

AALTO-YLIOPISTO

SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan laitos

Juha Mikola

Kuormanpudotuksen mahdollisuudet sähkönjakelun automaatiassa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8.1.2012

Työn valvoja Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja DI Jussi Harju

Tekijä: Juha Mikola

Työn nimi: Kuormanpudotuksen mahdollisuudet sähköjaketun automaatiassa

Päivämäärä: 8.1.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 9 + 118

Sähkötekniikan laitos

Professori: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Koodi: S-18

Valvoja: Professori Matti Lehtonen

Ohjaaja: DI Jussi Harju

Tänä päivänä sähkön laadulla, keskeytyksillä ja sitä kautta asiakkaiden tyytyväisyydellä on yhä suurempi merkitys. Sähkökatkoista voi seurata asiakkaille nopeastikin rahallista menetystä. Yksi tapa turvata sähkönsyöttö tärkeille kuormille, on panostaa kuormanpudotukseen, joka irrottaa vähemmän tärkeitä kuormia tuotanto-ongelmien aikana.

Markkinoilla on monia kuormanpudotukseen soveltuvia järjestelmiä ja laitteita. Kaikista näistä laitteistoista ei täysin tiedetä, mihin toteutuksiin ne sopivat parhaiten ja minkälaisissa toteutuksissa niitä ei sovi käyttää. Osa ratkaisuista sopii nopeaan kuormanpudotukseen, jossa vaatimuksena on erittäin nopea reagointi järjestelmän tuotanto-ongelmiin. Osa kuormanpudotuksen ratkaisuista ei taas pystytä käyttämään nopeassa kuormanpudotuksessa, koska niiden reagoitinopeus ei riitä.

Työssä tutkitaan ABB Oy:n käyttämiä kuormanpudotuksen ratkaisuja. Tutkittavia ratkaisuja ovat kaukokäyttöjärjestelmä MicroSCADA, ohjelmoitavat PLC-logiikat RTU ja AC800 sekä uusi kuormanpudotusohjain PML630. Jokaista näistä tuotteista on käytetty kuormanpudotuksessa aikaisemmin. Työn tavoitteena on selvittää, minkälaisissa tilanteissa ratkaisuja kannattaa käyttää ja minkälaisissa ei. Tuotteista ja niiden sopivuudesta eri kuormanpudotuksen toteutuksiin ei ole aikaisemmin tehty yhtä laajaa vastaavaa tutkimusta. Koska aikaisempaa yhtä laajaa tutkimusta ei ole, voi tätä työtä käyttää myyntivaiheessa selvittämään, mikä ratkaisu kyseiseen projektiin on paras. Tutkimus toteutettiin vertailemalla laitteistoilla jo tehtyjä projekteja ja omilla simuloinneilla.

Tutkimuksissa saatiin tehtyä hyvä vertailu laitteiden ominaisuuksista, joiden avulla niiden käytön rajoitukset on helppo tunnistaa. Tutkimuksissa havaittiin, että suurin rajoittava tekijä nopeassa kuormanpudotuksessa on erilaisten väyläkommunikointiyhteyksien hitaus. Positiivisena yllätyksenä väyläkommunikointiyhteyksien nopeudesta on kuitenkin IEC 61850 GOOSE -kommunikointi, joka mahdollistaa laitteiden välisen horisontaalisen, erittäin nopean, liikennöinnin. Tutkimuksissa saatiin tulos, jossa PML630 pystyi reagoimaan verkon tuotanto-ongelmaan keskimäärin enintään noin 48 ms:n kuluessa. Toinen tärkeä huomio oli kuormanpudotustoiminnallisuuden suuri ohjelmointityön määrä. Jos ratkaisuissa on valmis pohja kuormanpudotusta varten, asettaa se yleensä rajoituksia myös sähköaseman koolle, joka tulee ottaa huomioon projektia suunniteltaessa.

Avainsanat: kuormanpudotus, vertailu, kuormituksen hallinta, sähkönsyötön häiriöt

Author: Juha Mikola

Name of the thesis: Possibilities of Load Shedding in Distribution Automation

Date: 8.1.2012

Language: Finnish

Number of pages: 9 + 118

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power Systems and High Voltage Engineering

Code: S-18

Supervisor: Professor Matti Lehtonen

Instructor: M.Sc. Jussi Harju

Nowadays, power quality, interruptions and customer satisfaction have an increasingly important role. Power interruptions can quickly cause monetary losses to customers. One way to secure power supply for important loads is to invest in load shedding which will disconnect less important loads during power production failures.

On the market, there are many systems and devices suitable for load shedding. It is not exactly clear which device is always the most suitable for a situation at hand and in which kind of situation it should not be used. Some of the solutions are best suited for fast load shedding in which quick reaction time in power production failures is crucial. Some of the solutions cannot be used in fast load shedding because of their slow reaction time.

In this thesis, load shedding products used by ABB Oy are examined. The solutions studied are control system MicroSCADA, programmable logic controllers RTU and AC800 and a new load shedding controller PML630. All of the products have been used in load shedding before. The goal of this thesis is to figure out in which kind of situations each of the solutions could be used. No research regarding products and their suitability for load shedding as extensive as this thesis has been made before. Therefore, during tender phase, this thesis can be used to find out which solution is best for the project in question. The research was carried out by comparing projects made with the devices and through simulations.

A thorough comparison was made regarding the properties of the devices which made it easy to recognise their limitations. It was discovered that the most limiting factor in fast load shedding is the slowness of the communication protocols. It came as a surprise that IEC 61580 GOOSE communication protocol, which makes horizontal, very fast, communication possible, was as fast as it was. It was discovered that PML630 has the ability to react to power production failures in maximum average of 48 ms. Another important observation was the programming work needed for load shedding. If the solution has a template set up for load shedding, it usually sets restrictions for the size of the substation which should be noted when planning a project.

Keywords: load shedding, comparison, power management, power supply failures

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmissä Helsingissä. Kiitokset koko ABB:lle ja erityisesti Sähkönjakelun automaatiojärjestelmien yksikölle, että sain mahdollisuuden tehdä diplomityöni ABB:lle.

Haluan erityisesti kiittää ohjaajaani Jussi Harjua, joka tarjosi minulle tätä mielenkiintoista aihetta ja on ohjannut työtäni oikeaan suuntaan. Kiitokset esitän myös työni valvojalle, professori Matti Lehtoselle Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulusta. Työtä kirjoittaessani olen oppinut todella paljon sähköverkkojen kuormanpudotuksesta ja siihen liittyvistä haasteista. Hyvällä mielellä voinkin todeta, että tällä työllä on ollut iso merkitys omaan tietämykseeni ja uskoisin, että ABB tulee hyötymään työstäni. Haluaisin myös kiittää Kimmo Lindholmia, jonka kanssa kartoitimme mahdollisia diplomityön aiheita ennen oikean aiheen löytymistä.

Ilman asiantuntijoita ja heidän haastattelujaan työstäni olisi jäänyt puuttumaan paljon yksityiskohtaista tietoa kuormanpudotuksen ratkaisuksista. Kiitos siis Timo Peltoniemi, Jonny Forsman, Antti Esala ja Ville Luoma. Villelle erityiskiitos siitä, että hän on jaksanut auttaa minua puhelimella ja sähköpostilla tilanteissa, joissa kaikki ei ole sujunut ongelmitta. Samoin esitän kiitokset Jari Mäkilevolle auttamisesta työn simuloinneissa.

Lopuksi kiitokset Sannalle työni oikolukemisesta, kieliäsun korjaamisesta ja tuesta vaikeina aikoina sekä kotiväelle ja kavereille tuesta.

Espoossa 8.1.2012

Juha Mikola

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Alkulause..... | 4 |
| Sisällysluettelo..... | 5 |
| Symboli- ja lyhenneluettelo..... | 7 |
| 1 Johdanto..... | 10 |
| 1.1 Tutkimuksen tausta | 10 |
| 1.2 Tutkimusongelma..... | 10 |
| 1.3 Tutkimuksen tavoite | 11 |
| 1.4 Tutkimuksen rajaukset | 12 |
| 2 Kuormanpudotus | 13 |
| 2.1 Sähkönsiirron stabiilius | 13 |
| 2.2 Mitä on kuormanpudotus ja mihin sitä tarvitaan?..... | 14 |
| 2.3 Eri tapoja havainnoida verkon kuormitusta..... | 18 |
| 2.3.1 Tehotasapainon suora mittaus..... | 19 |
| 2.3.2 Taajuuspohjainen mittaus | 19 |
| 2.3.3 Jännitepohjainen mittaus..... | 22 |
| 2.4 Irrotettavan kuorman määrä | 26 |
| 2.5 Kuormien priorisointi | 33 |
| 2.6 Sähkön laatukriteereitä..... | 35 |
| 2.7 Kuormien takaisinkytkeminen | 38 |
| 2.8 Kuormanpudotuksen haasteet tulevaisuudessa | 39 |
| 3 Kuormanpudotuksen ratkaisuja | 42 |
| 3.1 Yleistä kuormanpudotuksen ratkaisuista..... | 42 |
| 3.2 Toteutuksissa käytettyjä kommunikointitapoja..... | 42 |
| 3.2.1 IEC 61850 | 44 |
| 3.2.2 OPC..... | 46 |
| 3.2.3 Suora kytkentä | 48 |
| 3.3 MicroSCADA..... | 49 |
| 3.3.1 Ohjelman yleisesittely..... | 49 |
| 3.3.2 Ohjelman hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa | 50 |
| 3.3.3 Kuormanpudotuksen toteutukset | 52 |
| 3.4 RTU..... | 54 |
| 3.4.1 Laitteen yleisesittely | 54 |
| 3.4.2 Laitteen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa | 56 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.4.3 | Kuormanpudotuksen toteutukset | 58 |
| 3.5 | AC800 | 60 |
| 3.5.1 | Laitteen yleisesittely | 60 |
| 3.5.2 | Laitteen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa | 62 |
| 3.5.3 | Kuormanpudotuksen toteutukset ja kirjastokomponentti | 64 |
| 3.6 | PML630 Load Shedding Controller | 67 |
| 3.6.1 | Ohjaimen yleisesittely..... | 67 |
| 3.6.2 | Ohjaimen toimintaperiaate..... | 69 |
| 3.6.3 | Ohjaimen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa | 71 |
| 4 | Testimenetelmät ja tulokset | 75 |
| 4.1 | Käytettävä testilaitteisto | 75 |
| 4.2 | PML630:n käyttöönottokoe..... | 76 |
| 4.2.1 | Kokeen tavoitteet ja toteutus..... | 76 |
| 4.2.2 | Tulokset | 80 |
| 4.3 | PML630:n nopean kuormanpudotustoiminnon koe | 84 |
| 4.3.1 | Kokeen tavoitteet ja toteutus..... | 84 |
| 4.3.2 | Reagointinopeuskokeen tulokset | 85 |
| 4.3.3 | Toimintatapakokeen tulokset..... | 88 |
| 4.4 | PML630:n hitaan kuormanpudotustoiminnon koe..... | 91 |
| 4.4.1 | Kokeen tavoitteet ja toteutus..... | 91 |
| 4.4.2 | Tulokset | 91 |
| 4.5 | PML630:n käyttöönotto MicroSCADAssa | 94 |
| 4.5.1 | Kokeen tavoitteet ja toteutus..... | 94 |
| 4.5.2 | Tulokset | 94 |
| 5 | Johtopäätökset | 97 |
| 6 | Yhteenveto..... | 105 |
| | Kirjallisuus | 108 |
| | Liitteet..... | 115 |
| | Liite A KAH-arvon laskemiseen tarvittavat taulukot..... | 115 |
| | Liite B MicroSCADA toteutus esimerkki kuormanpudotuksesta | 117 |
| | Liite C Kokeissa käytettyjen laitteiden tuotetiedot | 118 |
| | Liite D Mittaustulokset PML630:n nopeuskokeesta | 122 |

Symboli- ja lyhenneluettelo

Symbolit

| | |
|------------|---|
| α | Kerroin kuormituksen tyypille |
| ” | Tuuma |
| A | Ampeeri |
| b | Bitti |
| C_{TJSA} | Keskeytyksen aiheuttama haitta-arvo |
| E_{th} | Thevenin ekvivalenttipiirin jännite |
| f | Taajuus |
| f_0 | Nimellistaajuus |
| Hz | Hertsi |
| I | Virta |
| I_L | Kuorman virta |
| K_{AI} | Kulutuksen tyypistä riippuva energian kerroin |
| K_{KL} | Kulutuksen tyypistä riippuva tehon kerroin |
| K_{RA} | Rahanarvokerroin |
| K_v | Verkon luonnollinen säätövoima |
| K_{VA} | Vuodenaikakerroin |
| K_{VP} | Vuorokaudenaikakerroin |
| MW | Megawatti |
| m | Metri |
| ms | Millisekunti |
| nm | Nanometri |
| P | Pätöteho |
| P_G | Generaattorin tuottama pätöteho, tuotanto |
| P_L | Kuorman kuluttama pätöteho, kuormitus |
| s | Sekunti |
| S | Näennäisteho |
| S_0 | Nimellinäennäisteho |
| T | Keskeytyksen kesto |
| U | Jännite |
| U_0 | Nimellisjännite |
| U_L | Jännite kuorman päässä |
| V | Voltti |
| VAC | Vaihtojännite |

| | |
|-----------|--|
| VDC | Tasajännite |
| W | Watti |
| W_k | Verkon generaattoreiden liike-energia |
| W_s | Wattisekunti |
| Z_{app} | Kuorman impedanssi |
| Z_{th} | Thevenin ekvivalenttipiirin impedanssi |

Lyhenteet

| | |
|---------|---|
| cPMS | Compact Power Management System |
| DCOM | Distributed Component Object Model |
| DCS | Distributed Control Systems |
| DMS | Distribution Management System |
| ENTSO-E | European Network for Transmission System Operators for Electricity |
| GOOSE | Generic Object Oriented Substation Events |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| GPS | Global Positioning System |
| HMI | Human Machine Interface |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IED | Intelligent Electronic Device |
| IP | Internet Protocol |
| ISO/OSI | International Organization for Standardization/ Open Systems Interconnection |
| KAH | Keskeytyksen aiheuttama haitta |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| MMS | Manufacturing Message Specification |
| OLE | Object Linking and Embedding |
| OLE COM | Object Linking and Embedding Component Object Model |
| OPC | OLE for Process Control |
| PLC | Programmable Logic Controller |
| RTU | Remote Terminal Unit |
| SAV | Sampled Analog Values |
| SCADA | Supervisory Control And Data Acquisition |
| SCIL | Supervisory and Control Implementation Language (entinen Stömberg Control Implementation Language) |
| SCS | Strömberg Control System |

| | |
|------|--|
| SNTP | Simple Network Time Protocol |
| SOAP | Simple Object Access Protocol |
| SSS | System Self Supervision |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| UPS | Uninterruptible Power Supply |
| XML | eXtensible Markup Language |

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Elovaara ja Laiho (1988, s. 89) kirjoittavat, että sähköverkon tulee pysyä stabiilina, jotta tehonsiirtoa tapahtuisi. Verkon stabiiliudeksi kutsutaan generaattoreiden kykyä pysyä tahtikäytössä. Sähkön tuotannossa yleisimmin käytetty generaattorityyppi on tahtigeneraattori, ja siksi voimansiirtoverkkoon kytketyt generaattorit käyvät kaikki samalla sähköisellä kulmanopeudella. Esimerkiksi Suomessa tämä sähköinen kulmanopeus on 50 Hz. Verkon kuormitus ja erilaiset viat aiheuttavat verkon tehotasapainoon häiriötä ja generaattorin pyörimisnopeuteen muutosta.

Voidaan todeta, että sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen välillä tulee olla jatkuvasti tasapaino eli tehotasapaino. Jos tehotasapainoa ei ole, verkko voi joutua epästabiiliin tilaan. Elovaaran ja Laihon (1988, s. 89) mukaan suojauksen on laukaistava epätahtiin joutunut generaattori nopeasti irti verkosta niiden vaurioitumisen estämiseksi. Erilaisten vikojen ja kasvaneen kuormituksen seurauksena voidaankin siis joutua tilanteeseen, jossa tehotasapaino menetetään. Tällöin tehotasapaino pitäisi saavuttaa mahdollisimman nopeasti uudelleen, jotta verkko pysyisi stabiilina. Yksinkertaisin keino saavuttaa tasapaino onkin vähentää kuormitusta. Tässä kohtaa kuormanpudotus tulee merkittävään osaan.

1.2 Tutkimusongelma

Tänä päivänä sähkön laadulla, keskeytyksillä ja sitä kautta asiakkaiden tyytyväisyydellä on yhä suurempi merkitys. Sähkökatkoista voi seurata asiakkaille nopeastikin rahallista menetystä, ja keskeytyksen pidentyessä asiakkaat alkavat saamaan siitä korvauksia sähkölaitoksilta. (Wangdee & Billinton 2004) On esitetty (Tsai & Wong 2008), että yhä useammin sähkönsiirtojärjestelmiä käytetään yhä lähempänä niiden toimintarajoja. Tämä aiheuttaa suuria haasteita kuormanpudotukselle, koska tehotasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä on vallittava jatkuvasti, ettei verkon stabiiliutta menetetä.

Kuormanpudotusta on tutkittu paljon (Wu et al. 2010). Erilaisia toteutustapoja ja -algoritmeja on tutkittu ja kehitetty aina sähkönsiirtoverkoista (Fernandes et al. 2009) sähkönjakeluverkojen kuormanpudotuksen hallintaan (Hirodantis et al. 2009). Lisäksi toteutustapoja on tutkittu erilaisissa teollisuuslaitosten sähköjärjestelmissä (Khaki &

Montaser Kouhsari 2010) ja niiden saarekekäyttötilanteissa (Wu et al. 2010), joissa kulutusta kyetään ylläpitämään omalla hajautetulla tuotannolla.

Markkinoilla on Harjun (2011a) mukaan useitakin ABB Oy:n käyttämiä kuormanpudotuksen toteutustapoja, ja nykyään lähes jokaisessa ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmiin tulevassa tarjouspyynnössä ulkomaille on jonkinlainen vaatimus kuormanpudotuksesta. Koska toteutustapoja on monia, ei myyntivaiheessa ole aina tarkkaa kuvaa, minkälainen ratkaisu sopii parhaiten mihinkin tilanteeseen. Tämä aiheuttaa erilaisia lisäkustannuksia projekteissa, kun ongelmia joudutaan korjaamaan myöhemmin. Lisäksi markkinoille tulee jatkuvasti uusia kuormanpudotuksen tuotteita, joiden käytännön toteutuksista ja mahdollisuuksista ei vielä tiedetä paljon.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tämän työn tavoitteena oli testata erilaisia kuormanpudotuksen toteutustapoja ja selvittää, mikä tapa on paras ratkaisu mihinkin tarkoitukseen. On tärkeää, että laitteisto soveltuu toimintaympäristöön ja kykenee reagoimaan riittävän nopeasti muuttuvaan tehoasapainotilanteeseen irrottamalla tarvittavan määrän kuormitusta, jotta verkon stabiilius säilyy. Vertailu toteutettiin suorittamalla erilaisia simulointeja ja testejä laitteistoille. Lisäksi apuna käytettiin jo toteutettuja projekteja, joissa kuormanpudotuksen eri ratkaisuja on käytetty, sekä asiantuntijoiden haastatteluja. Tutkimuksen testitilanteiden avulla pyrittiin jäljittelemään mahdollisimman todellisia ja erilaisia käyttöolosuhteita sekä ongelmatilanteita, joita normaalissa käytössä voisi tulla. Näiden testitilanteiden avulla haluttiin tunnistaa tekijät, jotka rajoittavat laitteistojen sopivuutta erilaisiin sähköverkkoihin.

Koska tutkimuksessa tutkittiin jo käytössä olevien ratkaisuiden lisäksi laitetta, joka on niin uusi, ettei sillä ole vielä konkreettisia toteutuksia, piti tämän laitteen osalta perehtyä myös sen käyttöönottoon. Erilaisia ratkaisuja käytettäessä on tärkeää, että laitteistojen käyttöönotto tehdään oikein eikä väärällä asennustavalla vaikuteta laitteen toimintaan.

Tutkimuksen rakenne on jaettu osiin. Toisessa luvussa käsitellään kuormanpudotuksen teoriaa yleisellä tasolla: mitä kuormanpudotus on, miksi se on niin tärkeää ja minkälaisia tuotanto-ongelmien havainnointitapoja on käytössä? Kolmannessa luvussa esitellään tutkimuksessa tutkittavat kuormanpudotuksen ratkaisut: minkälaisia kuormanpudotuksen toteutuksia niillä on tehty sekä mitkä ovat niiden edut ja haitat.

Neljännessä luvussa tutkitaan simuloimalla tarkemmin yhtä kuormanpudotuksen ratkaisua, jolla ei ole vielä toteutettu yhtään projektia. Tämän jälkeen viidennessä luvussa esitetään johtopäätökset laitteistojen sopivuudesta erilaisiin kuormanpudotuksen toteutuksiin ja laitteistojen rajoituksista. Lopuksi kuudennessa luvussa esitetään tutkimuksen yhteenveto ja lisätutkimusmahdollisuudet.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tässä työssä tutkitaan vain ABB Oy:n tarjoamia yleisimpiä kuormanpudotuksen toteutusratkaisuja, joita ovat ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmien käyttämät MicroSCADA ja RTU (Remote Terminal Unit). Lisäksi ABB Oy, Prosessiteollisuus on käyttänyt AC800-laitetta kuormanpudotuksessa. Tutkimuksessa haluttiin tutkia myös uutta ja varta vasten kuormanpudotukseen suunniteltua ohjainta, PML630 Load Shedding Controller versio 1.1:tä.

Jo käytössä olevien laitteistojen osalta päätettiin, että vertailuun riittävät aikaisemmat kuormanpudotuksen projektit, joissa laitteita on käytetty sekä niiden asiantuntijoiden haastattelut. Tähän päädyttiin, koska täysin uuden tuotteen käytön ja asetteluiden opettelu vie jo itsessään paljon aikaa. Lisäksi laitteistolla pitäisi vielä suorittaa erilaisia testejä. Aikaisemmat projektit antavat myös riittävän kuvan laitteiston oikeasta toimintaympäristöstä, koska näissä toteutuksissa laitteisto on täyttänyt sille asetetut tavoitteet, joten ympäristöä voidaan pitää oikeana toimintaympäristönä.

Koska tämä työ tehdään ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmille, tämän työn tutkimusmenetelmät on rajattu keskittymään sähkönjakelu- ja teollisuussähköjärjestelmiin sekä niiden saarekekäyttötilanteisiin. Lisäksi tässä työssä on tutkittu laitteistojen sopivuutta erilaisiin tilanteisiin vain niiden teknisten näkökulmien puolelta eikä huomioon ole otettu esimerkiksi taloudellisia puolia.

2 Kuormanpudotus

2.1 Sähkönsiirron stabiilius

Sähkönsiirron stabiilius, tai oikeammin sen menettäminen, on tärkein syy, miksi kuormanpudotusta tarvitaan. Tämän takia on hyvä alussa tutustua hieman aiheeseen, mitä sähkönsiirron stabiiliudella tarkoitetaan.

Kuten Elovaara ja Haarla (2011a, s. 216) toteavat, on sähköverkko epälineaarinen ja dynaaminen järjestelmä, jossa kuormitus ja tuotanto muuttuvat jatkuvasti. Kun verkko on stabiilissa tilassa, sen jännitteet ja taajuus ovat hyväksyttävällä tasolla, eli kulutuksen ja tuotannon välillä vallitsee tasapaino, eikä siirtojohdoilla synny liian suuria jännitteen laskuja. Jos verkon jännite tai taajuus ei pysy vaaditulla alueella, kyseessä on stabiiliushäiriö, joka voi johtaa koko verkon tai sen osan romahtamiseen.

Elovaara ja Laiho (1988, s. 89) ovat kirjoittaneet sähköverkon stabiiliuden tärkeydestä. Koska sähkön tuotannossa käytetään yleisesti tahtigeneraattoreita, voimajärjestelmän kaikki kytketyt generaattorit pyörivät samalla sähköisellä kulmanopeudella. Suomessa esimerkiksi tämä sähköinen kulmanopeus on 50 Hz. Näin ollen, jos sähköinen kulmanopeus muuttuu, generaattori pitää irrottaa verkosta, ettei se vaurioituisi esimerkiksi resonoinnin takia. Resonointia voi syntyä, jos generaattori pyörii muulla kuin nimellistaajuudella ja pahimmassa tapauksessa se voi vaurioittaa koko laitetta. Esimerkiksi turbogeneraattorit pitää irrottaa verkosta, koska niiden turbiinien siivekkeet vaurioituvat alle 47 Hz taajuudella. Generaattori voi pudota tahtinopeudesta hitaana liukumisena kuormituksen kasvaessa tai nopeana muutoksena esimerkiksi ison vian seurauksena. (Elovaara & Laiho 1988, s. 89 sekä Elovaara & Haarla 2011a, s. 216–256)

Tapahuipua generaattorin putoaminen tahtinopeudesta hitaana liukumisena kasvavan kuormituksen takia tai nopeana muutoksena ison vian seurauksena, voidaan joutua nopeastikin sellaiseen tilanteeseen, ettei kuormituksen ja tuotannon välinen tasapaino säily. Elovaara ja Laiho (1988, s. 89) kirjoittavat, että jos generaattori putoaa tahdistista, pitää suojauksen laukaista se nopeasti verkosta pois vaurioitumisen estämiseksi. Luonnollisesti generaattorin irrottaminen verkosta voi tällöin kasvattaa ongelmaa entisestään.

Elovaaran ja Haarlan (2011a, s.74) mukaan esimerkiksi Suomessa sähkönsiirtoverkkoa käytetään N-1-periaatteella, eli verkon tulee kestää yhden mitoittavan vian ilman

romahtamista tai kuormien irrottamista. Mitoittavalla vialla tarkoitetaan yksittäistä pahinta mahdollista vikaa, joka yleisesti voi olla jonkin tärkeän siirtojohdon tai tuotantolaitoksen irtoaminen verkosta. Samanlaista vikakestoisuutta ei välttämättä ole jakeluverkkopuolella, puhumattakaan esimerkiksi yksittäisistä teollisuusasiakkaista, koska sähköverkot rakennetaan näissä yleensä säteittäisiksi (Elovaara & Haarla 2011a, s. 271). Tällöin sähkönsyötöllä ei välttämättä ole korvaavaa syöttöreittiä ja vian todennäköisyys on suurempi.

Stabiilius on jaettu kolmeen osa-alueeseen, joita ovat: kulmastabiilius, jännitestabiilius ja taajuusstabiilius. Näistä kuormanpudotuksen kannalta jännitestabiilius ja taajuusstabiilius ovat tärkeimpiä, koska ne ovat yleisimmät mittaussuureet suoran tehonmittauksen lisäksi, joiden mukaan kuormanpudotusalgoritmit toimivat. Näistä erilaisista kuormanpudotuksen havainnointitavoista on kerrottu tarkemmin luvussa 2.3. Jännitestabiiliudella viitataan verkon kykyyn ylläpitää vakaat jännitteet kaikissa verkon solmuissa jatkuvassa tilassa ja myös häiriöiden jälkeen. Jännitestabiiliushäiriö syntyy siis silloin, kun jännitteet laskevat tai nousevat liikaa. Perinteisesti jännitestabiilius liitetään kuormiin ja niiden tuottamaan tai kuluttamaan loistehoon. Taajuusstabiiliusongelma syntyy silloin, kun verkon taajuus pääsee laskemaan tai nousemaan liikaa. Taajuus laskee, kun kuormitusta on liikaa ja nousee, kun tuotantoa on liian paljon. Selvää on, että generaattoreiden irrottaminen verkosta tällaisessa tilanteessa huonontaa tilannetta entisestään. Koko verkon taajuus voi romahtaa, jos generaattoreita joudutaan irrottamaan liikaa. Taajuusromahdus on yleensä laaja ja häiriön jälkeen jännitteen syöttäminen ns. kylmään verkkoon voi kestää pitkään. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 216–256)

2.2 Mitä on kuormanpudotus ja mihin sitä tarvitaan?

Kuormanpudotuksen ymmärtäminen on erityisen tärkeää tämän työn kannalta. Tässä luvussa kerrotaan, mistä kuormanpudotuksessa on kyse ja minkälaisissa tilanteissa kuormanpudotusta voidaan tarvita.

Koska sähköä ei voida ainakaan vielä varastoida kovin suuria määriä, pitää verkossa jatkuvasti olla tasapaino tuotetun energian ja kulutuksen välillä. Kulutukseen vaikuttaa normaalin kulutuksen lisäksi myös sähköverkon häviöt (Fernandes et al. 2009). Sähkövoimajärjestelmien hyvä toiminta edellyttää, että taajuus ja jännite pysyvät lähellä nimellisarvojaan. Generaattorit on varustettu taajuudensäädöllä, jonka tehtävä on tasata taajuuden vaihteluita erilaisten kuormitusmuutosten seurauksena. Erilaisten vikojen

kuten johdon tai generaattorin laukeamisen tai nopeasti kasvaneen kuormituksen seurauksena voidaan joutua tilanteeseen, jossa kulutusta on liikaa eikä tuotanto enää riitä kulutukselle (Fernandes et al. 2009). Tällöin joudutaan ottamaan käyttöön pyöriä reservejä, joiden avulla saadaan lisätuotantoa. Lisätuotantoa ei välttämättä kuitenkaan ole saatavilla, se ei riitä korjaamaan tehotasapainoa tai sen käyttöönotto on liian hidasta, jolloin ainut tapa ratkaista tehotasapaino-ongelma on vähentää kuormitusta. Muussa tapauksessa vaarana on, että koko verkko voi romahtaa. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 347–348) Tällaisessa tilanteessa käyttöön voidaan ottaa kuormanpudotus, jonka avulla pyritään irrottamaan ylimääräistä kuormitusta mahdollisimman nopeasti, jotta verkko pysyy stabiilina ja toimivat generaattorit kytkettyinä verkkoon.

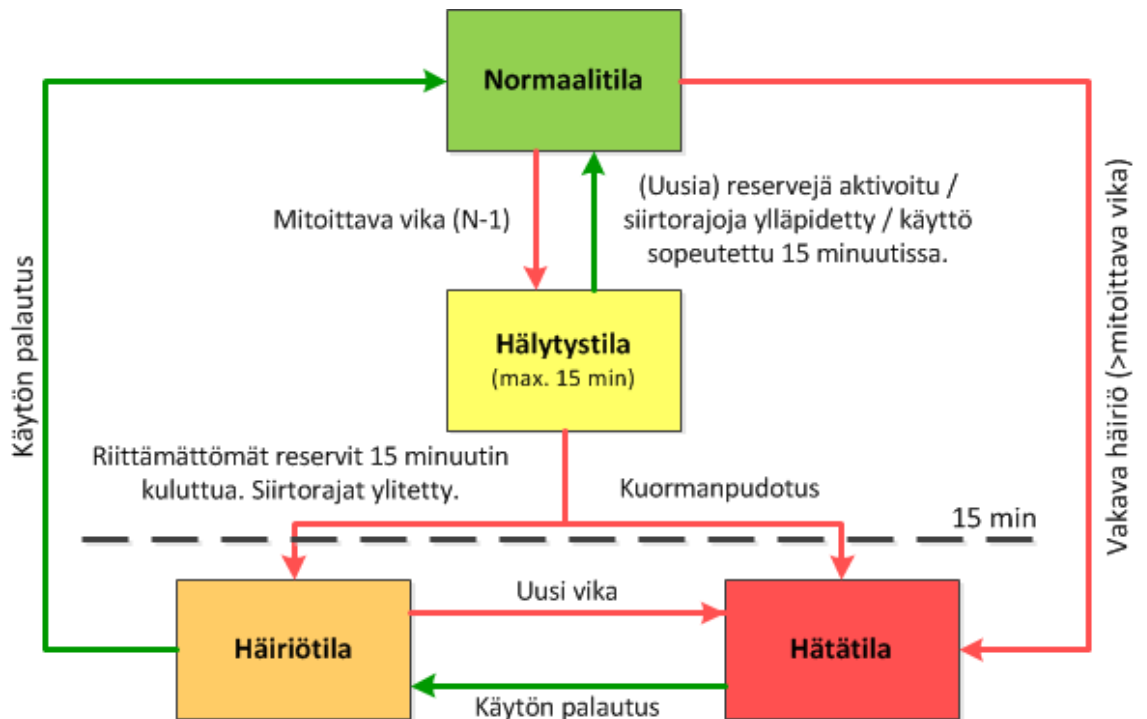
Kuormanpudotus on osa kuormituksen hallintaa. Itse kuormituksen hallinta käsittää monia muitakin toimenpiteitä, joilla sähköverkon stabiiliutta voidaan ylläpitää. Tällaisia muita toimenpiteitä ovat esimerkiksi tehon ohjaaminen ja verkon hyötysuhteen parantaminen. Tehon ohjaaminen käsittää niin loistehon kuin pätehtehon ohjaamisen erilaisilla menetelmillä. Näitä menetelmiä voivat olla erilaiset paristot ja tuotannon ohjaaminen sellaiselle alueelle, jossa kulutusta on enemmän. Kuormanpudotuksen tehtävä taas on turvata sähkö tärkeille kuormille vähentämällä muuta kuormitusta, kun ongelmia ilmenee. (ABB 2004)

Joissain tapauksissa muusta verkosta irronneen verkon osan tehotasapaino voidaan pystyä säilyttämään, jos alueella on esimerkiksi hajautettua tuotantoa. Tehotasapainon säilyttäminen ei kuitenkaan välttämättä onnistuisi ilman kuormituksen vähentämistä, jos alueen tuotanto ei kykene tuottamaan sähköä koko alueelle normaalilla kuormituksella. Tilannetta kutsutaan saarekekäytöksi ja siihen voidaan joutua esimerkiksi tilanteessa, jossa alueen ulkopuolinen sähkönsyöttö menetetään ja alueen sähkö tuotetaan omalla tuotannolla. (Hirodantis et al. 2009) Saarekekäytöllä tarkoitetaan sähköjärjestelmän käyttöä irti kantaverkkoyhteydestä. Saarekekäyttömahdollisuuksia on usein teollisuussähköasiakkailta, koska usein nämä teollisuusasiakkaat tuottavat normaalin prosessin ohella myös sähköä. Teollisuuslaitoksissa on yleensä paljon laitoksen prosessille tärkeitä kuormia, mutta myös paljon vähemmän tärkeitä kuormia, joita voidaan irrottaa tehovajeen aikana tilapäisesti (Khaki & Montaser Kouhsari 2010). Yleensä myös prosessin alajakustannukset ovat taloudellisesti erittäin huomattavia, minkä takia verkon saarekekäyttöjärjestelmän tulee olla toimiva. Teollisuussähköasiakkaat ovat siinä mielessä poikkeuksellisia, että yleensä

moottorikuormaa on paljon, jopa yli 90 % kuormituksesta. Lisäksi oikosulkuvirrat ja alueen tehotehiys ovat yleensä erittäin suuria. Kuormanpudotusta voidaankin pitää tällaisilla asiakkailta ensisijaisena tehotasapainoa ylläpitävänä toimenpiteenä. Ennen saarekekäyttöön siirtymistä laitoksen on pyrittävä tukemaan ulkopuolista verkkoa pyörivällä reservillä tai irrottamalla kuormia. (Kainulainen 2001)

Kuormanpudotus voi olla automaattista tai manuaalista pudottamista. Automaattisessa kuormanpudotuksessa toimenpiteet pohjautuvat erilaisiin verkon tehotasapainon mittauksiin, joihin järjestelmä reagoi automaattisesti. Verkon tehotasapainon muuttumiseen pyritään tällöin reagoimaan mahdollisimman nopeasti. Vikatilanteissa epätasapainotilanteeseen pitää voida reagoida jopa muutaman jakson kuluessa, eli noin 50–100 ms, ettei tärkeiden kuormien sähkönsyöttöön tulisi havaittavaa katkosta (Maiorano et al. 1999). Reagointinopeusvaatimus riippuu kuitenkin verkon rakenteesta ja tuotantovajeen suuruudesta, jotka vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti taajuus alkaa tippua. Tämä vaatii laitteilta erittäin nopeaa reagointia tilanteeseen. Manuaalisessa kuormanpudotuksessa toimenpiteet pohjautuvat taas käyttäjän tekemiin ohjaustoimiin, jolloin reagointi on paljon hitaampaa. (ABB 2011a) Automaattisen kuormanpudotuksen nopeuteen vaikuttaa kuitenkin viimekädessä asiakas, joka määrittää, kuinka nopeasti erilaisiin verkon häiriötilanteisiin tulee reagoida. Voi olla, että asiakkaalle riittää, että sähkö palautuu esimerkiksi muutaman minuutin kuluessa takaisin varavoimalla tai lähtökohtana voi olla vain generaattorien suojeleminen irrottamalla nopeasti kaikki kuormitus ongelmatilanteessa. (Esala 2011)

Nordel on määritellyt erilaisia verkon käyttötiloja ja ottanut ohjeistuksessaan kantaa kuormanpudotukseen. Ohjeistuksesta voidaan todeta, että kuormanpudotus, niin automaattinen kuin manuaalinen, on yleisesti käytössä Pohjoismaiden sähkönsiirtoverkkojen käyttäjillä. Suomen tilanteessa Fingrid Oyj:llä on käytössä automaattinen kuormanpudotus, jos verkon taajuus tippuu välille 48,7 Hz – 48,3 Hz. Manuaalista kuormanpudotusta käytetään pyörivän reservin tavoin, ja sitä voidaan käyttää, jos vain 600 MW pyörivästä reservistä on enää käyttämättä. (Nordel 2007, s. 100–101) Nordel:n verkon eri käyttötilojen kaaviokuva on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Nordel:n määrittämät verkon käyttötilanteet ja tapahtumat, joiden seurauksena voidaan joutua toiseen tilaan. Verkon romahdus voi tapahtua mistä käyttötilanteesta tahansa. (Nordel 2007, s. 66) Kuva piirretty uudelleen ja suomennettu.

Kuvasta 1 voidaan todeta, että jos kuormia joudutaan irrottamaan, ollaan verkon käytön kannalta hätätilassa (engl. emergency state). Hälytystilan määritelmä on, että verkossa on tapahtunut mitoitettava vika, joka ei itsessään välttämättä vaikuta verkon taajuuteen tai jännitteeseen, mutta verkko ei mahdollisesti kestä enää uutta vikaa. Tällaisissa häiriöissä on säädetty, että verkon käyttö tulee palauttaa normaaliin tilaan 15 minuutin kuluessa, jotta se kestää jälleen uuden mitoitettavan vian. Verkon käytön palauttaminen onnistuu tällaisessa tilanteessa esimerkiksi ottamalla käyttöön pyörivää reserviä. Jos verkon normaalia tilaa ei kuitenkaan kyetä saavuttamaan vaaditun 15 minuutin kuluessa, joudutaan joko häiriötilaan tai hätätilaan. Jos verkko pysyy stabiilina 15 minuutin kuluttua ilman kuormanpudotusta, ollaan häiriötilassa, mutta jos verkon käyttövarmuutta joudutaan parantamaan irrottamalla kuormia, ollaan hätätilassa. Hätätilan määritelmänä on, että kuormia on jouduttu irrottamaan verkon käyttövarmuuden parantamiseksi ja joudutaan mahdollisesti myös irrottamaan tuotantoa tai jakamaan verkkoa osiin. Toinen mahdollisuus joutua suoraan hätätilaan voi johtua siitä, että on tapahtunut mitoitettavaa vikaa pahempi vika. Mistä tahansa verkon käyttötilanteesta voi koska tahansa seurata verkon romahdus, jos riittäviä korjaustoimenpiteitä ei tehdä. Romahdukseksi kutsutaan tilannetta, jossa verkon osa tai koko verkko on jännitteetön. Nordel lakkautettiin vuonna 2009 ja sen korvasi ENTSO-E

(European Network for Transmission System Operators for Electricity), joka on EU:n maiden kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöelin. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 70–72, 281–282)

Siirtoverkoissa suuria stabiiliushäiriöitä onneksi esiintyy erittäin harvoin, mutta joitakin esimerkkejä on erittäin laajoista häiriöistä. Useat näistä suurhäiriöistä ovat saaneet alkunsa jonkin ison generaattorin irtoamisesta verkosta ja sitä kautta tehotasapainon menettämisestä. Kun korvaavaa tuotantoa on saatu jostain muualta, ovat ne lisänneet taas joidenkin siirtojohtojen kuormitusta jopa niin paljon, että johdot ovat ylikuormittuneet ja laenneet verkosta. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 258–270). Eräs erinomainen esimerkki kuormanpudotuksen vaikutuksesta suurhäiriön aikana löytyy Portugalista, kun marraskuussa 2006 Euroopan sähköverkko jakautui osiin vian seurauksena. Kuormanpudotuksella kyettiin pitämään verkko pystyssä Portugalissa ja häiriö ei aiheuttanut siellä suurta ongelmaa. Kyseessä on hyvin tavallinen käytännön esimerkki, johon voidaan joutua sähkönsiirtoverkkohäiriön seurauksena. (Fernandes et al. 2009) Todennäköisesti joistakin muista laajoista suurhäiriöistä olisi voitu selvittää pelkästään kuormanpudotuksella ja sitä kautta verkon käytön vakauttamisella. Osan kuormituksen irrottaminen on kuitenkin parempi vaihtoehto kuin koko verkon romahtaminen.

Tutkimuksessa on tähän asti keskitytty kuormanpudotuksen tarpeesta oikeastaan vain nopean reagoinnin tarpeeseen, jolloin reagoidaan heti, kun verkon tehotasapaino muuttuu tietyn määrän. Kuormanpudotus voi olla myös hidasta reagointia, jossa esimerkiksi sallitaan muuntajien ylikuormitusta jonkin aikaa. Jos vikaa ei saada tiettyyn aikarajaan mennessä korjattua, aletaan irrottaa kuormia ja palauttamaan kuormitustilannetta sitä kautta normaaliksi. (ABB 2011a) Tällainen tilanne voisi tulla esille esimerkiksi sähkömuuntoasemalla, jossa kahdesta päämuuntajasta toinen laukeaa ja koko kuormitus joudutaan ohjaamaan yhden päämuuntajan kautta. Lakervin ja Partasen (2008, s. 121) mukaan esimerkiksi päämuuntajan normaalin käytön kuormitus on noin 60–80 % ja vikatilanteessa sitä voidaan kuormittaa jopa 10–30 % ylikuormalla jonkin aikaa.

2.3 Eri tapoja havainnoida verkon kuormitusta

Kuormanpudotus voidaan jakaa eri luokkiin sen perusteella, millä mittaustavalla verkossa olevia kulutuksen ja tuotannon välisiä ongelmia havainnoidaan. Tässä luvussa käsitellään näistä tavoista yleisimpiä, joita ovat suora tehotasapainon, taajuuden tai

jännitteen mittaaminen. Tällä hetkellä yleisin tapa vaikuttaa olevan suora tehotasapainon mittaaminen, jota pidetään yksinkertaisimpana ja luotettavimpana tapana havainnoida tehotasapainon muutoksia. Kuitenkin nähtävissä on, että tulevaisuudessa esimerkiksi taajuusmittauksesta voi tulla yhä tärkeämpää kuormanpudotuksessa. (Luoma 2011 ja Peltoniemi 2011) Tämän takia on hyvä käydä läpi myös vaihtoehtoisia tuotanto-ongelmien havainnointitapoja, vaikka tutkittavat laitteistot pääasiassa käyttäisivätkin vain suoraa tehotasapainon mittausta.

Todellisessa tilanteessa on kuitenkin mahdollista käyttää useita eri havainnointitapoja, jolloin voidaan reagoida esimerkiksi sekä tuotantovajeeseen taajuutta mittaamalla että jännitteen liialliseen laskuun johdon kuormittumisen takia. Seuraavissa luvuissa on kerrottu hieman tarkemmin kuormanpudotuksen eri havainnointitavoista.

2.3.1 Tehotasapainon suora mittaaminen

Tehotasapainon suora mittaaminen on yksinkertaisin tapa havainnoida kulutuksen ja tuotannon välistä epätasapainoa, koska sen välinen erotus kertoo suoraan, kuinka paljon tuotantovajetta verkossa on. Tehotasapainon mittaaminen perustuu siihen, että koko verkon kaikkien kuormien kuluttama teho tulee voida mitata. Samoin tulee pystyä mittaamaan, mikä on verkkoon kytkettyjen generaattoreiden sen hetkinen tuotannon määrä ja kuinka paljon reserviä verkossa on vielä jäljellä. Jos kulutusta on enemmän kuin tuotantoa, tarkoittaa se tuotantovajetta ja kuormitusta pitää vähentää. (ABB 2011b)

Selvää on, että tällaisessa laajuudessa verkon eri tehosuuntien mittaaminen ei onnistu helposti suurissa sähköverkoissa. Sen sijaan menetelmä tulee kysymykseen pienemmissä sähköverkoissa, joita ovat esimerkiksi teollisuuslaitosten sähköverkot (ABB 2011b). Muita mahdollisia käyttökohteita ovat erilaiset pienet jakeluverkon saarekealueet, joissa eri tuotanto- ja kulutuspisteitä ei ole liikaa, jolloin kaikkien pisteiden tehot pystytään mittaamaan (Wu et al. 2010).

2.3.2 Taajuuspohjainen mittaaminen

Kulkarni et al. (2010) mukaan järjestelmän taajuus on erinomainen ylikuormituksen mittari, koska se on suoraan riippuvainen pätötehon kulutukseen. Taajuus siis laskee, jos verkossa on liikaa kulutusta ja nousee, jos kulutusta on liian vähän. Taajuuden vaihtelut eivät vaikuta esimerkiksi pelkkiin resistanssikuormiin, mutta induktiivisiin ja kapasitiivisiin kuormiin taajuuden muuttumisella on vaikutusta. Tehotasapainon vuoksi taajuus pyritään pitämään normaalitilanteessa mahdollisimman lähellä sen

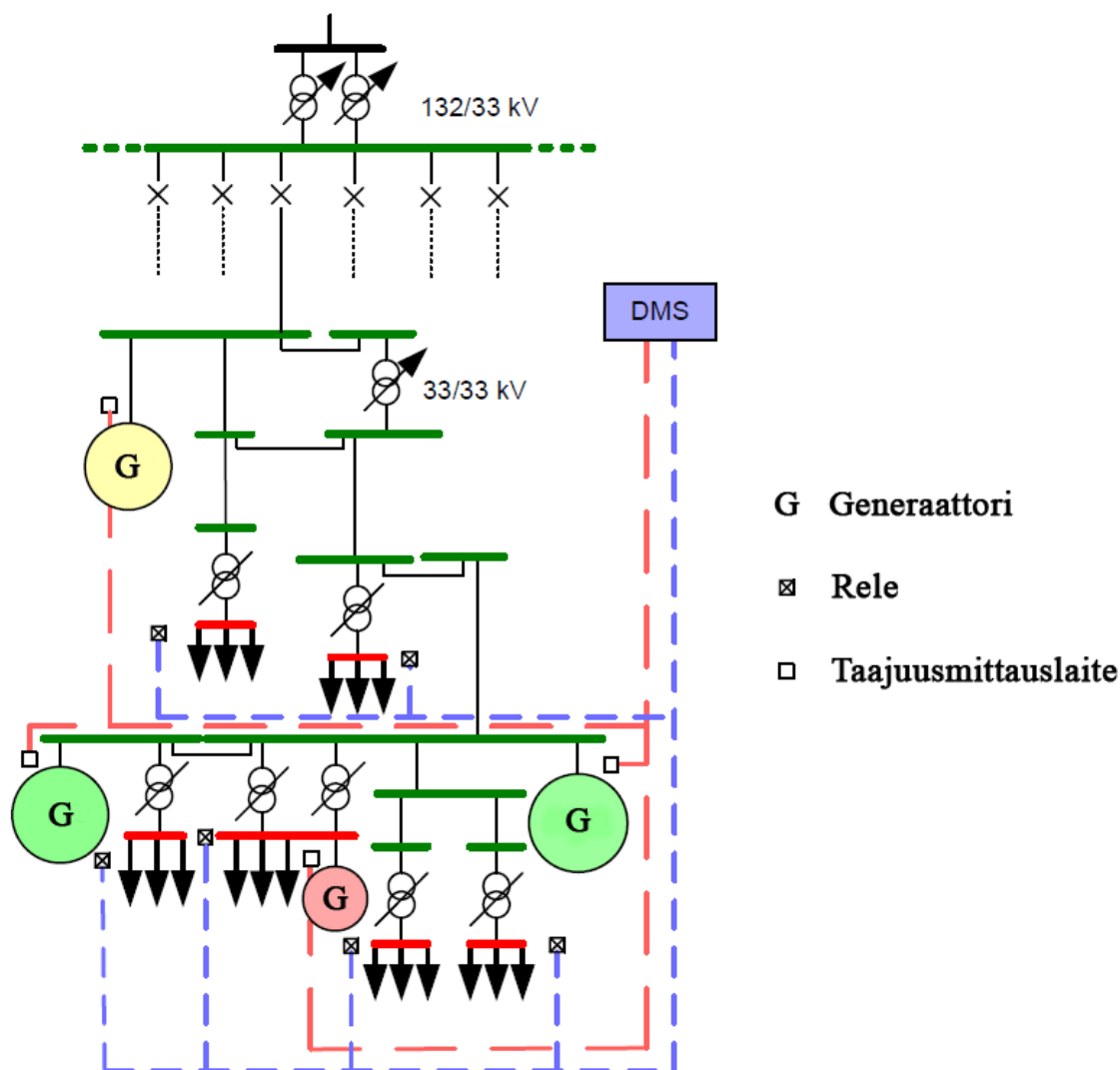
nimellisarvoa. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 454) Teollisuuslaitosten induktiomoottorit voivat hyvinkin kestää -2 Hz taajuuden muutoksen, mutta muissa kuormissa ei välttämättä ole samanlaista taajuudenkestoa. (Khaki & Kouhsari 2010)

Yleisimmät kuormanpudotuksen mallit ovat taajuusmittauksiin perustuvia, joista erityisesti alitaajuusmittaukset ovat kuormanpudotuksen kannalta tärkeimpiä. Irrotustoimenpiteiden ajoittamiseen vaikuttaa yleisesti tuotantogeneraattoreiden alitaajuuden kesto ja niiden irtoamistaajuus verkosta. Kuormanpudotus tulisikin aloittaa riittävän pienestä taajuuden laskusta, ettei taajuuskuoppa ehdi syvetä generaattoreiden irtoamistaajuuteen. Raja ei kuitenkaan saa olla liian lähellä nimellistaajuutta, ettei kuormia irrotettaisi turhan pienissä, itse korjaantuvissa ja normaaleissa taajuuden laskuissa. Rajataajuuteen vaikuttaakin verkon suuruus ja rakenne, kuinka herkästi verkko reagoi erilaisiin kuormitusmuutoksiin. (Kulkarni et al. 2010 ja Arulampalam & Saha 2010)

Yleisesti pyritään käyttämään useampia kuormaportaita, joita voidaan ottaa käyttöön sen mukaan, kuinka suuri taajuuspoikkeama on. Näin voidaan estää liian suurten muutosilmiöiden vaikutukset verkossa ja ei-toivottu taajuuden nousu liian suureksi kuormien irrottamisen jälkeen. Eri lähteistä ja tutkimuksista riippuen ehdotettujen kuormatasojen optimi määrä on noin 2–6 porrasta. (Arulampalam & Saha 2010 ja Fernandes et al. 2009) Portaisiin voidaan määrittää erilaiset taajuuden raja-arvot, jotka aktivoivat portaan taajuuden laskiessa sen alle. Portaiden välisen taajuuseron tulee myös olla sopivan pieni, jotta kaikki portaot voidaan jakaa tasaisesti halutulle taajuusvälille, ennen kuin generaattoreita pitää irrottaa verkosta. Näin ollen eri portaiden sopiva taajuusero keskenään on noin 0,5-1,0 Hz. Toinen tapa, josta on saatu hyviä tuloksia, on pitää vakio rajataajuus kaikissa portaissa, mutta aktivoitumisviivettä kasvatetaan eri portaiden välillä. Näin saavutetaan tilanne, jossa taajuuden laskiessa irrotetaan ensin jonkin verran kuormaa, mutta jos tilanne ei korjaannu ja taajuus jatkaa laskuaan, irrotetaan lisää kuormaa, kun seuraavan portaan aika täyttyy. (Hirodontis et al. 2009)

Taajuuden vaihtelut näkyvät melko samoina koko verkossa, jolloin epätasapaino voidaan havaita mistä päin verkkoa tahansa. Suotavaa on kuitenkin mitata taajuutta eri verkon kohdissa, ja mittauspisteet tulisi sijoittaa esimerkiksi mahdollisimman lähelle generaattoreita. Releet tulee sijoittaa lähelle kuormitusta, jotta irrotusoperaatiot onnistuisivat mahdollisimman nopeasti. Esimerkki mittauksen ja releiden sijoitteluista on esitetty kuvassa 2, jossa on tyypillinen Iso-Britannian jakeluverkon osa. Käytössä on

yksi DMS (Distribution Management System), joka hoitaa taajuuden seuraamisen ja toimenpidekäskyjen jakamisen releille. (Hirodantis et al. 2009)



Kuva 2: Esimerkkikuva taajuusmittareiden ja releiden sijoittelusta jakeluverkossa. (Hirodantis et al. 2009) Kuva suomennettu, muokattu kaikkien generaattoreiden merkit yksinkertaisemmiksi ja lisätty merkien selitykset kuvan oikeaan reunaan.

Taajuutta voidaan käyttää myös vian paikantamiseen järjestelmässä. Sähköinen etäisyys generaattoreiden ja vikakohtaan välillä sekä generaattoreiden taajuusvaste luovat taajuuden muutokseen hitautta. Tämä aiheuttaa sen, että taajuus putoaa nopeammin sellaisissa lähdöissä ja kiskoissa, jotka ovat lähempänä vikakohtaa tai joissa tuotantovaje on suurin. Vertailemalla eri mittauspisteiden taajuuksia tai niiden muutosnopeuksia, voidaan vika paikantaa melko tarkasti. Tällöin tosin taajuusmittareiden pitää olla aikasykronoituja, jotta mittaukset olisivat vertailukelpoisia. (Kulkarni et al. 2010)

Verkon taajuutta voidaan mitata järjestelmästä staattisesti, jolloin saadaan tieto taajuudesta verkon eri osissa. Hieman vaativampi ja parempi vaihtoehto on mitata taajuutta dynaamisesti, jolloin saadaan selville myös taajuuden muutosnopeus reaaliaikaisesti. Muutosnopeudella voidaan määrittää tarkemmin tuotantovajeen suuruutta ja sitä kautta esimerkiksi tarvittavan kuorman määrää, joka pitäisi irrottaa, jotta tilanne palautuisi normaaliksi. (Kulkarni et al. 2010)

2.3.3 Jännitepohjainen mittaus

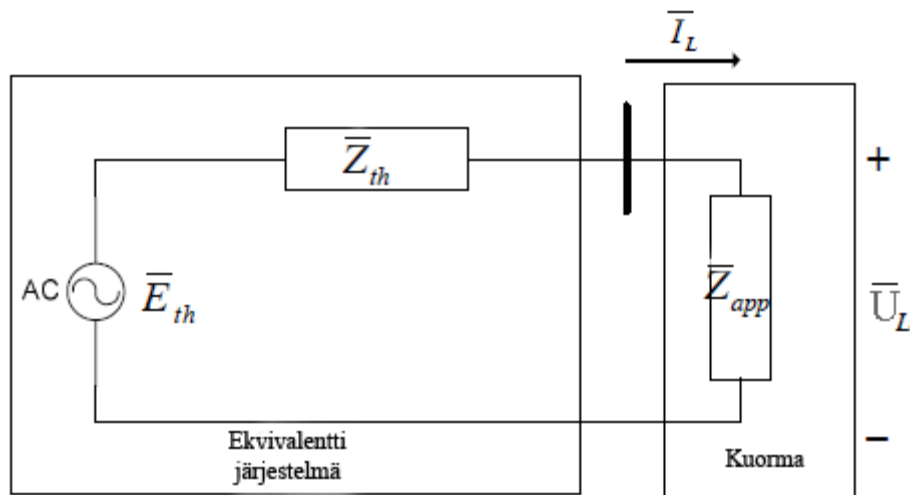
Verkon jännitteen mittausta voidaan käyttää myös kuormanpudotuksessa. Mutta koska jännite on sähköverkoissa paikallinen suure, se vaihtelee eri mittauspäikoissa sen mukaan, paljonko siirtojohdoilla on kuormitusta. Kun johdolla siirretään tehoa, erityisesti loistehoa, aiheuttaa se jännitteen laskua johdon toisessa päässä. Jännitepohjainen kuormanpudotus ei tämän takia sovellu kovin hyvin koko verkon tuotannon ja kuormituksen välisen tasapainon määrittämiseen. Jännitteellä on kuitenkin olemassa riippuvuus johdoissa kulkevaan loistehoon ja sitä kautta jännitteen avulla tai oikeammin sen muutoksella voidaan arvioida tehon kulutuksen muuttumista. Verkon jännitettä pystytään säätämään säätämällä verkon loistehoa, kun taajuuden säätö tapahtuu säätämällä pätötehoa. Loisteho vie johdon siirtotehoa ja laskee tällöin johdolla siirrettävän pätötehon enimmäismäärää. Jännitteen avulla voidaankin määrittää hyvin johtojen enimmäiskuormitusta ja vaikuttaa sen aiheuttamaan jännitteen alenemaan. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 347–352)

Jännite vaikuttaa yleensä paljon enemmän laitteen toimintaan kuin taajuus, jolla ei ole vaikutusta esimerkiksi resistanssikuormiin. Jokaiselle laitteelle on määritetty käyttöjännitealue, jonka sisällä verkon jännitteen tulisi olla, jotta laite toimii ja sitä voi käyttää turvallisesti. Jos verkon jännite nousee tai laskee liikaa, laite pitää irrottaa verkosta sen vahingoittumisen estämiseksi. Kuormanpudotuksen kannalta tärkein huomio kohdistuu alijännitteeseen. Jos verkon jännite laskee liikaa, on se yleensä merkki liiallisesta johdon kuormituksesta. Vähentämällä kuormitusta, voidaan nostaa jännitettä. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 438, 454 ja Tsai & Wong 2008)

Jännitepohjaisen kuormanpudotuksen haasteena on valita oikea raja-arvo, jonka alle jännitteen laskiessa aloitetaan irrotustoimenpiteet. On todettu, että useammat alijänniteportaat voivat johtaa tarpeettomiin kuormituksen irrotustoimenpiteisiin tai ongelmiin tunnistaa epävakautta. Kannattaa siis käyttää mielellään vain yhtä jännitepörrästä. On myös tiedossa, että paikalliset suuret, kuten jännite, ovat huonoja

osoittamaan verkon jännite-epävakautta suoraan käytettynä. Siksi jännitemittausten käyttäminen vaatii yleensä tarkempia algoritmeja, joiden avulla jännitteen ja kuormituksen välille haetaan riippuvuutta ja joiden avulla liiallinen kuormitus voidaan havaita. (Tsai & Wong 2008)

Verkon jännitteen määrittämiseen ja arvioimiseen, kun kuormitus on enimmäismäärän rajoilla, voidaan käyttää Thévenin ekvivalenttipiiriä. Thévenin ekvivalenttipiiriin mukaan kaikki piirin komponentit voidaan muokata ideaalisen jännitelähteen ja impedanssin sarjaankytkennäksi. Thévenin ekvivalenttipiiri on esitetty kuvassa 3. Piirin avulla voidaan arvioida mikä on kuorman jännite silloin, kun kuorman määrä on suurin, jotta verkko pysyy stabiilina, ja milloin tarvitaan kuormanpudotuksen toimenpiteitä. Thévenin ekvivalenttipiiriä käyttämällä on saatu hyvä tuloksia verkon jännitteen, kuormituksen ja jännitestabiiliuden välisestä yhteydestä. (Tsai & Wong 2008)



Kuva 3: Thévenin ekvivalenttipiiri, jolla voidaan estimoida kuorman jännitettä, kun kuormitus on suurin. Kuvassa merkitty Thévenin jännitelähteen jännitettä \bar{E}_{th} , Thévenin impedanssia \bar{Z}_{th} , kuormavirtaa \bar{I}_L , kuorman impedanssia \bar{Z}_{app} ja kuorman jännitettä \bar{U}_L . (Tsai & Wong 2008)
Kuva suomennettu.

Kuvasta 3 voidaan kirjoittaa Thévenin ekvivalenttipiiriin tasapainoyhtälö seuraavaan muotoon arvojen muutoksien avulla (Tsai & Wong 2008):

$$\Delta \bar{E}_{th} - \Delta \bar{U}_L = \Delta \bar{I}_L \bar{Z}_{th} \quad (1)$$

Thévenin impedanssi \bar{Z}_{th} voidaan laskea kovarianssien avulla seuraavalla kaavalla (Tsai & Wong 2008):

$$\bar{Z}_{th} = \frac{-COV[\Delta\bar{U}_L \Delta\bar{Z}_{app}]}{COV[\Delta\bar{I}_L \Delta\bar{Z}_{app}]} \quad (2)$$

Kun Thévenin impedanssi on laskettu kaavalla 2, saadaan kuorman jännitteen muutos laskettua kaavasta 1. Tämän jälkeen jännitettä voidaan estimoida käyttämällä oikeaa verkon mittauksien historiadataa kuorman määrästä sekä kuormavirrasta, ja laskea suurin kuormituksen määrä, jolloin jännite muuttuu suurimman sallitun määrän. Kaavan 1 avulla voidaan myös määrittää, kuinka paljon kuormitusta on vähennettävä, jotta jännite nousisi tietyn rajan yläpuolelle. (Tsai & Wong 2008)

Jännitepohjaisissa kuormanpudotusmenetelmissä on hyvä huomioida erityyppisen kuormituksen määrän riippuminen verkon jännitteestä. Riippuvuuskaavan avulla voidaan valita oikea jänniteraja, jossa toimenpiteet aloitetaan. Kaava voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$S = S_0 (U/U_0)^\alpha \quad (3)$$

, jossa S on kuormituksen aiheuttama todellinen hetkellinen näennäisteho,

S_0 on kuormituksen aiheuttama näennäisteho normaalissa tilassa,

U on hetkellinen jännite,

U_0 on jännite normaalissa tilassa ja

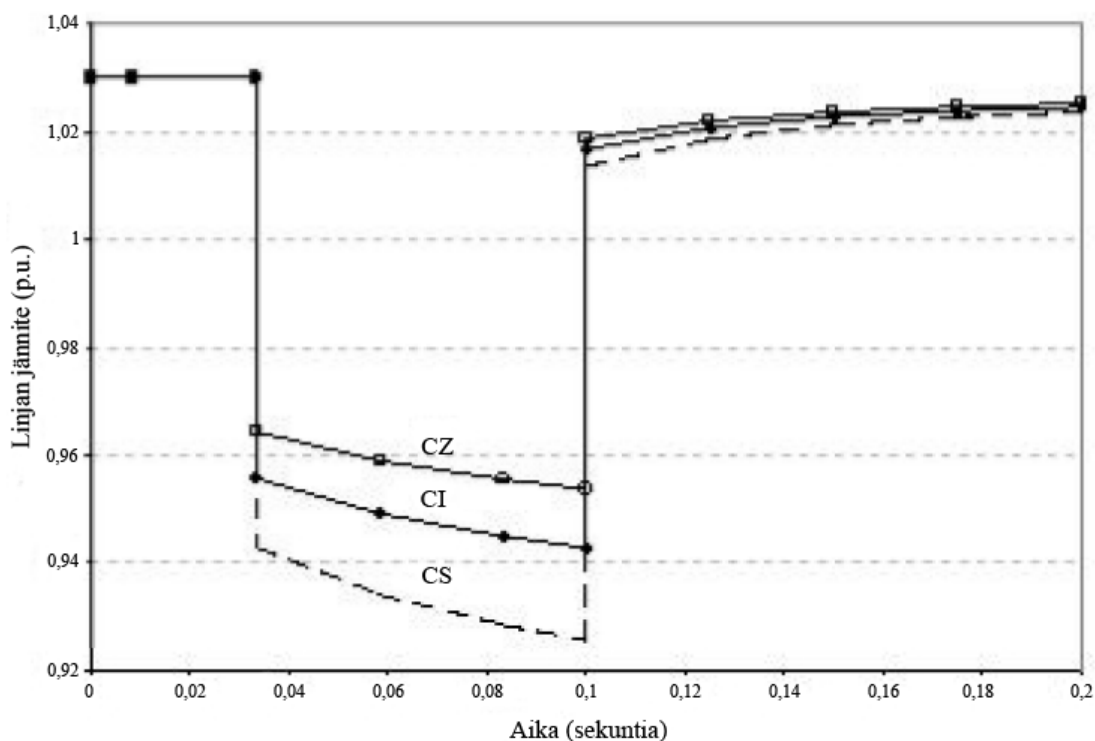
α on kerroin kuorman vasteelle jännitteen poiketessa normaalista tilasta.

(Ladhani & Rosehart 2005)

α :n arvo voi olla luku väliltä 0-2, jossa 0 tarkoittaa vakiotehoa, 1 tarkoittaa vakiovirtaa ja 2 tarkoittaa vakioimpedanssia. Luvun ei tarvitse olla tasaluku vaan esimerkiksi 0,5 tarkoittaa, että kuorma jäljittelee hieman vakiotehon ja vakiovirran piirteitä. Tällä tavoin saadaan parempia tuloksia kuormituksen määrän muutoksesta, kun jännite muuttuu. Kaavan 3 mukaan, kun jännite laskee, se vaikuttaa kuormituksen näennäistehon suuruuteen samalla tavalla ohmin lain perusteella. Jos kuormitus on vakiotehoinen, eli sen tehonkulutus ei muutu vaikka jännite muuttuisi, on kaavan tulos myös looginen, koska näennäistehon kulutus on vakioteholla sama. Kaavalla saadaan jännitevaste erityyppisille kuormituksille ja tällä tavoin tarkempia ennusteita. Kaavaa käytettäessä on hyvä tietää, että loisteho ja pätöteho käyttäytyvät todellisessa tilanteessa yleensä

hyvinkin erilaisilla, kun jännite muuttuu. Pätöteholle ja loisteholle on eri eksponenttinsa kaavassa 3. Kun loisteho reagoi yleensä hyvin nopeasti, seuraa pätöteho perässä pienellä viiveellä. (Ladhani & Rosehart 2005)

Kuvassa 4 on esimerkki kaavan 3 antamasta korjauksesta erityyppisille kuormille tilanteessa, jossa tapahtuu linjavika ja joka kasvattaa kuormitusta toisella johdolla. Jos tiedetään verkon jännite ennen vikaa ja vian aikana sekä tiedetään kuormitus ennen vikaa ja kuormituksen tyyppi, saadaan laskettua, kuinka paljon kuormaa verkossa on todellisuudessa jänniteromahduksen aikana. Kuvassa on merkitty erityyppisiä kuormituksia seuraavasti: CZ on vakioimpedanssi, CI on vakiovirta ja CS on vakioteho. Kuvan tapauksessa on osoitettu, että jos kyseessä olisi oikeasti vakiovirtakuorma, niin vakiotehokuormalla laskettuna jännite olisi todellista alhaisempi. Tämä voisi ennakoida laskun perusteella jänniteromahdusta, vaikka todellisuudessa tällaista vaaraa ei välttämättä olisi. Jos taas lasku tehtäisiin vakioimpedanssikuormalla, olisi jännite todellista korkeampi. Tässä tapauksessa on vaarana liian optimistinen suhtautuminen, vaikka jänniteromahdus onkin lähempänä. (Ladhani & Rosehart 2005)



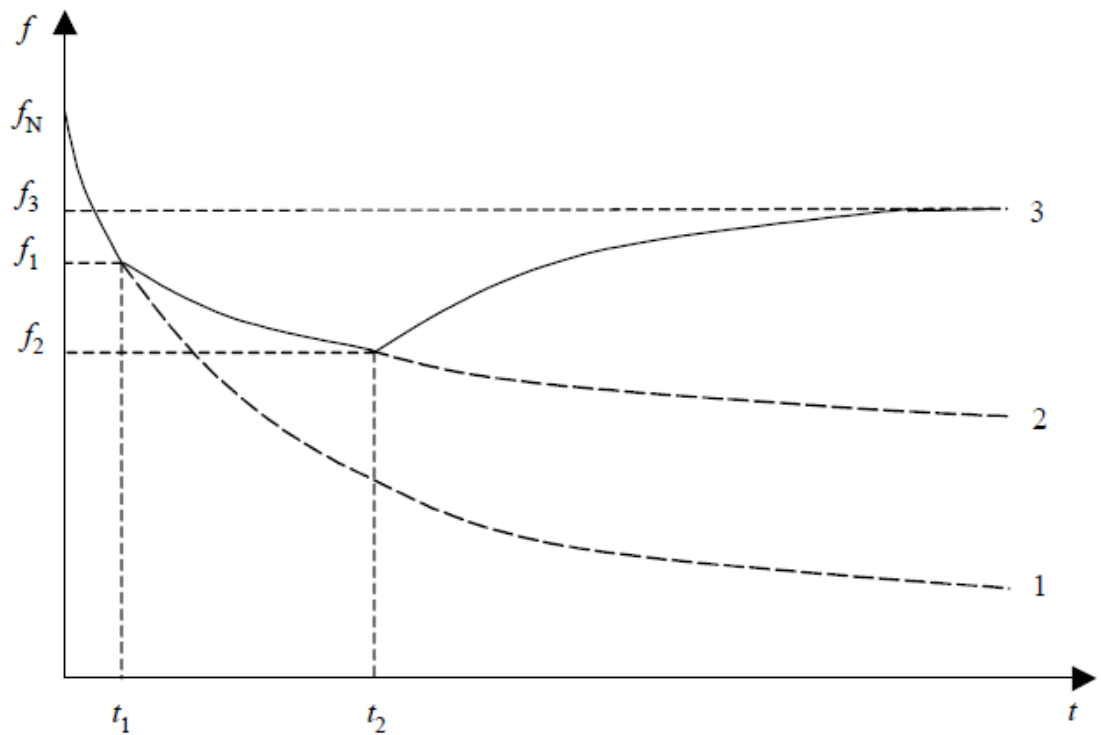
Kuva 4: Kuormituksen tyypin vaikutus jännitteen alenemaan vian aikana. Kuormituksen tyyppejä on merkitty seuraavasti: CZ on vakioimpedanssi, CI on vakiovirta ja CS on vakioteho. (Ladhani & Rosehart 2005) Kuva suomennettu.

Kuten jännitepohjaisen kuormanpudotuksen eri menetelmistä voidaan havaita, ovat ne paljon matemaattisempia kuin taajuuspohjaisessa kuormanpudotuksessa, koska alitaajuus on suoraan riippuvainen liiasta kulutuksesta, mutta jännitteen alenema on siirtojohtojen normaali ominaisuus. Vasta liiallinen jännitteen alenema on ongelma. Erilaiset ennuste- ja päättelyalgoritmit lisäävät aina jonkin verran virhettä lopputulokseen, mikä voi vaikuttaa huomattavastikin lopulliseen arvioon. Tällaisiin virhearvioihin tulee suhtautua erittäin vakavasti, koska ne voivat johtaa virheellisiin irrotustoimintoihin tai kuormia ei irroteta ollenkaan, vaikka todellisuudessa olisi tarve kuormituksen vähentämiseen.

2.4 Irrotettavan kuorman määrä

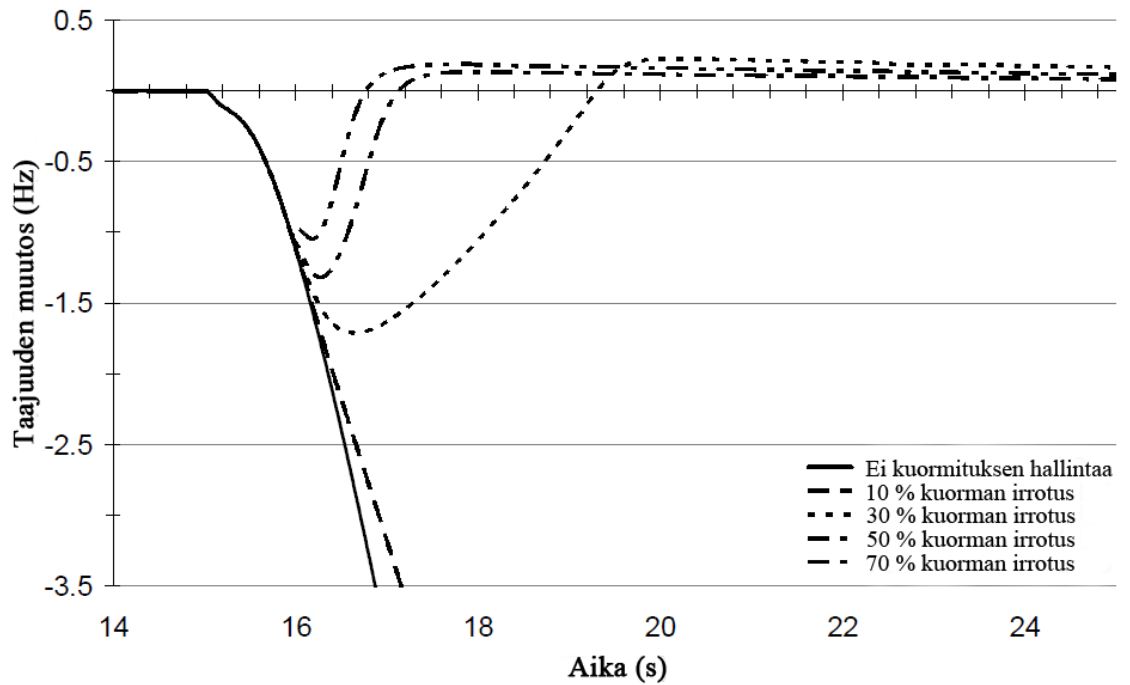
Tarvittavan kuorman määrää, joka riittää korjaamaan tuotantovajeen aiheuttaman taajuuden laskun, on tutkittu paljon. Ongelma ei ole aivan yksinkertainen, koska jos kuormaa irrotetaan liian vähän, ei tilanne korjaannu. Toisaalta ongelma voi syntyä myös, jos kuormaa irrotetaan liikaa. Tämä voi aiheuttaa taajuudelle tai jännitteelle päinvastaisen reaktion, eli taajuus tai jännite nousee liikaa. Yleisesti kuitenkin koetaan, että taajuuden säätö alaspäin on paljon helpompaa kuin ylöspäin, jolloin kuormituksen liiallista irrottamista ei tarvitse varoa. (Ladhani & Rosehart 2005) Kulkarni et al. (2010) mukaan hyvä yleissääntö on, että ensimmäisessä ja viimeisessä portaassa pitäisi irrottaa pienempi määrä kuormaa kuin keskimmaisissa, koska näin saadaan portaiden vaikutusta paremmin optimoitu.

Jos kuormaa irrotetaan liian vähän, taajuus ei korjaannu vaan jatkaa laskuaan. Taajuuden lasku tapahtuu toki hitaammin, koska tuotantovaje on hieman pienempi. Kuvassa 5 on esitetty tällaisessa tilanteessa taajuuden käyttäytyminen, kun taajuuden laskua korjataan irrottamalla tietty määrä kuormitusta. Kuvasta havaitaan, että kuormanpudotus toimii, kun taajuus laskee rajan f_1 alle. Irrotettu kuorma ei kuitenkaan riitä korjaamaan tilannetta, vaan taajuus jatkaa laskuaan edelleen. Kun taajuus putoaa rajan f_2 alle, irrotetaan lisää kuormaa, jonka jälkeen tuotanto ylittää kulutuksen ja taajuus alkaa nousta taajuuteen f_3 . Tämän jälkeen jäljelle jää vielä tietty taajuuspoikkeama, jonka generaattorin taajuuden säätö korjaa. Kyseessä on eri taajuusportaisiin pohjautuva kuormanpudotus. (Kainulainen 2001, s. 55)



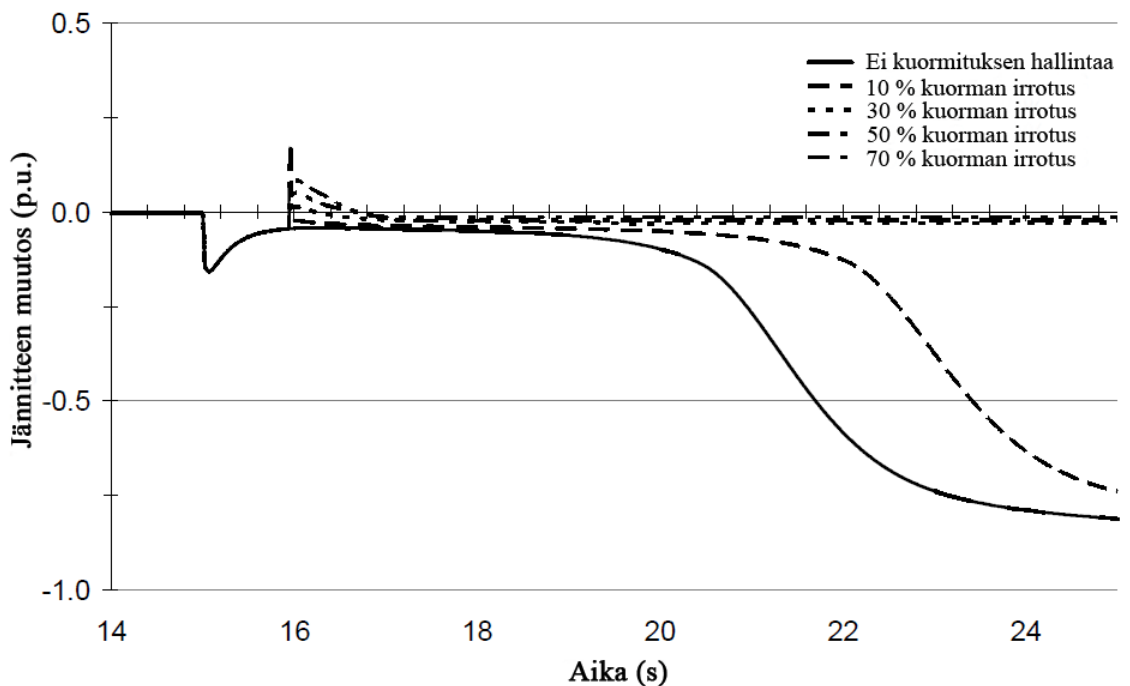
Kuva 5: Taajuuden korjaamisen periaate kuormanpudotuksessa. (Kainulainen 2001, s. 55)

Toinen esimerkki taajuuden ja jännitteen käyttäytymisestä on esitetty kuvissa 6 ja 7. Kuvassa 6 on esitetty jakeluverkon taajuutta ja sitä, kuinka irrotettavan kuorman määrä vaikuttaa taajuuden palautumiseen ongelman jälkeen, kun irrotetaan eri määrä kuormaa. Järjestelmässä tapahtuu vika noin 15 sekunnin kohdalla, joka saa taajuuden putoamaan. Noin 16 sekunnin kohdalla kuormanpudotus toimii ja irrottaa tietyn määrän kuormaa. Eri irrotettavan määrän vaikutus taajuuden käyttäytymiseen on havainnollistettu erilaisella viivan tyypillä. Kuvasta voidaan havaita, että jos kuormaa irrotetaan liian vähän, se ei korjaa tilannetta. 10 % kuorman irrotus on siis liian vähän. Kuvan tilanteessa generaattorien taajuuden säätö toimii hyvin eikä taajuus pääse nousemaan liian korkeaksi missään kohdassa, mutta irrotettavan kuorman määrä vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti taajuus palautuu normaaliksi. Optimointikysymys on siinä, mikä normalisoitumisaika on riittävän hyvä, koska enemmän kuin tarvittavan kuorman irrottaminen ei ole kannattavaa. (Hirodantis et al. 2009)



Kuva 6: Taajuuden käyttäytyminen vian jälkeen, kun eri määrä kuormitusta irrotetaan. (Hirodontis et al. 2009) Kuva suomennettu.

Kuvassa 7 on esitetty jännitteen käyttäytyminen samassa tilanteessa. Kuvasta voidaan havaita, että ylijännitepiikki on sitä korkeampi 16 sekunnin kohdalla, mitä enemmän kuormaa irrotetaan. Tässä mielessä mahdollisimman pienen kuorman irrottaminen on parempi kuin liian ison. (Hirodontis et al. 2009)



Kuva 7: Jännitteen käyttäytyminen vian jälkeen, kun eri määrä kuormitusta irrotetaan. (Hirodontis et al. 2009) Kuva suomennettu.

Joissain kuormanpudotuksen toteutuksissa riittää, että asiakas määrittää, kuinka paljon kuormitusta irrotetaan tietyissä kuormitusongelmissa. Tällöin kuormanpudotuksen toteutusten ei tarvitse laskea irrotettavan kuorman määrää sen enempää, vaan toimenpiteet perustuvat ennalta määrättyihin toimiin. (Forsman 2011) Tarvittavan kuorman määrän laskemiseen voidaan myös käyttää erilaisia staattisia ja dynaamisia malleja. Koska suora tehon ja taajuuden mittausta antaa parhaimman kuvan verkon tehotasapainosta, useimmat laskukaavat perustuvatkin näihin suureisiin. Jännitepohjaisessa kuormanpudotuksessa irrotettavan kuorman määrän laskemiseen ja sitä kautta jännitteen nostamiseen voidaan hyvin käyttää edellisen luvun Thévenin ekvivalenttipiirin menetelmää ja kaavoja 1 ja 2 sekä kuormituksen muutoksen kaavaa 3, jolla saadaan laskettua kuormituksen muutos jännitteen muuttuessa.

Jokaiselle irrotettavan kuormituksen määrän laskualgoritmile ominaista on, että kuormitukset on jaettu jonkinlaiseen prioriteettilistaan niiden tärkeyden mukaan siten, että heikoimmat prioriteetit ovat ensimmäisenä. Kuormien prioriteetin määrittämisestä on kerrottu tarkemmin luvussa 2.5.

Usein algoritmeissa on tarve laskea, kuinka paljon kuormitusta pitää vähentää, kun mitattava suure on laskenut tietyn tason alapuolelle ja mikä on maksimi irrotettavan kuorman määrä, ettei tapahdu päinvastaista reaktiota. (Khaki & Kouhsari 2010) Yksinkertainen tapa määrittää irrotettavan kuorman määrä on mitata kulutuksen ja tuotannon määrä. Tämä tosin vaatii, että kaikkien generaattoreiden tuotanto ja kuormien kulutus pitää pystyä mittaamaan, jolloin mittausjärjestely sopii parhaiten pieniin saareke- ja teollisuussähköjärjestelmiin. Tuotannon ja kuormituksen määrästä voidaan laskea tarvittava irrotettavan kuormituksen määrä suoraan kaavalla:

$$\Delta P_L = P_L - P_G \tag{4}$$

, jossa ΔP_L on järjestelmän tuotantovajeen määrä,

P_L on järjestelmän kokonaiskuormitus ja

P_G on järjestelmän kokonaistuotanto. (Kulkarni et al. 2010)

Jakeluverkkojen ja teollisuussähköjärjestelmien saarekekäyttötilanteessa tarvittavan irrotettavan kuorman määränä voidaan pitää sitä pätötehoa, joka alueelle tuotiin ennen vikaa. Tapaa voidaan käyttää siinä tilanteessa, että alueen omassa tuotannossa ei ole tapahtunut muutosta irtoamisen jälkeen ja voidaan olettaa tuotantovajeen olevan

samansuuruinen kuin alueen ulkopuolelta sähköä tuotiin ennen vikaa. (Kainulainen 2001, s. 58)

Jos jokaisen generaattorin tuotantoa ja kuormien kulutusta ei pystytä mittaamaan kaavaan 4, kuten usein ei pystytäkään, tarvittavan kuorman määrän arviota voidaan laskea myös verkon luonnollisen säätövoiman ja taajuuden muutoksen avulla:

$$\Delta P_L = -\Delta f K_v \quad (5)$$

, jossa ΔP_L on kuormitusmuutos,

Δf on taajuusmuutos ja

K_v on verkon luonnollinen säätövoima. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 360)

Suomessa esimerkiksi verkon luonnollinen säätövoima on noin 200 MW/Hz ja Pohjoismaissa yhteensä noin 1000 MW/Hz. Tämän tarkoittaa esimerkiksi Pohjoismaissa, että jos taajuus laskee 1 Hz, on verkossa tuotantovajetta noin 1000 MW ilman säätövoimaa. Yleensä kuitenkin parempi tapa laskea tehovajetta on käyttää verkon taajuuden muutosnopeutta, koska verkon taajuuden säätö pyrkii palauttamaan taajuuden pyörivän reservin avulla. Muutosnopeudella saadaan tietää verkon kuormitusmuutos, ja se voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon, jos tunnetaan verkon liike-energia:

$$\Delta P_L = \frac{2W_k}{f_n} * \frac{df}{dt} \quad (6)$$

, jossa ΔP_L on kuormitusmuutos,

W_k on verkon liike-energia,

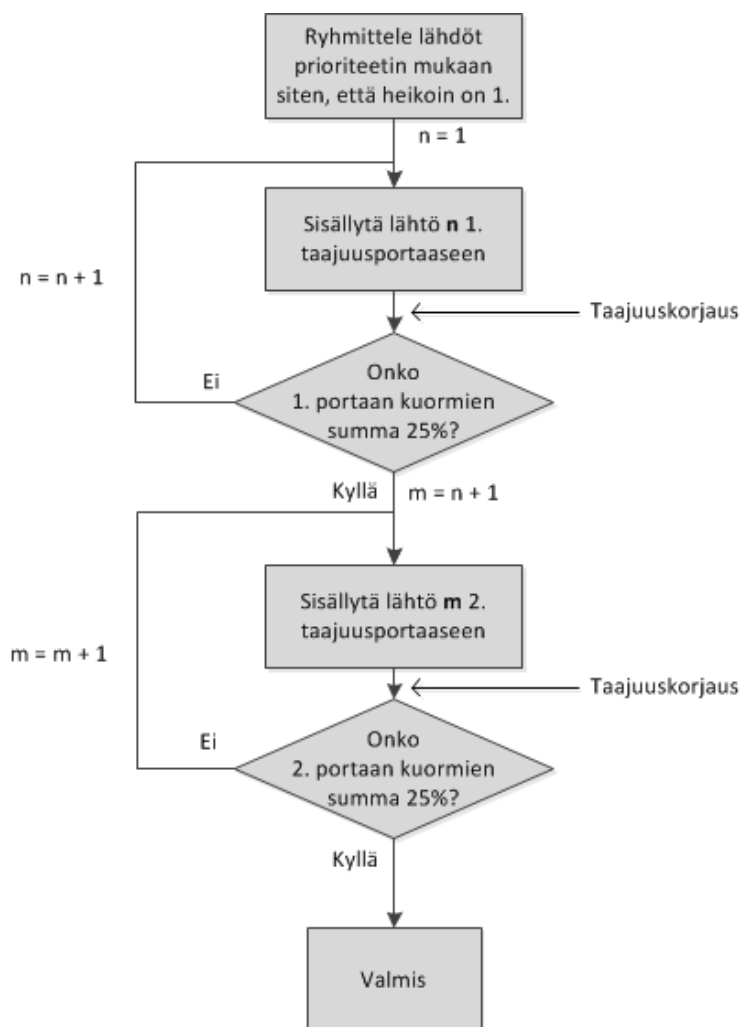
f_n on verkon nimellistaajuus ja

df/dt on taajuuden muutosnopeus. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 348, 358)

Esimerkiksi Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon liike-energia on noin 300 GWs ja se vaihtelee hieman sen mukaan, paljonko generaattoreita on verkkoon kytketty (Elovaara & Haarla 2011a, s. 348).

Kuormanpudotuksessa käytetään usein eri portaita, jotka sisältävät tietyn määrän kuormaa ja joita voidaan ottaa käyttöön tarpeen mukaan, kun esimerkiksi taajuus laskee tietyn rajan alle. Jokaiselle portaalille voidaan määrittää esimerkiksi tietty vakiomäärä

kuormaa. Tällöin voidaan määrittää esimerkiksi kaavoilla 5 tai 6, kuinka paljon taajuuden pitää laskea, että se vastaa irrotettavan portaan kuorman määrää. Kuvassa 8 on esitetty esimerkkiprosessikaavio tällaisesta menetelmästä, jossa lasketaan kuormia yhteen niin kauan, että irrotettavan kuorman määrä on 25 % kokonaiskuormituksesta. Irrotusportaita esimerkissä on 2, joista kukin kattaa 25 % kuormaa kokonaiskuormituksesta. Prosessin idea on, että alussa kaikki kuormalähdöt ryhmitellään eri prioriteetin mukaan listaan. Sitten lisätään lähtöjä niin monta, että portas kattaa 25 % kokonaiskuormituksesta. Sama tehdään 2. portaalle, ja prosessi on valmis, kun molemmissa portaissa on vaadittu kuormamäärä. Taajuuskorjaus tarkoittaa sitä, että jokaiselle portaisiin sisällytettävälle kuormalle asetetaan oikea rajataajuus, jonka jälkeen kuorman katkaisija avataan. (Fernandes et al. 2009) Koska portaat ovat melko suuria, voisi tällainen järjestely tulla kysymykseen jossain pienemmässä saarekeverkossa, kuten esimerkiksi teollisuusverkossa.



Kuva 8: Kuormien lisääminen kahteen portaaseen sitien, että jokaisessa portaassa irrotettavien kuormien määrä on 25 % kokonaiskuormituksesta. (Fernandes et al. 2009) Kuva piirretty uudelleen ja suomennettu.

Jos sähköjärjestelmässä on useita kiskoja, voidaan laskea tarvittavan kuorman irrotus kiskokohtaisesti. Näin saadaan irrotuksen vaikutukset jaettua paljon isommalle alueelle ja muutokset näin tasaisemmiksi. Kun tiedetään jokaisen kiskon kuormituksen vähennystarve, voidaan jokaista kiskoä käsitellä omana osanaan ja määrittää tarkempi irrotettava kuormitus kiskokohtaisesti eri priorisointitapojen mukaan. Jokaisen kiskon tarvittava kuorman vähennystarve voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta P_i = \frac{\Delta f_i * P_i}{\sum_{i=1}^n (\Delta f_i * P_i)} * \Delta P \quad (7)$$

, jossa ΔP_i on kiskon i kuorman vähennystarve,

Δf_i on kiskon i taajuuden muutos,

P_i on kiskon i kokonaiskuormitus,

n on järjestelmän kiskoäen kokonaismäärä ja

ΔP on kuormituksen kokonaisvähennystarve. (Kulkarni et al. 2010)

Kaava 7 voidaan myös kirjoittaa seuraavaan muotoon, jos pystytään dynaamisesti mittaamaan jokaisessa kiskossa taajuuden muutosnopeus:

$$\Delta P_i = \frac{\frac{df_i}{dt} * P_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df_i}{dt} * P_i \right)} * \Delta P \quad (8)$$

, jossa ΔP_i on kiskon i kuorman vähennystarve,

$\frac{df_i}{dt}$ on kiskon i taajuuden muutosnopeus,

P_i on kiskon i kokonaiskuormitus,

n on järjestelmän kiskoäen kokonaismäärä ja

ΔP on kuormituksen kokonaisvähennystarve. (Kulkarni et al. 2010)

Vaikka yleisen käsityksen mukaan taajuus pysyy samana koko verkossa, tarkoilla taajuusmittareilla voidaan havaita, että taajuus putoaa hieman nopeammin sellaisessa osassa verkkoa, jossa tuotantovaje on suurin. Kaavat 7 ja 8 perustuvatkin siihen, että niistä kiskoista, joissa on suurin tehovaje, irrotetaan eniten kuormitusta. Koska taajuuden muutosnopeus on hieman suurempi vian lähellä kuin muualla verkossa,

saadaan irrotettua enemmän kuormaa sieltä, missä ongelmia on. Tämä auttaa tasoittamaan verkkoa nopeammin. (Kulkarni et al. 2010)

Koska aina ei voida mitata suoraan koko verkon tuotannon ja kuormituksen määrää, joudutaan usein käyttämään muita keinoja tuotantovajeen määrän laskemiseen. Usein laskukaavoissa joudutaan käyttämään muuttujia, joiden arvojen määrittäminen ei välttämättä ole aivan yksinkertaista. Tällaisia muuttujia ovat esimerkiksi verkon luonnollinen säätövoima tai liike-energia, jotka määräävät kuinka nopeasti taajuus laskee tietyn suuruudessa tuotantovajeessa. Kuormanpudotuksen kannalta on kehitetty monia eri laskutapoja ja algoritmeja, joilla pyritään löytämään optimaalisen irrotettavan kuorman määrä.

2.5 Kuormien priorisointi

Kun kuormitusta joudutaan vähentämään tehovajeen aikana, tulee yleensä tarve jollain tavalla priorisoida, mistä kuormitusta vähennetään. Tärkein tavoite on, että tärkeimmät kuormat voivat saada tarvittavan määrän sähköä jatkuvasti. Kuormituksia voidaan priorisoida erilaisilla menetelmillä ja kriteereillä, joista on kerrottu tässä luvussa tarkemmin.

Yksinkertaisimmillaan jokaiselle kuormalle tai lähdölle voidaan antaa prioriteetti seuraavan jaon mukaan: tärkeä, melko tärkeä ja ei tärkeä. Sen jälkeen kuormat jaetaan prioriteettilistaan niiden tärkeyden mukaan siten, että heikoimman prioriteetin kuormat ovat listassa ensimmäisinä. Jos alimman prioriteetin kuormista ei saada vähennettyä tarpeeksi kuormitusta tuotantovajeen korjaamiseksi, siirrytään keskimmäisen prioriteetin kuormiin. (Khaki & Kouhsari 2010)

Koska johdolla siirrettävä kuorma vaikuttaa jännitestabiiliuteen, voidaan johtojen kuormitusastetta käyttää myös kuormanpudotuksen priorisointiin. Mitä enemmän johdolla siirretään kuormaa, sitä enemmän jännitehäviötä johdolla syntyy, kunnes jossain vaiheessa jännite romahtaa. Jokaiselle siirtojohdolle voidaan määrittää enimmäiskuormitustaso, jota ei saa ylittää. Enimmäiskuormitusmäärän ja nykyisen kuormitustason avulla voidaan laskea johdon kuormitusaste, eli kuinka monta prosenttia johdon kapasiteetista on käytössä, ja jakaa ne listaan kuormitusasteen mukaan. Toinen vaihtoehto on käyttää johdon jännitehäviötä, koska sillä on myös riippuvuus johdon kuormitukseen. Tällöin rajan määrittelee suurin sallittu johdon jännitteen lasku. Johdot, joissa on paljon kuormitusta eli iso kuormitusaste tai suuri jännitehäviö, ovat samalla

herkimpiä ongelmiin tehovajeen aikana ja niistä tulisi vähentää kuormitusta enemmän. (Tsai & Wong 2008)

Kuormitusta on tärkeää ja samalla järkevää vähentää myös sieltä, missä tuotantovaje on suurin. Koska taajuuden muuttumisessa on verkon ja generaattoreiden aiheuttamaa hitautta, taajuuden muutosnopeus on erinomainen tehotasapainon indikoija. Jos tuotantovajetta on paljon, taajuus myös laskee nopeammin. Tällöin voidaan priorisointiin käyttää kiskojen taajuuden muutosnopeutta ja vähentää kuormitusta enemmän kiskoista, joissa muutosnopeus on suurin. Muutosnopeuden mittaaminen vaatii dynaamista ja reaaliaikaista taajuusmittausta, ja kaikkien kiskojen taajuusmittareiden pitäisi olla aikasykronoituja keskenään. (Kulkarni et al. 2010)

Yleensä markkinat asettavat vaatimuksia kuormanpudotuksen toimenpiteille. Koska sähkökatkot aiheuttavat erisuuruisia rahallisia menetyksiä eri kuluttajille ja sitä kautta sähköjakeluverkkoyhtiöille korvausten muodossa, on järkevää priorisoida kuormitusta myös niiden taloudellisen tärkeyden mukaan. Kuorman taloudelliseen tärkeyteen vaikuttaa kulutuksen tyyppin lisäksi aika, koska esimerkiksi pyhäpäivinä teollisuusyritykselle sähkökatkon aiheuttamat rahalliset menetykset ovat pienemmät kuin arkisin. Kuormien taloudellisen merkittävyyden arviointiin voidaan käyttää keskeytyskustannuksia ja keskeytyksen aiheuttamaa haittaa eli KAH-arvoa (keskeytyksen aiheuttama haitta). (Wangdee & Billinton 2004)

KAH-arvo kertoo, mikä on sähkökatkosta seurannut rahallinen menetys asiakkaalle. Koska toimittamatta jääneen energian arvo perustuu vain sähkölaitoksen rahalliseen menetykseen myymättä jääneestä sähköstä, on rahallinen menetys asiakkaalle yleensä huomattavasti suurempi. KAH-arvot pyrkivät ottamaan huomioon erilaiset kuluttajatyypit siten, että esimerkiksi teollisuuslaitokselle sähkökatkosta seurannut rahallinen menetys on suurempi kuin kotitalouskuluttajalle. Lisäksi kertoimissa on otettu huomioon vuodenajan ja vuorokauden ajan vaikutus eri kuluttajatyyppeihin. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 428–430)

Asiakkaalle sähkökatkosta aiheutuva haitta voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$C_{TJSA} = (K_{KL} + K_{AI} * T) * P * K_{VA} * K_{VP} * K_{RA} \quad (9)$$

, jossa C_{TJSA} on keskeytyksen aiheuttama haitta-arvo euroissa,

K_{KL} on kulutuksen tyypistä riippuva tehon kerroin liitteen A taulukosta A.1,

K_{AI} on kulutuksen tyypistä riippuva energian kerroin liitteen A taulukosta A.1,

T on keskeytyksen kesto tunneissa,

P on keskeytynyt pätöteho ennen keskeytystä,

K_{VA} on vuodenaikakerroin liitteen A taulukosta A.2,

K_{VP} on vuorokaudenaikakerroin liitteen A taulukosta A.3 ja

K_{RA} on rahanarvokerroin liitteen A taulukosta A.4, jota tarvitaan vain, jos tehon ja energian kertoimet on ilmoitettu eri vuodelle kuin mitä halutaan laskea. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 429)

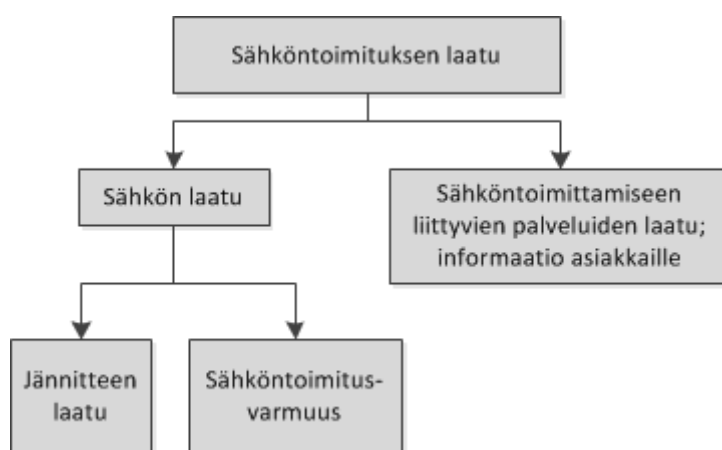
Kaavan 9 haitta-arvoa voidaan käyttää hyvin myös kuormituksen prioriteetin laskemiseen, kunhan laskukaavaa muistetaan päivittää riittävän usein kertoimien ja kulutuksen osalta. Ne kuormat, joissa on pienempi haitta-arvo, voidaan irrottaa ensimmäisten joukossa, koska todennäköisesti näille asiakkaille aiheutunut rahallinen haitta jää pienemmäksi. Vaikka teollisuuden KAH-arvo on yleensä paljon suurempi kuin tavallisen pienkuluttajan, tulee muistaa, että usein teollisuudestakin löytyy heikomman prioriteetin kuormia, joita voidaan irrottaa ilman tuotannon kärsimistä. Usein tämän heikomman prioriteetin kuormituksen määrä, joka voidaan irrottaa ainakin vähäksi aikaa, on erittäin merkittävä. Tämän takia teollisuus pitäisi ottaa mukaan kuormanpudotuksen suunnitteluun ja varustaa teollisuuslaitosten sähköjärjestelmät kuormanpudotusreleillä. Teollisuusyrityksille tulisikin tarjota kuormituksenjoustosta kunnollinen korvaus, joka yleensä jää huomattavasti pienemmäksi kuin koko laitoksen tuotannon katkeamisesta aiheutunut taloudellinen menetys. (Ladhani & Rosehart 2005)

2.6 Sähkön laatukriteereitä

Kun tutkitaan eri kuormanpudotuslaitteiden sopivuutta erilaisiin tilanteisiin, on hyvä tutkia ongelmaa myös sähkön laadun kannalta. Kuormanpudotuksessa on tarkoitus, että tärkeät kuormat saavat riittävän laadukasta sähköä toimiakseen myös ongelmatilanteissa. Jos jäljelle jääneelle kuormitukselle ei kyetä tarjoamaan riittävän

laadukasta sähköä, ei kuormanpudotuksesta ole mitään hyötyä. Onkin hyvä tietää, mitä sähkön laatu tarkoittaa ja minkälainen on riittävä sähkön laatu.

Elovaara ja Haarla (2011a, s. 419–420) kirjoittavat, että sähkön laatuun alettiin kiinnittää huomiota vasta 1970-luvulla, kun elektroniset laitteet verkossa lisääntyivät. Elektroniset laitteet ovat paljon herkempiä sähkön laatueroille kuin tavalliset sähkömekaaniset kojeet ja laitteet, jotka ottavat verkosta sinimuotoista virtaa. Alussa sähkön laatu tarkoitti sitä, kuinka hyvin jännitteen tai virran hetkellisarvot noudattivat puhdasta sinikäyrää, mutta sittemmin laadun käsitettä on jouduttu tarkentamaan. Tänä päivänä sähkön laatua tarkastellaan kahdesta eri näkökulmasta, koska vuoden 1995 sähkömarkkinalain myötä syntyi kaksi toisistaan erillistä liiketoiminta-aluetta: sähköverkkotoiminta ja sähkön myynti. Sähkön laatu tarkoittaa tänä päivänä sähkötoimituksen laatua sekä verkkotoiminnan laatua. Sähkötoimituksen laatu koostuu useasta osa-alueesta, joita on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9: Sähkötoimituksen laadun eri osa-alueet. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 420) Kuva piirretty uudelleen.

Kuvasta 9 voidaan havaita, että sähkötoimituksen laatuun lukeutuu sähkön laatu, johon kuormanpudotuksella pyritään vaikuttamaan. Kuormanpudotuksella pyritään vaikuttamaan osaltaan sähkötoimituksen varmuuteen, jotta tärkeät kuormat saisivat sähköä myös ongelmatilanteissa, kun nykyinen tuotanto ei riitä koko kuormitukselle. Toisaalta kuormanpudotuksella vaikutetaan myös jännitteen laatuun, jotta tärkeät kuormat saisivat pelkän sähkötoimituksen lisäksi myös riittävän laadukasta sähköä toimiakseen oikein.

Sähkötoimituksen varmuuteen vaikuttaa sähkötoimituksen keskeytykset. Tarkemmin varmuuteen vaikuttaa keskeytysten keskimääräinen lukumäärä vuodessa ja

keskimääräinen kestoaika. (Elovaara & Laiho 1988, s. 164) Kuten aiemmissa luvuissa on kerrottu, kuormanpudotuksella pyritään vaikuttamaan tärkeiden kuormien keskeytysten määrän minimoimiseen muiden, vähemmän tärkeiden, kuormien kustannuksella. Kuormanpudotus ei siis välttämättä vähennä keskeytysten keskimääräistä lukumäärää vuodessa tai niiden kestoaikaa. Jos hyötyä tarkastellaan toimittamatta jääneellä energialla tai keskeytyksen aiheuttamalla haitalla asiakkaalle, on kuormanpudotuksella iso merkitys, koska ilman kuormanpudotusta voisi häiriön vaikutukset olla huomattavasti suuremmat.

Kuormanpudotusratkaisuiden pitäisi kyetä reagoimaan ongelmatilanteisiin riittävän nopeasti ja samalla kyettävä tarjoamaan jäljelle jääneille kuormituksille riittävän laadukasta sähköä. Yksi Euroopassa laajasti käytössä oleva sähkönlaatustandardi on CENELEC:in laatima ja hyväksymä EN 50160 *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks* -standardi vuodelta 2007, jota voidaan käyttää riittävän laadukkaan sähkön määrittelyssä. Sama standardi on hyväksytty suomenkielisellä käännöksellä myös Suomessa SFS-EN 50160 *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet* -standardiksi vuonna 2008. (SFS-EN 50160 2008)

SFS-EN 50160 (2008) -standardi määrittelee jännitteen pääominaisuuden rajat tai arvot, joiden sisällä asiakas voi olettaa liittämiskohdan jännitteen olevan. Standardista tulee huomioida, ettei se määrää, mitkä jännitteen ominaisuuksien tulee olla, vaan kyseessä on ohjenuora. Lisäksi tulee huomioida, ettei standardia sovelleta esimerkiksi vian vuoksi alkunsa saaneissa olosuhteissa tai tilapäisissä syöttöjärjestelyissä eikä tapauksissa, joissa verkonkäyttäjän asennukset tai laitteet eivät täytä voimassa olevia standardeja tai viranomaispäätöksi. Tämän perusteella voidaan todeta, ettei kuormanpudotuslaitteiden tarvitse kyetä tarjota standardin mukaista sähkön laatua. Laitteiden oikean toiminnan kannalta on kuitenkin parempi, jos jännitteen ominaisuudet ovat standardin antamien rajojen sisällä.

SFS-EN 50160 (2008) -standardi määrittelee kuormanpudotuksen kannalta oikeastaan kaksi tärkeää perussuuretta: taajuuden ja jännitteen vaihtelun raja-arvot. Taajuuden nimellisarvon tulee olla sekä pienjännite- että keskijänniteverkoissa $f_n = 50$ Hz ja nimellisjännitteen julkisessa pienjänniteverkossa $U_n = 230$ V vaiheen ja nollan välillä mitattuna. Taajuuden vaihtelurajoiksi on määritetty molemmissa tapauksissa yhteiskäyttöverkoissa ± 1 % 99,5 % vuodesta ja $+4$ % / -6 % 100 % ajasta. Tämä tarkoittaa vaihteluväliä 49,5 Hz...50,5 Hz 99,5 % vuodesta ja 47 Hz...52 Hz 100 %

ajasta. Erillisverkoissa, eli esimerkiksi tietyillä saarilla tai saarekeverkoissa, taajuuden vaihtelurajoiksi on määritetty molemmissa tapauksissa $\pm 2\%$ 95 % viikosta ja $\pm 15\%$ 100 % ajasta. Tämä tarkoittaa vaihteluväliä 49 Hz...51 Hz 95 % viikosta ja 42,5 Hz...57,5 Hz 100 % ajasta. Taajuus tulee mitata 10 sekunnin keskiarvoina ja näiden keskiarvojen tulee olla edellä mainittujen rajojen sisällä.

Jännitteen vaihtelurajoissa on hieman eroa riippuen siitä käsitelläänkö pienjänniteverkkoja vai keskijänniteverkkoja. Molemmissa tapauksissa jännitevaihtelun tulisi olla enintään $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä. Pienjänniteverkoissa sallitaan, että jännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla 95 % jokaisen viikon ajasta välillä $\pm 10\%$. Kaikkien tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee osua välille $+10\%$ / -15% . Keskijänniteverkoissa ei ole määritetty, millä välillä kaikkien tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen pitää olla, mutta 95 % niistä pitää osua välillä $\pm 10\%$. Pienjänniteverkoissa nopeiden jännitteen alenemien suuruus ei yleensä ylitä arvoa $5\% U_n$, mutta lyhytaikaisia, jopa $10\% U_n$, alenemia voi tapahtua muutaman kerran päivässä. Yli 10% jännitteen alenemia kutsutaan jännitekuopiksi ja niitä voi olla vuodessa muutamista kymmenistä tuhanteen. Suurimmassa osassa tapauksista niiden kesto on alle 1 sekunti ja jännite jää suuremmaksi kuin 40% . Keskijänniteverkoissa nopeat jännitteen alenemat eivät yleensä ylitä arvoa 4% , mutta lyhytaikaisia, jopa 6% , alenemia voi tapahtua muutamia kertoja päivässä joissakin olosuhteissa. Jännitekuoppia voi esiintyä samalla tavalla kuin pienjänniteverkoissa. (SFS-EN 50160 2008)

Kuten huomataan, suurimmat sallitut jännitemuutokset ovat melko suuria, jotka varmasti aiheuttaisivat laitteisiin toimintahäiriöitä. Kuormanpudotuksessa olisi kuitenkin hyvä pyrkiä pitämään jännite ja taajuus standardin määrittämällä hyvällä vaihteluvälillä. Mutta kuten Elovaara ja Laiho (1988, s. 158) ovat todenneet, ei sähkötoimituksen laadun tarvitse olla mahdollisimman hyvää, koska se merkitsisi suurempia kustannuksia kuin asiakkaat ovat valmiita sähköstä maksamaan. Voidaan siis todeta hyvänä sääntönä, että kuormanpudotuksen tulisi kyetä tarjota jäljelle jääneille kuormituksille sellaista sähkön laatua, että laitteet pystyvät toimimaan samalla tavalla kuin ne toimivat normaalissa sähkön syöttötilanteessa.

2.7 Kuormien takaisinkytkeminen

Kun sähköjärjestelmän vika on poissa, kytketään vian aikana irrotettu kuormitus takaisin. Koska tässä työssä keskitytään enemmän kuormanpudotukseen, ei kuormituksen palautusta käsitellä kovinkaan paljon. Kuormituksen palauttamisesta on

kuitenkin hyvä tietää joitain periaatteita, koska se on oleellinen osa sähköverkon normaalin tilanteen palauttamista.

Kuormanpudotuksen algoritmit ovat paljon tärkeämpiä kuin kuorman palauttamisen, koska verkon stabiilius on suuremmissa vaarassa tuotantovajeen aikana. Tämän takia kuormanpalautuksessa ei yleensä käytetä automaattisia algoritmeja, vaan usein kuormitus palautetaan manuaalisesti vähän kerrallaan. Automaattisissa kuormanpalautuksen algoritmeissa on se vaara, ettei vika olekaan poistunut verkosta, vaikka esimerkiksi taajuus nousisikin normaaliksi. Jos kuormitusta kytketään liian aikaisin, on vaarana, että verkko menettää stabiiliutensa uudelleen. Tärkeää on siis tunnistaa, koska vika on oikeasti ohi ja koska kuormitusta voidaan palauttaa. (Harju 2011b)

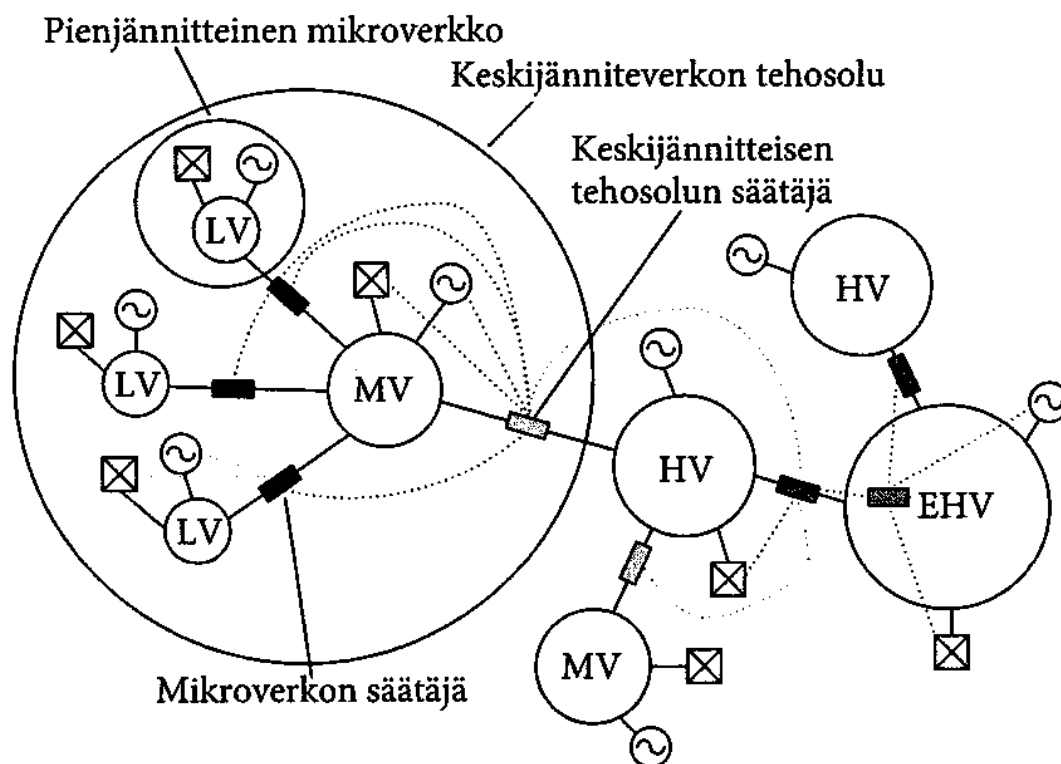
Kuormituksen palautuksesta on hyvä sopia ulkopuolisen verkonhaltijan kanssa. Ei välttämättä riitä, että ulkopuolisen verkon taajuus ja jännite ovat hyväksyttävällä tasolla. Itse kuormien takaisinkytkennässä voidaan käyttää erityistä automaattitahdistusta, koska irtikytkentäkatkaisija toimii usein myös tahdistuskatkaisijana. (Kainulainen 2001, s. 58)

2.8 Kuormanpudotuksen haasteet tulevaisuudessa

Koska tulevaisuuden sähköverkoissa on paljon haasteita, aiheuttaa se väkisinikin haasteita myös verkon stabiiliuden säilymiseen ja sitä kautta kuormanpudotuksen eri menetelmille. Tässä luvussa on tarkoitus hieman kertoa tulevaisuuden haasteista sähköverkoille, ja mitä ne tulevat todennäköisesti merkitsemään myös kuormanpudotuksen tarpeelle.

Ilmastonmuutos ja fossiilisten polttoaineiden liiallinen käyttö ovat suuri ongelma, jonka takia on tarve yleisesti parantaa energiatehokkuutta ja vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä merkittävästi. Tämä lisää haasteita tulevaisuuden sähköverkoille. Se että tavoitteisiin voidaan päästä, tarkoittaa, että paikoin jo hyvin vanhojen sähköverkkojen on muututtava melkoisesti. Haasteita verkoille aiheuttavat jatkuvasti lisääntyvä uusiutuvan energian käyttö sähkön tuotannossa sekä hajautettu tuotanto, joiden on määrä tuottaa tulevaisuudessa yhä suurempi osa kulutetusta sähköstä. Tulevaisuudessa siirtoverkkojen on kyettävä nykyistä suurempaan siirtotehoon maiden sisällä ja myös maiden välillä. Verkkoja on myös kyettävä käyttämään lähempänä niiden siirtokykyrajoja ilman, että suurhäiriöriski kasvaa. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 508–512)

Haasteita tulevaisuudessa luovat myös erilaiset älykkäät sähköverkot (smart grids) ja mikroverkot (microgrids), joiden tavoitteena on mahdollistaa verkon toiminta myös pienemmissä yhteisöissä, joissa oman hajautetun pientuotannon avulla tuotetaan sähkö alueen omaan tarpeeseen. Lisäksi yksittäiset pienasiakkaat voivat tulevaisuudessa liittää oman tuotantolaitoksensa esimerkiksi jakeluverkkoihin ja myydä ylimääräisen sähkön sähkölaitoksille. Tämä lisää reaaliaikaisen mittaustiedon tarvetta tehotasapainosta ja siihen reagointia nopeasti ja automaattisesti. Tulevaisuuden verkot pilkkovat nykyistä verkkoa pienempiin osiin eli saarekkeisiin, mikä vähentää generaattoreiden ja pyörivän reservin määrää tuotannossa. Kun generaattoreita on vähemmän ja/tai generaattoreiden yksikkökoot ovat pienempiä, on verkossa myös vähemmän generaattoreiden liike-energiaa pyörivissä massoissa ja sitä herkemmin verkko reagoi tuotannon ja kulutuksen välisiin epätasapainoihin taajuuden muuttumisena. Tulevaisuuden sähköverkon esimerkkirakennekuva on esitetty kuvassa 10. Tulevaisuuden sähköverkko voikin koostua useasta hajautetusta generaattorista ja alueesta, jotka voivat toimia myös itsenäisesti riippumatta toisistaan. Alueissa itsessään on säätäjät, jotka pitävät tehotasapainon esimerkiksi kuormanpudotuksen avulla. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 254 sekä 2011b, s. 509–513)



Kuva 10: Esimerkki tulevaisuuden sähköverkkojen rakenteesta. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 510)

Aikaisemmin sähköä on tuotettu yleisesti keskitetyissä ja suurissa voimalaitoksissa, mutta tulevaisuudessa yleisempi tuotantomuoto voi olla erilaiset hajautetut tuotantolaitokset, jotka mahdollistavat sähköntuotannon myös pienemmässä mittakaavassa. Hajautetun tuotannon tunnetuimpia tuotantomuotoja ovat aurinkoenergia ja tuulivoima. Aurinkoenergiaa tutkitaan tällä hetkellä hyvin paljon, mutta ongelmana on vielä aurinkokennojen huono hyötysuhde (yleisesti < 15 %). Esimerkiksi Suomessa aurinkoenergian hyödynnettävyys voi jäädä vähäisemmäksi pitkän pimeän ajan takia, jonka vuoksi aurinkoenergialla voitaisiin korvata vain muiden polttoaineiden käyttöä. Suurempi kehitys on tapahtunut tuulivoimassa, joiden määrät ovat kasvaneet voimakkaasti 1990-luvulta asti. Lisäksi EU:ssa on suuria tavoitteita lisätä uusiutuvan energian käyttöä tulevaisuudessa, mikä kasvattaa tuulivoiman tuotannon määrää jatkuvasti. Suomessa esimerkiksi uusiutuvan sähkön tuotantoa on rakennettava 2000 MW vuoteen 2020 mennessä. Tästä suurin osa on ehdotettu toteutettavaksi tuulivoimalla. Tuulivoimatuotannon ongelma on kuitenkin siinä, että tuotanto vaatii tuulta. Tuulivoiman tuotanto vaihtelee hyvin paljon (verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin) ja jos tuulivoimaa on paljon, on sitä varten varattava myös paljon reservejä. Ongelmana onkin, että sähköä on tuotettava kulutuksen tarpeeseen myös tuulettomina aikoina. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 39–43)

Kun hajautettu tuotanto ja erilaiset saarekekäytöt lisäävät verkon reagointia erilaisiin tuotannon ja kulutuksen tasapaino-ongelmiin, niin se lisää kuormanpudotuksen tarvetta sähköverkoissa. Kuormanpudotus on erityisen tärkeässä roolissa tulevaisuuden sähköverkojen kannalta, koska tuotannon ja kulutuksen välisen tehotasapainon on säilyttävä jatkuvasti, ja mitä nopeammin verkko reagoi tuotannon vaihteluihin, sitä nopeammin myös kulutuksen on muututtava. Mitä pienempiin verkon osiin ja saarekkeisiin mennään, sitä tärkeämpää on reagoida tuotantovajeisiin erittäin nopeasti irrottamalla kuormitusta tilapäisesti tarvittava määrä tasapainon säilyttämiseksi. Tällaisia tilanteita voi muodostua juuri jakeluverkkojen ja teollisuusjärjestelmien saarekekäytöissä, joissa kulutusta voidaan pitää yllä omalla tuotannolla (Wu et al 2010 ja Khaki & Kouhsari 2010). Ladhani ja Rosehart (2005) toteavat, että teollisuuslaitokset tulisi ottaa kuormanpudotuksen suunnitteluun mukaan, koska ne pystyvät yleensä hyvin osallistumaan kuormanpudotukseen ison kulutuksensa avulla. Asiakkaat ovat myös yhä vaativampia sähkön laadusta ja katkosten määristä, koska sähkökatkos voi aiheuttaa suuriakin rahallisia menetyksiä, joita voidaan vähentää kuormitusten priorisoinnilla ja kuormanpudotuksella. (Wangdee & Billinton 2004)

3 Kuormanpudotuksen ratkaisuja

3.1 Yleistä kuormanpudotuksen ratkaisuista

Tässä luvussa esitellään työssä tutkittuja kuormanpudotuksen hallintaan käytettyjä laitteistoja ja ratkaisuja sekä niiden osana käytettyjä kommunikointitapoja. Eri kommunikointitapoja ei ole tarkoitus esitellä kovin yksityiskohtaisesti, ainoastaan sillä tarkkuudella, että voidaan ymmärtää niiden merkitys juuri kuormanpudotuksen kannalta. Kommunikointiyhteyksien merkitys korostuu erityisesti nopeassa kuormanpudotuksessa ja laitteistojen laajennettavuudessa tulevaisuudessa.

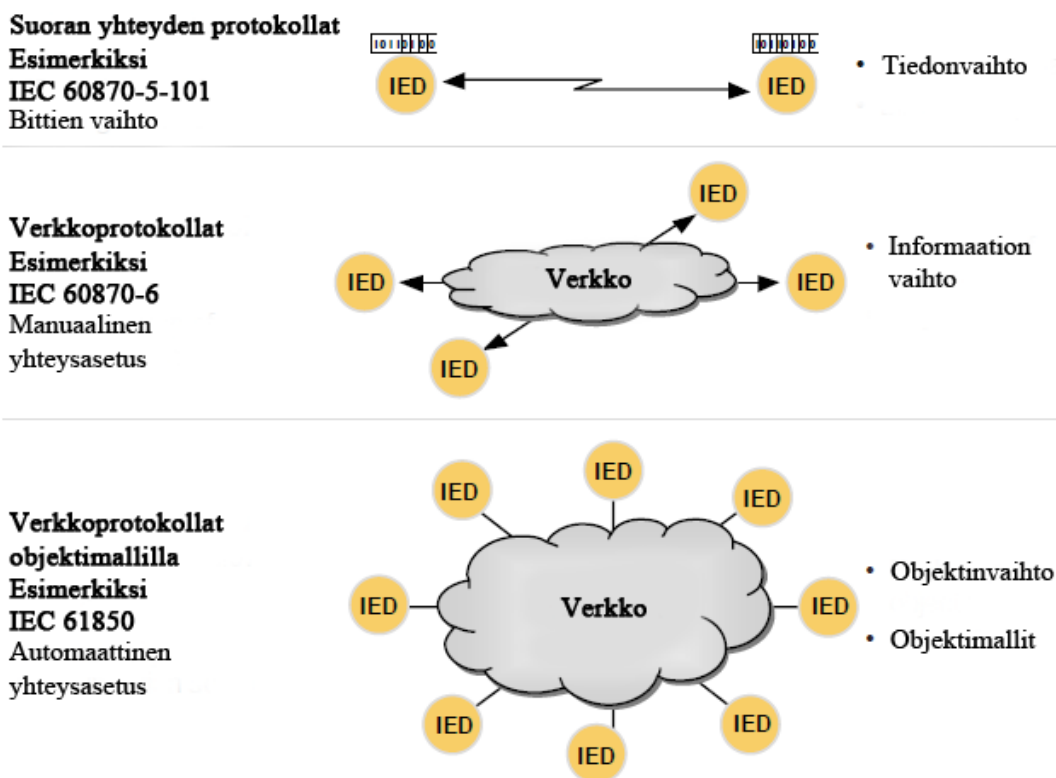
Laitteistoista on esitelty niiden yleinen käyttötarkoitus ja minkälaisia kuormanpudotuksen ratkaisuja niillä on tehty. Yleisimpiä kuormanpudotuksen toteutustapoja on havainnollistettu todellisilla toteutus esimerkeillä. Laitteistot ovat ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmien ja Prosessiteollisuuden yleisimmin käyttämiä ratkaisuja kuormanpudotuksessa. Lisäksi tutkimuksessa haluttiin tutkia uutta kuormanpudotuksen ohjainta, PML630:tä, jolla ei vielä ole toteutettu ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmissä yhtään projektia. Aiemmat käyttökokemukset perustuvatkin tässä luvussa vain laitteen esittelymateriaaleihin ja laitteen käyttöön paneudutaan tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

3.2 Toteutuksissa käytettyjä kommunikointitapoja

Kuormanpudotuksen eri ratkaisut vaativat aina erilaisia kommunikointitapoja sähköaseman eri komponenttien välillä. Kuormanpudotusta varten pitää saada verkon reaaliaikainen kuormitus tilanne selville käyttämällä erilaisia teho- ja taajuusmittauksia. Jos ohjaustoimintoihin on aihetta, katkaisijoiden ohjauskäskyt tulee voida toimittaa perille ongelmitta mahdollisimman nopeasti. Yhteys voi olla yksinkertaisimmillaan suoraan kytketty kuparikaapeli tai se voi olla jokin monimutkaisempi väyläyhteys.

Eri sähköasema-automaatiolaitteiden välisiä yhteystyyppejä on esitetty kuvassa 11. Yksinkertaisimmillaan kommunikoinnin voi siis hoitaa suoraan kahden laitteen välisenä kytkentänä, jolloin laitteiden välillä vaihdetaan bittejä. Eri väylätekniikoiden idea on, että kaikki laitteet kytkeytyvät yhteiseen verkkoon. Nämä tekniikat voidaan jakaa ryhmiin sen mukaan, luodaanko yhteys laitteiden välille manuaalisesti vai automaattisesti. Tällä hetkellä kehittynein kommunikointitapa sähköasema-automaatioon on IEC (International Electrotechnical Commission) 61850 -protokolla,

joka mahdollistaa automaattisen yhteydenmuodostuksen laitteiden kesken. (Baumann & Brand 2005)



Kuva 11: Eri kommunikointityypit sähköasema-automaatiolaitteiden välillä. (Baumann & Brand 2005) Kuva suomennettu.

Eri yhteystavoilla on erilaisia etuja ja haittoja, jotka tekevät niistä parempia yhteen tarkoitukseen ja huonompia toiseen. On huomioitava, että väyläratkaisut kommunikoinnissa lisäävät aina viivettä tiedonsiirtoon. Erityisesti sarjaliikenneväylät voivat lisätä merkittävää viivettä laitteiden väliseen ohjaukskäskyjen siirtymiseen, koska niissä käskyt toimitetaan perille yksi kerrallaan ja uusi käsky lähetetään vasta, kun edellisen lähetyksen kuittausviesti on tullut perille. Tämä taas hidastaa kuormanpudotuksen reagointia ongelmiin. Pahimmillaan viiveet ohjaukskäskyjen välillä sarjaliikenneväylässä voivat olla 1-2 s ja nopeimmillaan noin 100 ms. Järjestelmän täytyy myös ensin saada tieto verkon tuotanto-ongelmasta, ja sen siirtyminen vie saman ajan kuin ohjaukskäskyn. (Esala 2011 ja Forsman 2011) Uudemmissa kommunikointiväylissä, kuten IEC 61850:ssä, onkin pyritty nopeuttamaan tärkeiden viestien siirtymistä laitteelta toiselle.

ABB:n ratkaisut kuormanpudotukseen tukevat useita erilaisia kommunikointiprotokollia, joita ovat muun muassa LON, SPA, IEC 61850, IEC 60870-

5-101 ja IEC 60870-5-103/104. Seuraavissa luvuissa esitellään tarkemmin IEC 61850, joka edustaa nykyaikaista väyläratkaisua, ja sen osana käytetty OPC-standardi, eli OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control, sekä suora kytkentä, jolloin ei käytetä minkäänlaista väyläprotokollaa. Näiden eri yhteystapojen tunteminen auttaa ymmärtämään, mitä rajoituksia ne tuovat kuormanpudotuksen eri ratkaisuille ja mikä voisi olla paras yhteystapa jokaiseen tilanteeseen.

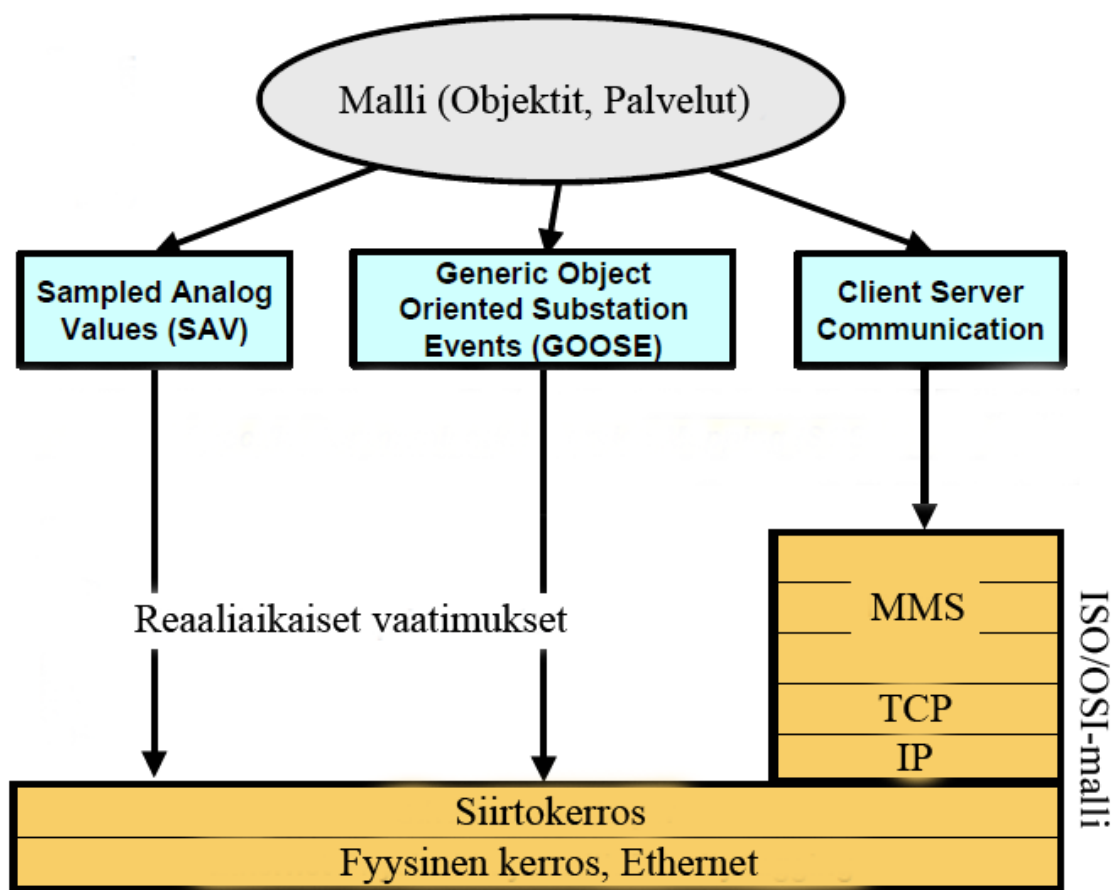
3.2.1 IEC 61850

IEC 61850 -standardi sähköasema-automaation kommunikoinnista on ensimmäinen kansainvälisesti hyväksytty standardi, joka kattaa kaikki sähköasema-automaation kommunikointitavat aivan aseman hallintatasolle asti. Standardin on julkaissut International Electrotechnical Commission (IEC) vuosina 2003–2005. Aiemmin ongelmana olivat valmistajien käyttämät erilaiset kommunikointitavat, mikä teki eri tuotteiden yhdistämisestä vaikeaa. Myös sähköasema-automaation jatkuvasti kasvava monimutkaisuus ja tarkemman tiedon tarve loivat haasteita valmistajille. IEC 61850 -standardissa on keskitytty siihen, että sähköasema-automaatiolaitteiden kommunikoinnissa olisi käytössä yksi yhteinen datamalli, jota kaikki valmistajat voisivat noudattaa, jolloin eri valmistajien tuotteita voitaisiin yhdistää keskenään helpommin. Yhteinen kommunikointistandardi mahdollistaa myös tulevaisuudessa paremman laitteistojen ylläpidon ilman suuria koko asemaa koskevia kommunikointiyhteyksien päivityksiä. (Baumann & Brand 2005)

IEC 61850 -standardin etu on, että se käyttää kommunikoinnissa tavallista Ethernet-tietoliikenneyhteyttä, mikä mahdollistaa tavallisten Ethernet-laitteiden, esimerkiksi kytkimien, käyttämisen yhteyden muodostamiseen. Nykyään eniten varoja käytetään tietoliikenneyhteyksien kehittämisessä juuri Ethernet-tekniikkaan. Ethernet-tekniikan nopeus voi olla huomattava: esimerkiksi LON-väylä mahdollistaa enintään 1,25 Mb/s nopeuden, mutta IEC 61850 -yhteydellä nopeus voi olla jopa 10 Gb/s. IEC 61850 -protokolla perustuu yhteiseen verkkoon, johon jokainen aseman laite kytketään verkkokaapelilla. Tämä vähentää kaapeleiden määrää IED:ien (Intelligent Electronic Device) välillä, koska kaikki liikenne voidaan siirtää yhtä verkkokaapelia pitkin, eikä yksittäisiä suoria kytkentöjä tarvita. Yksi yhteinen verkko myös helpottaa tulevaisuuden muutoksia asemalla. IEC 61850 -protokolla pitää huolen siirrettävän tiedon laadusta ja oikeellisuudesta. Ethernet-pohjaisen tietoliikenteen mahdollistaa ISO/OSI-malliin (International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection model)

perustuva tietoliikennepaketin rakenne, joten mikä tahansa Ethernet-laite osaa käsitellä liikennettä. (ABB 2011e ja Brand 2004)

IEC 61850 tarjoaa sähköasema-automaatioon kolme erilaista kommunikointitapaa: SAV:n (Sampled Analog Values), GOOSE:n (Generic Object Oriented Substation Events) ja MMS:n (Manufacturing Message Specification). Protokollan käyttämä datamalli sisältää kaiken sähköasema-automaatiolaitteiden tarvitseman tiedon, eli sekä ohjaus- ja suojaustoiminnot, että IED:ien ja kytkinkentän asettelutiedot. Kuvassa 12 on esitetty IEC 61850 -protokollan eri kommunikointitapojen sijoittuminen ISO/OSI-mallin 7-kerroksiseen viitemalliin. (Brand 2004)



Kuva 12: IEC 61850 -protokollan eri kommunikointitavat ja ISO/OSI-malli. (Brand 2004) Kuva suomennettu ja yksinkertaistettu.

Kuvasta 12 voidaan havaita, että GOOSE- ja SAV-pakettien käsittely tapahtuu ISO/OSI-mallin kahdessa alimmassa kerroksessa, joita ovat fyysinen kerros ja siirtokerros. Esimerkiksi GOOSE:a käytetään juuri IED-laitteiden väliseen horisontaaliseen eli suoraan liikenteeseen. GOOSE-pakettien ei tarvitse kiertää minkäänlaisen pääjärjestelmän kautta kuten muissa isäntä-orja-tyyppisissä yhteyksissä,

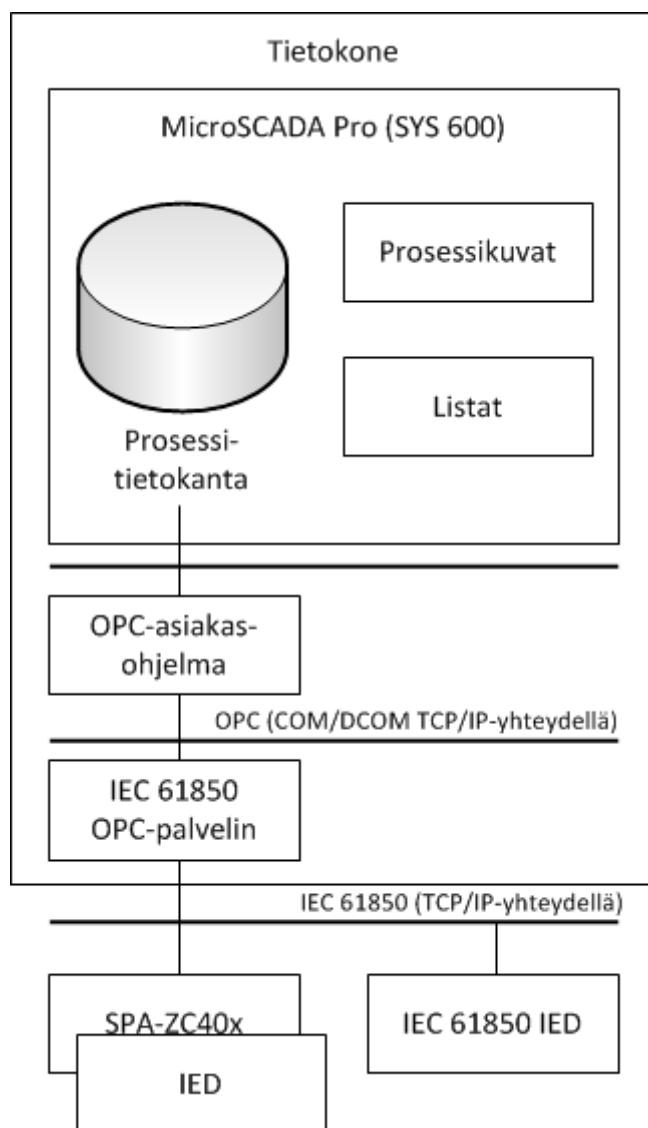
vaan ne voidaan toimittaa suoraan toiselle IED:lle. Tämän takia viestit voidaan välittää nopeasti laitteelta toiselle, eikä toimenpide näin vie muiden laitteiden resursseja ja aikaa. GOOSE:n avulla voidaan siirtää esimerkiksi ohjauskäskyjä ja mittaustietoja suoraan toiselle IED:lle, ja se mahdollistaa laitteiden nopean reagoinnin, mikä on tarpeen nopeassa kuormanpudotuksessa. GOOSE-pakettien nopeudesta on todettu, että paketit voidaan siirtää jopa 4 ms:n nopeudella, joka voi olla jopa nopeampi kuin tavallisen suoraan kytketyn kaapeliyhteyden nopeus (ABB 2011b ja 2011e). MMS-kommunikoinnin käsittely tapahtuu ISO/OSI-mallin kaikissa seitsemässä kerroksessa ja sitä käytetään keskusteluun kaukokäyttöjärjestelmän tai jonkin muun ohjausjärjestelmän ja IED:n välillä. MMS-paketit eivät ole yhtä nopeita kuin GOOSE-paketit. (Brand 2004)

3.2.2 OPC

OPC on OPC Foundation -järjestön kehittämä avoin yhteysstandardi teollisuusautomaatiolle ja sitä tukeville ohjelmistoille. Standardia käytetään useimmiten PC-valvomoiden ja ohjelmitavien logiikkalaitteiden, mm. PLC:n (Programmable Logic Controller) ja IED:n, yhdistämiseen. Standardi tarjoaa valmistajille yhteisen tavan, jolla ohjelmien tulisi muodostaa yhteys eri IED- ja PLC-laitteisiin. Alun perin OPC perustui Microsoftin kehittämiin OLE COM (Object Linking and Embedding Component Object Model) ja DCOM (Distributed Component Object Model) tekniikoihin. Valmistajat ovat kehitelleet satoja OPC-palvelimia ja -asiakasohjelmia. OPC Foundation -järjestön uudet määrittelyt perustuvat nykyään muun muassa XML-(eXtensible Markup Language) ja SOAP-tekniikoihin (Simple Object Access Protocol), eikä riippuvuutta ole enää Microsoftiin. Nykyään OPC tarkoittaaakin Open Connectivity via Open Standardsia. (ABB 2011g ja OPC Foundation 2011)

ABB Oy:ssä OPC:ta käytetään muun muassa kaukokäyttöjärjestelmän ja IEC 61850 -laitteiden välisessä kommunikoinnissa. Tällöin OPC-palvelin hoitaa IEC 61850 -liikenteen ja se voi olla käytössä esimerkiksi joko COM 600- tai MicroSCADA Pro (SYS 600) -ohjelmassa. Lisäksi yhteys vaatii OPC-asiakasohjelman, jolla OPC-palvelimessa määritellyt IEC 61850 -laitteiden pisteet linkitetään kaukokäyttöjärjestelmän tietokannan pisteisiin. Kuvassa 13 on esitetty kaavio OPC:n käytöstä IEC 61850 -liikenteessä. Kuvasta nähdään, että alhaalta ylöspäin mentäessä IED-laitteet keskustelevat OPC-palvelimen kanssa ja se välittää tiedot OPC-asiakasohjelmalle. OPC-asiakasohjelma on yhteydessä kaukokäyttöjärjestelmän

tietokantaan, josta tiedot välittyvät näytölle esimerkiksi prosessikuviin ja erilaisiin tapahtuma- ja hälytyslistoihin. (ABB 2010d ja 2010e)



Kuva 13: OPC-palvelin ja -asiakasohjelma kaukokäyttäjärjestelmän ja IED:iden välisessä IEC 61850 -liikenteessä. (ABB 2010e) Kuva piirretty uudelleen yksinkertaisempana ja suomennettu.

Muun muassa MicroSCADA Prossa oleva OPC-palvelin on täysin sulautettu MicroSCADAan, jolloin se käynnistyy ja sammuu yhdessä MicroSCADAn kanssa automaattisesti. Kaikki MicroSCADAn tietokantapisteet voidaan tuoda OPC-palvelimelle OPC-pisteinä ja kaikkia OPC-pisteitä voidaan käsitellä MicroSCADAssa SCIL-ohjelmointikielellä (Supervisory and Control Implementation Language). Tämä mahdollistaa OPC-pisteiden täydellisen sulautuvuuden MicroSCADAan. (ABB 2010f)

AC800-laitteet voivat käyttää OPC:tä myös, kun ne kytketään esimerkiksi ulkoiseen kaukokäyttäjärjestelmään. Tällaisia järjestelmiä voivat olla teollisuusasiakkaiden omat sähköjärjestelmän kaukokäyttöohjelmistot, jotka voivat olla jopa toisen valmistajan

tuotteita. Tässäkin tapauksessa AC800 on mahdollista ottaa käyttöön toisen valmistajan järjestelmässä, koska yhteinen OPC-standardi mahdollistaa sen toimivuuden. (Shumaker 2004)

3.2.3 Suora kytkentä

Suoralla kytkennällä (engl. Hardwired I/Os) tarkoitetaan, että kuormanpudotuksen ohjelmat antavat toimenpidekäskyt suoraan sähköjärjestelmän kytkinlaitteille käyttäen laitteen omia ulos- ja sisääntulokanavia. Ulostulokanavat ovat yleensä kosketinlähtöjä, jotka joko sulkeutuvat tai avautuvat, kun ne aktivoidaan. Sisääntulokanava aktivoituu, kun kanavaan syötettävä jännite ylittää kanavalle asetetun jännitteen alarajan. Suoraa kytkentää käytettäessä kuormanpudotuksen laitteessa tulee olla aina yhtä ohjattavaa kytkinlaitetta kohtaan oma ohjauslähtönsä. Tämä säästää käskyn siirtoon kuluvaan aikaan merkittävästi, koska välissä ei ole väylätekniikoita, jotka aiheuttavat tiedonsiirtoon viivettä. Käytännössä ainoa viive syntyy sähköpulssein siirtymisestä johtimessa. Suora kytkentä tuleekin kysymykseen nopeassa kuormanpudotuksessa, jossa on ehdottoman tärkeää, että katkaisijoiden avauskäskyt siirtyvät katkaisijoille mahdollisimman pienellä viiveellä. Jos kuormanpudotuksen laitteiston ja katkaisijan välissä olisi hidas väyläyhteys, ei avauskäskyä saataisi toimitettua riittävän nopeasti ja sähköjärjestelmä voisi romahtaa. Samalla tavalla kuin ohjauksessa, vähentää suoran kytkennän käyttäminen myös teho-, jännite- ja taajuusmittausten viivettä, jolloin laitteisto pystyy reagoimaan nopeammin verkon tuotantovajeeseen. (Harju 2011b)

Tässä työssä tutkittavista kuormanpudotuksen laitteistoista suoran kytkennän toteutuksia voidaan tehdä RTU:lla ja AC800:lla. Nämä laitteet ovat ohjaus- ja havainnointiyksiköitä, joihin voidaan kytkeä yleensä haluttu määrä ulos- ja sisääntuloja. Molemmissa laitteissa on ohjelmoitava logiikka, jolla kuormanpudotuksen toiminnot on tehty. Näin ne voivat antaa suoraan ohjauskäskyt halutuille katkaisijoille ilman väyläkommunikointiyhteyksiä. (ABB 2010c ja Peltoniemi 2011)

Suorat ohjaukset eivät onnistu MicroSCADalla ja PML630:llä. PML630:llä olisi periaatteessa mahdollista toteuttaa suoria ohjauksia ja mittausten sisääntuloja, mutta vielä versiossa 1.1 tämä ei ole ohjelmiston kannalta mahdollista (ABB 2011b). PML630:stä on tulossa versio 1.2, jossa on mahdollista antaa avauskäskyjä myös suoraan laitteen ulostuloista (Kulathu 2011).

Vaikka yleisesti ajatellaan, että suora kytkentä on nopea ja erilaiset väyläyhteydet hitaita, voi tähänkin tulla tulevaisuudessa muutos. IEC 61850 -protokollan GOOSE-viestien on väitetty kykenevän jopa 4 ms:n vasteaikaan, joka voisi olla jopa nopeampi kuin suoraan kytkettyjen ohjausten vasteaika. Suoran kytkennän ongelma on kuitenkin se, että jokaiselle kytkinlaitteelle tarvitaan oma ohjauskaapeli, mikä lisää erilaisten kaapeleiden määrää sähköasemalla. Väyläratkaisut voivat säästää yksittäisten kaapeleiden määrää ja helpottaa tulevaisuuden laajennuksien toteuttamista. (ABB 2011b ja 2011e)

3.3 MicroSCADA

3.3.1 Ohjelman yleisesittely



Kuva 14: MicroSCADA Pro. (ABB 2006)

MicroSCADA on ABB:n kehittämä SCADA-kaukokäyttöjärjestelmä (Supervisory Control And Data Acquisition), joka on suunniteltu pääasiassa sähköasema-automaatioon ja sähkönjakelun hallintajärjestelmiin. MicroSCADA on ohjaus- ja monitorointijärjestelmä, joka toimii Microsoft Windows -käyttöjärjestelmässä. (ABB 2005a)

MicroSCADAn kehitys alkoi vuonna 1981. Järjestelmän nimi oli alun perin SCS, Strömberg Control System, koska se kehitettiin ABB:n edeltäjä Strömberg Oy:ssä. SCS muutettiin MicroSCADaksi vuonna 1989. MicroSCADA oli ensimmäinen

ohjausjärjestelmä, joka käytti ikkunointia ja hiiritekniikkaa ja korvasi vanhat näyttötaulut. SCS:ään kehitettiin oma ohjelmointikieli SCIL, Stömberg Control Implementation Language, joka muutettiin MicroSCADAn myötä nimeksi Supervisory and Control Implementation Language. SCIL:llä voidaan ohjelmoida haluttuja toiminnallisuuksia järjestelmään, lukea järjestelmään liitettyjen laitteiden antamia tietoja, kuten mittaustietoja, ja antaa erilaisia ohjaustoimenpiteitä. SCIL-koodi on mahdollista suorittaa automaattisesti tietyn aikajakson välein tai jonkin ehdon täytyessä, esimerkiksi kun jollekin mittaukselle asetettu raja-arvo ylitetään. Myös kuormanpudotuksen toiminnallisuudet on toteutettu SCIL-koodilla MicroSCADAssa. SCIL-ohjelma kysyy järjestelmään kytkettyjen laitteiden, generaattoreiden, muuntajien ja kuormien tehoja ja jos kulutusta on liikaa, irrotetaan ennalta määrätyn prioriteetin mukaan kuormitusta tarvittava määrä. (ABB 2005b ja Harju 2011b)

ABB:n uusin pääversio MicroSCADAsta on 9. Version 9.0 myötä siirryttiin täysgraafiseen käyttöliittymään, jolloin MicroSCADA-nimeen lisättiin myös sana ”Pro”. Aikaisemmat versiot tunnettiin pelkällä MicroSCADA-nimellä. Lisäksi versiossa 9.0 tuli tuki IEC 61850 -protokollalle. MicroSCADA Pro -tuoteperheeseen kuuluu paikalliskäyttöjärjestelmä SYS 600 ja sähkönjakelun hallintajärjestelmä DMS 600. Uusin versio tällä hetkellä MicroSCADA Prosta on 9.3, joka julkaistiin vuoden 2010 keväällä ja sisälsi parannetun järjestelmän itsevalvonnan (engl. System Self Supervision, SSS). Vuoden 2011 alussa julkaistiin version 9.3 FP1-päivityspaketti (Feature Pack 1), joka sisälsi parannetun kiskoväriytyksen. Parannettu kiskoväriytys värittää kiskot oikean kytkentätilanteen mukaan, eli sen mukaan, onko kiskossa jännite vai ei. Kiskoväriytystä voidaan käyttää hyödyksi myös SCIL-koodissa. (ABB 2005a, 2010a ja 2011f)

3.3.2 Ohjelman hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa

MicroSCADAn suurin hyöty kuormanpudotuksessa on sen laajennettavuus ja tietokoneen suorittimen laskentateho, joka ei lopu helposti raskaammisakaan kuormanpudotuksen toteutuksissa. Ohjelmaan voidaan kytkeä periaatteessa rajaton määrä suojareleitä, RTU:ita ja muita ohjauslaitteita, koska ohjelman tietokanta ei rajoita niiden määrää. MicroSCADAlla tehdyt kuormanpudotuksen sovellukset eivät siis aseta rajoituksia kuormien tai generaattoreiden määrille. SCIL-ohjelmointikieli antaa mahdollisuuden luoda periaatteessa minkälaisia toimintoja tahansa kuormanpudotukseen, ja koska koodin suoritus tapahtuu tietokoneen prosessorissa, ei

sen laskentatehon loppumisesta yleensä ole vaaraa verrattuna esimerkiksi PLC-laitteisiin. MicroSCADA tukee myös monia eri tietoliikenneprotokollia, jolloin kuormanpudotukseen käytettävät laitteet voivat käyttää eri protokollia tai olla jopa eri valmistajilta. Kuormanpudotuksen toteutuksiin on mahdollista myös ohjelmoida automaattinen takaisinkytkentä samalla vaivalla kuin kuormanpudotuskin. (Esala 2011)

Ohjelman suurimmat heikkoudet ja rajoitukset kuormanpudotuksessa syntyvät juuri kommunikointiprotokollista, MicroSCADAn ohjelmakoodeista ja erityisesti niiden suorituskykleistä. MicroSCADAan ei ole mahdollista kytkeä omia ulos- ja sisääntulokanavia, joten kuormanpudotuksen toteutuksissa pitää aina käyttää jotain kommunikointiväylää. Kommunikaatiöväylien viiveiden takia MicroSCADalla toteutettu kuormanpudotus soveltuukin huonosti nopeaan kuormanpudotukseen, jossa halutaan saada lähes katkeamaton sähkönsyöttö tärkeille kuormille. (Esala 2011)

Kommunikointiprotokollat aiheuttavat aina tiedon siirtymisen viivettä, joka voi pahimmillaan olla jopa 1-2 s. Nopeimmillaankin yleisimpien kommunikointiväylien nopeus on saatu vain noin 100 ms:iin. Kun näihin viiveisiin lisätään vielä MicroSCADAn ohjelmakoodin suorituskykli, joka on minimissään 1 s, on nopean kuormanpudotuksen toteuttaminen erittäin hankalaa. Hyvin optimoidussa järjestelmässä suoja-rele lähettää verkon alentuneesta taajuudesta mittaustiedon, jolla kestää noin 100–200 ms siirtyä MicroSCADAan. Riippuen ohjelmakoodin suorituskyklin ajoittumisesta voidaan koodi suorittaa hyvinkin nopeasti mittaustiedon päivittymisen jälkeen, mutta pahimmillaan vasta 1 s päästä. Itse ohjelmakoodi voidaan suorittaa hyvinkin nopeasti tietokoneen suurella laskentateholla ja lähettää avauskäsky katkaisijalle. Avauskäskyn siirtyminen väylässä kestää 100–200 ms. Useassa sarjaliikenneprotokollassa (esimerkiksi IEC 60870-5-101 ja -103) on vielä ominaisuus, että seuraava ohjauskäsky lähetetään vasta kun edellisen käskyn kuittausviesti on tullut takaisin. Tämä aiheuttaa lisää viivettä (hyvin optimoidussa liikenteessäkin 200–400 ms) järjestelmässä, jossa on useita avattavia katkaisijoita tuotannon ongelmatilanteessa. (Esala 2011)

Vaikka SCIL-ohjelmointikielen ja sähköjärjestelmän komponenttien sallimaa vapautta voidaan pitää suurena etuna, aiheuttaa se kuitenkin paljon työtä toteutuksessa. MicroSCADAan ei ole toteutettu valmiita kuormanpudotuksen kirjastokomponentteja, jotka olisi helppo ottaa käyttöön erilaisia tilanteita varten. Sen sijaan kaikki toiminnallisuus pitää ohjelmoida yleensä alusta alkaen ja jokaista projektia varten

erikseen. Toki valmiita projekteja voidaan käyttää apuna joissain tilanteissa. (Esala 2011)

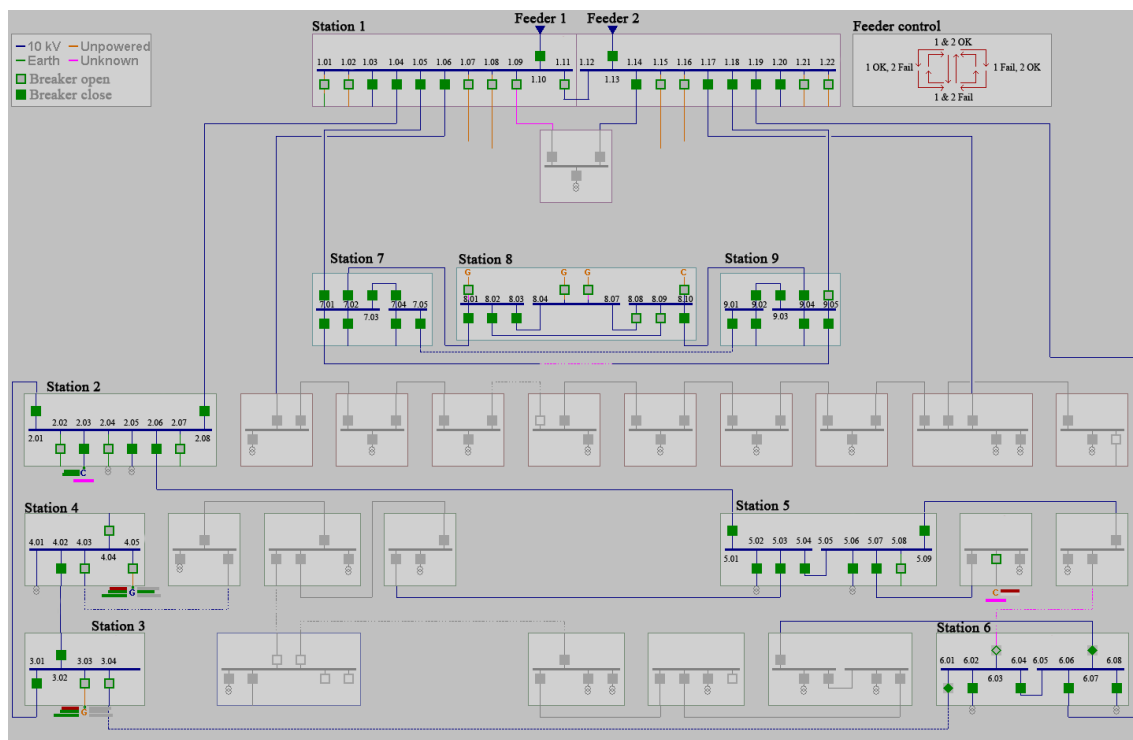
3.3.3 Kuormanpudotuksen toteutukset

Tavallisimmat kuormanpudotuksen sovellukset MicroSCADAlle on tehty sähköjärjestelmiin, joissa riittää hitaampi kuormanpudotus. Tällöin asiakkaalle ei ole tärkeää katkeamaton sähkönsyöttö tai järjestelmään liittyy esimerkiksi varmennettuja sähkönsyöttöjä (engl. Uninterruptible Power Supply, UPS), jotka takaavat katkeamattoman sähkönsyötön tärkeille kuormille kunnes ne saadaan kytkettyä takaisin verkkoon. (Esala 2011)

Monessa tapauksessa asiakkaan puolelta on jo valmiit ohjeet, mitä kuormituksia kytketään pois ongelmatilanteissa. MicroSCADAlla ei siis ole ollut tarvetta toteuttaa tarkempaa logiikkaa kuormanpudotukseen, vaan kuormanpudotus toteutetaan asiakkaan ohjeiden mukaan. Koska MicroSCADA reagoi hitaasti verkon tuotanto-ongelmiin, yleisin toteutusmalli on, että suojeleille asetellaan taajuus- tai jänniteraja, joka aktivoituessaan avaa siihen liitetyn katkaisijan. Näin pystytään suojelemaan järjestelmän muita generaattoreita ja syöttöjä, etteivät ne pääse tippumaan verkosta liiallisen kuormituksen takia. Kun kaikki kuormat on ensin tiputettu nopeasti verkosta pois, aletaan MicroSCADAlla kytkeä kuormituksia takaisin muuhun tuotantoon asiakkaan laatimien prioriteettien ja ohjeiden mukaan. Joissain tapauksissa on myös mahdollista, että MicroSCADA mittaa varatuotannon kuormitusta ja kytkee vain sen verran kuormitusta takaisin kuin varatuotanto sallii. (Esala 2011)

Kuvassa 15 on esitetty esimerkki MicroSCADAlla toteutetusta kuormanpudotuksen sovelluksesta lentokentälle. Kuva sähköjärjestelmästä on esitetty myös liitteen B kuvassa B.1 suurempana, jotta asemien ja kennojen tunnistet erottuvat. Harmaalla olevia asemia ei ole liitetty MicroSCADAan, vaan niitä varten on oma hallintajärjestelmänsä ja ne eivät osallistu kuormanpudotukseen. Tässä tapauksessa järjestelmässä on olemassa kaksi rinnakkaista pääsähkönsyöttöä asemalle 1 (kennoihin 1.10 ja 1.13) ja ne syöttävät normaalissa tilanteessa kumpikin omaa osaansa lentokentän sähköjärjestelmistä. Lisäksi asemilla on generaattoreita sähkönsyötön varmistamiseksi ongelmatilanteissa, mutta ne kykenevät syöttämään sähköä vain osaan kuormista. Molemmat pääsyötöt ovat riittävän vahvoja syöttämään koko lentokentän tarvitseman sähköä, mutta niitä ei saa kytkeä rinnakkain kiinni, koska tällöin oikosulkuvirrat olisivat liian suuria. Normaalissa tilanteessa aseman 1 kiskot onkin erotettu toisistaan

kiskokatkaisijalla, ja syöttö 1 syöttää numeroiduista asemista kaikkia muita paitsi asemaa 6, jota syöttää syöttö 2. Järjestely johtuu siitä, että aseman 6 kuormitus on suurempi kuin muiden asemien. (Esala 2011)



Kuva 15: Kuormanpudotuksen toteutus esimerkki MicroSCADAlla. Isompi kuva on esitetty liitteen B kuvassa B.1. (Esala 2011) Kuvan tekstit muutettu, ettei alkuperäistä asiakasta pysty tunnistamaan.

Kuormanpudotus on jaettu syöttöongelmien osalta kolmeen pätilanteeseen. Ensimmäisessä kahdessa tilanteessa jompikumpi syötöistä katkeaa ja kolmannessa molemmat syötöt katkeavat. Lisäksi huomioon on otettu erilaisia generaattoriongelmaa sen varalta, että jonkin aseman generaattori ei käynnistyäkään. Näihin kaikkiin mahdollisuuksiin on tullut asiakkaalta toimintamalli, jonka mukaan kuormien kytkennät tehdään. Perustoimintamalli on, että jos jompikumpi syötöistä tai molemmat syötöt menetetään, avataan automaattisesti kaikkien kuormien katkaisijat, joita vioittunut syöttö syötti. Tämän jälkeen MicroSCADA alkaa annettujen toimintaohjeiden mukaan ohjata katkaisijoita taas kiinni. Jos vain yksi syöttö katkesi, siirretään kaikki kuormitus toiselle syötölle ja jos molemmat syötöt menetettiin, kytketään generaattoreille vain kaikista tärkeimmät kuormat, joita generaattorit pystyvät ylläpitämään asemakohtaisesti. Järjestelmässä ei ole toteutettu automaattista kuormien takaisinkytkentää, vaan operaattori hoitaa sen. (Esala 2011)

MicroSCADA valittiin projektin toteutukseen, koska järjestelmään oli alun perinkin tarve kytkeä kaukokäyttöjärjestelmä ja sen vuoksi myös kuormanpudotus oli luonnollista toteuttaa sillä. Asiakas oli määrittänyt projektin alussa, kuinka nopeaa kuormanpudotusta halutaan ja asiakkaan toive oli, että kuormat saataisiin palautettua muutamien minuuttien kuluttua ongelman syntymisestä. Aikaraja riitti hyvin MicroSCADAlle, minkä takia ei ollut tarvetta investoida ja kuluttaa aikaa muuhun nopeampaan kuormanpudotukseen. Tulevaisuudessa lentokentän muutkin asemat aiotaan liittää osaksi MicroSCADAA, jolloin ne voivat osallistua myös kuormanpudotukseen. MicroSCADAan on tulevaisuudessa helppo liittää loputkin asemat, koska sen laajennettavuus on hyvä. (Esala 2011)

3.4 RTU

3.4.1 Laitteen yleisesittely



Kuva 16: RTU560 hyllyasennukseen. (ABB 2010b)

ABB:n RTU on prosessorilla varustettu ohjaus- ja valvontayksikkö, joka mahdollistaa sähköjärjestelmään kytkettyjen laitteiden ohjauksen suorittamisen sekä asentojen ja mittausten valvonnan. Laite voidaan kytkeä kaukokäyttöjärjestelmään, esimerkiksi MicroSCADAan. Tällöin kaukokäyttöjärjestelmään saadaan liitettyä RTU:hun kytketyt mittaukset, eri komponenttien asentotiedot ja lisäksi kaukokäyttöjärjestelmästä voidaan hallita sähköjärjestelmän komponentteja, esimerkiksi katkaisijoita ja erottimia. RTU on varustettu myös Web-käyttöliittymällä, jolloin tärkeimpien tietojen valvonta voidaan tehdä myös sillä. (ABB 2010c)

RTU:n tuoteperheeseen ABB:llä kuuluu yleisimmin käytetyt RTU560 ja RTU211. Jokaiseen yksikköön on mahdollista asentaa haluttu määrä ulos- ja sisääntulokanavia. Kanavat voivat olla joko digitaalisia tai analogisia. Lisäksi RTU voi toimia pää-RTU:na, jonka hallintaan voidaan kytkeä erillisiä ala-RTU:ita. Tällöin kommunikointi

RTU:ien välillä hoidetaan erillisillä kommunikointiväylillä. RTU:n asennustapoja löytyy useille eri kiinnitystavoille, joita ovat esimerkiksi erilaiset ja eri kokoiset hylly- sekä DIN-kiskoasennukset. Ideana ABB:n RTU-tuoteperheessä on, että yksi järjestelmä sopii moniin eri toteutuksiin. Yleisimmät toteutukset ovat sähkönsiirrossa, -jakelussa, älykkäissä sähköverkoissa ja syöttöautomaatioissa. Lisäksi toteutuksia on tehty esimerkiksi erilaisten rakennusten sähkönsyötön ohjaamiseen. (ABB 2010c ja Forsman 2011)

ABB:n RTU:t tukevat lukuisia eri kommunikointiprotokollia, minkä takia ne sopivat erinomaisesti erillisiksi yhdysväyläyksiköiksi yhdistämään eri väyliä keskenään. Lisäksi liikennöintiin voidaan käyttää erilaisia langattomia tiedonsiirtoyksiköitä, esimerkiksi radiota, GPRS:ää (General Packet Radio Service) tai UMTS:ää (Universal Mobile Telecommunications System). Hyvä yhteensopivuus eri kommunikointiväylien kanssa takaa RTU:n hyvän sopivuuden sähkönjakelun eri tarpeisiin. Eräs esimerkkisijoituspaikka voisi olla muun muassa pylväserottimissa, koska näissä toteutuksissa ohjauskäskyt annetaan yleensä langattomasti. IEC 61850 -protokollasta RTU tukee myös GOOSE-kommunikointia, joka mahdollistaa RTU:n toimimisen myös kenttälaitteena, koska se voi vaihtaa tietoa muiden IEC 61850 -laitteiden kanssa. Ominaisuus julkaistiin vuonna 2009. Tätä ennen RTU:ta oli mahdollista käyttää vain pää-RTU:na, joka ohjasi siihen kytkettyjä laitteita ylhäältäpäin IEC 61850 -protokollalla, eikä pystynyt horisontaaliseen GOOSE-liikenteeseen laitteiden välillä. IEC 61850 -pisteiden määrittely tapahtuu käyttäen erillistä RTUutil61850-ohjelmistoa. Muut käyttöönnoton asetelut PLC-ohjelmointia lukuun ottamatta voidaan tehdä käyttäen RTUutil560-ohjelmistoa. Ohjelmalla voidaan määrittää laitteeseen kytketyt yksiköt, datapisteet ja asettaa niiden osoitteet kaukokäyttöjärjestelmään. RTUutil560-ohjelmalla voidaan hallita sekä RTU 560 että RTU 211 -laitteita. PLC-ohjelmointiin käytetään Multiprog-ohjelmaa. (ABB 2010c ja Forsman 2011)

ABB:n RTU on luotettava, koska lähes jokaisen komponentin voi kahdentaa laitteessa. RTU:hun voidaan lisätä esimerkiksi toinen virransyöttö- tai tietoliikenneyksikkö. On monia vaihtoehtoja, joista jokaiseen tarkoitukseen löytyy oikea toteutus. Luotettavuuden kannalta tärkeää on se, että tapahtumat tulevat oikeilla aikaleimoilla kaukokäyttöjärjestelmään. RTU voi synkronoida sisäisen kellonsa useista eri lähteistä. Näitä lähteitä voivat olla esimerkiksi GPS-kello (Global Positioning System), erillinen

SNTP-palvelin (Simple Network Time Protocol) tai kaukokäyttöjärjestelmä. Tapahtumien tarkkuudeksi saadaan näin ollen parhaimmillaan jopa 1 ms. (ABB 2010c)

RTU:n ohjelmoitava logiikka (engl. Programmable Logic Controller, PLC) mahdollistaa omien toimintojen suorittamisen jo RTU:ssa, eikä vasta esimerkiksi MicroSCADAssa. Tätä mahdollisuutta on käytetty muun muassa kuormanpudotuksen toimintojen ohjelmoimisessa. Toimintaviiveet pienenevät merkittävästi, kun ohjaukset voidaan antaa suoraan jo RTU:lta, eikä niitä tarvitse kierrättää esimerkiksi MicroSCADAn kautta. (ABB 2010c ja Harju 2011b)

3.4.2 Laitteen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa

RTU:n ehdoton hyöty kuormanpudotuksessa on laitteen monipuolisuus ja laajennettavuus. RTU tukee monia eri kommunikointiprotokollia, mikä mahdollistaa sen käytön monien eri laitteiden kanssa. Laitteet voivat olla niin uusia kuin vanhojakin ABB:n tai kokonaan toisen valmistajan valmistamia suojarkeitä, joilta RTU voi saada tietoja ja lähettää ohjauksia niille. Muiden valmistajien laitteiden käytöstä on kuitenkin hyvä huomioida, että vaikka laite tukisi jotain samaa kommunikointiprotokollaa kuin RTU, ei niiden yhdistäminen välttämättä onnistu. Tämä johtuu eri kommunikointiprotokollien standardien heikkouksista, jotka mahdollistavat erilaisen yhteydenmuodostustavan tai tietoliikennepaketin rakenteen eri laitteille. IEC 61850 -standardissa tällaiset poikkeavuudet on pyritty minimoimaan, jotta kaikki laitteet toimisivat keskenään. (Forsman 2011)

RTU:hun on mahdollista kytkeä omia ulos- ja sisääntulokanavia, jotka mahdollistavat sen käytön myös nopeassa kuormanpudotuksessa. Ohjelmoitava PLC mahdollistaa kuormanpudotuksen ohjelmakoodin suorittamisen jo laitteessa, jolloin reagointiviiveistä saadaan mahdollisimman pieniä. Ohjelmakoodin suoritussyklin pystyy valitsemaan halutuksi, mutta nopeimmillaan RTU voi suorittaa ohjelmakoodia 10 ms:n välein. Uutta suorituskierrosta ei kuitenkaan voida aloittaa ennen kuin vanhan suoritus on päättynyt. Suurissa ohjelmakoodeissa tämä rajoittaa syklin suoritusväliä. RTU:n omat ulos- ja sisääntulokanavat voidaan kytkeä joko suoraan samaan yksikköön, jossa PLC on, tai ne voidaan asentaa kokonaan uuteen yksikköön. Tällöin RTU:n eri yksiköiden etäisyys ei voi kuitenkaan olla kovin suuri, vaan yleisesti voidaan sanoa, että yksiköiden tulee olla samassa tilassa keskenään. Jos laitteita pitää hajauttaa isommalle alueelle, tulee kysymykseen pää-RTU ja siihen liitettävät ala-RTU:t. Laitteen ohjelmakoodi voidaan suorittaa missä tahansa yksikössä, mutta yleisesti ala-RTU:ssa suoritettu koodi ei ohjaa

toista ala-RTU:ta. Yhden RTU:n kokoa rajoittaa sen suurin mahdollinen lisenssi ja suositus laitteen koosta. Yhteen RTU:hun voidaan kytkeä maksimissaan 5000 ulos- ja sisääntulopistettä. Yksi katkaisija käyttää yleensä useita pisteitä: ohjauksille on omat pisteensä ja lisäksi on erilaisia asentotietoja. Yleisesti voidaankin todeta, ettei RTU:hun kytkettävien komponenttien määrä rajoita kuormanpudotuksen toteutuksia. (Forsman 2011)

PLC tarjoaa mahdollisuuden ohjelmoida vapaasti erilaisia tuotanto-ongelmien havainnointitapoja. Aktivointisignaaleja voidaan vastaanottaa esimerkiksi alitajuus- tai -jännitereleiltä tai mittauksia voidaan kytkeä suoraan RTU:n sisääntulokanaviin. Myös suoja-alueiden laukaisutiedot voidaan tuoda suoraan RTU:n sisääntulokanaviin, mikä pienentää kommunikointiväylien aiheuttamia viiveitä. Jos PLC:stä loppuu laskentateho, voidaan rinnalle asentaa toinen PLC-yksikkö, jolloin prosessorien kuormitusta voidaan jakaa molempien yksiköiden kesken. Tässä tapauksessa kuitenkin itse ohjelmalohkon suoritusta ei voi jakaa molempien prosessorien kesken, eli RTU ei jaa kuormitusta automaattisesti tasaisesti siten, että samaa koodia suoritettaisiin kahdessa prosessorissa. Ohjelmointivaiheessa voidaan määrittää, mikä ohjelmalohko suoritetaan aina missäkin prosessorissa, jolloin kuormitus voidaan jakaa tasaisesti määrittämällä osa koodista suoritettavaksi toisessa prosessorissa. (Forsman 2011)

RTU on varustettu omalla Web-käyttöliittymällä, joka mahdollistaa laitteen perustoimintojen käytön. Käyttöliittymästä voidaan tarkastella erilaisia mittaus- ja tilatietoja sekä ohjata ulostulokanaviin kytkettyjä toimintoja. Web-käyttöliittymän perusversio kuuluu aina toimitukseen, mutta käyttöliittymästä on myös kehittyneempi versio. Kehittyneemmässä käyttöliittymässä on mahdollista luoda myös järjestelmän yksijohdinkaaviokuva. Usein RTU kytketään kuitenkin johonkin kaukokäyttöjärjestelmään, mutta pieniä projekteja voidaan toteuttaa myös laitteen omalla käyttöliittymällä. (Forsman 2011)

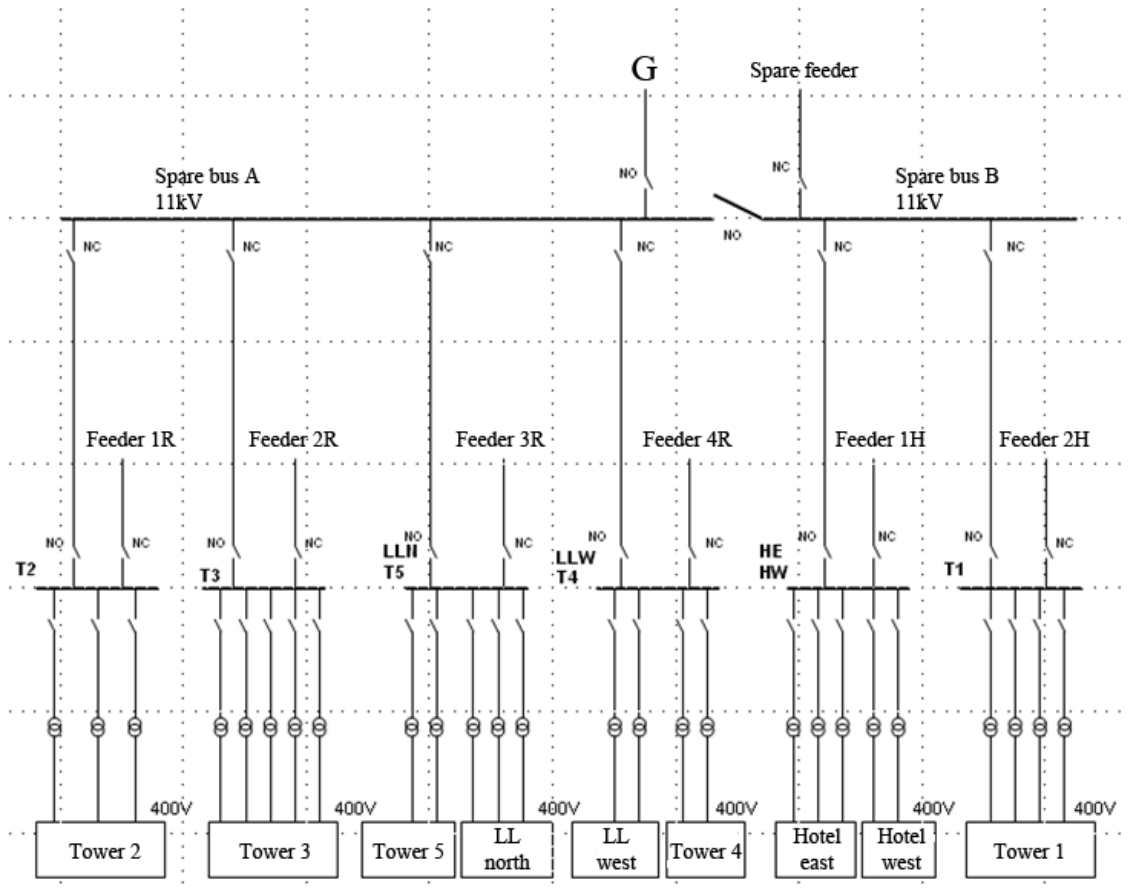
RTU:n heikkoudet liittyvät kommunikointiväylien hitauksiin ja vaadittavan ohjelmointityön määrään kuormanpudotuksen sovelluksissa. Kommunikointiväylät rajoittavat ratkaisujen fyysistä kokoa, koska usein isoissa järjestelmissä ei ole mahdollista sijoittaa koko RTU:ta samaan tilaan vaan RTU pitää hajauttaa. RTU ei pysty antamaan kommunikointiväylää pitkin kuin yhden ohjauksen kerrallaan, mikä hidastaa toimintaa isommissa järjestelmissä. Vaikka yhdessä RTU:ssa olisi useita yksiköitä, pystytään ohjaukset niissä antamaan lähes samaan aikaan, mutta jo

esimerkiksi pää-RTU:n antaessa ohjauksia ala-RTU:lle, hidastuu ohjausten välitys heti, koska jokaisesta ohjauksesta odotetaan kuittausviesti ennen uuden lähettämistä. Tällöin viive ohjauksien välillä voi olla jopa 0,5 s. Hajautetuissa RTU:issa voikin olla parempi tehdä ohjelma jokaiselle ala-RTU:lle, jolloin pää-RTU antaa vain yhden ohjauksen ala-RTU:lle, minkä jälkeen ala-RTU suorittaa tarvittavien katkaisijoiden avaamisen nopeasti lähes rinnakkaisilla komennoilla. (Forsman 2011)

Kuormanpudotukseen ei ole RTU:ssa valmiita kirjastokomponentteja, vaan kaikki toiminnallisuus joudutaan kirjoittamaan yleensä alusta alkaen, mikä vaatii hyvää suunnittelua, jottei suuria muutoksia tarvitsisi tehdä myöhemmin. Mitä isompi projekti ja järjestelmä on kyseessä, sitä enemmän aikaa kaikkien toiminnallisuuksien ohjelmointiin kuluu ja suuriin järjestelmiin on vaikea toteuttaa muutoksia myöhemmin. Lisäksi ison projektin kaikkien tilanteiden lukumäärä kasvattaa helposti ohjelmakoodin suoritukseen tarvittavaa aikaa ja lisää prosessorin kuormitusta. (Forsman 2011)

3.4.3 Kuormanpudotuksen toteutukset

Toteutus esimerkki RTU:lla tehdystä kuormanpudotuksesta on viiden tornitalon sekä kahden muun rakennuksen (Rakennus LL ja hotelli) infra, jossa kuormanpudotuksella halutaan turvata sähkönsyöttö rakennuksille jonkin pääsyötön pettäessä. Rakennusten sähköjärjestelmän periaatekuva on esitetty kuvassa 17. Jokaiseen rakennukseen tulee sähkönsyöttö kuuden keskijännitekiskon kautta, ja jokaiseen kiskoon on oma sähkönsyöttönsä paikalliselta sähkölaitokselta. Jokaiseen keskijännitekiskoon liittyy noin 80 ohjattavaa pienjännitekatkaisijaa eri rakennuksissa. Keskijännitekiskoon on mahdollista kytkeä sähkönsyöttö varakiskosta, johon tulee yksi varasyöttö sähkölaitokselta, ja lisäksi kiskoon on kytketty generaattori. Varasyöttö pystyy syöttämään sähkön vain yhdelle rakennukselle. Eli jos yksi pääsyöttö pettää, voidaan se korvata vielä varasyötöllä, mutta jos kaksi tai useampi pääsyöttö pettää, pitää kuormitusta vähentää. Generaattoreita käytetään pääasiassa vain silloin, jos varasyöttökin pettää. (Forsman 2011)



Kuva 17: Rakennusten sähkönsyötön periaatekuva RTU:lla toteutetussa kuormanpudotuksen sovelluksessa. (Forsman 2011) Rakennusten ja kiskojen nimet muutettu.

Kuormanpudotukseen saadaan asiakkaalta usein valmis lista tarvittavista toimenpiteistä eri ongelmatilanteissa. Tässäkin tapauksessa asiakkaalta on saatu lista toimenpiteistä. Kuormanpudotuksen aktivoitumistieto saadaan RTU:lle alijännitereleiltä ja ensimmäinen toimenpide on, että kaikki keski- ja pienjännitekatkaisijat avataan siltä asemalta, josta syöttö katkesi. Sen jälkeen RTU alkaa kytkeä haluttuja kuormia takaisin. RTU laskee varasyötön kuormitusta ja kytkee vain sen verran kuormitusta takaisin, että varasyöttö ei ylikuormitu. Pääasiassa kuitenkin tärkein asia, josta RTU:n täytyy pitää huolta, on se, että kaikki ohjaukset menevät perille. Jos jonkin ohjauksen kanssa on ongelmia, voidaan yrittää sen uudelleenohjaamista tai viimekädessä annetaan virheilmoitus epäonnistuneesta ohjauksesta järjestelmään kytkettyyn kaukokäyttäjärjestelmään. Koska järjestelmään on liitetty useita pääsyöttöjä, varasyöttö ja generaattori, voi jokaisessa näistä olla vikaa. Vika voi tulla vain yhteen tai useampaan syöttöön. Jotta kuormanpudotus toimisi oikein, pitää jokainen näistä mahdollisista vikatilanteista ottaa suunnittelussa huomioon. Suuressa järjestelmässä erilaisten vikatilanteiden huomioonottaminen kasvattaa järjestelmän kokoa. Tässäkin tapauksessa mahdollisia vikatilanteita oli 126 kappaletta. Tämä tarkoitti sitä, että jokainen näistä

ongelmatilanteista piti ohjelmoida RTU:n logiikkaan erikseen. Koska jokaiseen tilanteeseen liittyi keskimäärin noin 90 keski- ja pienjännitekatkaisijaa ja jokaisen katkaisijan ohjauksen onnistuminen pitää varmistaa, tuli ohjelmakoodista pitkä. (Forsman 2011)

Esimerkin ohjelmakoodista tuli niin pitkä, että RTU:hun piti kytkeä kiinni kaksi PLC-yksikköä ja ohjelmien suoritus jaettiin puoliksi molempien yksiköiden kesken. Tällä tavoin ohjelmakoodista saatiin hieman lyhyempi ja sen suoritus onnistui RTU:ssa. Muita ongelmia aiheutti RTU:ien hajauttaminen, jolloin pää-RTU:ssa suoritettava ohjelmakoodi pystyi antamaan vain yhden ohjauksikäskyn kerrallaan ala-RTU:ille. RTU:t hajautettiin siten, että järjestelmässä oli yksi pää-RTU ja jokaisella keskijännitekeskolla oma ala-RTU:nsa. Järjestelmän koosta voidaankin todeta, että tulevaisuuden kannalta olisi hyvä, jos RTU:lla tehtävät toteutukset olisivat hieman pienempiä. Tämän kokoisen järjestelmän toteuttaminen on jo hieman RTU:n toteutuksien ylärajoilla. RTU:n ohjelmakoodia olisi voitu saada pienemmäksi, jos koodin suoritusta olisi hajautettu ala-RTU:ille. Asiakkaan toive oli kuitenkin toteuttaa projekti yllä kuvatulla tavalla. Koodia hajauttamalla olisi voitu toteuttaa nopeaa kuormanpudotusta, eikä kaikkia katkaisijoita olisi tarvinnut avata aluksi varasyötön tai generaattoreiden suojaamiseksi. Lisäksi tällaisenaan järjestelmään muutoksien teko vie paljon aikaa ja jos tulevaisuudessa järjestelmään lisättäisiin toinen varasyöttö, kasvattaisi se mahdollisten ongelmatilanteiden määrää logaritmisesti. (Forsman 2011)

3.5 AC800

3.5.1 Laitteen yleisesittely

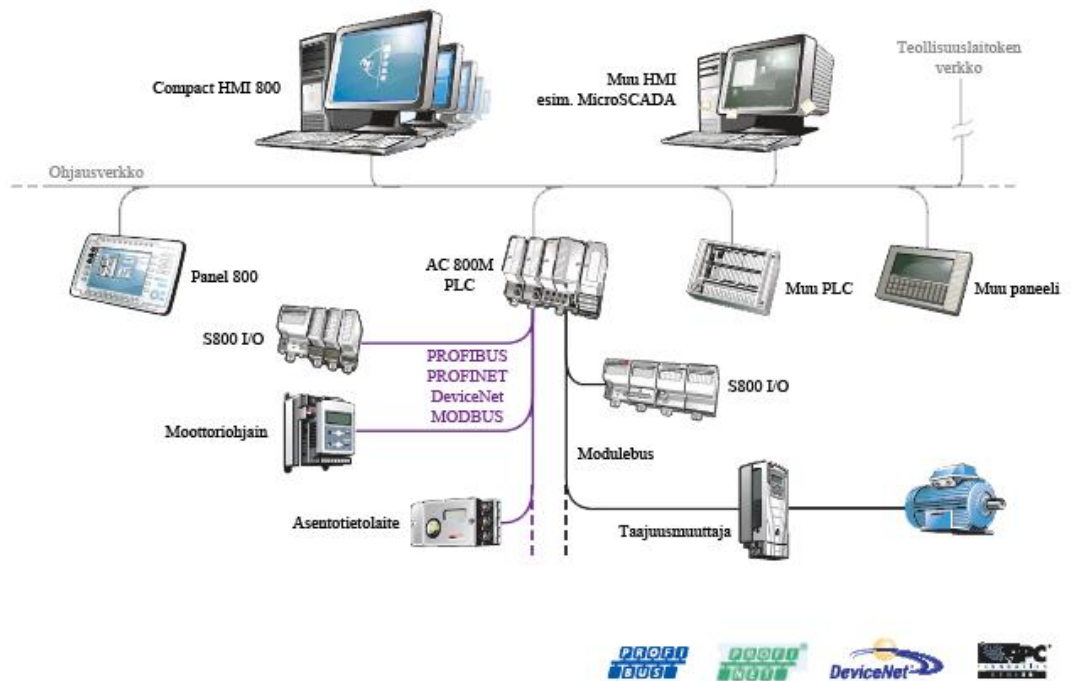
AC800 on ohjaus- ja valvontalaite, jota käytetään muun muassa ABB Oy, Prosessiteollisuudessa. AC800 on tarkkaan ottaen vain PLC-yksikkö, johon on tarkoitus kytkeä erillisiä S800 I/O -ulos- ja sisääntulokanavayksiköitä. Virallisesti tällaisen kokonaisuuden nimi on silloin Compact 800. Yhteen AC800 yksikköön voidaan kytkeä myös erillisiä etä-I/O-yksiköitä. AC800 on hyvin samanlainen laite toiminnaltaan kuin RTU, mutta sen käyttö on optimoitu erityisesti teollisuuslaitosten sähköjärjestelmiin. AC800-laitteen pääasialliset toteutukset ovatkin juuri prosessiteollisuudessa. S800 I/O -yksiköiden ulos- ja sisääntuloihin voidaan kytkeä esimerkiksi katkaisijoita tai moottorien kuormitus-, käyttötila- ja ohjaustietoja sekä hälytyksiä. (Shumaker 2004 ja Peltoniemi 2011)



Kuva 18: AC800. (ABB 2003)

AC800:aa voidaan ohjata joko kaukokäyttöjärjestelmästä tai laitteeseen kytkettävästä erillisestä ohjauspaneelistä, Panel 800:sta. Pääosin kuitenkin AC800:n yhteydessä käytetään aina esimerkiksi MicroSCADaa, jolloin AC800 kytkeytyy siihen OPC:n avulla. Kaukokäyttöjärjestelmää tarvitaan, koska AC800:ssa ei ole omaa Web-käyttöliittymää kuten RTU:ssa. AC800-laitteet ovat muuntautuvia kokonaisuuksia, joihin voidaan kytkeä enintään 12 kappaletta ulos- ja sisääntuloyksiköitä (S800 I/O). Tämän lisäksi laitteeseen voidaan kytkeä etä-I/O:ita. S800 I/O -yksiköt voivat olla erityyppisiä ja eri kanavamäärillä varustettuja ulos- ja sisääntuloyksiköitä. Näin ollen AC800 sopii mainiosti niin pieniin kuin vähän suurempiinkin laitteisiin. (Shumaker 2004 ja Peltoniemi 2011)

Kuvassa 19 on periaatekaavio AC800-laitteen käytöstä teollisuuslaitoksen sähköjärjestelmien ohjaamiseen. Kuten kuvasta havaitaan, voidaan AC800-laitteeseen kytkeä monia eri ohjauslaitteita, mikä tekee siitä monipuolisen teollisuusautomaatiossa. Kaukokäyttöjärjestelmä kytkeytyy kiinni OPC-palvelimen kautta, ja sen avulla järjestelmään voidaan kytkeä myös teollisuuslaitoksen omassa verkossa olevia prosessin ohjausjärjestelmiä. Muita tuettuja kommunikointiprotokollia laitteen ja ohjausjärjestelmien välillä ovat IEC 60870-5-104 ja Modbus. AC800 käyttää teollisuusjärjestelmien laitteiden ohjaamiseen myös Profibus-väylää, joka on yleisesti käytössä teollisuusautomaatiossa. (Peltoniemi 2011)



Kuva 19: AC800-laitteen käyttö teollisuuslaitoksen sähköautomaatiossa. (ABB 2011i) Kuva suomennettu.

Useita AC800-yksiköitä voidaan kytkeä myös rinnakkain suuremmaksi järjestelmäksi. Tällöin järjestelmästä käytetään nimitystä 800xA. Yleisin käyttö 800xA-laitteistoille on ABB:n DCS-järjestelmissä (Distributed Control Systems). DCS-järjestelmät mahdollistavat erittäin suurienkin toteutusten tekemisen AC800-laitteilla, kun Compact 800 on suunniteltu oikeastaan vain pieniin ja keskisuuriin toteutuksiin. (Peltoniemi 2011)

3.5.2 Laitteen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa

AC800-laitteen ehdoton etu on sen valmis kirjastokomponentti kuormanpudotukseen, mikä säästää paljon työtä suurimmassa osassa tapauksia. Kirjastokomponentin avulla voidaan helposti luoda kuormanpudotuksen toiminnallisuus laitteeseen ja saman komponentin avulla on mahdollista määrittää valmis käyttöliittymä MicroSCADAan. MicroSCADAan ei tule valmista tietokantaa kirjastokomponentin mukana, mutta tietokanta pysyy melko samana toteutuksesta toiseen, jolloin sen voi melko suurella todennäköisyydellä kopioida tai muokata pienellä vaivalla toisesta projektista. Tietokantapisteitä on yhteensä noin 700, joista sisääntulopisteitä MicroSCADAlle on noin 500 ja ohjauspisteitä AC800:lle noin 200. (Peltoniemi 2011)

Kuormanpudotuksen kirjastokomponentti tukee tarkkaan rajattua määrää laitteita, mikä helpottaa sen soveltuvuuden rajausta sähköjärjestelmään. Toisaalta taas tarkkaan rajattu komponenttien määrä rajoittaa sen käyttöä isommissa sovelluksissa. Mikään ei estä kytkemästä samalle asemalle kahta AC800:aa, mutta ne eivät voi tällöin vaikuttaa toistensa kuormanpudotukseen, eivätkä tiedä mitä toinen laitteista tekee. Näin ollen voidaan tietyissä tapauksissa kytkeä jokaiselle kiskolle omat AC800-laitteensa, jolloin yksi AC800 vastaa vain oman kiskonsa tehotasapainon ylläpitämisestä. Kuormanpudotuksen kirjastokomponentti tukee sähköaseman komponentteja seuraavasti:

- 10 generaattoria tai muuntajasyöttöä, jotka voivat olla kytkettyinä mihin kiskoon tahansa
- 40 kuormaa, jotka voivat olla kytkettyinä mihin kiskoon tahansa
- 30 kiskoa (Peltoniemi 2011)

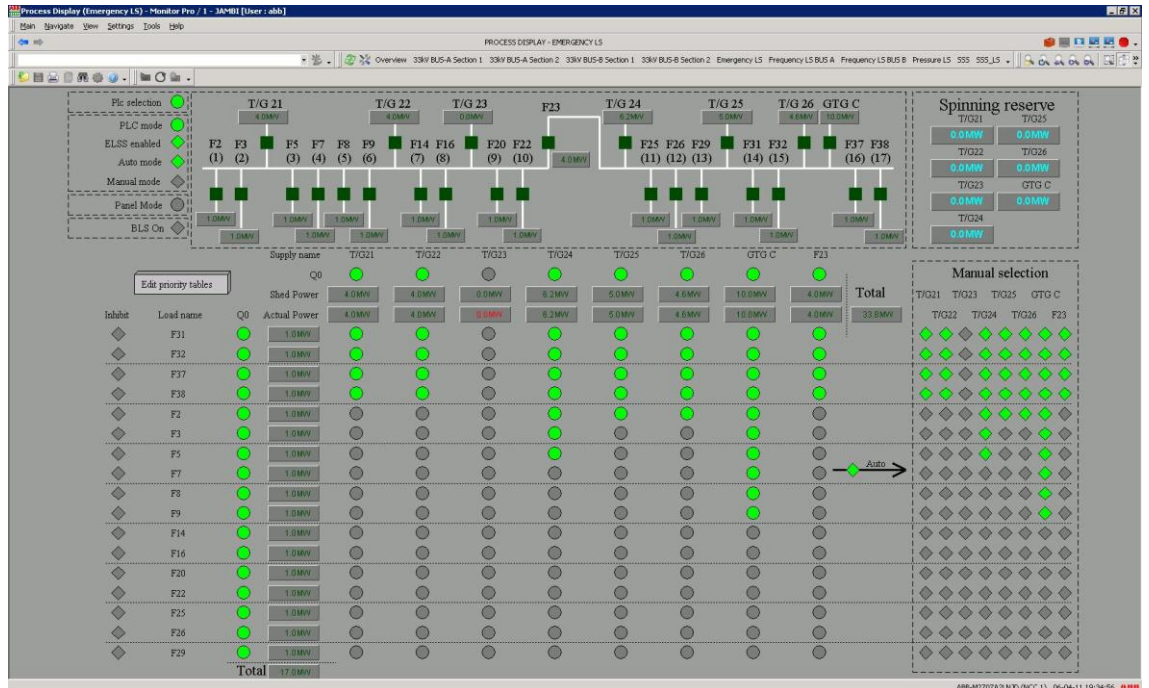
Kirjastokomponentin ja samalla AC800:n suurin heikkous on siinä, että se tunnistaa, jos generaattori tai muuntajasyöttö irtoaa verkosta, mutta se ei osaa tunnistaa kiskokatkaisijan avautumista. Koska generaattoreiden tai muuntajasyöttöjen sijainneilla kiskoissa ei ole väliä, ei kiskojen välisiä yhteyksiä voida ottaa huomioon tai muuten laskentamatriisista tulisi erittäin haastava. Kiskokatkaisija voidaan kuitenkin joissain tapauksissa lisätä järjestelmään naamioimalla se tuotannoksi. Kiskokatkaisijan naamioimisesta tuotannoksi on kerrottu tarkemmin AC800-kuormanpudotuskirjaston esittelyluvussa 3.5.3. (Peltoniemi 2011)

Kirjastokomponentin sallima määrä sähköaseman laitteita ei ylikuormita AC800:n prosessoria, koska se voidaan vaihtaa tarvittaessa tehokkaammaksi. Kuormanpudotuksen ohjelmakoodin suoritusyksi voidaan valita vapaasti. Yleensä kuitenkin tehomatriisin lasku tapahtuu huomattavasti hitaammin, esimerkiksi 300 ms:n välein, kun taas laukaisuiden tarkkailu suoritetaan nopeammin, esimerkiksi 20 ms:n välein. Tehomatriisin laskemisesta on kerrottu tarkemmin kuormanpudotuksen kirjastokomponentin esittelyssä luvussa 3.5.3. AC800:aan kytkettävät I/O-yksiköiden määrät eivät rajoita kuormanpudotuksen ratkaisuiden kokoa. Ainoastaan jos joudutaan käyttämään useita rinnakkaisia AC800-yksiköitä, hidastuu kommunikointi niiden välillä merkittävästi. Tällöin ohjauksikäskyissä voi olla jopa sekuntien viiveet, jolloin ratkaisu ei sovellu enää nopeaan kuormanpudotukseen. (Peltoniemi 2011)

AC800 soveltuu hyvin nopeaan kuormanpudotukseen ja tarvittaessa, koska kyseessä on tavallinen PLC, voidaan sitä muokata lähes vapaasti. Laitteen omat I/O-yksiköt mahdollistavat sen, että voidaan nopeasti vastaanottaa mittaustietoja ja lähettää ohjaukaskäskyjä. Tarvittaessa AC800 voi vastaanottaa syöttöjen laukaisutiedot suojaareleelta, jolloin havainnointitapa voidaan valita releen ominaisuuksien mukaiseksi, esimerkiksi alijännite- tai -taajuuspohjaiseksi. (Peltoniemi 2011)

3.5.3 Kuormanpudotuksen toteutukset ja kirjastokomponentti

Kuten AC800-laitteen esittelyssä jo kerrottiin, pääosa laitteella toteutetuista kuormanpudotuksen toiminnoista on tehty prosessiteollisuudelle. Näissä toteutuksissa on käytetty valmista kuormanpudotuksen kirjastokomponenttia, jolla kuormanpudotus voidaan ottaa helposti käyttöön. Lisäksi komponentin mukana tulee valmis käyttöliittymä MicroSCADAan, mikä säästää sen tekemiseen kuluvaan aikaa. MicroSCADA-käyttöliittymän kuva esimerkkitoteutuksessa on esitetty kuvassa 20. Esimerkkisähköasema koostuu seitsemästä generaattorista tai muuntajasta sekä 17 kuormasta. Lisäksi järjestelmässä on kaksi kiskoa ja kiskokatkaisija, joka erottaa kiskot toisistaan. Kiskokatkaisija on naamioitu syötöksi järjestelmässä siten, että jos katkaisija avautuu, voidaan laskea, kuinka paljon kuormitusta täytyy irrottaa. Tällöin pitää saada asetettua, että tuotannon teho on se, mitä kiskokatkaisijan kautta tuodaan toiselle kiskolle. Lisäksi pitää määrittää, että kiskokatkaisijaa vastaava tuotantoyksikkö on kytketty nimenomaan toiseen kiskoon. Näin kuormanpudotusmatriisi ottaa kiskokatkaisijan tehölähteeksi toiselle kiskolle ja laskee kuinka paljon kiskolta pitää irrottaa kuormitusta, jos kiskokatkaisija avautuu. Toteutuksessa ei ole mahdollista se, että kuormanpudotusalgoritmi voisi avata kiskokatkaisijan, joten sitä mahdollisuutta ei tarvitse ottaa huomioon matriisissa. (Peltoniemi 2011)



Kuva 20: AC800:lla tehdyn kuormanpudotuksen toteutusimerkki MicroSCADAssa. (Peltoniemi 2011)

Käyttöliittymässä on esitetty sähköjärjestelmän yksijohdinkuva, josta nähdään kaikkien syöttöjen ja kuormien sijainnit. Käyttöliittymästä nähdään myös tehomatriisi, jota logiikka laskee säännöllisin väliajoin. Matriisin sarakkeissa ylhäällä on aina yksi syöttö (kuvassa oikeanpuoleisimpana kiskokatkaisija), joka voi olla generaattori tai muuntaja, sekä riveillä vasemmalla kaikki järjestelmän kuormat siten, että heikoimman prioriteetin kuorma on ylimpänä. Matriisin laskualgoritmi tunnistaa ensin, minkä tuotannon ja kuorman välillä on sähköinen yhteys eli minkä kuorman avaaminen vaikuttaa tiettyyn tuotannon kuormitukseen. Sellaisten kuormien, joilla ei ole sähköistä yhteyttä tuotantoyksikköön, algoritmi siirtyy yli automaattisesti. Periaatteessa riittää, että tunnetaan tuotantoyksiköt, kuormat ja mitkä niistä ovat kytkettyinä toisiinsa. Sen tarkempaa kuvausta järjestelmästä ei tarvita. AC800:ssa on kuitenkin toinen ohjelmakomponentti, jolle määritetään sähköjärjestelmän rakenne. Tällöin kuormanpudotuslohko osaa hakea automaattisesti komponentilta sähköjärjestelmän rakenteen ja määrittämään millä tuotantoyksiköillä ja kuormilla on sähköinen yhteys järjestelmässä. (Peltoniemi 2011)

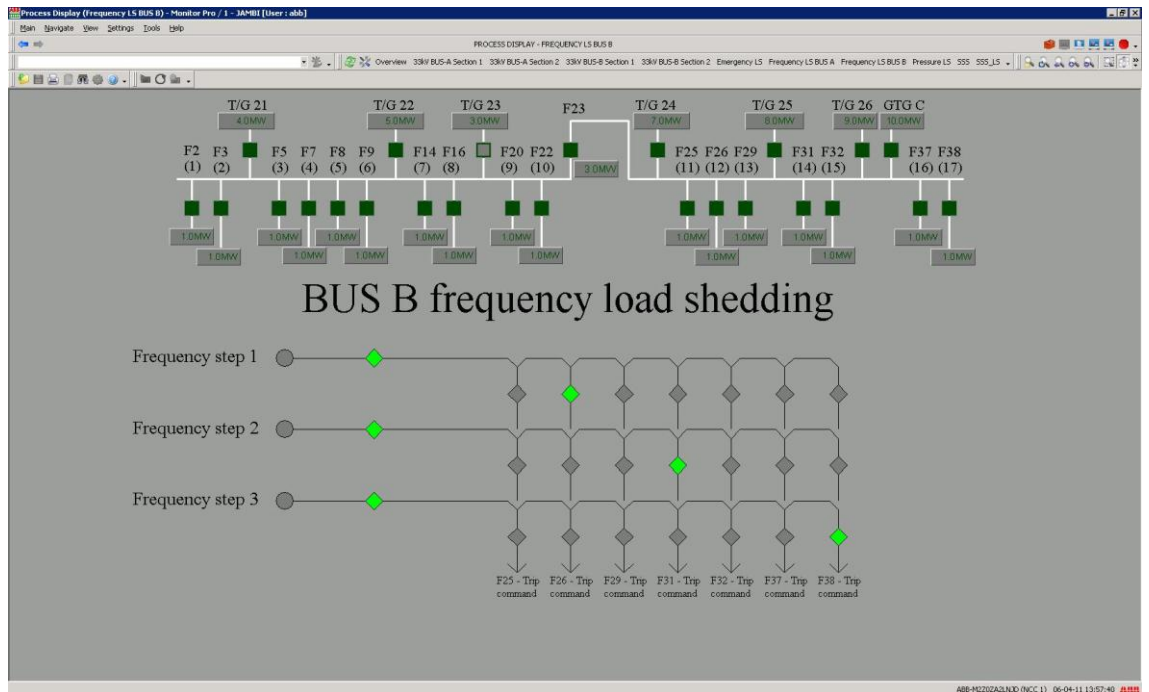
Järjestelmään saadaan merkittävä kuinka paljon tehoreserviä kussakin tuotantoyksikössä on. Algoritmi laskee nykyisen tuotannon, kulutuksen ja tehoreservin mukaan kuinka paljon kuormitusta sen täytyy irrottaa, jotta irronnut tuotanto tulee korvattua. Kuvasta 20 nähdään, että mitä suurempitehoinen tuotantoyksikkö on kyseessä, sitä enemmän

kuormia täytyy irrottaa, jotta tuotannon menetys tulisi korvattua. Tehomatriisi käyttää siis suoraan tehoja tehotasapainon määrittämisessä, eli kyseessä on suora tehotasapainon mittaaminen. Mittauksessa käytetään tuotantoyksiköiden tehoja ennen irtoamista, joten tarvittavan irrotettavan kuorman määrä määräytyy suoraan tuotantoyksikön tehosta ennen irtoamista. (Peltoniemi 2011)

Käyttäjä voi ottaa käyttöön myös manuaalisen kuormanpudotuksen, jossa käyttäjä voi itse määrittää, mitä kuormituksia irrotetaan, jos jokin tuotantoyksikkö irtoaa verkosta. Niiden asettaminen onnistuu käyttöliittymässä suoraan. Käyttäjä voi myös estää joidenkin kuormien tiputtamisen käyttöliittymästä, jolloin tehomatriisin laskenta-algoritmi osaa automaattisesti jättää sen kuorman huomioimatta ja siirtyä seuraavaan. Kuormien prioriteettien muuttaminen onnistuu helposti käyttöliittymästä. (Peltoniemi 2011)

AC800:lla ei yleisesti toteuteta automaattista takaisinkytkentää, koska yleensä asiakas ei halua sitä. Asiakkaat haluavat kytkeä kuormat itse takaisin, kun tuotanto-ongelma on varmasti korjaantunut. AC800:n PLC mahdollistaisi kuitenkin myös automaattisen takaisinkytkennän ohjelmoinnin, mutta ainakaan tällä hetkellä sille ei ole ollut vielä tarvetta. (Peltoniemi 2011)

AC800:ssa on mahdollista ottaa käyttöön myös taajuuspohjainen kuormanpudotus. Kuormanpudotuksessa käytetään maksimissaan kolmea eri taajuusporttia, joille jokaiselle voidaan määrittää haluttujen kuormien irtoaminen, jos taajuusportti aktivoituu. Taajuuspohjaisen kuormanpudotuksen käyttöliittymä on esitetty kuvassa 21. Taajuusporttien määrittäminen tapahtuu suoraan alitaajuusreleillä, joilta porttien aktivoitumissignaali saadaan. Taajuuspohjainen kuormanpudotus on tarkoitettu varalle, koska ensisijaisesti kuormanpudotuksen pitäisi aktivoitua suoraan tuotantoyksikön irtoamisesta. Taajuuspohjaista suojausta voidaan käyttää myös esimerkiksi muuntajasyötöissä, jos verkon taajuus alkaa pudota ulkopuolisten ongelmien takia. Tällöin kuormitusta vähentämällä voidaan auttaa ulkopuolista verkkoa pysymään pystyssä. AC800:aan on mahdollista aktivoida myös varalohko kuormanpudotusta varten tapauksessa, jossa esimerkiksi kaksi tuotantoyksikköä irtoaa hyvin pienellä viiveellä ja ensimmäinen lohko ei ole ehtinyt vielä päivittää tehomatriisia. (Peltoniemi 2011)



Kuva 21: AC800:n käyttö taajuuspohjaisessa kuormanpudotuksessa. (Peltoniemi 2011)

3.6 PML630 Load Shedding Controller

3.6.1 Ohjaimen yleisesittely



Kuva 22: PML630 Load Shedding Controller versio 1.1. (ABB 2011d)

PML630 kuormanpudotusohjain on ABB:n julkaisema uusin, vuoden 2011 keväällä ilmestynyt tuote, joka on tarkoitettu varta vasten kuormanpudotuksen hallintaan. Tutkimuksessa käytetyn laitteen tuoteversio on 1.1, joka on tutkimusta tehdessä uusin versio PML630:sta. PML630 kuuluu ABB:n 630-sarjan releperheeseen. Ohjain tarjoaa

kuormanpudotustoiminnallisuuden pieniin ja keskisuuriin teollisuussähköjärjestelmiin ja kattaa suojan sähkönsyötön häiriöitä ja katkoksia vastaan. PML630:lle liian suuret sovellukset on tarkoitus toteuttaa ABB:n DCS 800xA -järjestelmällä. Ohjain tukee tietoliikenneväylänä ainoastaan IEC 61850 -protokollaa, jonka avulla se keskustelee muiden suojareiden ja ohjausjärjestelmän kanssa GOOSE- ja MMS-kommunikoinnilla. (ABB 2011a ja Luoma 2011)

Ohjain on suunniteltu ja optimoitu käytettäväksi muiden ABB:n 600-sarjan releperheen tuotteiden kanssa, joita ovat RET615, REM615, REF615, RET630, REM630, REF630, REG670 ja COM600 asema-automaatiolaitteistot. COM600 asema-automaatiolaitteistot ovat itsenäisiä hallintajärjestelmiä teollisuuden IED:ien ohjaamiseen tai esimerkiksi ylempien hallintajärjestelmien välille, joita voivat olla esimerkiksi kaukokäyttöjärjestelmät (MicroSCADA) tai koko verkon DMS-hallintajärjestelmät. COM600-tuoteperheeseen kuuluvat ohjaus- ja monitorointiyksikkö COM605, alasemien yhdysväyläyksikkö COM610 ja asematietokone COM615 varustettuna täydellisellä asema-automaatioiminnallisuudella. PML630 voidaan kytkeä myös suoraan kaukokäyttöjärjestelmään. (ABB 2011b ja 2007)

Ohjain toimitetaan ns. tyhjällä ohjelmistolla, eli ohjaimessa ei ole minkäänlaista tehdasohjelmistoa asennettuna. Ohjaimen mukana tulee kuitenkin kattava ohje sen käyttöönotosta ja asetteluiden tekemisestä. Ohjaimen ohjelmointi tapahtuu PCM600-ohjelmalla käyttämällä valmista PML630-yhteyspakettia (engl. Connectivity Package) sekä kuormanpudotukseen osallistuvien muiden suojareiden ja -laitteiden vastaavia yhteyspaketteja. PCM600 on IED-laitteiden hallintatyökaluohjelmisto, jonka avulla voidaan määrittää IED:ien asetukset vastaamaan todellista järjestelmää. Ohjelmistolla määritellään myös muiden IED-laitteiden yhteysasetukset, jotta ne voivat keskustella keskenään ja kaukokäyttöjärjestelmien kanssa. PCM600-työkalulla ohjaimen määritellään sähköverkon rakenne, siihen liitetyt muut laitteet sekä suojareleet, joiden kanssa PML630 keskustelee ja joille ohjauskäskyt annetaan. Lisäksi työkalulla voidaan piirtää PML630 etupaneelissa näkyvä sähköverkon yksijohdinkuva. Kun asetukset on määritetty, voidaan projekti ladata releille ja ohjaimelle. Ohjelmalla voidaan luoda myös valmis asetustiedosto, joka voidaan tuoda esimerkiksi kaukokäyttöjärjestelmään ja saada näin automaattisesti oikeat tietokantapisteen määritellyt järjestelmään. PML630-yhteyspaketti määrittää laitteen perusasetukset PCM600-ohjelmalle ja toimii samalla PML630-laitteen kirjastona, jonka avulla ohjain voidaan ohjelmoida käyttämällä

valmista asetustenluontiohjelmaa. Paketin käyttäminen myös vähentää mahdollisia virheitä, joita voi tulla, jos asetusten määrittely aloitetaan tyhjästä projektista. PML630 on varustettu lisäksi Web-pohjaisella käyttöliittymällä, jota voidaan käyttää tavallisella internetselaimella. Web-käyttöliittymällä voidaan määrittää perusasetuksia ja havainnoida kuormapudotuksen tilaa. Samoja ominaisuuksia voidaan muuttaa PML630-laitteen etupaneelista. (ABB 2009 ja 2011b)

PCM600-ohjelmasta on olemassa kolme erilaista versiota. PML630:n ohjelmoimiseen tarvitaan ohjelman kehittyneintä PCM600 Engineering Pro -versiota. Vain tällä versiolla on mahdollista ohjelmoida laitteiden välinen IEC 61850 GOOSE -liikenne. IEC 61850 -liikenteen määrittely tapahtuu PCM600-ohjelman mukana tulevalla CCT600-ohjelmalla. CCT600-vaatii lisenssin, joka pitää ostaa erikseen. (ABB 2011h)

Tutkimusta tehtäessä, uusin version ohjaimesta on 1.1. Ohjaimesta on ilmestymässä versio 1.2 vuonna 2012. Tarkkaa ilmestymispäivää ei kuitenkaan ole vielä sovittu, eikä sitä, jaetaanko osa uudistuksista esimerkiksi versioon 1.3. Uudessa versiossa on mahdollista kytkeä kaksi PML630-laitetta rinnan, jolloin järjestelmän komponenttien määrä voidaan kaksinkertaistaa. Tässä versiossa on tarkoitus, että ohjaimet kykenevät keskustelemaan keskenään ja näin tietämään myös muiden alueiden kuormanpudotustilanteen. Tällä hetkellä versiossa 1.1 jokainen ohjain tietää vain oman alueensa tilanteen, eikä pysty saamaan tietoa muista alueista, jos asemalla on käytössä useampi itsenäinen kuormanpudotusverkko. Lisäksi versiossa 1.2 tulee mahdolliseksi antaa katkaisijoiden avauskäskyt myös suoraan kytketyillä kaapeleilla ohjaimen ulostulokanavista IEC 61850 -väylän sijaan. PML630-ohjaimelle ollaan myös toteuttamassa rajapintaa 800xA-järjestelmille, jolloin PML630-ohjainta voitaisiin käyttää myös isommissa sähköjärjestelmissä. (Kulathu 2011 ja Luoma 2011)

3.6.2 Ohjaimen toimintaperiaate

PML630-ohjaimen toiminta perustuu siihen, että laite vastaanottaa tehomittaustietoja IEC 61850 -tietoliikenneprotokollan GOOSE-kommunikoinnilla muilta järjestelmän laitteilta, jotka suojaavat esimerkiksi muuntajia, lähtöjä ja generaattoreita. Lisäksi ohjain osaa ottaa huomioon jo auki olevat katkaisijat, myös kiskokatkaisijat, ja huomioi nämä laskennassa. Ohjain laskee saatujen tehotietojen perusteella järjestelmän tehotasapainon suoraan ja jos ohjaustoimenpiteitä vaaditaan, antaa ohjain käskyt IEC 61850 -väylää pitkin. Suoran tehotasapainon laskeminen on paljon tarkempaa kuin esimerkiksi

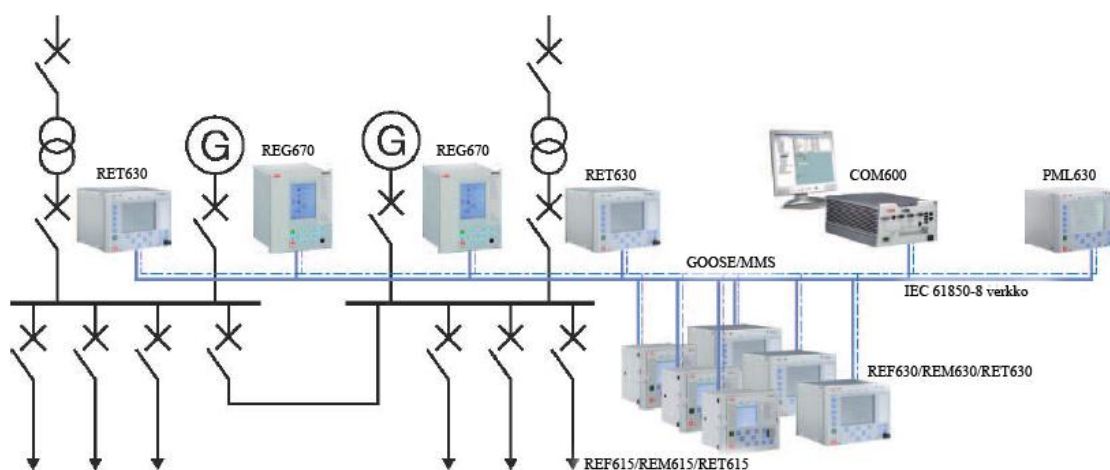
taajuuden mittaaminen ja sen muutosten perusteella tehotasapainon arvioiminen. (ABB 2011b ja Luoma 2011)

PML630 tukee kolmea eri kuormanpudotustapaa: nopeaa, hidasta ja manuaalista. Nopeassa kuormanpudotuksessa ohjain laskee jatkuvasti kaikkien sähköjärjestelmään kytkettyjen laitteiden tehonkulutusta ja tuotantoa sekä määrittää näiden avulla tehotasapainomatriisin. Jos jokin tuotantoyksikkö irtoaa verkosta, tai verkko jakautuu useampaan aliverkkoon kiskokatkaisijan avauduttua, pystyy ohjain tämän matriisin avulla nopeasti määrittämään kuinka paljon kuormaa pitää vähentää ja antaa tarvittaville katkaisijoille avauskäskyn määrättyjen prioriteettien mukaan. Ohjain osaa ottaa huomioon myös generaattoreiden ja muuntajasyöttöjen tehoreservin. Hitaassa kuormanpudotuksessa ohjain sallii esimerkiksi jonkin aikaa toisen päämuuntajan ylikuormittamista ennen kuin ohjain antaa ohjauksikäskyn kuormituksen vähentämiseksi. Tämän jälkeen kuormanpudotus tapahtuu samalla tavalla kuin nopeassa kuormanpudotuksessa. Ohjain tukee manuaalista kuormanpudotusta, jolloin käyttäjä voi antaa laitteelle käskyn vähentää kuormitusta tietyn prioriteettitason mukaan. Ohjaimessa on 19 kappaletta eri prioriteettiryhmiä, joihin kuormat voidaan jakaa. 1. prioriteetti on heikoin. Lisäksi ohjaimen voidaan määrittää sellaisia kuormia, joita ei voida irrottaa, mutta niistä käytetään tehomittaustietoja. (ABB 2011b ja Luoma 2011)

Ohjain osaa estää kuormanpudotustoiminnon automaattisesti esimerkiksi silloin, jos yhteydessä eri laitteiden välillä on ongelmia tai jos datapaketti sisältää virheitä. Paketin virheet voivat liittyä esimerkiksi vääriin aikaleimoihin. Kuormanpudotus estetään myös automaattisesti, jos muuntajasyöttö on testitilassa sekä jos generaattorin tai muuntajan katkaisija on välitilassa yli 200 ms:n ajan tai virhetilassa. Kun kuormanpudotus on estetty, ei ohjaimella voida aktivoida manuaalistakaan kuormanpudotusta. Käyttäjä voi myös manuaalisesti estää nopean tai hitaan kuormanpudotuksen. Kuormanpudotus voidaan estää manuaalisesti joko kaukokäyttöjärjestelmästä tai PML630-laitteen etupaneelin käyttöliittymästä. (ABB 2011b)

Ohjain käyttää IEC 61850 -protokollan GOOSE-kommunikointia järjestelmän suojalaitteiden välillä, mikä mahdollistaa binääristen viestien lähettämisen väylää pitkin vain noin 4 ms:n viiveellä. GOOSE-kommunikoinnin etuna on, että yksittäisiä johdotuksia ei tarvita, vaan kaikki tieto kulkee yhdessä kaapelissa kaikille väylään kytketyille laitteille. Väyläratkaisun on todettu olevan joissain tilanteissa jopa nopeampi kuin tavallinen suoraan kytketty kaapeli, ja väylä tarjoaa tiedonsiirron varmistuksen

sekä laadun valvonnan. Muutosten tekeminen järjestelmään onnistuu nopeammin ja pienemmällä vaivalla, kun käytetään väyläratkaisua tiedonsiirrossa. COM600-laitteen tai kaukokäyttöjärjestelmän keskusteluun ohjain käyttää IEC 61850 -protokollan MMS-kommunikointia, jolla voidaan siirtää kuormanpudotuksen tila järjestelmille, ohjata kuormanpudotusta sekä näyttää erilaisia tapahtuma- ja hälytyslistoja. PML630-laitteen esimerkkisijoitus sähköasemalla on esitetty kuvassa 23. Kuvassa on myös havainnollistettu IEC 61850 -väylän kytkeytymistä sähköaseman eri laitteiden välille. (ABB 2011b ja 2011e)



Kuva 23: PML630-ohjaimen sijoittaminen sähköasemalla ja kommunikointi eri laitteiden välillä IEC 61850 -protokollaa käyttäen. (ABB 2011b) Kuva suomennettu.

3.6.3 Ohjaimen hyödyt ja rajoitukset kuormanpudotuksessa

Ohjaimen suurimmat hyödyt ovat sen nopeus ja käyttöönoton helppous. PML630 laskee järjestelmän tehotasapainoa 10 ms:n sykleissä ja sen luvataan pystyvän reagoimaan muuttuneeseen tehotasapainoon vain 40–60 ms:ssa. Aika sisältää tiedonsiirron molempiin suuntiin, ohjaimen reagointiajan sekä katkaisijan avautumiseen kuluvaan ajan. Kun PML630 julkaistiin, sillä toteutettiin pilottiprojekti Thaimaalaiseen valimotehtaaseen. Järjestelmä koostui kahdesta kiskosta, yhdestä generaattorista, kahdesta syötöstä järjestelmän ulkopuolelta sekä 12 kuormasta. Testit osoittivat, että viive ensimmäisen katkaisijan avautumiseen oli 63 ms:a siitä, kun jokin tuotantoyksikkö irtosi verkosta. Projektin toteutukseen kului vain kolme kuukautta. PML630 on suunniteltu mahdollisimman helpoksi ottaa käyttöön ja ohjaimen tukemien ABB:n releiden käyttäminen mahdollistaa lähes automaattisen käyttöönoton. Ohjaimen mukana tulee myös kattavat manuaalit siitä, kuinka ohjain tulee asentaa ja ohjelmoida. (Luoma 2011)

PML630 tukee vain rajattua määrää erilaisia verkkokomponentteja. Haittana on, että se rajoittaa ohjaimen soveltuvuutta isommille sähköasemille, mutta antaa toisaalta hyvät rajoitukset siitä, minkä suuruisille asemille ohjain sopii. Ohjaimia voidaan kytkeä asemille useampia, mutta jokainen ohjain tietää tällöin vain oman määritellyn alueensa tehotasapainotilanteen eikä pysty vaikuttamaan toisen alueen kuormanpudotustilanteeseen tai tietämään siitä. Yhteen PML630-ohjaimen voidaan liittää enintään

- 6 generaattoria
- 2 muuntajasyöttöä järjestelmään
- 6 yksittäistä kiskoa
- 4 aliverkkoa, mikä tarkoittaa, että nämä aliverkot voivat toimia itsenäisinä alueina, jolloin tehotasapainoa ylläpidetään kussakin alueilla erikseen
- 23 ohjattavaa katkaisijaa, jotka voivat sisältää enintään 6 katkaisijaa generaattoreille, 2 muuntajasyöttöä sekä 15 kiskokatkaisijaa (kiskojen välinen yhteys voi rakentua joko yhdestä tai kahdesta katkaisijasta)
- 60 pudotettavaa kuormaa tai kuormanpudotusryhmää eri prioriteeteilla jaettuna jokaiselle 6 kiskolle tai enintään 10 kuormaa yhdellä kiskolla. (ABB 2011c)

6 generaattoria ja 2 muuntajasyöttöä voidaan kytkeä enintään neljään eri kiskoon. PML630:n rinnalle voidaan kytkeä toinen PML630, joka parantaa kuormanpudotuksen toimintojen redundanttisuutta. Tällä tavalla ei kuitenkaan voida kasvattaa järjestelmän komponenttien lukumäärää. Toiseen ohjaimen asennetaan tällöin pidempi toimintaviive, jolloin se suorittaa kuormanpudotuksen, jos toisessa ohjaimessa on vikaa. (ABB 2011c ja Luoma 2011)

PML630:ssä ei ole mahdollista toteuttaa automaattista kuormituksen palautusta ongelman poistuttua. Palautus on kuitenkin mahdollista toteuttaa esimerkiksi COM600-laitteessa tai kaukokäyttäjärjestelmässä. COM600 laitteen versiossa 3.5 on valmis toiminnallisuus automaattiseen kuormituksen palautukseen, mutta kuten monessa muussakin projektissa, asiakkaat eivät yleensä halua automaattista kuormituksen palautusta. (Luoma 2011)

Koska PML630:n ohjauskäskyt on suunniteltu annettavaksi IEC 61850 -yhteydellä, ei laitteen ohjelmistossa ole oletuksena käytössä analogisia ja digitaalisia ulos- ja sisääntuloja. Ohjaimessa on kuitenkin 4 analogista virtamuuntajatuloa (1/5 A) ja 5 analogista jännitemuuntajatuloa. Lisäksi ohjaimessa on 14 digitaalista sisääntuloa ja 9 digitaalista ulostuloa. Nämä ulos- ja sisääntulokanavat voidaan ottaa käyttöön erilaisia toimintoja varten ohjelmoimalla niiden ohjauslohkot käyttöön PCM600-ohjelmistolla. Analogisia ja digitaalisia tuloja ei kuitenkaan pysty käyttämään esimerkiksi avauskäskyjen antamiseen katkaisijaan suoraan kytketyllä ohjauskaapelilla versiossa 1.1. (ABB 2011b)

Vaikka ohjain käyttää muiden suojarleiden välisessä kommunikoinnissa kommunikointiväylää, mahdollistaa IEC 61850 nopean liikenteen näiden välillä. PML630:een kytkettävien releiden aiheuttama IEC 61850 -liikenne ei riitä hidastamaan kuormanpudotuksen toimintaa. Releiden määrällä ei siis ole vaikutusta niiden ja PML630:n väliseen liikenteeseen. Joidenkin arvioiden mukaan releiden käyttämä liikenne on vielä pientä, ja vasta noin 200 relettä voisi hidastaa liikennettä. (Luoma 2011)

PML630 takaa yhteensopivuuden vain ABB:n valmistamien ja 600-sarjan suojarleiden kanssa. Muiden valmistajien releiden käyttöönottoaminen voi kuitenkin olla mahdollista. Laitteiden tulee tukea IEC 61850 GOOSE -kommunikointia. PML630 on käytetty Siemensin valmistaman suojarleen kanssa onnistuneesti, mutta haittapuolena on, että ohjelmointivaiheessa on tuntemattomia muuttujia, koska relettä ei pysty asettamaan PCM600-ohjelmistossa. CCT600 mahdollistaa kuitenkin myös kolmannen osapuolen laitteiden ohjelmoimisen. Jos kuormanpudotuksessa on käytetty jotain kolmannen osapuolen suojarlettä, ei laitteistolle taata suorituskykyä. ABB:n vanhempien releiden käyttäminen on myös mahdollista, mutta niidenkin tapauksessa on vaarana, että suorituskyky kärsii erilaisten väylämuuntimien takia. Esimerkiksi REF543:n liittämiseksi IEC 61850 -väylään tarvitaan SPA-ZC400-väylämuunnin, joka muuntaa releen käyttämän SPA-väylän IEC 61850 -väyläksi. Tässä tilanteessa SPA-väylä releen ja muuntimen välillä hidastaa liikennettä merkittävästi. (Luoma 2011)

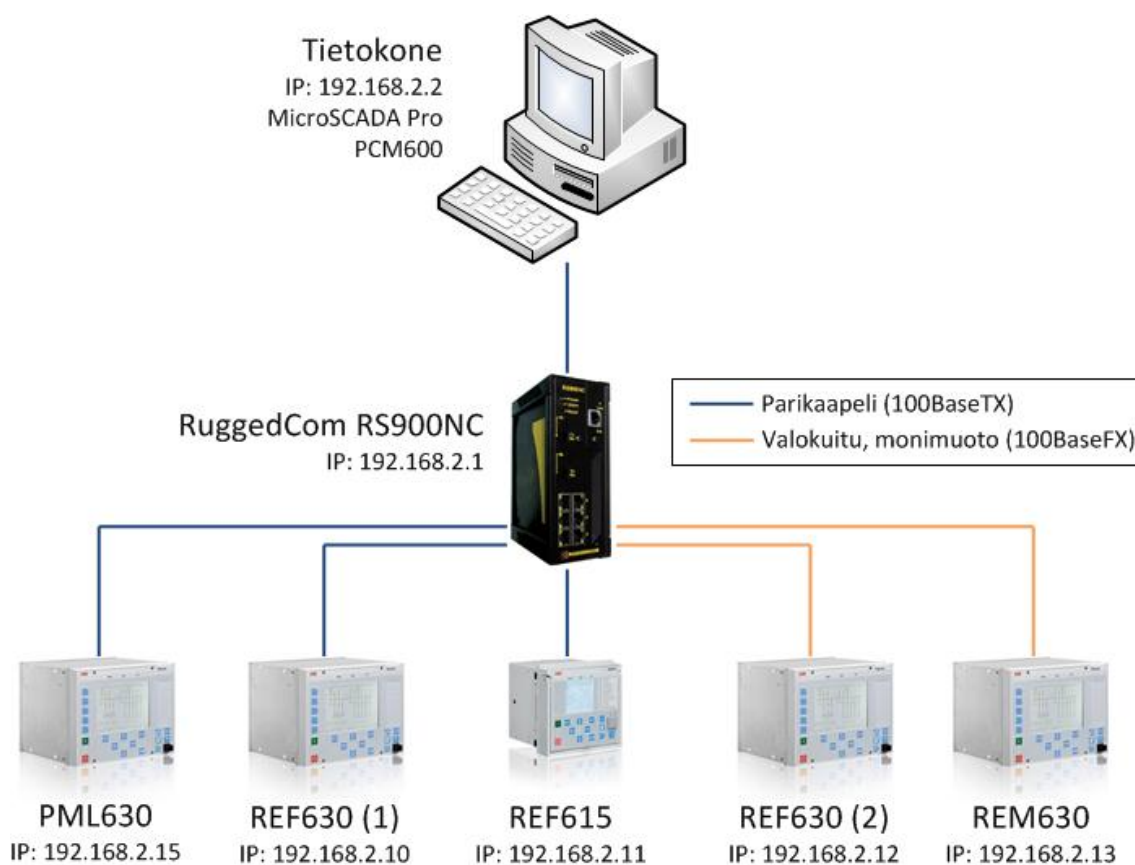
PML630 pääasiallinen markkinointikohde onkin uusissa järjestelmissä. Tällöin järjestelmään voidaan myydä samalla PML630:n tukemat suojarleet ja näin voidaan taata järjestelmän paras suorituskyky. Jos asiakkaalla on esimerkiksi yksi toisen

valmistajan suojarahle, ei sen liittämistä PML630:een yleensä tule ongelmaa, eikä projektia sen takia jätetä toteuttamatta. (Luoma 2011)

4 Testimenetelmät ja tulokset

4.1 Käytettävä testilaitteisto

Työn kokeellinen osuus tehtiin PML630-kuormanpudotusohjaimen toimintojen ja parhaimman käyttöympäristön selvittämiseksi. Simulointia varten käytössä oli neljä ABB:n suojarelettä, joita voitiin käyttää simuloimaan PML630:lle joko syöttöpuolen (syöttömuuntaja tai generaattori) katkaisijoiden, kiskokatkaisijan tai kuormapuolen katkaisijoiden tilatietoja ja kuormitusta. Relekokoonpanoa muuttamalla pystyttiin rakentamaan riittävän monipuolinen testiympäristö ohjaimen eri toimintojen simuloimiseen. Kaikkien tutkimuksessa käytettyjen laitteiden tekniset tiedot on esitetty liitteessä C.

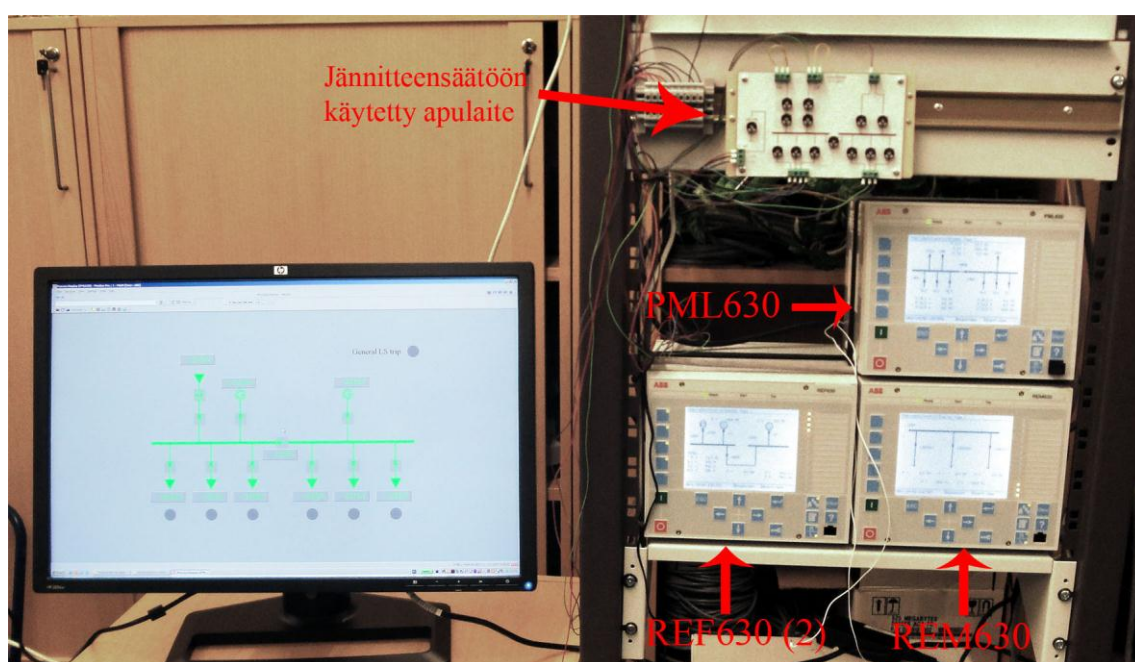


Kuva 24: PML630:n simuloimiseen käytettyjen laitteiden fyysinen kytkentä. Testilaitteisto koostuu tietokoneesta (Microsoft ClipArt-kuva), RuggedCom-kytkimestä (RuggedCom 2010), PML630:stä (ABB 2011d) ja ABB:n suojareleistä (ABB 2011d ja ABB 2010h).

Kuvassa 24 on esitetty PML630:n ja muiden simuloimiseen käytettyjen laitteiden fyysinen verkkokytkentä ja laitteille asetetut IP-osoitteet (Internet Protocol). Eri katkaisijoiden tilatietojen ja kuormitusten simuloimiseen oli käytössä kaksi REF630-suojarelettä, yksi REM630- ja yksi REF615-suojarele. Kaikki releet ja PML630 oli

kytketty samaan verkkoon RuggedCom RS900NC –kytkimellä. RuggedCom takaa kytkimensä toiminnan IEC 61850 –liikenteellä, mikä on tärkeää varsinkin nopean kuormanpudotuksen reagointinopeustesteissä (RuggedCom 2010). Toinen REF630-releistä ja REM630-suojarele oli kytketty kytkimeen valokuitukaapelilla, mutta muuten laitteiden kytkentä tapahtui tavallisella Ethernet-parikaapelilla.

Tietokonetta käytettiin releiden ja PML630:n ohjelmoimiseen PCM600 Engineering Pro -ohjelmalla ja niiden tilatietojen havainnointiin MicroSCADA Pro -kaukokäyttöohjelmistolla. Yhdessä tutkimuksessa haluttiin myös selvittää, mitä ominaisuuksia PML630:stä saadaan tuotua MicroSCADAan ja kuinka näiden toimintojen määrittely MicroSCADAssa tapahtuu.



Kuva 25: Kuva testilaitteistosta. Kuvasta puuttuu REF630 (1) ja REF615. Jännitteensäädön apulaitteella voitiin säätää haluttu jännite releiden jännitesisääntuloihin, joiden avulla saatiin muodostettua releelle jännite ja virta.

4.2 PML630:n käyttöönotto

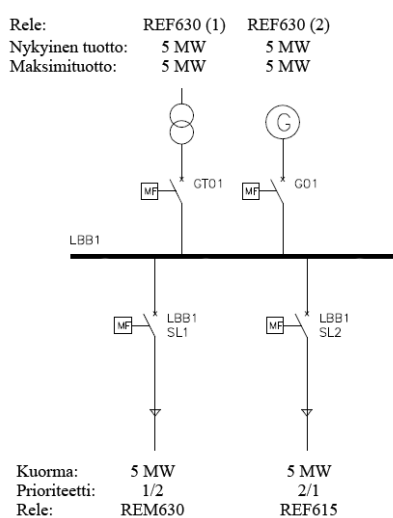
4.2.1 Kokeen tavoitteet ja toteutus

Käyttöönottokeksessä haluttiin tutkia, minkälainen prosessi PML630:n käyttöönotto on ja minkälaisia asioita tulee ottaa huomioon ohjainta ohjelmoitaessa. Erityisesti tässä kokeessa haluttiin löytää sellaiset mahdolliset ominaisuudet, jotka voisivat rajoittaa ohjaimen soveltuvuutta sähköasemalle, joka muuten täyttäisi luvussa 3.6.3 kerrotut laitteen rajoitteet. Kokeessa haluttiin myös tutkia, onko laitteen käyttöönotto niin helppoa kuin sen on sanottu olevan. Luoman (2011) mukaan PML630 on tehty

mahdollisimman helpoksi ottaa käyttöön. Ohjaimen ohjelmointi voidaan tehdä lähes automaattisesti käyttämällä valmista avustajaohjelmaa, jolla sähköverkon rakenne ja releet voidaan helposti määrittää PML630:lle.

Koetta varten muodostettiin kaksi erilaista simuloitavaa sähköasemaa. Toisessa sähköasemista jokaiselle releelle oli määritetty vain yksi katkaisija, mikä on releille normaali käyttötapa. Koska releitä ei kuitenkaan ollut käytössä kuin neljä, haluttiin myös tutkia, onnistuisiko yhdeltä releeltä ottaa käyttöön useampia katkaisijoita, jotka voitaisiin linkittää PML630:lle erillisiksi ja itsenäisiksi syöttö- tai kuormapuolen katkaisijoiksi ja tehotiedoiksi. Tällä tavoin simuloidusta sähköverkosta saadaan monipuolisempi, kun siihen voidaan yhdistää useampi kuorma ja tuotantoyksikkö sekä jakaa ne useammalle kiskolle.

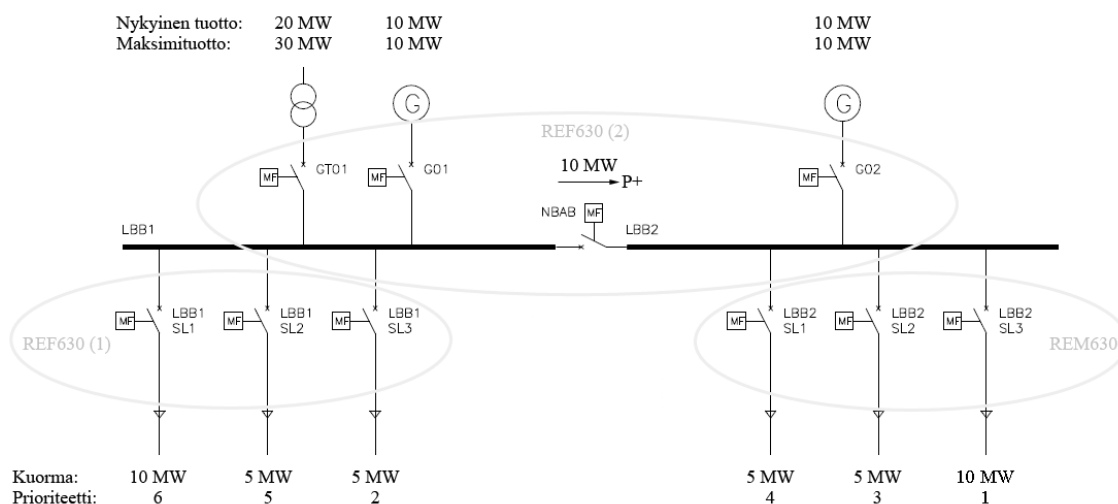
Yksinkertaisemman sähköaseman yksijohdinkuva on esitetty kuvassa 26. Sähköasema koostui yhdestä kiskosta, syöttömuuntajasta, generaattorista ja kahdesta kuormasta. Aseman tuotantoyksiköiden ja kuormien tehot määritettiin kaikki samoiksi, koska asemaa oli tarkoitus käyttää ainoastaan PML630:n reagoitinopeuskokeessa. Tällöin riippuen kuormien prioriteeteista yhden tuotantoyksikön tippuminen verkosta aiheutti vain yhden kuorman irtoamisen. Prioriteettia muuttamalla voitiin valita, kumpi kuormista irtosi. Jokaiseen syöttö- ja kuormayksikköön on merkitty, mikä rele vastaa katkaisijan tilatiedon ja tehon lähettämisestä PML630:lle.



Kuva 26: Yksinkertaisemman simuloitavan sähköverkon yksijohdinkuva.

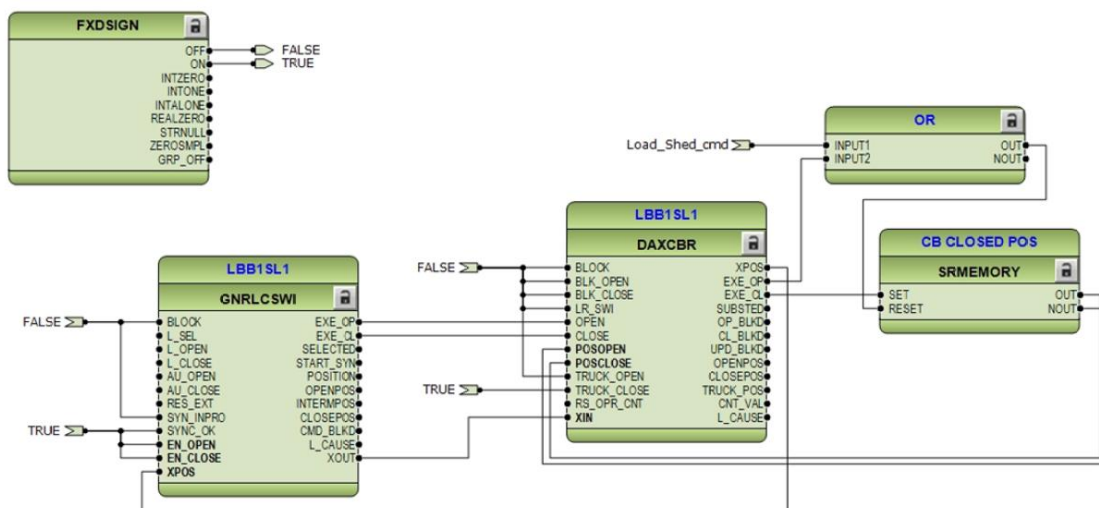
Monipuolisemman sähköaseman yksijohdinkuva on esitetty kuvassa 27. Asema koostui kahdesta kiskosta, niitä yhdistävästä kiskokatkaisijasta, syöttömuuntajasta, kahdesta generaattorista ja kuudesta kuormasta. Kuormien prioriteetit, tehot ja syöttöyksiköiden

tehot pyrittiin määrittämään sellaisiksi, että niiden avulla saatiin mahdollisimman monipuolisia koejärjestelyitä aikaan ilman suuria muutoksia asetuksissa. Releet jaettiin siten, että REF630:llä (1) simuloitiin 1. kiskon kuormat, REM630:llä 2. kiskon kuormat ja REF630:llä (2) molempien kiskojen syötöt ja kiskokatkaisija. Tuotantoyksiköiden tuotantorajoja määriteltäessä ei kiinnitetty huomiota siihen, kuinka todellinen käyttötilanne se sähköasemalle olisi, vaan tehoilla ja reservitehoilla haluttiin luoda mahdollisimman monipuolisia käyttötilanteita ja -ongelmia simuloitulle sähköasemalle.



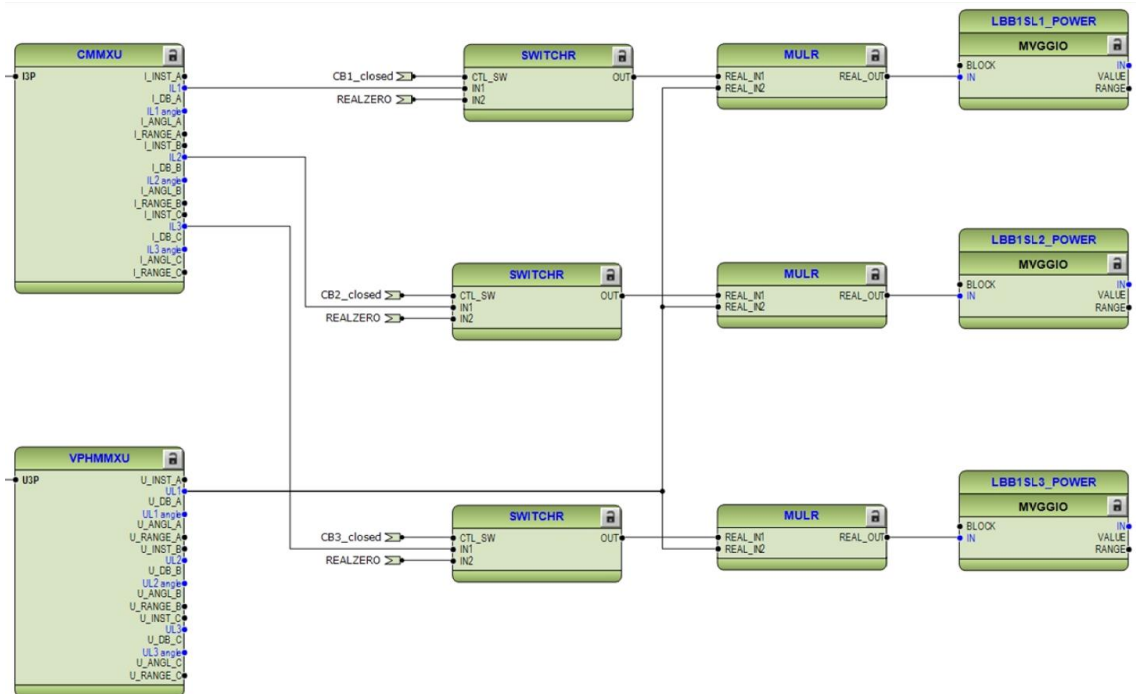
Kuva 27: Monimutkaisemman simuloitavan sähköverkon yksijohdinkuva.

Esivalmisteluina jokaiselta releeltä poistettiin käytöstä kaikki suojauslohkot ja -ominaisuudet, koska kokeissa haluttiin, että ainoat ohjauskäskyt saadaan PML630:ltä, eikä mikään suoja saa laukaista kuormia irti, kun tehoja muutetaan. Lisäksi jokaiselle releelle ohjelmoitiin katkaisijan asentotiedon takaisinkytkentä ohjauskäskyjen mukaan ilman, että apuna tarvitsisi käyttää apureleitä ja muita ulkoisia apukytkentöjä. Katkaisijan asentotiedon takaisinkytkentä muistilohkon avulla on esitetty kuvassa 28. Kytkennän tarkoituksena on, että kun releeltä annetaan katkaisijan kiinniohjaus (DAXCBR-lohkolta), aktivoi se muistilohkon (SRMEMORY), joka syöttää sen jälkeen jatkuvasti aktiivisen signaalin katkaisijan kiinni-asentotietoon. Kun katkaisijalle annetaan avauskäsky joko manuaalisesti tai kuormapuolen releiden tapauksessa PML630:ltä, nollaa se muistilohkon, joka alkaa syöttää aktiivista signaalia katkaisijan auki-asentotietoon. FXDSIGN-lohko syöttää nolla- ja aktiivitietoa sellaisiin katkaisijan ohjauslohkon tuloihin, jotka ilman niitä estäisivät katkaisijan toiminnan. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi erottimien kiinni-asentotiedot.



Kuva 28: Releen katkaisijan asentotiedon takaisinkytkentä erillisen muistilohkon avulla.

Monipuolisempaa simuloitavaa sähköasemaa varten releiltä piti saada oma tehotietonsa jokaista katkaisijaa kohti. Tätä varten teho laskettiin yksivaiheisesti ja vietiin erilliselle mittauslohkolle (MVGGIO). Kuormapuolen releissä (REF630 [1] ja REM630) oli neljä sisääntuloa jännitteen mittaamiselle, ja koska rele ei lähetä mitatun arvon yksikköä lukujen mukana, voitiin kolmea näistä sisääntuloista käyttää virran arvon syöttämiseen ja yhtä jännitteen arvon syöttämiseen. Mitta-arvot saadaan skaalattua muuttamalla releen asetuksia halutuiksi. Syöttöpuolen releessä (REF630 [2]) oli viisi sisääntuloa jännitteelle, jolloin sillä voitiin muodostaa neljä erillistä tehoarvoa. Jännitettä haluttiin käyttää, koska sen syöttäminen ja muuttaminen oli helpompaa kuin virran. Tehon muodostuksen lohkoakaaviokuva on esitetty kuvassa 29. Kertolaskulohkoille (MULR) tuodaan jännitetieto yhdestä sisääntulosta. Virtatieto, joka on siis myös kytketty jännitesisääntuloon, käytetään kytkinlohkon kautta (SWITCHR), joka päästää virran läpi, kun siihen liitetty katkaisija on kiinni. Muussa tapauksessa kytkinlohko päästää nolla-arvon (REALZERO) läpi. Kertolaskulohko laskee jännite- ja virta-arvon tulon ja syöttää sen mittauslohkolle (MVGGIO). Tästä lohkoista tehotieto voidaan lähettää PML630:lle.



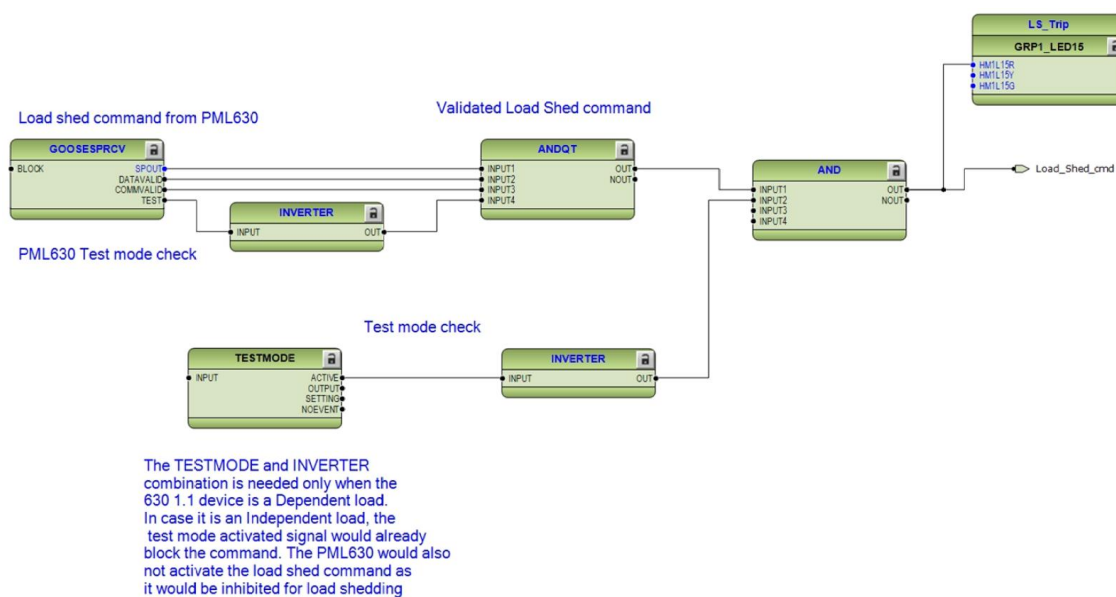
Kuva 29: Tehotietojen muodostaminen kolmelle katkaisijalle.

4.2.2 Tulokset

Tässä luvussa esitetään PML630:n käyttöönoton vaiheita kuitenkin paneutumatta niihin sen tarkemmin. Päähuomio on sellaisissa kohdissa, jotka tulivat yllätyksenä käyttöönottoprosessin aikana ja joihin ei osattu valmistautua suunnitteluvaiheessa.

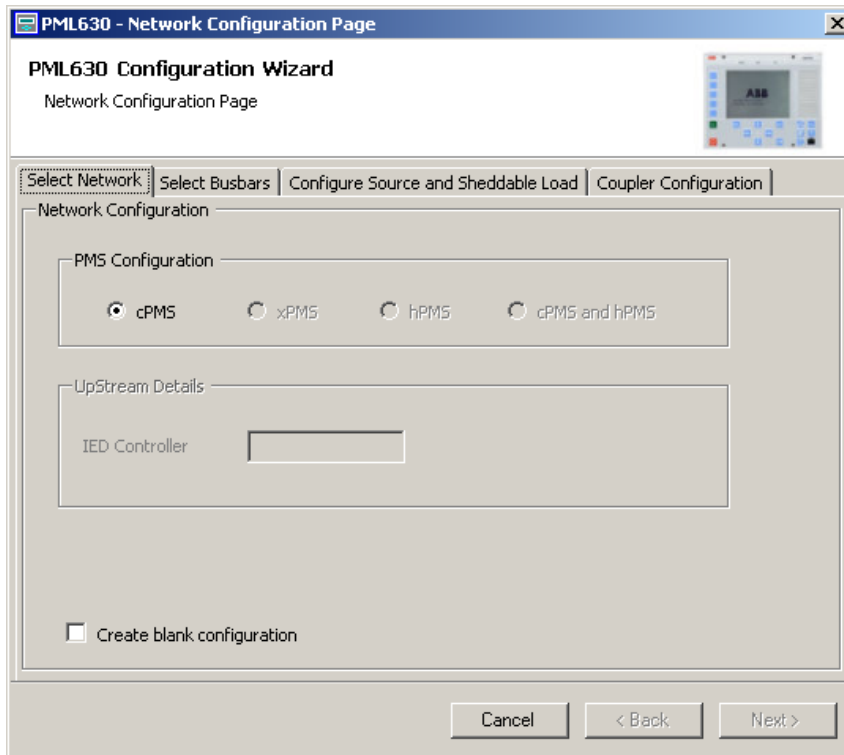
Koetta lähdettiin toteuttamaan PML630:n ohjemateriaalien avustuksella (Engineering Manual ja Application Engineering Guide). Manuaaleissa oli selvitetty erittäin selkeästi kuvia apuna käyttäen, mitä missäkin kohdassa PCM600-ohjelmistossa pitää tehdä. PML630:n yhteyspaketin mukana tulee valmiita ohjelmapohjia 630- ja 615-sarjojen releisiin. Nämä pohjat tuovat kuormapuolen releisiin valmiin toiminnallisuuden GOOSE-viestien käsittelyyn ja kuormanpudotussignaalin muodostamiseen. Käyttäjälle jää vain signaalin kytkeminen katkaisijan laukaisupiiriin. Näissä kokeissa kuormanpudotussignaali yhdistettiin suoraan sen katkaisijan avauskäskyyn, joka nollasi muistilohkon ja alkoi syöttää katkaisijan auki-asentotietoa. Valmis kuormanpudotussignaalin käsittelylohkokaavio 630-sarjan releille on esitetty kuvassa 30. Kaavio koostuu GOOSE-viestien vastaanottolohkosta (GOOESPRCV), joka vastaanottaa katkaisijan avauskäskyn PML630:ltä. Muut lohkot tarkastavat, että annettu viesti on oikea ja että PML630 tai kohderele ei ole testitilassa. Jos kaikki ehdot täyttyvät, luodaan kuormanpudotussignaali, joka on kytketty katkaisijan avauspiiriin. Kuormanpudotussignaali on kytketty myös yhteen releen etupaneelin merkkivaloista

osoittamaan, että katkaisija on avattu PML630:n toimesta. 615-sarjan lohkokaaavio on muuten samanlainen, mutta 615-sarjan releissä ei voida vastaanottaa samassa GOOSE-viestien vastaanottolohkossa tietoa ohjaimen testitilasta. Tätä varten kaaviossa on toinen GOOSE-viestien vastaanottolohko ja käyttöönotto-ohjeessa ohje, miten PML630:n testitieto siihen kytketään.



Kuva 30: PML630:n mukana tuleva 630-sarjan releen valmis kuormanpudotussignaalin käsittelylohkokaavio.

Jotta PML630:n automaattista avustajaa voidaan käyttää, pitää kaikki sähköaseman ja kuormanpudotukseen osallistuvat IED:t määrittää ohjelmistossa. Tämän jälkeen PML630:n avustaja löytää ne. PCM600:ssa määritetyllä sähköaseman rakenteella ei ole väliä, koska sama määrittely tehdään uudelleen avustajassa. Avustajan käyttö on helppoa ja siinä määritellään käytettävät kiskot, niiden väliset yhteydet ja mitä kaikkia tuotantoyksiköitä ja kuormia mihinkin kiskoon liittyy. Avustaja pitää huolen, ettei ohjaimen kytkettävien laitteiden enimmäismäärää ylitetä. PML630 asennuksen avusta on esitetty kuvassa 31.

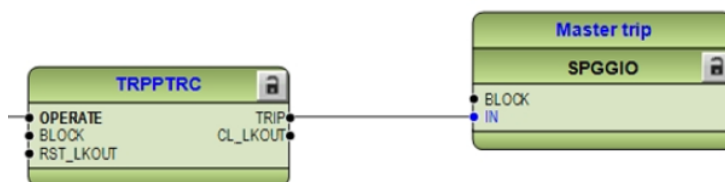


Kuva 31: PML630 asennuksen avustajaohjelma.

Jokaiseen tuotantoyksikön releeseen pitää määrittää tieto katkaisijan käytöstä kuormanpudotuksessa. Käytännössä tämä onnistuu siten, että yksi releen etupaneelin toimintopainikkeista kytketään digitaaliseen mittauslohkoon (SPGGIO), joka lähettää käyttötiedon PML630:lle, kun toimintopainike on aktivoitu. PML630 käyttää tätä tietoa määrittämään vaikuttaako katkaisijan avautuminen ohjaimen toimintaan. Jos signaalia ei ole aktivoitu ja katkaisija avautuu, ei PML630 anna avauskäskyä kuormapuolen releille. Tämän toiminnon kytkentä releessä on esitetty kuvassa 32. Lisäksi tuotantopuolen releiltä pitää kytkeä PML630:een tieto yleisen laukaisulogiikkalohkon toiminnasta. Tähän lohkoon on kytketty kaikki releen suojauslohkojen toimintatiedot ja sen avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi katkaisijan toimintaan, jos jokin suojauslohko aktivoituu. Lohkon toimintatieto liitetään myös digitaaliseen mittauslohkoon, jolloin tieto voidaan lähettää PML630:lle. Yleisen laukaisulogiikkalohkon kytkentä on esitetty kuvassa 33.



Kuva 32: Tuotantoyksikön katkaisijan käyttötilan kytkeminen digitaaliseen mittauslohkoon, josta se voidaan lähettää PML630:lle.



Kuva 33: Releen yleisen laukaisulogiikkalohkon kytkeminen digitaaliseen mittauslohkoon, josta se voidaan lähettää PML630:een.

Kun releet on määritetty, määritellään IEC 61850 GOOSE -liikenne releiden ja PML630:n välille CCT600-ohjelmistolla. Lähetettävien tietojen määrittely onnistui myös ohjekirjan ohjeiden mukaan. Tässä kohtaan koetta ilmeni käytettävien releiden suurin ongelma, josta ei ole mainittu PML630:n myynti- ja asennusmateriaaleissa. Aikaisemmin on vain ilmoitettu, että ohjain tukee ABB:n 615- ja 630-sarjan releitä. Materiaalista ei löytynyt, että myös releiden versioilla on väliä. Releiden pitää olla uusimpia, eli 615-sarjan osalta versio 3.0 ja 630-sarjan osalta versio 1.1. Vanhemmat releet eivät osaa lähettää analogista GOOSE-viestiä, eli juuri tehotietoja, jotka ovat erittäin tärkeitä ohjaimen toiminnan kannalta. Tämä rajoittaa ohjaimen käyttämistä vanhemmissa ja jo olemassa olevissa järjestelmissä.

PML630:n avustaja luo ohjaimen toimintolohkot ja niiden väliset yhteydet automaattisesti. Käyttäjän tarvitsee manuaalisesti asetella vain kuormien prioriteetit ja tuotantoyksiköiden enimmäistuotot. Näiden tietojen asettelu onnistuu helposti ohjekirjan avulla. Syöttömuuntajille voidaan myös määrittellä hidasta kuormanpudotusta varten sen aktivoitumiskuormitus ja kuormitustaso, kun hidas kuormanpudotus on toiminut. Hidasta kuormanpudotusta tutkitaan tarkemmin luvussa 4.4. Yhteyspaketin mukana tulee PML630:n etupaneelin käyttölogiikalle valmis pohja, jonka avulla toimintopainikkeiden ja merkkivalojen ohjelmointi onnistuu helposti. Tässä yhteydessä tarvitsee vain kytkeä logiikan signaalit ohjekirjan mukaan oikeisiin toimintalohkoihin.

Yleisesti PML630:n käyttöönotto on erittäin helppoa, mutta vaatii ohjelmoijalta aikaisempaa kokemusta PCM600- ja CCT600-ohjelmistoista ja releiden ohjelmoimisesta niillä. Molemmat simuloitavista sähköasemista (kuvat 26 ja 27) oli helppo saada määritettyä ja käyttöön PML630:ssä. Releet vaativat hyvin pieniä muutoksia ohjelmistokoodeihinsa, kun ne ohjelmoidaan valmiiksi PML630:tä varten. Tämä säästää huomattavasti aikaa toteutusvaiheessa. Kuormapuolen releille pitää asettaa kuormanpudotussignaalin käsittely ja tuotantopuolen releille katkaisijan käytön

toimintapainike ja yleisen laukaisulogiikan toimintatieto. PML630:n avustajan avulla saadaan luotua toimintolohkot ohjaimelle automaattisesti ja kytkennät niiden välille.

4.3 PML630:n nopean kuormanpudotustoiminnon koe

4.3.1 Kokeen tavoitteet ja toteutus

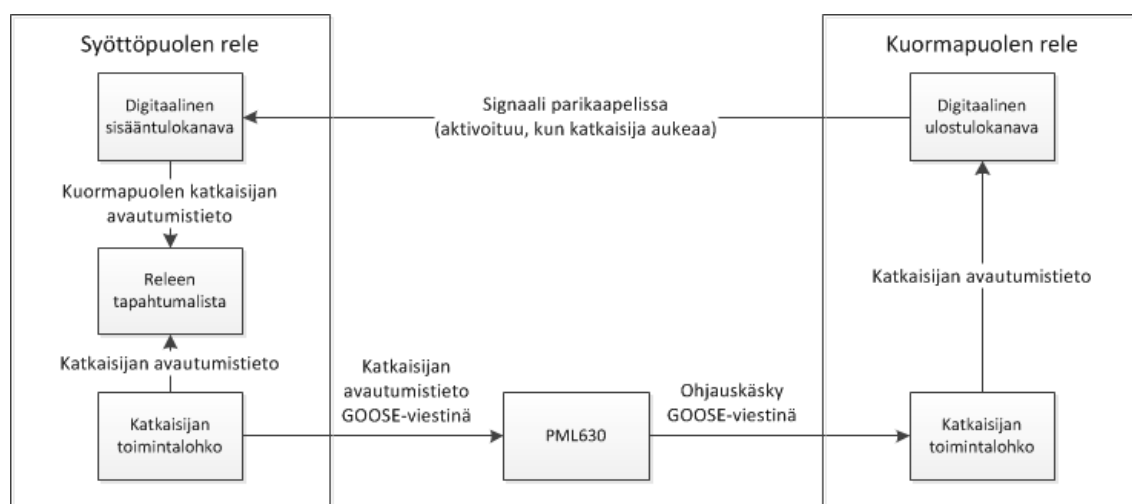
Nopean kuormanpudotuksen koe jaettiin kahteen eri osaan: nopeus- ja toimintakokeeseen. Nopeuskokeessa haluttiin selvittää, kuinka nopeasti PML630 kykenee reagoimaan verkon tuotantovajeeseen, kun tuotantoyksikkö irtoaa verkosta. Toimintakokeessa taas haluttiin selvittää, kuinka PML630 reagoi erilaisiin sähköverkon nopeisiin tuotanto-ongelmiin. Nopeuskokeessa käytettiin kuvan 26 yksinkertaisempaa sähköasemaa, jossa jokainen rele ohjasi vain yhtä katkaisijaa, kuten näiden releiden käyttö on suunniteltu PML630:ssä. Näin voitiin varmistaa, että releet toimivat parhaimmalla mahdollisella nopeudella, eivätkä ohjelmiston muutokset aiheuta ylimääräistä viivettä rektioaikaan. Koska toimintakokeessa ei tarvinnut varmistaa, että releet toimivat mahdollisimman nopeasti, voitiin siinä käyttää kuvan 27 monipuolisempaa sähköasemaa. Toimintakoe toteutettiin luomalla sähköverkkoon erilaisia tuotanto-ongelmatilanteita, joiden avulla haluttiin muodostaa mahdollisimman tarkka kuva PML630:n toimintatavasta ja erityisesti, mitkä seikat rajoittavat sen toimintaa.

Nopeustestiä toteutettaessa kaikkien laitteiden kellonajat piti ensimmäiseksi saada täysin samaan aikaan, jotta laitteiden tapahtumalistoja voitaisiin verrata keskenään luotettavasti. Kellonaikojen piti olla niin tarkasti samoja, että tapahtumia voitaisiin verrata jopa 1 ms tarkkuudella, koska PML630:n reaktioajoissa puhutaan vain muutamasta kymmenestä millisekunnista. Yksi mahdollisuus releiden synkronointiin olisi ollut, että kaikki releet olisi laitettu hakemaan tarkka aika SNTP-palvelimelta, mutta koska luotettavaa SNTP-palvelinta ei ollut saatavilla testilaitteiden suljetun verkon takia, ei releiden tapahtumalistoja voitu verrata keskenään luotettavasti.

Tapahtumien vertailu päätettiin tehdä vain yhdessä syöttöpuolen releessä kerrallaan, ettei tapahtumia tarvitsisi hakea useammasta laitteesta. Tätä varten kuormapuolen releiden katkaisijoiden avautumistiedot vietiin releiden digitaalisiin ulostulokanaviin ja kytkettiin tavallisella parikaapelilla syöttöpuolen releen digitaalisiin sisääntuloportteihin. Nämä sisääntulokanavat kytkettiin syöttöpuolen releen tapahtumalistaan, jonne myös syöttöpuolen katkaisijan avautumistieto oli kytketty. Näin

ollen releiden keskinäisillä aikaeroilla ei ollut väliä ja yhden releen tapahtumalistaan voitiin verrata luotettavasti. Koska 630-sarjan releiden, joita suurin osa testilaitteiston releistä oli, ohjelmistokoodit noudattavat 10 ms:n suoritussykliä, tuloksia vertaillessa tulee ottaa huomioon, että releen tulosignaali on voinut olla aktivoituneena jo enintään 10 ms:n ajan, kun se kirjautuu tapahtumalistaan.

Kuormapuolen katkaisijan avautumistiedon kytkennän periaatekaavio on esitetty kuvassa 34. Kun syöttöpuolen rele aktivoituu esimerkiksi jännitteen tai taajuuden tippumisen takia, avautuu katkaisija ja tapahtuma tallentuu releen tapahtumalistaan. Samalla rele lähettää tiedon PML630:lle, joka kuormitusmatriisia apuna käyttäen lähettää avauskäsken kuormapuolen releelle. Kuormapuolen rele avaa katkaisijan ja aktivoi digitaalisen ulostulokanavan. Tästä kanavasta on kytketty parikaapeli syöttöpuolen releen digitaaliseen sisääntulokanavaan, joka on kytketty releen tapahtumalistaan.

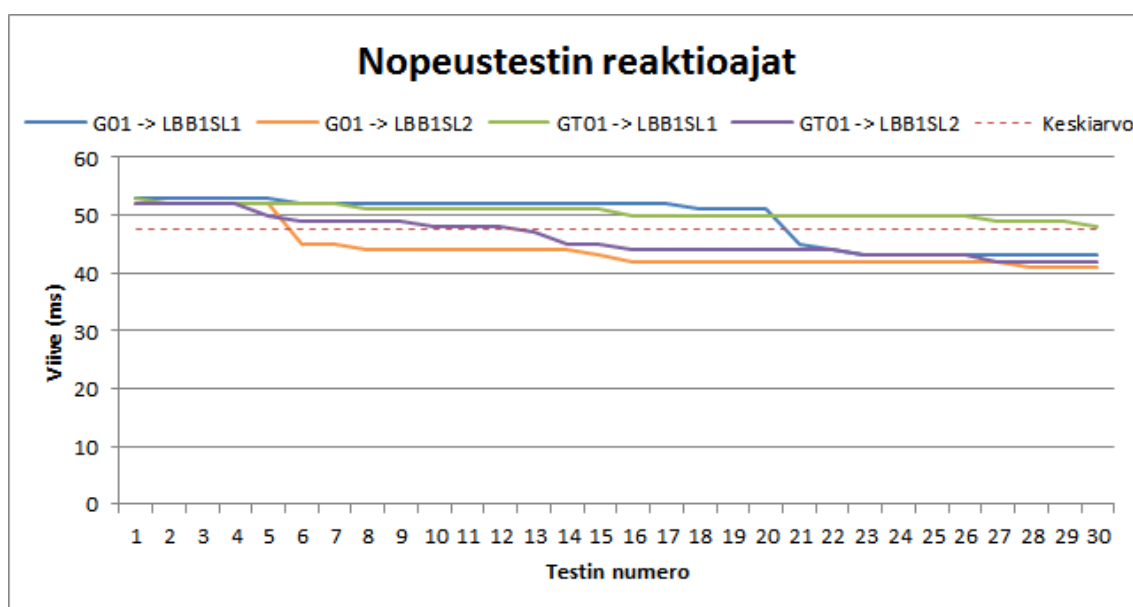


Kuva 34: Kuormapuolen katkaisijan avautumistiedon vienti syöttöpuolen releen tapahtumalistaan.

4.3.2 Reagointinopeuskokeen tulokset

PML630 nopeuskokeessa tehtiin yhteensä 120 toistoa, joissa yksi tuotantoyksikön katkaisija avattiin ja PML630 avasi sen jälkeen kuormapuolen katkaisijan. Kuormitukset ja tuotannot oli aseteltu niin, että PML630:n riitti avata vain yksi katkaisija. Katkaisijoiden prioriteettia muuttamalla voitiin valita, mikä katkaisija avattiin. Koska tuotantoyksiköitä ja kuormia oli molempia kaksi, mahdollisia yhden tuotantoyksikkö-kuorma-yhdistelmiä tuli yhteensä neljä. Näin ollen koetoistoja tehtiin yhteensä 30 jokaista yhdistelmää kohden.

Reagointinopeuskokeen tulosten yhteenveto on esitetty kuvassa 35. Tarkemmat taulukot kokeen reaktioajoista on esitetty liitteen D taulukoissa D.1-D.4. Kuvan koetulokset on järjestetty sarjoihin tuotantoyksikön ja kuorman yhdistelmän mukaan suurimmasta viiveestä pienimpään. Tämä helpottaa niiden vertailua. Sinisellä viivalla on piirretty ne reaktioajat, joissa generaattori G01 irtosi verkosta ja PML630 avasi sen jälkeen kuorman LBB1SL1. Oranssilla ne, joissa generaattori G01 irtosi verkosta ja PML630 avasi kuorman LBB1SL2. Vihreällä ne, joissa syöttömuuntaja GT01 irtosi verkosta ja PML630 avasi kuorman LBB1SL1. Lilalla ne, joissa syöttömuuntaja GT01 irtosi verkosta ja PML630 avasi kuorman LBB1SL2. Lisäksi kuvaan on piirretty punaisella katkoviivalla kaikkien tulosten keskiarvo.



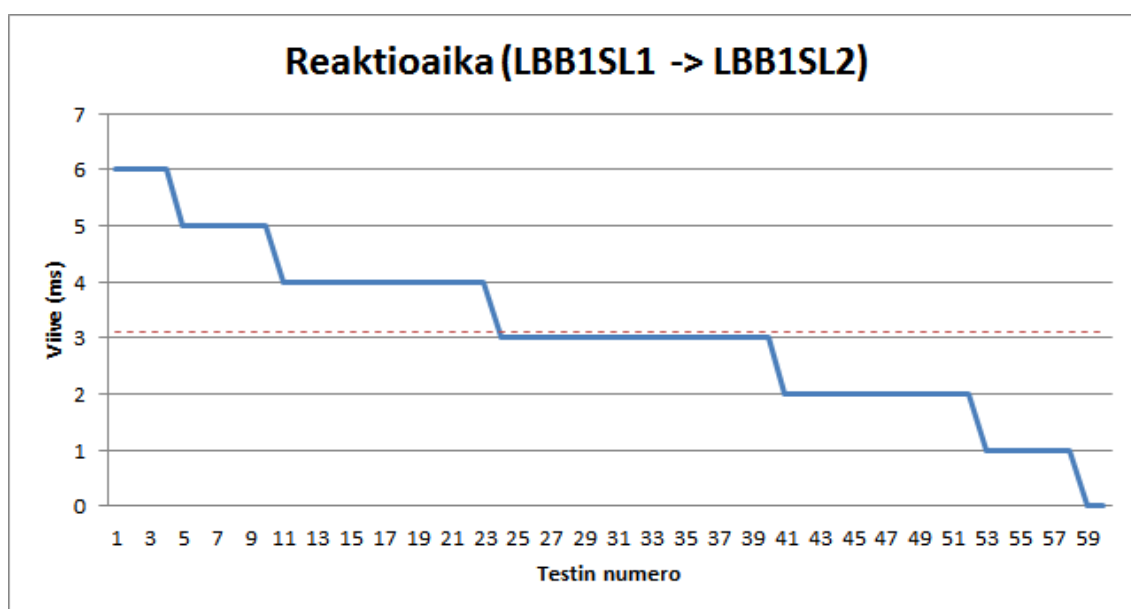
Kuva 35: Reagointinopeuskokeen tulosten yhteenveto.

Kuvan 35 tuloksia tarkastelemalla voidaan todeta, että PML630:n toiminta-ajan keskiarvo on näiden 120 toiston perusteella 48 ms. Enintään aikaa kului 53 ms ja vähintään 41 ms. Tuloksista pitää huomioida, että ne ovat enimmäisaikoja, koska kuormapuolen katkaisijan avautumistieto oli syötetty releen ulostulokanavasta syöttöpuolen releen sisääntulokanavaan. Normaalisti katkaisijan avausohjaus annettaisiin ulostulokanavasta katkaisijalle, joten sen aktivoitumisen viive ei tuo virhettä tuloksiin. Sen sijaan syöttöpuolen sisääntulokanavan viive tuo. Koska releiden sykli aika on 10 ms, on kanava voinut olla aktiivisena jo enintään 10 ms ajan, kun se kirjautuu releen tapahtumalistaan. Pääosin tulokset noudattavatkin tätä 10 ms hajontaa. Lisäksi tulee huomioida, että tapahtumalistan tarkkuus on 1 ms, mikä tuo tuloksiin 1 ms:n virheen.

PML630:n reaktioaika noudattaa siis luvattua 40–60 ms:n viivettä ensimmäisen katkaisijan avautumiseen.

Toisena osana nopeuskoetta haluttiin vielä tutkia, kuinka paljon lisäviivettä tulee toisen katkaisijan avautumiseen. Useassa kommunikointiväyläprotokollassa viestien lähetyksessä on aina viivettä, jos niitä lähetetään useampia. Joissain seuraava viesti lähetetään vasta, kun edellisen perillemenosta on saatu kuittaus.

Koetta varten kuvan 26 sähköaseman kuormien tehoja säädettiin siten, että yhden kuorman irrottaminen ei enää riittänyt, vaan molemmat piti irrottaa. Koe suoritettiin vain syöttömuuntajan GT01 irtoamisena, mutta kuormien prioriteetteja muutettiin puolessa välissä toisinpäin. Toistoja tehtiin yhteensä 60. Testin reaktioajan yhteenveto on esitetty kuvassa 36. Tarkempi listaus aikaleimoista on liitteen D taulukossa D.5. Taulukon ensimmäiset 30 tulosta on saatu asetuksilla, joissa kuorman LBB1SL1 prioriteetti oli heikompi kuin kuorman LBB1SL2. Lopuissa 30 tuloksessa prioriteetit ovat toisinpäin. Kuvassa on esitetty avautumisviiveiden itseisarvot järjestettynä suurimmasta viiveestä pienimpään. Kuvaan on piirretty punaisella katkoviivalla tulosten keskiarvo.



Kuva 36: Kahden kuormapuolen katkaisijan välinen avautumisviive.

Kuvasta 36 voidaan havaita, että tulokset jakautuvat välille 0–6 ms, joka sisältyy releen virheeseen. Tämän takia tuloksia ei oikein voida vertailla. Tarkemmasta listauksesta aikaleimoista liitteen D taulukossa D.5 voidaan todeta, että olivat prioriteetit mitkä tahansa, kuorma LBB1SL2 aukeaa lähes aina ennen kuormaa LBB1SL1. Tämä johtuu

siitä, että 615-sarjan releiden, jollainen kuorma LBB1SL2 oli, sykli aika on 2,5 ms. Rele siis pystyy reagoimaan keskimääräisesti nopeammin sille annettuihin avauskäskyihin kuin 630-sarjan rele ja aktivoimaan nopeammin ulostulokanavan. Sama tulos voidaan havaita myös kuvan 35 tapauksessa, jossa kuorman LBB1SL2 avautumistapauksissa on keskiarvallisesti hieman pienempi viive.

PML630 lähettää katkaisijoiden avauskäskyt samassa viestipaketissa ryhmälähetyspaketina (engl. Multicast) yleisellä osoitteella, josta jokainen osoiteavaruuteen määritetty rele sen saa. Ryhmälähetysryhmät on jaettu ryhmiin siten, että kaikkien kiskojen ensimmäiset kuormat ovat samassa ryhmälähetysryhmässä, toiset kuormat omassa ja niin edelleen.

Tuloksista voidaan todeta, että pakettien lähetyksessä ei ole suurta viivettä ja useampi katkaisija aukeaa hyvin pienellä viiveellä. Ei myöskään vaikuttaisi olevan väliä, kuuluvatko katkaisijat eri ryhmälähetysryhmiin.

4.3.3 Toimintatapakokeen tulokset

Tässä luvussa kerrotaan PML630:llä tehdyistä kuormanpudotuksen toimintakokeista. Jokaisesta kokeesta on kerrottu, mikä oli kokeen lähtötilanne, kuinka PML630 reagoi siihen ja mitä johtopäätöksiä siitä voidaan tehdä. Jos muuta ei ole ilmoitettu, alussa kaikki kuvan 27 sähköaseman katkaisijat olivat kiinnitilassa eli tuotantoyksiköiden ja kuormien tehot sekä kuormien prioriteetit olivat kuvan 27 mukaiset.

Ensimmäisessä testissä irrotettiin sähköaseman syöttömuuntaja GT01 verkosta. Irtoamisen seurauksena PML630 avasi kuormat LBB2SL3, LBB1SL3 ja LBB2SL2. Tästä voidaan todeta, että ohjain osaa laskea vaadittavan irrotettavan kuorman määrän ja jos heikoin prioriteetti ei yksin riitä, avaa ohjain tarvittavan määrän lisää kuormia heikoimmasta kuormasta alkaen. Kokeessa tuotantovajeeksi tuli 20 MW, koska molemmat generaattorit pyörivät jo täydellä teholla eikä käytettävissä näin ollen ollut yhtään reservituotantoa. Ei myöskään ole väliä, missä kiskoissa kuormat sijaitsevat, vaan jos kiskokatkaisija on kiinni, irrotetaan kuormitusta koko aseman heikoimmista prioriteeteista alkaen.

Toisessa kokeessa katsottiin kuinka ohjain reagoi tilanteeseen, jossa jompikumpi generaattoreista menetetään. Jos generaattori G02 irrotettiin verkosta, ohjain ei irrotanut yhtään kuormaa. Tämä johtui siitä, että syöttömuuntajalla GT01 oli 10 MW

reservituotantoa, joten se pystyi korvaamaan irronneen generaattorin tuotannon. Jos verkosta irrotettiin vielä lisäksi generaattori G01, irrotti ohjain kuorman LBB2SL3. Tässä tapauksessa syöttömuuntajalla ei ollut enää reservituotantoa ja ohjaimen piti vähentää heikoimmasta prioriteetista generaattorin G01 tuotantoa vastaava teho.

Toista koetta muutettiin vielä siten, että heikoimman prioriteetin (1), kuorma laskettiin 5 MW:iin ja toiseksi heikoimman prioriteetin kuorma nostettiin 10 MW:iin. Kokeella haluttiin simuloida tilannetta, jossa heikoimman prioriteetin kuorman irrottaminen yksinään ei riitä, mutta toiseksi heikoimman prioriteetin kuorman irrottaminen riittäisi yksinään. Kun nyt molemmat generaattorit irrotettiin verkosta syöttömuuntajan lisäksi, irrotti ohjain molemmat heikoimman prioriteetin kuormat LBB2SL3 ja LBB1SL3. Kokeen perusteella voidaan siis todeta, ettei ohjain osaa ottaa huomioon tilannetta, jossa toiseksi heikoin prioriteetti riittäisi yksinäänkin, vaan ohjain irrottaa molemmat kuormat. Seuraavaksi koetta muutettiin sen verran, että kuormien tehot palautettiin alkuarvoihin, mutta niiden prioriteetit laitettiin samoiksi. Kun nyt molemmat generaattorit irrotettiin verkosta, avasi ohjain molemmat kuormat edelleen, vaikka vain toinen olisi riittänyt. Kokeen perusteella voidaan todeta, että PML630 irrottaa kuormitusta aina prioriteettitaso kerrallaan, ei kuorma kerrallaan. Jos kiskokatkaisija oli auki, eli samaa prioriteettia käytettiin eri aliverkoissa, ei ohjain enää avannut molempia katkaisijoita, vaan sen aliverkon katkaisijan, jossa tuotantovaje oli. Samoja prioriteetteja voidaan siis käyttää eri aliverkoissa, mutta jos ne ovat samassa verkossa, irrotetaan kaikki sen prioriteetin kuormat tuotanto-ongelmassa.

Seuraavassa kokeessa avattiin kiskokatkaisija, jolloin kiskoon LBB2 tuli tuotantovaje, koska kiskokatkaisijan kautta siirrettiin 10 MW teho kiskoon. Tässäkin tapauksessa ohjain avasi onnistuneesti kuorman LBB2SL3. Kokeen perusteella voidaan todeta, että kiskokatkaisija toimii hyvin tuotantoyksikkönä ohjaimelle, eli jos se aukeaa, vähentää ohjain kiskokatkaisijan kautta siirretyn tehon määrän kuormitusta siitä kiskosta, jonne teho siirrettiin. Kiskokatkaisijaa ei saada toimimaan kuormituksena, eli PML630 ei avaa itse kiskokatkaisijaa missään vaiheessa.

Kun kahdelle tuotantoyksikön katkaisijalle annettiin avauskäsky samaan aikaan, ei ohjaimella ollut ongelmaa vähentää niiden aiheuttamaa tuotantovajetta vastaavaa määrää kuormaa. Jos esimerkiksi avauskäsky annettiin samaan aikaan syöttömuuntajalle GT01 ja generaattorille G02, jätti ohjain ainoastaan kuorman LBB1SL1 kiinni ja avasi muut. Ohjaimen toiminta oli oikein, koska verkkoon jäi ainoastaan 10 MW:a tuotantoa

ja kuorman LBB1SL1 prioriteetti oli korkein sekä kuormitus juuri 10 MW. Jos verkko jää tuotantoyksiköiden irtoamisen jälkeen jännitteettömäksi, ei ohjain avaa yhtään kuormaa.

Eri kokeissa huomattiin, että PML630:n toiminta perustuu vain tehomatriisin laskemiseen. Ohjain päivittää tehomatriisia muuttuvan tehotilanteen mukaan. Matriisissa on määritetty, mitä kuormituksia pitää irrottaa, jos jokin tuotantoyksikkö irtoaa verkosta. Ohjain ei siis reagoi sellaisiin tilanteisiin, joissa jonkin lähdön kuormitus kasvaa tai jonkin tuotantoyksikön tuotanto laskee, mikä voisi aiheuttaa ylikuormitusta muualle verkkoon ja mahdollisesti verkon romahtamisen. Tällaisia tilanteita varten on ilmeisesti ajateltu, että lähdön suojarile irrottaisi kuorman ennen verkon romahtamista tai jos johonkin tuotantoyksikköön tulee ongelma, sen yksikön suojarile irrottaa sen verkosta. Tuotantoyksiköiden ylikuormittumista varten ohjaimessa on hidas kuormanpudotus, joka reagoi tilanteisiin, joissa verkon kuormitus kasvaa ilman tuotantoyksiköiden menettämistä. Hitaassa kuormanpudotuksessa ongelmaksi voi muodostua, että se on käytössä vain syöttömuuntajilla, eikä generaattoreilla ole PML630:ssä mitään suojaa ylikuormitusta vastaan. Generaattorin oma suoja laukaisee sen verkosta, jos kuormitus kasvaa liian suureksi, mutta tällöin koko tuotantoyksikkö menetetään ja kuormitusta joudutaan irrottamaan koko kuormituksen verran, kun alun perin olisi riittänyt vähentää vain ylikuorman määrää.

PML630 ei myöskään välttele kuormien yli-irrottamista, vaan irrottaa kuormitusta aina prioriteettitaso kerrallaan niin kauan, että tarvittava kuorman määrä saadaan vähennettyä. Joissain tapauksissa lopullinen irrotettavan kuorman määrä voi olla hyvinkin paljon enemmän kuin menetetty tuotanto. Tässä menetelmässä vaarana voisi olla joissain tilanteissa, että verkkoon tulee hetkellisesti ylituotantoa ja verkon taajuus pääsee nousemaan liian suureksi. Ilmeisesti kuitenkin on ajateltu, että esimerkiksi generaattoreiden tehonsäätö toimii riittävän nopeasti, eikä tällaisia ylituotantotilanteita pääse syntymään.

Toimintakokeissa onnistuttiin muodostamaan hyvä kuva PML630:n toimintaperiaatteesta. Tehdyillä simuloinneilla pystyttiin muodostamaan mahdollisimman erilaisia käyttöongelmia, joihin PML630 reagoi. Koska kuormia irrotetaan aina prioriteettitaso kerrallaan, on perusteltua, että ohjaimessa on niinkin monta prioriteettitasoa kuin 19. Jos asemalla voi olla enintään 60 kuormaa, voisi joissain tapauksissa olla tarve jopa enemmän prioriteettimäärälle. Eri asia on, onko

yhdellä asemalla koskaan tarvetta irrottaa yli 19 kuormaa siten, ettei niistä mitään voisi irrottaa samaan aikaan.

4.4 PML630:n hitaan kuormanpudotustoiminnon koe

4.4.1 Kokeen tavoitteet ja toteutus

Hitaan kuormanpudotuksen kokeessa haluttiin tutkia, kuinka PML630:n hidasta kuormanpudotus toimii. Hitaan kuormanpudotuksen tarkoituksenaan on, että tuotanto-ongelmissa voidaan kuormittaa tilapäisesti syöttömuuntajia ylikuormalla. Jos ongelmaa ei kyetä ratkaisemaan määrättyssä ajassa, kuormaa pudotetaan niin paljon, että muuntaja ei vaurioidu. Kokeessa haluttiin erityisesti selvittää, minkälaisilla asetuksilla muuntajan ylikuormituksen kesto ja määrään voidaan vaikuttaa. Koe toteutettiin kuvan 27 monipuolisemmalla sähköasemalla.

Ensimmäiseksi koetta toteutettaessa tutustuttiin PML630:ssä määriteltäviin hitaan kuormanpudotuksen parametreihin ja mihin näiden asetellut arvot vaikuttavat. Sen jälkeen näiden parametrien vaikutusta kokeiltiin käytännössä testilaitteistolla asettamalla syöttömuuntajan teho ja vaihevirta suuremmaksi ja mittaamalla kuinka nopeasti PML630 pudottaa kuormitusta. Hitaan kuormanpudotuksen raja-arvot voidaan määrittää erikseen molemmille syöttömuuntajille.

4.4.2 Tulokset

PML630:n hidasta kuormanpudotusta testattiin muuttamalla kuvan 37 punaisella ja vihreällä rajattuja parametreja, jotka vaikuttavat siihen, missä ylikuormitustilanteessa hidasta kuormanpudotusta käytetään ja kuinka nopeasti kuormaa vähennetään. Hidas kuormanpudotus jakautuu PML630:ssä kahteen ominaisuuteen: ylivirta- ja ylikuormituskuormanpudotukseen. Kuvassa 37 hitaan ylivirtakuormanpudotuksen parametrit on rajattu punaisella ja ylikuormituskuormanpudotuksen parametrit vihreällä. Ylimmät kaksi parametria määrittävät, käytetäänkö näitä ominaisuuksia. Ylivirtakuormanpudotusta varten määritellään maksimivaihevirta, jonka ylitettyä hidasta kuormanpudotus toimii, kun sille määritetty aikaraja täyttyy. Seuraavia kolmea parametria käytetään aikarajan määrittämiseen, josta on kerrottu paremmin seuraavassa kappaleessa. Viimeinen ylivirtakuormanpudotuksen parametri määrittää kuormitustason, jolle syöttömuuntajan kuorma pitää saada hitaan kuormanpudotuksen toimimisen jälkeen. Erillinen tehotason määrittäminen ylikuormituksen jälkeen on tärkeää, koska muuntaja on ehtinyt lämmetä ylikuormituksen aikana ja vaatii sen jälkeen

pienempää kuormitusta, että muuntaja ehtii jäähtyä. Ylikuormituskuormanpudotukselle määritetään aika- ja kuormitusraja. Jos syöttömuuntajan kuormitus on yli määritetyn rajan ja ajan, toimii hidas kuormanpudotus.

| Group / Parameter Name | IED Value | PC Value | Unit | Min | Max |
|------------------------|-----------|----------------|------|-------|----------|
| PWSMMXU: 1 | | | | | |
| Grid 1 | | | | | |
| En Max Demsh Grd1 | | Yes | | | |
| Ol loadsh En Grd1 | | Yes | | | |
| Max power Grd1 | | 30000,0 | kW | 0,0 | 999999,9 |
| Max current Grd1 | | 1500,00 | A | 0,00 | 99999,99 |
| Pickup Grd1 | | 1,00 | | 0,00 | 5,00 |
| IDMT exponent Grd1 | | 0,200 | | 0,000 | 2,000 |
| Time multiplier Grd1 | | 1,00 | | 0,00 | 1,00 |
| Busbar Num Grd1 | | Load Bus Bar 1 | | | |
| Power direction Grd1 | | positive | | | |
| Time interval Grd1 | | 1 Minute | | | |
| Max Pow SLT Grd1 | | 20000,0 | kW | 0,0 | 999999,9 |
| Power unit Grd1 | | W | | | |
| Max demand Grd1 | | 32000,0 | kW | 0,0 | 999999,9 |

Kuva 37: PML630 1. syöttömuuntajan parametrit. Hitaan kuormanpudotuksen parametrit rajattu punaisella ja vihreällä. Ylivirtakuormanpudotuksen parametrit on punaisella rajattu ja ylikuormituskuormanpudotuksen parametrit vihreällä.

PML630 käyttää hitaan kuormanpudotuksen aikarajan määrittämiseen kaavassa 10 esitettyä laskukaavaa. Kaava käyttää sen hetkistä suurinta vaihevirtaa ja muita kuvan 37 määritettyjä ylivirtakuormanpudotuksen aikarajan parametreja. Tulokseksi saadaan sekunteina aikaraja, jonka jälkeen kuormaa pudotetaan, jos kuormitus ei ennen sitä ole laskenut normaalille tasolle. PML630 päivittää aikarajaa mitatun vaihevirran mukaan. Kaavan parametrit määritetään esimerkiksi muuntajan valmistajan antamien tietojen mukaan, koska jotkin muuntajat kestävät suurempaa ylikuormitusta kuin toiset. Kun parametrit on määritelty, toimii PML630 sitä nopeammin, mitä suurempi vaihevirta on. Kun aikaraja on täyttynyt, toimii PML630 kuten nopeassa kuormanpudotuksessa ja pudottaa kuormaa niin paljon kuin kuormitusta on yli hitaan kuormanpudotuksen jälkeiselle tasolle.

$$t = \left(\frac{1}{\left(\frac{I}{Max\ current\ Grd1 * Pickup\ Grd1} \right)^{IDMT\ exponent\ Grd1} - 1} \right) * Time\ multiplier\ Grd1 \quad (10)$$

, jossa t on hitaan kuormanpudotuksen viive sekunneissa,
 I on suurin vaihevirta ampeereina,
 $Max\ current\ Grd1$ on kuvan 37 parametri suurimmasta vaihevirrasta ampeereina, jonka jälkeen hidas kuormanpudotus toimii,
 $Pickup\ Grd1$ on kuvan 37 kerroinparametri maksimivirralla,
 $IDMT\ exponent\ Grd1$ on kuvan 37 eksponenttikerroinparametri kaavaan ja
 $Time\ multiplier\ Grd1$ on kuvan 37 aikakerroinparametri (ABB 2011l, s. 161)

Koetta suoritettaessa havaittiin, että oletuksena releet lähettävät uudet teho- ja virtatiedot liian harvoin PML630:lle. Tämä viive voi olla jopa 10 s, kuten se releissä on alun perin määriteltä. Koetta toteutettaessa tehotietojen päivittymisen viive kävi ilmi, kun PML630 tiputti kuormitusta hitaan kuormanpudotuksen aktivoiduttua. Koska uusi tehotieto päivittyi vasta 10 s:n päästä, irrotti ohjain kuormia noin 2 s:n välein aina lisää niin pitkään, että uusi tehotieto päivittyi ohjaimeen, eli lähetettiin syöttömuuntajan releeltä. Tehotiedon lähetyaikaa voidaan pienentää releen ohjelmoinnissa pienimmillään 1 sekuntiin muuttamalla tehomittauslohkon db-arvoa, joka riittää PML630:n hitaan kuormanpudotuksen toimintaan.

Kuvan 37 mukaisilla parametreilla ja syöttämällä syöttömuuntajan vaihevirraksi eri virran arvoja, saatiin hitaan kuormanpudotuksen reagointiajaksi taulukossa 1 esitetyt ajat. Taulukkoon on myös laskettu kaavasta 10 laskettu teoreettinen aika. Tulokset ovat riittävän lähellä toisiaan, koska syötetyn virran arvo ei pysynyt täysin vakiona testien aikana ja heilunnan ottaminen huomioon laskennallisessa viiveessä oli vaikeaa.

Taulukko 1: PML630:n hitaan kuormanpudotuksen reagointiaika ja laskennallinen reagointiaika kaavasta 10 virran eri arvoilla.

| Virta (A) | Mitattu viive (s) | Laskennallinen viive (s) |
|-----------|-------------------|--------------------------|
| 1674 | 46 | 45 |
| 1780 | 30 | 29 |
| 2034 | 17 | 16 |

Kokeen perusteella voidaan todeta, että PML630:n hitaan kuormanpudotuksen ominaisuudet ovat erittäin monipuoliset ja ne toimivat luvulla tavalla ja luvatuissa aikarajoissa. Sähköaseman muut releet vaativat ohjelmointivaiheessa muutoksen, että teho- ja virtatieto lähetetään mahdollisimman usein ohjaimelle. Tietojen minimilähetyisaika, 1 s, riittää hyvin PML630:lle, koska ohjain avaa uuden kuorman vasta noin 2 s kuluttua, jos syöttömuuntajan teho tai virta ei ole pienentynyt halutulle tasolle.

4.5 PML630:n käyttöönotto MicroSCADAssa

4.5.1 Kokeen tavoitteet ja toteutus

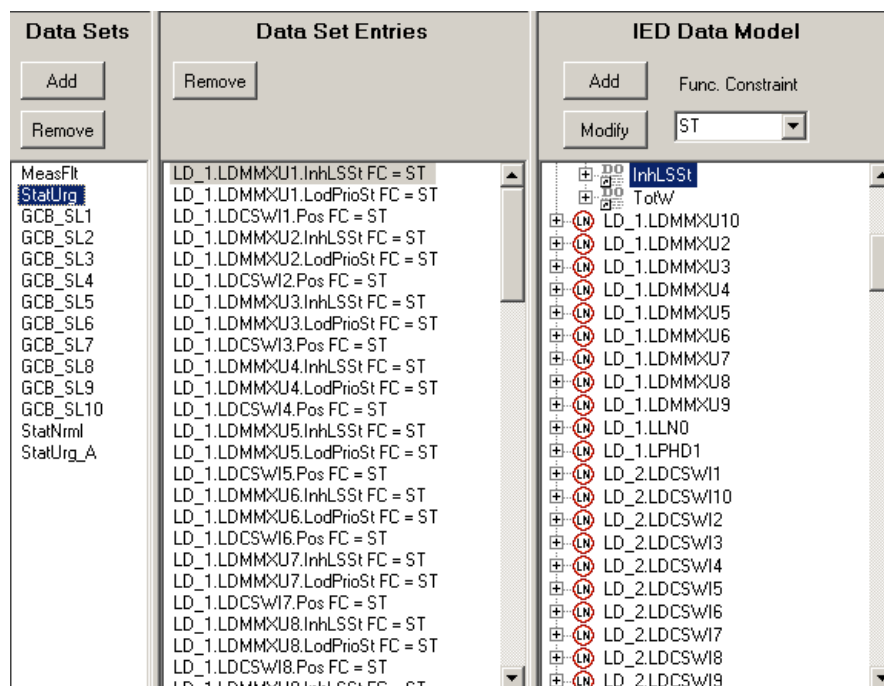
PML630:n käyttöönottokokeessa MicroSCADAssa haluttiin selvittää, mitä kaikkia ominaisuuksia ohjaimesta voidaan määrittää kaukokäyttöjärjestelmään ja kuinka näitä ominaisuuksia käytetään. MicroSCADA pystyy määrittämään ABB:n suojarileiltä esimerkiksi katkaisijoiden ohjauslohkot automaattisesti, jolloin tiedot saadaan tuotua automaattisesti tietokantaan ja tuonnin jälkeen katkaisijan kuvake voidaan vetää suoraan kuvaan, eikä erillisiä asetusten määrittämissä tarvita. Tätä samaa haluttiin kokeilla PML630:lle, eli että saadaanko nämä ominaisuudet automaattisesti MicroSCADAn käyttöön vai pitääkö ne ottaa manuaalisesti käyttöön, eli määrittää esimerkiksi katkaisijan kuvake juuri tiettyyn tietokannan pisteeseen.

Koetta varten halutut PML630:n lähettämät tiedot kaukokäyttöjärjestelmille tulee lisätä ohjaimen datapaketteihin (engl. Datasets) CCT600-ohjelmalla. Datapaketit sisältävät tiedot lohkoista ja parametreista, jotka ohjain lähettää IEC 61850 MMS -liikenteellä kaukokäyttöjärjestelmälle. Kun halutut datapaketit on muodostettu, luodaan ohjaimesta CID-määrittelytiedosto, joka voidaan tuoda MicroSCADAn OPC-palvelimelle ja linkittää sen jälkeen OPC-asiakasohjelmiston avulla MicroSCADAn tietokantapisteisiin.

4.5.2 Tulokset

PML630:n käyttöönottokoetta toteutettaessa huomattiin, että ohjaimen avustaja luo jo valmiiksi datapaketit kaukokäyttöjärjestelmiä varten ja laittaa niihin tarvittavat kuormanpudotuslohkojen parametrit. Tämä helpottaa ohjelmointia huomattavasti, koska datapaketteihin ei tarvitse koskea käytännössä ollenkaan, eikä näin ollen tarvitse huolehtia, että kaikki tarvittava tieto olisi niihin muistettu lisätä. PML630:n datapaketit sisältävät tiedot muun muassa katkaisijoiden asennoista, nykyisestä tehosta,

tehoreservistä, kuormanpudotuksen estoista ja aktivoitumisista. Kuvassa 38 on esitetty monipuolisemman sähköaseman (kuva 27) tapauksessa luodut valmiit PML630:n datapaketit. Parametrien nimet noudattavat IEC 61850 -standardia ja niiden selitykset voi lukea PML630:n IEC 61850 Point List Manual -ohjeesta.



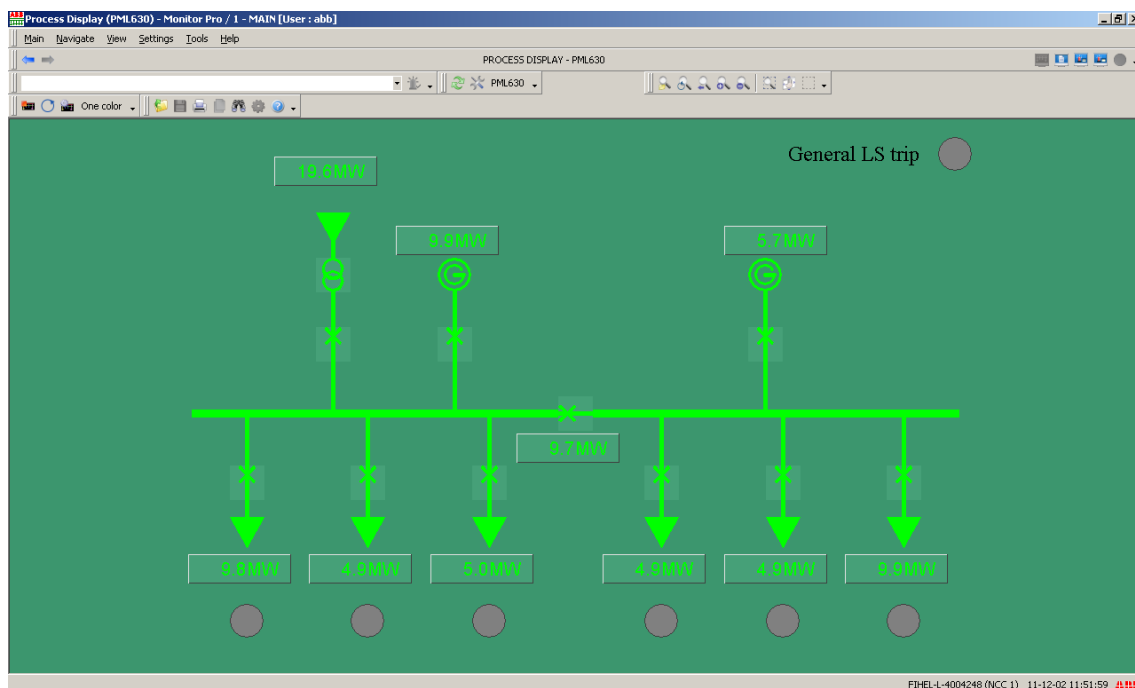
Kuva 38: Esimerkki PML630 datapaketin sisällöstä.

Datapakettien luonnin jälkeen voitiin ohjaimen asetukset viedä PCM600-ohjelmassa CID-määrittelytiedostoksi, joka pitää sisällään muun muassa ohjaimen liikennöintiä koskevat tiedot. Tämän tiedoston avulla ohjain voidaan tuoda MicroSCADAn OPC-palvelimelle. Palvelin sisältää tiedoston tuonnin jälkeen samat tiedot ohjaimesta ja sen IEC 61850 -parametreista kuin CCT600-ohjelmalla voidaan nähdä. Kokeessa tietojen tuonti OPC-palvelimelle onnistui ongelmitta.

Kun ohjain oli tuotu OPC-palvelimelle ja oli varmistuttu palvelimen diagnostiikkaohjelmalla, että liikennöinti toimii palvelimen ja ohjaimen välillä, piti seuraavaksi määrittää ohjaimesta tuotavat pisteet MicroSCADAn tietokantaan. Vaikka ohjain noudattaakin IEC 61850 -standardin mukaisia parametrien nimiä, MicroSCADA ei suostunut tuomaan mitään tietoja ohjaimesta automaattisesti tietokantaan. Tämä johtuu siitä, ettei PML630:n CID-määrittelytiedoston rakenne ole sellainen, jota MicroSCADA osaisi lukea (Liesjärvi 2011). Määrittelytiedostosta puuttuu sellainen rakenne, jonka MicroSCADAn SA-lib-kirjasto tunnistaisi, ja jonka perusteella se voisi luoda vaadittavat katkaisijat ja mittaustiedot. SA-lib (Substation Automation library) on

kirjasto sähkönjakelun automaation peruskomponenteista, joita ovat esimerkiksi katkaisijat, erottimet, mittaukset ja hälytykset. Kirjaston avulla voidaan luoda esimerkiksi katkaisijan kaikki tarvittavat tilatieto- ja ohjauspisteet tietokantaan, jonka jälkeen ne voidaan asettaa suoraan kuvaan. Vaikka PML630:ssä sinänsä on samoja katkaisijoita ja mittauksia, on ne kuitenkin yhdistetty yhteen kuormanpudotuslohkoon ja näin ollen lohko on erilainen kuin erilliset katkaisijoiden ohjauslohkot olisivat.

Koska MicroSCADA ei tuonut automaattisesti ohjaimesta mitään tietoja tietokantaan, piti kaikki tarvittavat tiedot määrittellä käsin. Käsin määrittelyn apuna piti käyttää PML630:n IEC 61850 Point List Manual -ohjetta, josta selvisi, mitä mikäkin IEC-standardin mukainen nimi tarkoitti ja minkälainen tieto oli kyseessä. Tämän jälkeen MicroSCADAn tietokantaan piti määrittää tarvittava määrä katkaisijoita, mittauksia, hälytyksiä ja ohjauspisteitä luomalla ne SA-lib-kirjastosta. Kun kaikki halutut pisteet oli määritetty MicroSCADAan, linkitettiin ne OPC-palvelimen pisteisiin OPC-asiakasohjelmalla. Asiakasohjelman käytössä ei ollut ongelmia ja pisteiden linkittäminen onnistui helposti. Kun oli varmistettu, että ohjaimen tiedot päivittyvät MicroSCADAn tietokantaan, piirrettiin simuloidusta sähköverkosta kuva, jonne asetettiin katkaisijat, tehotiedot ja kuormapuolen katkaisijoiden kuormanpudotuslaukaisutiedot. MicroSCADAlla piirretty sähköaseman kuva on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39: MicroSCADA-kuva monipuolisemmasta sähköasemasta, jossa PML630:stä on tuotu katkaisijoiden tila-, teho- ja laukaisutiedot.

5 Johtopäätökset

Tässä luvussa vertaillaan tutkimuksessa tutkittuja kuormanpudotuksen ratkaisuja. Luvussa esitellään ratkaisuiden parhaimpia ominaisuuksia tiettyihin toteutuksiin ja rajoituksia, jotka saattavat estää niiden käytön tietyissä projekteissa. Luvun tarkoituksena on antaa lukijalle mahdollisimman tarkka kuva siitä, mihin eri tarkoituksiin tutkimuksessa tutkitut kuormanpudotuksen ratkaisut sopivat parhaiten ja minkälaisissa tilanteissa niitä ei voida käyttää.

Tutkimuksessa tutkittiin neljää eri kuormanpudotukseen käytettyä laitteistoa. Laitteistot ovat MicroSCADA, RTU, AC800 ja PML630. MicroSCADA on kaukokäyttöjärjestelmä ja RTU ja AC800 ovat pohjimmiltaan ohjelmoitavia PLC-laitteita, jotka mahdollistavat hyvinkin vapaan ohjelmoinnin. PML630 on uusi ABB:n 630-releperheen kuormanpudotusohjain, jonka toiminta perustuu hyvin samoihin ominaisuuksiin kuin 630-sarjan suojareleidenkin. Työssä MicroSCADAn, RTU:n ja AC800:n vertailun pohjana käytettiin niillä jo toteutettuja projekteja, ja simuloiteja tehtiin vain PML630:lle.

Jo toteutettuja projekteja voidaan pitää luotettavina lähteinä laitteiden ominaisuuksista, koska näissä projekteissa laitteistot ovat käytössä ja niiden kuormanpudotuksen ominaisuuksia on jouduttu pohtimaan jo projektien suunnitteluvaiheessa. Näin ollen projektien toteutusvaiheessa on jo muodostunut tarkka kuva siitä, miksi kyseinen laitteisto on sopinut parhaiten kuormanpudotuksen toimintaan juuri siinä projektissa. PML630:llä ei ole ABB Oy, Sähkönjakelun automaatiojärjestelmissä toteutettu vielä yhtään projektia, joten tämän laitteen vertailussa ei voitu käyttää valmiita projekteja. Sen takia laitteiston toimintaperiaatteen ja parhaimman käyttöympäristön selvittämiseksi laitteelle tehtiin erilaisia simulointikokeita. Kokeiden avulla haluttiin selvittää, minkälaisissa tilanteissa laite toimii parhaiten ja mitkä ovat niitä rajoituksia, joiden takia laite ei sovi joihinkin toteutuksiin.

PML630:n kokeissa haluttiin selvittää, kuinka paljon työtä ohjaimen käyttöönotto tuo ja minkälaisia rajoituksia käytettävien laitteiden kanssa on. Lisäksi haluttiin selvittää, kuinka PML630 reagoi erilaisiin tuotanto-ongelmiin ja kuinka ohjain havaitsee niitä verkossa. PML630:ssä on kaksi erilaista kuormanpudotustoimintoa. Nopeassa kuormanpudotuksessa ohjain pyrkii reagoimaan mahdollisimman nopeasti verkosta irronneen tuotantoyksikön tuotannon korvaamiseksi ja hitaassa kuormanpudotuksessa

ohjain sallii syöttömuuntajan tilapäisen ylikuormituksen määrätyn ajan, jonka jälkeen se vähentää kuormitusta. Viimeisenä kokeena haluttiin vielä selvittää, kuinka PML630 saadaan määritettyä ABB:llä käytössä olevaan MicroSCADA-kaukokäyttöjärjestelmään. Kokeiden perusteella muodostettiin käsitys ohjaimen käyttöönoton vaativuudesta ja toimintaperiaatteista. Näitä samoja ominaisuuksia selvitettiin myös muista kuormanpudotuksen ratkaisuista valmiiden projektien ja asiantuntijahaastattelujen avulla.

PML630:n kokeissa saavutettiin luotettava kuva sen toiminnasta ja käyttöönoton vaativuudesta. Kokeita toistettiin riittävän monta kertaa, jotta tuloksia voitaisiin analysoida ja vertailla luotettavasti. Esimerkiksi nopeuskoetta varten erilaisia testejä tehtiin yhteensä 120 kertaa, jota voidaan pitää riittävänä toistomääränä. Näistä saadut tulokset noudattivat releiden ohjelmistojen suoritusrytmistä johtuvaa mittausvirhettä, mikä myös kertoo tulosten luotettavuudesta. Koska nopeustestin tulokset luettiin releiden tapahtumalistaista, ei niihin pystytty vaikuttamaan ulkoisesti, eikä näin ollen ollut inhimillisen erehdyksen vaaraa. Ohjaimen toimintakokeissa myös tehtiin useita toistoja aina erilaisissa tuotanto-ongelmissa ja varmistettiin, että ohjain reagoi jokaisella kerralla samalla tavalla. Näin voitiin varmistua, että ohjain toimii oikein, eikä virheitä päässyt syntymään.

Eri kuormanpudotuksen ratkaisuiden johtopäätöksiä varten laitteistojen kuormanpudotuksen ominaisuuksista tehtiin taulukko. Taulukossa on esitetty, kuinka nämä ratkaisut sopivat tiettyihin tilanteisiin ja minkälaisia rajoituksia ja muita ominaisuuksia laitteissa on. Taulukon jälkeen esitellään vielä yksityiskohtaisesti taulukossa käsitellyjä laitteistojen rajoituksia ja ominaisuuksia. Laitteistojen vertailutaulukko on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Vertailu tutkittujen laitteistojen kuormanpudotuksen ominaisuuksista.

| | MicroSCADA | RTU | AC800 ^[1] | PML630 |
|---|--|---|---|--|
| Soveltuvuus nopeaan kuormanpudotukseen | ei | kyllä | kyllä | kyllä |
| Soveltuvuus hitaaseen kuormanpudotukseen | kyllä | kyllä | kyllä | kyllä |
| Valmis toteutus nopeaan kuormanpudotukseen | ei ^[2] | ei ^[2] | kyllä | kyllä |
| Valmis toteutus hitaaseen kuormanpudotukseen | ei ^[2] | ei ^[2] | ei | kyllä |
| Rajoitettu määrä sähkö- aseman komponentteja | ei | ei | kyllä | kyllä |
| Rajoituksia ABB:n tuotteiden käytölle | ei | ei | ei | kyllä ^[3] |
| Tuki muille kuin ABB:n tuotteille | kyllä | kyllä | kyllä | ei ^[4] |
| Käyttöönotto | paljon ohjelmointi- työtä ^[2] | paljon ohjelmointi- työtä ^[2] | helppoa | helppoa |
| Kommunikointitapa | väylä ^[5] | väylä ^[5] , omat ulos- ja sisääntulo- kanavat | väylä ^[5] , omat ulos- ja sisääntulo- kanavat | IEC 61850 - väylä |
| Kuormanpudotuksen aktivointisignaali | voidaan ohjelmoida vapaasti | voidaan ohjelmoida vapaasti | katkaisijan avautu- minen ^[6] | katkaisijan avautu- minen ^[6] |
| Tuotantovajeen laskentatapa | voidaan ohjelmoida vapaasti | voidaan ohjelmoida vapaasti | suora tehotasapainon mittaus ^[7] | suora tehotasapainon mittaus |
| Automaattinen kuorman takaisinkytkentä | ohjelmoita- vissa | ohjelmoita- vissa | ei | ei |
| Kuvan teko MicroSCADAan | manuaalinen | manuaalinen | valmis pohja | manuaalinen |

1. Tarkastelu tehty valmiin kuormanpudotuksen kirjastokomponentin pohjalta. Muuten kyseessä PLC, jota voidaan ohjelmoida hyvinkin vapaasti
2. Jo tehtyjä toteutuksia voidaan käyttää jossain määrin apuna, mutta käytännössä työ pitää aloittaa aina alusta
3. Virallisesti tuetut releet: RET615, REM615, REF615, RET630, REM630, REF630 ja REG670
4. Muidenkin valmistajien releiden käyttö mahdollista, mutta tällöin ohjelmointi muuttuu haastavammaksi. Ei tukea suorituskyvylle
5. Valittavissa useita eri väyläkommunikointiyhteyksiä. Käytännössä kuitenkin hidastavat aina laitteen toimintaa
6. Katkaisijan avautuminen voidaan ohjelmoida vapaasti kohdelaitteessa esimerkiksi alijännitteestä tai -taajuudesta
7. Olemassa myös taajuuspohjainen havainnointi taajuusportaittain, mutta tarkoitettu vain varalle

Kaikki muut laitteistot paitsi MicroSCADA sopivat nopeaan kuormanpudotukseen. MicroSCADAn suurin ongelma on se, että kyseessä on tietokoneohjelmisto, ohjelmistossa ei ole omia ulos- ja sisääntulokanavia sekä ohjelmiston suoritusyksi on hidas. Ohjelmakoodia voidaan suorittaa minimissään sekunnin välein, joka asettaa rajoituksia sen soveltuvuudelle nopeaan kuormanpudotukseen. RTU ja AC800 sopivat nopeaan kuormanpudotukseen vain silloin, jos voidaan käyttää niiden omia ulos- ja sisääntulokanavia. Käytännössä tämä vaatii, että laitteistojen tulee olla samassa tilassa, eikä laitteiden yhteyksissä tarvitse käyttää hitaita kommunikointiväyliä. Väyläkommunikointiyhteydet aiheuttavat aina viiveitä tiedonsiirtoon. Varsinkin nopeassa kuormanpudotuksessa on erityisen tärkeää, että tieto tuotantovajeesta siirtyisi mahdollisimman nopeasti kohdelaitteelle. PML630 ja myös RTU:n uudet versiot tukevat IEC 61850 GOOSE-protokollaa, joka mahdollistaa erittäin nopean tiedonsiirron laitteiden välillä väyläkommunikoinnilla. Tutkimuksessa tutkittiin PML630:n toimintanopeutta GOOSE-viesteillä ja enimmäisviiveen keskiarvoksi saatiin 48 ms. Keskiarvo ei sisällä katkaisijan avautumisviivettä. Käytännössä kuitenkin GOOSE-kommunikoinnilla päästään reilusti alle 100 ms:n reagointiviiveisiin. Useimmissa tapauksissa nopeus riittää keskeytymättömään sähkönsyöttöön ja takaamaan sähkönlaatustandardien mukaisen riittävän sähkön laadun.

Nopeaa kuormanpudotusta varten vain AC800:ssa ja PML630:ssä on valmis pohja, johon voidaan määritellä helposti käytettävät katkaisijat ja tehotiedot. MicroSCADasta ja RTU:sta nämä pohjat puuttuvat. MicroSCADasta osaltaan siksi, ettei se sovellu nopeaan kuormanpudotukseen. RTU:n käyttö nopeassa kuormanpudotuksessa vaatii aina paljon ohjelmointityötä ja järjestelmän rakentaminen pitää käytännössä aloittaa aina alusta. Toki valmiita projekteja voidaan joissain määrin käyttää apuna. Vapaampi ohjelmitavuus mahdollistaa toteutuksen myös monipuolisempiin järjestelmiin, mutta lisää ohjelmointityötä toteutusvaiheessa. Vain AC800:ssa on lisäksi valmis pohja MicroSCADaan, mutta muissa laitteissa tämän joutuu määrittelemään käsin. PML630:ssä on mahdollista käyttää COM600-asema-automaatiolaitteistoa, johon löytyy valmis pohja myös PML630:n käyttöön.

Kaikki työssä tutkitut laitteistot soveltuvat hitaaseen kuormanpudotukseen. Hitaassa kuormanpudotuksessa ei ole niin suurta nopeusvaatimusta kuin nopeassa ja tässä tilanteessa voidaan hyvin käyttää myös hitaita kommunikointiyhteyksiä. Hitaan kuormanpudotuksen tarkoituksena voi olla esimerkiksi muuntajan suojeleminen

ylikuormitukselta pudottamalla kuormaa tietyn ajan kuluttua, jos kuormitus kasvaa liian suureksi. On myös tehty paljon toteutuksia, joissa taajuuden tai jännitteen romahtaessa jokaisen kuorman suojarele avaa siihen määritellyn katkaisijan, minkä jälkeen kuormitusta kytketään takaisin niin paljon kuin varavoimakoneet sallivat. Tällaista tilannetta varten riittää hyvin myös hitaampi kuormanpudotustoiminnallisuus, mutta ratkaisulla ei saavuteta katkeamatonta sähkönsyöttöä tärkeille kuormille, ellei niitä ole erikseen varustettu esimerkiksi UPS-laitteilla. Hitaan kuormanpudotuksen ominaisuudet jakautuvat oikeastaan valmiin pohjan löytymiseen. Ainoastaan PML630:ssä on valmis toteutus muuntajan ylikuormitussuojausta varten. Muissa laitteissa hitaan kuormanpudotuksen toiminnallisuus pitää tehdä alusta alkaen. Toki tässäkin tapauksessa valmiita projekteja voi joissain tapauksissa käyttää apuna.

Kun laitteesta löytyy valmis pohja kuormanpudotusta varten, tarkoittaa se yleensä myös rajoituksia sähköaseman komponenttien määrään. AC800:ssa ja PML630:ssä on valmis pohja kuormanpudotusta varten, ja ne sisältävät myös laitteistojen ainoat tarkat rajoitukset syöttöyksiköiden ja kuormien määriin ja kiskojen välisiin yhteyksiin. Näiden laitteistojen rajoitukset sähköaseman komponenttien määrästä on esitetty taulukossa 3. AC800:n osalta vertailu on tehty kuormanpudotuksen kirjastokomponentin aiheuttamien rajoitusten mukaan, vaikka PLC sallisi muunkin ohjelmoinnin.

Taulukko 3: AC800 ja PML630 kuormanpudotuksen rajoitukset sähköaseman komponenttien määrälle.

| | AC800 | PML630 |
|--|-------------------|--------------------|
| Kiskoja | 30 | 6 |
| Syöttöjä (muuntaja/ generaattori) | 10 | 2/6 |
| Syöttöjen kytkentä kiskoihin | ei rajoitusta | enintään 4 kiskoon |
| Kuormia | 40 | 60 |
| Kuormien kytkentä kiskoihin | ei rajoitusta | 10 per kisko |
| Kiskokatkaisija tuettu | ei ^[1] | kyllä |

1. Kiskokatkaisijoiden avautuminen ei aiheuta kuormanpudotusta sillä kiskolla, jonne tehoa siirrettiin kiskokatkaisijan kautta.

AC800 suurin ongelma sähköaseman rakenteessa on, että laite ei tue kunnolla kiskokatkaisijoita. Kiskokatkaisijan aukeaminen ei aiheuta laukaisukäskyä ja kuormanpudotusta laitteistossa. Kuten luvussa 3.5.3 selvitettiin, on kuitenkin mahdollista saada myös kiskokatkaisija näkymään tuotantona sille kiskolle, jolle siirretään tehoa kiskokatkaisijan kautta. PML630 toimii siinä mielessä paremmin, että se osaa rajoituksiensa puitteissa ottaa paremmin kiskokatkaisijat huomioon.

Koska PML630 saa tiedot muilta releiltä IEC 61850 GOOSE -kommunikoinnilla eikä ohjaimessa ole käytettävissä ulos- ja sisääntulokanavia, rajoittaa se sähköaseman releiden käyttöä. Releiden pitää tukea IEC 61850 GOOSE -liikennettä ja erikseen tuettuna pitää olla tehomittausten siirtoa varten analoginen GOOSE. Analogista GOOSEa tukevat ainoastaan uudemmat ABB:n suojareleet. Kokeissa havaittiin, että PML630 tukee suoraan vain 615-sarjan version 3.0 ja 630-sarjan version 1.1 releitä. PML630:n ohjelmointi rajoittaa myös muiden valmistajien releiden käyttöä, koska ohjaimen ohjelmointi tehdään omalla ohjelmistolla, johon ei saada tuotua ABB:n vanhempia tai muun valmistajan releitä. Muissa kuormanpudotuksen ratkaisuissa ei tällaisia rajoituksia ole, koska ne tukevat monia eri kommunikointitapoja ja AC800:ssa sekä RTU:ssa on lisäksi ulos- ja sisääntulokanavia, joiden kautta tiedot voidaan tuoda myös suoraan katkaisijasta tai mittamuuntajalta.

Kaikki tutkimuksessa tutkitut nopean kuormanpudotuksen laitteistot, joihin löytyy valmis pohja, laskevat erikseen tehotasapainoa ja toimivat vain silloin jos jokin tuotantoyksikkö menetetään. Tämä johtuu siitä, että tehomittausten siirto järjestelmään on hitaampaa kuin katkaisijoiden laukaisutietojen. RTU:ssa ja AC800:ssa olisi mahdollista toteuttaa myös luvussa 2.3 esitettyjä muita tuotanto-ongelmien havainnointimenetelmiä kuten esimerkiksi taajuuspohjaista havainnointia. Taajuuspohjaisen havainnoinnin hyvä puoli on, että tällöin ei tarvitse tietää kaikkia verkon tuotanto- ja kuormayksiköitä. Jos taajuus verkossa tipahtaisi määrätyn rajan alle, voisi kuormanpudotuslaitteisto irrottaa tietyn ennalta asetetun määrän kuormaa. Irrotettavan kuorman määrä voisi pohjautua valmiiseen suunnitelmaan tai monipuolisemmassa tapauksessa laitteisto voisi laskea tarvittavan irrotettavan kuorman määrän taajuuden alenemasta. Periaatteessa AC800:n kuormanpudotuksen kirjastokomponentissa on käytettävissä myös taajuuspohjainen kuormanpudotus, jossa tietyn taajuusportaan aktivoituessa laitteisto irrottaa käyttäjän määrittämät kuormat. Taajuuspohjainen kuormanpudotus saa aktivoitumissignaalin sähköaseman taajuusreleiltä. AC800:ssa taajuuspohjainen kuormanpudotus on kuitenkin suunniteltu käytettäväksi vain varoiksi ja lähtökohtaisesti kuormanpudotuksen aktivoitumissignaali saadaan tuotantoyksikön irtoamisesta verkosta. Ominaisuus on kuitenkin hyvä olla olemassa tilanteita varten, joissa ulkopuolisen verkon taajuus alkaa heilua ja suoja ei vielä laukaise yksikköä irti verkosta. Tällaisessa tapauksessa teollisuuslaitos pystyy tukemaan ulkopuolista verkkoa vähentämällä omaa kulutustaan.

Suoran tehomittauksen takia laitteistot laskevat tehotasapainomatriisia, jota voidaan päivittää hitaammin. Tehomatriisissa jokaista tuotantoyksikön irtoamista varten on laskettu, kuinka paljon kuormitusta pitää verkosta irrottaa. Jos tuotantoyksikkö nyt irtoaisi, saataisiin matriisista nopeasti selvitettyä irrotettavat kuormat ja annettua avauskäskyt katkaisijoille. Ohjelmistot saavat tuotantoyksiköiden irtoamissignaalit esimerkiksi niitä vastaavilta katkaisijoilta, jotka taas voivat aueta esimerkiksi alitaajuuden tai -jännitteen seurauksena. Jokaisella tuotantoyksiköllä on kuitenkin yleensä oma suojalaitteensa, joka laukaisee yksikön pois verkosta ongelman syntyessä.

Yhdessäkään tutkitussa laitteistossa ei ole automaattista kuorman takaisinkytkentää. Tämä johtuu osaltaan Luoman (2011) mukaan siitä, etteivät asiakkaat yleensä halua automaattista kuorman takaisinkytkentää, vaan he haluavat hoitaa takaisinkytkennän itse. PML630:ssä on mahdollista käyttää automaattista takaisinkytkentää, kun käytetään COM600 versio 3.5 -asema-automaatiolaitteistoa. Muissakin laitteistoissa automaattinen takaisinkytkentä on mahdollista ohjelmoida kaukokäyttöjärjestelmässä erikseen.

Tutkitut kuormanpudotuksen ratkaisut edustavat keskenään hyvin erilaisia laitteistoja. Osa laitteistoista sopii erinomaisesti erittäin nopeaan kuormanpudotukseen ja osa taas huonosti. Toisissa taas laajennettavuus on aivan omaa luokkaansa, kun taas toisissa on hyvinkin rajattu sähköaseman kokoonpano.

MicroSCADAn hyvä puoli on, että kyseessä on tietokoneohjelmisto, jota voidaan laajentaa lähes rajattomasti. Lisäksi MicroSCADA tukee hyvin monia kommunikointitapoja, jolloin voidaan käyttää hyvin erilaisia laitteita. Ohjelmiston huonoin puoli on sen puuttuvat omat ohjauskanavat, minkä takia ohjelmisto ei sovellu nopeaan kuormanpudotukseen. RTU:n hyvä puoli on sen laajennettavuus, tuetut kommunikointiprotokollat ja omat ohjauskanavat. RTU sopii nopeaan kuormanpudotukseen hyvin, jos voidaan käyttää sen omia ohjauskanavia. RTU tukee myös IEC 61850 GOOSE -kommunikointia, joka mahdollistaa nopean tiedonsiirron kommunikointiväylässä. RTU:n huonoin puoli on tarvittavan ohjelmoinnin määrä käyttöönnotossa. Koska valmista pohjaa ei ole, pitää kuormanpudotuksen toiminnallisuus ohjelmoida aina alusta asti. AC800:ssa hyvät ja huonot ominaisuudet ovat hyvin samankaltaisia kuin RTU:ssa, koska molemmat laitteet ovat pohjimmiltaan ohjelmoitavia PLC-logiikoita, joita voidaan ohjelmoida hyvinkin vapaasti. AC800:ssa on lisäksi valmis kuormanpudotustoiminnallisuuden pohja, mikä on sen vahvuus.

Laitteiston huonoin puoli tulee valmiin pohjan rajoituksista ja siitä, ettei kiskokatkaisijaa tueta täysin. PML630:n hyvä puoli on sen nopea väyläkommunikointiyhteys, joka säästää kaapelointia sähköasemalla ja mahdollistaa hyvän laajennettavuuden tulevaisuudessa. Ohjaimesta löytyy myös valmis pohja kuormanpudotusta varten ja sen käyttöönotto on helppoa. Ohjaimen huonoin puoli on sen rajoitettu tuki sähköaseman suojuareille. Ohjaimessa ei ole omia ohjauskanavia, jolloin kaiken liikenteen pitää kulkea väyläkommunikointiyhteydellä. Koska myös tehotiedot välitetään väylässä, pitää kohdelaitteiden tukea analogisen mittaustiedon lähetystä. Käytännössä tätä tukevat ABB:n suojuareista vain uusimmat ohjelmistoversiot.

6 Yhteenveto

Tänä päivänä sähkön laadulla, keskeytyksillä ja sitä kautta asiakkaiden tyytyväisyydellä on yhä suurempi merkitys. Sähkökatkoista voi seurata asiakkaille nopeastikin rahallista menetystä. Yksi tapa turvata sähkönsyöttö tärkeille kuormille on panostaa kuormanpudotukseen. Kuormanpudotuksen tarkoitus on pudottaa ongelmatilanteissa turhaa kuormitusta verkosta pois, jolloin tärkeiden kuormien sähkönsyöttö voidaan turvata esimerkiksi hajautetulla tuotannolla. Tämän takia erityisesti teollisuusyritysten kannattaa panostaa kuormanpudotukseen, koska sen avulla tärkeimmät prosessit pystytään pitämään käynnissä omalla tuotannolla silloinkin, jos ulkoinen sähkönsyöttö menetetään. Myös sähköjakeluyritysten kannattaa panostaa sähköasemillaan kuormanpudotukseen, jonka avulla ne pystyvät turvaamaan sähkönsyötön tärkeimmille asiakkailleen esimerkiksi tulevaisuuden saarekekäyttötilanteissa hajautetun tuotannon avulla. Tärkeimpinä asiakkaina voidaan pitää esimerkiksi asiakkaita, joille sähkökatkoksesta tulisi suurimmat rahalliset menetykset.

Markkinoilla on monia kuormanpudotukseen soveltuvia järjestelmiä ja laitteita. Kaikista näistä laitteistoista ei aina täysin tiedetä, mihin toteutuksiin ne sopivat parhaiten ja minkälaisissa toteutuksissa niitä ei voida käyttää. Osa ratkaisuista sopii nopeaan kuormanpudotukseen, jossa vaatimuksena on erittäin nopea reagointi järjestelmän tuotanto-ongelmiin. Osaa kuormanpudotuksen ratkaisuista ei taas pystytä käyttämään nopeassa kuormanpudotuksessa, koska niiden reagoitinopeus ei riitä, mutta niitä voidaan käyttää hyvin esimerkiksi hitaammassa kuormanpudotuksessa.

Työn tavoitteena oli tutkia muutamaa kuormanpudotuksen ratkaisua ja löytää niiden parhaimmat ja huonoimmat puolet. Erityisesti tutkimuksessa haluttiin selvittää laitteistojen sellaiset ominaisuudet, jotka rajoittavat niiden sopivuutta tiettyihin projekteihin. Lisäksi ABB:llä ei ole aikaisemmin tehty yhtä laajaa vastaavaa tutkimusta laitteistojen sopivuudesta eri kuormanpudotuksen toteutuksiin. Tutkittaviksi kuormanpudotuksen ratkaisuiksi valittiin ABB Oy:n käyttämiä laitteistoja, joilla on tehty kuormanpudotuksen toteutuksia projekteissa. Näitä laitteistoja oli kaukokäyttöjärjestelmä MicroSCADA ja ohjelmoitavat PLC-logiikat RTU ja AC800. Lisäksi työssä haluttiin tutkia uutta kuormanpudotusohjainta PML630:tä.

MicroSCADAn, RTU:n ja AC800:n osalta vertailun pohjana käytettiin laitteistoilla jo toteutettuja kuormanpudotuksen toteutuksia. Näitä projekteja voitiin pitää riittävän

luotettavina lähteinä, koska projekteissa laitteistot ovat käytössä ja niiden sopivuutta kuormanpudotukseen on jouduttu jo pohtimaan projektia toteutettaessa. Uudella PML630-kuormanpudotusohjaimella ei ole toteutettu vielä kovin montaa projektia. Ohjaimen osalta sen kuormanpudotuksen ominaisuuksia ja rajoitteita tutkittiin omilla tutkimuksilla.

Tutkimuksissa saatiin luotua erittäin kattava kuva laitteistojen sopivuudesta erilaisiin kuormanpudotuksen projekteihin ja niiden rajoituksista. Erilaisista ominaisuuksista saatiin muodostettua selkeä yhteenvedo, josta laitteistojen kuormanpudotuksen ominaisuuksia on helppo vertailla. Kun tiedetään projektin laajuus ja minkälaista kuormanpudotusta projektissa halutaan käyttää, voidaan vertailutaulukon avulla helposti löytää projektille sopiva ratkaisu. Työssä siis onnistuttiin täyttämään sille asetetut tavoitteet.

Tutkimuksissa havaittiin, että suurin rajoittava tekijä nopeassa kuormanpudotuksessa on erilaisten väyläkommunikointiyhteyksien hitaus. Jos halutaan käyttää nopeaa kuormanpudotusta, pitää laitteistosta yleensä löytyä omia ulos- ja sisääntulokanavia, joiden kautta verkon mittaustiedot voidaan lukea ja ohjauskäskyt antaa mahdollisimman nopeasti. Positiivisena yllätyksenä väyläkommunikointiyhteyksien nopeudesta on kuitenkin IEC 61850 GOOSE -kommunikointi, joka mahdollistaa laitteiden välisen horisontaalisen, erittäin nopean, liikennöinnin. Tutkimuksissa saatiin tulos, jossa PML630 pystyi reagoimaan verkon tuotanto-ongelmaan keskimäärin enintään noin 48 ms:n kuluessa. Viive on erittäin hyvä ja takaa keskeytyksettömän sähkönsyötön useimmissa tapauksista.

Osassa laitteistossa on olemassa kuormanpudotusta varten valmis pohja, jolla kuormanpudotuksen toiminnallisuus on helppo määrittää. Nämä pohjat kuitenkin asettavat rajoituksia sähköaseman koolle ja ominaisuuksille. Osassa laitteissa on otettu huomioon enemmän ominaisuuksia kuin toisissa. Lähes aina, jos toiminnallisuuksia joudutaan tekemään alusta alkaen, koska valmista pohjaa ei ole tai se ei riitä toteutettavalle järjestelmälle, vaaditaan käyttöönottoaiheessa hyvin paljon ohjelmointityötä. Tällaisia tilanteita varten valmiit pohjat säästävät merkittävästi aikaa ja helpottavat ominaisuuksien käyttöönottoa.

Yksikään tutkituista laitteistoista ei käytä suoraan mitään monimutkaisempia tuotanto-ongelmien havainnointikeinoja, vaan jokainen laitteisto, jossa on valmis

kuormanpudotuksen pohja, mittaa suoraan verkon tehotasapainoa. Tulevaisuudessa voisi olla kannattavaa selvittää, kuinka esimerkiksi taajuuspohjainen kuormanpudotus toimisi ratkaisuisissa. Tällöin ei tarvitsisi tuntea kaikkia verkon syöttö- ja kuormapisteitä. Tulevaisuuden hajautettu tuotanto ja saarekekäyttötilanteet voivat lisätä verkon tehotasapaino-ongelmia ja sitä kautta heiluttaa verkon taajuutta. Jos taajuuden tippumiseen voidaan vaikuttaa ennen tuotantoyksikön irtoamista vähentämällä kuormitusta, pystytään yksiköstä hyödyntämään mahdollisesti edes osa tuotannosta. Jos aina odotetaan, että tuotantoyksikkö laukeaa verkosta, pitää kuormitusta vähentää aina koko tuotantoyksikön tuotannon verran.

PML630:n osalta olisi kannattavaa myös selvittää, kuinka ohjain soveltuu käytettäväksi muiden valmistajien ja vanhempien ABB:n suojarleiden kanssa. Näiden releiden käyttö on mahdollista, mutta vaatii aina huomattavasti enemmän ohjelmointityötä kuin valmiiksi tuettujen releiden käyttö. Olisikin hyvä selvittää, kuinka paljon ohjelmointityötä tulee lisää. Vähemmän rajoitettu releiden tuki mahdollistaisi PML630:n monipuolisemman käytön useammalla sähköasemalla, koska PML630 tarjoaa paljon ominaisuuksia. PML630:stä on myös ilmestymässä uusia versioita, joiden ominaisuudet olisi hyvä selvittää tarkemmilla tutkimuksilla. Uusina ominaisuuksina on ainakin tulossa kahden ohjaimen käyttö samalla asemalla, mikä mahdollistaa sähköaseman komponenttien määrän kaksinkertaistamisen.

Kirjallisuus

ABB. 2003. *Control IT AC 800M controller*. AC800-12.jpg. ABB Image Bank.
[Viitattu 9.8.2011].

ABB. 2004. *Industrial^{IT} Power Management System For Industrial Plants*. ABB Oy:n esitelmämateriaali. [Viitattu 27.7.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot267.nsf/veritydisplay/45d7ff32819eb3a3852573db006c4b6d/\\$file/Power Management System.ppt](http://www05.abb.com/global/scot/scot267.nsf/veritydisplay/45d7ff32819eb3a3852573db006c4b6d/$file/Power%20Management%20System.ppt).

ABB. 2005a. *MicroSCADA Pro Control System, SYS 600 9.0 Release Note, Cover Letter*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS755542. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d23428752912f3d4c2256fe10044f588/\\$file/SYS600_90RNCL_ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d23428752912f3d4c2256fe10044f588/$file/SYS600_90RNCL_ENa.pdf).

ABB. 2005b. *The Birth of MicroSCADA*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS752589. [Viitattu 17.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/0/5e4989b705a357b9c2256d3a0025ecbe/\\$file/birthofmicroscada.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/0/5e4989b705a357b9c2256d3a0025ecbe/$file/birthofmicroscada.pdf).

ABB. 2006. *MicroSCADA Pro for Substation Control*.
MSPro_SubCon4_displays_170804_720.jpg. ABB Image Bank. [Viitattu 9.8.2011].

ABB. 2007. *Station Automation Series COM600*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS755810.

ABB. 2009. *Protection and control IED manager PCM600*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756483.

ABB. 2010a. *MicroSCADA Pro, SYS 600 v. 9.3 Release Note, Cover Letter*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS757043. [Viitattu 19.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/75187469e58ee039c12577180040d489/\\$file/SYS600_93_rncl_757043_ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/75187469e58ee039c12577180040d489/$file/SYS600_93_rncl_757043_ENa.pdf).

ABB. 2010b. *RTU560 rack*. RTU560C_mit_neuen_Logos.jpg. ABB Image Bank.
[Viitattu 9.8.2011].

- ABB. 2010c. *RTU560/RTU211 Solutions overview*. ABB Oy. [Viitattu 18.8.2011].
Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot258.nsf/veritydisplay/5af3008767a05dff12577ae00548d66/\\$file/rtu560_rtu211_solutions_overview_en.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot258.nsf/veritydisplay/5af3008767a05dff12577ae00548d66/$file/rtu560_rtu211_solutions_overview_en.pdf).
- ABB. 2010d. *MicroSCADA Pro SYS 600 9.3 IEC 61850 Master Protocol (OPC)*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756230. [Viitattu 26.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/7475c31108784b6ac125770e003365d6/\\$file/SYS600_IEC%2061850%20Master%20Protocol%20\(OPC\)_756632_ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/7475c31108784b6ac125770e003365d6/$file/SYS600_IEC%2061850%20Master%20Protocol%20(OPC)_756632_ENa.pdf).
- ABB. 2010e. *MicroSCADA Pro SYS 600 9.3 IEC 61850 System Design*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756664. [Viitattu 26.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/31115d33f2d0439cc125770e00347ef7/\\$file/SYS600_IEC%2061850%20System%20Design_756664_%20ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/31115d33f2d0439cc125770e00347ef7/$file/SYS600_IEC%2061850%20System%20Design_756664_%20ENa.pdf).
- ABB. 2010f. *MicroSCADA Pro SYS 600 9.3 OPC Server*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756659. [Viitattu 26.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d9c962ad453cf23fc1257823003f14cc/\\$file/SYS600_OPC_Server__756659_ENb.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d9c962ad453cf23fc1257823003f14cc/$file/SYS600_OPC_Server__756659_ENb.pdf).
- ABB. 2010g. *MicroSCADA Pro for Substation Automation*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756064. [Viitattu 27.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/a4b4060556f72a1cc1257799002cb4bc/\\$file/1MRS756064_C_en_MicroSCADA_Pro_for_Substation_Automation.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/a4b4060556f72a1cc1257799002cb4bc/$file/1MRS756064_C_en_MicroSCADA_Pro_for_Substation_Automation.pdf).
- ABB. 2010h. *REF615 3.0 IEC, Feeder Protection Relay, Product Guide*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756379. [Viitattu 12.11.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e3582ad99c6e9e1dc12577990023a69e/\\$file/REF615_pg_756379_ENk.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e3582ad99c6e9e1dc12577990023a69e/$file/REF615_pg_756379_ENk.pdf).
- ABB. 2011a. *Release of Load Shedding Controller PML630*. ABB Oy:n sisäinen julkaisu 9.5.2011. [Viitattu 27.5.2011].

- ABB. 2011b. *PML630 1.1 Load shedding controller, Product Guide*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS757334. [Viitattu 5.7.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/db73adb0f7416674c125788b001a67c1/\\$file/PML630_pg_757334_ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/db73adb0f7416674c125788b001a67c1/$file/PML630_pg_757334_ENa.pdf).
- ABB. 2011c. *PML630 1.1, Load shedding controller, Brochure*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS757420. [Viitattu 5.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/2ecfabec821eb478c1257873002441f1/\\$file/PML630_broch_757420_LRENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/2ecfabec821eb478c1257873002441f1/$file/PML630_broch_757420_LRENa.pdf).
- ABB. 2011d. *PML630*. PML630_120_level_2_RGB300dpi.tif. ABB Image Bank. [Viitattu 9.8.2011].
- ABB. 2011e. *PML630 Load Shedding Controller, General presentation*. ABB Oy:n sisäiset esityskalvot.
- ABB. 2011f. *MicroSCADA Pro SYS 600 9.3 Feature Pack 1 Release Announcement*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS230812. [Viitattu 19.8.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/5e394a1f4a824f36c1257823003db45b/\\$file/SYS_600_9.3_FP1_Release_Announcement__230812_RNAena.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/5e394a1f4a824f36c1257823003db45b/$file/SYS_600_9.3_FP1_Release_Announcement__230812_RNAena.pdf).
- ABB. 2011g. *OPC in ABB*. ABB Inside web-sivu. [Viitattu 16.8.2011].
- ABB. 2011h. *Protection and Control IED Manager PCM600 Product Guide*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756448. [Viitattu 7.9.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/1b895acff5da2c49c12578b1003afd00/\\$file/PCM600_2.4_pg_756448_ENg.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/1b895acff5da2c49c12578b1003afd00/$file/PCM600_2.4_pg_756448_ENg.pdf).
- ABB. 2011i. *Compact 800 AC 800M Process PLC 5.1 Overview*. ABB Oy:n julkaisu 3BSE045596. [Viitattu 14.9.2011]. Saatavissa:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/22e7ff5b632318c2c12578b70036b47a/\\$file/3BSE045596_A_en_Compact_800_AC_800M_Process_PLC_5.1_Overview.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/22e7ff5b632318c2c12578b70036b47a/$file/3BSE045596_A_en_Compact_800_AC_800M_Process_PLC_5.1_Overview.pdf).

- ABB. 2011j. *REF630 IEC 1.1, Feeder Protection and Control, Product Guide*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756976. [Viitattu 7.11.2011]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/58e94160ad4621bec12578b500477a91/\\$file/REF630_pg_756976_ENd.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/58e94160ad4621bec12578b500477a91/$file/REF630_pg_756976_ENd.pdf).
- ABB. 2011k. *REM630 IEC 1.1, Motor Protection and Control, Product Guide*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS756977. [Viitattu 7.11.2011]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/2c218af145cb2936c12578b500475aad/\\$file/REM630_pg_756977_ENd.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/2c218af145cb2936c12578b500475aad/$file/REM630_pg_756977_ENd.pdf).
- ABB. 2011l. *PML630 1.1 Load shedding controller, Technical Manual*. ABB Oy:n julkaisu 1MRS757256. [Viitattu 23.11.2011]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/de794077c350a4ddc125788b0018d14c/\\$file/pml630_tech_757256_ena.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/de794077c350a4ddc125788b0018d14c/$file/pml630_tech_757256_ena.pdf).
- Arulampalam, A. & Saha, T. K. 2010. *Fast and Adaptive under Frequency Load Shedding and Restoration Technique using Rate of Change of Frequency to Prevent Blackouts*. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. S. 1-8. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PES.2010.5589415.
- Baumann, R. & Brand, K.-P. 2005. *The Standard IEC 61850 - a Simple but Comprehensive Solution for Today's Power System Requirements*. Artikkel. [Viitattu 21.8.2011]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b7c65c3e6294f546c12570d100519610/\\$file/PSCC_2005%20%20Paper%20677%20Baumann%20Brand.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b7c65c3e6294f546c12570d100519610/$file/PSCC_2005%20%20Paper%20677%20Baumann%20Brand.pdf).
- Brand, K.-P. 2004. *The Standard IEC 61850 as Prerequisite for Intelligent Applications in Substations*. Power Engineering Society General Meeting, 2004 IEEE. S. 714-718. [Viitattu 21.8.2011]. DOI: 10.1109/PES.2004.1372909.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. *Sähköverkot I*. 1. painos. Helsinki. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. *Sähköverkot II*. 1. painos. Helsinki. 551 s. ISBN 978-951-672-363-4.

- Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. *Sähkölaitostekniikan perusteet*. 6. painos. Helsinki. 487 s. ISBN 978-951-672-285-9.
- Esala, A. 2011. Projekti-insinööri. ABB Oy, Sähköjaketun automaatiojärjestelmät. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Haastattelu 31.8.2011.
- Fernandes, R.V., de Almeida, S.A.B., Barbosa, F.P.M. & Pestana, R. 2009. *Load Shedding — Coordination between the Portuguese Transmission Grid and the Distribution Grid with Minimization of loss of Distributed Generation*. Power Tech Conference, 2009 IEEE Bucharest. S. 1-6. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282171.
- Forsman, J. 2011. Projekti-insinööri. ABB Oy, Sähköjaketun automaatiojärjestelmät. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Haastattelu 31.8.2011.
- Harju, J. 2011a. Projektipäällikkö. ABB Oy, Sähköjaketun automaatiojärjestelmät. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Puhelinhaastattelu 27.5.2011.
- Harju, J. 2011b. Projektipäällikkö. ABB Oy, Sähköjaketun automaatiojärjestelmät. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Haastattelu 21.7.2011.
- Hirodontis, S., Li, H. & Crossley, P.A. 2009. *Load Shedding in a Distribution Network*. Sustainable Power Generation and Supply, 2009, SUPERGEN '09. International Conference on. S. 1-6. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348255.
- Kainulainen, K. 2001. *Teollisuussähköverkon stabiilisuus saarekekäyttöön siirryttäessä*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. Lappeenranta. 85 s.
- Khaki, B. & Montaser Kouhsari, S. 2010. *Proper Setting of Underfrequency Load Shedding Relays in Industrial Plants*. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010, 9th International Conference on. S. 198-201. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5489970.
- Kulathu, G. 2011. Tuotepäällikkö. ABB Oy, Sähköjaketuautomaatio. Intia. Sähköpostikeskustelu 12.8.2011.

- Kulkarni, A. V., Gao, W. & Ning, J. 2010. *Study of Power System Load Shedding Scheme Based On Dynamic Simulation*. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES. S. 1-7. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484262.
- Ladhani, S. S. & Rosehart, W. 2005. *Criteria for Load Control when Considering Static Stability Limits*. Power Engineering Society General Meeting, 2005 IEEE. S. 1558-1562. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PES.2005.1489697.
- Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. *Sähkönjakelutekniikka. 2. uudistettu painos*. Helsinki, 295 s. ISBN 978-951-672-359-7.
- Liesjärvi, T. 2011. Ohjelmistoasiantuntija. ABB Oy, Sähkönjakeluautomaatio. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Sähköpostikeskustelu 5.12.2011.
- Luoma, V. 2011. Tuotepäällikkö. ABB Oy, Sähkönjakeluautomaatio. Vaasa, PL 699, 65101 Vaasa. Puhelinhaastattelu 8.9.2011.
- Maiorano, A., Sbrizzai, R., Torelli, F. & Trovato, M. 1999. *Intelligent load shedding schemes for industrial customers with cogeneration facilities*. Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE. S. 925-930. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PESW.1999.74729.
- Nordea. 2011. Rahanarvotaulukko. [Viitattu 10.8.2011]. Saatavissa: <http://service.nordea.com/nordea-openpages/lists/valueofmoney/listmoneyOfValues.action?language=fi>.
- Nordel. 2007. *Nordic Grid Code 2007 (Nordic collection of rules)*. [Viitattu 15.6.2011]. Saatavissa: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/nordic/planning/070115_entsoe_nordic_NordicGridCode.pdf.
- OPC Foundation. 2011. *What is OPC?*. [Viitattu 27.8.2011]. Saatavissa: http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01_about/01_what_is.asp?MID=AboutOPC.
- Peltoniemi, T. 2011. Projekti-insinööri. ABB Oy, Prosessiteollisuus. Vaasa, PL 644, 65101 Vaasa. Haastattelu 31.8.2011.

- RuggedCom. 2010. *RuggedCom RuggedSwitch RS900NC Datasheet*. RuggedCom Inc. [Viitattu 7.11.2011]. Saatavissa: http://www.ruggedcom.com/pdfs/datasheets_new/rs900_nc_datasheet_rev2t.pdf.
- SFS-EN 50160. 2008. *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 34 s.
- Shumaker, B. 2004. *P&P Drives DCS Integration*. ABB Oy:n sisäinen dokumentti. [Viitattu: 17.8.2011].
- Tsai, S.-J.S. & Wong, K.-H. 2008. *Adaptive Undervoltage Load Shedding Relay Design Using Thevenin Equivalent Estimation*. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. S. 1-8. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PES.2008.459637. ISSN 1932-5517.
- Wangdee, W. & Billinton, R. 2004. *Utilization of time varying event-based customer interruption cost load shedding schemes*. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2004 International Conference on. S. 769-775. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/PMAAPS.2004.241491.
- Wu, C., Gao, L. & Dai, Y. 2010. *Simulation and Optimization of Load Shedding Scheme for Islanded Power System*. Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on. S. 1-6. [Viitattu 10.6.2011]. DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666690.

Liitteet

Liite A KAH-arvon laskemiseen tarvittavat taulukot

Tässä liitteessä on esitetty KAH-arvon laskemiseen tarvittavat taulukot, joita tarvitaan laskukaavassa 9, kun käytetään KAH-arvoa kuormituksen priorisointiin.

Taulukossa A.1 on esitetty kulutuksen tyypistä riippuva tehon ja energian kertoimet, jotka määrittävät kulutustyyppin mukaisen peruskustannuksen. Peruskustannusta korjataan erilaisilla kertoimilla vuodenajan, vuorokaudenajan ja laskentavuoden mukaan.

Taulukko A.1: Kulutuksen tyypistä riippuva kerroin teholle (K_{KL}) ja energialle (K_{AI}) odottamattomille yli 1 sekunnin pituisille keskeytyksille vuoden 2007 kustannustason mukaan. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 429)

| | Kulutuksen laji | K_{KL} (€/kW) | K_{AI} (€/kWh) |
|---|----------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | Paperi- ja massateollisuus | 4,1 | 0,2 |
| 2 | Kemian teollisuus | 2,5 | 6,9 |
| 3 | Metalliteollisuus | 2,5 | 0,4 |
| 4 | Liikenne | 0,1 | 0,9 |
| 5 | Jakeluverkkokulutus | 1,9 | 16,1 |

Taulukossa A.2 on esitetty vuodenajan korjauskertoimet eri kulutuksen tyypeille kuukausittain.

Taulukko A.2: Vuodenaikakertoimet (K_{VA}) jokaiselle kuukaudelle eri kulutuksen tyyppin mukaan vuoden 2007 kustannustason mukaan. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 429)

| Kuukausi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| Paperi- ja massa teollisuuden K_{VA} | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Kemian teollisuuden K_{VA} | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 |
| Metalliteollisuuden K_{VA} | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Liikenteen K_{VA} | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Jakeluverkkokulutuksen K_{VA} | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 1,0 | 1,1 | 1,15 | 1,25 | 1,20 | 1,05 | 1,0 | 0,9 | 0,9 |

Taulukossa A.3 on esitetty korjauskertoimet vuorokauden ajan mukaan eri kulutustyypeille. Korjauskertoimet on ilmaistu jokaiselle eri kulutustyyppille tunneittain arkipäivisin ja viikonloppuisin.

Taulukko A.3: Tuntikertoimet (K_{VP}) eri kulutuksen tyyppin mukaan vuoden 2007 kustannustason mukaan. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 430) A = paperi- ja massateollisuus, B = kemianteollisuus, C = metalliteollisuus, D = liikenne, E = jakeluverkkokulut.

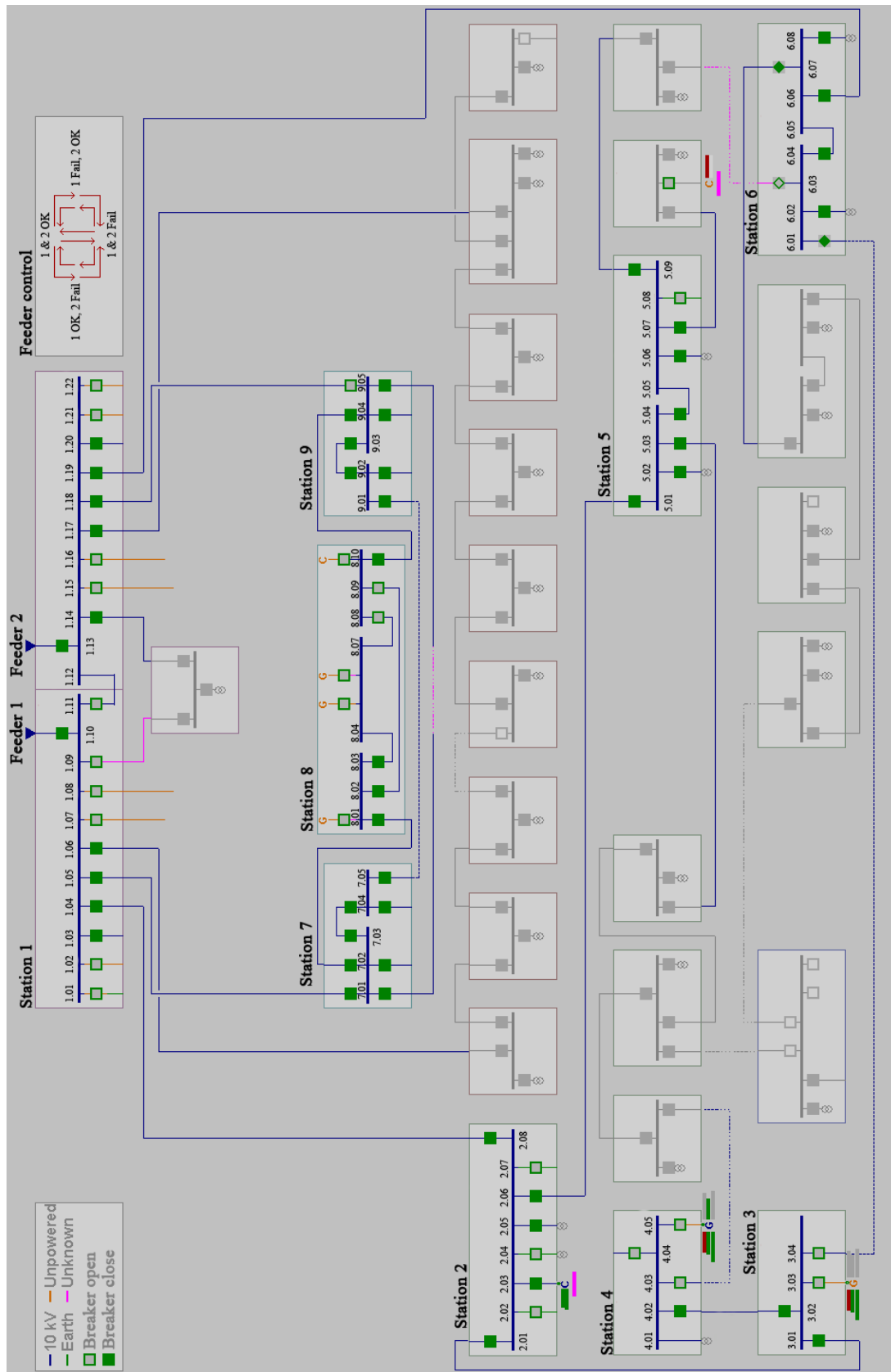
| Tunti | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A, K_{VP} (ma-pe) | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| A, K_{VP} (la-su) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| B, K_{VP} (ma-su) | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| C, K_{VP} (ma-pe) | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| C, K_{VP} (la-su) | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| D, K_{VP} (ma-su) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E, K_{VP} (ma-pe) | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,8 | 0,95 | 1,3 | 1,5 | 1,55 | 1,5 |
| E, K_{VP} (la-su) | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,8 | 0,95 | 1,3 | 1,35 | 1,4 | 1,35 |
| Tunti | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| A, K_{VP} (ma-pe) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| A, K_{VP} (la-su) | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| B, K_{VP} (ma-su) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| C, K_{VP} (ma-pe) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| C, K_{VP} (la-su) | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| D, K_{VP} (ma-su) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E, K_{VP} (ma-pe) | 1,6 | 1,65 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 0,75 | 0,65 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| E, K_{VP} (la-su) | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,75 | 0,65 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

Taulukossa A.4 on esitetty muutamia rahanarvon kertoimia vuoden 2010 arvoon verrattuna, joita tarvitaan vain, jos tehon ja energian kertoimet on ilmoitettu eri vuodelle kuin mitä halutaan laskea. Jos esimerkiksi tehon ja energian kertoimet on ilmoitettu vuodelle 2008, mutta lasku halutaan suorittaa nykyarvon (vuoden 2010) mukaan, pitää kaavaan 9 lisätä taulukosta A.4 rahanarvon kertoimeksi 1,0120.

Taulukko A.4: Rahanarvon kertoimet vuosille 1991–2010. (Nordea 2011)

| Vuosi | Kerroin | Vuosi | Kerroin | Vuosi | Kerroin | Vuosi | Kerroin |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1991 | 1,3470 | 1996 | 1,2530 | 2001 | 1,1380 | 2006 | 1,0800 |
| 1992 | 1,3140 | 1997 | 1,2370 | 2002 | 1,1200 | 2007 | 1,0540 |
| 1993 | 1,2870 | 1998 | 1,2200 | 2003 | 1,1100 | 2008 | 1,0120 |
| 1994 | 1,2730 | 1999 | 1,2060 | 2004 | 1,1080 | 2009 | 1,0120 |
| 1995 | 1,2600 | 2000 | 1,1670 | 2005 | 1,0980 | 2010 | 1,0000 |

Liite B MicroSCADA toteutus esimerkki kuormanpudotuksesta



Kuva B.1: Toteutus esimerkki kuormanpudotuksesta MicroSCADAlla. (Esala 2011) Kuvan tekstit muutettu, ettei alkuperäistä asiakasta pysty tunnistamaan.

Liite C Kokeissa käytettyjen laitteiden tuotetiedot

ABB:n releet

REF615 versio 3.0

Sarjanumero: 1VHR91008982

Tilausnumero: HBFFAFAGNBA1BAB1XD

Tilausnumeron selitys (ABB 2010h, s. 70-74):

- H = IED: 615 sarjan IED (sisältää kotelon)
- B = Standardi: IEC
- F = Pääkäyttökohde: Johtolähdön suojaus ja ohjaus
- F = Esikokoonpano: F
- AF = Analogiset sisääntulokanavat: 4I (0.2/1 A) + 5U
- AG = Binääriset kanavat: 16 sisääntuloa + 10 ulostuloa
- NB = Kommunikointimoduulit: Ethernet 100Base-TX (1 x RJ-45)
- A = Kommunikointiprotokolla: IEC 61850
- 1 = Kieli: Englanti
- B = Etupaneeli: Iso LCD-näyttö (Liquid Crystal Display)
yksijohdinkaaviokuvalla
- A = Lisäominaisuus 1: Automaattinen jälleenkytkentä
- B = Lisäominaisuus 2: Admittanssipohjainen maasulkusuojaus
- 1 = Käyttöjännite: 48...250 VDC, 100...240 VAC
- X = Vapaa tunnus
- D = Versio: 3.0

REF630 versio 1.1 (rele 1)

Sarjanumero: 1VHR91009689

Tilausnumero: SBFNABACBBAZDZNBXB

Tilausnumeron selitys (ABB 2011j, s. 69-72):

- S = IED: 630 sarjan IED, 4U puolikas 19”-n asennus kehikkoon
- B = Standardi: IEC
- F = Pääkäyttökohde: Johtolähdön suojaus ja ohjaus
- N = Esikokoonpano: Ei esikokoonpanoa
- AB = Analogiset sisääntulokanavat: 4I (1/5 A) + 1I (0.1/0.5 A) + 4U
- AC = Binääriset kanavat: 32 sisääntuloa + 27 ulostuloa
- B = Sarjaliikennekommunikaatio: Muovikuitu (pikaliittimet)
- B = Ethernet-kommunikaatio: Ethernet 100BaseTX (RJ-45)
- A = Kommunikointiprotokolla: IEC 61850
- Z = Kieli: Englanti ja Kiina
- D = Etupaneeli: Erillinen paikallinen HMI (Human Machine Interface),
3 m kaapeli
- Z = Lisäominaisuus 1: Kaikki lisäominaisuudet
- N = Lisäominaisuus 2: Ei lisäominaisuutta

B = Käyttöjännite: 110...250 VDC, 100...240 VAC
X = Vapaa tunnus
B = Versio: 1.1

REF630 versio 1.1 (rele 2)

Sarjanumero: 1VHR91033413

Tilausnumero: SBFNAAABAAAZANNAXB

Tilausnumeron selitys (ABB 2011j, s. 69–72):

S = IED: 630 sarjan IED, 4U puolikas 19”ⁿ asennus kehikkoon
B = Standardi: IEC
F = Pääkäyttökohde: Johtolähdön suojaus ja ohjaus
N = Esikokoonpano: Ei esikokoonpanoa
AA = Analogiset sisääntulokanavat: 4I (1/5 A) + 5U
AB = Binääriset kanavat: 23 sisääntuloa + 18 ulostuloa
A = Sarjaliikennekommunikaatio: Lasikuitu (ST-liittimet)
A = Ethernet-kommunikaatio: Ethernet 100BaseFX (LC-liittimet)
A = Kommunikaatioprotokolla: IEC 61850
Z = Kieli: Englanti ja Kiina
A = Etupaneeli: Kiinteä paikallinen HMI
N = Lisäominaisuus 1: Ei lisäominaisuutta
N = Lisäominaisuus 2: Ei lisäominaisuutta
A = Käyttöjännite: 48...125 VDC
X = Vapaa tunnus
B = Versio: 1.1

REM630 versio 1.1

Sarjanumero: 1VHR91033412

Tilausnumero: SBMNAAABAAAZAZNAXB

Tilausnumeron selitys (ABB 2011k, s. 57–60):

S = IED: 630 sarjan IED, 4U puolikas 19”ⁿ asennus kehikkoon
B = Standardi: IEC
M = Pääkäyttökohde: Moottorin suojaus ja ohjaus
N = Esikokoonpano: Ei esikokoonpanoa
AA = Analogiset sisääntulokanavat: 4I (1/5A) + 1I (0.1/0.5A) + 4U
AB = Binääriset kanavat: 23 sisääntuloa + 18 ulostuloa
A = Sarjaliikennekommunikaatio: Lasikuitu (ST-liittimet)
A = Ethernet-kommunikaatio: Ethernet 100BaseFX (LC-liittimet)
A = Kommunikaatioprotokolla: IEC 61850
Z = Kieli: Englanti ja Kiina
A = Etupaneeli: Kiinteä paikallinen HMI
Z = Lisäominaisuus 1: Kaikki lisäominaisuudet
N = Lisäominaisuus 2: Ei lisäominaisuutta
A = Käyttöjännite: 48...125 VDC

X = Vapaa tunnus

B = Versio: 1.1

Kuormanpudotusohjain

PML630 versio 1.1

Sarjanumero: 1VHR91044260

Tilausnumero: UBPLAAAAABAZAANBXX

Tilausnumeron selitys (ABB 2011b, s. 17–19):

U = IED: 630 sarjan IED, 4U puolikas 19”-n asennus kehikkoon johtoliittimillä

B = Standardi: IEC

P = Pääkäyttökohde: Tehonhallinta

L = Toiminnallinen sovellus: Kuormanpudotus

AA = Analogiset sisääntulokanavat: 4I (1/5 A) + 5U

AA = Binääriset kanavat: 14 sisääntuloa + 9 ulostuloa

A = Sarjaliikennekommunikaatio: Lasikuitu (ST-liittimet)

B = Ethernet-kommunikaatio: Ethernet 100BaseTX (RJ-45)

A = Kommunikaatioprotokolla: IEC 61850

Z = Kieli: Kaikki julkaistut kielet

A = Etupaneeli: Kiinteä paikallinen HMI

A = Lisäominaisuus 1: cPMS-toiminnallisuus (compact Power Management System)

N = Lisäominaisuus 2: Ei lisäominaisuutta

B = Käyttöjännite: 110...250 VDC, 100...240 VAC

X = Vapaa tunnus

B = Versio: 1.1

Kytkin

RuggedCom RS900NC

Sarjanumero: 900-0511-44875

Tilausnumero: RS900NC-HI-D-ML-ML-MT-XX

Tilausnumeron selitys (RuggedCom 2010, s. 9):

HI = Käyttöjännite: 88...300 VDC, 85...264 VAC

D = Asennustapa: DIN-kisko

ML = Portin 7 tyyppi: 1 x 100BaseFX valokuitu, monimuoto, 1300 nm, LC-liittimet

ML = Portin 8 tyyppi: 1 x 100BaseFX valokuitu, monimuoto, 1300 nm, LC-liittimet

MT = Portin 9 tyyppi: 1 x 100BaseFX valokuitu, monimuoto, 1300 nm, ST-liittimet

XX = Valmistajan muutokset: Ei muutoksia

Tietokone ja ohjelmistot

Tietokone

Lenovo ThinkPad T61

Intel Core 2 Duo T8300 @ 2,4 GHz

2 GB RAM

MicroSCADA

MicroSCADA Pro 9.3

FeaturePack 1

Hot Fix 2

Lisenssi: ABB Substation Automation Engineering License

PCM600

Engineering Pro versio 2.3

Liite D Mittaustulokset PML630:n nopeuskokeesta

Taulukko D.1: Aikaleimat REF630 (1) -releen tapahtumalistalta koetilanteesta, jossa GT01 avattiin ja jonka jälkeen PML630 avasi LBB1SL1-kuorman.

| Rele: REF630 (1) | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Tapahtuma: GT01 avataan, koska LBB1SL1 avautuu | | | |
| Testi: | GT01 avautumistieto: | LBB1SL1 avautumistieto: | Viive (ms): |
| 1 | 21.11.2011 14:21:58:771 | 21.11.2011 14:21:58:820 | 49 |
| 2 | 21.11.2011 14:22:16:222 | 21.11.2011 14:22:16:270 | 48 |
| 3 | 21.11.2011 14:22:30:205 | 21.11.2011 14:22:30:255 | 50 |
| 4 | 21.11.2011 14:22:48:487 | 21.11.2011 14:22:48:537 | 50 |
| 5 | 21.11.2011 14:23:05:858 | 21.11.2011 14:23:05:908 | 50 |
| 6 | 21.11.2011 14:23:20:027 | 21.11.2011 14:23:20:077 | 50 |
| 7 | 21.11.2011 14:23:39:116 | 21.11.2011 14:23:39:165 | 49 |
| 8 | 21.11.2011 14:23:57:379 | 21.11.2011 14:23:57:429 | 50 |
| 9 | 21.11.2011 14:24:14:740 | 21.11.2011 14:24:14:789 | 49 |
| 10 | 21.11.2011 14:24:32:553 | 21.11.2011 14:24:32:603 | 50 |
| 11 | 21.11.2011 14:24:50:698 | 21.11.2011 14:24:50:748 | 50 |
| 12 | 21.11.2011 14:25:07:701 | 21.11.2011 14:25:07:751 | 50 |
| 13 | 21.11.2011 14:25:25:165 | 21.11.2011 14:25:25:216 | 51 |
| 14 | 21.11.2011 14:25:50:020 | 21.11.2011 14:25:50:071 | 51 |
| 15 | 21.11.2011 14:26:06:593 | 21.11.2011 14:26:06:644 | 51 |
| 16 | 21.11.2011 14:26:22:315 | 21.11.2011 14:26:22:366 | 51 |
| 17 | 21.11.2011 14:26:38:442 | 21.11.2011 14:26:38:493 | 51 |
| 18 | 21.11.2011 14:26:57:326 | 21.11.2011 14:26:57:378 | 52 |
| 19 | 21.11.2011 14:27:12:942 | 21.11.2011 14:27:12:993 | 51 |
| 20 | 21.11.2011 14:27:38:248 | 21.11.2011 14:27:38:300 | 52 |
| 21 | 21.11.2011 14:27:54:190 | 21.11.2011 14:27:54:241 | 51 |
| 22 | 21.11.2011 14:28:15:322 | 21.11.2011 14:28:15:374 | 52 |
| 23 | 21.11.2011 14:28:32:364 | 21.11.2011 14:28:32:414 | 50 |
| 24 | 21.11.2011 14:28:46:944 | 21.11.2011 14:28:46:996 | 52 |
| 25 | 21.11.2011 14:29:07:144 | 21.11.2011 14:29:07:194 | 50 |
| 26 | 21.11.2011 14:29:21:938 | 21.11.2011 14:29:21:991 | 53 |
| 27 | 21.11.2011 14:29:43:694 | 21.11.2011 14:29:43:744 | 50 |
| 28 | 21.11.2011 14:30:00:174 | 21.11.2011 14:30:00:225 | 51 |
| 29 | 21.11.2011 14:30:15:716 | 21.11.2011 14:30:15:768 | 52 |
| 30 | 21.11.2011 14:30:32:850 | 21.11.2011 14:30:32:902 | 52 |
| | | | |
| | | | Maksimi: 53 |
| | | | Minimi: 48 |
| | | | Keskiarvo: 51 |

Taulukko D.2: Aikaleimat REF630 (1) -releen tapahtumalistalta koetilanteesta, jossa GT01 avattiin ja jonka jälkeen PML630 avasi LBB1SL2-kuorman.

| Rele: REF630 (1) | | | |
|--|-----------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Tapahtuma: GT01 avataan, koska LBB1SL2 avautuu | | | |
| Testi: | GT01 avautumistieto: | LBB1SL2 avautumistieto: | Viive (ms): |
| 1 | 21.11.2011 12:35:40:880 | 21.11.2011 12:35:40:932 | 52 |
| 2 | 21.11.2011 12:36:23:869 | 21.11.2011 12:36:23:921 | 52 |
| 3 | 21.11.2011 12:36:41:935 | 21.11.2011 12:36:41:987 | 52 |
| 4 | 21.11.2011 12:37:01:216 | 21.11.2011 12:37:01:268 | 52 |
| 5 | 21.11.2011 12:37:24:702 | 21.11.2011 12:37:24:744 | 42 |
| 6 | 21.11.2011 12:37:45:251 | 21.11.2011 12:37:45:293 | 42 |
| 7 | 21.11.2011 12:38:15:784 | 21.11.2011 12:38:15:827 | 43 |
| 8 | 21.11.2011 12:39:11:908 | 21.11.2011 12:39:11:950 | 42 |
| 9 | 21.11.2011 12:39:30:152 | 21.11.2011 12:39:30:195 | 43 |
| 10 | 21.11.2011 12:39:54:682 | 21.11.2011 12:39:54:726 | 44 |
| 11 | 21.11.2011 12:40:33:696 | 21.11.2011 12:40:33:738 | 42 |
| 12 | 21.11.2011 12:40:54:165 | 21.11.2011 12:40:54:208 | 43 |
| 13 | 21.11.2011 12:41:20:859 | 21.11.2011 12:41:20:902 | 43 |
| 14 | 21.11.2011 12:42:37:607 | 21.11.2011 12:42:37:651 | 44 |
| 15 | 21.11.2011 12:42:55:958 | 21.11.2011 12:42:56:002 | 44 |
| 16 | 21.11.2011 12:43:16:330 | 21.11.2011 12:43:16:374 | 44 |
| 17 | 21.11.2011 12:43:38:726 | 21.11.2011 12:43:38:770 | 44 |
| 18 | 21.11.2011 12:44:11:944 | 21.11.2011 12:44:11:988 | 44 |
| 19 | 21.11.2011 12:44:32:656 | 21.11.2011 12:44:32:703 | 47 |
| 20 | 21.11.2011 12:45:43:436 | 21.11.2011 12:45:43:480 | 44 |
| 21 | 21.11.2011 12:46:07:085 | 21.11.2011 12:46:07:130 | 45 |
| 22 | 21.11.2011 12:47:00:530 | 21.11.2011 12:47:00:578 | 48 |
| 23 | 21.11.2011 12:47:28:728 | 21.11.2011 12:47:28:777 | 49 |
| 24 | 21.11.2011 12:47:49:169 | 21.11.2011 12:47:49:214 | 45 |
| 25 | 21.11.2011 12:48:08:687 | 21.11.2011 12:48:08:736 | 49 |
| 26 | 21.11.2011 12:48:27:842 | 21.11.2011 12:48:27:890 | 48 |
| 27 | 21.11.2011 12:48:51:914 | 21.11.2011 12:48:51:963 | 49 |
| 28 | 21.11.2011 12:49:14:290 | 21.11.2011 12:49:14:338 | 48 |
| 29 | 21.11.2011 12:49:33:513 | 21.11.2011 12:49:33:562 | 49 |
| 30 | 21.11.2011 12:50:09:393 | 21.11.2011 12:50:09:443 | 50 |
| | | Maksimi: | 52 |
| | | Minimi: | 42 |
| | | Keskiarvo: | 46 |

Taulukko D.3: Aikaleimat REF630 (2) -releen tapahtumalistalta koetilanteesta, jossa G01 avattiin ja jonka jälkeen PML630 avasi LBB1SL1-kuorman.

| Rele: REF630 (2) | | | |
|---|----------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Tapahtuma: G01 avataan, koska LBB1SL1 avautuu | | | |
| Testi: | G01 avautumistieto: | LBB1SL1 avautumistieto: | Viive (ms): |
| 1 | 21.11.2011 13:47:18:198 | 21.11.2011 13:47:18:241 | 43 |
| 2 | 21.11.2011 13:47:40:482 | 21.11.2011 13:47:40:535 | 53 |
| 3 | 21.11.2011 13:47:55:606 | 21.11.2011 13:47:55:650 | 44 |
| 4 | 21.11.2011 13:48:10:509 | 21.11.2011 13:48:10:552 | 43 |
| 5 | 21.11.2011 13:48:29:921 | 21.11.2011 13:48:29:964 | 43 |
| 6 | 21.11.2011 13:48:54:643 | 21.11.2011 13:48:54:688 | 45 |
| 7 | 21.11.2011 13:49:14:411 | 21.11.2011 13:49:14:454 | 43 |
| 8 | 21.11.2011 13:51:31:750 | 21.11.2011 13:51:31:793 | 43 |
| 9 | 21.11.2011 13:51:49:511 | 21.11.2011 13:51:49:564 | 53 |
| 10 | 21.11.2011 13:52:06:994 | 21.11.2011 13:52:07:037 | 43 |
| 11 | 21.11.2011 13:52:21:416 | 21.11.2011 13:52:21:469 | 53 |
| 12 | 21.11.2011 13:52:38:212 | 21.11.2011 13:52:38:255 | 43 |
| 13 | 21.11.2011 13:52:56:889 | 21.11.2011 13:52:56:932 | 43 |
| 14 | 21.11.2011 13:53:13:807 | 21.11.2011 13:53:13:859 | 52 |
| 15 | 21.11.2011 13:53:38:266 | 21.11.2011 13:53:38:317 | 51 |
| 16 | 21.11.2011 14:13:11:387 | 21.11.2011 14:13:11:440 | 53 |
| 17 | 21.11.2011 14:13:26:504 | 21.11.2011 14:13:26:556 | 52 |
| 18 | 21.11.2011 14:13:42:247 | 21.11.2011 14:13:42:298 | 51 |
| 19 | 21.11.2011 14:13:57:952 | 21.11.2011 14:13:58:004 | 52 |
| 20 | 21.11.2011 14:14:13:355 | 21.11.2011 14:14:13:407 | 52 |
| 21 | 21.11.2011 14:14:29:235 | 21.11.2011 14:14:29:287 | 52 |
| 22 | 21.11.2011 14:14:46:382 | 21.11.2011 14:14:46:434 | 52 |
| 23 | 21.11.2011 14:15:03:367 | 21.11.2011 14:15:03:419 | 52 |
| 24 | 21.11.2011 14:15:19:041 | 21.11.2011 14:15:19:093 | 52 |
| 25 | 21.11.2011 14:15:34:151 | 21.11.2011 14:15:34:203 | 52 |
| 26 | 21.11.2011 14:15:49:814 | 21.11.2011 14:15:49:865 | 51 |
| 27 | 21.11.2011 14:16:07:311 | 21.11.2011 14:16:07:363 | 52 |
| 28 | 21.11.2011 14:16:23:034 | 21.11.2011 14:16:23:086 | 52 |
| 29 | 21.11.2011 14:16:38:987 | 21.11.2011 14:16:39:040 | 53 |
| 30 | 21.11.2011 14:16:56:357 | 21.11.2011 14:16:56:409 | 52 |
| | | Maksimi: | 53 |
| | | Minimi: | 43 |
| | | Keskiarvo: | 49 |

Taulukko D.4: Aikaleimat REF630 (2) -releen tapahtumalistalta koetilanteesta, jossa G01 avattiin ja jonka jälkeen PML630 avasi LBB1SL2-kuorman.

| Rele: REF630 (2) | | | |
|---|----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Tapahtuma: G01 avataan, koska LBB1SL2 avautuu | | | |
| Testi: | G01 avautumistieto: | LBB1SL2 avautumistieto: | Viive (ms): |
| 1 | 21.11.2011 13:30:34:014 | 21.11.2011 13:30:34:056 | 42 |
| 2 | 21.11.2011 13:30:58:611 | 21.11.2011 13:30:58:652 | 41 |
| 3 | 21.11.2011 13:31:23:540 | 21.11.2011 13:31:23:592 | 52 |
| 4 | 21.11.2011 13:31:46:637 | 21.11.2011 13:31:46:689 | 52 |
| 5 | 21.11.2011 13:32:13:863 | 21.11.2011 13:32:13:915 | 52 |
| 6 | 21.11.2011 13:32:42:771 | 21.11.2011 13:32:42:823 | 52 |
| 7 | 21.11.2011 13:33:03:372 | 21.11.2011 13:33:03:414 | 42 |
| 8 | 21.11.2011 13:33:42:175 | 21.11.2011 13:33:42:219 | 44 |
| 9 | 21.11.2011 13:34:05:283 | 21.11.2011 13:34:05:325 | 42 |
| 10 | 21.11.2011 13:34:24:516 | 21.11.2011 13:34:24:558 | 42 |
| 11 | 21.11.2011 13:34:57:640 | 21.11.2011 13:34:57:682 | 42 |
| 12 | 21.11.2011 13:35:17:124 | 21.11.2011 13:35:17:166 | 42 |
| 13 | 21.11.2011 13:35:36:490 | 21.11.2011 13:35:36:532 | 42 |
| 14 | 21.11.2011 13:36:32:303 | 21.11.2011 13:36:32:345 | 42 |
| 15 | 21.11.2011 13:36:48:864 | 21.11.2011 13:36:48:906 | 42 |
| 16 | 21.11.2011 13:37:05:047 | 21.11.2011 13:37:05:099 | 52 |
| 17 | 21.11.2011 13:37:24:701 | 21.11.2011 13:37:24:745 | 44 |
| 18 | 21.11.2011 13:37:47:522 | 21.11.2011 13:37:47:564 | 42 |
| 19 | 21.11.2011 13:38:13:513 | 21.11.2011 13:38:13:556 | 43 |
| 20 | 21.11.2011 13:38:35:214 | 21.11.2011 13:38:35:256 | 42 |
| 21 | 21.11.2011 13:38:56:833 | 21.11.2011 13:38:56:874 | 41 |
| 22 | 21.11.2011 13:39:40:423 | 21.11.2011 13:39:40:467 | 44 |
| 23 | 21.11.2011 13:40:20:244 | 21.11.2011 13:40:20:288 | 44 |
| 24 | 21.11.2011 13:40:38:329 | 21.11.2011 13:40:38:374 | 45 |
| 25 | 21.11.2011 13:41:06:203 | 21.11.2011 13:41:06:248 | 45 |
| 26 | 21.11.2011 13:41:26:353 | 21.11.2011 13:41:26:394 | 41 |
| 27 | 21.11.2011 13:42:02:096 | 21.11.2011 13:42:02:138 | 42 |
| 28 | 21.11.2011 13:42:21:283 | 21.11.2011 13:42:21:327 | 44 |
| 29 | 21.11.2011 13:42:51:796 | 21.11.2011 13:42:51:840 | 44 |
| 30 | 21.11.2011 13:43:18:320 | 21.11.2011 13:43:18:364 | 44 |
| | | | |
| | | | Maksimi: 52 |
| | | | Minimi: 41 |
| | | | Keskiarvo: 44 |

Taulukko D.5: Kahden kuormapuolen katkaisijan avautumisviive, kun PML630 avaa ne samalla kertaa.

| Rele: REF630 (1) | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Tapahtuma: LBB1SL1 ja LBB1SL2 avautuu, mikä on aikaero näiden välillä | | | |
| Testi | LBB1SL1 avautumistieto | LBB1SL2 avautumistieto | Viiveen itseisarvo (ms): |
| 1 | 23.11.2011 15:19:31:777 | 23.11.2011 15:19:31:771 | 6 |
| 2 | 23.11.2011 15:21:47:658 | 23.11.2011 15:21:47:654 | 4 |
| 3 | 23.11.2011 15:22:09:514 | 23.11.2011 15:22:09:511 | 3 |
| 4 | 23.11.2011 15:22:28:578 | 23.11.2011 15:22:28:574 | 4 |
| 5 | 23.11.2011 15:22:49:329 | 23.11.2011 15:22:49:325 | 4 |
| 6 | 23.11.2011 15:23:06:148 | 23.11.2011 15:23:06:143 | 5 |
| 7 | 23.11.2011 15:23:23:291 | 23.11.2011 15:23:23:286 | 5 |
| 8 | 23.11.2011 15:23:41:813 | 23.11.2011 15:23:41:809 | 4 |
| 9 | 23.11.2011 15:24:04:089 | 23.11.2011 15:24:04:085 | 4 |
| 10 | 23.11.2011 15:24:24:241 | 23.11.2011 15:24:24:237 | 4 |
| 11 | 23.11.2011 15:24:44:741 | 23.11.2011 15:24:44:737 | 4 |
| 12 | 23.11.2011 15:25:05:778 | 23.11.2011 15:25:05:774 | 4 |
| 13 | 23.11.2011 15:25:26:016 | 23.11.2011 15:25:26:011 | 5 |
| 14 | 23.11.2011 15:25:55:989 | 23.11.2011 15:25:55:984 | 5 |
| 15 | 23.11.2011 15:26:13:261 | 23.11.2011 15:26:13:259 | 2 |
| 16 | 23.11.2011 15:26:30:442 | 23.11.2011 15:26:30:437 | 5 |
| 17 | 23.11.2011 15:26:48:207 | 23.11.2011 15:26:48:205 | 2 |
| 18 | 23.11.2011 15:27:04:983 | 23.11.2011 15:27:04:981 | 2 |
| 19 | 23.11.2011 15:27:33:119 | 23.11.2011 15:27:33:117 | 2 |
| 20 | 23.11.2011 15:27:50:385 | 23.11.2011 15:27:50:383 | 2 |
| 21 | 23.11.2011 15:28:06:120 | 23.11.2011 15:28:06:114 | 6 |
| 22 | 23.11.2011 15:28:31:019 | 23.11.2011 15:28:31:015 | 4 |
| 23 | 23.11.2011 15:28:51:192 | 23.11.2011 15:28:51:186 | 6 |
| 24 | 23.11.2011 15:29:07:045 | 23.11.2011 15:29:07:041 | 4 |
| 25 | 23.11.2011 15:29:23:667 | 23.11.2011 15:29:23:664 | 3 |
| 26 | 23.11.2011 15:29:41:380 | 23.11.2011 15:29:41:377 | 3 |
| 27 | 23.11.2011 15:30:02:477 | 23.11.2011 15:30:02:471 | 6 |
| 28 | 23.11.2011 15:30:20:125 | 23.11.2011 15:30:20:122 | 3 |
| 29 | 23.11.2011 15:30:40:069 | 23.11.2011 15:30:40:066 | 3 |
| 30 | 23.11.2011 15:30:56:339 | 23.11.2011 15:30:56:335 | 4 |
| 31 | 23.11.2011 15:38:12:313 | 23.11.2011 15:38:12:312 | 1 |
| 32 | 23.11.2011 15:38:31:131 | 23.11.2011 15:38:31:128 | 3 |
| 33 | 23.11.2011 15:38:51:998 | 23.11.2011 15:38:51:996 | 2 |
| 34 | 23.11.2011 15:39:10:389 | 23.11.2011 15:39:10:387 | 2 |
| 35 | 23.11.2011 15:39:28:877 | 23.11.2011 15:39:28:875 | 2 |
| 36 | 23.11.2011 15:39:45:630 | 23.11.2011 15:39:45:627 | 3 |
| 37 | 23.11.2011 15:40:01:005 | 23.11.2011 15:40:01:003 | 2 |
| 38 | 23.11.2011 15:40:18:903 | 23.11.2011 15:40:18:900 | 3 |
| 39 | 23.11.2011 15:40:34:276 | 23.11.2011 15:40:34:273 | 3 |
| Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla... | | | |

| ...jatkoa edelliseltä sivulta. | | | |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| 40 | 23.11.2011 15:40:50:958 | 23.11.2011 15:40:50:955 | 3 |
| 41 | 23.11.2011 15:41:10:448 | 23.11.2011 15:41:10:445 | 3 |
| 42 | 23.11.2011 15:41:29:199 | 23.11.2011 15:41:29:196 | 3 |
| 43 | 23.11.2011 15:41:55:806 | 23.11.2011 15:41:55:803 | 3 |
| 44 | 23.11.2011 15:42:13:722 | 23.11.2011 15:42:13:718 | 4 |
| 45 | 23.11.2011 15:42:29:820 | 23.11.2011 15:42:29:819 | 1 |
| 46 | 23.11.2011 15:42:46:251 | 23.11.2011 15:42:46:248 | 3 |
| 47 | 23.11.2011 15:43:08:280 | 23.11.2011 15:43:08:280 | 0 |
| 48 | 23.11.2011 15:43:29:458 | 23.11.2011 15:43:29:455 | 3 |
| 49 | 23.11.2011 15:43:51:246 | 23.11.2011 15:43:51:242 | 4 |
| 50 | 23.11.2011 15:44:07:197 | 23.11.2011 15:44:07:195 | 2 |
| 51 | 23.11.2011 15:44:24:311 | 23.11.2011 15:44:24:310 | 1 |
| 52 | 23.11.2011 15:44:47:817 | 23.11.2011 15:44:47:816 | 1 |
| 53 | 23.11.2011 15:45:07:249 | 23.11.2011 15:45:07:246 | 3 |
| 54 | 23.11.2011 15:45:27:480 | 23.11.2011 15:45:27:480 | 0 |
| 55 | 23.11.2011 15:45:44:865 | 23.11.2011 15:45:44:862 | 3 |
| 56 | 23.11.2011 15:46:02:565 | 23.11.2011 15:46:02:564 | 1 |
| 57 | 23.11.2011 15:46:19:555 | 23.11.2011 15:46:19:554 | 1 |
| 58 | 23.11.2011 15:46:34:608 | 23.11.2011 15:46:34:603 | 5 |
| 59 | 23.11.2011 15:46:51:381 | 23.11.2011 15:46:51:379 | 2 |
| 60 | 23.11.2011 15:47:07:103 | 23.11.2011 15:47:07:101 | 2 |
| | | | |
| Maksimi: | | | 6 |
| Minimi: | | | 0 |
| Keskiarvo: | | | 3 |