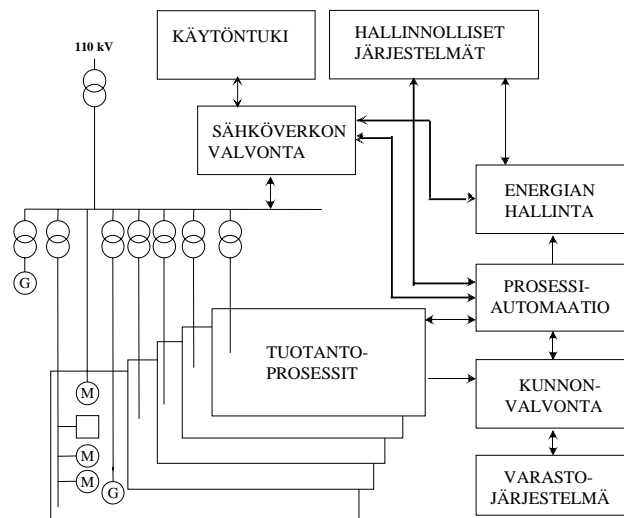


# Teollisuussähköjärjestelmien hallinta

## Keskeiset tulokset

### 1998-2002

VTT, LTKK, TTKK



TESLA-raportti nro 69/2002

Teollisuussähköjärjestelmän hallinta  
Keskeiset tulokset  
1998-2002

Raili Alanen, Lauri Kumpulainen, Jussi Manninen  
VTT Prosessit

Jarmo Partanen, Jero Ahola, Tuomo Lindh  
LTKK  
PL 20  
53851 Lappeenranta

Pertti Järventausta, Kirsi Nousiainen, Antti Mäkinen,  
Markku Kauppinen  
TTKK  
PL 692  
33101 Tampere

Joulukuu, 2002

<b>Suorittajaorganisaatio ja osoite</b> VTT Prosessit PL 700 65101 Vaasa  <b>Projektipäällikkö</b> Lauri Kumpulainen  <b>Diaarinumero</b>	<b>Tilaaaja</b>  <b>Tilaaajan yhdyshenkilö</b>  <b>Tilaus- tai viitenumero</b>
<b>Projektin nimi ja suoritustunnus</b>  Teollisuussähköjärjestelmien hallinta	<b>Raportin numero ja sivumäärä Päiväys</b>  Tesla-raportti nro 69/2002, 49 s. 12/2002
<b>Raportin nimi ja tekijät</b> Teollisuussähköjärjestelmien hallinta, keskeiset tulokset, 1998-2002	
<b>Tiivistelmä</b>  Tässä tutkimusraportissa kuvataan Tekesin teknologiaohjelmaan <b>Informaatiotekniikka sähkönjakelussa</b> (TESLA) sisältyneen projektin ”Teollisuussähköjärjestelmien hallinta” keskeiset tulokset koko hankkeen toteutusajalta 1998-2002.  Tutkimustyön ovaat toteuttaneet Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen korkeakoulu ja VTT Prosessit (VTT Energia).	

<b>Raportin päävastuullinen laatija</b>  Lauri Kumpulainen <b>Hyväksynyt</b>  Ritva Hirvonen	<b>Tarkastanut</b>  Risto Komulainen <b>Julkisuus</b>  Julkinen
---	--

# ALKUSANAT

Tutkimushanke *Teollisuussähköjärjestelmien hallinta* on toteutettu vuosina 1998-2002. Tutkijaosapuolina ovat toimineet Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen korkeakoulu ja VTT Prosessit. Tutkimusta ovat rahoittaneet Tekes, ABB, SVK-pooli, Metso Paper, Metso Automation, StoraEnso, UPM-Kymmene ja CTS Engineering. Asiantuntijoina tai tulosten hyödyntäjinä ovat edellisten lisäksi osallistuneet Rautaruukki, AvestaPolarit ja M-real. Tutkimushanke on liittynyt valtakunnalliseen Tekesin pääasiassa rahoittamaan ja VTT Prosessien koordinoimaan tutkimusohjelmaan *Informaatiotekniikka sähkönjakelussa* (TESLA).

Tutkimushanketta on ohjannut ja valvonut johtoryhmä, jonka jäseninä ovat vuonna 2002 toimineet seuraavat henkilöt:

Pekka Ruupunen, StoraEnso Oyj  
Seppo Kylliäinen, UPM-Kymmene Oyj  
Risto Tavia, UPM-Kymmene Oyj  
Erkki Keskinen, ABB Oy  
Pekka Verho, ABB Oy  
Erkki Rajala, ABB Oy  
Juhani Mantere, ABB Oy  
Jari Kallela, ABB Oy  
Pekka Niemelä, AvestaPolarit Chrome Oy  
Juhani Liimatainen, Rautaruukki Steel Oy  
Antti Suonperä, Metso Paper Oy  
Pekka Höyssä, Metso Automation Oy  
Heikki Voima, CTS Engineering Oy  
Jari Eklund, TEKES  
Jukka Leskelä, SVK-pooli  
Jarmo Partanen, LTKK  
Pertti Järventausta, TTKK  
Jussi Manninen, VTT Prosessit  
Lauri Kumpulainen, VTT Prosessit

Tässä raportissa kuvataan tutkimushankkeen keskeiset tulokset ja kokemukset. Yksityiskohtaiset kuvaukset hankkeen eri osioiden toteutuksesta ja tuloksista on esitetty lukuisissa hankkeen aikana julkaistuissa raporteissa, opinnäytteissä ja konferenssijulkaisuissa.

Joulukuussa 2002

tekijät

# TIIVISTELMÄ

## Teollisuussähköjärjestelmien hallinta 1998-2002

Tutkimushanke *Teollisuussähköjärjestelmien hallinta* toteutettiin vuosina 1998-2002. Tutkijaosapuolina toimivat Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen korkeakoulu ja VTT Prosessit. Tutkimusta rahoittivat Tekes, ABB, SVK-pooli, Metso Paper, Metso Automation, StoraEnso, UPM-Kymmene ja CTS Engineering. Asiantuntijoina tai tulosten hyödyntäjinä osallistuivat edellisten lisäksi Rautaruukki, AvestaPolarit ja M-real. Tutkimushanke liittyi valtakunnalliseen Tekesin pääasiassa rahoittamaan ja VTT Prosessien koordinoimaan tutkimusohjelmaan *Informaatiotekniikka sähkönjakelussa* (TESLA).

## Hankkeen tärkeimmät tulokset

### **Teollisuuden sähköjärjestelmien hallinta ja kunnonvalvonta / LTKK**

Tutkimuksessa osoitettiin, että standardityökaluilla voidaan muodostaa standardirajapinnat tuotannonohjaustason sovelluksille, jotka tarvitsevat tietoa teollisuuslaitoksen eri järjestelmistä, kuten prosessiautomaatiosta. Järjestelmä on laajennettavissa etähallinnan järjestelmäksi myös standardityökaluja käyttäen.

Kunnonvalvontatutkimusten perusteella voidaan todeta, että staattorivirtamittaus ei ole yksinään riittävä sähkömoottorikunnonvalvonnassa. Tarvitaan moottorin yhteyteen liitettävä anturi (yl. tärinä), jonka tieto on siirrettävä anturilta kenttäväylään. Anturi voidaan toteuttaa hyödyntäen edullisia mikrotyöstettyjä antureita, joiden ominaisuudet riittävät useimpiin käyttösovelluksiin.

Sähköverkkotiedonsiirron edellytykset moottorikaapelissa on selvitetty ja on rakennettu edulliset demonstraatiolaitteet moottorikaapelissa tapahtuvaan tiedonsiirtoon. Tiedonsiirto voidaan toteuttaa luotettavasti usean sadan metrin pituisessa moottorikaapelissa. Rakennetun modeemin tiedonsiirtokapasiteetti on 1200 b/s.

### **Teollisuuden sähköverkon käytöntuki / TTKK**

Tutkimuksessa määriteltiin ja kehitettiin sähköverkon hallintaan soveltuvaa sovelluskokonaisuutta, jossa hyödynnettiin toisaalta julkisten jakeluverkkojen hallintaan kehitettyjä sovelluksia sekä kehitettiin teollisuusverkon tarpeisiin liittyvää uutta toiminnallisuutta. Sovelluskokonaisuutta demonstroitii StoraEnson Varkauden tehtailta ABB Oy:n toimittamassa tietojärjestelmäympäristössä. Käytöntukisovelluksiin liittynyt tutkimustyö keskittyi erityisesti kuormitusmallien määrittämiseen, laskenta-algoritmien kehitykseen, sähköverkon käyttövarmuustarkasteluihin liittyviin menetelmiin ja tiedonhallintaan.

## **Kuormitusten mallintaminen ja laskenta-algoritmit / TTKK**

Tutkimusprojektissa määriteltiin toiminnallisuus, jossa prosessiautomaatiojärjestelmän ja sähköverkon mittauksia sekä yksittäisiä erillismittauksia hyödynnetään keskijänniteverkon muuntajien kuormitusten mallintamisessa jatkuvatoimisena muodostettaessa reaaliaikainen kuormitusilanne ja kunkin kohteen tietyllä ajanjaksolla kokema maksimikuormitus. Toiminnallisuudesta on toteutettu tietokantarajapintoja hyödyntävä demonstraatio-sovellus. Tutkimuksessa kehitettiin staattisen tilan tarkasteluun soveltuvaa laskenta-ohjelmistoa, joka laskee jakeluverkon tehonjaon ja oikosulkuvirrat myös silloin, kun verkon kytkentätila on silmukoitu tai kun vikavirtalähteitä on useita. Tehonjaon lähtötietoina voidaan käyttää edellä kuvattuja jakelumuuntajien kuormitusmalleja.

## **Käyttövarmuustarkastelut / TTKK**

Tutkimuksessa kartoitettiin erilaisia käyttövarmuuden hallintaa tukevia toimintoja sekä toteutettiin muutamalle komponenttiryhmälle vika- ja vaikutusanalyysiä tukevia tarkasteluja, demonstroitettiin dokumenttien ja tietokantojen hallintaa sekä kehitettiin sovellus StoraEnson relekoestustietokannan integrointiin osaksi käytöntukijärjestelmäkokonaisuutta. Tutkimusprojektissa kartoitettiin kyselytutkimuksen muodossa suuren ja keskisuuren teollisuuden sähkönjakelussa esiintyviä häiriöitä. Vastauksien perusteella häiriöt esiintyvät yleisimmin pienjännitepuolella; moottoreissa ja keskuksissa. Teollisuuslaitokset ovat pyrkineet vähentämään häiriöitä mm. huomioimalla ympäristöolosuhteet, asennustekniikan ja toimilaitteiden oikean valinnan. Jännitekuopista aiheutuneet häiriöt ovat lisääntyneet häiriöherkkien laitteiden myötä.

## **Sähkön laadun seuranta / TTKK**

Tutkimusprojektissa toteutettiin oikosulkukokeita ja jännitekuoppamittauksia erään verkkoyhtiön verkossa, jossa teollisuusasiakkaalle oli aiheutunut ongelmia muun verkon oikosuluista aiheutuvista jännitekuopista. Jännitekuoppamittausten ja PSS/E -ohjelmiston simulointien avulla verifioitiin kehitettyjä laskentamalleja sekä pyrittiin arvioimaan erilaisia verkosto- ja laitetason ratkaisuvaihtoehtoja, joilla voidaan vähentää jännitekuopista aiheutuvia häiriöitä.

Tutkimuksessa määriteltiin ja toteutettiin StoraEnson Varkauden tehtaiden verkkoon jakelumuuntajatasen jatkuvatoiminen sähkön laadun seurannan mittausjärjestelmä. Järjestelmä perustuu MX Electrix Oy:n laatuvahtimittareihin, joilla mitataan pätö- ja loistehot, virrat ja energiat, ”normaalit” sähkölaatusuureet (jännitetaso ja -särö, jännitteen yliaallot), jännitekuopat, virran yliaallot (testattavana oleva prototyyppiversio) ja lämpötiloja. Mittarien kaukoluenta hoidetaan Enersoft Oy:n Transmit -ohjelmalla ja tulosten esittämiseen käytetään TESLA -ohjelman Verkostoautomaatio, tiedonsiirto ja sähkön laatu -projektissa kehitettyä WWW-sovellusta, jonka kautta mittauksia voidaan seurata Varkaudessa Internetin kautta TTKK:lla olevalta WWW-serveriltä.

## **PD-kunnonvalvonta / TTKK**

Tutkimusprojektin tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia suorittaa osittaispurkausmittauksia (PD-mittauksia) häiriöisessä teollisuusympäristössä ja luoda järjestelmäkonepiti PD-mittauksiin perustuvalla teollisuusympäristöön soveltuvalle kunnonvalvontamenetelmälle. Kunnonvalvonta-järjestelmäkonepiti perustuu yksinkertaisiin ja edullisiin antureihin, häiriöiden automaattiseen suodattamiseen sekä mitattujen signaalien automaattiseen analysointiin ja vikatyypin tunnistamiseen. Häiriösuodatuksen mahdollisuuksia tutkittiin kartoittamalla teollisuusympäristöissä esiintyviä häiriöitä, mm. erilaisten moottorikäyttöjen aiheuttamina, sekä mahdollisia häiriösuodatusmenetelmiä. Tutkimuksen aikana kehitettiin myös erityisesti kaapeliverkkoihin soveltuva, Rogovski-käämiin perustuva yksinkertainen ja edullinen anturityyppi.

## **Jakelumuuntajan lämpötilan ja eliniän kulutuksen laskennallinen seuranta/ TTKK**

Tutkimusprojektissa selvitettiin muuntajien kuumimman pisteen lämpötilan (hot-spot – lämpötilan) ja eliniän kulutuksen laskentaan perustuvan muuntajaseurannan toteutusmahdollisuuksia teollisuusympäristössä sekä määriteltiin järjestelmäkonepiti teollisuusympäristöön soveltuvalle muuntajaseurannalle. Kehitetty seurantamenetelmä voidaan liittää osaksi olemassa olevaa tai uutta automaatiojärjestelmää tai integroida johonkin verkossa käytettävään, esimerkiksi sähkön laadun, seurantalaitteeseen. Eliniän kulutustietoa voidaan käyttää myös verkostosuunnittelun tukena arvioitaessa muuntajavaihtojen tarpeellisuutta tai kun on päätettävä mitkä muuntajajaksilöt olisi syytä vaihtaa kiireellisimmin. Projektin tuloksena toteutettiin Visual Basic-ympäristössä laskentasovelluksen prototyyppi, Muuntaja analysaattori -ohjelma joka sisältää IEC 354 ja IEEE C57/91 standardien mukaiset laskennat nestemuuntajille sekä IEC 905 standardin mukaisen laskennan kuivamuuntajille. Tutkimusprojektissa selvitettiin lisäksi yliaaltojen vaikutusta muuntajien lämpenemään. Selvitysten tuloksena Muuntaja analysaattori -ohjelmaan sisällytettiin myös standardin HD 482.4 mukainen virran yliaaltojen vaikutuksen laskenta.

## **Sähköenergian käytön hallinta / VTT Prosessit**

Hankkeessa useiden vuosien aikana toteutetun mittaustoiminnan avulla tuotettiin tietoa erityisesti tuotantolaitosten henkilökunnalle. Potentiaalisia säästökohteita esitettiin, prosessin energiankulutuksen tuntemus kehittyi, kuormitustasot ja mitoituksen onnistuminen selvisivät. Hankkeessa myös kehitettiin kulutuksen ennustemenetelmiä, ja toiminta synnytti kysyntää energian hallintaan liittyvälle mittauspäalvelutoiminnalle.

## **Energiataloudellinen laitemitoitus / VTT Prosessit**

Mitoitukseen kohdistuneessa selvityksessä selvitettiin kv. lähteistä aikaisempien ja meneillään olevien tutkimusten tietoja moottorikäyttöjen mitoituksesta ja säästöpotentiaaleista. Kotimainen tarkastelu tehtiin 7 tehtaassa tehtyjen mittausten perusteella, joista erityisesti kahden uudehkon tehtaan mitoituksen onnistumista tarkasteltiin yhteistyössä tehtaiden henkilöstön ja laitemittajien kanssa.

Tutkimuksen mukaan niin Suomessa kuin muuallakin taipumus ylimitoitukseen on tyypillistä. Selvitys tuotti parannusehdotuksia mitoituskäytäntöihin kartoittamalla mitoituksessa huomioon otettavia tekijöitä, suunnitteluvaiheiden välisiä tiedonsiirtotarpeita, ylimitoituksen aiheuttamia kustannuksia ja energiatehokkaiden moottoreiden tarjoamaa säästöpotentiaalia. Tutkimustulosten mukaan merkittävimmät säästövaikutukset saavutettaisiin pumppausjärjestelmissä investoimalla pyörimisnopeussäätöihin ja pysyvillä pumpun kapasiteetin muutoksilla.

### **Teollisuuden jännitekuoppien lieventämismahdollisuuksia / VTT Prosessit**

Tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuustutkimuksen ja simulointien avulla mahdollisuuksia jännitekuoppien haittojen lieventämiseksi erityisesti uuden suojaustekniikan avulla. Teollisuusverkon vikatilanteista aiheutuvien jännitekuoppien haittavaikutuksia voitaneen merkittävästi lieventää nopeuttamalla suojausta ja varustamalla herkät komponentit jännitettä tukevilla laitteilla. Kiskonvaihtoautomaatiikka osoittautui simuloitussa kohteessa toimivaksi ratkaisuvaihtoehdoksi.

### **Esiselvitys teollisuuden sähkönjakelukonseptien kehityksestä / VTT Prosessit**

Selvityksessä koottiin yleiskuvaus sähkönjakelun tämänhetkisestä tilanteesta, meneillään olevista tutkimus- ja kehityshankkeista ja tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksista. Verkoston rakenneratkaisuja tarkasteltaessa nousivat kehitysmahdollisuuksina esille pienjännitetason nostaminen, hajautettu sähkönjakelu (DENET-konsepti), jakelutaajuuden muuttaminen, laajamittainen inverttereiden yhteinen tasajännitejakelu, sulakkeeton pienjännitejakelu ja modulierakenteinen jakelu. Rakenne- ja laatuasioita enemmän kehityspotentiaalia nähdään tieto- ja tietoliikennetekniikan soveltamisessa teollisuusverkon verkkotieto-, käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmiin.



# SISÄLLYSLUETTELO

Alkusanat

Tiivistelmä

1	Tutkimushankkeen tavoitteet ja toteutus .....	9
1.1	Tausta .....	9
1.2	Tutkimushankkeen tavoitteet .....	9
1.3	Tutkimushankkeen käytännön toteutus .....	10
2	Tutkimushankkeen keskeiset tulokset ja niiden hyödyntäminen .....	10
2.1	Tiedonkeruujärjestelmä teollisuussähköjärjestelmien tiedon-hallintaa varten...	10
2.2	Sähköjärjestelmien etähallinta teollisuusympäristössä.....	11
2.3	Sähköenergian käytön hallinta .....	15
2.3.1	Tavoitteet .....	15
2.3.2	Virtamittausten soveltuvuus jatkuvatoimiseen tehonmittaukseen.....	15
2.3.3	Sähköenergian kulutuksen jakautuminen prosessinosittain.....	16
2.3.4	Prosessin energiatehokkuuden arviointi .....	16
2.3.5	Sähköenergian kulutuksen tarkempi ennustaminen.....	17
2.3.6	Tulosten hyödyntäminen.....	18
2.4	Energiataloudellinen laitemitoitus.....	19
2.4.1	Taustaa ja tavoitteita .....	19
2.4.2	Saavutetut tulokset.....	20
2.5	Teollisuuden sähköverkon käytöntuki.....	24
2.5.1	Kuormitusmallit.....	25
2.5.2	Laskenta-algoritmit.....	27
2.5.3	Käyttövarmuustarkastelut .....	28
2.6	Ennakoiva kunnonvalvonta .....	32
2.6.1	Sähkömoottoreiden ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmät .....	32
2.6.2	Sähköverkkotiedonsiirto teollisuuden pienjänniteverkossa.....	34
2.6.3	Osittaispurkausmittauksiin perustuva kunnonvalvonta .....	36
2.6.4	Jakelumuuntajan lämpötilan ja eliniän kulutuksen laskennallinen seuranta	38
2.7	Sähkön laatu .....	41
2.7.1	Sähkön laadun mittaukset .....	41
2.7.2	Teollisuuden jännitekuoppien lieventämismahdollisuuksia .....	43
2.8	Esiselvitys teollisuuden sähkönjakelukonseptien kehityksestä .....	44
2.8.1	Tavoitteet .....	44
2.8.2	Tulokset .....	44
	Julkaisut ja artikkelit.....	46

# 1 Tutkimushankkeen tavoitteet ja toteutus

## 1.1 Tausta

Teollisuus käyttää Suomessa yli puolet sähköenergiasta. Teollisuuden sähkökäytölle on ominaista suuri energiantensiteetti. Energiavaltaisesta tuotantoprosessista johtuen myös sähköverkkojen ja sähkökäyttöjen käyttövarmuusvaatimukset ovat erittäin korkeat.

Prosessiautomaatiojärjestelmien ja verkkoyhtiöiden sähköverkkojen hallintaan liittyvä osaaminen on Suomessa korkeatasoista ja niihin liittyy merkittävää ohjelmistotuotantoa. Teollisuuden sähköjärjestelmien automaatiosovellukset (sähköverkon valvonta, kunnonvalvonta) ovat sitä vastoin olleet vaatimattomia ja toistaiseksi vain vähän älykkyyttä sisältäviä. Sähköjärjestelmien älykkäällä hallinnalla voidaan kuitenkin saavuttaa merkittäviä säästöjä teollisuuskonsernin energiahankintakustannuksissa (energian hankinnan seuranta, ennustaminen ja optimointi), energiasäästöjä (häviöiden minimointi, prosessin ominaiskulutusten seuranta ja optimointi), investointisäästöjä (ylimitoitusten vähentäminen) sekä parantaa tuotantoprosessin käyttövarmuutta (ennakoiva sähkökäyttöjen ja verkon kunnonvalvonta, verkon käyttö häiriötilanteissa, sähkön laadun hallinta).

Loppukäyttäjien (prosessiteollisuus) saamien hyötyjen lisäksi aihealue tarjoaa erinomaisen pohjan automaatiojärjestelmien laajapohjaiselle teolliselle tuotannolle ja vientitoiminnalle vastaavalla tavalla kuin on tapahtunut sähköyhtiöiden sähköverkkojen automaatiojärjestelmien kehitystyön yhteydessä. Muita hyödyntäjätahoja voivat olla laitevalmistajat sekä teollisuusprosesseja suunnittelevat konsulttitoimistot.

## 1.2 Tutkimushankkeen tavoitteet

Tutkimushankkeen tavoitteena oli kehittää ja demonstroida ja osin tuotteistaa teollisuussähköjärjestelmien älykkääseen hallintaan soveltuvia menetelmiä, konsepteja ja tietojärjestelmiä sekä syventää osaamista algoritmi- ja mallinuskysymyksissä. Useista projekteista koostuva hanke voidaan jakaa neljään pääsovellusalueeseen, jotka ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa erityisesti tiedonhallinnan kautta:

- tiedonhallinta
- sähköenergian käytön hallinta ja energiataloudellinen laitteiden mitoitus
- teollisuuden sähköjakeluverkon käytön tuki
- sähköjärjestelmien ennakoiva kunnonvalvonta

Pitkän aikavälin tavoitteena on kehittää laaja tietojärjestelmäkokonaisuus, jossa kaikkien edellä mainittujen osakokonaisuuksien sovellukset ovat joustavasti teollisuuslaitoksen eri henkilöstön käytettävissä yhteisiä tietokantoja, tiedonsiirtoväyliä ja käyttöliittymiä hyödyntäen.

### 1.3 Tutkimushankkeen käytännön toteutus

Tutkimushanke on toteutettu laajana yhteistyönä. Tutkijaosapuolina ovat toimineet LTKK, TTKK ja VTT Prosessit (VTT Energia). ABB yhtiöiden rooli hankkeessa on ollut toimia tutkimustulosten tuotteistajana, asiantuntijana sekä rahoittajana. Kehitettyjen ratkaisuiden demonstraatio- ja pilottikohteena on toiminut pääasiassa StoraEnso Oyj:n Varkauden tehdas. Muita hankkeeseen osallistuneita teollisuusosapuolia ovat olleet UPM-Kymmene Kymi Paper, StoraEnso Oulu Fine Paper, UPM-Kymmene Kaukas, AvestaPolarit Chrome, Rautaruukki Raahe Steel, ja M-real Kirkniemi. Rahoitukseen ovat osallistuneet lisäksi Metso Paper Oy, Metso Automation Oy, CTS Engineering Oy ja SVK-pooli.

Hankkeen vastuullinen taho oli vuosina 1998-99 LTKK:n sähkötekniikan laitos ja vuosina 2000-2002 VTT Prosesit (VTT Energia). Hankkeen vastuullisina johtajina ovat toimineet prof. Jarmo Partanen vuosina 1998-99, TkT Sakari Palko v. 2000, PhD Jussi Manninen v. 2001 ja TkL Lauri Kumpulainen v. 2002.

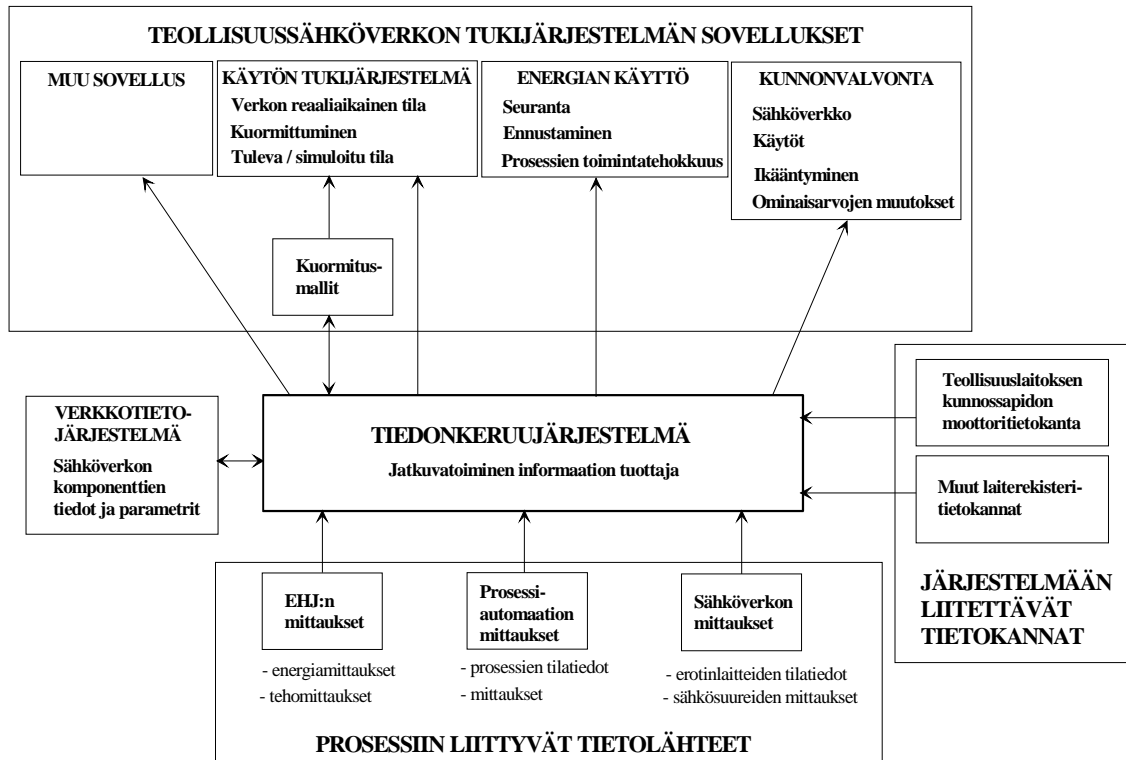
## 2 Tutkimushankkeen keskeiset tulokset ja niiden hyödyntäminen

### 2.1 Tiedonkeruujärjestelmä teollisuussähköjärjestelmien tiedonhallintaa varten

Hankkeen tavoitteena oli kehittää ja demonstroida tiedonkeruujärjestelmää, joka liittyy teollisuuslaitoksen olemassa oleviin tietojärjestelmiin standardiohjelmistorajapintoja hyödyntäen ja yhdistää eri tietolähteistä kerätyn tiedon. Järjestelmän tietolähteitä olivat esimerkiksi prosessiautomaatiojärjestelmä, energianhallintajärjestelmä, sähköverkon mittaukset ja erilaiset laiterekisterit. Tiedonkeruujärjestelmän tehtävänä oli tarjota standardirajapintoja hyödyntäen tietoa neljää eri osa-aluetta edustaville sovelluksille, joita tutkittiin tutkimusprojektin muissa osioissa:

- Sähköenergian käytön hallinta
- Teollisuussähköverkkojen käytöntukijärjestelmä
- Sähköjärjestelmien ennakoiva kunnonvalvonta
- Muut tuotannonohjaustason sovellukset

Tutkimushankkeen puitteissa kehitettiin tiedonkeruujärjestelmä, joka pystyi liittymään erilaisia standardiohjelmistorajapintoja hyödyntäen teollisuuslaitoksen olemassa oleviin tietojärjestelmiin (kuva 2.1.1). Tiedonkeruujärjestelmään pilotoitiin Varkaudessa StoraEnson tehtailla vuosina 1999-2001. Pilotoinnin perusteella todennettiin, että kehitetyllä konseptilla pystytään tuottamaan tietoa tuotannonohjaustason sovelluksia varten ilman, että jokaiselle sovellukselle on rakennettava kenttätasolta lähtien oma instrumentointi ja omat tiedonsiirtoväylät. Järjestelmää hyödynnettiin hankkeen aikana Stora-Enson energia-analyseissä ja sähköverkon käytönuessa. Tuloksilla oli aikanaan merkittävä uutuusarvo, sittemmin vastaavia konsepteja on tullut markkinoille useita.



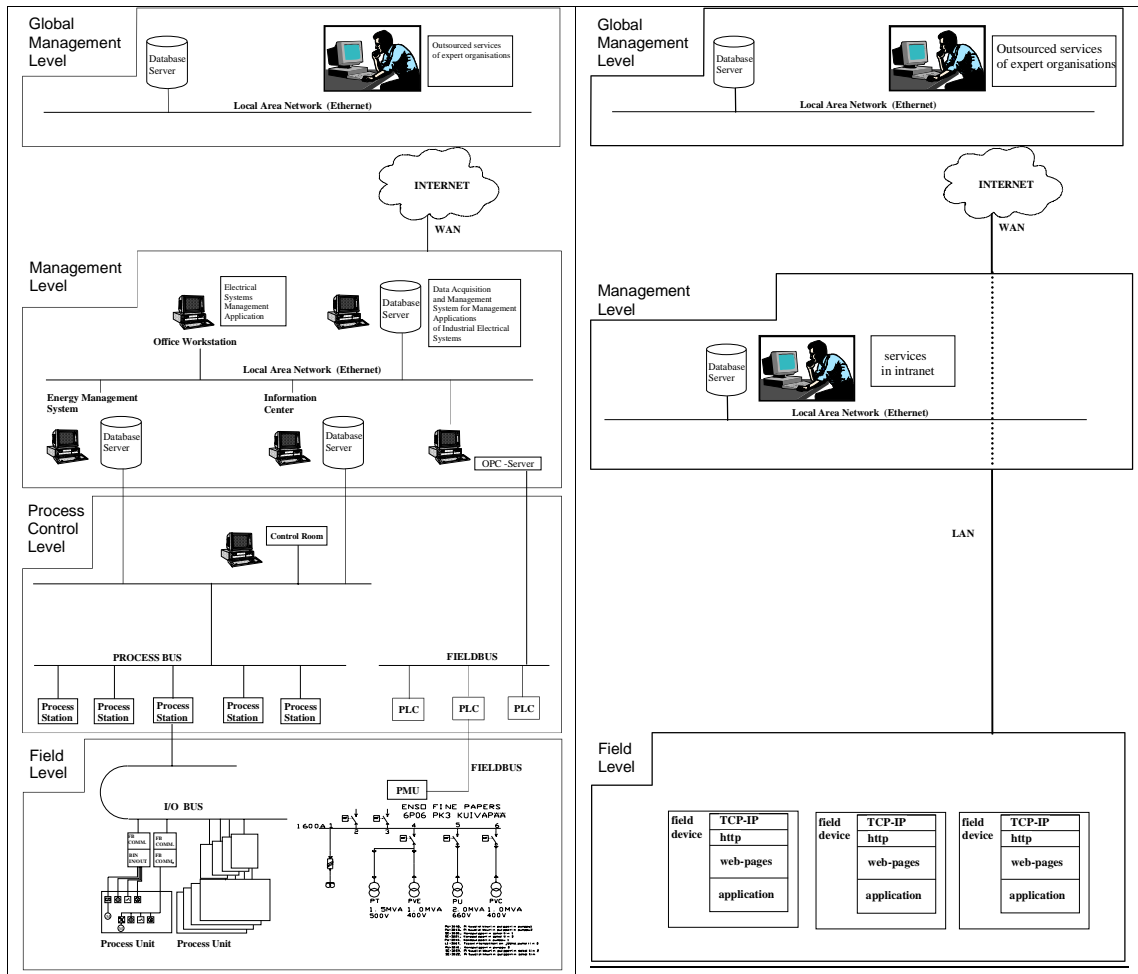
Kuva 2.1.1. Tiedonkeruujärjestelmän sijoittuminen suhteessa tehtaan muihin tietojärjestelmiin.

## 2.2 Sähköjärjestelmien etähallinta teollisuusympäristössä

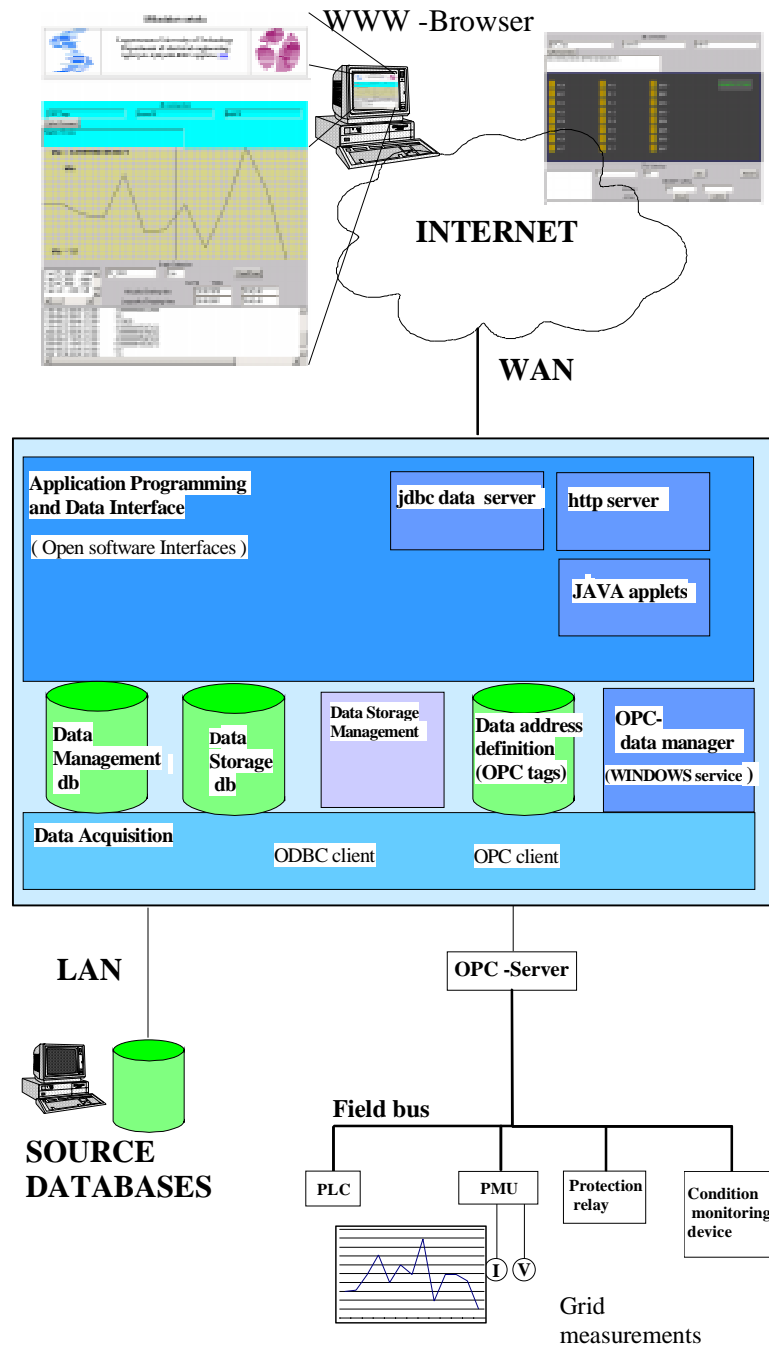
Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka teollisuusympäristössä voidaan toteuttaa järjestelmä, jonka avulla on mahdollista:

- prosessiin liittyvien tietojen seuraaminen mistä tahansa tietokoneesta, jolle on annettu tähän oikeus
- toimilaitteiden, esim. sähköverkossa olevan mittalaitteen, asetusten muuttaminen etäkäyttönä
- kunnonvalvontaan liittyvän tiedonsiirtoketjun rakentaminen anturilta www-verkkoon, joka mahdollistaa toimilaitteiden joustavan etävalvonnan.

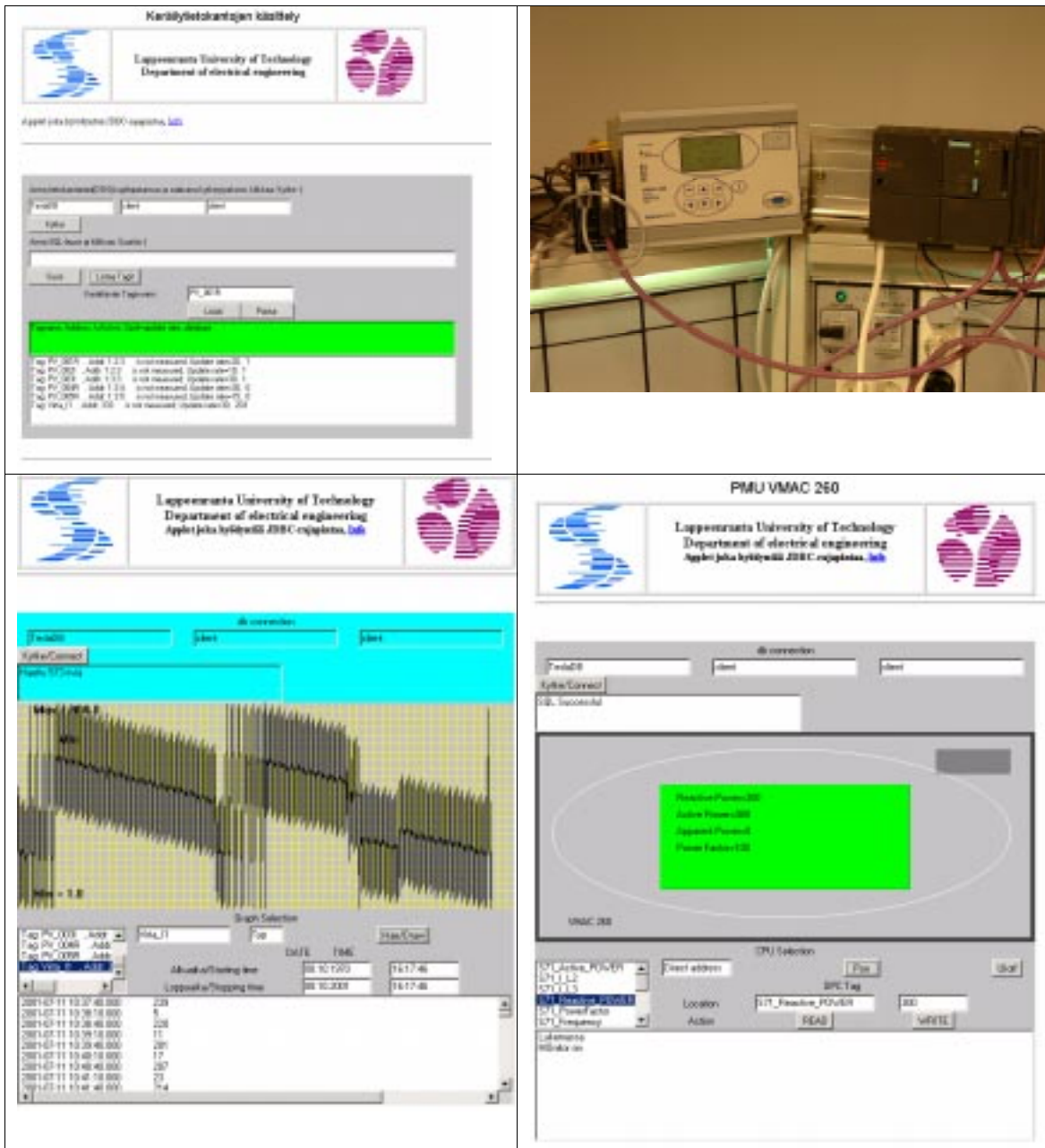
Internet-yhteys muodostettiin laiteasolle epäsuorasti yhdistämällä kenttätason infrastruktuuri ja Internet-työkaluihin tuotannonohjaustasolla (kuva 2.2.1). Laboratorioon rakennetun demonstraatiojärjestelmän avulla todennettiin, että teollisuuslaitoksen kenttätason laitteita voidaan ohjata soveltamalla standardeja tietokanta-, kenttäväylä- ja JAVA-määrittelyjä (kuva 2.2.2). Toteutus vaatii tiedon siirtämistä kenttätasolta tuotannonohjaustasolle ja päinvastoin. Tähän sovellettiin samoja menetelmiä kuin aiemmin esitetyssä tiedonkeruujärjestelmän konseptissa. Web-liittymän avulla voidaan määrittää tiedonkeruutapahtumia, lukea kerättyä tietoa ja lukea ja ohjata kenttäväyliin liitettyjen laitteiden rekistereitä



Kuva 2.2.1. Perinteisen teollisen tietojärjestelmän malli, johon on lisätty mahdollisuudet monitoroida kenttätason laitteita internetin välityksellä (vasemmalla). Kuvassa (oikealla) on esitetty suora web-liityntä kenttätasolle, jonka soveltuvuus teolliseen käyttöön on kyseenalaista.



Kuva 2.2.2. Epäsuoran WWW- laiteyhteyden pääkomponentit. Kenttäväyläteknikka yhdistetään internet-tekniikkaan tuotannonohjaustasolla standardiohjelmisto ja laitekomponenteilla.



Kuva 2.2.3. Epäsuoran WWW- yhteyden avulla voidaan määrittää tiedonkeruuta, esittää tiedonkeruun tuloksia sekä lukea ja ohjata laitteiden rekistereitä.

## 2.3 Sähköenergian käytön hallinta

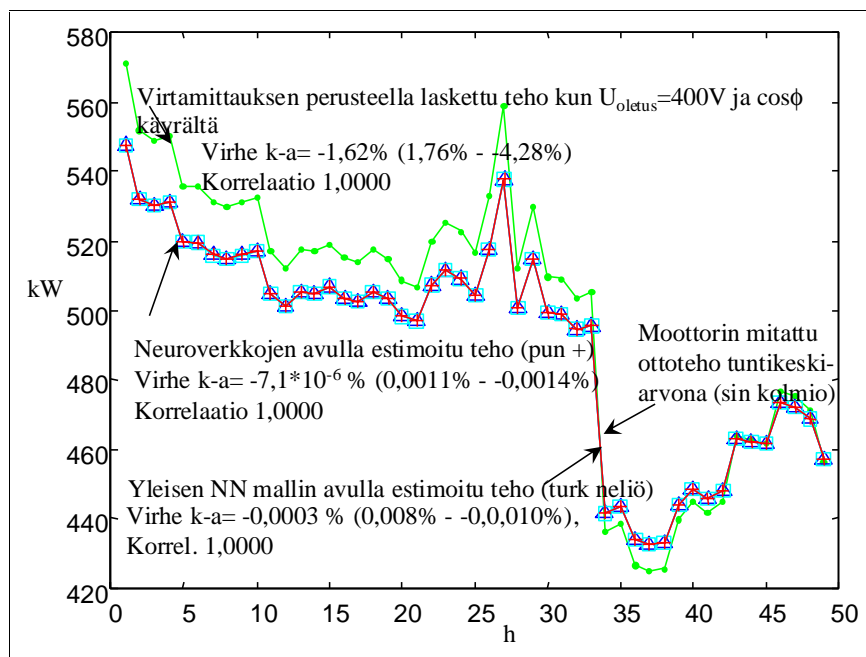
### 2.3.1 Tavoitteet

Osion tärkeimpinä tavoitteina olivat seuraavat:

- 1) selvittää voidaan oikosulkumoottoreiden virtamittaustiedoista luotettavasti ja yksinkertaisesti määrittää jatkuvatoimisesti tehonkulutus,
- 2) määrittää sähköenergian kulutuksen tarkka jakautuminen paperikoneen eri osiin,
- 3) sähköenergiankulutuksen tarkempi ennustaminen ja
- 4) tuottaa tehtaalle käyttökelpoista tietoa tuotantoprosessin energiatehokkuuden parantamiseksi ja näin luoda osaltaan edellytyksiä tehtaan kokonaisvaltaiseen energianhallintaan

### 2.3.2 Virtamittausten soveltuvuus jatkuvatoimiseen tehonmittaukseen

Muunnosta virtamittauksesta tehoon tutkittiin pääosin kahdella menetelmällä: perinteisellä nimellisvirtaan suhteutetuilla käyräsovitteilla ja neuroverkko-mallinnuksella.



Kuva 2.3.1. Moottorin verkosta ottaman tehon laskentamallien vertailu.

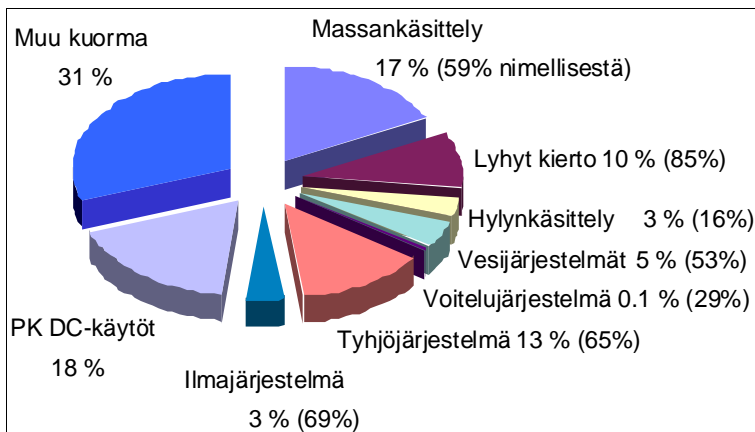
Neuroverkkosovelluksen opetusaineistona käytettiin samanaikaista virta- ja tehomittauksia. Molemmat menetelmät osoittautuivat hyvin toimiviksi. Neuroverkon avulla muunnoksen tarkkuutta voitiin tosin olennaisesti parantaa. Lisäksi neuroverkkomalli voidaan toteuttaa adaptiivisena, jolloin ennustamalli päivittyy automaattisesti tehtaalla tapahtuvien laitteistojen ja tuotantotapojen muutoksissa. Neuroverkkomallin käyttö edellyttää kuitenkin syöte- ja vastearvoiksi riittävän pitkäaikaisia virta- ja tehomittauksia mallin opetusta varten. Uusimpien moottoreiden ollessa kyseessä käytettiin valmistajan antamia tyyppikohtaisia kuormituskäyrästäjä.



### 2.3.3 Sähköenergian kulutuksen jakautuminen prosessinosittain

Projektissa tarkasteltiin seitsemää eri paperikonelinjaa ja yhtä sellunvalmistuslinjaa. Sähkömoottorikäyttöjen energiakulutusta seurattiin neljällä eri ikäisellä paperikonelinjalla ja yhdellä sellunvalmistuslinjalla. Seurantakohteina olivat tyypillisesti yli 30 kW:n tehoiset moottorikäytöt, jotka lukumääräisesti käsittävät n. 20 % paperikonelinjaan asennetuista moottoreista mutta muodostivat yli 80 % yhteenlasketusta asennetusta moottoritehosta. Suurin osa moottoreista oli pumppukohteissa. Muita merkittäviä laiteryhmiä olivat paperikoneen telat, puhaltimet, jauhimet, sekoittimet ja lajittimet.

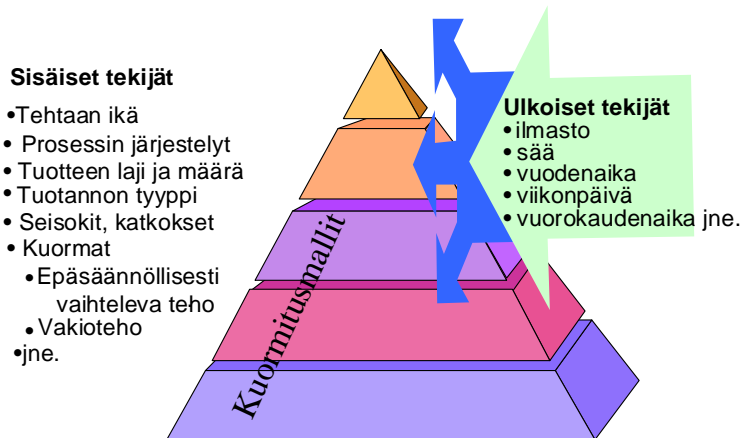
Moottoritietojen lisäksi tiedonkeruun piirissä ovat olleet keskeisimmät tuotantotiedot ja valikoituja automaatiojärjestelmän keräämiä prosessiparametreja. Näiden perusteella voitiin tutkia eri ajotilanteiden vaikutusta. Kuvassa 2.3.2 on esitetty esimerkki paperikonelinjan sähkökulutuksen jakautumisesta prosessinosittain. Ryhmä "muut" sisältää sekä kaikki ne yli 30 kW:n moottorit, jotka eivät olleet seurannassa että alle 30 kW:n moottorit, joista ei tehtaalla ole virtamittausta.



Kuva 2.3.2. Esimerkki talvikaudella mittauksessa mukana olleiden paperikonelinjan moottoreiden energiankulutusosuudesta linjan koko energian kulutuksesta.

### 2.3.4 Prosessin energiatehokkuuden arviointi

Paperikonelinjalla keskeisimmät kulutuksen vaihtelua selittävät tekijät olivat tuotannon määrä ja laji, jotka ovat myös tärkeimmät tekijät tuotannon suuruuden tarkennetussa ennustamisessa. Tuotelajin osalta tärkein vaikuttaja oli neliöpaino, mutta suurimmalta osalta sähköenergian kulutuksen vaihtelut eri neliöpainoilla johtuivat käytetyistä erilaisista ajonopeuksista. Vuodenajan ja ympäristön lämpötilan vaikutus näkyi lähinnä seisokkien aikaisessa tehonkulutuksessa, ollen lähinnä valaistus-, ilmastointi ja apulaitekuormaa. Vuorokauden aikojen ja viikonpäivien erot olivat tilastollisesti merkittäviä. Viikonpäivien erot johtuivat lähinnä seisokkien ajoittumisesta tietyille viikonpäiville. Työvuorojen väliset erot energiankulutusta tarkasteltaessa ovat selkeämmät seisokkien ja katkosten aikana, jolloin työntekijöiden toimenpiteet esim. moottoreiden pysäyttämisen suhteen saattoivat poiketa toisistaan. Katkoksien aikainen energiankulutus oli keskimäärin hieman suurempaa kuin normaalin tuotantoajan.



Kuva 2.3.3. Paperitehtaan energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä

Tutkitun koivusellun valmistuslinjan moottorikäyttöjen ottama kokonaisteho riippui selkeästi tuotannosta ja sekä valkaisimon kulutuksen että kokonaistehon vaihtelua selitti hyvin massavirta tasaussäiliöön.

Erästä tutkimuksessa mukana olleesta paperikoneesta laadittiin tasemalli, jonka avulla voitiin simuloida ainevirtauksia eri ajotilanteissa. Simulointiympäristönä käytettiin VTT:n kehittämää Balas-ohjelmistoa. Paine- ja virtausmittauksista saatujen tietojen ja pumppujen tuottokäyrien perusteella analysoitiin keskeisimpien seurannan piirissä olleiden pumppausjärjestelmien hyötysuhteita.

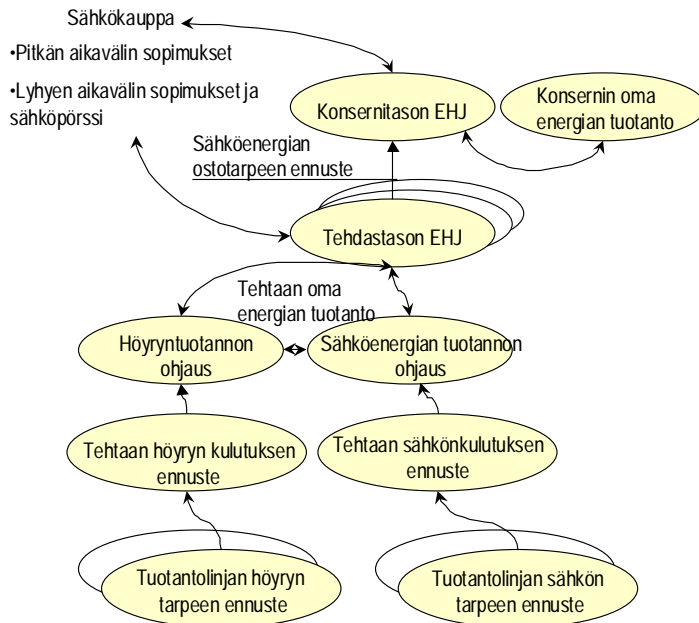
Seurantojen ja analyysien tulokset raportoitiin osalle tehtaista energiansäästöön tähtäävinä toimenpide-ehdotuksina. Erikoistilanteet (seisokit, katkot) ja normaaliajotilanteet käsiteltiin erikseen. Erikoistilanteiden osalta päähuomio oli laitteissa, jotka jäävät päälle tuotannon pysähtyessä. Seisokin aikaiseen tehonkulutukseen vaikuttavat kesto ja tyyppi sekä jossain määrin vakiintunut toimintatapa. Normaali ajotilanteiden osalta tarkasteltiin laitteiden kuormitustasoa ja sen pysyvyyttä sekä verrattiin näitä mitoitusarvoihin. Lähellä nimellispiistettään pysyvästi toimivat laitteet identifioitiin.

### 2.3.5 Sähköenergian kulutuksen tarkempi ennustaminen

Sähkömarkkinoiden vapautuminen ja yleiset energiansäästösopimukset ovat osaltaan lisänneet tarvetta tehokkaampaan energianhallintaan teollisen tuotannon eri osa-alueilla. Energian käytön ja hallinnan optimoinnin tärkeimpiä perusedellytyksiä ovat mm. tehokkaat ja jatkuvat energiansäästötoimenpiteet ja toimintatilanteiden muutoksissakin toimivat energian kulutuksen ennustemenetelmät. Energiansäästötoimenpiteiden kohdentaminen ja tarkemman sähkönkulutuksen ennustusmenetelmän kehittäminen edellyttävät sähköenergian kulutuksen määrään ja dynamiikkaan liittyvien tekijöiden tuntemusta.

Paperitehtaan energiankulutuksen ennustamistoiminnot riippuvat koko tehtaan rakenteesta ja toiminnoista. Erityisesti paperinvalmistuksessa merkittävänä tekijänä parempien sähköenergiakulutusten ennustemenetelmien tarpeelle on ollut uusien entistä tehokkaampien paperikoneiden käyttöönotto. Uusien koneiden energiankulutuksen

vaihtelut vastaavat pienempien koneiden koko kulutusta ja kuormitusten vaihtelut näkyvät selkeämmin jopa ison konsernin kokonaissähkötaseessa. Kun pienten ja keskisuurten paperinvalmistuslinjojen energiankulutuksen ennustevirheet vaihtelevat 8-20 %, voivat vastaavilla menetelmillä suurien koneiden ennustevirheet olla jopa 100 %.



Kuva 2.3.4. Paperitehtaan energiakulutuksen ennustamistoiminnot riippuvat koko tehtaan rakenteesta ja toiminnoista

Työssä kehitettiin kaskadi neuroverkkopohjainen asiantuntijasäännöillä täydennetty ennustamiskonsepti, joka validoitiin neljän paperikonelinjan tuotanto- ja kulutustiedoilla. Neuroverkolla saadut tulokset olivat kussakin testitapauksessa paremmat kuin aikaisemmilla malleilla etenkin tapauksissa, joissa energiankulutuksen vaihtelut olivat suurempia.

### 2.3.6 Tulosten hyödyntäminen

Hankkeessa useiden vuosien aikana toteutetun mittaustoiminnan avulla on tuotettu tietoa erityisesti tuotantolaitosten henkilökunnalle. Potentiaalisia säästökohteita on esitetty, prosessin energiankulutuksen tuntemus on kehittynyt, kuormitustasot ja mitoituksen onnistuminen ovat selvinneet. Hanke on synnyttänyt kysyntää energian hallintaan liittyvälle mittauspalvelutoiminnalle. Linjakohtaisen energiakulutusten vaatimusten lisääntyessä neuroverkkopohjainen asiantuntijasäännöillä täydennetty ennustemenetelmä antaa mahdollisuuksia tarkennettuun ennustamiseen, jos tuotannon suunnittelun tiedot ovat saatavissa reaaliaikaisena sähköisessä muodossa ja kulutuksen sekä malliin liitettyjen syötteiden historiatietoja on käytettävissä.

## 2.4 Energiataloudellinen laitemitoitus

### 2.4.1 Taustaa ja tavoitteita

Teollisuuden sähköenergiankulutus on n. 53 % (Sener: Sähkövuosi 2001) koko maan sähköenergiankulutuksesta ja suurin osa siitä (jopa 80 %) muodostuu sähkömoottorikäyttöjen kulutuksesta. Useiden kansainvälisten tutkimusten mukaan moottorikäyttöihin liittyvän sähköenergiankulutuksen säästöpotentiaali on merkittävä. Em. tutkimustulosten mukaisesti säästöpotentiaalin syntymiseen ovat syynä mm. moottorikäyttöjen mitoitus-, valinta- ja käyttökäytännöt, puute energiakustannukset huomioon ottavasta mitoitusyökalusta sekä tiedonpuute uusista energiataloudellisista ratkaisuista ja laitteiden todellisesta energiakulutuksesta.

Mitoitusosuudessa hyödynnettiin tutkittavissa tuotantolaitoksissa tehtyjä mittauksia, laitteiden toiminta- ja kuormitustasotutkimuksia. Tavoitteita olivat seuraavat:

- Selvittää mitoitukseen ja sähkömoottorien valintaan liittyvä nykykäytäntö sekä kansainvälisten tutkimusten perusteella että projektin tutkimuskohteina olleiden tuotantolinjojen osalta.
- Tarkastella tutkimuskohteina olleiden tehtaiden avulla sähkökäyttöihin liittyvien laitteiden mitoitusperusteita ja erilaisten laitevalintojen aiheuttamia seuraamuksia
- Määrittää sähkönjakelun ja käytön osille kustannusherkkyyttä eli hinnan säästö/lisäys, kun valitaan edellisen tai seuraavan kokoluokan laitteet eri paikkoihin.
- Syventää moottoreihin liittyvää osuutta ja ottaa vahvemmin mukaan moottorikäyttöjen elinikäkustannusten hallinta, uusien energiatehokkaiden moottorien käyttöön liittyvän tietämyksen lisääminen.
- Kartoittaa aikaisempia käytäntöjä ja uusia mahdollisuuksia ja tarpeita projektissa mukana olevien yritysten asiantuntijoiden (suunnittelijat, konsultit ja laitevalmistajat) kanssa yhteistyössä (ryhmätyöpäivät).
- Tarkastella moottorikäyttöjen mitoittamis- ja valintakäytäntöjä ja niihin liittyviä eri suunnitteluryhmien välisiä osaamis- ja tiedonsiirtotarpeita sekä tehokkaampien, elinikäkustannukset huomioon ottavien mitoitus/valintatyökalujen kehittämistarpeita.



Kuva 2.4.1. Kaavio mitoitusarkistuksesta

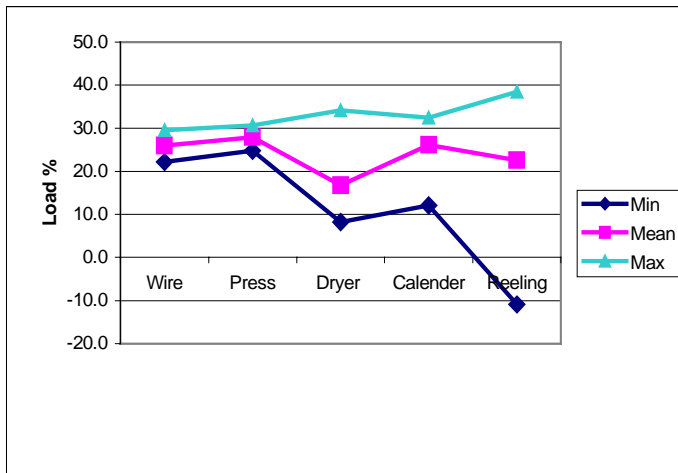
## 2.4.2 Saavutetut tulokset

US DOE:n (United States Department of Energy) Motor Challenge ohjelman (v. 1998) tulosten mukaan säästöpotentiaali moottorikäyttöjen nykyisestä kulutuksesta olisi 11-18 %. Suurimmat säästökohteet löytyvät paperi-, kemian ja metalliteollisuuden pumppu- (5 %:n säästöpotentiaali), puhallin- (0,8 %) ja kompressorikäytöistä (2,7 %). Suurimpiin säästöihin voitaisiin päästä tarkkailemalla energiakulutusta mittauksin ja käyttämällä energiakustannusten suhteen optimoituja ratkaisuja, kuten prosessilaitteiden (pumput, puhaltimet jne.) moottoreiden ja niihin liittyvien sähköisten ja mekaanisten laitteiden koko eliniän kustannukset huomioon ottavaa optimaalista mitoitusperiaatetta (US DOE: tutkituista 200 moottorikäytöstä 44 % oli ylimitoitettu käyden korkeintaan 40 % osakuormalla), taajuusmuuttajia nopeuden säätöön ja uusia energiataloudellisia moottoreita.

Teollisuuden sähköenergiankulutus oli Suomessa vuonna 2000 43,2 TWh, joka on n. 53 % (Sener: Sähkövuosi 2001) koko maan sähköenergiankulutuksesta. Teollisuuden sähkönkulutuksesta muodostuu Suomessa jopa 80 % sähkömoottorikäyttöjen kulutuksesta, josta esim. pumppujen kulutus on n. 20 %. 80 %:n osuus vuoden 2001 kokonaiskulutuksesta merkitsisi n. 34,6 TWh ja esim. 10 %:n kokonaissäästöpotentiaali olisi n. 3,5 TWh.

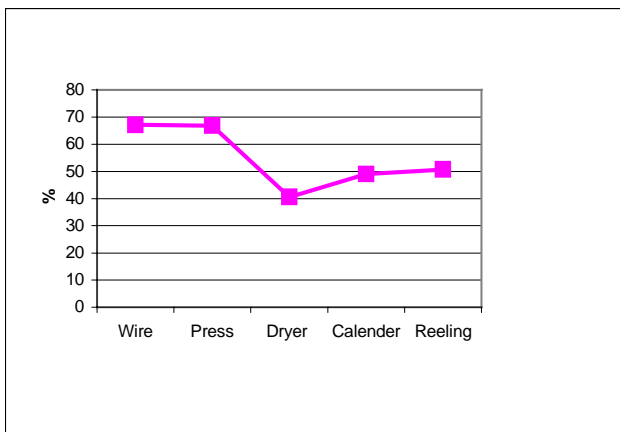
TSH-projektissa tarkasteltiin kaikkiaan 7 eri ikäisen paperikoneen ja yhden sellutehtaan yhteensä 3858 moottoria. Osaa pumppukäytöistä tarkasteltiin lähemmin myös pumpun ja juoksupyörän mitoituksen osalta.

Vuosien 1998-2001 aikana suoritettujen moottorien kuormitusmittauksien mukaan huonolla hyötysuhteella käyvien laitteiden olemassaolo havaittiin jopa vanhoilla maksimituotannossa olevilla prosessilinjjoilla. Noin 30 % moottoreista toimi alikuormassa. Vuonna 2002 uusina tutkimuskohteina oli lisäksi kaksi paperinvalmistuslinjaa, joista toisessa ei vielä ollut tehty tuotannon nostoon liittyviä muutoksia, joten laitteiden kuormituksia voitiin tarkastella verrattuna alkuperäiseen mitoituskuormitukseen. Tulosten tarkasteluun osallistui myös ko. tehtaiden edustajia sekä paperikoneen valmistajan asiantuntijoita. Myös uusissa tuotantolaitoksissa löytyi moottorikäyttöjä, jotka voidaan katsoa ylimitoitetuiksi. Tutkimuksen mukaan kuormitus paperikoneen eri osissa vaihteli ollessaan alle 40 % moottorin nimellisestä kuormasta.



Kuva 2.4.2. Kuormituksen vaihtelu paperikoneen osissa suhteessa moottorin nimellistehoon.

Suurin ero lasketun tehontarpeen ja nimellistehon välillä esiintyi kuivaimessa, jossa kuorman kiihdytys on määräävä mitoituksen kannalta.



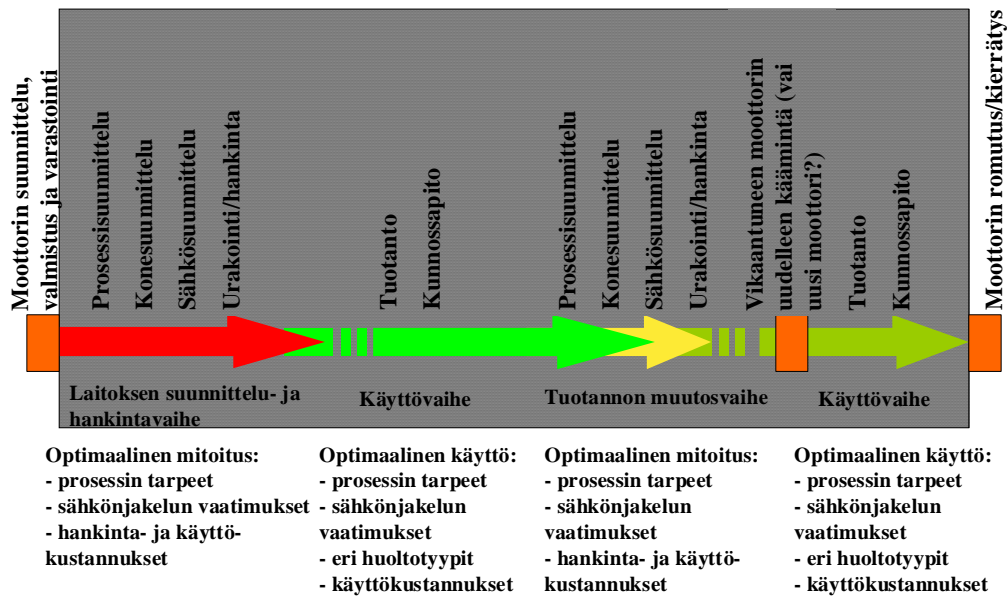
Kuva 2.4.3. Esimerkki moottorin mitoituksen tarkastelusta paperikoneen osissa. Lasketun tehontarpeen ja yhteenlasketun nimellistehon suhde nimelliskuormalla ja nimellisuopeudella.

Tutkimustulosten mukaan merkittävimmät säästövaikutukset saavutettaisiin pumppausjärjestelmissä investoimalla pyörimisnopeussäätöihin ja pysyvillä pumpun

kapasiteetin muutoksilla. Myös jatkuvasti matalalla kuormitustasolla toimivien moottoreiden vaihdoilla saavutettaisiin pienehköjä säästöjä sähkönkulutuksessa. Näissä kohteissa suurempi hyöty kuitenkin saataisiin parantuneen loistehon hallinnan kautta.

Moottorikäyttöjen optimoitu mitoitus, jossa koko elinkaaren aiheuttamat kustannukset on otettu huomioon, lisää tuotantoprosessien tehokkuutta ja myös tyypillisesti vähentää moottorien energiakulutusta. Kuvassa 2.4.4 on esitetty moottorikäyttöjen koko eliniän aikaisten kustannusten vaiheita ja optimointimahdollisuuksia.

Teollisuusprosessien moottorikäyttöjen mitoitus ja valinta ovat vaativia tehtäviä, johon elinikäkustannusten, ympäristövaikutusten ja energiatehokkuuden vaatimukset tuovat lisää tarpeita. Mittaustulokset sekä käytännön tietämys prosessissa ja ympäristössä tapahtuvista vaihteluista antavat paremmat mahdollisuudet todellisen kuormituksen selvittämiseen. Sähkömoottorin ja siihen liittyvien esim. nopeuden säätöön tarkoitettujen laitteiden valinnan ja mitoituksen kannalta todellisten kuormitusten vaihtelujen selvittäminen on olennaisen tärkeää. Hyvät mitoitus- ja valintatyökalut sekä tehokas ja tarkka eri suunnittelu- ja valitsijaportaiden välinen tiedonsiirto parantaa optimaalisen mitoituksen mahdollisuuksia ja estää sähkömoottorien tarkoituksettoman ylimitoituksen, joka voi näkyä koko sähkönjakeluportaan ylimitoituksena ja virheellisinä energiantuotannon tarvearvioina.



Kuva 2.4.4 Moottorikäyttöjen koko eliniän aikaisten kustannusten vaiheet ja optimointimahdollisuudet.

Moottoreiden ylimitoituksen kustannusvaikutuksista tehtiin hypoteettinen tarkastelu, jonka kohteina olivat vanha, pienekapasiteettinen paperinvalmistuslinja ja uusi suurikapasiteettinen linja. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 2.4.1. Taulukossa kohde A on vanha ja kohde B uusi tehdas. Tarkastelussa a) kaikki 30 kW ja suuremmat moottorit on ylimitoitettu yhden tehoportaan verran, tarkastelussa b) vain teholuokka 30-100 kW.

Taulukko 2.4.1. Esimerkkitarkastelu moottoreiden ylimitoituksen aiheuttamista kustannuksista.

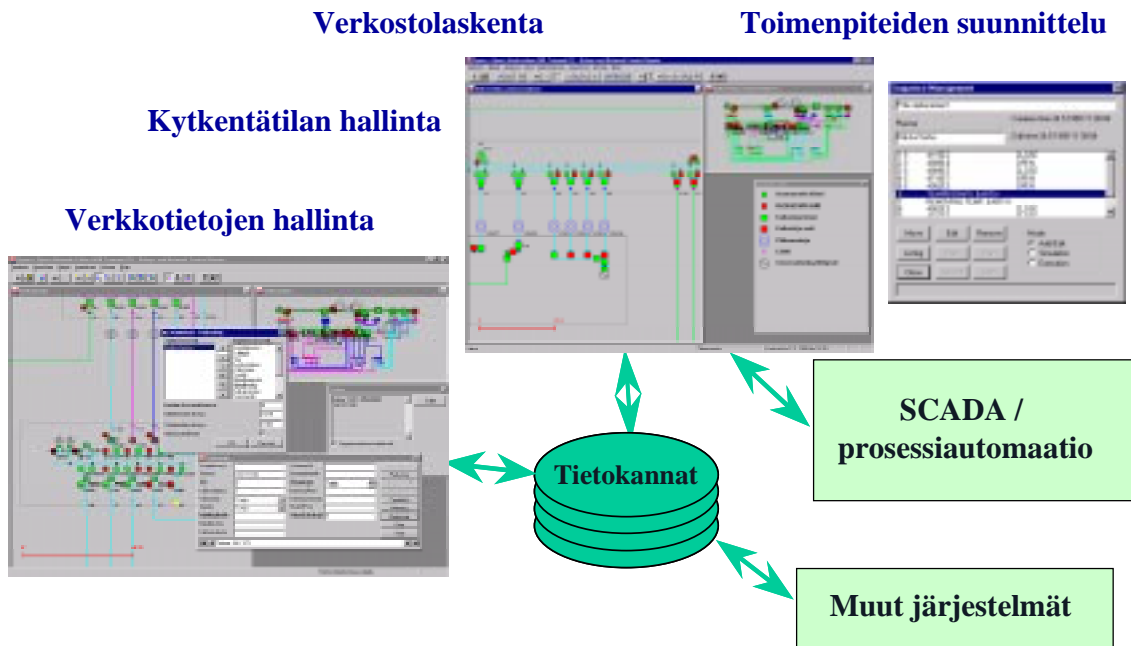
Ylimitoituksen aiheuttama kustannuslisä / eur		Kohde A		Kohde B
		a)	b)	b)
Investointikustannukset				
	Moottorit	266015	90113	95149
	Moottorikeskukset	117059	78235	77143
	Moottorikaapelit	69718	17916	24077
	Taajuusmuuttajat	6567	3121	16965
	Turvakytkimet	27271	8279	12962
	Jakelumuuntajat	24756	12227	17630
	Yhteensä	511386	209891	243927
	Investoinnin arvo 5 v:n kuluttua 5% korolla	652672	267880	311319
Käyttökustannukset *)	Tehomaksu	2952	759	1007
	Loistehomaksu	0	0	0
	Energiamaksu	26207	6742	8936
	Yhteensä	29159	7501	9943
	5 v:n käyttökust. 5% korolla	161123	41450	54940
Lisäkust. 5 v:n kuluttua		813795	309330	366259



## 2.5 Teollisuuden sähköverkon käytöntuki

Sähköverkon käytöntuella tarkoitetaan sovelluskokonaisuutta, jonka avulla teollisuuden sähköjakelujärjestelmän tietoja ja toimintoja voidaan hallita verkon dokumentaation, suunnittelun ja käyttötoiminnan kannalta yhtenäisenä kokonaisuutena. Käytöntuen sovellukset voivat kuulua tapauskohtaisesti eri tietojärjestelmiin, kuten esim. verkkotietojärjestelmään (VTJ), käytöntukijärjestelmään (KTJ) tai käytönvalvontajärjestelmään (SCADA), tai teollisuuslaitoksen omiin räätälöityihin sovelluksiin. Kuvassa 2.5.1 on esitetty sähköverkon käytöntuen sovelluskokonaisuutta.

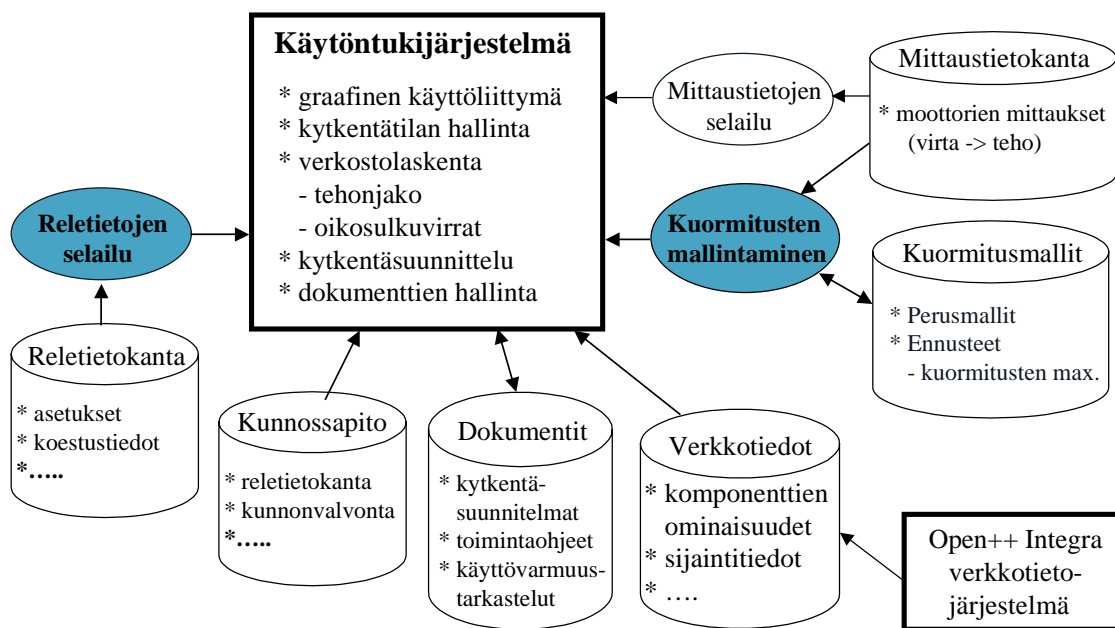
Sähköyhtiöiden julkisten jakeluverkkojen dokumentaation, suunnittelun ja käytön hallintaan on käytössä vakiintuneita tietojärjestelmiä ja –sovelluksia. Teollisuudessa ei ole sähköyhtiöiden kaltaista verkkotietojärjestelmäperinnettä, käytönvalvontajärjestelmien käyttö sähköverkon hallintaan ei ole yhtä yleistä ja toisaalta monia sähköverkkoon liittyviä toimintoja (esim. verkostosuunnittelu, kunnossapito) on ulkoistettu. Teollisuusympäristöstä johtuen tietojärjestelmätoimintojen tarpeet ja toteutusmallit ovat osin erilaiset, mikä on vaatinut uutta tutkimus- ja kehitystyötä. Taustalla tutkimusprojektissa on ollut TTKK:ssa 80- ja 90-lukujen aikana sähköjakeluverkkojen verkkotieto- ja käytöntukijärjestelmien eri sovelluksiin liittynyt tutkimustyö.



Kuva 2.5.1. Teollisuuden sähköjakelun käytöntuen sovelluskokonaisuus.

Varkaudessa StoraEnson tehtailla otettiin projektin kuluessa käyttöön ABB Oy:n verkkotietojärjestelmä Open++ Integra. Verkkotietojärjestelmä muodostaa graafisen dokumentaatiojärjestelmän, jonka avulla sähköjakeluverkon komponenttien ominaisuus- ja sijaintitiedot talletetaan avoimeen relaatiotietokantaan. Tietokannasta voidaan tehdä erilaisiin tarpeisiin raportteja ja yhteenvetoja. Teollisuusympäristöön soveltuva ABB Oy:n Open++ Opera käytöntukijärjestelmä sisältää perustoimintoina graafisen näkymän sähköverkkoon ja sen komponenttien ominaisuustietoihin, verkon kytkentätilan hallinnan sekä tehonjaon ja vikavirtojen laskennan.

Kuvassa 2.5.2 on esitetty projektissa kehitettyä ja määriteltyä StoraEnson Varkauden tehtailla toimivaa käytöntukijärjestelmäkokonaisuutta, johon liittyy niin TTKK:n tutkimusprojektin tuloksia kuin ABB Oy:n tuotekehitystyötä. Kuvassa olevat tietokannat sijaitsevat tietokantapalvelimilla. Käytöntuki- ja verkkotietojärjestelmä toimivat Windows NT -työasemissa. Käytöntukijärjestelmän graafisen verkkokuvan kautta voidaan tarkastella myös muiden tietokantojen tietoja, kunhan tietokantojen linkityksessä käytetään verkon solmutunnuksia. Näin esimerkiksi mittaustietokannan käyttöliittymä tai StoraEnson itse kehittämä Access-pohjainen relekoestustiedot sisältävä tietokantasovellus voidaan avata käytöntukijärjestelmän verkkokuvan kautta esittämään halutun kohteen tietoja.



Kuva 2.5.2 Varkauden StoraEnson käytöntukijärjestelmäkokonaisuus ja siihen liittyvät tietokannat.

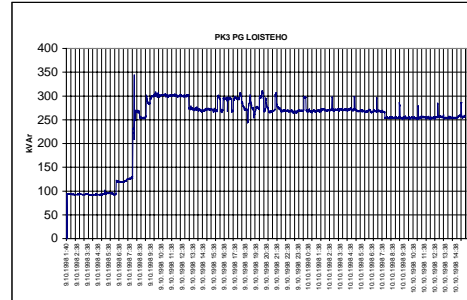
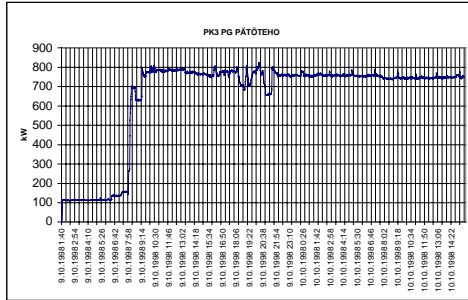
Tutkimusprojektissa käytöntukisovellukset ovat tarkoittaneet käytöntukijärjestelmän toimintojen kehittämiseen liittyvää tutkimustyötä. Tärkeimmät käytöntukijärjestelmän kehittämiseen liittyneitä toimintoja, joihin tutkimusprojektissa on keskitytty, ovat olleet:

- kuormitusmallien määrittäminen ja tuotantoprosessin kuormitusten ennustaminen
- silmukoidun verkon laskenta-algoritmit
- sähköverkon käyttövarmuustarkasteluihin liittyvät menetelmät
- tiedonhallinta

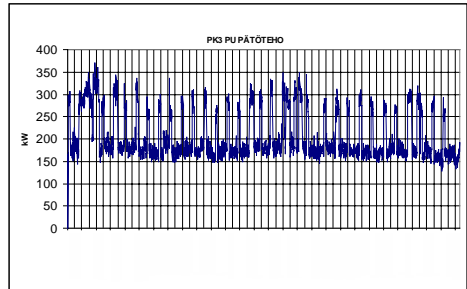
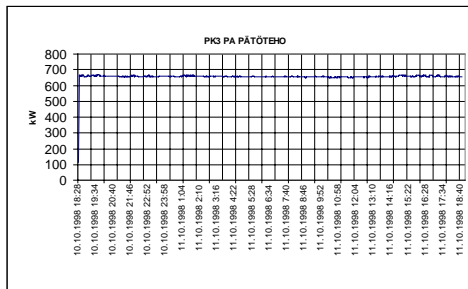
### 2.5.1 Kuormitusmallit

Sähköverkon tehonjakolaskelmissa tarvitaan mahdollisimman tarkkoja malleja yksittäisten kuormitusten käyttäytymisestä. Teollisuuden jakeluverkkojen mallintamiseen ei julkisten jakeluverkkojen laskentaa varten kehitettyjä tyyppikuormituskäyriä voida sellaisenaan soveltaa vaan kuormitusmallit on määritettävä uudella tavalla. Teollisuusverkoissa osa kuormituksesta on erittäin merkittävästi tuotannosta ja mallinnettavasta prosessista riippuvaa (esim. osa sähkömoottoreista), kun taas osa kuormituksista on puolestaan vähän tuotannosta riippuvaa (esim. valaistus).

Tutkimusprojektissa toteutettiin kattavat erillismittaukset StoraEnson Varkauden tehtaiden paperikoneiden 3 ja 4 osalta. Paperikoneita 3 ja 4 syöttävän keskijänniteverkon jakelumuuntajien kuormitusta mitattiin samanaikaisesti noin neljän vuorokauden ajan sisältäen myös paperikoneen käynnistyksen. Seuraavissa kuvissa on eräitä mitattuja tehokäyriä, jotka esittävät kuormituksen tasoa ja käyttäytymistä jakelumuuntajassa.



Kuva 2.5.3. Muuntajan PG pätötehoikäyriä. Kuva 2.5.4. Muuntajan PG loistehoikäyriä.



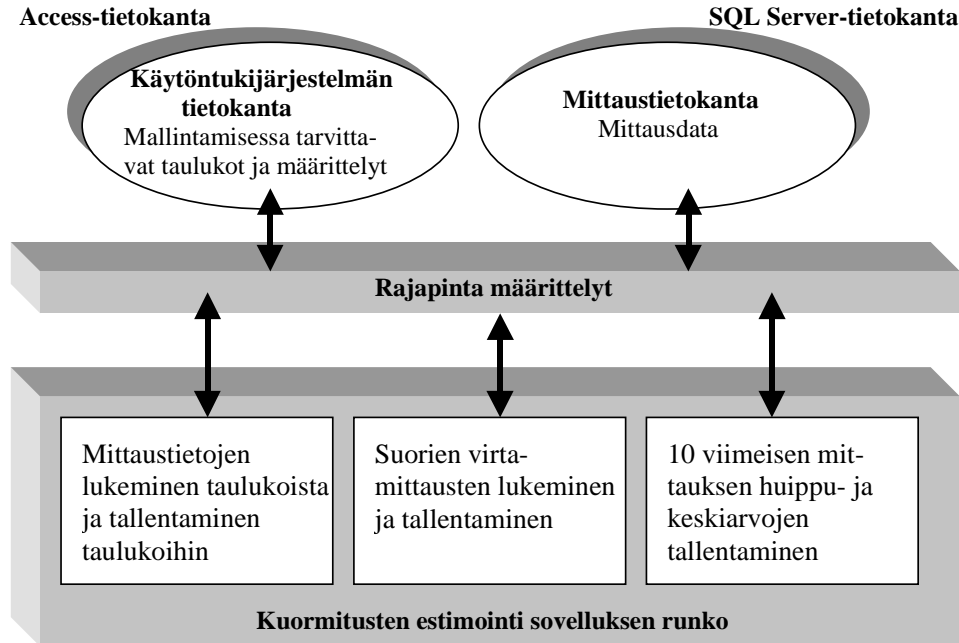
Kuva 2.5.5. Muuntajan PA pätötehoikäyriä Kuva 2.5.6. Muuntajan PU pätötehoikäyriä.

Useimmissa mittauspisteissä pätötehot pysyvät hyvin tasaisena tuotannon toimiessa normaalisti. Poikkeustapauksissa tehojen muutokset ovat askelmaisia nopeita tehotason muutoksia. Lähes kaikissa mittauspisteissä loistehoissa esiintyy askelmaisia merkittäviä tasomuutoksia, jotka johtuvat osaksi kompensointiparistojen kytkennöistä.

Kuormituksen taso ja vaihtelu voidaan mallintaa seuraamalla kunkin jakelumuuntajan syöttämien pienjänniteverkon (prosessiverkon) kuormitusten mitattuja virtoja, mikäli muuntamossa itsessään ei ole kaukoluettavaa virtamittausta. Jakelumuuntajittain voidaan erottaa keskeiset pienjänniteverkossa olevat kuormitukset, jotka muodostavat määräävän osan muuntajan kuormasta, ja joiden seurannalla voidaan mallintaa kunkin muuntajan reaaliaikainen kuormitus. Valittujen kuormitusten tehotiedot saadaan luettua mittaustietokannasta. Jakelumuuntajan kuormitus mallinnetaan laskemalla muuntajan syöttämien kuormitusten tehot yhteen ja muokkaamalla tulosta erillismittausten pohjalta määritettyjen korjauskertoimien avulla.

Projektissa kehitettiin C++ -kielinen kuormitusten estimointi -sovellus (kuvassa 2 tummennettu esitetty sovellus), joka määrittää jatkuvatoimisesti mittaustietokannan reaaliaikaisten mittaustietojen sekä aikaisemmin toteutettuihin erillismittauksiin perustuvien peruskuormitusmallien avulla jakelumuuntajakohtaisia kuormituksia käytöntukijärjestelmän tehonjaon laskennan lähtötiedoiksi niin reaaliaikaista laskentaa kuin maksimikuormitustilannetta vastaavaa simulointia varten (kuva 7). Sovelluksessa

hyödynnetään mittaustietokannan sovellusrajapinnan funktiokutsuja, jotka on liitetty mukaan DLL-kirjastona. Demonstroitu toiminnallisuus on tuoteistettavissa jatkokehitystyönä joko osana ABB Oy:n käytöntukijärjestelmäkokonaisuutta tai osana



erillisen mittaustietokannan toiminnallisuutta.

Kuva 2.5.7. *Kuormitusten estimointi –sovellus.*

## 2.5.2 Laskenta-algoritmit

Projektissa kehitettiin käytöntukijärjestelmän kanssa yhteistä verkkomallia hyödyntävää staattisen tilan tarkasteluun soveltuvaa laskenta-ohjelmistoa, joka laskee jakeluverkon tehonjaon ja oikosulkuvirrat myös silloin, kun verkon kytkentätila on silmukoitu tai kun vikavirtalähteitä on useita. Tehonjaon lähtötietoina käytetään edellä kuvattuja jakelumuuntajien kuormitusmalleja.

Tehonjaon laskentaan projektissa kehitettiin laskentaohjelma, joka laskee keskijänniteverkon tehonjaon Newton-Raphsonin menetelmällä. Ohjelma sisältää verkon kytkentätilan analysoinnin, joka jaottelee verkon saarekkeisiin, jos niitä on enemmän kuin yksi. Laskennan lähtötietoina tarvitaan kuormitussolmuille (muuntajat, moottorit) niiden ottamat pätö- ja loistehot sekä generaattorisolmuille jännitteet ja tuotetut pätötehot. Rajapintana laskennan ja lähtötietojen välillä toimii Access-tietokannassa olevat kuormitusmallit.

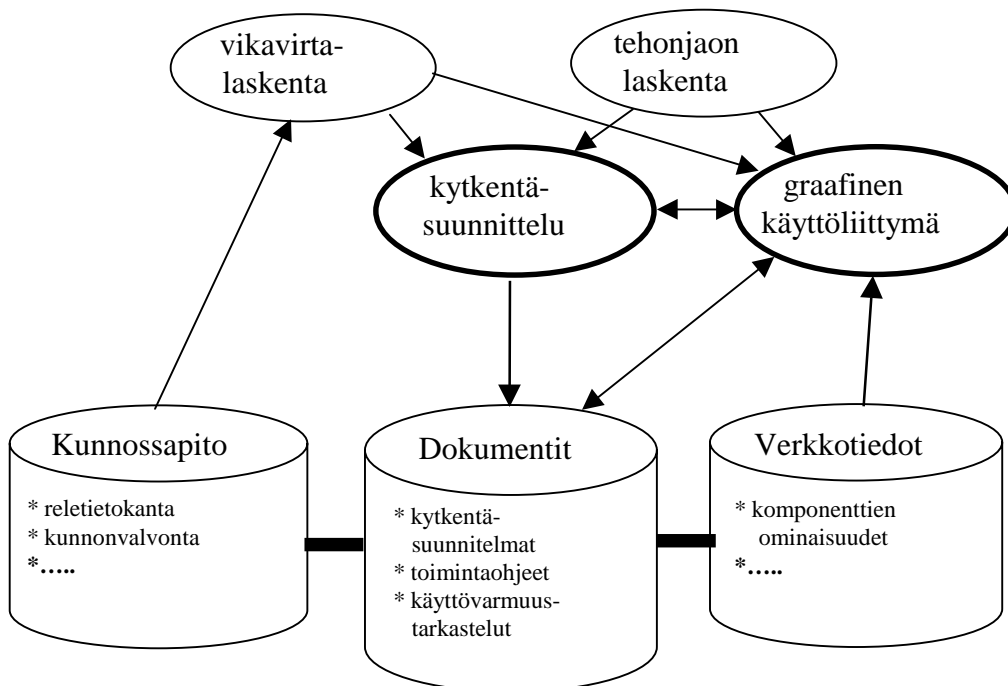
Vikavirtalaskennassa määritetään verkon oikosulkuvirrat käyttäjän osoittaman vikapaikan perusteella. Projektissa toteutettu laskentaohjelma sisältää solmupiste-impedanssimatriisin  $Z$  generoinnin  $Z$ -algoritmia käyttäen sekä vikavirtojen laskemisen kaikille solmuväleille vikapaikan funktiona. Vikavirtalaskenta käyttää samaa verkon analysointia kuin tehonjakolaskenta. Lähtötietoina vikavirtalaskenta tarvitsee admittanssimatriisin ja solmujännitteet ennen vikaa.

Laskenta-algoritmien jatkokehitys ja tuotteistaminen siirtyi vuoden 2000 aikana osaksi ABB Oy:n tuotekehitystoimintaa.

### 2.5.3 Käyttövarmuustarkastelut

Käyttövarmuuden hallinnalla ja siihen liittyvillä toiminnoilla on teollisuudessa huomattava taloudellinen merkitys. Tähän liittyy toisaalta häiriöiden aiheuttamat tuotannon menetykset ja toisaalta panostukset verkon investointeihin, kunnossapitoon sekä käyttötoimintaan. Luotettavuusteknisen tilan analysointi liittyy läheisesti myös suojauskoordinaatioon eli analysointimallien avulla voidaan ennustaa miten sähköjakelujärjestelmä sekä edelleen primääriprosessi käyttäytyvät jakeluverkon vikatilanteissa.

Sähköverkon käyttövarmuuden hallintaan liittyviä käytön tuen toimintoja voidaan sisällyttää kokonaiskonseptista riippuen useisiin eri järjestelmiin, joita ovat mm. verkko-tietojärjestelmä, käytöntukijärjestelmä, käytönvalvontajärjestelmä, kunnossapito-järjestelmät sekä erilaiset dokumentointijärjestelmät. Kuvassa 2.5.8 on esitetty käytöntukijärjestelmäympäristöön liittyviä toimintoja sekä tietokantoja ja tietokanta-liityntöjä, jotka tukevat erilaisten käyttövarmuustarkastelujen toteuttamista. Tehonjako- ja oikosulkulaskennat ovat keskeisiä käyttövarmuustarkasteluissa hyödynnettäviä käytöntukijärjestelmän laskentasovelluksia. Laskennat mahdollistavat mm. kytkentöjen suunnittelun, releasettelujen suunnittelun ja häiriötilanteiden simuloinnin. Keskeinen käyttövarmuuden hallintaa tukeva toiminto on myös erilaisten ohjeiden yms. dokumenttien hallinta. Sähköverkon graafinen näkymä mahdollistaa erilaisten käyttövarmuustarkasteluja tukevien käyttöliittymätoimintojen kehittämisen, esim. tarkas-teltavan komponentin syöttöreitin määrittäminen verkkokuvasta osana vika- ja vaikutusanalyysiä.



Kuva 2.5.8. Käyttövarmuustarkasteluja tukevia tietojärjestelmätoimintoja ja tietokantoja.

Tutkimusprojektissa kartoitettiin erilaisia käyttövarmuuden hallintaa tukevia toimintoja, joista keskeisiksi kehityskohteiksi arvioitiin:

*A) Komponenttikohtaiset vika-vaikutusanalyysit tärkeimmille komponenteille*

- \* vioittumistavat, syyt, vikojen paljastuminen (liitynnät kunnonhallintaan, mittaukset, huolto-ohjelmat), vikojen vaikutus järjestelmään (suojauskoordinaatio, häiriön leviäminen), toimenpiteet (vaurioiden minimointi, ennakkohuolto ja kunnonvalvonta, käytön palautusohjeet, varaosien löytäminen yms., toimenpide-ehdotukset, haitta-aste, tn., tärkeysmitat).
- \* ohjeet sille, miten mistäkin tilanteesta selvittää.
- \* koulutusfunktio (ammattitaidon ylläpito, olemassa olevan tietämyksen tallentaminen)

*B) Erilaisten käyttötilanteiden hallinta*

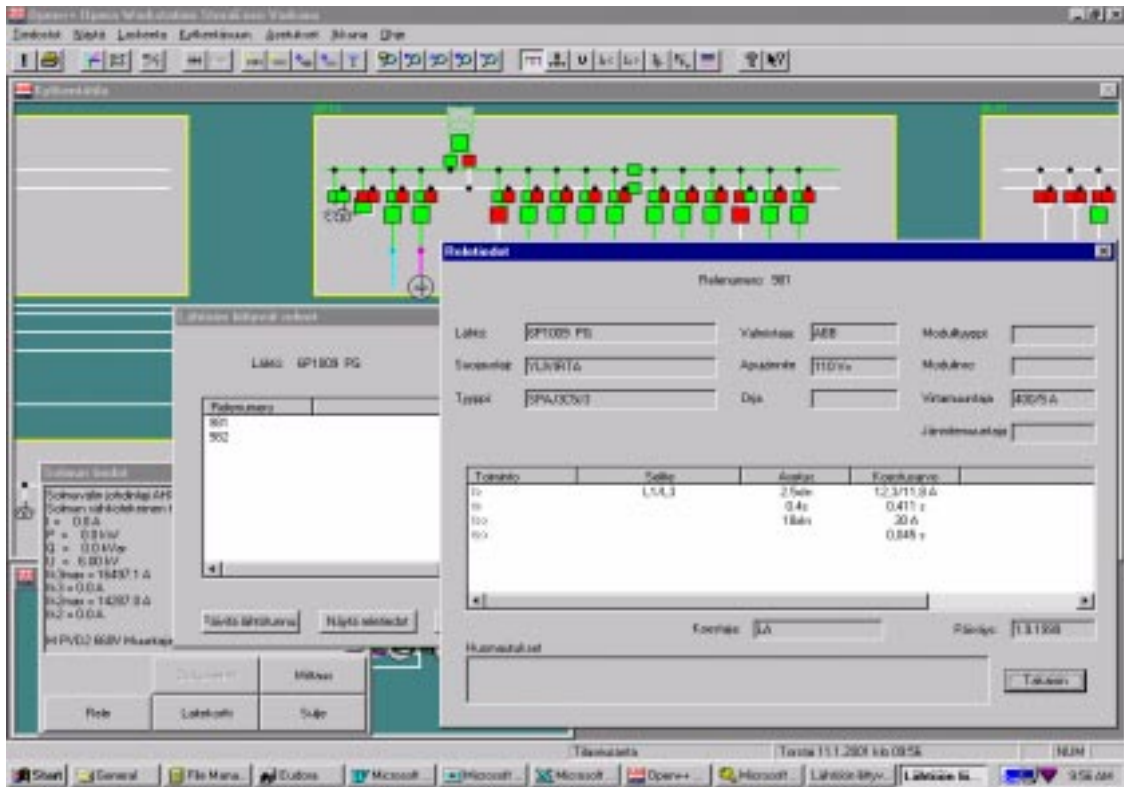
- \* poikkeukselliset kytkentätilanteet, vikatilanteet
- \* verkon kapasiteetin riittävyys (johdot, kaapelit, muuntajat)
- \* suojauskoordinaatio
- \* kirjalliset ohjeet kytkentämuutoksille

*C) Vika- ja häiriöanalyysit*

- \* häiriöraportoinnin kehittäminen
- \* lähtödataa vika-vaikutusanalyysiin
- \* mitä tapahtui, mitä tuli tehtyä, mikä auttoi, tapahtumien jälkisinulointi
- \* suojareiden toiminnot
- \* liitynnät huolto-ohjelmiin ja kunnonhallintaan

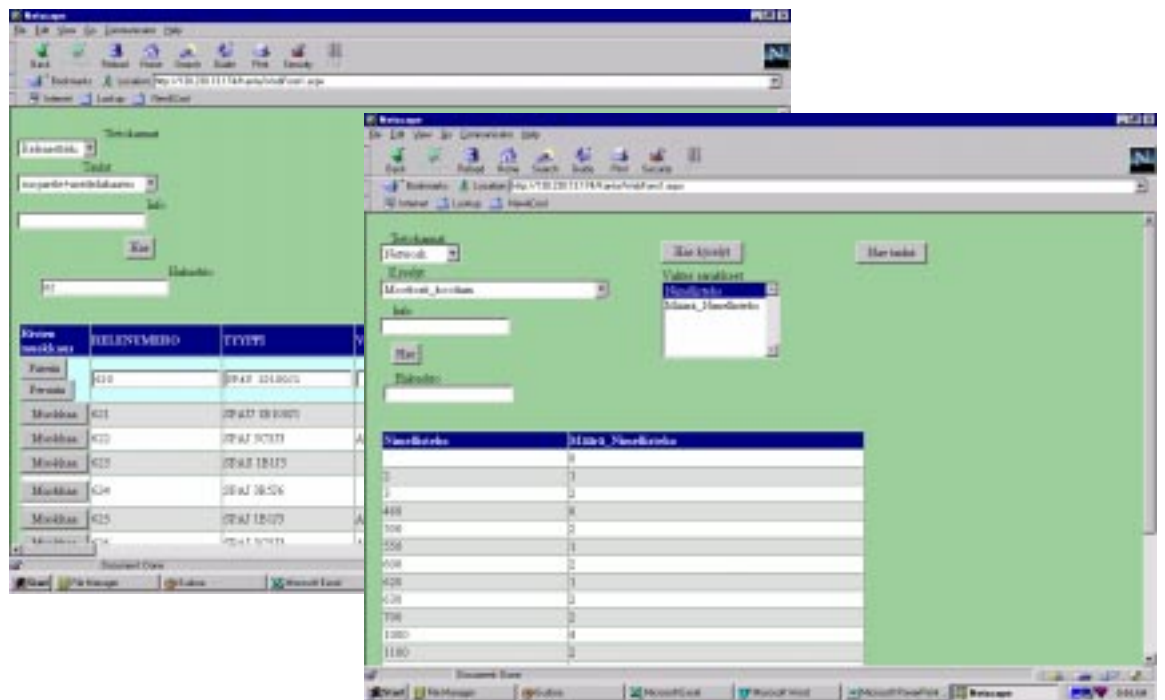
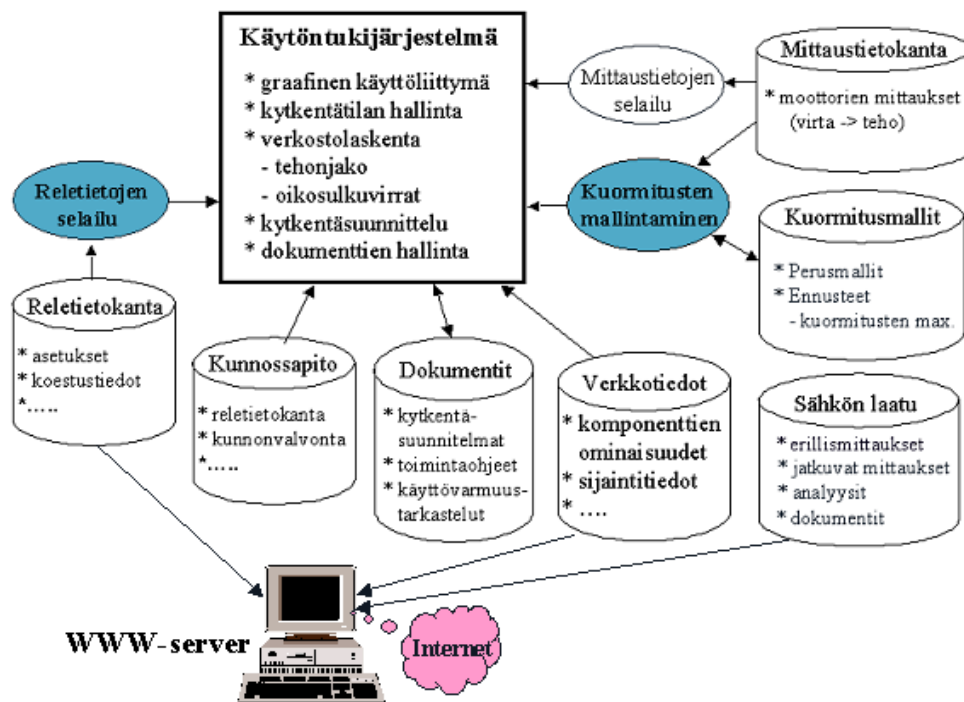
Tutkimusprojektissa kartoitettiin kyselytutkimuksen muodossa suuren ja keskisuuren teollisuuden sähköjakelussa esiintyviä häiriöitä. Vastauksien perusteella häiriöt esiintyvät yleisimmin pienjännitepuolella; moottoreissa ja keskuksissa. Tuloksissa ei ollut havaittavissa mitään erityistä toimialaa, missä häiriöitä olisi ollut muita enemmän. Yhtiöt ovat pyrkineet vähentämään häiriöitä mm. huomioimalla ympäristöolosuhteet, asennustekniikan ja toimilaitteiden oikean valinnan. Jännitekuopista aiheutuneet häiriöt ovat lisääntyneet häiriöherkkien laitteiden myötä.

Käyttövarmuustarkasteluihin liittyen projektissa toteutettiin StoraEnson Varkauden tehtaiden verkon muutamalle komponenttiryhmälle vika- ja vaikutusanalyysi tukevia tarkasteluja, demonstroitiin dokumenttien hallintaa, implementoitiin käytöntukijärjestelmään muutamia uusia käyttövarmuustarkasteluja tukevia toimintoja (mm. syöttöreitin graafinen esitys ja syöttöreitillä olevien komponenttien tallennus tietokantaan) sekä kehitettiin C++ -kielinen sovellus StoraEnson Access-pohjaisen relekoestustietokannan integrointiin osaksi käytöntukijärjestelmäkokonaisuutta siten, että tietokannan tietoja voi selailta suoraan Opera -käytöntukijärjestelmän graafisesta verkkokuvasta (kuva 2.5.9).



Kuva 2.5.9. *StoraEnson Varkauden tehtaiden relekoestustietokannan ja Opera – käyttötukijärjestelmän integrointisovellus reletietojen selailuun.*

Relekoestustietojen selailuun liittyi myös WWW-sovelluksen demonstrointi. Projektissa kehitettiin Internet-pohjaista teknologiaa vapaamuotoiseen tietokantojen selailuun. Kehitystyön pohjana olivat StoraEnson Varkauden tehtaiden Access-pohjaiset verkko-tieto- ja relekoestustietokannat. Tuloksena oli selainpohjainen sovellus, jonka avulla voi tarkastella halutun tietokannan tietosisältöä ja hakea tietoa erilaisilla hakuehdoilla. Selainpohjaiseen teknologiaan perustuvat toiminnot lisäävät tietokantojen hyödyntämisen joustavuutta erilaisina Intranet –sovelluksina. Kuvassa 2.5.10 on esitetty käyttötukijärjestelmäympäristöön liittyvien tietokantojen selailuun kehitettyä www-sovellusta.



Kuva 2.5.10. Käytöntukeen liittyvien tietokantojen selailu Intranet –sovelluksena.



## 2.6 Ennakoiva kunnonvalvonta

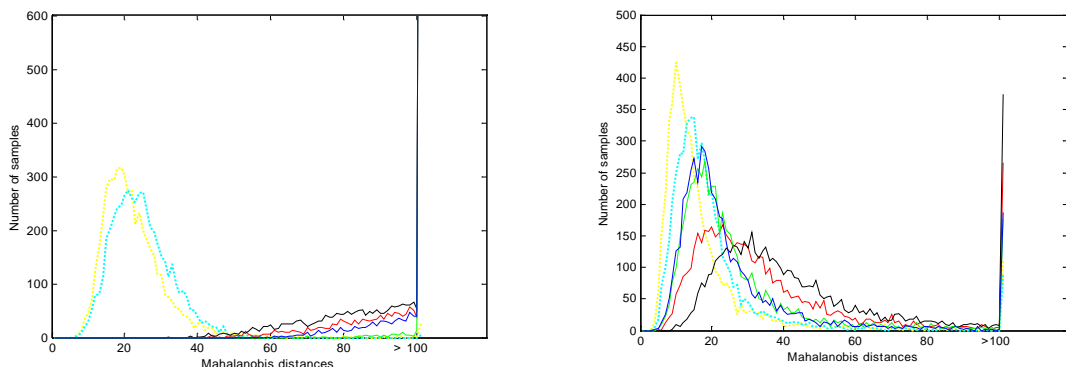
### 2.6.1 Sähkömoottoreiden ennakoivan kunnonvalvonnan menetelmät

Kunnonvalvonnan menetelmätutkimuksen tavoitteena on selvittää voidaanko yhdellä mitta-anturilla indikoida oikosulkumoottorin tärkeimmät viat. Mitta-anturi olisi joko virta- tai värinäanturi. Käytännössä tiedossa on jo etukäteen, että värinämittauksella ei voida kattaa tärkeimpiä moottorin vikoja ongelma johtaa seuraaviin selvityksiin:

- Voidaanko virtamittauksella havaita laakerivika?
- Voidaanko halpoja värinäantureita käyttää laakerikunnonvalvonnessa?
- Miten anturi liittyy teollisuuden tietojärjestelmiin?

Hankkeessa tutkittiin staattorivirtamittaukseen perustuvan laakerikunnonvalvonnan onnistumisedellytykset käytännössä. Teoreettisesti voidaan osoittaa, että roottorin radiaalinen liike näkyy staattorivirrassa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko staattorivirrassa oleva muutos riittävä indikoimaan laakerivaurio. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi staattorivirran tilastollisia ominaisuuksia ja hahmontunnistusta (kuva 2.6.1). Tuloksena oli seuraavat johtopäätökset:

- Laakerivika aiheuttaa staattorivirrassa muutoksen joka on havaittavissa muiden tekijöiden kuten kuormitus ollessa vakio
- Vika voidaan tunnistaa, jos laakerin radiaalinen välyksen ja ilmavälin suhde on suuri. 15 kW nelinapaisen koneen tapauksessa vika on tunnistettavissa C3-luokan laakereita käytettäessä, mutta luotettavaan tunnistukseen pystytään vasta käytettäessä C4-luokan laakeria
- Normaalista kulumista ei voida erottaa laakeriviasta
- Virhetulkinnan mahdollisuus suuri, jos moottorikäytössä tapahtuu muita kuin laakerista aiheutuvia muutoksia
- Käytännön sovellettavuus hyvin vaikeaa



Kuva 2.6.1. Tilastollisten etäisyyksien jakaumat. Etäisyys on laskettu ehjän laakerin opetusjoukkoon nähden. Ehyellä viivalla piirretyt käyrät ovat hajallisen laakerin arvoja ja katkoviivoitetut ovat ehjien arvoja. Vasemman puoleisessa kuvassa on verrattu suurivälyksellisiä laakereita (C4) ja oikeanpuoleisessa luokan 'normal' laakereita.

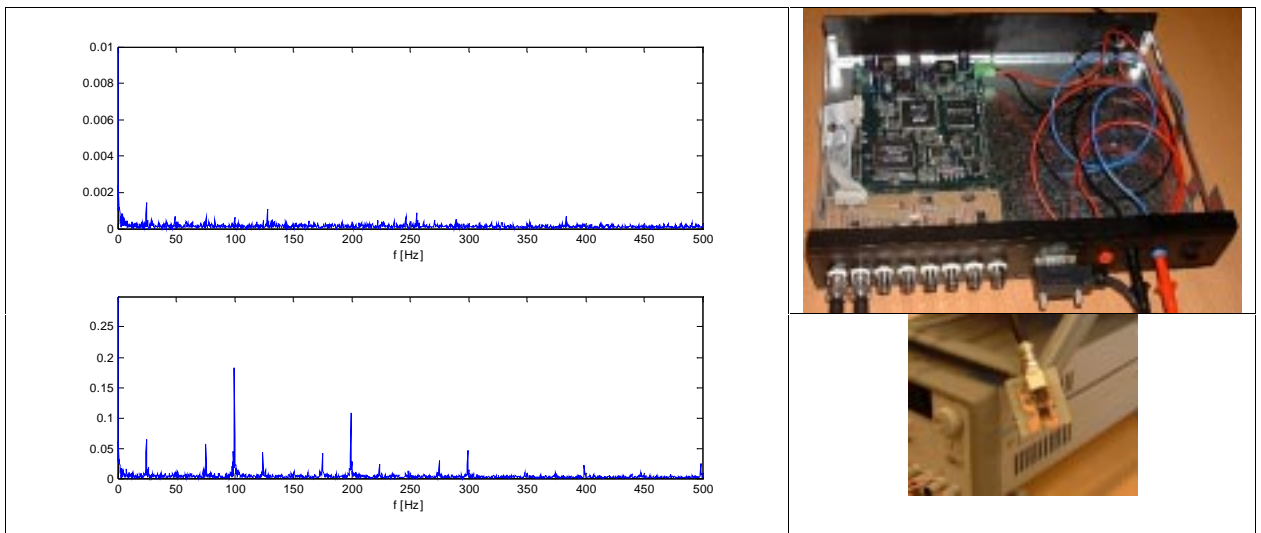
## Mikrotyöstetyn anturin suorituskyvyn arviointi laakerikunnonvalvonnassa

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää mikrotyöstetyn kapasitiivisen kiihtyvyyssanturin suorituskyky induktiomoottorin laakerikunnonvalvonnassa. Tutkimus tehdään vertaamalla rinnakkain moottorin rungolle asetettua piezo-sähköisen anturin ja mikrotyöstetyn anturin signaaleja. Tärinämittaussignaali on analysoitu verhoikäryäanalyysiä käyttäen vialle tyypillisten taajuuksien etsimiseen.

Mikrotyöstetyn (MEMS) anturin avulla kyetään ilmaisemaan alkava laakerivika samalla tavalla kuin piezo-sähköisellä anturilla. Verhoikäryspektreissä saadaan selvät piikit laakerin aiheuttaman tärinäimpulssien taajuudella jo pienehköillä vioilla (kuva 4).

Mikrotyöstetyn anturin suurempi kohina ja suppeampi mitta-alue kuitenkin rajoittaa anturin käytön kohteisiin, joissa vallitseva tärinätaaso ei ole suuri. Tämä rajaa anturin käyttöalueen ulkopuolelle esimerkiksi murskaimet, potkuripumput ja mäntä-kompressorit. Mikrotyöstettyjen antureiden lämpötilakestoisuus on pienempi kuin piezo-sähköisten antureiden rajaten näin sekä anturin sijoittamista että käyttökohteita.

Mikrotyöstetyn anturin halpa hinta ja helppo liitettävyys muuhun elektroniikkaan mahdollistaa halpojen älykkäiden, analyysiin ja kommunikointiin kykenevien anturien rakentamisen. Mikrotyöstettyjen antureiden ominaisuudet ovat jatkuvasti parantuneet. Nykyisen tai nykyistä pienemmän kohinatason ja samalla laajemman mitta-alueen omaavien antureiden kehittäminen laajentaa tällä hetkellä rajoittuneita käyttömahdollisuuksia myös vaativimpiin käyttökohteisiin.



Kuva 2.6.2. Mikrotyöstetyn anturin signaalille tehty verhoikäryspektri ehjän (yllä) ja hajallisen (alla) laakerin tapauksessa. Moottori nimelliskuormalla. Oikealla alhaalla mikrotyöstetty anturi (piirilevyn keskellä) ja ylhäällä sulautettu DSP- testilaitteisto, jolla verhoikäryspektri muodostettiin.

Tutkimuksen tuloksena päädyttiin siihen, että kummallakaan anturilla (tärinä/virta) ei yksistään voida selvittää luotettavasti vikoja ja erityisesti, että virtamittauksen avulla ei voida tunnistaa luotettavasti laakerivikoja.

## 2.6.2 Sähköverkkotiedonsiirto teollisuuden pienjänniteverkossa

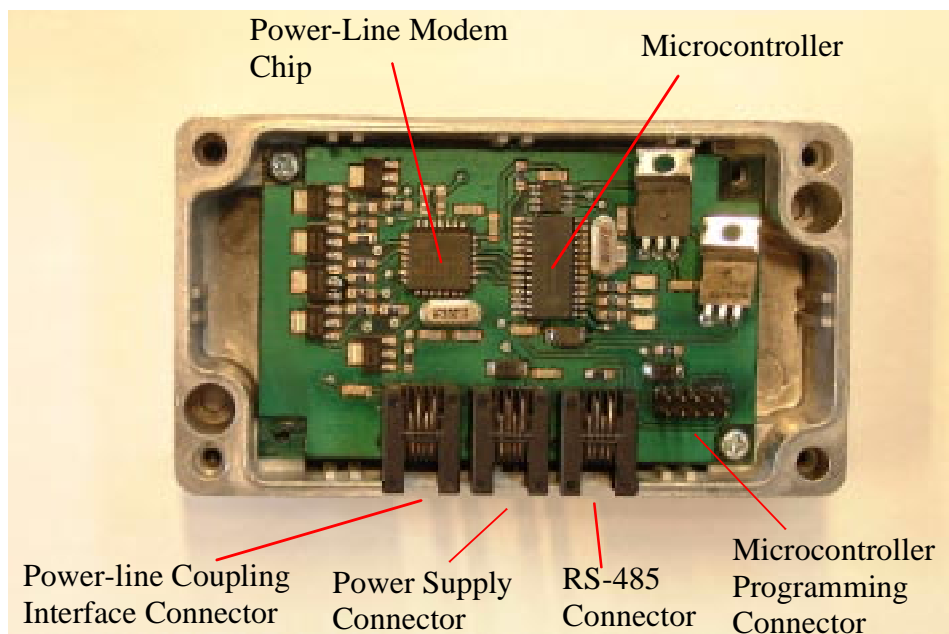
Tutkimuksen lähtökohtana on ollut tutkia mahdollisuuksia siirtää lähinnä moottorikunnonvalvontaan liittyviä anturi- ja tilatietoja sähköverkossa. Lähtökohtana on ollut ajatus, että sähköverkkotiedonsiirron ansiosta moottorille pystytään sijoittamaan älykäs kunnonvalvontaa suorittava anturi, joka ottaa käyttöenergiansa moottorin terminaaleista ja kommunikoi moottorikaapelin välityksellä.

Tiedonsiirtotutkimuksen tavoitteena on ollut tutkia ja mallintaa pienjänniteverkon ominaisuuksia sähköverkkotiedonsiirron kannalta lähtien liikkeelle sähköverkon yksittäisten komponenttien ominaisuuksista. Lisätavoitteena on ollut saatavien tulosten perusteella rakentaa ja pilotoida sähköverkkotiedonsiirtoon soveltuvaa laitteistoa, joka on suunniteltu kunnonvalvonnan ja lainsäädännön asettamien rajoitusten mukaisesti.

Tutkimuksessa mitattiin ja mallinnettiin moottorikaapelin ominaisuuksia taajuuskaistalla 100 kHz – 30 MHz. Tulosten perusteella moottorikaapelin ominaisimpedanssit ovat matalia, luokkaa 5 – 50 ohmia riippuen kaapelista ja kytkennästä. Kaapelin vaimennus aiheutuu pääosin dielektrisistä häviöistä PVC-eristeessä ja se kasvaa voimakkaasti signaalitaajuuden kasvaessa. Kaapelien lisäksi tutkittiin mittaamalla oikosulkumottoreiden tuloimpedansseja taajuuskaistalla 10 kHz – 30 MHz eri kytkennöillä. Mittausten perusteella kaikki moottorit käyttäytyivät pääpiirteittäin samalla tavoin. Suoritettujen mittausten perusteella muodostettiin malli myös oikosulkumoottorin tuloimpedanssille.

Yksittäisten verkon komponenttien mittausten lisäksi pyrittiin saamaan kokonaiskuva sähköverkosta tiedonsiirron kannalta. Tätä varten rakennettiin testiympäristö (kuvat 2.6.4 ja 2.6.5), jolle suoritettiin muun muassa vaimennus- ja kohinamittauksia. Mittausten perusteella todettiin, että sähköverkon vaimennus oli CENELEC-taajuuskaistalla (3 – 148.5 kHz) pientä. Vaimennus kasvoi taajuuden funktiona. Pääsyyinä vaimennuksen kasvuun olivat epäsovituksista aiheutuvat heijastukset ja kaapelin vaimennus. Matalilla kanta-aaltotaajuuksilla sähköverkkotiedonsiirtolaitteiston kantama voi olla esimerkiksi kilometrejä. Käytännössä kantaman määräävät ja sitä rajoittavat muun muassa verkon kuormien lukumäärä, kuormien laatu, vallitseva kohinataso ja tiedonsiirtolaitteen lähetysteho ja käytettävä modulointi.

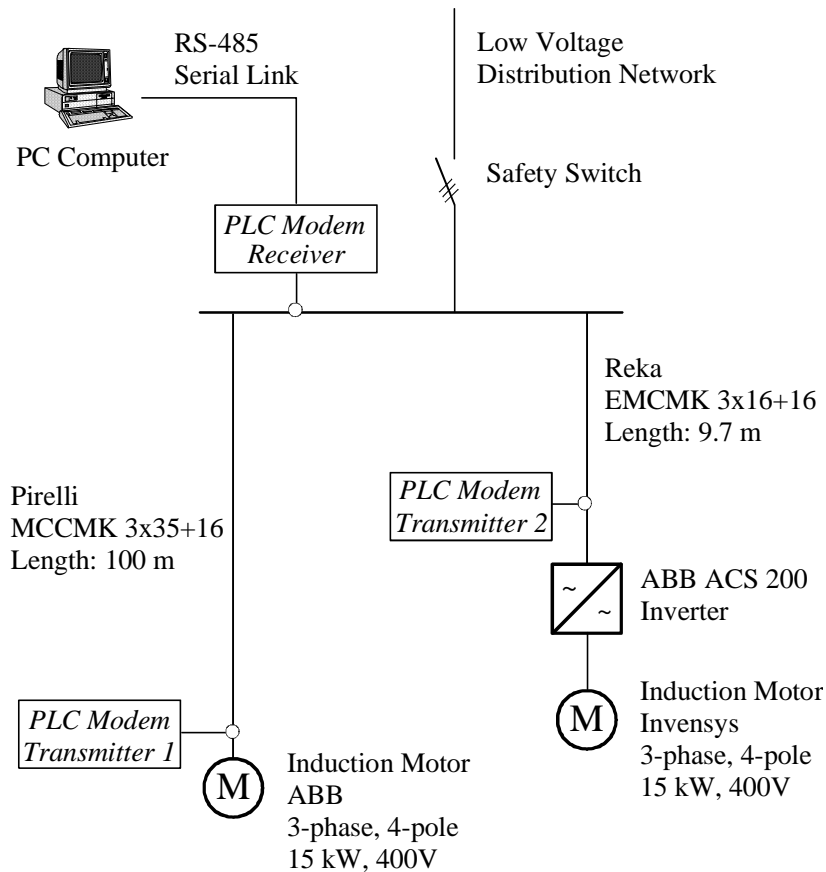
Mittausten ja mallinnuksen lisäksi kehitettiin tiedonsiirtoon soveltuvaa laitteistoa ja sitä on pilotoitiin testiympäristössä (kuva 2.6.5). Testien tuloksia on esitetty taulukossa 2.6.1 ja ne ovat pääosin positiivisia. Testilaitteessa sovellettiin edullista kotiautomaatiotarpeisiin kehitettyä modeemiipiiriä, joka käyttää sähköverkkotiedonsiirrossa binääristä taajuusmodulaatiota (FSK) kanta-aaltotaajuudella 130 kHz. Laite täyttää Eurooppalaisessa CENELEC-standardissa signaloinnille pienjänniteverkossa asetetut määräykset. Suurin saavutettava tiedonsiirtonopeus on 2400 bittiä/s. Laitteen komponenttien hinta pienenä sarjana on noin 30 €. Massatuotannossa se kuitenkin laskisi tästä merkittävästi. Testeissä lähettimen ja vastaanottimen suurin etäisyys oli 100 metriä.



Kuva 2.6.4. *Pilot-modeemi (PLC)*

Taulukko 2.6.1. Tiedonsiirtotestien tuloksia, jotka on saatu kehitetyillä sähköverkkomodeemeilla testiympäristössä.

	Total	Coupling: (L1,PE)		Coupling: (L1,L2)	
		Transmitter 1	Transmitter 2	Transmitter 1	Transmitter 2
Transmitted	149502	42829	42832	31920	31921
OK	145963	41688	41806	31428	31041
Corrupted	23	10	13	0	0
Missing	3127	1131	1013	490	493



Kuva 2.6.5. Pilot –ympäristö. Ympäristöä on sovellettu tiedonsiirtotesteihin ja mittauksiin.

Tutkimusten perusteella sähköverkkotiedonsiirtoa voidaan soveltaa sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan anturitason tiedonsiirtoon. Valmiita integroituja modeemi-piirejä löytyy GENELEC –taajuuskaistalle. Korkeampiakin kantoaaltotaajuuksia voitaisiin käyttää, mutta ne eivät ole vallitsevan lainsäädännön takia sallittuja. Tiedonsiirtoon moottorin ja taajuudenmuuttajan välillä kehitetty ja pilotoitu laitteisto ei sovellu. Lisäksi sähköverkkoon tiedonsiirtokanavana liittyy aina epävarmuuksia kuten radiotiehenkin.

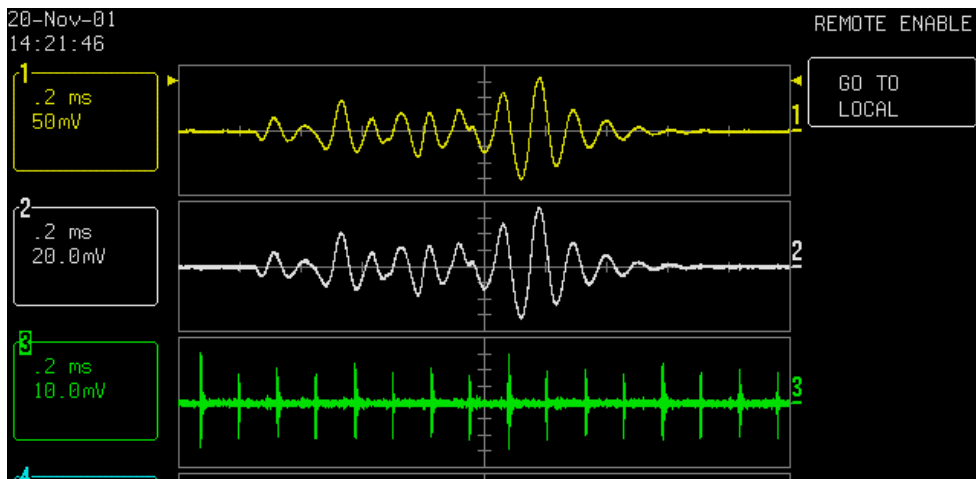
### 2.6.3 Osittaispurkausmittauksiin perustuva kunnonvalvonta

Tutkimusprojektin tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia toteuttaa jatkuvatoimisia osittaispurkausmittauksia (PD-mittauksia) häiriöisessä teollisuusympäristössä ja luoda järjestelmäkonsepti teollisuusympäristöön soveltuvalla PD-mittauksiin perustuvalla kunnonvalvontamenetelmälle. Tutkimuksen aikana kehitetty kunnonvalvontamenetelmä voidaan toteuttaa yksinkertaisella anturitekniikalla ja liittää osaksi olemassa olevaa tai uutta automaatiojärjestelmää. Tutkimustuloksia voivat käyttää hyväksi esimerkiksi mittalaittevalmistajat ja automaatio- ja tietojärjestelmätoimittajat.

TTKK:n suurjännitetekniikan tutkimusryhmässä on aikaisemmin useissa projekteissa tutkittu osittaispurkausmittausten soveltamista julkisen sähköverkon komponenttien kunnonvalvontaan. Tässä kuvattu tutkimus oli suoraa jatkoa vuosien 1999-2000 aikana TESLA-ohjelman Verkostoautomaatio-projektin puitteissa tehdylle tutkimustyölle, jossa

kehitettiin yksinkertaiseen anturitekniikkaan perustuvia automaatiojärjestelmään integroitavia kunnonvalvontamenetelmiä keskijänniteverkkoihin.

Jatkuvatoimisen PD-mittauksen toteuttamismahdollisuuksiin vaikuttavat merkittävästi mittaussympäristössä esiintyvät häiriöt, jotka on pystyttävä automaattisesti suodattamaan mittaussignaalista. Häiriöt ovat teollisuusverkoissa erilaisia kuin julkisissa jakeluverkoissa. Tutkimuksessa kartoitettiin teollisuusympäristöissä esiintyviä häiriöitä, mm. erilaisten moottorikäyttöjen aiheuttamina, sekä tutkittiin mahdollisuuksia näiden häiriöiden suodattamiseen. Kuvassa 2.6.4 on esimerkki teollisuusverkosta mitatuista tasasuuntaajien ja taajuusmuuttajien aiheuttamista häiriöistä.



Kuva 2.6.4. *Esimerkki tasasuuntaajien (kaksi ylintä käyrää) ja taajuusmuuttajien (alin käyrä) aiheuttamista häiriöistä teollisuusverkossa.*

Tutkimuksen aikana kehitettiin erityisesti kaapeliverkkoihin soveltuva yksinkertainen ja edullinen anturityyppi, joka perustuu Rogowski-käämiin (kuva 12). Kehitettyjen Rogowski-antureiden ominaisuuksia PD-signaalien mittauksessa testattiin TTKK:n suurjännitelaboratoriossa mittaamalla kaapelikoekappaleissa esiintyviä osittaispurkauksia. Antureiden avulla kerättiin myös häiriödataa teollisuusverkosta.



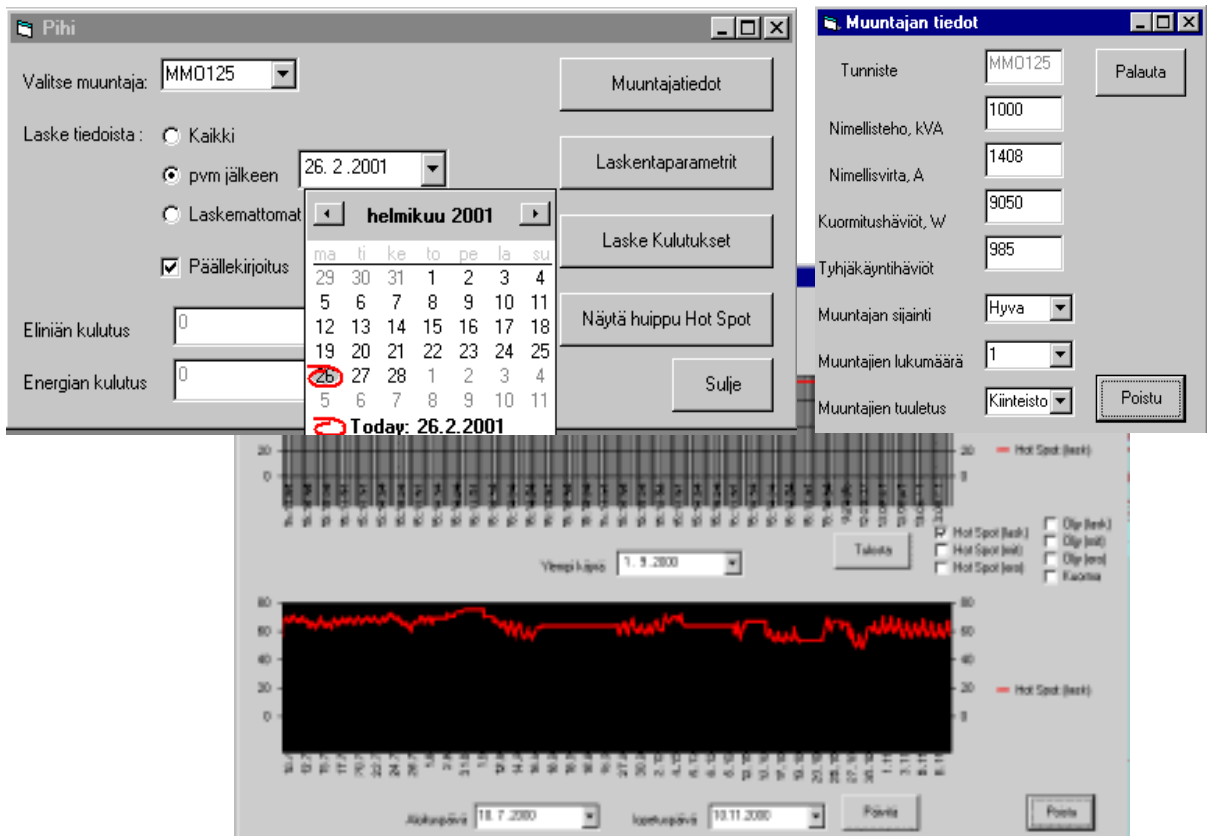
Kuva 2.6.5. *Tutkimuksen aikana kehitetty Rogowski-anturi osittaispurkausmittauksiin.*

#### **2.6.4 Jakelumuuntajan lämpötilan ja eliniän kulutuksen laskennallinen seuranta**

Tutkimusprojektin tavoitteena oli selvittää muuntajien kuumimman pisteen lämpötilan (hot-spot –lämpötilan) ja eliniän kulutuksen laskentaan perustuvan muuntajaseurannan toteutusmahdollisuuksia teollisuusympäristössä ja luoda järjestelmäkonsepti teollisuusympäristöön soveltuvalla muuntajaseurannalle. Kehitetty seurantamenetelmä voidaan liittää osaksi olemassa olevaa tai uutta automaatiojärjestelmää tai integroida johonkin verkossa käytettävään, esimerkiksi sähkön laadun, seurantalaitteeseen. Tutkimustuloksia voivat käyttää hyväksi esimerkiksi mittalaittevalmistajat ja automaatio- ja tietojärjestelmätoimittajat.

Tutkimusprojekti oli kaksivuotinen (2001-2002) ja siinä jatkettiin vuosina 1999-2000 TESLA-ohjelman Verkostoautomaatio-projektin puitteissa tehtyä tutkimustyötä. Aikaisemmassa projektissa oli kehitetty olemassa olevia automaatiojärjestelmiä ja niiden keräämiä kuormitustietoja hyödyntävä laskentamenetelmä yleisen sähkönjakeluverkon jakelumuuntajien hot-spot -lämpötilan ja muuntajien eliniän kulumisen seurantaan. Tässä aikaisemmassa tutkimuksessa kehitettiin laskentaohjelman pilottiversio Visual Basic Excel-ympäristössä. Lisäksi toteutettiin kaksi pilottia; muuntajan eliniän kulumisen seurantasovellus Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:ssä perustuen sähkökaupan tuntitehomittauksiin ja MicroSCADA-ympäristössä toteutettu jatkuvatoiminen muuntajan hot-spot -lämpötilan seuranta Helsingin Energiassa.

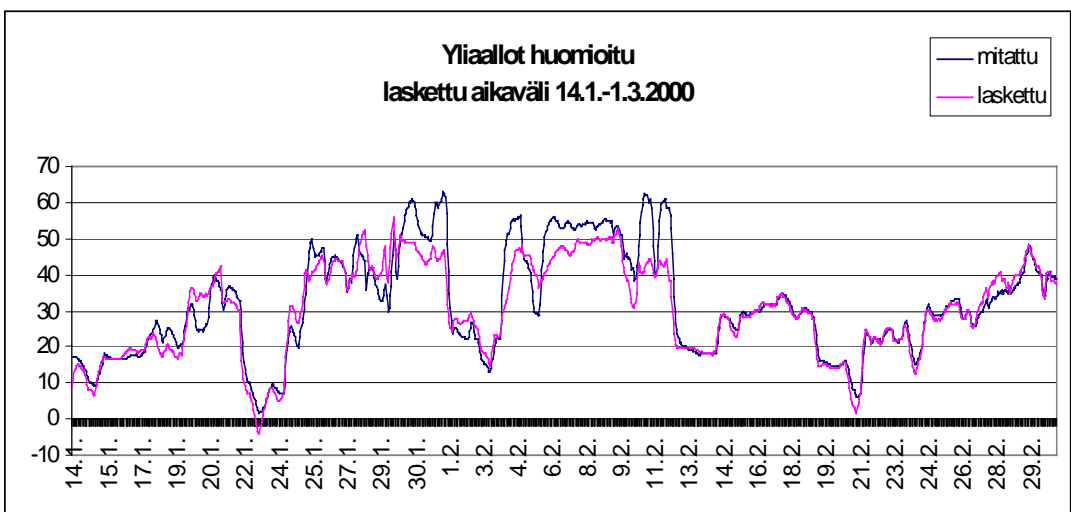
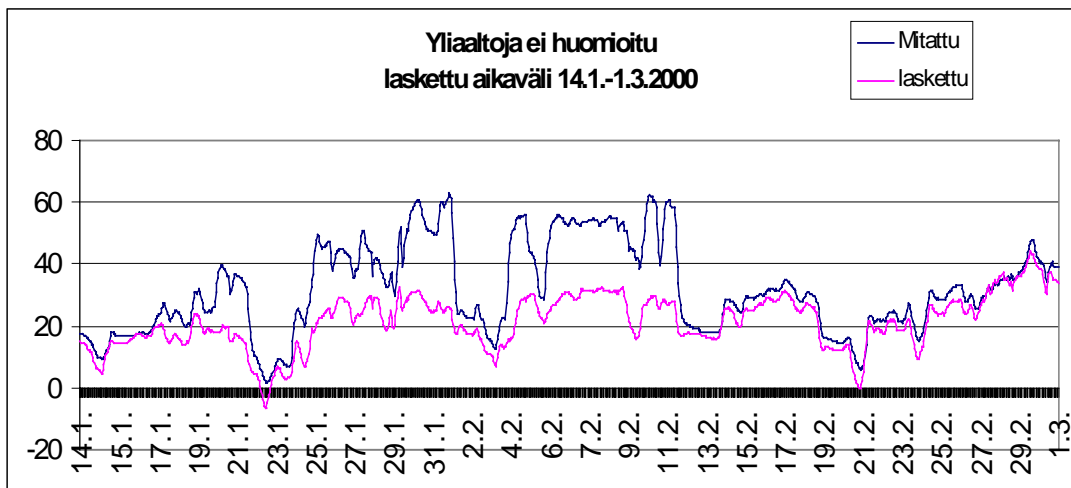
Vuoden 2001 aikana selvitettiin millaiset edellytykset edellä mainitun seurantamenetelmän soveltamiseen on teollisuusympäristössä ja miten lämpötilan ja eliniän kulumisen laskenta olisi käytännössä toteutettava. Lisäksi tutkittiin miten teollisuusympäristö eroaa muuntajan lämpenemisen kannalta jakeluverkkoympäristöstä. Tutkimuksessa kerättiin kuormitus- ja lämpötilatietoja teollisuusympäristön muuntajista laskentamenetelmässä tarvittavien parametrien määrittämiseksi ja kehitettiin tutkimuksen edellisessä vaiheessa tehtyä laskentaohjelmaa edelleen yleiskäyttöisemmäksi ja teollisuusympäristöön soveltuvaksi. Kuvassa 2.6.6. on esitetty tutkimusprojektin aikana kehitetty uusi Visual Basic –pohjainen muuntaja-analysointiohjelma.



Kuva 2.6.6. Muuntaja-analysaattori - ohjelmisto

Vuoden 2002 aikana muuntaja-analysaattori -ohjelmaa täydennettiin edelleen siten, että se sisältää öljyeristeiselle muuntajalle laskentakokonaisuudet IEC-standardin 354 mukaiselle hot-spot –lämpötilan laskennalle sekä tarkemmalle ANSI-standardin C57.91 mukaiselle laskennalle. Ohjelmalla voidaan laskea myös kuivamuuntajan kuumin lämpötila IEC-standardiin 905 pohjautuvalla laskentamallilla. Tutkimusprojektissa selvitettiin lisäksi kirjallisuuden, mittausten ja laskennallisten tarkastelujen avulla miten yliaallot vaikuttavat muuntajan lämpenemiseen. Laskentaohjelmaan onkin sisällytetty mahdollisuus ottaa laskennassa huomioon myös yliaaltojen vaikutus muuntajan lämpenemiseen. Kuvassa 2.6.7 on esitetty esimerkki siitä, miten paljon yliaaltojen huomioon ottaminen lisää laskentaohjelman tarkkuutta muuntajan huippuöljyn lämpötilan estimoinnissa.



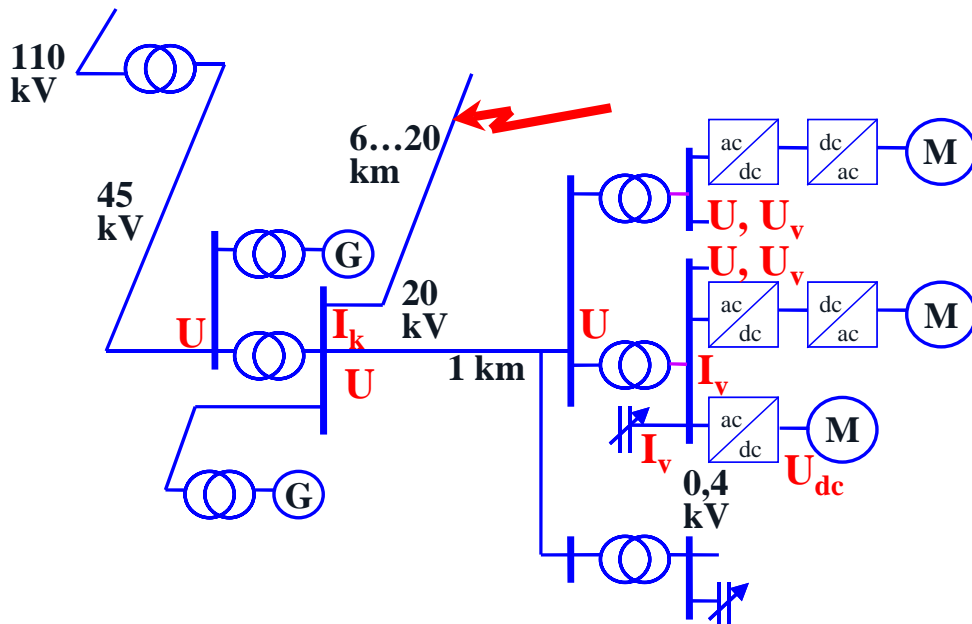


Kuva 2.6.7. Erään muuntajan mitatun ja lasketun huippuöljyn lämpötilan ( $^{\circ}\text{C}$ ) vaihtelu huomattavien yliaaltojen yhteydessä. Ylemmässä kuvassa yliaaltoja ei ole otettu huomioon, alemmassa kuvassa yliaallot otettu huomioon.

## 2.7 Sähkön laatu

### 2.7.1 Sähkön laadun mittaukset

Teollisuuden sähkönjakeluun aiheutuu häiriöitä sähkön syötöstä vastaavan verkkoyhtiön verkossa tapahtuvista oikosuluista aiheutuvista jännitekuopista. Pahimmillaan jännitekuopat voivat aiheuttaa prosessin pysähtymisen joko kokonaan tai osittain, ja olla jopa haitallisempia kuin jälleenkytkennöistä aiheutuva hallitumpi prosessin alasajautuminen. Tutkimusprojektissa toteutettiin oikosulkukokeita ja jännitekuoppamittauksia Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n (KSS) verkossa. Eräällä yhtiön teollisuusasiakkaalla oli aiheutunut ongelmia muun verkon oikosuluista aiheutuvista jännitekuopista. Ongelmien todentamiseksi ja erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen löytämiseksi toteutettiin maaliskuussa 2000 oikosulkukokeet KSS:n verkossa (kuva 15). Jännitekuoppamittauksien ja PSS/E -ohjelmiston simulointien avulla verifioitiin kehitettyjä laskentamalleja sekä pyrittiin arvioimaan erilaisia verkosto- ja laitetason ratkaisuvaihtoehtoja, joilla voidaan vähentää jännitekuopista aiheutuvia häiriöitä. Oikosulkukokeiden jatkoksi kesän 2000 aikana toteutettiin jatkuvatoiminen kaukoluettava jännitekuoppaseuranta KSS:n Killinkosken sähköasemalle. Verkkoyhtiö on sen jälkeen laajentanut sähköasemataso jännitekuoppaseuranta kaikille sähköasemilleen normaalina käyttötoimintanaan. Jännitekuoppaseurannan kehitys kuului osana myös TESLA-ohjelman Verkostoautomaatio-projektiin.



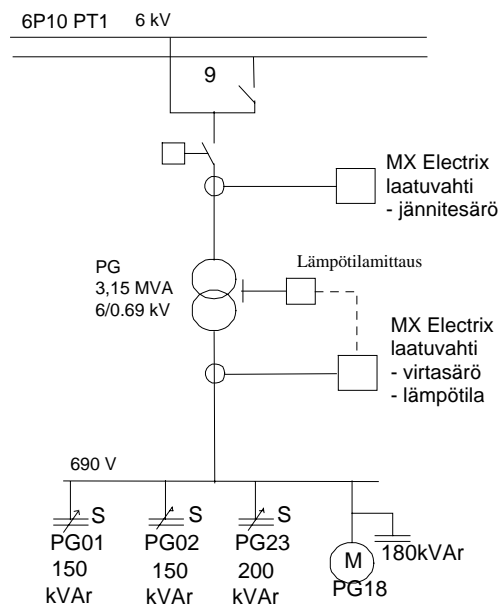
Kuva 2.7.1. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkossa toteutetut oikosulkukokeet ja jännitekuoppamittaukset.

Kappaleessa 2.5.1 kuvattujen StoraEnson Varkauden tehtaiden paperikoneiden 3 ja 4 jakelumuuntajataso kuormitusmallinnusta varten toteutettujen erillismittauksien yhteydessä mitattiin myös joitakin ko. jakeluverkon sähkön laatuun liittyviä ominaisuuksia. Päähuomio kiinnitettiin jännitetasoihin, harmonisiin yliaaltojännitteisiin ja virtoihin sekä loistehoihin. Yhteenvedonä todettiin, että mitatut jännitetasojen

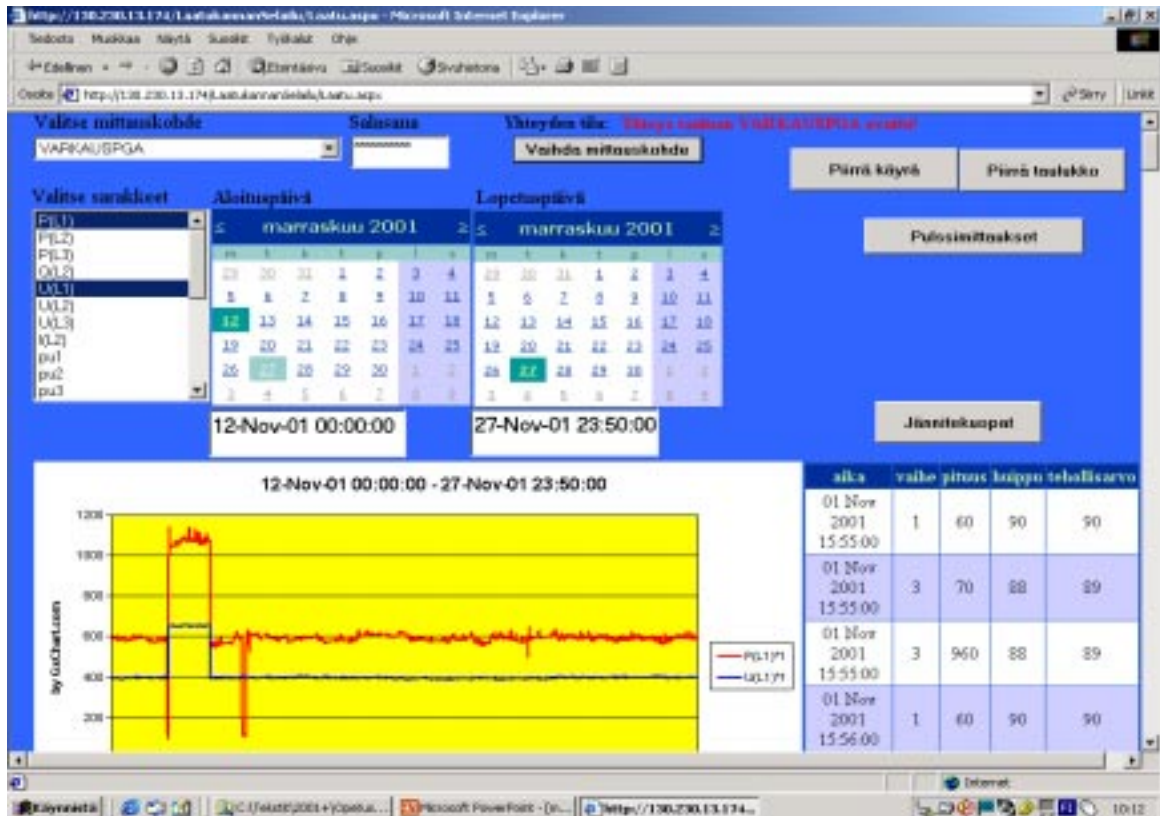
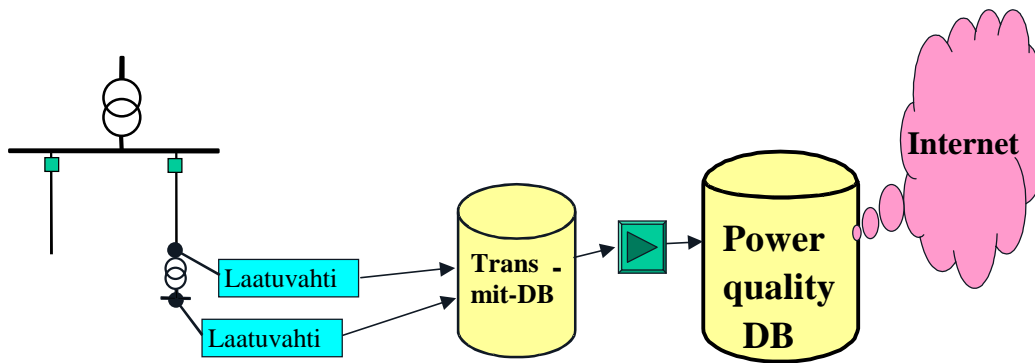
vaihtelut ja jännitesäröt vaikuttivat yleisesti (erittäin) hyviltä sekä keskijännite- että pienjännitepuolella. Alhaiset särötasot olivat osittain 6 kV yliaaltosuodattimien ansiota. Jakelumuuntamotason tehokertoimissa (pf, joka sisältää sekä perustaaajuisen että yliaalloista aiheutuvat loistehot) oli suurimpien kuormien aikana huomattavia eroja ja joitakin negatiivisiakin arvoja esiintyi.

Projektissa toteutettiin StoraEnson Varkauden tehtaiden verkkoon PK3:lle jakelumuuntajatasen jatkuvatoiminen sähkön laadun seurannan mittausjärjestelmä, joka perustuu MX Electrix Oy:n laatuvahtimittareihin. Jakelumuuntajan PG ylä- ja alajännitepuolelle on asennettu kaksi laatuvahtia, joista toinen on prototyypiversio, joka sisältää virran yliaaltojen sekä ulkoisen lämpötilan mittaamisen. Kuva 16 esittää mittausjärjestelmää. Laatuvahtimittareilla mitataan pätö- ja loistehot, virrat ja energiat, ”normaalit” sähkölaatusuureet (jännitetaso ja -särö, jännitteen yliaallot), jännitekuopat, virran yliaallot (testattavana oleva prototyypiversio) ja lämpötiloja. Mittarit mahdollistavat myös erilaisten hälytysten, tilatietojen ja ohjausten välittämisen.

Mittarien kaukoluenta hoidetaan TTKK:lla olevalla laatuvahtien kaukoluentaan kehitetyllä Enersoft Oy:n Transmit –ohjelmalla. Laatumittausten tulosten esittämiseen käytetään TESLA –ohjelman Verkostoautomaatio, tiedonsiirto ja sähkön laatu -projektissa kehitettyä WWW-sovellusta, jonka kautta mittauksia voidaan seurata Varkaudessa Internetin kautta TTKK:lla olevalta WWW–serveriltä. Kuva 17 esittää mittausjärjestelmää ja selainsovellusta. Sähkön laadun seurantaan liittyvä konseptimäärittely ja sovellukset ovat hyödynnettävissä useammankin eri toimittajan tuotekehitystyössä. Demonstroitu seurantajärjestelmä avaa mahdollisuuksia myös uuden tyyppisille palveluliiketoimintaan liittyville liiketoiminnoille.



Kuva 2.7.2. PK3:n jakelumuuntajan PG jatkuvatoiminen sähkön laadun mittausjärjestelmä.



Kuva 2.7.3. Sähkön laadun WWW- seurantasovellus.

## 2.7.2 Teollisuuden jännitekuoppien lieventämismahdollisuuksia

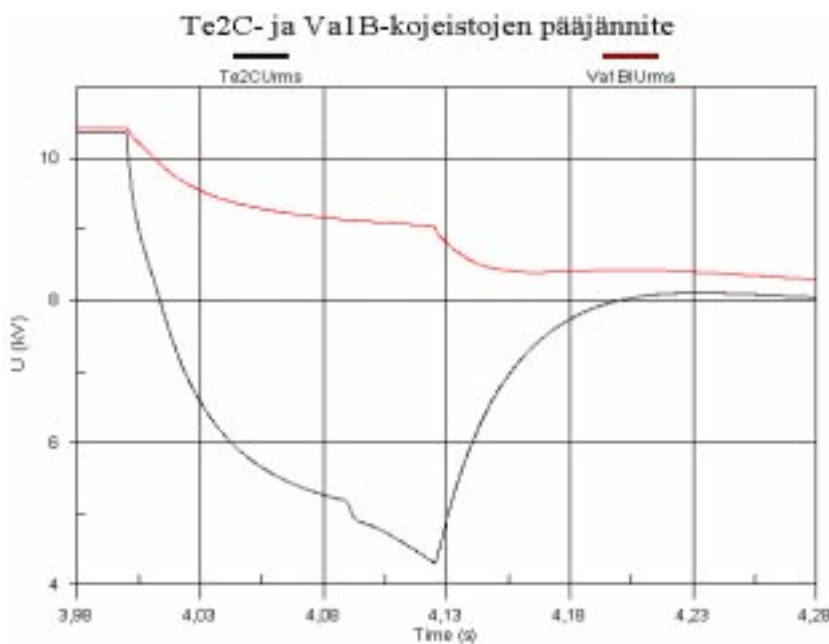
Tutkimuksessa on selvitetty kirjallisuustutkimuksen ja simulointien avulla mahdollisuuksia jännitekuoppien haittojen lieventämiseksi erityisesti uuden suojaustekniikan avulla. Laiteryhmien jännitekuoppasietoisuudesta on tehty lyhyt kirjallisuusselvitys.

Rautaruukin Raahan terästehtaan verkkomallilla tehtiin suurehko määrä verkon vikatilanteiden simulointeja. Tulosten vertaaminen kirjallisuudesta löytyneisiin tietoihin tukee käsitystä, että Rautaruukin verkon vikatilanteista aiheutuvien jännitekuoppien haittavaikutuksia lienee mahdollista lieventää jonkin verran jo pelkällä laukaisuaikojen lyhentämisellä. Releiden toiminta-aikojen muuttaminen edellyttää kuitenkin koko suojausjärjestelmän ja tuotantoprosessin tarkastelua ja pohdintaa siitä, voidaanko

selektiivisyydestä tinkii jännitekuoppien haittojen eliminoimiseksi. Haittoja voitaneen merkittävästi lieventää varustamalla herkät komponentit jännitettä tukevilla laitteilla suojauksen nopeuttamisen lisäksi.

Uusia laitteita hankittaessa on mahdollista kiinnittää huomiota laitteiden jännitekuoppasietoisuuteen ja vaatia esim. SEMI F47 –standardin mukaista sietokykyä

Kiskonvaihtoautomaatiikan käyttöä tärkeän kojeiston suojaamiseksi jännitekuoppilta simuloitiin laajakosti varioimalla mm. kojeistoon kytkettyä kuormitusta. Simulointitulosten perusteella voidaan arvioida, että automaatiikka on mahdollista toteuttaa ja että sen käyttö johtaa kuoppien lieventymiseen tasolle, jonka laitteet todennäköisesti sietävät. Kuvassa 2.7.4 on simuloitu esimerkki kiskojen jännitteiden käyttäytymisestä kiskonvaihdon aikana.



Kuva 2.7.4. Kojesteiden pääjännitteet kiskonvaihdoissa.

## 2.8 Esiselvitys teollisuuden sähköjakelukonseptien kehityksestä

### 2.8.1 Tavoitteet

Selvityksen tavoitteena oli antaa yleiskuvaus sähköjakelun tämänhetkisestä tilanteesta, meneillään olevista tutkimus- ja kehityshankkeista ja tulevaisuuden kehittymismahdollisuuksista. Selvitys toteutettiin kirjallisuus- ja haastattelututkimuksena.

### 2.8.2 Tulokset

#### Verkon rakenne ja sähkön laatu

Verkoston rakenneratkaisuja tarkasteltaessa nousivat kehittymismahdollisuuksina esille pienjännitetaso nostaminen, hajautettu sähköjakelu (DENET-konsepti),

jakelutaajuuden muuttaminen, laajamittainen inverttereiden yhteinen tasajännitejakelu, sulakkeeton pienjännitejakelu ja modulierakenteinen jakelu. Sähkön laatuasioista ovat edelleen ajankohtaisia yliaalto- ja kompensointikysymykset, teollisuuden jännitekuopat ja EMC. Muita, enemmän tulevaisuuteen suuntautuneita mahdollisuuksia ovat suprajohtavuuden hyödyntäminen energiavarastoissa ja laitteissa, mitoituksen tarkentaminen sekä apu/ohjaussähköjärjestelmien kehittäminen.

## **Verkon hallinta**

Rakenne- ja laatuasioita enemmän kehityspotentiaalia nähdään tieto- ja tietoliikennetekniikan soveltamisessa. Teollisuusverkon verkkotieto-, käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmissä on huomattavia kehitysmahdollisuuksia samoin kuin tiedonkeruujärjestelmissä. Toimintojen kehittämisessä voidaan joiltakin osin soveltaa sähköyhtiöiden tietojärjestelmien ratkaisuja. Tietoliikennetekniikat tuovat aivan uusia mahdollisuuksia teollisuuden järjestelmien hallintaan väyläpohjaisen liikennöinnin ja langattoman teknologian avulla. Älykkäät kenttälaitteet, etädiagnostiikka ja ennakoiva kunnonvalvonta sekä kehittyneet dokumentointijärjestelmät lienevät myös lähivuosien soveltavan kehitystyön kohteena.

## Julkaisut ja artikkelit

### LTKK

Ahola, J.: *Tiedonkeruujärjestelmä teollisuussähköjärjestelmien hallintaa varten*. Diplomityö, LTKK/Sähkötekniikka, 1999.

Ahola, J., Lindh, T., Partanen, J.: *Determination of Properties of Low Voltage Power Cables at Frequency Band 100 kHz – 30 MHz*, ICEM 2002, Bruges, Belgium 26-28 August, 2002.

Ahola, J., Lindh, T., Partanen, J., Järventausta, P., Kauppinen, M.: *Data Management System for DMS in Industrial Environment*. Distributech DA/DSM Europe 2000, Austria 10-12 October 2000.

Ahola, J., Lindh, T., Partanen, J.: *Measuring Transmission Line Parameters of a Power Cable*. Proceedings of Summer Seminar of Nordic Network for Multi-Disciplinary Optimised Electrical Drives, Denmark, 12-14 August 2001.

Ahola, J., Lindh, T., Partanen, J., Silvennoinen, P., Nerg, J.: *Pienjännitevoimakaapeliin ominaisuudet sähköverkkotiedonsiirron kannalta*. Tutkimusraportti 13, TESLA-raportti 52/2001.

Huotari, K., Partanen, J.: *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen*. LTKK/Sähkötekniikka, opetusmoniste 3, 1998, 46 s.

Kämäräinen J. K., Kyrki V., Lindh T., *Signal Discrimination Based on Power Spectrum of Filter Response*, Tutkimusraportti 80 (TITE), ISBN 951-764-683-6, 2002.

Lindh, T.: *Teollisuussähköjärjestelmien käytöntukitoimintojen määrittäminen*. Diplomityö, LTKK, 1997.

Lindh, T., Partanen, J.: *Sähkökäyttöjen mittaavan kunnonvalvonnan menetelmiä*. TESLA-raportti 14/1999.

Lindh, Tuomo, Ahola, Jero & Partanen, Jarmo: *Oikosulkumoottorin laakerivian tunnistaminen staattorivirtamittauksen perusteella*. LTKK, Lappeenranta 2000. TESLA-raportti nro 36/2000.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J., Alanen, R., Hukari, S., Ikäheimo, J., Manninen, J., Viinikainen, S., Kauppinen, M., Mäkinen, A., Järventausta, P.: *Management of electrical systems in industrial plants*. TESLA-raportti 42/2001.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J., Antila, S., Järventausta, P., Kivikko, K., Verho, P., Ruuponen, P.: *Web-based monitoring functions utilising data management system*. Distributech Europe 2001, Berlin 6-8 November 2001.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J., Oikosulkumoottorin laakerivian tunnistaminen mikrotyöstetyn kiihtyvyyssanturin avulla. Tutkimusraportti 14, TESLA-raportti 56/2001.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J.; *An Evaluation of Condition Monitoring of Bearings of 15 kW Induction Motor Based on Stator Current Measurement*, ICEM 2002, Bruges, Belgium 26-28 August, 2002.

Lindh, T.: *Bearing monitoring of electrical motors and powerline communications in low voltage industrial distribution networks*. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Lappeenranta 2002. Tesla-raportti nro 79/2002.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J.: *An Evaluation of micromachined accelerometer in the Condition Monitoring of Induction Motor Bearings*, Lodz, Poland, 17-19 October 2002.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J.: *Effects of Internal Radial Clearance of Bearings to Condition Monitoring of Bearings of Induction Motor Based on Statistical Stator Current Analysis*, Lodz, Poland, 17-19 October 2002.

Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J.: *Communication Possibilities for Remote Control and Condition Monitoring of Small Scale Power Plant*, NORDAC 2002, Copenhagen, Denmark, 7-8 November, 2002.

Partanen, J., Lindh, T., Järventausta, P., Kauppinen, M., Verho, P., Kärenlampi, M.: *Intelligent applications for the management of electrical systems in industrial plants*, Intelligent System Application to Power Systems (ISAP'99) April 4-8, 1999, Rio de Janeiro.

Partanen, J., Lindh, T., Ahola, J., Järventausta, P., Kauppinen, M., Mäkinen, A., Salomaa, T., Alanen, R., Panttila, L., Viinikainen, S., Ruuponen, P.: Teollisuussähköjärjestelmien hallinta, loppuraportti. Tesla-raportti nro 20/99.

Spatenka, P: *Methods of Design and Testing of Real Time Systems*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 2002.

Tarkiainen, A, Ahola, J., Pyrhönen, J.: *Modelling the Cable Oscillations in Long Motor Feeder Cables*, PCIM Europe 2002, Nuremberg, Germany, May 14-16, 2002.

Terrihauta, V: *Oikosulkumoottorin roottorivaurioiden tunnistaminen staattorivirran avulla*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 2002. (Ei saatavana sähköisessä muodossa.)

## **TTKK**

Kauppinen M., Mäkinen A., Antila S., Järventausta P., *Paperikonetta syöttävän sähkönjakeluverkon kuormitukset ja niiden mallintaminen käytöntuen sovelluksia varten*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka. Tampere, 2002. TESLA-raportti nro 76/2002.



Kauppinen, Mäkinen, Antila, Järventausta, Ahola, Lindh, Partanen: *Load modelling for distribution management functions of industrial medium voltage distribution networks*. IASTED 2001, Rhodes, Greece, 3-6 July, 2001.

Lehto, K.: *Teollisuussähköverkkojen häiriötietojen kartoitus*. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka. Tampere, 2002. TESLA-raportti nro 75/2002.

Lehtonen, O.: *Teollisuuden sähkönjakelun käyttövarmuuden hallinnan kehittäminen*. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka. Tampere 2001. TESLA-raportti nro 78/2002.

Mäkinen A., Kauppinen M.: *Teollisuuden sähköjärjestelmien hallinta - kuormitusmallit (mittausraportti)*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköverkot ja markkinat, tutkimusraportti, 1999, 19 s.

Nevalainen, P.: *PD-mittauksiin perustuva kunnonvalvontamenetelmä teollisuuden sähköverkoissa*. TTKK Sähkövoimatekniikan laitos, Tampere 2002. TESLA-raportti 67/2002.

Nevalainen, P.: *Osittaispurkausmittauksiin perustuva kunnonvalvonta teollisuusverkossa*. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu 5.2002 (Sisältyy TESLA-raporttiin 67)

Nousiainen, K.: *Monitoring the temperature and ageing of distribution transformers with distribution automation*, The 9th International Electrical Insulation Conference, Berlin 18-20 June 2002.

Nousiainen, K., Verho, P., Pylvänäinen, J.: *The temperature monitoring of distribution transformers*. TESLA Interim report 2001.

Nousiainen, K., Nevalainen, P.: *Partial discharge measurements in industrial networks*, TESLA Interim report 2001.

Nousiainen, K., Nevalainen, P.: *Implementation of partial discharge measurements in a noisy environment*. TTKK, 2002.

Nousiainen, K., Verho, P., Pylvänäinen, J.: *New methods for temperature monitoring of distribution transformers*. TTKK, 2002.

Pylvänäinen, J.: *Jakelumuuntajien seurantamenetelmien kehittäminen*. TTKK Sähkövoimatekniikan laitos, Tampere 2002. TESLA-raportti 68/2002

Salomaa, T.: *Silmukoidun jakeluverkon laskenta-algoritmit*. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka. Tampere 1999. TESLA-raportti nro 77/2002.

## VTT

Alanen, R.: *Epätahtimoottorin kuormituksen mallinnus*. TESLA-raportti 1/1998, 32 s.

Alanen R.: *Neural Networks and their Applications in Industrial Electric Power Systems*. Lisensiaattityö, 1998, 95 s. (Ei saatavana sähköisessä muodossa.)

Alanen, R., Panttila, L.: Stora Enso, Varkaus. Paperikonelinjan PK3 (PK1) sähköenergian kulutus. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 1999.

Alanen, R.: Uppokaariuunin tehon asetusarvon ohjaaminen. Tilastollinen esianalyysi mittausten tuntikeskiarvojen perusteella tehon rajoitukseen vaikuttavista tekijöistä. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 1999.

Alanen, R., Panttila, L., Viinikainen, S.: Stora Enso Oyj, Varkauden paperikonelinjan PK4 sähköenergian kulutus. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 2001.

Alanen, R.: M-real, Kirkiniemen PK3 sähköenergian kulutus. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 2002.

Alanen, R.: *Moottorikäyttöjen mitoitus- ja valintakysymykset ja energiansäästöpotentiaalit*. VTT Prosessit, Espoo, 2002. TESLA-raportti 64/2002.

Alanen, R.: *Study of electric motor system dimensioning in industrial processes*. VTT Processes, 2002.

Alanen, R., Kumpulainen, L., Manninen, J., Partanen, J., Lindh, T., Ahola, J., Järventausta, P., Kauppinen, M., Mäkinen, A., Nousiainen, K., Verho, P.: *Teollisuussähköjärjestelmien hallinta. Keskeiset tulokset 1998 - 2002*. TESLA-raportti nro 69/2002.

Hukari, S.: *Esiselvitys teollisuuden sähköjakelukonseptien kehityksestä*. VTT Energia, Jyväskylä, 2001. TESLA-raportti 50/2001. 74 s.

Hukari, S.: Preliminary study on the development of industrial electricity distribution systems. TESLA Interim Report.

Ikäheimo, J.: Stora Enso, Varkauden kuumahierrelinjan (TMP) sähköenergian kulutus. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 2001.

Ikäheimo, J.: Kymi Paper Oy:n sellulinjan sähköenergian kulutus. Luottamuksellinen tutkimusraportti, 2002.

Kumpulainen, L., Hautala, J., Kauhaniemi, K.: *Teollisuuden jännitekuoppien lieventämismahdollisuuksia suojausteknisin keinoin*. VTT Prosessit, Vaasa, 2002. TESLA-raportti 63/2002. 34 s.

Kumpulainen, L., Hautala, J., Kauhaniemi, K.: *Voltage dip mitigation possibilities in industrial distribution systems*. VTT Processes, 2002.