtäisiin kannattavuuslaskelmia mahdollisesta kestopagneettigeneraattoriratkaisusta.

6.2 Releistyksen uusiminen

Väliaikaisratkaisuna suositeltavaa on generaattoreiden suojareleistyksen uusiminen saarekekäyttötilanteen estämiseksi. Uusittavia releitä olisivat sekä taajuus- että jänniterele. Mittausten valossa tultiin siihen tulokseen, että nykyiset releet eivät enää toimi riittävän nopeasti mahdollisen vikatilanteen sattuessa.

Uusille releille voidaan antaa muutamia raja-arvoja, jotka perustuvat mittaustuloksiin. Vääräkosken johtolähdön mitattu sähköverkon PJK:n jännitteetön aika on 0,5 sekuntia. Tällöin generaattorit tulee saada irti verkosta ko. ajan aikana mahdollisten ongelmien välttämiseksi. Yleisesti ollaan sitä mieltä, että generaattoreiden katkaisijoina toimivien kontaktoreiden viive on noin 100 ms tämän ikäluokan (rakennettu 80-luvun alussa) laitteissa. Tällöin releiden kokonaistoiminta-aika saisi olla käytännössä noin 300 ms riittävän nopean irtikytkennän takaamiseksi.

Yleisesti voidaan olettaa, että jakeluverkon taajuus ei poikkea enempää kuin 0,1 Hz suuntaansa. Tämän johdosta taajuus-pikalaukaisu voidaan asettaa esimerkiksi 0,2 Hz yli ja alle verkon nimellistaajuuden. Tähän viittaa myös erään mittaustilanteen (kuva 14) taajuuspoikkeama saarekekäyttötilanteessa. Kuvaan 14 perustuen voidaan olettaa, että 0,2 Hz on riittävä taajuusasettelu, jolla generaattorit saadaan irti verkosta.

Jänniterajoina voidaan pitää $\pm 5\%$ verkon nimellisjännitteestä. Rajat ovat riittävät, koska mittauksissa todettiin verkon jännitetason olevan noin 235 V, jolloin pienet jännitekuopat esimerkiksi suuren moottorin käynnistyessä eivät vielä vaikuta releiden toimintaan. Lisäksi laitoksen verkko on varsin jäykkä, koska muuntaja on välitömässä läheisyydessä ja reilusti mitoitettu kuormitukseen verrattuna. Sen sijaan verkon jännitteen pudotessa 5 %, on käytännössä kyseessä jo saarekekäyttötilanne.

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Aura, Lauri - Tonteri, Antti J. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. WSOY. Porvoo 1996. 544 s.
- 2 Hietalahti, L. - Männistö, M. - Seesvuori, R. - Seesvuori, V. - Wilén, T. Yliaallot ja kompensointi. STUL ry. Espoo 2006. 110 s.+ 10 liites.
- 3 Lem Instruments. Power Network Analyser TOPAS 1000. Tekninen esite. Saksa. 8 s.
- 4 Nokian Capacitors. Estokelaparisto. Tekninen esite. 2006. 4 s.
- 5 Puusaari, Kalevi. Pienvesivoimalaitos ja epätahtikone sen generaattorina. Lisensiaatintutkimus. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Tampere 2005. 137 s. + 7 liites.
- 6 Suuronen, Matti. Maadoituksen mittaustapojen soveltuvuuden arviointi. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere 2006. 66 s. + 3 liites.
- 7 SFS-EN 6000. Pienjännitesähköasennukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2005. 387 s.
- 8 SFS-EN 60204-1. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 1998. 181 s.
- 9 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. D1 Käsikirja rakennuksen sähköasennuksista. Espoo 2006. 365 s.
- 10 Vacon NSX -taajuusmuuttajan tekniset tiedot. Vacon Oyj. 2006
- 11 Vyyryläinen, Esa. Invertteriohjattu oikosulkugeneraattori pienoisvoimalaitoksessa. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tampere 1985. 82 s + 6 liites.

Painamattomat lähteet

- 12 ABB Motors Oy. Epätahtigeneraattoreiden simulaatiot. Helsinki. 2007.
- 13 Hämeen Sähkö Oy. Tarkastuspöytäkirja. Toijala. 2006

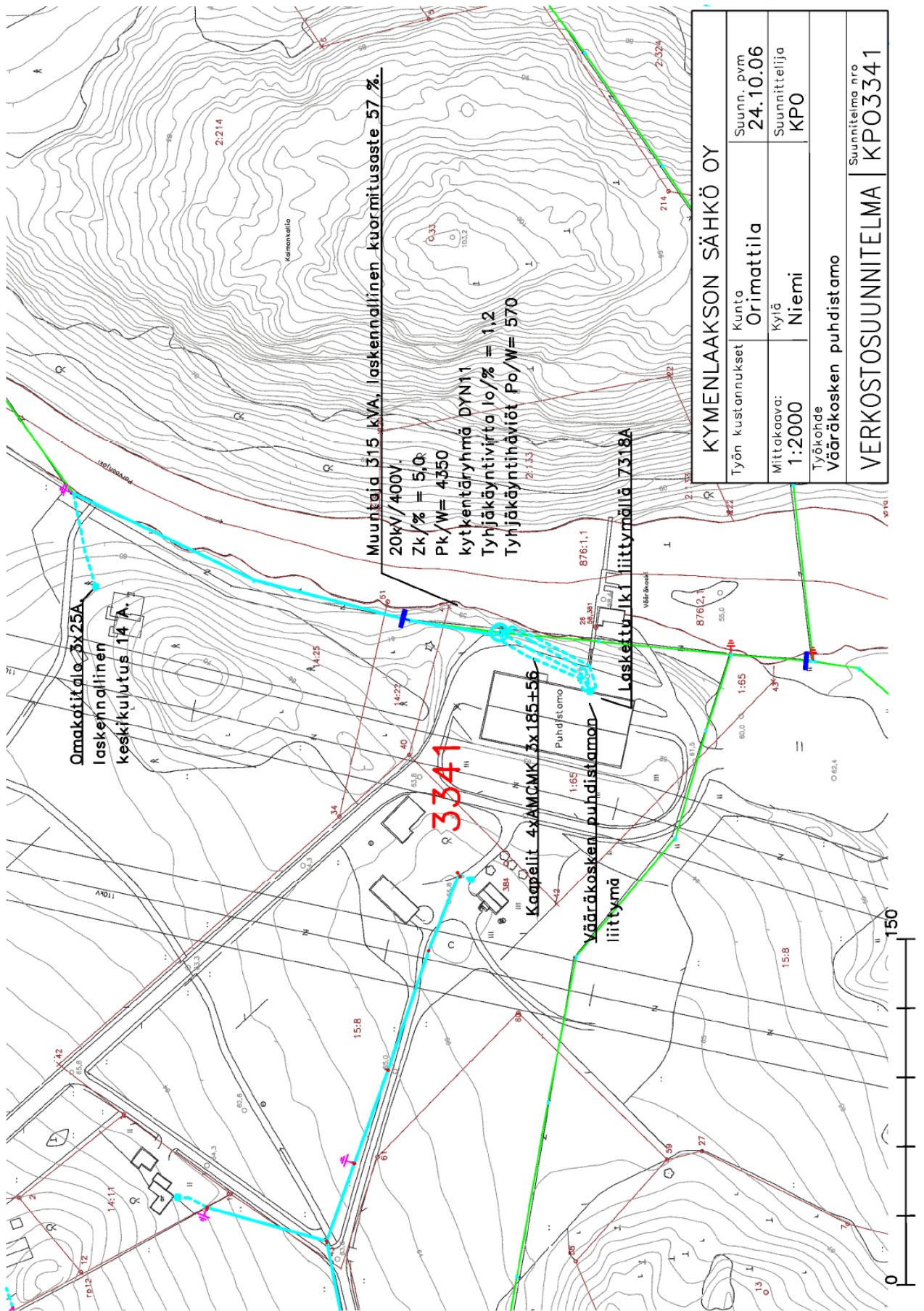
- 14 Kivikoski, Renja, laboratorioinsinööri. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähköpostikeskustelu. 14.2.2007.
- 15 Kymenlaakson Sähkö Oy. Verkostosuunnitelma, Vääräkosken puhdistamo. 2006.
- 16 Nokian Capacitors, Tampere. Luento. 8.3.2007.
- 17 Nokian Capacitors. Pienjännite estokelapariston spesifikaatio. 2004.
- 18 Pirttiniemi, Heikki, toimitusjohtaja. Waterpumps WP Oy. Puhelinkeskustelu. 20.2.2007.
- 19 Salila, Juha, verkkomestari. Kymenlaakson Sähkö Oy. Puhelinkeskustelu. 12.2.2007.
- 20 Säilä, Lauri, huoltopäällikkö. Oy Danfoss Ab. Puhelinkeskustelu. 13.2.2007.
- 21 Tekninen Korkeakoulu. Mallinnus ja simulointi sähkömekaniikassa. Luentokalvot. 2004. 124 s.
- 22 Waterpumps WP Oy. Generaattoreiden konekortti. 1983.

Sähköiset lähteet

- 24 ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita. Luku 3. [www-sivu], [viitattu 11.12.2006]. Saatavissa: [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/035_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/035_0007.pdf)
- 25 Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Sähkömoottori. [www-sivu], [viitattu 10.12.2006]. Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/sahkomoottori.html>
- 26 Teknillinen Korkeakoulu. Esimerkki 1: Kondensaattorimagnetoitu epätahtikone generaattorina. [www-sivu], [viitattu 22.11.2006]. Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Sahkomekaniikka/teaching/s17102/labrat/tyo3esim.pdf>
- 27 Teoteam. [www-sivu], [viitattu 14.1.2007]. Saatavissa: <http://www.teoteam.fi>

LIITTEET

1. Verkostokartta Vääräkosken puhdistamon liittymästä
2. Nokian Capacitors estokelapariston spesifikaatio
3. 2,2 kW Epätahtigeneraattorin laboratoriomittaukset, Fluke 434
4. ABB Motors Oy:n 30 kW ja 38 kW epätahtigeneraattoreiden sijaiskytkennät
5. Laboratoriokokeet oikosulkumoottorin generaattorikäytöstä
6. OrCAD PSpice -simulointimalli
7. OrCAD PSpice -simulointitulokset
8. 2,2 kW Oikosulkumoottorin mittaustulokset
9. Hämeen Sähkö Oy:n tarkastuspöytäkirja, estokelaparisto





SPESIFIKAATIO

PIENJÄNNITE ESTOKELAPARISTON SPESIFIKAATIO

PARISTO :

Tyyppimerkintä	D200/2*25+3*50-400-50/189-1218
Nimellisteho	200 kvar
Laajennusvara	50 kvar
Nimellistaajuus	50 Hz
Viritystaajuus	189 Hz (7 %)
Nimellisjännite	400 V
Nimellisvirta	338 A
Eristystaso	3 / - kV
Kaappi (leveys x korkeus x syvyys)	1200x1800x600 mm
Paino	~380 kg
Kotelointiluokka	IP 20C
Asennus	sisäasennus
Lämpötilaluokka	0 / + 40 °C
Syöttökaapelit (laajennusvara huomioiden)	MCMK 2*(3*120+70)
Sulakkeet	gG 400 A

Huom ! Kaapelit ja sulakkeet eivät kuulu toimitukseen

PORRAS (25kvar/400V):

Yliaallot	50 / 150 / 250 / 350 f/Hz 39,7 / 1,4 / 13,4 / 4,8 I/A
Virta (rms)	42,2 A
Nimellisinduktanssi	1,533 mH
Porrassulakkeet	3 x gG 50

Kondensaattoriyksikkö :

Yksikön tyyppi	SL2D 40+40/525/50
Nimellisjännite koestus 2,15 kertaa 10 sekuntia	525 V
Nimelliskapasitanssi (Y)	462 µF
Purkausaika 75 V	180 s
Jälleenkytkentäaika	30 s

PORRAS (50kvar/400V):

Yliaallot	50 / 150 / 250 / 350 f/Hz 79,4 / 2,7 / 26,9 / 9,7 I/A
-----------	--

Virta (rms)	84,4 A
-------------	--------

Nimellisinduktanssi	0,767 mH
---------------------	----------

Porrassulakkeet	3 x gG 100
-----------------	------------

Kondensaattorivksikkö :

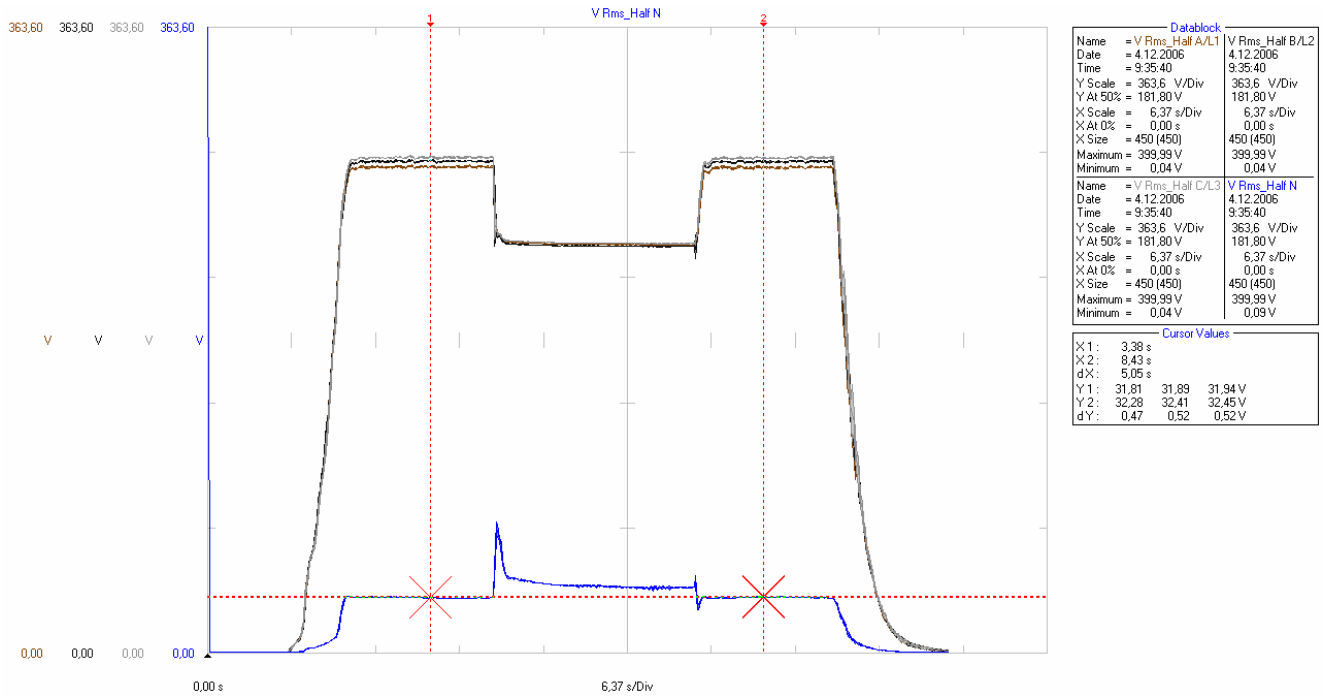
Yksikön tyyppi	SL2D 80/525/50
----------------	----------------

Nimellisjännite	525 V
-----------------	-------

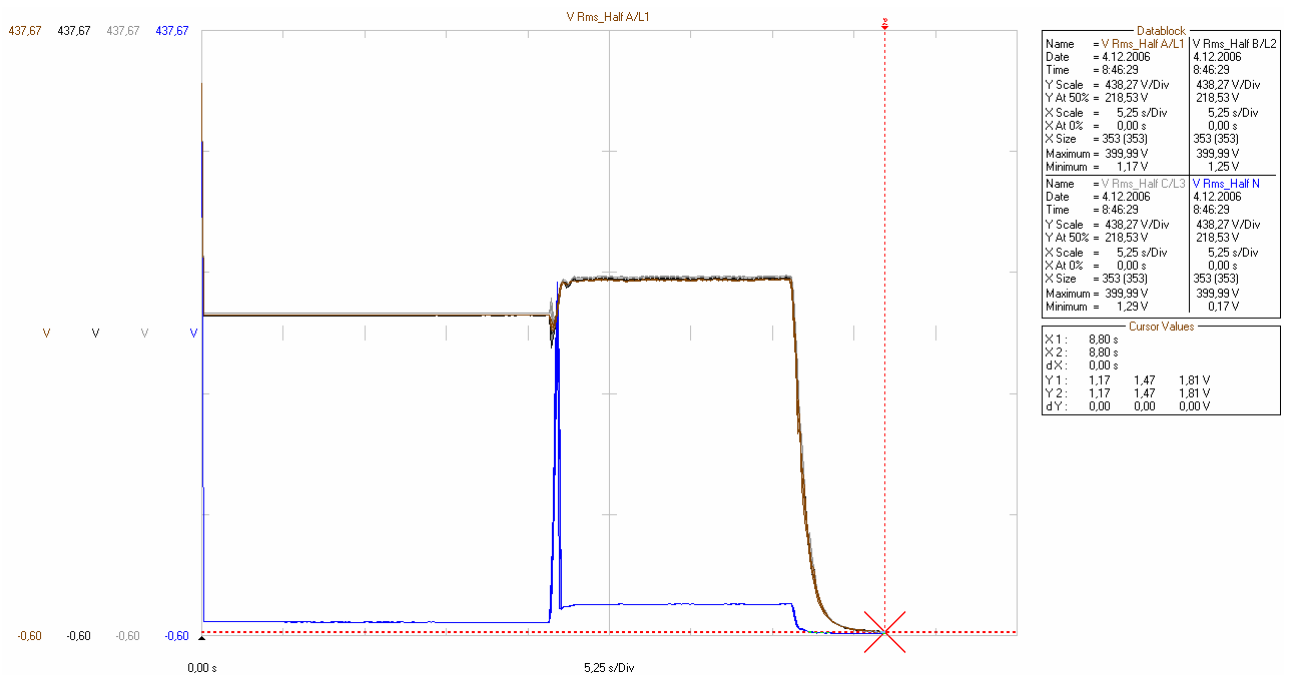
Nimelliskapasitanssi (Y)	925 µF
--------------------------	--------

Purkausaika 75 V	180 s
------------------	-------

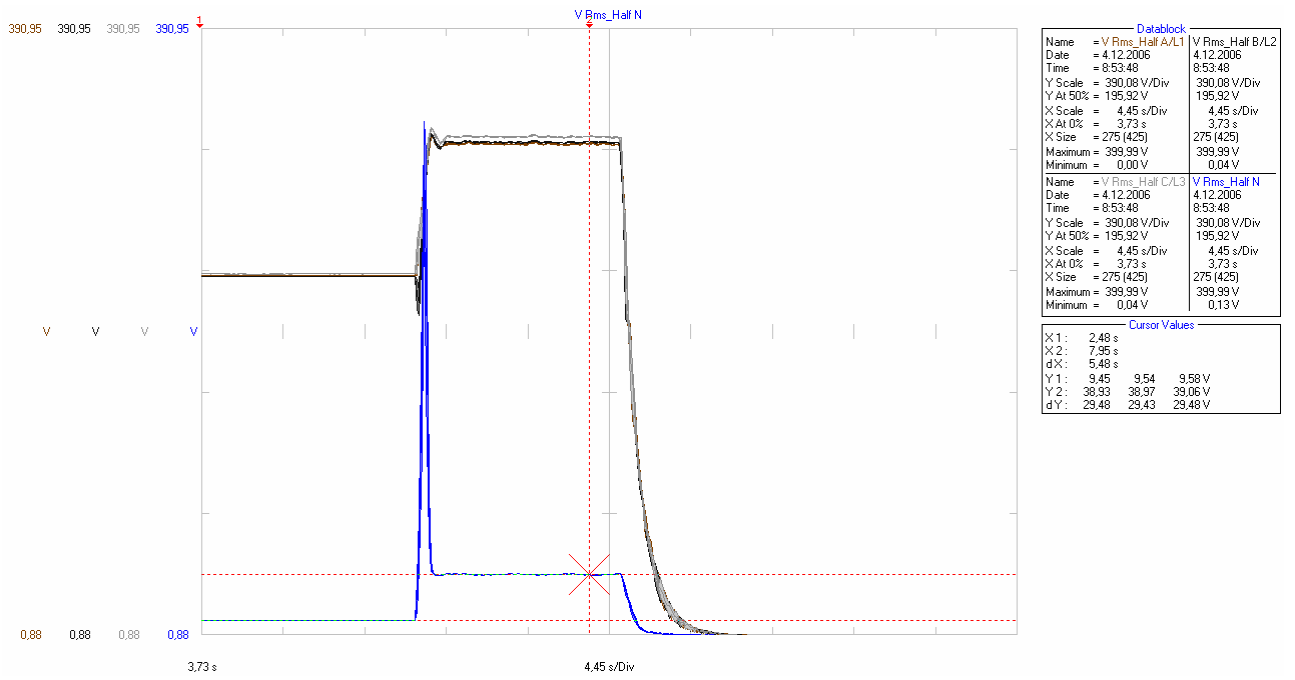
Jälleenkytettäaika	30 s
--------------------	------



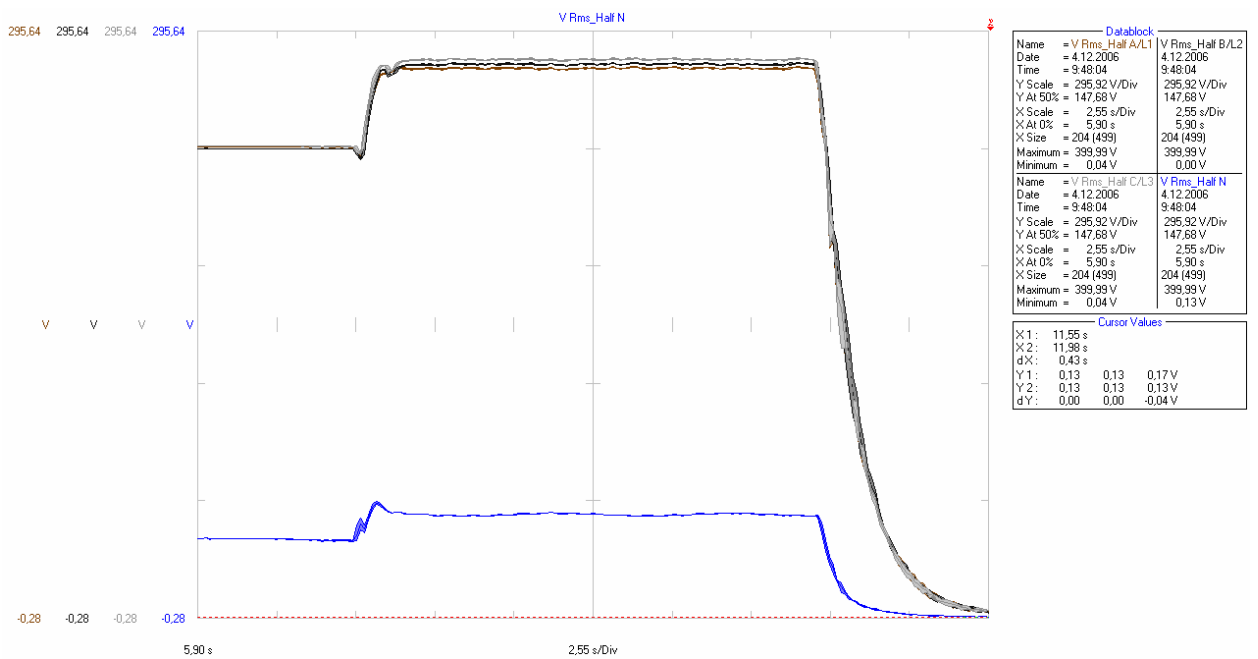
Kuva 1 Vaihejännitteiden muutos jakeluverkkoon liitettäessä. $X_L = 1060 \Omega$, $X_C = 45,0 \Omega$, $R = 800 \Omega$



Kuva 2 Vaihejännitteiden muutos jakeluverkkoon liitettäessä, sarjaresonanssi. $X_C = 81,2 \Omega$, $R = 267 \Omega$, $X_L = 88 \Omega$



Kuva 3 Vaihejännitteiden muutos jakeluverkkoon liitettäessä, rinnanresonanssi.



Kuva 4 Nollajohdin poikki generaattorilta

ABB Oy Machines and Motors	Classifying code or document type				ABB
	PERFORMANCE DATA OF GENERATOR				
Department/Author PED100/TORY	Date of issue 2007-01-18	Lang. En	Rev. date	Our ref.	
Customer ref.	Saving Ident		Rev/Changed by A	Pages 10/10	

Generator type code: M3BG 280SMB 12

Rated output	30 kW	Power Factor	0.53
Voltage	400 V	Rated torque	-616 Nm
Frequency	50 Hz	Relat. starting current	5.5
Speed	507 r/min	Relat. starting torque	-1.4
Current	81 A	Relat. maximum torque	3.7

Equivalent circuit corresponding to star-connection

Running		Rotor resistance R_2' (120 °C)		0.0606 Ω
Stator resistance R_1 (105 °C)	0.0593 Ω	Rotor reactance X_2'	0.4284 Ω	
Stator reactance X_1	0.3554 Ω	Iron loss resistance R_{Fe}	0.14 k Ω	
Magnetizing reactance X_m	3.57 Ω			
Starting		Rotor resistance R_2' (50 °C)		0.0963 Ω
Stator resistance R_1 (50 °C)	0.0497 Ω	Rotor reactance X_2'	0.2749 Ω	
Stator reactance X_1	0.2552 Ω			
Ambient condition		Rotor resistance R_2' (40 °C)		0.0929 Ω
Stator resistance R_1 (40 °C)	0.0480 Ω			

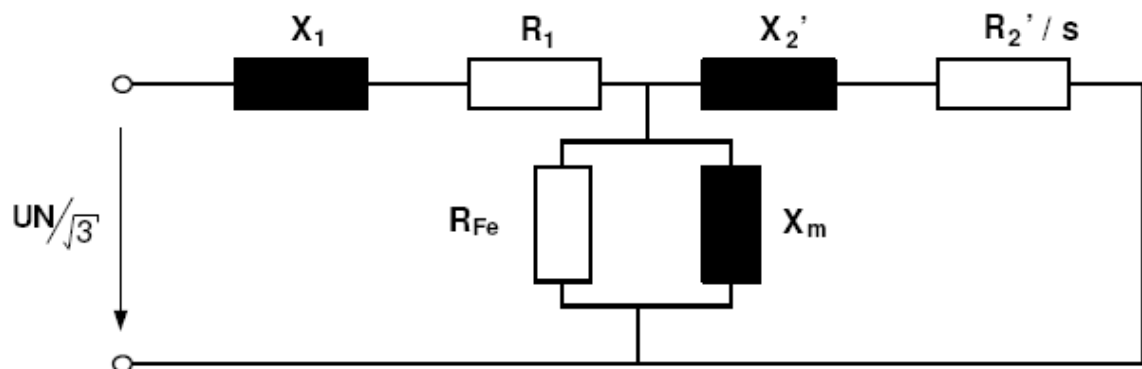


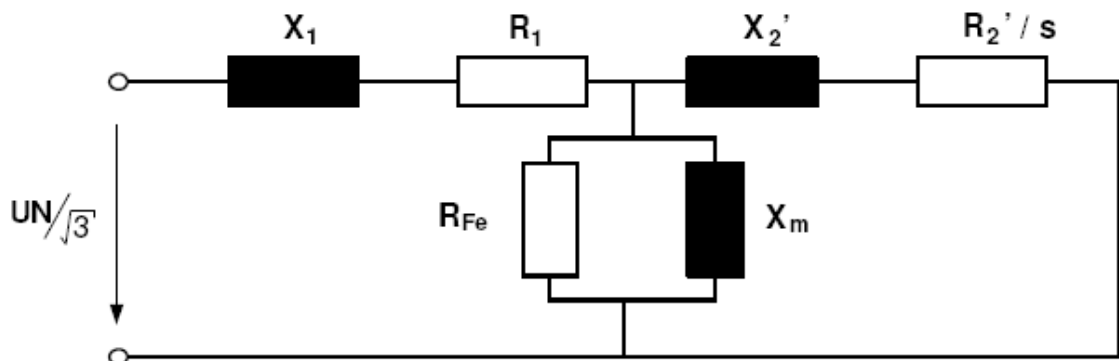
ABB Oy Machines and Motors	Classifying code or document type				ABB
	PERFORMANCE DATA OF GENERATOR				
Department/Author PED100/TORY	Date of issue	Lang. En	Rev. date	Our ref.	
Customer ref.	Saving ident		Rev./Changed by A	Pages 10/10	

Generator type code: M3BP 280SMC 12

Rated output	38 kW	Power Factor	0.54
Voltage	400 V	Rated torque	-781 Nm
Frequency	50 Hz	Relat. starting current	5.6
Speed	507 r/min	Relat. starting torque	-1.5
Current	101 A	Relat. maximum torque	3.7

Equivalent circuit corresponding to star-connection

Running		Rotor resistance R_2' (130 °C)		0.0496 Ω
Stator resistance R_1 (110 °C)	0.0466 Ω	Rotor reactance X_2'	0.3391 Ω	
Stator reactance X_1	0.2770 Ω	Iron loss resistance R_{Fe}	0.11 k Ω	
Magnetizing reactance X_m	2.90 Ω			
Starting		Rotor resistance R_2' (50 °C)		0.0769 Ω
Stator resistance R_1 (50 °C)	0.0385 Ω	Rotor reactance X_2'	0.2165 Ω	
Stator reactance X_1	0.1980 Ω			
Ambient condition		Rotor resistance R_2' (40 °C)		0.0742 Ω
Stator resistance R_1 (40 °C)	0.0371 Ω			



Taulukko 1 Generaattorin herääminen saarekekäytössä ja toiminta jakeluverkon rinnalla

Saarekekäyttö, generaattorin herääminen															
Kuormat, vaihejännitteet ja vaihevirratt							Kondensaattorit, pääjännitteet ja vaihevirratt					Resistanssit		Induktanssit	Servo
U_1	I_{K1}	I_0	P_{1v}	P_{3v}	Q_{1v}	Q_{3v}	U_{12}	I_C	$\cos \varphi$	X_C	C	R	X_L	n	
V	A	A	W	W	kvar		V	A	°	Ω	μF	Ω	Ω	rpm	
251	0	0	0	0	0	0	436	3,12	-88	96,6	33,0	0	0	1500	
267	0,6	0,4	0,17	0,51	0,01	0,03	455	3,68	-89	81,3	39,2	125	0	1500	
Toiminta jakeluverkon kanssa rinnan															
232	2,7	0,4	0,31	0,93	0,56	1,68	399	4,9	-81	96,6	33,0	200	96,6	1500	
231,5	3,5	0,6	0,61	1,83	0,55	1,65	399	5,2	-67	96,6	33,0	100	96,6	1500	
231,5	3,4	0,6	0,61	1,83	0,5	1,5	399	5	-65	96,6	33,0	100	106,3	1500	

Taulukko 2 Jakeluverkon poiskytkennät symmetrisellä kuormituksella

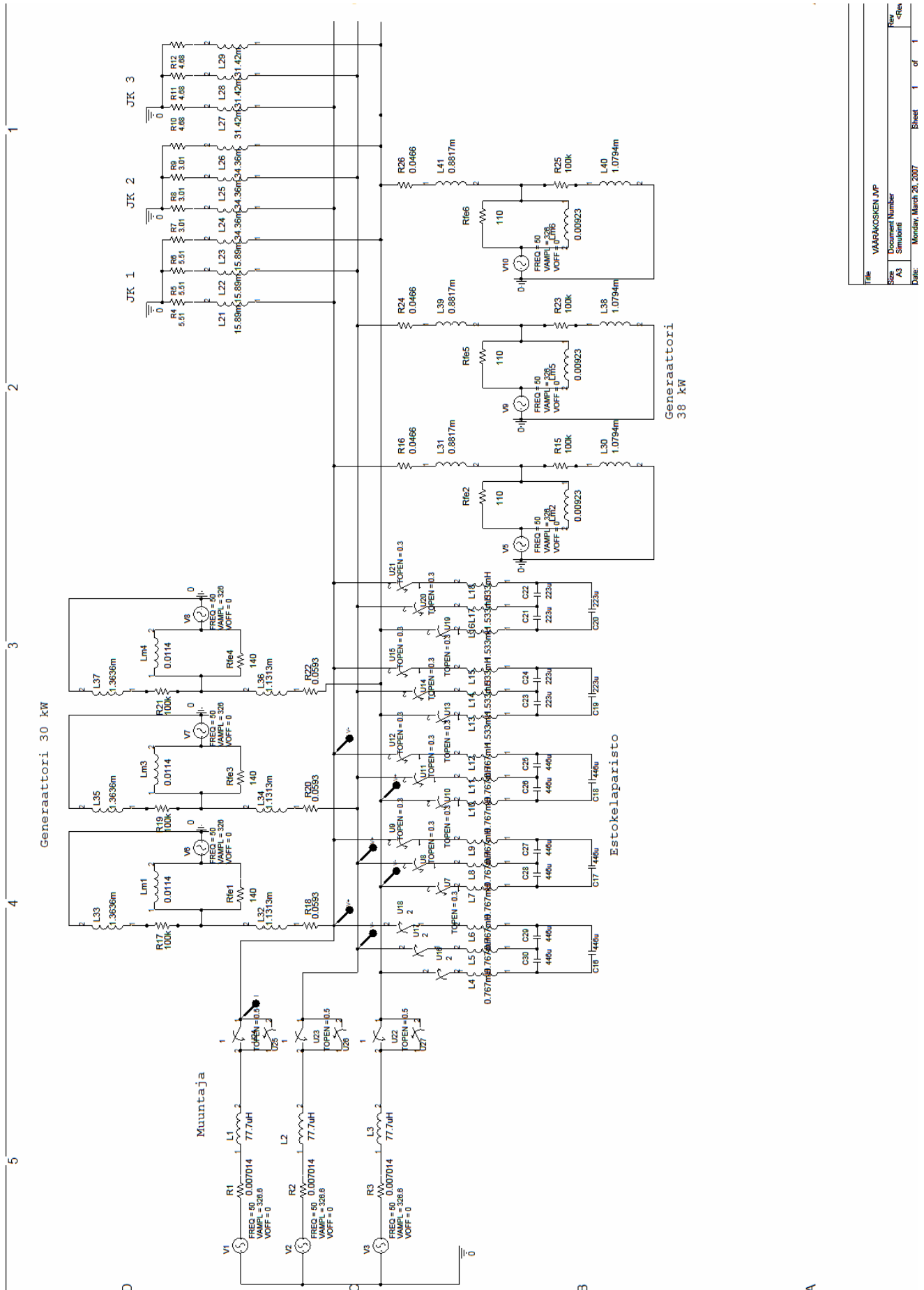
Vaihejännitteet		Kondensaattorit		Resistanssit	Induktanssit	Servo
U_{alku}	U_{loppu}	X_C	C	R	X_L	n
V	V	Ω	μF	Ω	Ω	rpm
233	253	70,8	45,0	800	106,3	1500
233	281	70,8	45,0	800	1060	1500
233	320	39,2	81,2	800	0	1500
233	0	70,8	45,0	53,3	1060	1500
233	285	70,8	45,0	800	106,3	1500
generaattori ei herää		70,8	45,0	100	106,3	1500
233	278	70,8	45,0	400	106,3	1500

Taulukko 3 Epäsymmetria- ja resonanssitilanteet jakeluverkon poiskytkennässä

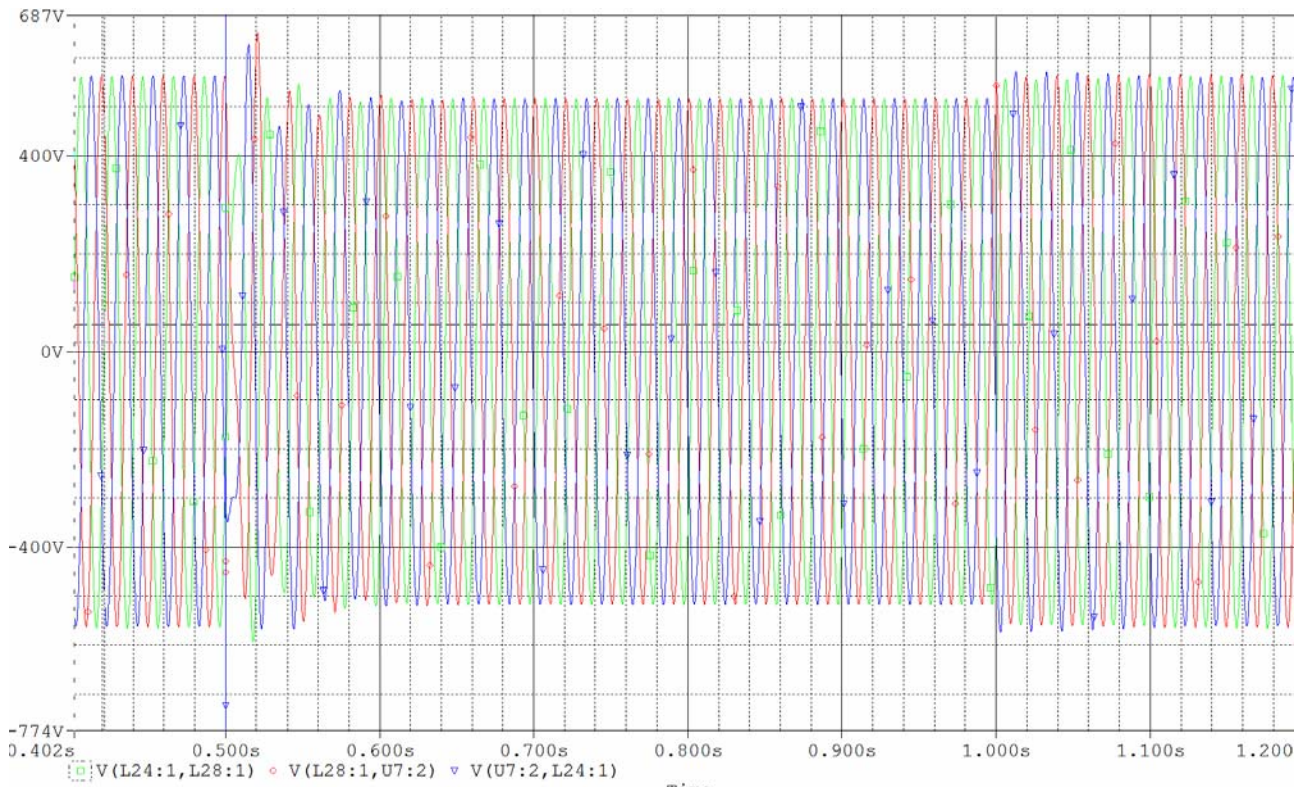
Vaihejännitteet						Nollajännite		Kondensaattorit		Kuormitus		Servo	Tilanne
$U_{v1,alku}$	$U_{v1,loppu}$	$U_{v2,alku}$	$U_{v2,loppu}$	$U_{v3,alku}$	$U_{v3,loppu}$	$U_{n,alku}$	$U_{n,loppu}$	X_C	C	R	X_L	n	
V	V	V	V	V	V	V	V	Ω	μF	Ω	Ω	rpm	
231,5	257	232	258	233	259	8,7	21,3	39,2	81,2	267	88	1500	A
232	317	232	318	233	321	9,5	39	39,2	81,2	267	88	1500	B
233	314	228	308	234	318	10,5	38,3	39,2	81,2	267	88	1500	C
231	265	234	253	238	266	30	34	70,8	45,0	267	40,7	1500	D
235	265	231	253	239	267	30	34	70,8	45,0	133	40,7	1500	E

Taulukon 3 kytkentätilanteet:

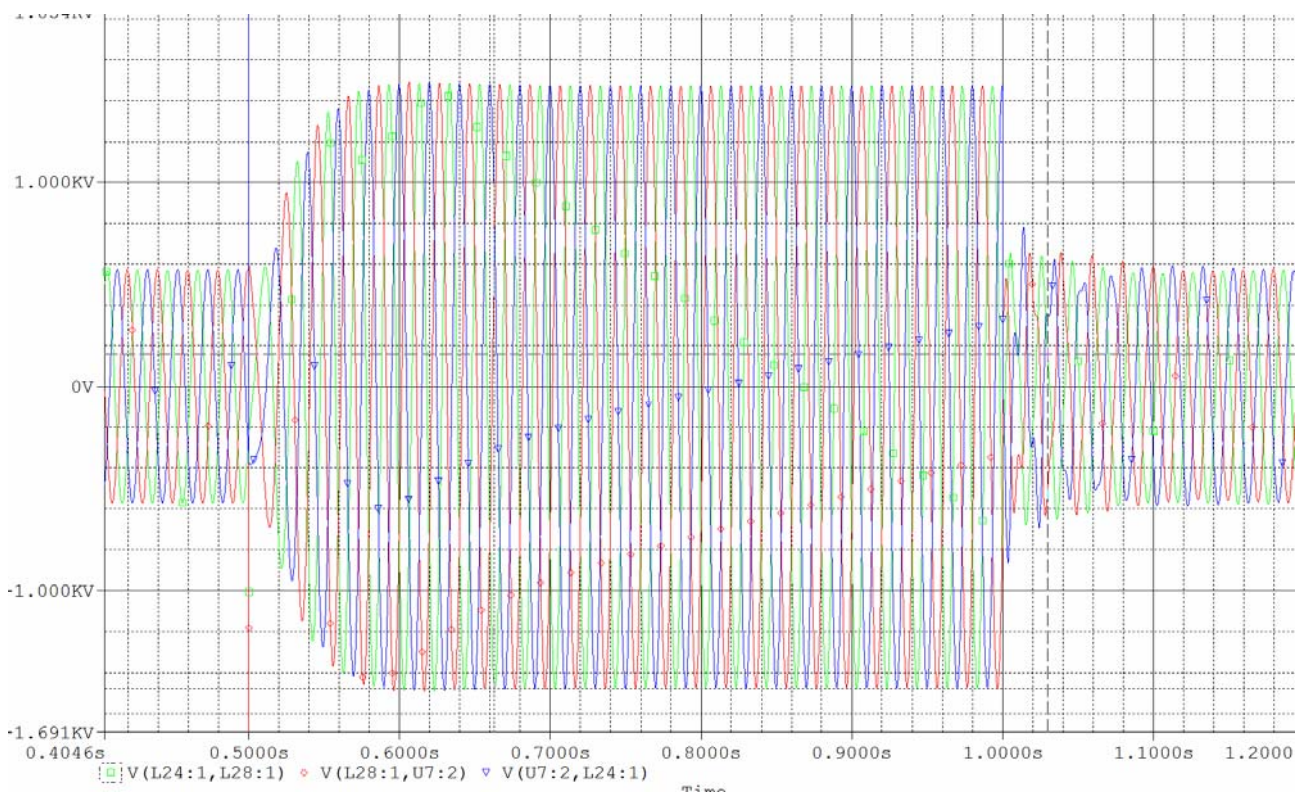
- Sarjaresonanssi, kelat resistanssien kanssa rinnan
- Rinnanresonanssi, kelat resistanssien kanssa sarjassa
- Epäsymmetria, kelojen rinnalla 1 resistanssi $R = 200 \Omega$
- ”Normaali” tilanne
- Epäsymmetria, kelojen rinnalla 1 resistanssi $R = 200 \Omega$



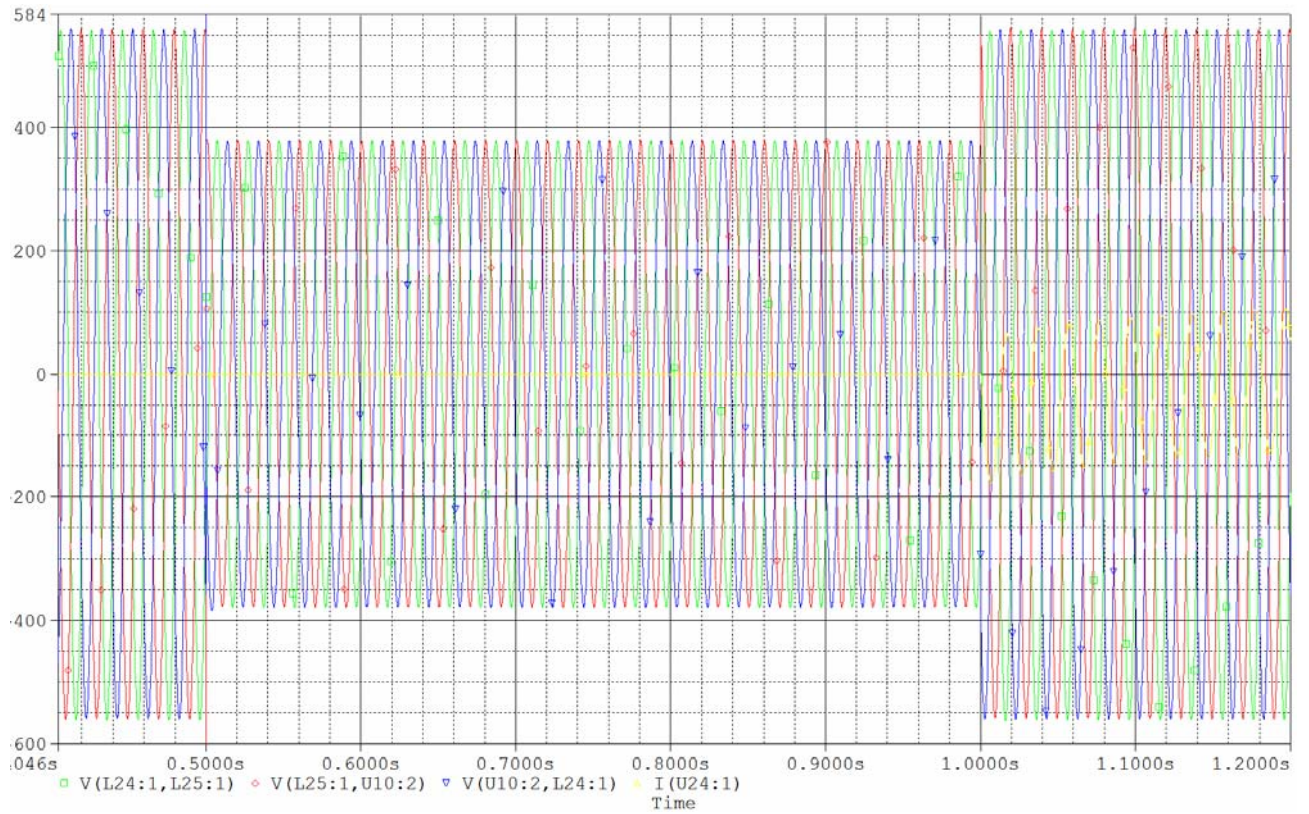
Title	VAAKOSKEN.JVP
Size	Document Number
Author	J. Simulant
Date	Monday, March 26, 2007
Sheet	1 of 1



Kuva 1 Kompensointiteho 50 kvar, pääkiskoston pääjännitteen tehollisarvo 365 V



Kuva 2 Kompensointiteho 100 kvar, pääkiskoston pääjännitteen tehollisarvo 1046 V



Kuva 3 Kompensointi poiskytketty, pääkiskoston pääjännitteen tehollisarvo 267 V

Taulukko 1 Tyhjäkäyntikoe

U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	$P_{1(-)}$ [W]	P_2 [W]	P_{TOT} [W]	n [rpm]
480	480	480	3,48	3,51	3,47	-640	1000	360	1501
440	440	440	2,71	2,71	2,69	-440	740	300	1498
400	400	400	2,24	2,23	2,25	-320	580	260	1497
360	360	360	1,95	1,95	1,92	-240	480	240	1496
320	320	320	1,70	1,69	1,71	-160	380	220	1498
280	280	280	1,48	1,47	1,50	-100	300	200	1493
240	240	240	1,31	1,28	1,29	-60	240	180	1494
200	200	200	1,13	1,10	1,16	-40	200	160	1490
160	160	160	1,01	0,99	1,02	0	160	160	1485
120	120	120	0,95	0,98	0,99	20	120	140	1465
80	80	80	1,26	1,29	1,28	30	100	130	1395
70	70	70	1,61	1,64	1,63	30	120	150	1310

Taulukko 2 Oikosulkukoe

U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	$P_{1(+)}$ [W]	P_2 [W]
106,4	106,6	106	5,88	5,9	5,8	40	29
94,9	96,1	96	5	5	5	10	22
88,9	89,5	89,2	4,5	4,5	4,5	20	18
80,3	81,6	81,1	4	4	4	0	15
72,7	73,4	73,2	3,5	3,5	3,5	0	12
65,8	66,8	66	3	3	3	0	9
56,6	58,1	56,9	2,5	2,5	2,5	0	6
48,2	49,7	48,5	2	2	2	0	80
40,7	43,1	40,9	1,5	1,5	1,5	0	55
32,1	34,5	32,2	1	1	1	0	25
23,2	25,9	23,3	0,5	0,5	0,5	0	10



Tarkastuspöytäkirja

Päivämäärä

 Käyttöönotto
 Vuositarkastus
 Korjaus

 30.08.2006
 30.08.2006

Asiakas Vääräkosken jätevedenpuhdistamo		Työn tilaaja Teo-Team					
Osoite Vääräkoskentie 73		Yhteyshenkilö Reijo Ruohola					
Postinumero ja -toimipaikka 16300 ORIMATTILA		Fax	Puhelin 0500-352 038				
Yhteyshenkilö kohteessa Ahlstedt		Sähköposti					
Puh 0400-718 003		Laskutusosoite Orimattilan Vesi Oy					
Sähköposti vaarakoski@phnet.fi		Torkkolantie 3 16300 ORIMATTILA MERKKI: VÄÄRÄKOSKI					
Keskus PK	Virtaamauntaja 1000/5A	Kompensointi teho 200 kvar	Portaat 2x25+3x50				
Pariston tyyppi 2FCDKR+3A		Sarjanumero F0000446					
Säätimen tyyppi A12	Sarjanumero K9910965	Porrastustapa N	Havahtumisraja ind/kap 0,18 0,18 Tavoitetehtokerroin 1,00 ind/kap				
Kompensoinnin kaapelit 2x MCMK 3x120/70		Kompensoinnin sulakkeet 3x400A / OFAA 400A 25					
Yliaaltomittaukset L1 1000/5A toisio, kerroin 2		Lämpötila 21 °C					
Lisätietoja Loistehonkompensoinnin vuositarkastus ja säätimen vaihto							
porr. no.	kond yksikkö Sarjanumero	Nimellisarvo Q/V tai	In A	L1-L2 µF	L1-L3 µF	L2-L3 µF	Huomautukset
1	C000 7932	40/525	44	225	223	221	
2	C000 7933	40/525	44	226	226	223	
3	C000 7915	80/525	88	444	446	451	
4	C000 7916	80/525	88	446	446	445	
5	C000 7917	80/525	88	442	442	447	
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
Tarkastuksen yhteenveto: Kompensointi on kunnossa. Se korjattiin tarkastuksen yhteydessä.							
Säädin vaihdettiin. Säätimen porrastustapa muutettiin CB-->N.							
Ovisuodattimet 2 kpl vaihdettiin. Kaikki kupariosat ovat hapettuneet tummiksi.							
Sivous	<input checked="" type="checkbox"/>	Virtaliitosten jälkikristys	<input checked="" type="checkbox"/>	Suodattimien uusinta	2	Tyyppi	AM25P
Mittauksen suoritti		Asiakkaan edustajan allekirjoitus					
Janne Rissanen puh 0424 927 202							

 Hämeen Sähkö Oy
 Pätsiniementie 4D
 37800 TOIJALA

 puh 0424 927 200
 fax 03-543 4422
 info@hameensahko.fi

 Kotipaikka Toijala
 Alv rek
 Y-tunnus 1861828-3
 1/8