

Harri Kämppi

# Verkostoautomaatio pienjänniteverkossa

Selektiivisyyden parantaminen kompaktikatkaisijoilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Sähköinen talotekniikka

Opinnäytetyö

22.2.2019

Tekijä Otsikko	Harri Kämppe Verkostoautomaatio pienjänniteverkossa
Sivumäärä Aika	68 sivua + 4 liitettä 22.2.2019
Tutkinto	Ylempi ammattikorkeakoulu
Koulutusohjelma	Talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähköinen talotekniikka
Ohjaajat	Ryhmäpäällikkö Teemu Mansikkala Lehtori Jarmo Tapio Lehtori Matti Sundgren
<p>Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä HUS:n ja ABB:n kanssa insinööritoimisto Granlund Oy:n toimeksiannosta.</p> <p>Päättötyössä tutkittiin selektiivisyyden ja turvallisuuden parantamista sairaalan sähköverkossa. Näkökulmana oli tutkia sähköverkkoautomaation ulottamista myös sille harvinaisemmalle pienjännitepuolelle kolmen esimerkki rakennuksen avulla.</p> <p>Menetelminä tiedon haussa käytettiin käytettiin alan kirjallisuutta, HUS:n sähkönsäädön johtajan ja ABB:n asiantuntijoiden haastatteluita, sekä katkaisijoiden valmistajien tehtaille suoritettuja ekskursioita. Loistavan käytäntöön sidotun faktapohjan työlle tuotti ABB:n sähkölaboratoriossa suoritettut testaukset ja koekytännöt.</p> <p>Työn aikana vahvistui käsitys sulakesuojauksen jäämisestä jälkeen kehityksestä monimutkaisissa kohteissa joissa syöttävä teho vaihtelee suuresti.</p> <p>Granlund Oy tekee paljon sähkösuunnittelua Helsingin ja uudenmaansairaanhoidopiirille. Päättötyötä voi käyttää suunnittelun tukena ja lähtökohtana sähköverkon suunnittelemisessa vaatimaan sairaalakohteeseen, sillä se todistaa konkreettisesti automaatiosta saadut edut.</p>	
Avainsanat	verkostoautomaatio, kennotermiinaali, scada, IEC 61850

Author Title	Harri Kämppe Network Automation in Small Voltage Grid
Number of Pages Date	68 pages + 4 appendices 22 February 2019
Degree	Master of Engineering
Degree Program	Building Services Engineer
Specialisation option	Electrical Building Services
Instructors	Teemu Mansikkala, Department manager Jarmo Tapio, Principal Lecturer Matti Sundgren, Senior Lecturer
<p>The Master's thesis studied how to improve the selectivity and safety of the electrical network in a hospital. Especially the extension of power grid automation to the low voltage side was studied, based on three case buildings.</p> <p>The methods used in the search of information were studying literature of the field and interviews with various experts. In addition, excursions to manufacturers of intelligent electronic devices offered more information, and practical research material was provided by the electrical testing laboratory.</p> <p>The results of the thesis suggested that in complex grids with varying input power, fuse protection is not sufficient alternative. Only the use of guided breakers can make that kind of a grid completely selective.</p> <p>This thesis can be used as a support to design process and as a starting point for designing a power grid for a demanding hospital, as it demonstrates the advantages of automation.</p>	
Keywords	network automation, IED, scada, IEC 61850

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Verkon ohjaus ja hallinta	3
2.1	Sähköverkon ohjaus	3
2.1.1	Säästöä jo rakennusvaiheessa	4
2.1.2	Jakeluverkon hallintajärjestelmä	6
2.2	Verkkotietojärjestelmä	6
2.3	Käytönvalvontajärjestelmä	6
2.4	Johtolähtöautomaatio	7
2.5	Sähkönjakelun energianhallintajärjestelmä	7
3	Scada ja MicroScada	8
3.1	Rakenne	8
3.2	Komponentit ja kaapeloinnit	9
3.3	Verkoston ylläpito	10
3.4	Laitteet	12
4	Relesuojaus ja selektiivisyys	15
4.1	Oikosulkusuojaus ja selektiivisyys	15
4.1.1	Oikosulku	15
4.1.2	Selektiivisyys	17
4.2	Sähköverkon suojaus	19
4.3	Suojareleen toimintaperiaate	22
4.3.1	Mekaaniset releet	22
4.3.2	Staattiset releet	22
4.3.3	Numeeriset releet	23
5	IEC 61850 -väylä	24
5.1	Historia	24
5.2	Goose -kommunikaatio	26
6	Meilahden verkonhallinta järjestelmä	28

7	Sulakesuojaus vs. kompaktikatkaisijoilla toteutettu suojaus	31
7.1	Laskentatapaus K	35
7.1.1	Perinteinen sulakesuojaus	35
7.1.2	Katkaisijoilla ja väyläohjauksella toteutettuna	38
7.2	Laskentatapaus N	45
7.2.1	Perinteinen sulakesuojaus	45
7.2.2	Katkaisijoilla ja väyläohjauksella toteutettuna	48
7.3	Laskentatapaus U	53
7.3.1	Perinteisellä sulakesuojauksella toteutettuna	53
7.3.2	Katkaisijoilla ja väyläohjauksella toteutettuna	56
8	Tulokset ja yhteenveto	64
8.1	Selektiivisyys ja turvallisuus	65
8.2	Toiminta ja käytettävyys	66
	Lähteet	67

## Liitteet

Liite 1. Verkonohjauskaavio

Liite 2. Esimerkkiverkko K

Liite 3. Esimerkkiverkko N

Liite 4. Esimerkkiverkko U

## Käsitteet ja lyhenteet

DAP

Distribution automation process. Automaatiolla ohjattu sähköverkko.

Digitalinen viesti

Tietoa sisältävä ykkösistä ja nolista koostuva viesti.

$I_{pk}$

Rajoittamaton kolmevaiheinen dynaaminen oikosulkuvirta.

$I_c$

Etukojeella (sulakkeella) rajoitettu kolmivaiheinen oikosulkuvirta.

$I_{min}$

Etukojeella (sulakkeella) rajoitettu yksivaiheinen oikosulku (ns. maasulku)

IEC

International Electrical Commission. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.

IED

Intelligent Electronic Device. Laite, joka pystyy vastaanottamaan dataa sensoreilta ja vastaamaan annettuihin käskyihin.

I/O (Input/Output)

Reitittimelle tai muulle ohjaimelle tulevat/lähtevät viestit. Inputit ovat indikointi tietoja esim. antureilta ja outputit ohjaussignaaleja toimilaitteille.

Jänniteviesti / analoginen

Jännitteellä tai virralla välitettävä viesti.

Pollaava väylä

Isäntälaitte lähettää tietyillä intervaleilla tunnustelun tai "kysymyksen" väylän laitteille, johon nämä vastaavat.

SPA

Verkostoautomaation väylätyyppi. Pollaava eli "orja-isäntälaitte" väylä.

Spontaani väylä

Väyläjärjestelmä, jossa kaikki väylän laitteet omaavat älyä ja lähettävät tietoa väylään omaehtoisesti.

UPS

Uninterruptible power supply. Akustollinen katkoton sähkön varavoimajärjestelmä.

## 1 Johdanto

Verkon ohjausjärjestelmä on sähköverkolle nykyään samankaltainen välttämättömyys kuin rakennusautomaatiojärjestelmä talotekniikalle.

Sähköverkossa on usein kuormia, joiden kaikkien yhtäaikainen käyttö ei ole tarpeellista. Yleensä niiden käyttöä tai kytkentää ei koordinoita, vaan ne toimivat itsenäisesti ollen koko ajan kytkettynä. Mikäli tarpeeksi monta kuormaa kytkeytyy yhtä aikaa päälle, sähköverkko saattaa kuormittua liikaa. Tämä puolestaan aiheuttaa hälytyksiä ylikuormituksen valvonnassa ja suojalaitteiden kuten releiden laukeamista.

Sähköverkon automaatio eli jakeluautomaatio (Distribution Automation) tarkoittaa erilaisten sähkön siirto- ja jakeluverkkojen hallintaa, käyttöä ja valvontaa. Jakeluautomaatiota käytetään laaja-alaisesti sähkö-, lämpö-, vesi- ja kaasuverkoissa. Peruskonsepti on kaikissa järjestelmissä ja sovelluksissa sama: suorittaa erilaisia ohjauksia ja mitauksia sekä välittää tilatietoja ja hälytyksiä yms.

Tässä työssä keskitytään kuitenkin pienjännitealueen sähköverkon jakeluautomaatioon, jota kutsutaan DA-konseptiksi. DA-konsepti perustuu tuotteista ja järjestelmästä jotka ovat keskenään integroituneet samoihin rajapintoihin. Näin sähköverkkoa voidaan ohjata ja hallita sekä syöttää energiaa tehon tarpeen mukaan.

Tähän mennessä automaatiota sähköverkossa on käytetty lähinnä suur- ja keskijänniteverkoissa. Tässä työssä on kuitenkin tarkoitus tutkia mitä hyötyjä automaatiosta saataisiin pienjänniteverkossa, painottuen sairaalakohteissa merkityksellisiin selektiivisyyteen ja turvallisuuteen.

Tällä hetkellä syöttöjen etukojeina sairaaloissa on lähinnä sulakkeita, jotka katkaisevat virran määrätyn virta-arvon ylityttyä, ilman mitään automaatiota tai tietoa toisistaan. Ongelmaksi sairaalan sähköverkossa muodostuu kuitenkin kolme erillistä syöttöjärjestelmää, jolloin oikosulkuvirtaa on käytössä eri määrät riippuen syöttötilanteesta. Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta käyttää automatisoituja kompaktikatkaisijoita keskusten etukojeina. Onko oikosulkuvirtojen katkaisu mahdollista saada nopeammaksi ja parantaa verkon selektiivisyyttä, katkaisijoiden kommunikoidessa keskenään?

Työssä tarkastellaan kolmen esimerkkirakennuksen verkkoa. Referenssikohteina käytetään todellisia nousujohtokaavioita Meilahdesta. Verkot mallinnetaan FebDoc- tietokoneohjelmalla ja ABB:n Vaasan koeasemalla käyttäen uusia komponentteja ja väylätekniikkaa. Saatuja tuloksia verrataan toteutettuihin ratkaisuihin.

Työstä on rajattu pois varsinaiset järjestelmän muutoksista syntyvien kustannusten arvionti ja muiden kuin keskusten etukojeiden tarkastelut. Kysyntäjoustoja tai syötönvaihtoautomaatiikkaa, jotka ovat myös automaation tärkeitä sovellutuksia, sivutaan vain lyhyesti.

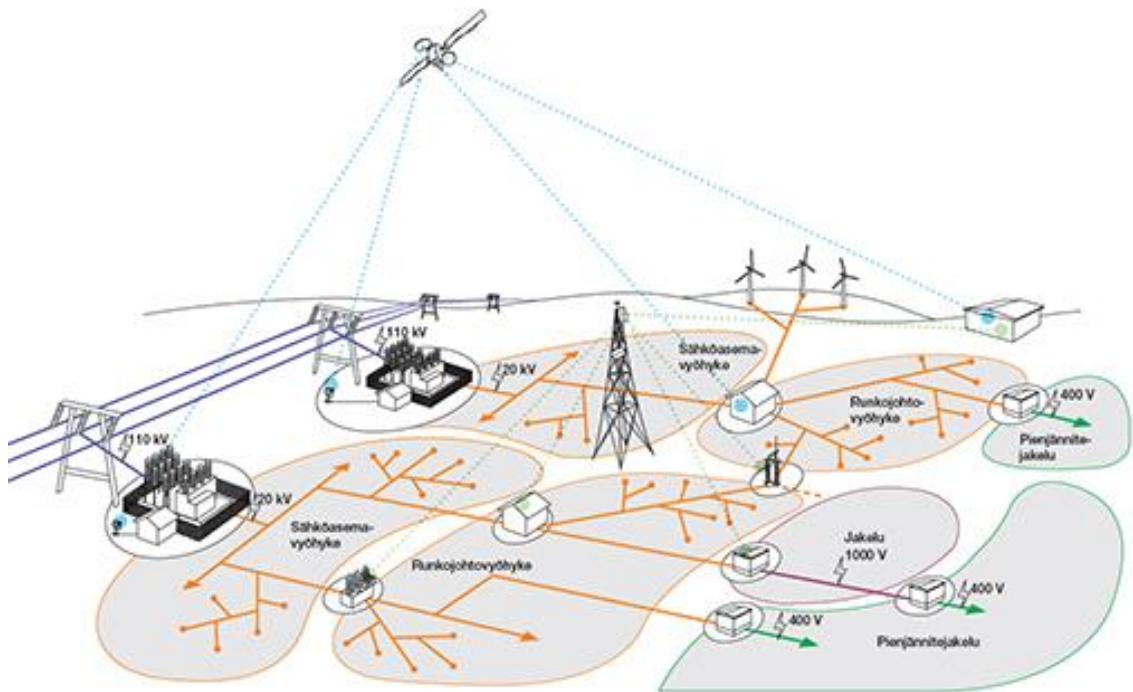


## 2 Verkon ohjaus ja hallinta

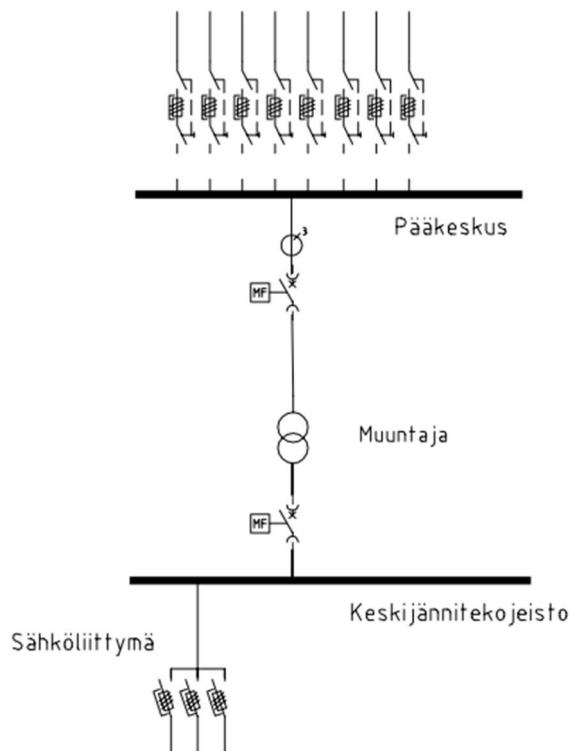
### 2.1 Sähköverkon ohjaus

Verkkoautomaatiota käytetään voimalaitoksissa, sähköasemilla, sairaaloissa ja joissakin teollisuuslaitoksissa. Järjestelmää käytetään, kun sähkökatkoilla on merkitystä yhteiskunnan huoltovarmuuden kanssa tai katkoista syntyisi vaaraa tai suuria kustannuksia. Sellaisenaan se on hieman liian järeä asuntoinfraan tai kaupallisiin rakennuksiin (kuva 1).

Automaatiolla ohjataan yleensä kojeistoja, muuntamoita ja pääkeskuksia (kuva 2). Ohjaus tapahtuu erottamalla ja kytkemällä edellä mainituissa olevia katkaisijoita. Verkostoautomaatiojärjestelmällä myös kerätään tietoa sähköverkosta: esimerkiksi kulutuksesta, vaihevirroista jännitteen alenemista, yliaalloista, katkoksista ja muista häiriöistä. Sähköverkon automaatioon on kaksi pääsyytä: se säästää kustannuksia ja kohentaa verkon käytettävyyttä parantamalla käyttöastetta sekä lisäämällä luotettavuutta.



Kuva 1. Kantaverkon rakenne.



Kuva 2. Pienjänniteverkon rakenne.

### 2.1.1 Säästöä jo rakennusvaiheessa

Automaatiikka ohjaa tavallisesti katkaisijoita, erottimia, muuntajien käämikytkimiä sekä erilaisia mittauksia kiskostosta. Kaikki ohjaus- ja mittausprosessit ovat täysin reaaliaikaisia. Verkstoautomaatio voidaan myös integroida liittymään muihin taloautomaatiojärjestelmiin, kuten KNX:ään tai Modbusiin.

Jo rakennusvaiheessa verkkoautomaatiolla voidaan saada aikaan säästöjä, kun valvonta voidaan keskittää yhteen tilaan ja näin ollen säästää neliöitä. Lisäksi yhden ainoan käyttöliittymän johdosta järjestelmän ylläpitotarve sekä huoltohenkilökunnan koulutustarve vähentyvät.

Kauko-ohjatuissa erotinasemilla viat voidaan erottaa verkosta nopeasti valvomosta käsin. Vianmäärityksessä lokitiedot ja aikaleimat ovat isoksi avuksi, kun vikaa etsitään monimutkaisista tai suurista verkoista. Automaatiikka pystyy myös itsenäisesti erottamaan viallisen haaran verkosta. Kertyneellä lokitiedolla vikakohta pystytään rajaamaan paremmin, ja aiheutuvat huoltohävikit pienenevät.

Automaatiota voidaan käyttää myös sähköenergian kulutuksen mittaukseen. Tällöin erilisiä kulutusmittarien luentoja ei tarvita, sillä kaikista kennoterminaleista voidaan tuoda mittaustieto valvomon tietokoneelle. Mittausdataa voidaan käyttää myös loistehon kompensointiin sekä jännitteen ja kytkentätilanteen optimointiin. Tällöin verkon kokonaishäviö pystytään minimoimaan.

Verkon keskitetty valvonta (mm. käyttödokumentit, päto- ja loistehon mittaukset ja kirjaukset, kuormitusmallit ja niistä saatavat ennusteet jne.) takaa nykyisessä sähkökaupassa mahdollisuuden merkittäviin säästöihin energiamaksuissa, kun kuormia pystytään ennustamaan paremmin. Näin esimerkiksi tiettyihin kuormiin voidaan käyttää niin kutsuttua sähkön kysyntäjoustoa. Eli kuorma voidaan kytkeä sähkön hintatariffin ollessa halvempaa kuin jonain toisena ajankohtana.

Ennen nykyisiä digitaalisia sovellutuksia verkon valvonta ja ohjaus toteutettiin suoraan sulkeutuvilla ja avautuvilla koskettimilla niin kutsutun jänniteviestin tai virtaviestin avulla. Apukosketin antoi tiedon tai ohjasi kontaktoria tai relettä toimimaan. Tällaisia kutsutaan potentiaalivapaalla koskettimella ohjatuksi lähdeksi.

Tällaisessa järjestelmässä ohjauskomponenttien määrä saattaa kasvaa isoksi, mikä lisää kustannuksia sekä vie tilaa keskuksista ja kojeistoista. Mitä suurempi on komponenttien määrä, sitä suurempi on mekaanisen vian mahdollisuus: esimerkiksi kärkien jumittuminen tai kiinni hitsautuminen.

Jänniteviestistä ei myöskään itsessään pystytä irrottamaan mitään tietoa. Itsessään se on vain indikointitieto. Sellaisenaan se pitää monistaa ja kaapeloida apukärjillä jokaiseen kohteeseensa erikseen. Ja siltikin se on vain päällä/pois -tyyppinen indikointi ilman mitään bittipohjaista oheisinformaatiota (Aura & Tonteri 1993).

### 2.1.2 Jakeluverkon hallintajärjestelmä

(DMS, Distribution Management System) eli verkosto automaatio on muita järjestelmiä palveleva käytön tuki sähköverkon valvontaan ja suunnitteluun. Näitä järjestelmiä ovat esimerkiksi kytkentätilan ylläpito, verkkotopologian hallinta, vianhallinta, raportointi ja tilastointi tiedot. Edellä mainitut järjestelmät perustuvat yleensä käytönvalvonta- ja verkkotietojärjestelmien ylläpitämien tietojen käyttöön.

### 2.2 Verkkotietojärjestelmä

(NIS, Network Information System) käsittää verkon laskennalliseen käsittelyyn tarvittavat toiminnot ja tietokannat. Ne sisältävät teknilliset tiedot sähköasemilta, keskijänniteverkosta, muuntamoilta ja pienjänniteverkosta. Verkkotietojärjestelmän pääasiallinen tarkoitus on verkon suunnittelu, ylläpito ja seurantalaskenta. Näiden lisäksi siihen sisältyy mm. verkoston kunnossapidon ja rakentamisen suunnittelutoimintoja. Yleensä verkkotietojärjestelmä perustuu paikkatietojen hallintaan, ja graafisen käyttöliittymän avulla esitettävään havainnollistettavaan kaavioon.

### 2.3 Käytönvalvontajärjestelmä

(NCS, Network Control System) kerää valvomoon reaaliaikaisia tietoja sähkö-asemilta sekä verkosta, ja lähettää ohjauksia verkon komponenteille. Käytönvalvontajärjestelmä sisältää tietokannan, jossa säilytetään mittaus-, ja tilatietoja, parametrejä yms. aikaleimattuina. Järjestelmä tallentaa vain tietyn määrän tietoja, koska sinne saapuu jatkuvasti uusia mittaus ja tilatietoja. Tietokanta on ohjelmistona joustava, ja siihen voidaan liittyä erilaisilla sovelluksilla (Mäkinen 2013).

## 2.4 Johtolähtöautomaatio

(FA, Feeder Automation) päätehtävänä on rajoittaa verkostossa syntyvien vikatilanteiden vaikutusaluetta ja -aikaa sekä suojella verkon laitteita. Lisäksi järjestelmällä voidaan ehkäistä verkossa olevia vikoja. Toiminnallisuuden hallinta hyödyntää jakeluverkoissa olevia toimilaitteita ja kaukokäytön päätelaitteita. DMS tukipalvelu täydentää johtolähtöautomaation toimintoja.

## 2.5 Sähkönjakelun energianhallintajärjestelmä

(DEM, Distribution Energy Management) optimoi laitoksen tai kiinteistöjen energian hallintaa ja seuraa energiankäyttöä, mikäli hankintalähteitä on useita. Sähkökaupan vapautuminen tuo entistä suuremman painoarvon näille järjestelmille ja niiden kehittämiselle; esimerkiksi verkkoyhtiön tapauksessa jakeluverkon energiataseiden hahmottaminen alueellisia taselaskelmia varten.

### 3 Scada ja MicroScada

Scada (Supervisory Control And Data Acquisition) on ABB:n kehittämä verkonvalvonta- ja ohjausjärjestelmä. Järjestelmä on keskitettyyn valvomoon perustuva selainpohjainen graafinen ohjelma. Scada-järjestelmästä kiinteistön tai alueen sähköverkko on helppo hahmottaa normaali- ja vikatilanteessa.

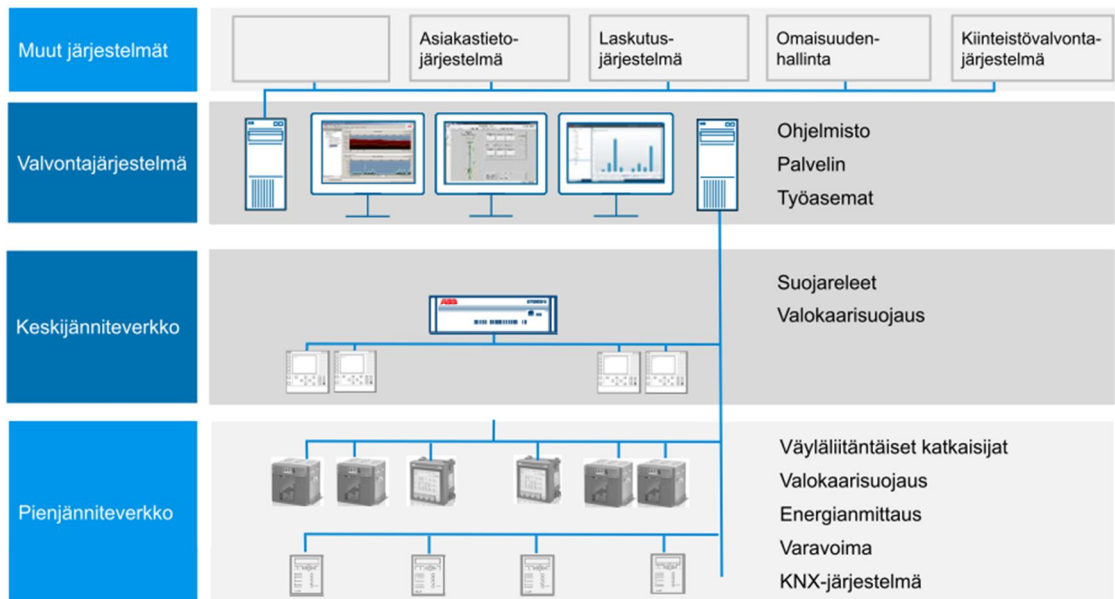
Ohjelma kerää tietoa verkon eri komponenteilta ja luo kuvan kokonaistilanteesta helposti ymmärrettäväksi kaavioksi. Valvomosta on reaaliaikiasen kaavion avulla mahdollista valvoa suurtakin verkkoa, melko pienellä miehityksellä.

#### 3.1 Rakenne

Scada perustuu väyläpohjaiseen tiedonvälitykseen. Järjestelmä koostuu kenttälaitteista, ala-asemasta ja valvomosta (kuva 3).

Valvomo on siis järjestelmän tarkkailu ja ohjaustila. Siellä oleville näytöille tuodaan kaikki informaatio kentältä.

Valvomo (kuva 7) sisältää UPS (katkoton sähkönsyöttö) -varmennetut tietokoneet, joilla verkkoa tarkkaillaan ja ohjataan. Niihin on liitetty SCADA:n serveri, joka tallentaa tapahtumat, aikatahdistaa järjestelmän ja välittää viestit sisään ja ulos kenttälaitteista. Valvomoita voi olla myös useampia, mikäli niin halutaan, jolloin paikallisautomaatiolla voidaan hoitaa jonkin pienemmän kokonaisuuden ohjaukset, päävalvomon toimiessa varalla.



Kuva 3. Verkon valvonna järjestelmäkaavio.

Ala-asema on tietoliikennevirstien, eli I/O-tietojen (indikointien ja ohjausten), väylien ja SPA-viestien eli ohjausten koontipiste. Ala-asema on yksinkertaisimmillaan ristikytken-täteline (kuva 4), joka toimii muuntimena ja keskittimenä verkosta tulevien komponent-tien kaapeloinneille. Ala-asemalta tiedot viedään kuitukaapelilla valvomon palvelimelle ja tietokoneelle.

### 3.2 Komponentit ja kaapeloinnit

Ala-asemalla sijaitsevat logiikat ja prosessorikortti, johon kaapelit kytketään riviliittimien kautta. Input/output tiedot tulevat katkaisijoiden tai muiden laitteiden apukoskettimilta ja ne käsittävät katkaisijan asentotietoja ja muita vastaavia indikoiteja. Ne on tavallisesti kaapeloitu kaksiparisilla merkinantokaapeleilla kuten Jamak tai Redak.

Niin kutsuttu SPA -väylä on 5 voltin RS485 -protokolla (väylätyyppi). Väylä on siis erilli-nen piiri itse katkaisijoihin nähden, ja se liitetään erillisellä muuntimella katkaisijaan. Väylän kautta kulkevat säätöviestit viritys ja avausmoottoreille. SPA -väylä kaapeloi-daan tavallisesti ethernet (eli lähiverkko) kuitukaapelilla. Väylä ohjaa 110 voltin tasavir-tajärjestelmää, joka saa syöttönsä apusähkökeskuksesta. 110 VDC viritys-apusähkö on varsinainen ohjausjännite katkaisijoiden moottoreille. Moottorit avaavat ja sulkevat katkaisijoita ja lukituksia. Varsinainen syöttö moottoreille on 230 V, ja se syötetään MMO-kaapelilla apusähkökeskuksesta (MicorSCADA Pro – Sähköverkon valvonta- ja ohjausjärjestelmä 2016).

Ala-asemalle tulevat kaapelit johdotetaan riviliittimien kautta prosessorikortille ja siitä kuitumuuntimelle tai kytkimelle. Kytkimellä jänniteviestit muunnetaan biteiksi ja siirretään ethernet kaapelissa, kuten CAT-6 (parikierrretty kupari), tai kuiduissa kuten, Avago, valvomoon (kuva 5).

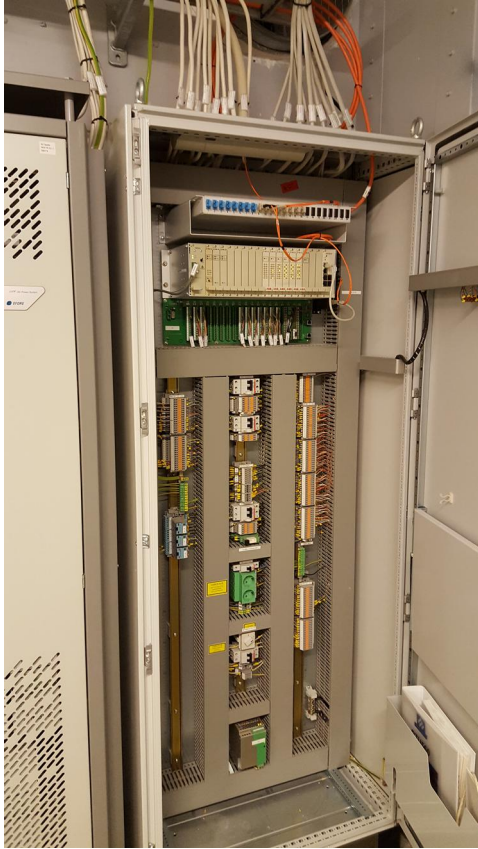
### 3.3 Verkoston ylläpito

Koko verkon näkyminen tietokoneella samassa kaaviossa tekee muutosten ja lisäysten suunnittelun helpoksi, kun erillisiä paperisia ylläpitosarjoja ei tarvita. Pilvipalvelut myös varmistavat dokumenttien paremman säilyvyyden.

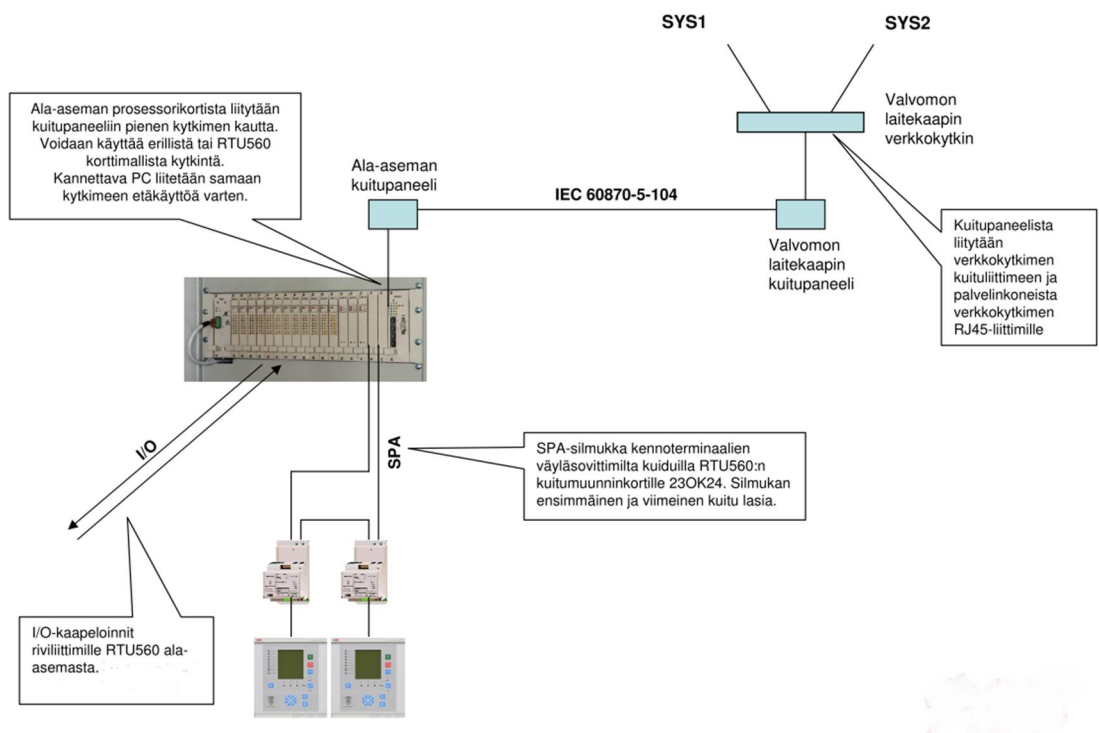
Verkon mallista voidaan tehdä muun muassa vikavirtojen laskenta, oikosulkuvirrat verkon eri pisteissä sekä selektiivisyyden tarkastelu. Myös verkon kuormituksen ja vaihekuormitusten, lois- ja pätötehon sekä energian kulutukset on helppo pitää hallittavana kokonaisuutena.

Järjestelmän mittauksista muodostuvan datan ja analyysin perusteella kunnossapidon tarve esimerkiksi jakelumuuntajilla voidaan arvioida tarkemmin ja ajankohtaan ennakoitua paremmin, jolloin huoltoseisokkien ajat pienenevät (Autio 2017).





Kuva 4. RTU (remote terminal unit) ala-asema.



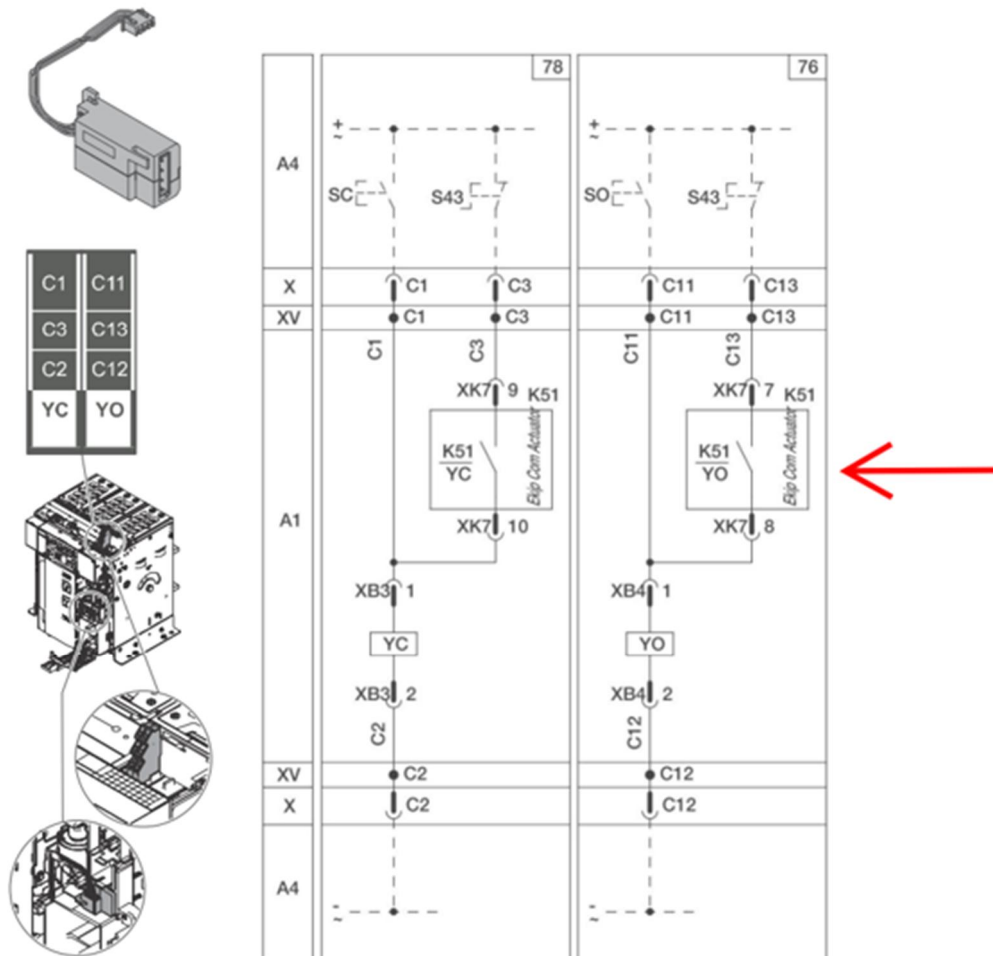
Kuva 5. Verkonvalvonnan kaapelointi.

### 3.4 Laitteet

Scada tarvitsee toimiakseen komponentteja, jotka voivat ottaa vastaan bittimuotoista tietoa tai joissa on sovitin, jolla voidaan ohjata niiden varsinaista ohjausjännitettä. Perusvaatimus on tietoliikenneverkon yhteensopivuus CAT 6 kaapeleille ja RJ 45 liittimillä. Olemassa oleviin komponentteihin tämä toteutetaan yleensä väyläsovittimella (kuva 8), joka liitetään esimerkiksi tavallisen katkaisijaan plug –menetelmällä (atk-liittimellä). Väyläsovittimeen liitetään kuitupaneelilta tuleva digitaalinen väylä ethernetkaapelilla. Väyläsovittimeen tuodaan myös viritysapusähkö apusähkökeskukselta. Väyläsovitin ohjaa apusähkön kytkeytymistä ja näin katkaisijaa (kuva 6).

Muita Scadaan liitettäviä komponentteja voivat olla esimerkiksi:

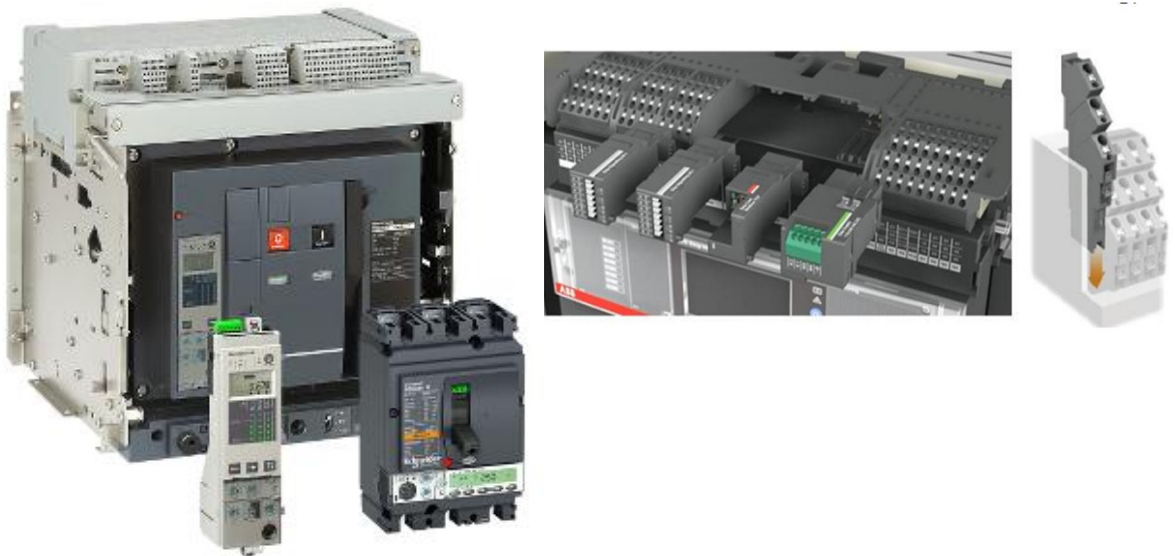
- energiamittarit
- kauko-ohjattavat katkaisijat (kuva 8)
- muuntajan valvontayksikkö ja muuntamoautomaatio
- UPS-akustovalvonta
- sähköntuotannon invertterit (esim. aurinkokeräimet) leed ja breem vaativat nykyään tuottoa. EU on linjannut ilmastotavoitteen puhtaasta energian tuotannosta ja siirtymisestä kulutusjousto. Vuonna 203 tavoitteena on, että koko verkon on kulutukseltaan joustava, ja uusiutuvan energian osuus on puolet kaikesta energian kulutuksesta. Saadaan tietoa tuotannosta rakennuksessa.
- KNX (automaatio protokolla) tai muut RAU (rakennusautomaatio) väyläsovittimet
- Generaattorien valvonta. Sen ohjaus, tilatiedot, synkronointi muuhun energian tuotantoon



Kuva 6. Kaukovalvotun katkaisijan ohjausliitin.



Kuva 7. Keskusvalvomo.



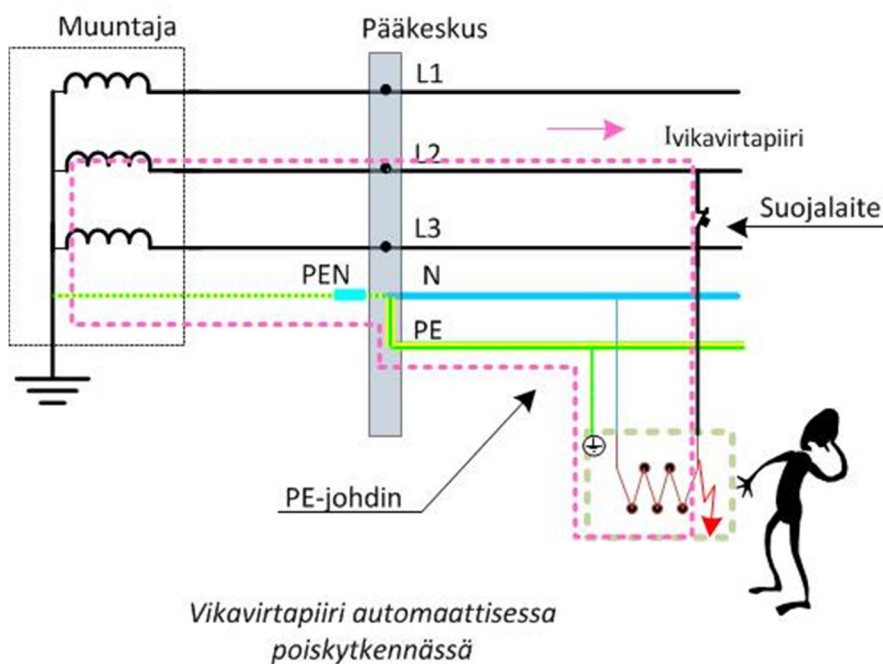
Kuva 8. Kennotermiinalin liittäminen älyverkkoon.

## 4 Relesuojaus ja selektiivisyys

### 4.1 Oikosulkusuojaus ja selektiivisyys

#### 4.1.1 Oikosulku

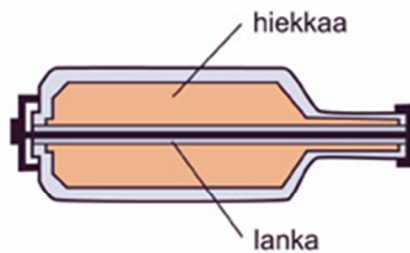
Oikosulku on virtapiirissä tapahtuva vika, jossa virtapiiri pääsee muodostumaan kulke-matta varsinaisen kuorman läpi hallitusti paluujohdinta pitkin. Oikosulussa virtapiiri muodostuu vaiheen ja maan tai vaihejohtimien välille. Tällöin virta etsii ”helpoimman” eli pieni impedanssisimman reitin maihin. Tyypillisiä tilanteita oikosulun syntymiselle ovat johtimien liittimien irtoamiset, jolloin laitteen kuori tulee jännitteiseksi, tai mahdolliset kytkentävirheet keskuksissa. Mikäli laitteen kuori on maadoitettu asennus-standardien mukaan, oikosulku palautuu hallittua reittiä syöttävään keskukseen (kuva 9).



Kuva 9. Oikosulkupiiri.

Oikosulkutilanteessa tarkastellaan sekä suurinta että pienintä oikosulkuvirtaa, pienintä, jotta suojalaitteet toimivat varmasti tarpeeksi nopeasti ennen henkilö tai materiaalivahinkoja, ja suurinta, jotta komponentit kestävät sen ja pystyvät katkaisuun. Oikosulkuvirta muodostuu koko verkon läpi aina muuntajalta pääkeskuksille ja sieltä ryhmäkeskusten kautta ryhmäjohtoon. Heikoin oikosulkuvirta on aina pisimmän ja ohuimman kaapelipinnan perässä, eli siinä missä verkon impedanssi on kaikkein suurin.

Oikosulku pyritään katkaisemaan etukojeella, kuten sulakkeella. Sulakkeen sisällä on ohut metallilanka, joka palaa poikki virran noustessa liian suureksi, katkaisten piirin. Sulakkeen koko määrittää kuinka paljon, ja kuinka kauan virtaa sulake kestää palamatta.

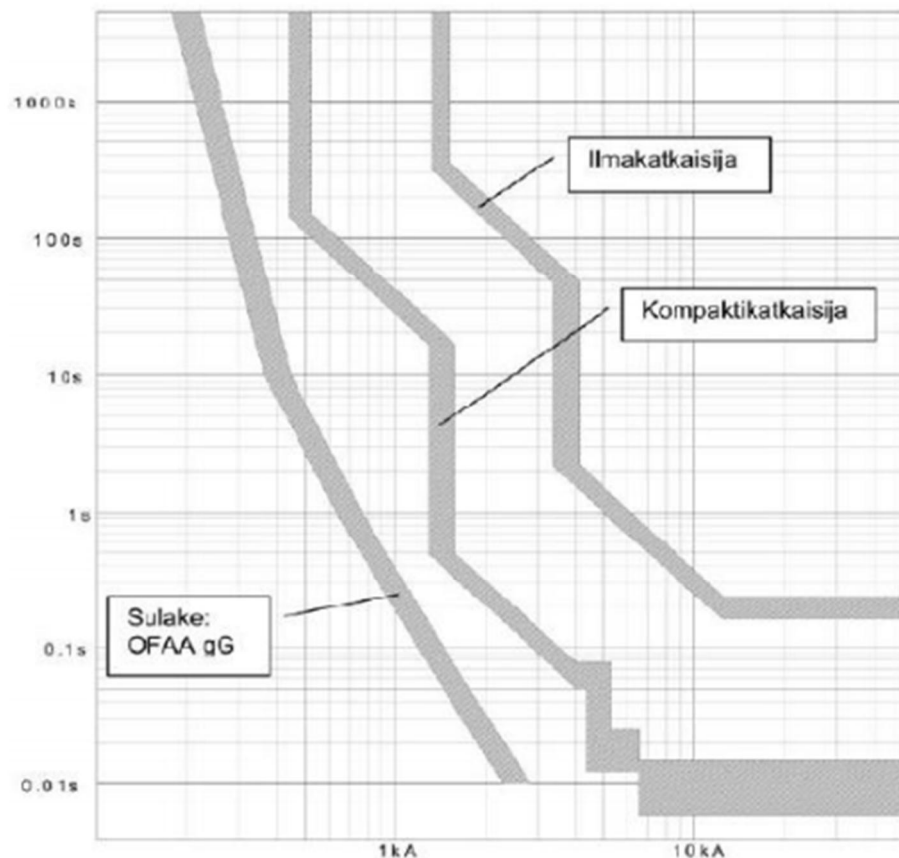


Kuva 10. Kahvasulakkeita ja sen rakenne.

#### 4.1.2 Selektiivisyys

Selektiivisyydellä tarkoitetaan vikaantuneen verkon osan automaattista erottamista verkosta portaittaisesti ilman, että muut verkon osat häiriintyvät. Suojalaitteiden, kuten releiden ja sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden, tulee siis katkoa virtapiiri kuormasta katsoen ylöspäin porrastetulla tavalla. Yksittäisen johdonsuojakatkaisijan tulee siis toimia ennen ryhmäkeskusta syöttävää kahvasulaketta ja ryhmäkeskusta syöttävän sulakkeen ennen nousukeskusta syöttävää sulaketta jne. Erotus ei kuitenkaan saa tapahtua pienissä virtapiikeissä, kuten moottorien käynnistyspiikeissä.

Selektiivisyys on teoriassa helpointa toteuttaa sulakkeilla, mutta niiden virtakestoisuus oikosulkuilanteessa ei useinkaan riitä, jolloin on pakko turvautua katkaisijoihin. Yleensäkin sulakesuojaukseen toimii vain noin 800 A:n nimellisvirtaan asti (kuva 11).

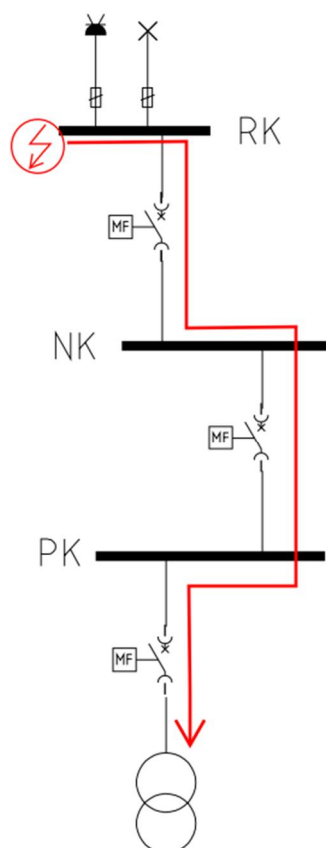


Kuva 11. Eri etukojeiden toiminta-aikoja.

Katkaisijoiden ollessa kyseessä selektiivisyys on vaikeammin toteutettavissa. Vaikka erikestoiset katkaisijat ja eri sijaintien välillä olevat kaapelit vaimentavat oikosulkuvirtaa jonkin verran, on kyse silti yleensä suojarleen asettelusta. Jotta asetteluarvot voidaan määrittää oikein, täytyy verkko mallintaa tarkasti, ja laskea oikosulkuvirran suuruus kussakin kohdassa verkkoa (kuva 13).

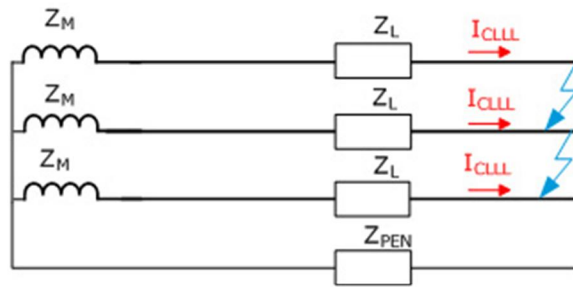
Kuvan 12 osoittamassa paikassa tapahtuva oikosulkuvirta siis kulkee koko verkon läpi. Nousukeskukselta tulevan syötön suojalaitteen tulee siis toimia, mutta nousukeskusta ja pääkeskusta syöttävien ei. Mikäli ensimmäinen suojalaitte on jostain syystä jumiutunut kiinni, eikä katkaise piiriä, tulee seuraavan suojalaitteen toimia.

Tämän vuoksi releet asetetaan kestäämään oikosulkuvirtaa hieman enemmän kuin edellinen rele. Näin suojarleiden laukaisu tulee portaittaiseksi, jossa etupuolella oleva laukeaa aina järjestyksessä seuraavana. Esimerkiksi ensimmäinen porraskäyttö kestää 5 kA:n virtaa 0,15 s, toinen porraskäyttö 0,30 s ja viimeinen 0,50 s (kuva 14).



Kuva 12. Oikosulkupiirin rakenne.





$$I_{C_{LL}} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_L + Z_M)}$$

U = pääjännite [V]

C = jännitekerroin

Z<sub>L</sub> = vaihejohtimen impedanssi [Ω]

Z<sub>PEN</sub> = PEN-johtimen impedanssi [Ω]

Z<sub>M</sub> = muuntajan impedanssi [Ω]

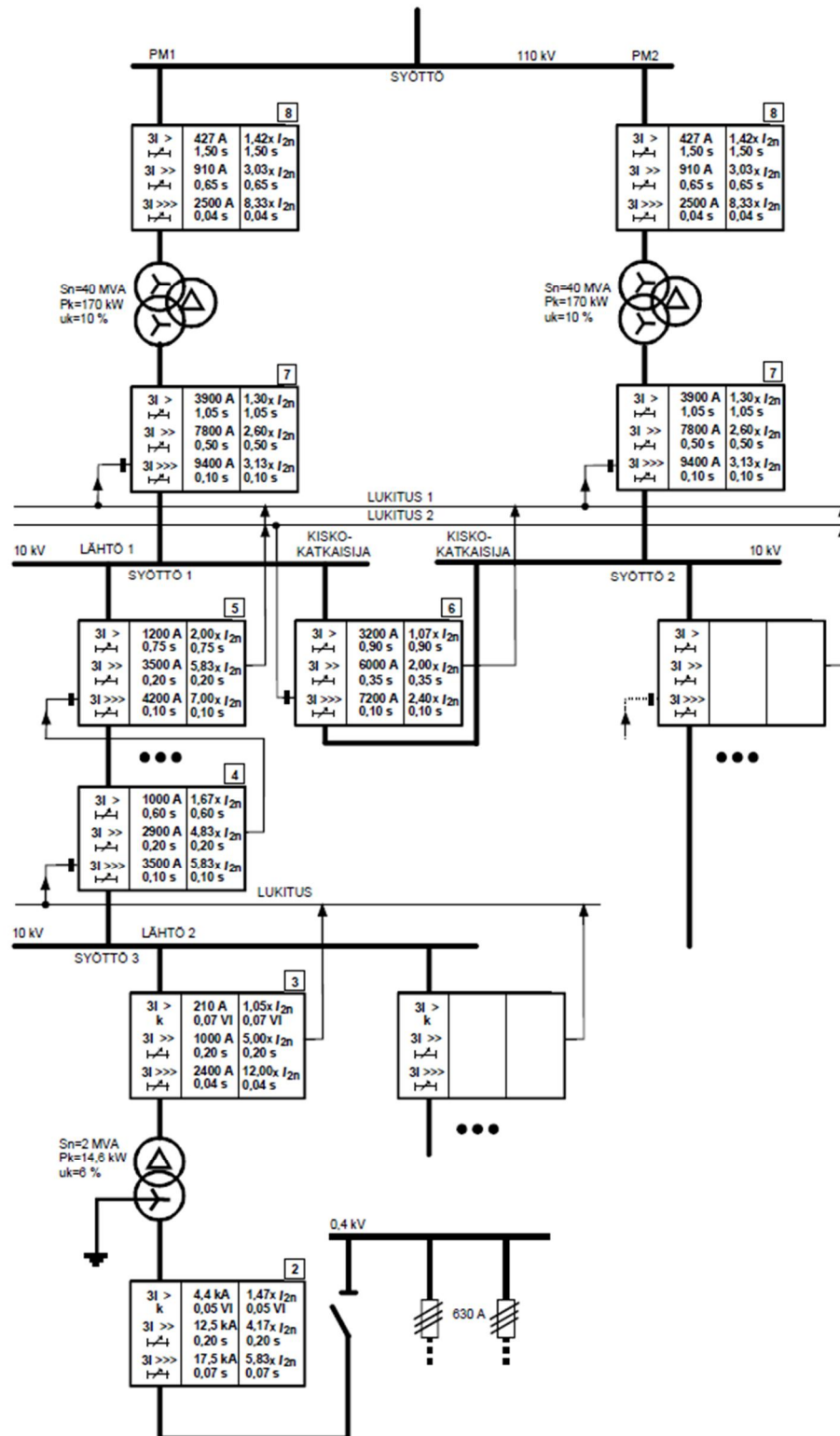
Z<sub>reit</sub> ≈ 0

Kuva 13. Oikosulkuvirran laskentakaava.

## 4.2 Sähköverkon suojaus

Suojalaitteiden, kuten releiden, katkaisijoiden ja sulakkeiden, tehtävä on katkaista virtapiiri hallitusti ja mahdollisimman pieneltä osalta vian sattuessa. Katkosalueen minimoimista kutsutaan selektiivisyydeksi. Selektiivisessä verkossa ensiöpuolella olevien suojalaitteiden on tarkoitus aina toimia vasta niiden syöttämien suojalaitteiden jälkeen. Näin mahdollisimman suuri osa verkkoa pystyy jatkamaan sähkön syöttöä vikatilanteissa.

Suojalaitteiden toiminta perustuu tiettyjen suureiden mittaamiseen sähköverkosta, ja niiden poiketessa asetellusta arvosta, laukeamiseen salamannopeasti. Mitattavia suureita voivat olla muun muassa yli- tai alijännite, ylivirta, kosketusjännite tai muut häiriöjännitteet. Seuraavalla sivulla on esimerkki suojareleen asettelukaaviosta (kuva 14). Siinä on tyypillinen katkaisijoiden portaittainen (hidastettu) asettelu oikosulkuvirtojen katkaisuun. Asettelu alkaa muuntajan ensiöpuolelta 1,50 s jatkuen seuraavaan portaan 1,05 s ja 0,75 s jne. mitoitetuna 1,42 -kertaiselle virran monikerralle (TTT-käsikirja 2016).

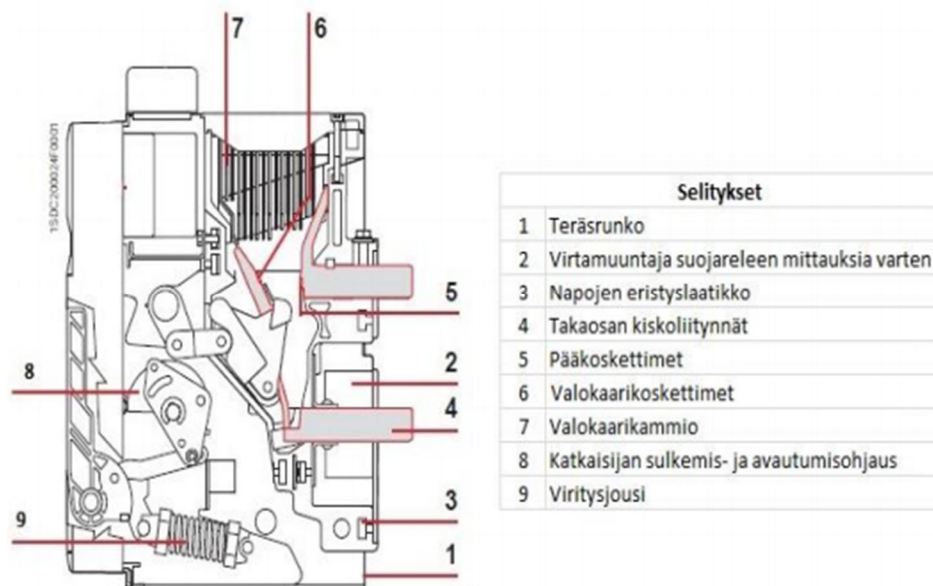


Kuva 14. Esimerkkiasetus suojareille.

Releet voidaan kytkeä suoraan päävirtapiiriin, jolloin niitä kutsutaan ”primaarireleiksi” tai ensioreleiksi. Tämä tapa on kuitenkin verraten harvinainen, ja siihen törmää lähinnä vanhoissa asennuksissa. Yleensä releet ovat ns. mittamuuntajilla erotettuja sekundaarireleitä tai ”toisioreleitä”. Niiden etuna on huomattavasti pienempi virta ja jännite sekä fyysisen sijainnin vapaa sijoitus suhteessa katkaisijaan. Mittamuuntajan toisioon kytketty rele mahdollistaa myös käytön aikaisen koestamisen, jota ei voida tehdä primaarireleen ollessa kysymyksessä.

Pienjännitekatkaisijat ovat nykyään yleensä ilmaeristeisiä. Ilmaeristeisessä katkaisijassa on ns. sammutuskammio valokaaren sammuttamista ja katkaisijan kärkien jäähdyttämistä varten. Tämä on tärkeää varsinkin virtojen kasvaessa suuriksi (Saarela 2011).

Ilmakatkaisijassa on yleensä kahdet koskettimet, joista toisissa (nk. pääkoskettimissa) virta kulkee katkaisijan läpi, ja toiset ovat valokaarikoskettimet valokaarta varten, jotta pääkoskettimet eivät vaurioituisi (kuva 15).



Kuva 15. Katkaisijan rakenne.

### 4.3 Suojareleen toimintaperiaate

Katkaisija on verkon pääpiirin komponentti, jota rele ohjaa auki- tai kiinni- asentoon. Katkaisijan tehtävä on erottaa verkon osa toisesta eli katkaista sähkönsyöttö. Joissain katkaisijoissa on erilliset apureleet sulkemiselle ja avaamiselle. Katkaisijaa ohjaavan suojareleen tehtävä on johtaa jännitelähteestään saamansa virta oikealla hetkellä katkaisijan auki- tai kiinniohjauskelalle. Jännitelähteenä toimii yleensä jokin akkuvarmennettu katkoton sähköjärjestelmä (Lehtomäki 2014).

Verkon toimiessa normaalisti rele vain tarkkailee piiriä, eikä tee mitään. Mikäli jokin releen parametri ylittyy tai alittuu, rele toimii ja antaa kytkentävirikkeen. Releen havahdumisen ja toiminnan välistä aikaa kutsutaan toiminta-ajaksi.

”Rele on jonkin sähkövirtapiirissä tapahtuneen muutoksen (virikkeen) vaikutuksesta toimiva laite, jonka tehtävänä on muutoksen aiheuttaminen ohjausta tai merkinantoa varten samassa tai toisessa sähkövirtapiirissä.”(Mörsky 1992, 19)

#### 4.3.1 Mekaaniset releet

Aluksi releet olivat nk. sähkömekaanisia releitä. Mekaanisissa releissä on nimensä mukaisesti liikkuva kytkentäosa tai kela. Ne perustuvat sähkömagneettisen voiman aiheuttamaan laukaisuun, ja ovat näin ollen melko epätarkkoja ja isoja. Ne ovat kuitenkin melko kestäviä, ja siksi niihin saattaa vielä törmätä joissain vanhoissa asennuksissa.

#### 4.3.2 Staattiset releet

Staattinen rele sisältää puolijohdekomponentteja ja mikropiirejä. Mikropiirien pienempi koko mahdollistaa staattisen releen pienemmän koon ja useammat suojaustoiminnot samassa releessä. Staattisten releiden asettelualue on paljon laajempi kuin mekaanisten ja ne ovat paljon tarkempia.

Staattiset releet saavat käyttöjännitteensä erillisestä jännitelähteestä, jolloin mittauspiirit eivät kuormitu niin paljon kuin mekaanisissa releissä. Pienemmän virran ansiosta voidaan myös samasta releestä ottaa apukosketintietoja, eikä tarvita erillistä apurelettä, joka toisi suojaukseen viivettä.

#### 4.3.3 Numeeriset releet

Nykyisin valtaosa releistä on nk. numeerisia releitä. Niissä on mikroprosessori, joka mahdollistaa yhä useampien toimintojen integroimisen samaan releeseen. Numeeriset releet pystyvät paitsi vastaanottamaan tietoa, myös lähettämään sitä takaisinpäin. Tällöin saadaan aikaan kommunikaatiota ja tietoa releen mittaussuureista verkon haltijalle. Releestä saadaan tällöin suojauskomponentin lisäksi tiedonkeruuyksikkö. Tällaisia releitä kutsutaan kennoterminaaleiksi (VAMP 57 –monitoiminen suojarele 2015).

Kennoterminaaleissa olevat mikroprosessorit mahdollistavat bittimuotoisen tiedon käyttämistä sen ohjaukseen. Niihin pystytään myös tallentamaan tärkeitä tietoja, kuten katkaisijan tilatietoja, asetteluarvoja, mittausarvoja yms. Prosessorien ansiosta numeeriset releet voidaan ohjelmoida myös logiikkaa vaativiin toimenpiteisiin, esimerkiksi automaattisiin syötönvaihtoihin. Kennoterminaaleissa on tallennuksen ansiosta itsevalvonta, joka valvoo releen toimintaa ja vikoja. Tällöin koestusvälin ei tarvitse olla niin tiheä kuin muilla reletyypeillä (Kivelä 2014).

## 5 IEC 61850 -väylä

IEC 61850 on kansainvälisesti käytetty standardi kennotermiinaalien ja ala-asemien ethernet-pohjaiselle väyläkommunikaatiolle. Standardi käsittää kaikkienensa yli tuhat sivua, ja siinä määritellään käytettävä ohjelmakieli, ohjelmablokit, laitteiden nimeäminen, fyysiset liitännät, tiedonsiirtonopeus, tiedostomuodot sekä viestien rakenne. Standardi varmistaa eri valmistajien välisen yhteensopivuuden. Laittevalmistajat eivät siis voi muokata väyläkommunikaatiota omanlaisekseen (Lepistö 2015).

### 5.1 Historia

IEC 61580 –standardi on peruja vuonna 1988 käynnistyneestä Pacific Gas and Electric Co:n ja Houston Light and Power Co:n hankkeesta kehittää järjestelmä valvonta-alakeskusten ja ala-asemien väliseen kommunikointiin. Lopputuloksena syntyi kommunikaatioarkkitehtuuri nimeltä Utility Communication Architecture eli UAC v1.0. (IEC 61850 n.d).

UCA v1.0 oli kuitenkin melko teoreettinen eikä määrittänyt tarkasti, miten uutta kommunikaatioarkkitehtuuria tulisi soveltaa käytännössä. Tästä johtuen laitevalmistajat eivät omaksuneet UCA v1.0:aa toivotulla tavalla. Hiljaisesta kysynnästä huolimatta ERPI ja IEEE jatkoivat projektin kehittämistä, ja loivat UCA v2.0:n. UCA v2.0 oli selkeästi käytännön läheisempi, ja siinä määriteltiin tarkasti loogiset laitteet, datan nopeus ja tyyppi sekä topologia.

Sähköalan kansainvälinen standardointiorganisaatio IEC liittyi 1995 mukaan kehitystyöhön tavoitteenaan saada aikaan standardi sähkölaitosten väliseen kommunikaatioon. Tavoitteeksi asetettiin kaikkien valmistajien laitteiden yhteensopivuus, yhtenäiset laitekonfiguroinnit, nopeat tietoliikenneyhteydet ja sama viestien sisältö.

Vuonna 2004 yhteistyö tuotti lopulta IEC 61850 standardin. Ensimmäinen osa oli kuitenkin liian puutteellinen ja se jouduttiin vetämään takaisin. IEC 61850 Edition 2 julkaistiin vuotta myöhemmin, ja vaikka kaikkia virheitä ei ollut saatu korjattua, ei niiden katsottu olevan kovin merkittäviä.

Ensimmäisenä standardin otti tuotteissaan käyttöön Siemens. Siemensin Siprotec 4 -tuoteperhe oli ensimmäinen, joka sisälsi tuen IEC 61850 -standardiin, ja ensimmäiset suoja releet asennettiin Sveitsiin Winznuschachenin sähköasemalle.

ABB seurasi perässä ja lisäsi standardin tuotteisiinsa 2008 Relion -tuotesarjallaan. Samaan aikaan ABB toi markkinoille myös väylämoduulin, jolla vanhemmat kennotermiinaalit voidaan liittää IEC 61850 -väylään.

Kansainvälisten standardien, kuten IEC 61850, tarkoituksena on parantaa kilpailua, kun rakennuttajat ja sähkölaitokset voivat vapaasti valita laajemmasta valmistajaskaalasta. Lisäksi se saa aikaan parempaa hintakehitystä, kun mikään yksittäinen yritys ei voi dominoida markkinoita.

Standardoinnista on hyötyä myös valmistajille, sillä niiden ei tarvitse ottaa vastuuta kennotermiinaaleissa käytetystä kommunikaatioprotokollasta, ja toisaalta niiden ei tarvitse huolehtia yhteensopivuudesta kilpailijoiden tuotteiden kanssa. Se tuo siis tietynlaista luotettavuutta ja laadunvarmistusta valmistajien lupauksille yhteensopivuudesta.

Myös tietoturvaratkaisut ja vikojen määrittäminen pysyy paremmin hallinnassa, kun kaikkien laitteiden ohjelmakieli ja tyyppi on sama.

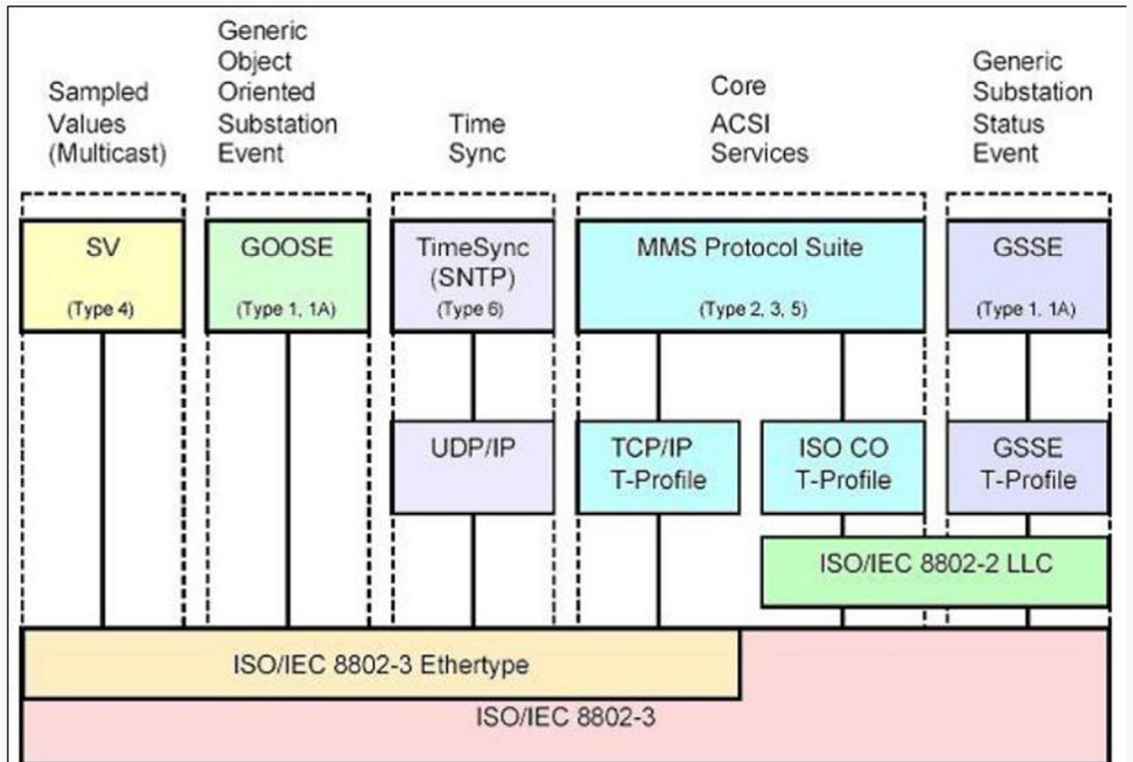
## 5.2 Goose -kommunikaatio

Goose (Generic Object Oriented Substation Event) on periaatteessa IEC 61580 laajennus. Goose -kommunikaatiota kutsutaan horisontaaliseksi. Siinä suojalaitteet omaavat prosessorin ja kommunikoivat suoraan keskenään ilman vertaisverkkoa, jossa viestit kulkisivat keskitetyn palvelimen kautta. Näin ollen horisontaalinen kommunikaatio on luotettavampi ja vähemmän vika-altis kuin keskitetty järjestelmä, jossa yhden laitteen vikaantuminen (palvelin) kaataa koko järjestelmän. Jokainen laite on siis itseasiassa palvelin (Communication interface for Emax 2 trip units 2018).

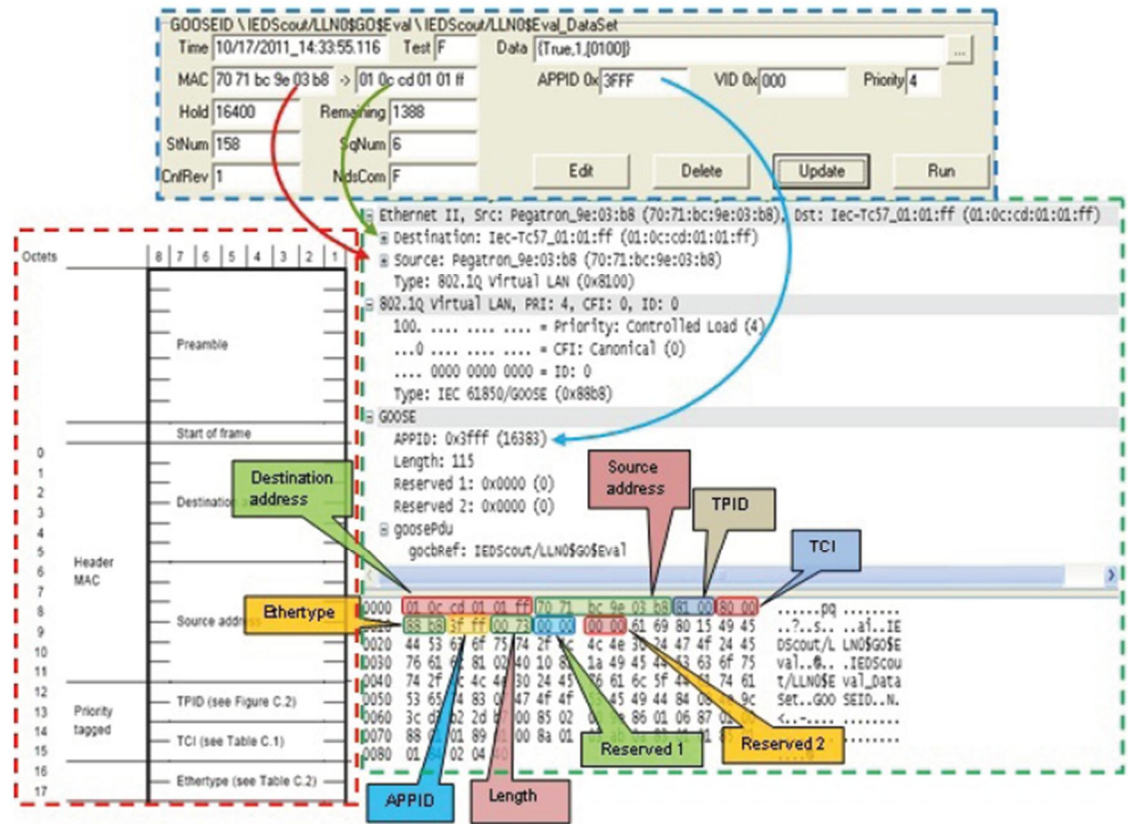
Goose -kommunikaatiossa viestit voivat sisältää laukaisu-, I/O- mittaus- tai hälytystietoja (kuva 16). Eri valmistajien laitteet voivat lähettää ja vastaanottaa Goose-viestejä. Viestit voidaan välittää samassa väylässä kuin ohjaus viestit ala-asemalta kennotermiinaaleille, tai niillä voi olla oma väylänsä. Toisin kuin useimmat IEC viestit, Goose -viestit koostuvat pelkkien staattisten bittien sijaan biteistä, bittipareista ja muista data-alemneiteistä, kuten komennoista, hälytyksistä ja loki -merkinnöistä (kuva 17).

Kun kaikki I/O -ohjauksetkin toteutetaan ethernet kaapelin välityksellä, säästetään johdin määrissä merkittävästi verrattuna perinteiseen kovan puolen ohjaukseen potentiaalivapilla koskettimilla. Myös järjestelmän suunnittelu ja dokumentointi on huomattavasti yksinkertaisempaa ja helpompaa, kun johdinpareja ei tarvitse laskea, eikä piirikaavioita laatia. Käyttöönotto- ja testausprosessi on myös yksinkertaisempi verrattuna johdotukselle tarvittavaan koestukseen. Ethernet -rajapinta mahdollistaa myös huomattavasti tavanomaista (esim. SPA) nopeamman tiedonsiirtonopeuden (Communication functions with SACE Emax 2 circuit breakers 2017).





Kuva 16. Viestiprotokolla.



Kuva 17. Viestin rakenne.

## 6 Meilahden verkonhallinta järjestelmä

Meilahden sairaala-alue kuuluu niin sanotun kansallisen huoltovarmuuden kannalta kriittisiin kohteisiin. Niinpä siellä sähkökatkot, niiden pituudet ja niiden välttäminen ennakolta ovat erittäin tärkeässä roolissa. Toisaalta vikojen sattuessa on tärkeää pystyä diagnosoimaan vian syy ja paikka, jotta korjaustoimiin päästään nopeasti ja vian uusiutuminen voidaan ehkäistä.

Meilahden sairaala-alueelle sähkö syötetään poikkeuksellisesti muuhun kaupungin suurjännite verkkoon nähden 110 kV:n jännitteellä, jotta virtamäärä saadaan pidettyä pienempänä. 110 kV muunnetaan Meilahden voimalaitoksella suurjännite muuntajalla 10 kV:ksi ja jaetaan eri sairaaloiden kojeistoille. Kojestot muodostavat keskenään renkaan, jolloin ”piiriä” voidaan syöttää vikatilanteessa kummasta suunnasta tahansa. Keskijännitekojeistot on liitetty Microscada -valvontaan.

Meilahden sairaala-alueen sähköverkko on niin sanottu ”island -tyyppinen” verkko, jossa se pidetään jännitteisenä generaattorien avulla, vaikka valtakunnan verkko olisikin kaatuneena. Sairaala-alueen verkko voidaan syöttää diesel-generaattoreilla, jotka käynnistyvät jännitteen pudotessa valtakunnan verkossa. Jokainen sairaalarakennus sisältää oman generaattorin, joka syöttää ensisijaisesti sitä rakennusta, jossa se sijaitsee. Rakennusten välille on kuitenkin rakennettu varasyöttöyhteydet, joiden avulla generaattoreilla voidaan syöttää myös muita rakennuksia (Käyhkö 2017).

Useimmista sairaalarakennuksissa myös varmennettu verkko on kahdennettu eli redundanttinen. Niissä on siten kaksi samantehoista generaattoria, jotka pystyvät molemmat itsenäisesti syöttämään koko rakennuksen. Näin myös ylläpidetään reserviä syöttää muita rakennuksia varayhteyksien kautta.

Generaattorien käynnistyssekvenssi ja tahdistuminen verkkoon kestää noin 10–12 sekuntia. Tätä katkosta varten rakennuksissa on vielä erillinen UPS-verkko (uninterruptible power supply). UPS -verkko syöttää katkottomasti kriittisiä kuormia generaattorin käynnistymiseen asti. Sen tehtävä on tasata jännitekatkokset ja pitää yllä järjestelmiä, kuten tietoverkko, jonka aktiivilaitteet ja ristikytkentäkytkimet eivät välttämättä pysty käynnistämään itseään sähkökatkon sattuessa.

Scadaa valvotaan ja ohjataan Meilahden voimalaitoksen valvomosta, jossa on 24 tunnin päivystys (kuva 18). Valvomossa on kahdennettu Scada-järjestelmä eli niin kutsuttu kylmä-kuumakonejärjestelmä. Järjestelmä on redundanttinen, eli molemmat koneet ovat identtisiä ja pystyvät suoriutumaan koko verkon ohjauksesta itsenäisesti. Niin kutsuttu kuuma kone on pääasiallinen käytettävä laitteisto, ja kylmä kone on varalla mahdollisten vikatilanteiden varalta.

Tämän tyyppisessä verkossa, jossa varmentavia syöttöjärjestelmiä on useampia ja sähköä saatetaan syöttää useammasta syöttökaapelista samaan pisteeseen, kunnollisen verkon hallinnan merkitys korostuu. Rinnakkaissyöttöjen ollessa kyseessä on verkon ja kuormien hallittu kytkeminen ja erottaminen vielä tärkeämpää.



Kuva 18. Meilahden sairaala-alueen sähkövalvomo.

Meilahden sairaala -alueella jokainen rakennus syötetään omalla 10 kV:n keskijännitekojeistollaan. Kojeistosta syötetään rakennusten jakelumuuntajat, joilla 10 kV:a muunnetaan 400 V:n jännitteeseen ja syötetään pääkeskuksille.

Kojeistoissa käytetään piirien yhdistämiseen katkaisijoita, joilla jännite kytketään tai erotetaan kuormasta. Näitä katkaisijoita ohjataan keskitetysti Meilahden sähkövalvomosta (kuva 18).

Katkaisijat saavat 110 V:n DC käyttöjännitteensä apusähkön keskukselta. 110 V:n tasajännite siis käyttää katkaisijoiden viritysmoottoreita ja saa katkaisijan avautumaan jousen voimasta mahdollisimman nopeasti, jotta katkaisijan liittimet eivät aiheuttaisi valokaarta välilleen.

Katkaisijoiden viritysmoottoreita ohjataan Scadan ohjaussignaaleilla, joka on bittimuotoista, ja siirretään kuitukaapeleissa. Katkaisijoiden väyläsovitin ovat silmukassa keskenään ja väylä alkaa ja päättyy RTU:n kuitupaneeliin tai uudemmissa kojeistoissa suoraan prosessorikorttiin. SPA -väylä kaapeloidaan joko lasi- tai muovikuitukaapelilla. Prosessorikorttiin tuodaan myös I/O-kaapeloinnit, joihin kuuluu valokaarisuojien valvontaa, lämpötilahälytyksiä, ylijännite-valvontaa ynnä muita vastaavia hälytystietoja.

Jokaisessa kojeistotilassa on niin kutsuttu Scadan ala-asema eli laitekaappi, joka sisältää RTU560 prosessorikortin, kytkimet, riviliittimet, kuitumuuntimen ja kuitupaneelin (kuva 4).

Valvomossa sijaitsevat Scadan käyttöliittymä, kuitumuuntimet, kytkimet, prosessorit ja valvontamonitorit (liite 1). Se on tietyllä tavalla sähköverkkoutomaation sydän. Kansallisen huoltovarmuuden kriittisen luonteen vuoksi valvomo on miehittettynä 24 h ja myös kaukovalvottuna.

## 7 Sulakesuojaus vs. kompaktikatkaisijoilla toteutettu suojaus

Tutkimusongelmaksi on tässä työssä valittu verkon komponenttien ylimitoituksen hallinta ja toisaalta verkon selektiivisyyden parantaminen pienjännite puolella (400 V). Käytämällä tietokoneohjelmaa tai verkostoautomaatiojärjestelmää perinteisen virta-aika integraaliin perustuvan tavan sijaan voidaan tulla toimeen pienemmillä oikosulkuvirroilla verkon selektiivisyyden ja toimintavarmuuden silti kärsimättä.

Meilahden sairaala -alueella kaikki keskuksat ja niiden komponentit mitoitetaan kestämään rajoittamaton oikosulkuvirta, jotta niitä voidaan tarvittaessa sulakkeiden sijasta syöttää kompaktikatkaisijoilla.

Keskusten kiskostojen ja rakenteiden saaminen prospektiivisen oikosulun kestäviksi ei sinänsä ole ongelma tai kovin kallista, mutta pääkytkimissä esiintyy ongelmia. Esimerkiksi tyypillisissä 125 A:n mitoitusvirtaisissa keskuksissa pääkytkin joudutaan usein valitsemaan 400 A:n vahvuiseen tai jopa suurempaan, jotta se kestäisi 15–20 kA:n oikosulkuvirtoja.

Ongelmia muodostaa myös verkon saaminen selektiiviseksi sulakkeilla, kun syöttöjärjestelmiä on kolme erillistä: normaaliverkko (sähköyhtiö), generaattorivarmennettu ja UPS-syöttöverkko. Verkon ollessa esimerkiksi UPS-laitteen syöttämänä selektiivisyyden täytyy kuitenkin toimia samalla tavalla kuin ”normaalitilanteessa”. UPS-laite ei kuitenkaan pysty tuottamaan tarpeeksi oikosulkuvirtaa, jotta normaalisti sähköyhtiön syöttämässä verkossa suojalaitteet toimisivat vaadituissa 5 s:n ja 0,4 s:n ajoissa (Nieminen 2018).

Generaattorivarmennettua verkkoa ja UPS-verkkoa ei mitoiteta koko rakennuksen käyttämälle teholle, vaan niissä käytetään erilaisia tasoituskertoimia kokonaistehoon suhteutettuna laitteiden mitoituksen ja tilavarausten vuoksi. Mikäli generaattorit tai UPS-laitteet ja akustot mitoitettaisiin koko liittymän teholle, tulisi niistä erittäin isoja, kalliita ja niiden lämpökuormat muodostaisivat ongelmia tilavarauksissa sekä jäädytyksessä. Jäädytykseen menevä energiakin jouduttaisiin syöttämään samasta teholähteestä, joka lisäisi taas mitoitustehoa (kuva 19).

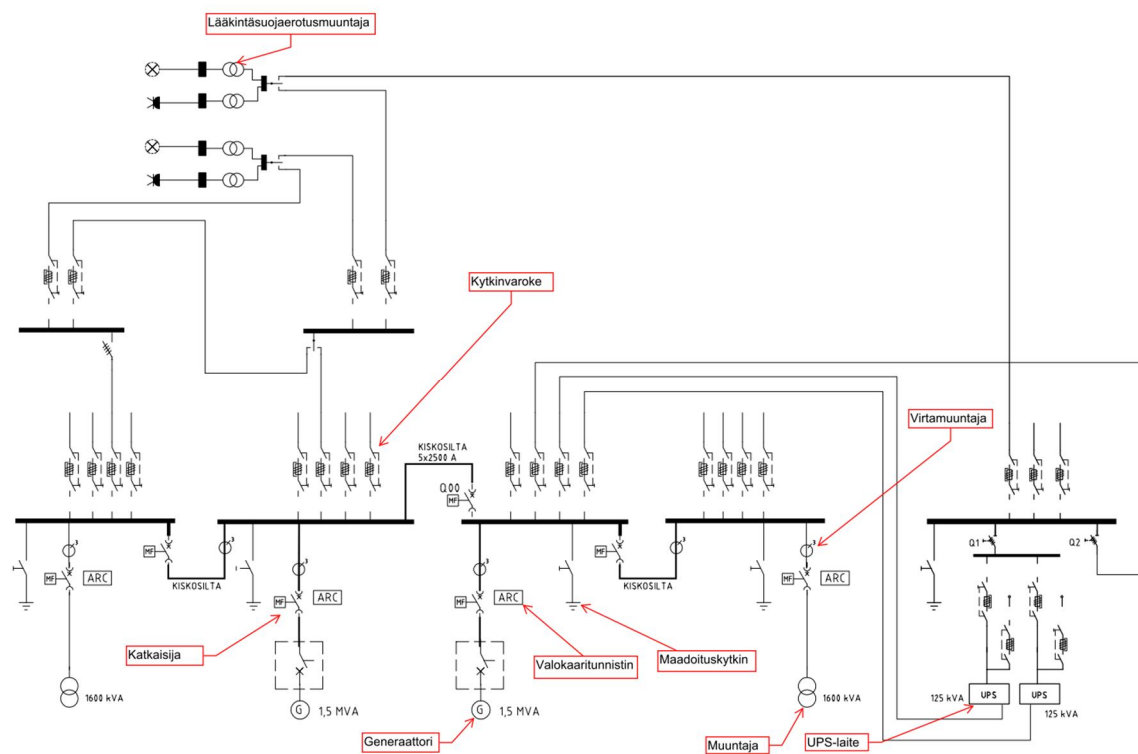
Sulakkeiden hankaluus oikosulkujen rajoittajana ovat suuret portaat virta-arvoissa sekä säädettävyyden puute. Sulake siis palaa aina virta-aika integraalin mukaan, eikä se ota huomioon erilaisia syöttötapoja (generaattori, UPS yms.) tai oikosulun tyyppiä. Sulakkeet saattavat lisäksi katkaista piiristä vain yhden vaiheen, jolloin tapahtuu niin sanottu epäsymmetrinen katkaisu. Lisäksi sulake on aina laukeamisen jälkeen vaihdettava, kun taas oikein mitoitettu katkaisija voidaan virittää uudelleen.

Jotta UPS -syöttötilanteessa syötön automaattinen poiskytkentä saadaan toteutettua, täytyy kaapelit ylimitoitaa, eli valita kaapelit, joiden poikkipinta on valtava suhteessa syötettävään tehoon, jotta oikosulkuimpedanssi saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä. Vikatilanteessa UPS-invertteri toimii periaatteessa verkon tehonlähteenä, ja sen napajännite puolestaan määräytyy syötettävän verkon impedanssista. Mikäli impedanssi on suuri, kohoaa UPS:n napajännite, eikä virtaa pystytä syöttämään oikosulku-piiriin tarpeeksi suurta määrää tai tarpeeksi pitkään, jotta sulake saadaan palamaan tarpeeksi nopeasti.

UPS-laitteen luonteen vuoksi (vaihto/tasajännite muunnin ja elektroninen virtalähde) syötön automaattisen poiskytkennän tulee vielä tapahtua poikkeuksellisen nopeasti, mielellään alle 20 ms:ssa, johtuen UPS-laitteessa olevien virtalähteiden kondensaattoreista. Kuormille ei oikosulkuutilanteessa syötetä lainkaan energiaa lukuun ottamatta virtalähteiden kondensaattoreita. Powereiden toimiessa nimelliskuormallaan, ei niissä välttämättä riitä energiaa yli 20 ms. kestäville katkoksille. Tällöin tasasuunnatussa laitteessa virtalähde on ilman energiaa kaksi puolijaksoa, jolloin se saattaa kytkeä itsensä irti verkosta riippuen verkkoon kytketyistä kuormista. Kun poiskytkentä saadaan aikaan tarpeeksi nopeasti jatkavat muut rinnankytketyt UPS:t syöttämistään, ja muut kuin viikaantunut kuorma pysyvät toiminnassa.

Selektiivisyyden kannalta hankalimmaksi paikaksi muodostuu usein UPS-pääkeskuksessa tai sen ensiöpuolella tapahtuva oikosulku. Mikäli pääkeskus on suojattu keskenään samankokoisilla kytkinvarokkeilla, ei oikosulkutilanteessa voida olla varmoja mikä niistä laukeaa ensimmäisenä, koska kaikkien oikosulkuarvot ovat samat. Lisäksi sulakkeita ei voida lukita keskenään, eivätkä ne tunnista virran kulkusuuntaa. Tällöin on vaarana, että rinnan käyvät UPS:t putoavat pois viallisen piirin lisäksi ja tällöin n+1 -rinnakkaisperiaatteesta ei ole mitään hyötyä.

Sairaalaympäristössä ongelmia oikosulkujen kannalta aiheuttavat myös suojaerotusmuuntajilla erotetut piirit. Tyypillisesti G2-luokan lääkintätiloja, kuten leikkaussaleja ja heräämöiden sähköverkko on galvaanisesti erotettu muusta verkosta maasulkujen estämiseksi. Muuntaja ei siis muunna perinteisen muuntajan tavoin jännitettä vaan sen raudan ympärillä on sama määrä rautalenkkejä ja muuntosuhde on 1:1. Muuntajan tehtävänä on vain tehdä galvaaninen erotus sen erottaman verkon ja maan potentiaalinvälille. Itse syöttölaitteet ja niihin kytketyt potilaat ovat siis suojassa sähköiskulta, mutta muuntajan vaimentaessa oikosulkuja on sen ensiöpuolen suojalaite vaikea saada palamaan. Vaikeutta lisää, kun otetaan huomioon syöttävällä sulakkeelle oleva vaatimus kestää muuntajan käynnistyspiikit ja vuotovirrat.



Kuva 19. Verkon rakenne sairaalassa.

Seuraavassa esitellään kolme esimerkkikohdetta, jotka on toteutettu perinteisellä sulakesuojauksella. Rakennukset on valittu sattumanvaraisesti edustamaan mahdollisimman suurta ja kattavaa esimerkkijoukkoa. Keskusten arvot ja nousujohdot on siis otettu kyseisten projektien suunnitelma-asiakirjoista. Niiden tehollisarvot ja mitoitus perustuvat LVI-laiteluetteluihin ja MagiCad pisteluetteluihin. Oikosulkuarvot ja keskusten mitoitus on laskettu perinteistä exceliä käyttäen.

Vaihtoehtoinen tapa on kuvitteellinen, jossa toteutetut ratkaisut on korvattu automatisoiduilla katkaisijoilla. Alkutilanne on laskettu FebDok-ohjelmalla, ja kytkentöjen, ajoitusten sekä mitoitusten toimivuus on varmistettu laboratoriossa tehdyillä koekytkennöillä koestamalla.



## 7.1 Laskentatapaus K

### 7.1.1 Perinteinen sulakesuojaus

Laskentatapaus K:ssä 10 kV:n rengasverkosta syötetään kahdella rinnan kytketyllä 1200 kVA:n 10/0,4 kV:n muuntajalla viittä pääkeskusta. Kolmea pääkeskusta voidaan lisäksi syöttää 1,2 MVA:n generaattorilla tai yhtä pääkeskusta kolmella 200 kVA:n UPS-laitteella. Kyseessä on todellinen kohde Meilahden sairaala-alueella.

Pääkeskukset syöttävät nousukeskuksia, jotka syöttävät jakokeskuksia. Jakokeskukset syöttävät 7,5 kVA:n ja 5,5 kVA:n lääkintäsuojaerotusmuuntajia, jotka syöttävät erotetun jakelun jakokeskuksia G2-luokan lääkintätiloissa.

Kaikkiin keskuksiin on suunniteltu varasyöttöyhteys ainakin yhdestä suunnasta, ja keskusten pääkytkiminä on mekaaninen vaihtokytkin, jolla syöttö voidaan vaihtaa käsin eri keskukseen (liite 2).

Syöttöjohtojen pituudet vaihtelevat keskijännitemuuntajien ja pääkeskusten välisistä 10 metristä, nousukeskusten ja kauimmaisten ryhmäkeskusten 70 metriin. Kaapeleina käytetään konsentrisia, halogeenittomia, alumiini ja kupari kaapeleita. Kaapelien koko vaihtelee 10 mm<sup>2</sup> :stä 185 mm<sup>2</sup>:iin.

Taulukko 1. Oikosulkutarkastelu K-verkosta

Muuntajan syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W21 PK K1	2000	132	132	36
W22 PK K1	2000	137	137	37
W22 PK K2	2000	133	133	36
W23 PK K1	630	36	91	10
W21 NK K1	630	23,5	60	6
W22 NK K1	400	19	45	5
W22 JK K1	400	7	35	1,89
W23 JK K1	125	4	21	1,08
W29 JK K1.1	63	0,6	0,9	0,28
W29 JK K1.2	63	0,5	0,6	0,24

Generaattorin syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W22 PK K1	2000	6,82	6,82	1,84
W22 PK K2	2000	6,21	6,21	1,68
W23 PK K1	630	2,85	4,57	0,77
W22 NK K1	400	3,91	6,15	1,06
W22 JK K1	400	3,36	5,91	0,91
W23 JK K1	125	2,21	3,75	0,60
W29 JK K1.1	63	0,56	0,79	0,26
W29 JK K1.2	63	0,51	0,72	0,24

UPS-laitteen syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W23 PK K1	630	2,98	2,98	0,80
W23 JK K1	125	1,81	2,44	0,49
W29 JK K1.2	63	0,35	0,56	0,16

$I_c$  = etukojeella rajoitettu oikosulkuvirta,  $I_{pk}$  = rajoittamaton oikosulkuvirta ja  $I_{min}$  = yksivaiheisen oikosulkuvirta

Ongelma tässä verkossa on tyypillinen verkolle, jota syötetään kolmesta erisuuruudesta teholähteestä. Sulakkeiden tulee olla mitoitettu toisaalta kuormien, toisaalta normaali-verkon oikosulkukestoisuudelle ja toisaalta UPS-syötön pienimmälle yksivaiheiselle oikosululle. Erityisen vaikeaksi ongelman tekee suojaerotusmuuntopiiri, joka pudottaa toisiopuolellaan oikosulkuvirran suuruuden syötettävään tehoon nähden erittäin pieneksi.

Rakennuksessa K oikosulun kannalta vaikein tilanne on siis suojaerotusmuuntopiireissä olevat keskukset. Keskusta W29 JK K1.1 syötetään 35 A:n gG-typin sulakkeella ja W29 JK K1.2 keskusta 32 A:n gG-typin sulakkeella (taulukko 1).

Nimellisvirraltaan 35 A:n gG-typin kahvasulake palaa 230 A:n virralla noin 0,8 s. 32 A:n nimellisvirraltaan oleva gG-typin kahvasulake palaa 160 A virralla noin 1,8 s. Nämä virta-arvot ovat siis kyseessä pienimmässä mahdollisessa oikosulkutilanteessa, eli tilanteessa, jossa on kyseessä yksi vaiheinen oikosulku eli ns. maasulku, ja jossa oikosulkuvirtaa on rajoitettu etukojeella.

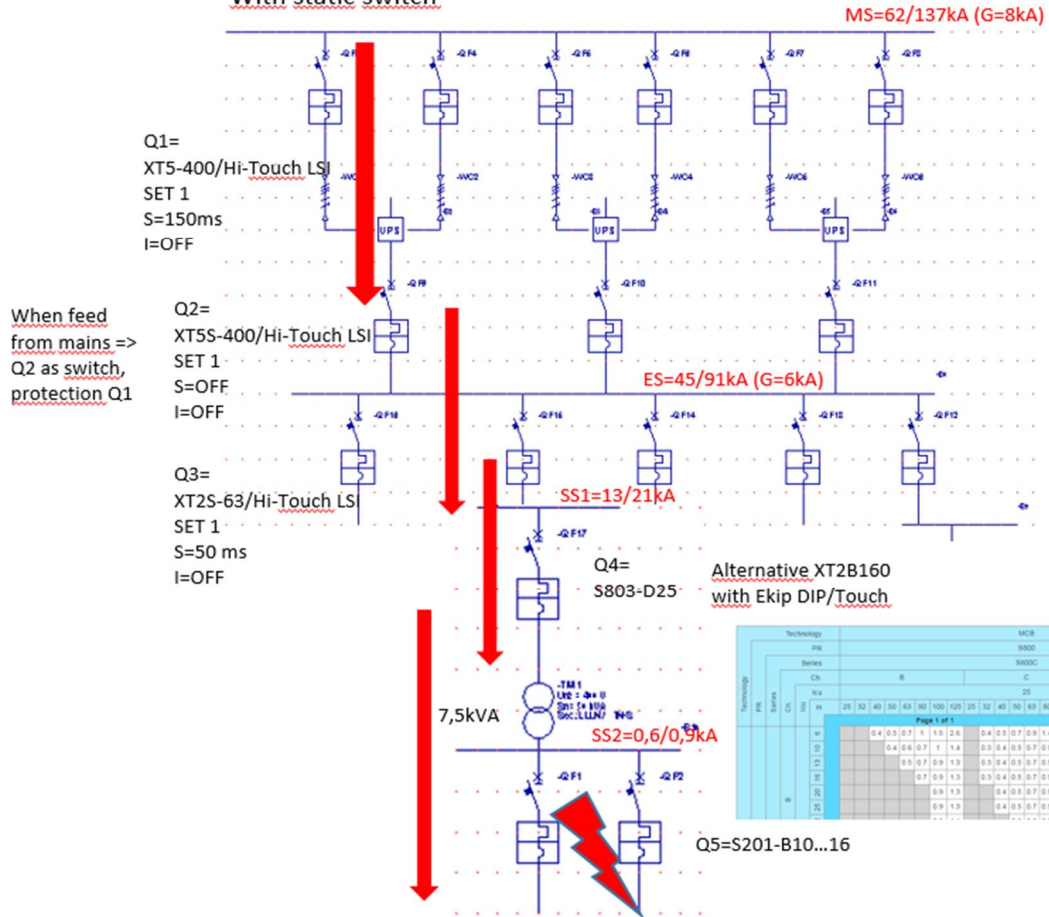
SFS 6000 -standardin vaatima viitearvo keskusten syöttöjen automaattiselle poiskytkenälle on alle 5 s. Periaatteessa arvot täyttävät kyseiset raamit ja ovat standardin määräysten mukaisia. Kuitenkin useiden sekuntien mittainen ylivirta, josta voi syntyä valokaaria voi vaurioittaa keskuksia ja kaapeleita.

## 7.1.2 Katkaisijoilla ja väylähajauksella toteutettuna

**Situation 1. feed from trafos**

Proposal, 3 pcs (n pcs) UPS 200kVA in parallel

With static switch



In case of fault in load of SS2 =&gt; max.lk=0,6kA =&gt;

Q5 – Q4 selectivity &gt; 0,6kA = OK

Q4 – Q3 Selectivity &gt; 1kA, Q3 S=50ms = OK

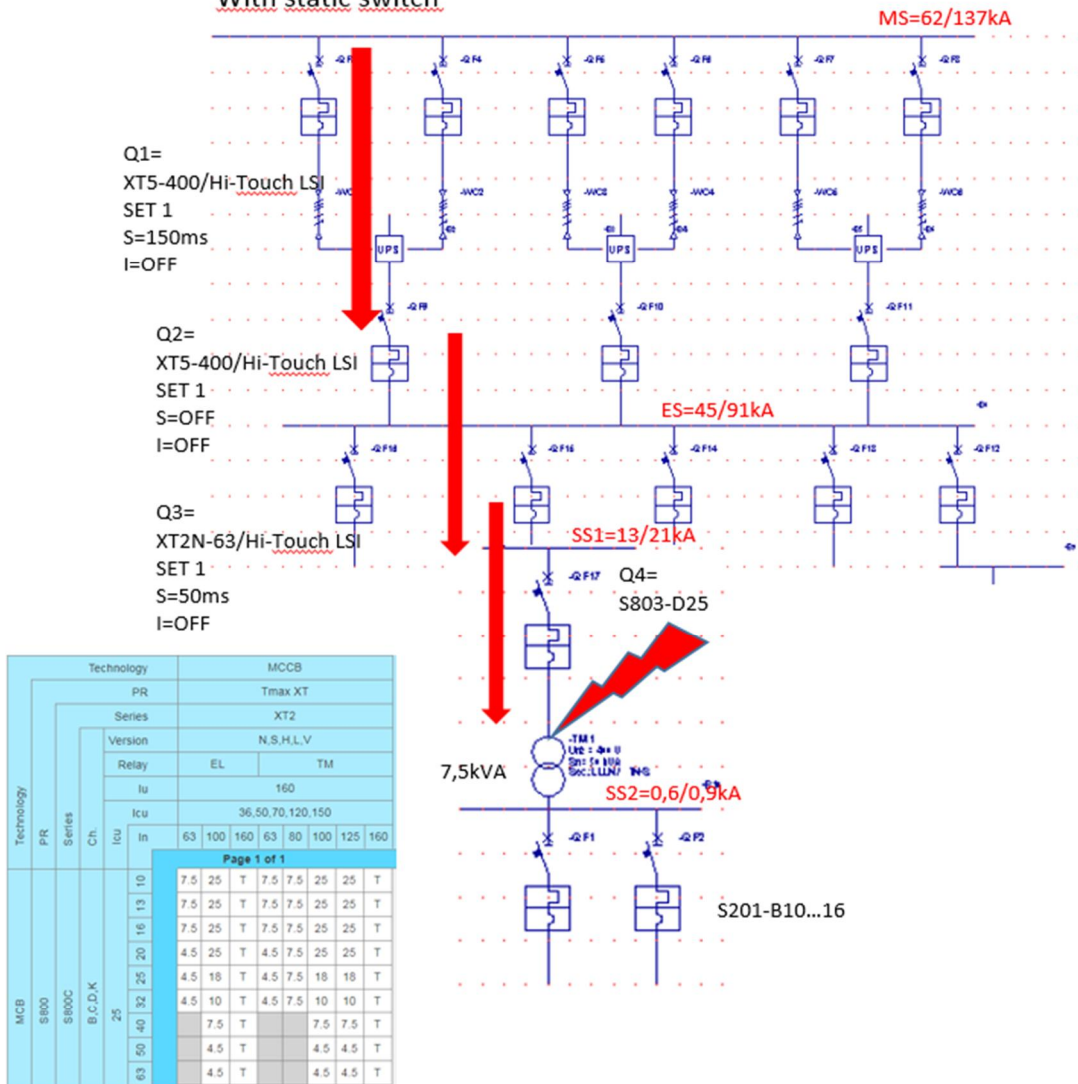
Q3 – Q2 Selectivity OK

Q2 – Q1 selectivity &gt;1kA =OK

Kaavio 1. Oikosulku keskuksen W29 JK K1.2 toisipuolella.

**Situation 1. feed from trafos**

Proposal, 3 pcs (n pcs) UPS 200kVA in parallel  
With static switch



In case of fault in trafo primary:

Q4 – Q3 Selectivity > 4,5kA = OK

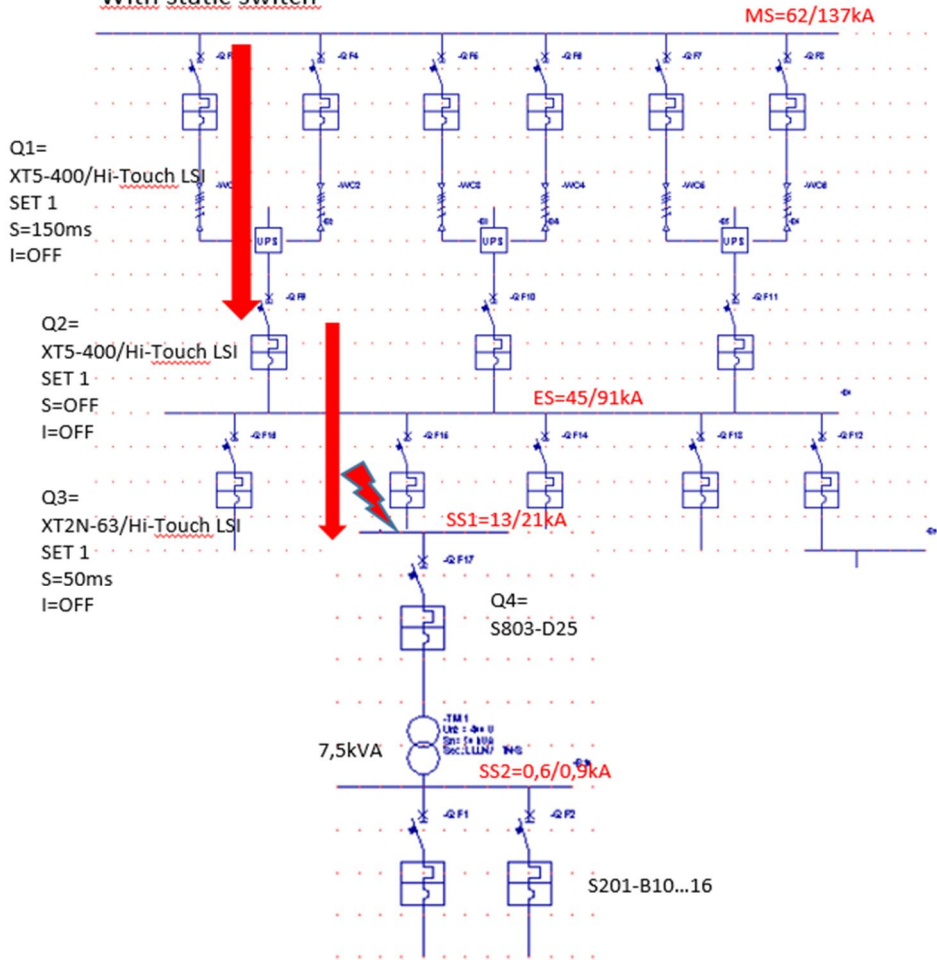
Q3 – Q2 Selectivity OK

Q2 – Q1 selectivity up to propulsion = 7kA= OK

**Situation 1. feed from trafos**

Proposal, 3 pcs (n pcs) UPS 200kVA in parallel

With static switch

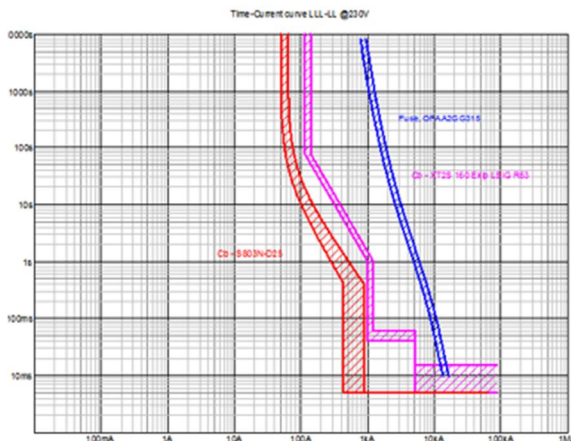


In case of fault in SS1:

Q3 – Q2 (and Q1) Selectivity OK

Q2 – Q1 selectivity up to propulsion = 7kA= Not needed

Q3 will trip

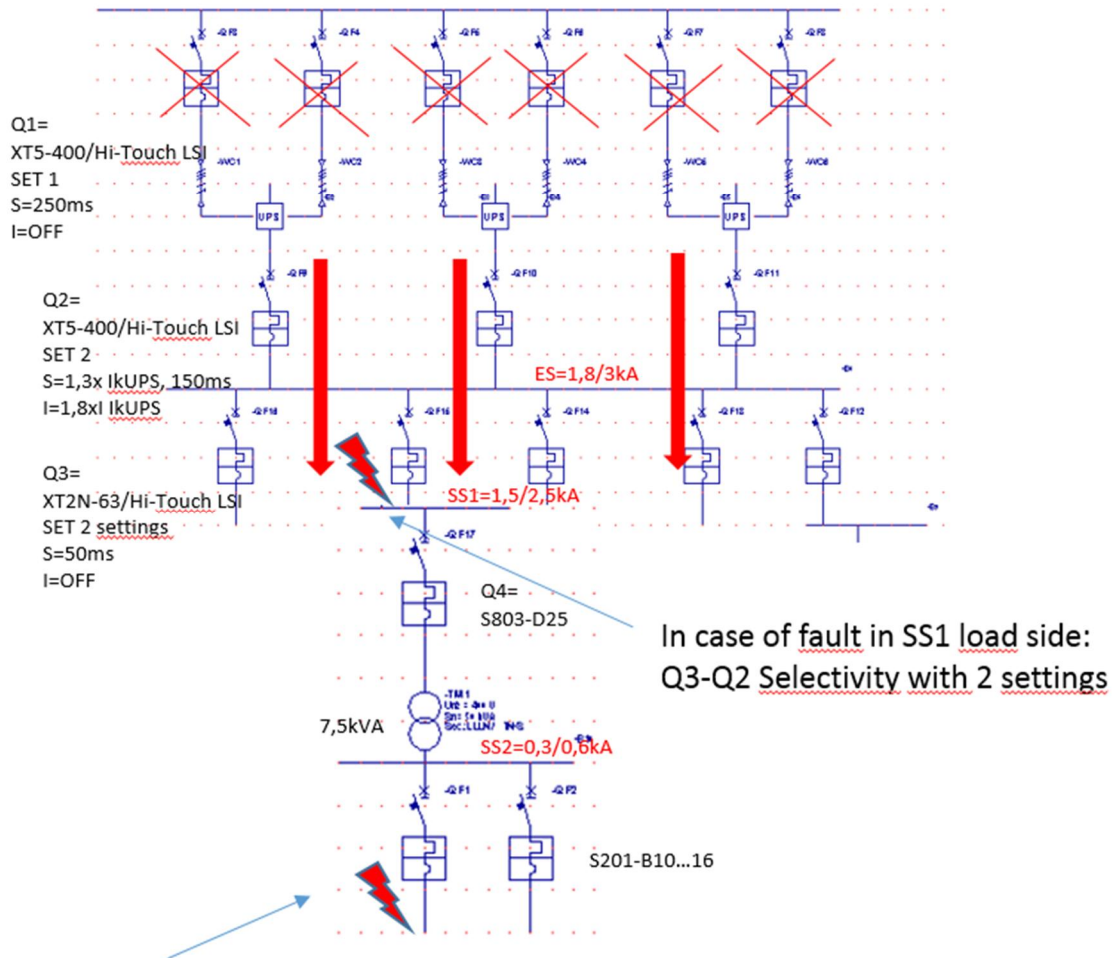


Considering the use of monolithic UPS with 315A fuse in bypass, we verified following solution with power supply:  
Q2 not selective, fine XT5  
Q3 – XT2N 63A Hi-Touch  
Q4 – S800 25A curve D  
Downstream trafo S200 10A curve B

Kaavio 3. Oikosulku keskuksessa W23 JK K2 muuntajan syöttäessä.

**Situation 2. feed from UPS**

Proposal, 3 pcs (n pcs) UPS 200kVA in parallel  
 With static switch



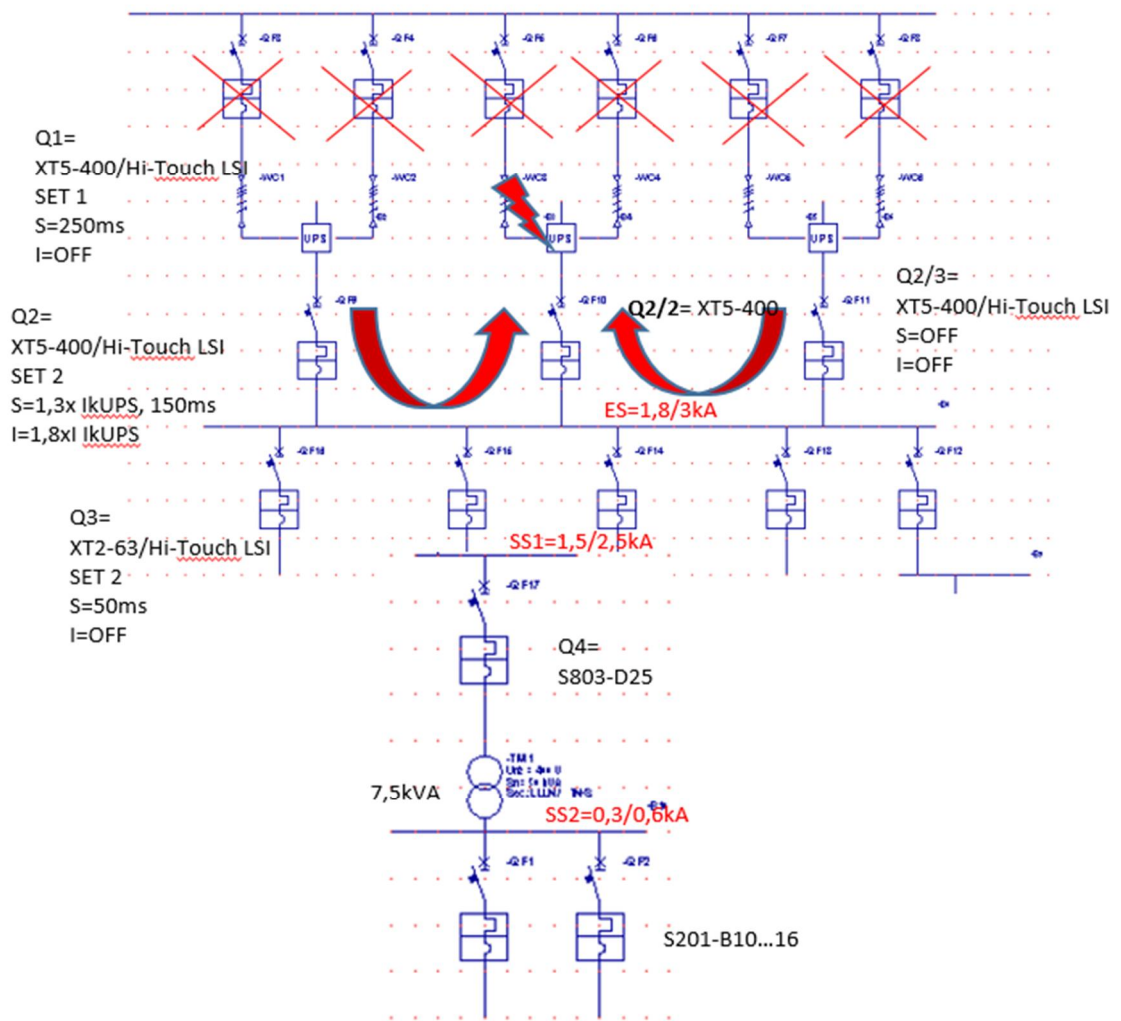
In case of fault in SS2 load side:  
 S201 – Q4 Selectivity OK  
 Q4 – Q3 Selectivity OK  
 Q3-Q2 Selectivity with 2 settings

Kaavio 4. Oikosulku keskuksessa W23 JK K2 UPS:ien syöttäessä.

## Situation 2. feed from UPS

Proposal, 3 pcs (n pcs?) UPS 200kVA in parallel

With static switch



If fault in UPS =>

Q2 => SET2 settings

S=1,3x IkUPS, 150ms

I=1,8xI IkUPS

=> The middle CB will trip by I-protection (2xUPS feeding)

while left-right only 1 UPS feeding => no trip



Technology		MCB																			
PR		S800																			
Series		S800C																			
Ch.		B									C										
Icu		25																			
In		25	32	40	50	63	80	100	125	25	32	40	50	63	80	100	125	25	32	40	
Page 1 of 1																					
6				0.4	0.5	0.7	1	1.5	2.6			0.4	0.5	0.7	0.9	1.4	2.4	4.8	0.5	1	1.2
10					0.4	0.6	0.7	1	1.4			0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.3	2	0.4	0.6	0.8
13						0.5	0.7	0.9	1.3			0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.3	1.9	0.4	0.6	0.8
16							0.7	0.9	1.3			0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.3	1.9		0.6	0.8
20								0.9	1.3				0.4	0.5	0.7	0.9	1.2	1.8			0.8
25									0.9	1.3				0.4	0.5	0.7	0.9	1.2	1.8		0.8

Taulukko 2. Selektiivisyystaulukko Tmax XT2–S200 johdonsuoja muuntajan toisiopuolella.

Technology		MCCB									
PR		Tmax XT									
Series		XT2									
Version		N,S,H,L,V									
Relay		EL					TM				
Iu		160									
Icu		36,50,70,120,150									
In		63	100	160	63	80	100	125	160		
Page 1 of 1											
10		7.5	25	T	7.5	7.5	25	25	T		
13		7.5	25	T	7.5	7.5	25	25	T		
16		7.5	25	T	7.5	7.5	25	25	T		
20		4.5	25	T	4.5	7.5	25	25	T		
25		4.5	18	T	4.5	7.5	18	18	T		
32		4.5	10	T	4.5	7.5	10	10	T		
40			7.5	T			7.5	7.5	T		
50			4.5	T			4.5	4.5	T		
63			4.5	T			4.5	4.5	T		

Taulukko 3. Selektiivisyystaulukko Tmax XT2–S200 johdonsuoja muuntajan ensiöpuolella.

Edellä olevista kaavioista (kaaviot 2-5) käy ilmi, että vaihdettaessa sulakkeiden tilalle ABB:n XT-sarjan kompaktikatkaisijat joihin ohjelmoidaan kaksi asetusarvo-settiä ja jotka voidaan lukita keskenään ohjelmallisesti, saavutetaan nopeampi oikosulkujen katkaisu, kuin sulakkeilla (IEC 61580).

Kaavioissa katkaisijat on merkitty Q-tunnuksella ja välitasot kuvaavat keskuksia. Punaisella on kuvattu oikosulkupiste ja tarvittaessa virran kulkusuunta. Kaavioihin on myös lisätty näkyviin taulukko selektiivisyydestä ja laukaisukäyrästöt.

Katkaisijoiden käyttäminen etukojeina osoittautui ainoaksi tavaksi, jolla rinnakkaiset UPS-laitteet voidaan saada selektiiviseksi keskenään. Sulakkeilla tämä on puolestaan mahdotonta, koska virtakestoisuus on kaikissa sama.

Katkaisijoihin asetetaan portaittainen 50–150 ms:n hidastus UPS:n tai generaattorin syöttäessä ja 80–200 ms hidastus muuntajan syöttäessä. Lisäksi rinnansyöttävät katkaisijat lukitaan keskenään 100 ms:n viiveellä. Tämän lisäksi niihin asetetaan valvonta, joka tunnistaa virran kulkusuunnan.

Goose –väylä katkaisijoiden välillä kertoo rinnan kytketyille katkaisijoille verkon tilasta, ja varmistaa, etteivät ne aukea, ellei vika leviä verkossa.

## 7.2 Laskentatapaus N

### 7.2.1 Perinteinen sulakesuojaus

Laskentatapaus N:ssä 10 kV:n rengasverkosta syötetään kahdella rinnan kytketyllä 1250 kVA:n 10/0,4 kV:n muuntajalla viittä pääkeskusta. Kolmea pääkeskusta voidaan lisäksi syöttää 1,3 MVA:n generaattorilla tai yhtä pääkeskusta kolmella 200 kVA:n UPS akustolla.

Pääkeskukset syöttävät nousukeskuksia, jotka syöttävät jakokeskuksia. Jakokeskukset syöttävät kuormat kentällä.

Kaikkiin keskuksiin on suunniteltu varasyöttöyhteys ainakin yhdestä suunnasta, ja keskusten pääkytkiminä toimivat 4-napaiset vaihtokytkimet, joilla syöttö voidaan vaihtaa mekaanisesti tulemaan eri reittiä pitkin (liite 3).

Syöttöjohtojen pituudet vaihtelevat keskijännitemuuntajien ja pääkeskusten välisistä 20 metriä, nousukeskusten ja kauimmaisten ryhmäkeskusten 80 metriä. Kaapeleina käytetään konsentrisia, halogeenittomia, alumiini ja kupari kaapeleita. Kaapelien koko vaihtelee 10 mm<sup>2</sup> :stä 185 mm<sup>2</sup>:iin.

Taulukko 4. Oikosulkutarkastelu N-verkosta

Muuntajan syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W21 PK N1	2500	135	135	36
W22 PK N1	2500	138	138	37
W22 PK N2	2500	139	139	38
W23 PK N1	1250	41	117	11
W21 NK N1	630	46	73	12
W22 NK N1	630	17	82	5
W21 JK N1	125	4	14	1,08
W22 JK N1	125	5	26	1,35
W23 JK N1	125	2	10	0,54

Generaattorin syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W22 PK N1	2500	15,5	15,5	4,2
W22 PK N2	2500	15,8	15,8	4,3
W23 PK N1	1250	2,85	4,57	0,77
W22 NK N1	630	6,85	14,5	1,85
W22 JK N1	125	4,29	10	1,16
W23 JK N1	125	2,21	3,75	0,60

UPS-laitteen syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	$I_c$ (kA)	$I_{pk}$ (kA)	$I_{min}$ (kA)
W23 PK N1	1250	1,32	1,32	0,36
W23 JK N1	125	0,63	0,71	0,17

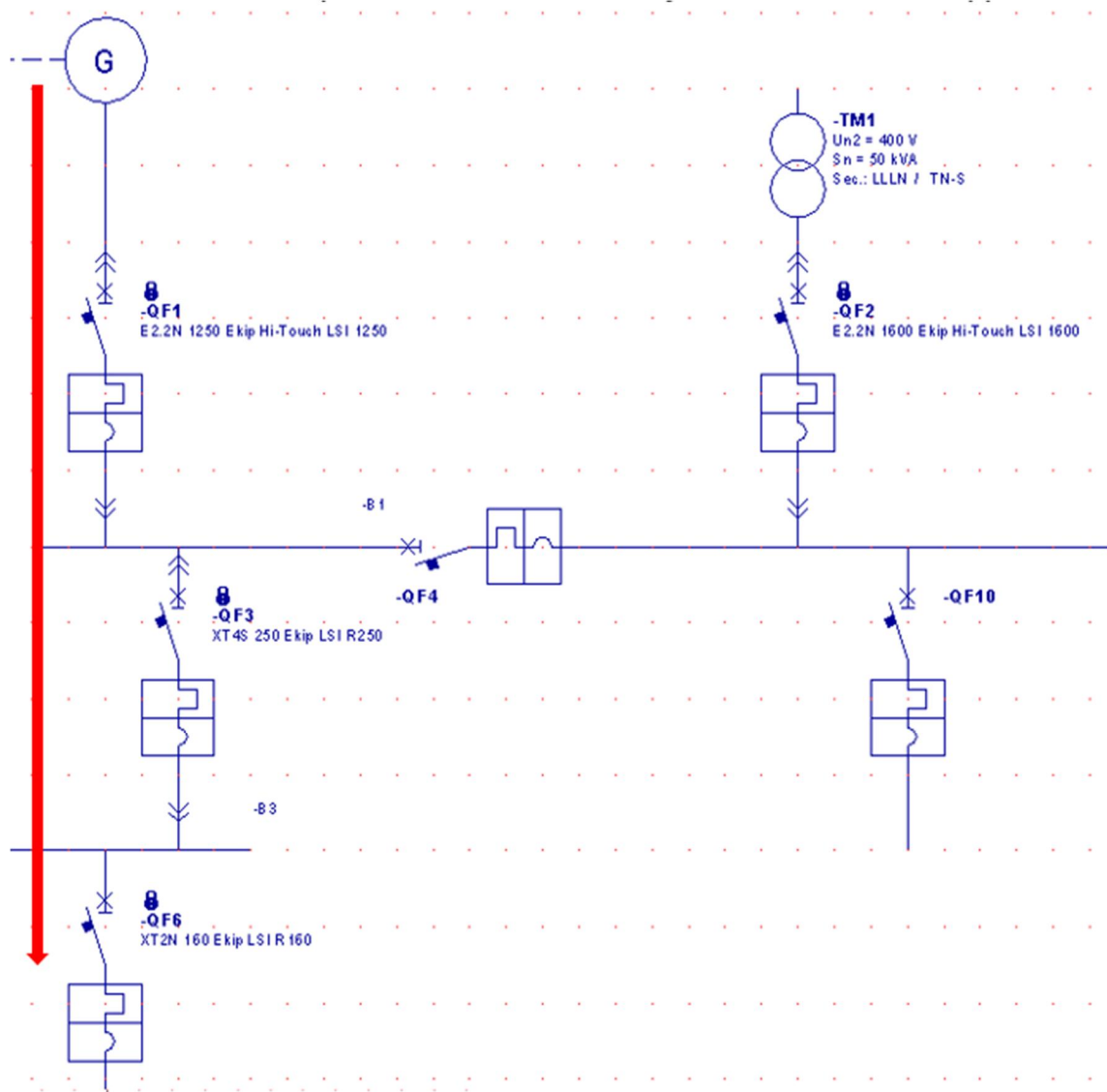
$I_c$  = etukojeella rajoitettu oikosulkuvirta,  $I_{pk}$  = rajoittamaton oikosulkuvirta ja  $I_{min}$  = yksivaiheisen oikosulkuvirta

N-rakennuksessa on kahden muun esimerkin tapaan kolme teholähdettä samalle verkolla ja etukojeille. Kaikki kolme teholähdettä eroavat niin teholtaan kuin oikosulkuvirran syöttökyvyltään. Tästä kyseisestä rakennuksesta puuttuu G2-lääkintätilojen vaatima suojaerotusmuuntajien syöttämä verkko, mikä helpottaa tilannetta hieman.

Rakennuksessa N oikosulun kannalta vaikein tilanne on keskuksessa W23 JK N1.1 sen ollessa syötettynä katkottomasta syöttöjärjestelmästä (taulukko 4). Keskusta syötävä 35 A nimellisvirraltaan oleva gG-tyypin kahvasulake palaa 170 A:n virralla noin 2,8 s, joka on siis pienin yksi vaiheinen oikosulku kyseisen keskuksen kiskostossa tai syötävässä kaapelissa. Kyseisessä oikosulussa on huomioitu sitä rajoittava etukoje.

SFS 6000 -standardin vaatima viitearvo keskusta syöttävien etukojeiden automaattiselle poiskytkennälle on alle 5 s. Arvot täyttävät standardin määräykset ja rakennus on mennyt läpi kolmannen osapuolen suorittamasta varmennustarkastuksesta. Kuitenkin useiden sekuntien mittainen ylivirta, josta voi syntyä valokaaria voi vaurioittaa keskuk-  
sia ja kuumentaa kaapeleita.

## 7.2.2 Katkaisijoilla ja väyläohjauksella toteutettuna



Kaavio 6. Oikosulku keskuksessa W22 JK N1 generaattorin syöttäessä.

400 V

**-QF1 (Set A), E2.2N 1250 Ekip Hi-Touch LSI  
1250**

L: IEC60947-2

I1: 0.90

t1: 3s

S function on t=k

I2: 1.20

t2: 0.30s

S2 function on t=k

I2 (S2): 2.00

t2 (S2): 0.15s

I - off

INST 2 - off

**-QF6, XT2N 160 Ekip LSI R160**

I1: 1.00

t1: 3s

S - off

I3: 4.50

**-QF7, S803N-C32**

Ith: 32.00

Im: 320.00

**-QF9, S203-B 16**

Ith: 16.00

Im: 80.00

**-QF3, XT4S 250 Ekip LSI R250**

I1: 1.00

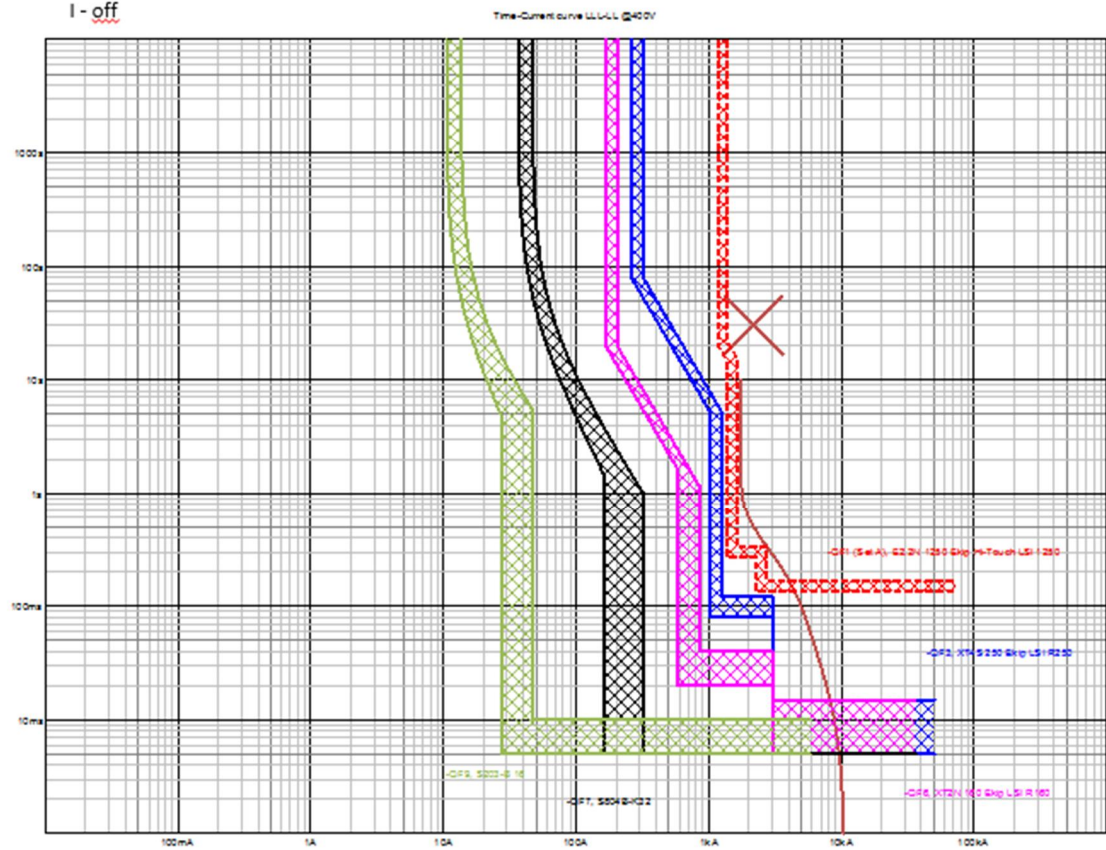
t1: 12s

S function on t=k

I2: 4.50

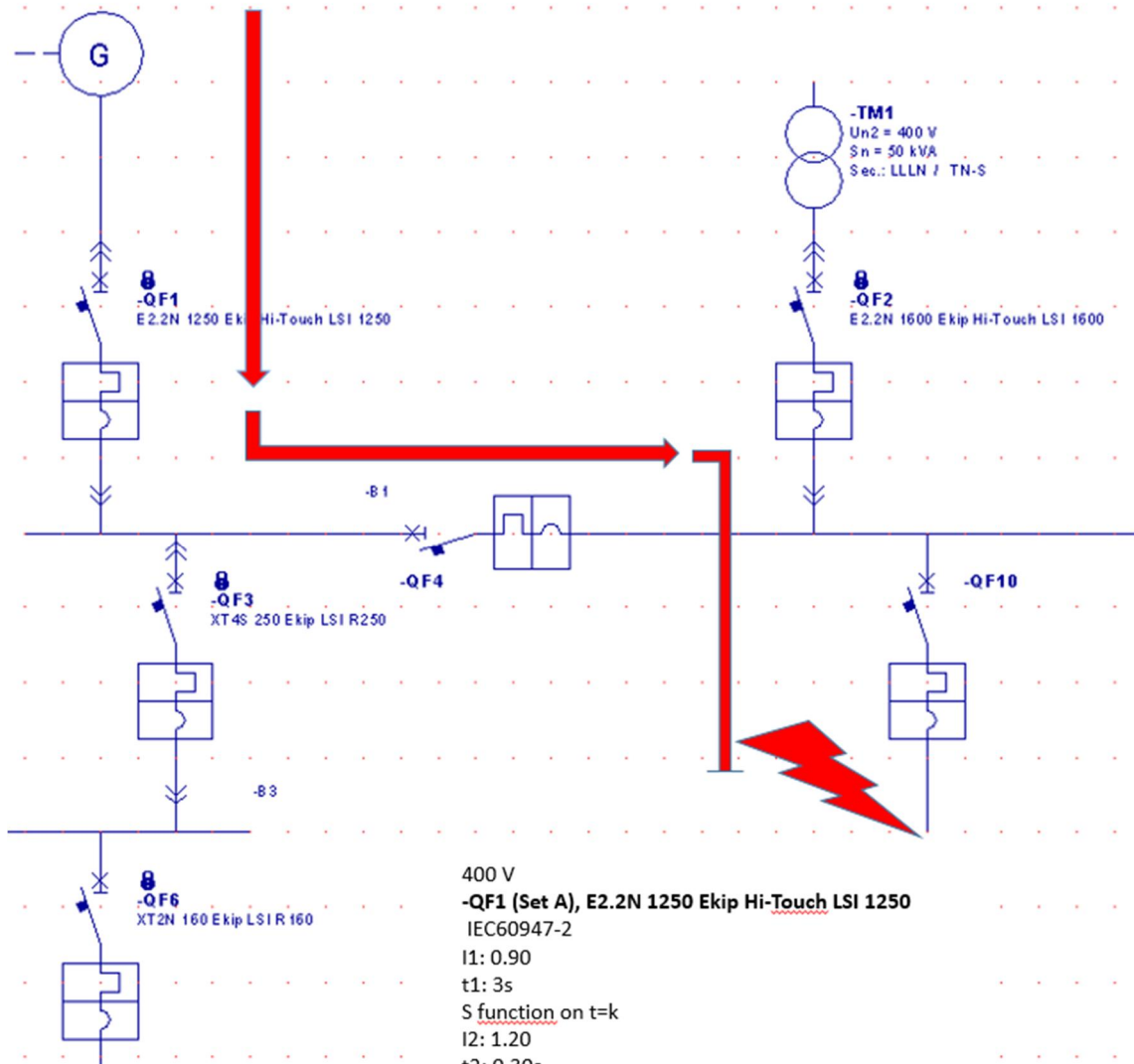
t2: 0.1s

I - off



Kaavio 7. Katkaisijoiden asettelut.

Generaattorisyöttö: Kiskokatkaisijan kautta, Kiskokatkaisijalla SET A asetellut  
Selektiivisyys sekä suojaus toimii



400 V

**-QF1 (Set A), E2.2N 1250 Ekip Hi-Touch LSI 1250**  
IEC60947-2

I1: 0.90

t1: 3s

S function on t=k

I2: 1.20

t2: 0.30s

S2 function on t=k

I2 (S2): 2.00

t2 (S2): 0.21s

I - off

INST 2 - off

**-QF4 (Set A), E2.2N 1600 Ekip Hi-Touch LSI 1600**

L: IEC60947-2

I1: 0.49

t1: 3s

S function on t=k

I2: 0.70

t2: 0.14s

S2 function on t=k

I2 (S2): 4.00

t2 (S2): 0.06s

I - off

INST 2 - off

**-QF10, T5S 400 PR222DS-LSI 320A**

I1: 0.80

t1: 3s

S function on t=k

I2: 2.40

t2: 0.10s

I - off

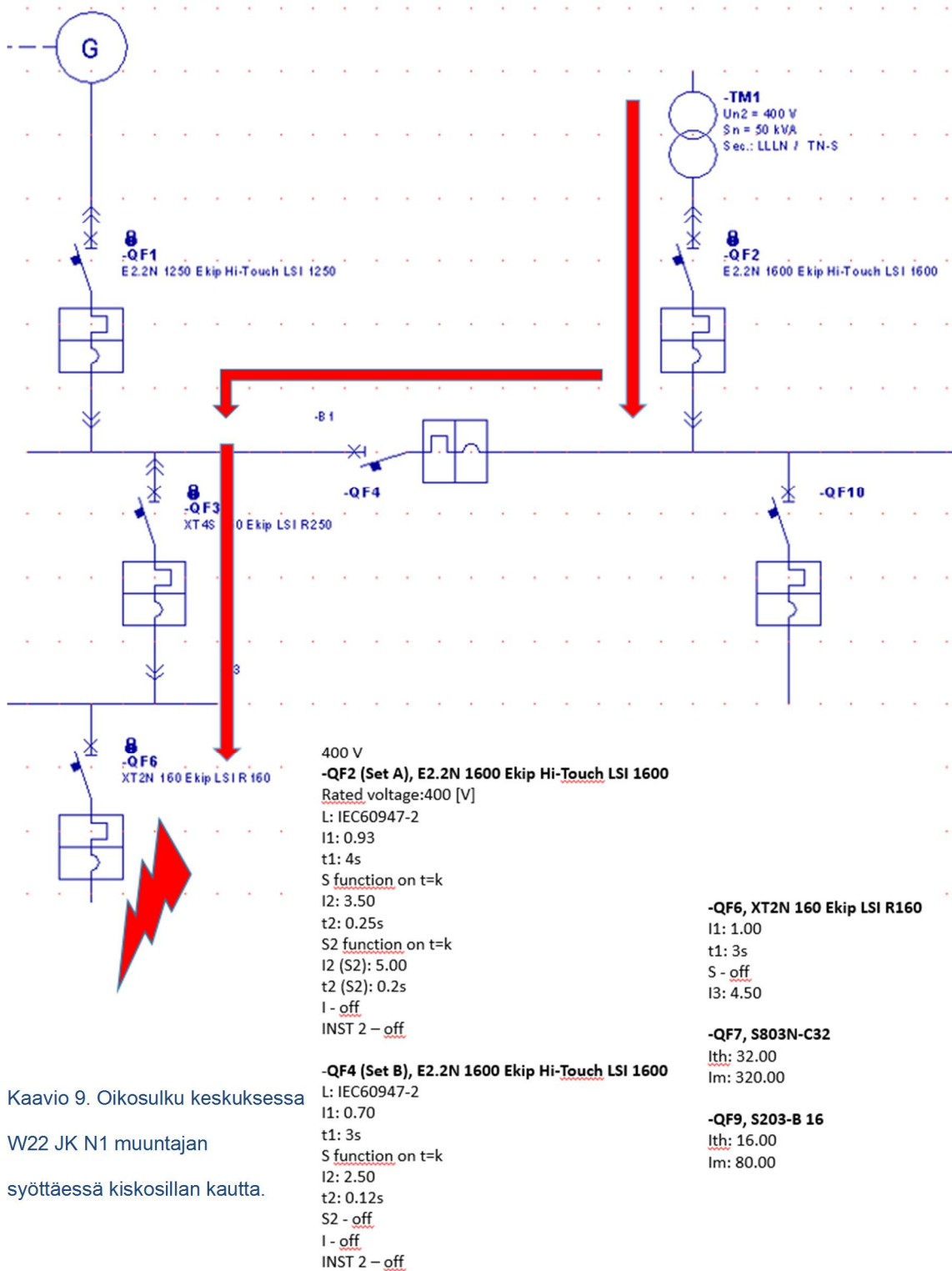
Kaavio 8. Oikosulku keskuksessa

W21 JK N1 generaattorin syöttäessä

kiskosillan kautta.



## Muuntajasyöttö:



Kaavio 9. Oikosulku keskuksessa  
W22 JK N1 muuntajan  
syöttäessä kiskosillan kautta.

Edellä olevista kaavioissa (kaaviot 6-9) sulakkeiden tilalle on vaihdettu ABB:n XT-sarjan kompaktikatkaisijat joihin ohjelmoidaan kaksi asetusarvoasettiä ja jotka voidaan lukita keskenään ohjelmallisesti. Tällöin saavutetaan nopeampi oikosulkujen katkaisu ja keskinäinen selektiivisyys helpommin kuin sulakkeilla.

Kaavioissa katkaisijat on merkitty Q-tunnuksella ja välitasot kuvaavat keskuksia. Punaisella on kuvattu oikosulkupiste ja tarvittaessa virran kulkusuunta. Kaavioihin on myös lisätty näkyviin taulukko selektiivisyydestä ja laukaisukäyrästöt.

Katkaisijoiden käyttö etukojeina on ainoa tapa jolla rinnakkaiset UPS:t voidaan saada selektiiviseksi keskenään. Rinnan kytkettyjen 125 A:n kytkinvarokkeiden virtaresistiivisyys on sama, joten oikosulun sattuessa mikä tahansa niistä saattaa lauetta.

Katkaisijoihin asetetaan portaittainen 10–100 ms. hidastus UPS:n tai generaattorin syöttäessä ja 90–250 ms. hidastus muuntajan syöttäessä. Lisäksi rinnansyöttävät katkaisijat lukitaan keskenään 100 ms. viiveellä. Tämän lisäksi niihin asetetaan valvonta, joka tunnistaa virran kulkusuunnan (Hi touch).

## 7.3 Laskentatapaus U

### 7.3.1 Perinteisellä sulakesuojauksella toteutettuna

Laskentatapaus U:ssä 10 kV:n rengasverkosta syötetään kahdella rinnan kytketyllä 1600 kVA:n 10/0,4 kV:n muuntajalla viittä pääkeskusta. Kolmea pääkeskusta voidaan lisäksi syöttää kahdella rinnankytketyllä 1,5 MVA:n generaattorilla tai yhtä pääkeskusta kolmella 400 kVA:n UPS akustolla.

Pääkeskukset syöttävät nousukeskuksia, jotka syöttävät jakokeskuksia. Jakokeskukset syöttävät 7,5 kVA:n ja 5,5 kVA:n lääkintäsuojaerotusmuuntajia, jotka syöttävät erotetun jakelun jakokeskuksia.

Kaikissa esimerkin keskuksissa on pääkytkimenä kaksi asentoinen mekaaninen 4- napainen kytkin, jolla syöttävää keskusta voidaan vaihtaa, esimerkiksi huollon yhteydessä. (liite 4).

Syöttöjohtojen pituudet vaihtelevat keskijännitemuuntajien ja pääkeskusten välisistä 20 metriä, nousukeskusten ja kauimmaisten ryhmäkeskusten 90 metriä. Kaapeleina käytetään konsentrisia, halogeenittomia, alumiini ja kupari kaapeleita. Kaapelien koko vaihtelee 10 mm<sup>2</sup> :stä 240 mm<sup>2</sup>:iin.

Taulukko 5. Oikosulkutarkastelu U-verkosta

Muuntajan syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	I <sub>c</sub> (kA)	I <sub>pk</sub> (kA)	I <sub>min</sub> (kA)
W21 PK U1	3200	193	193	52
W22 PK U1	2500	189	189	51
W22 PK U2	2500	189	189	51
W23 PK U1	1250	58	122	16
W21 NK U1	1000	46	94	12
W22 NK U1	800	37	78	10
W21 JK U1.1	125	11	32	2,97
W22 JK U1.1	63	5	18	1,35
W23 JK U1.1	63	4	13	1,08
W22 JK U1.2	63	5	17	1,35
W23 JK U1.2	63	3	9	0,81
W29 JK U1.21	63	0,48	0,55	0,23
W29 JK U1.22	63	0,48	0,55	0,23
W29 JK U1.21.UPS	63	0,28	0,33	0,13
W29 JK U1.22.UPS	63	0,29	0,34	0,14

Generaattorin syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	I <sub>c</sub> (kA)	I <sub>pk</sub> (kA)	I <sub>min</sub> (kA)
W22 PK U1	2500	13,9	13,9	3,75
W22 PK U2	2500	13,9	13,9	3,75
W23 PK U1	1250	3,6	13	0,97
W22 NK U1	800	6,88	12,8	1,86
W22 JK U1	63	4,12	9,61	1,11
W23 JK U1	63	3,7	7,12	1,00
W22 JK U1.2	63	3,57	6,8	0,96
W23 JK U1.2	63	2,89	4,57	0,78
W29 JK U1.21	63	0,56	0,79	0,26
W29 JK U1.22	63	0,56	0,79	0,26
W29 JK U1.21.UPS	63	0,31	0,61	0,15
W29 JK U1.22.UPS	63	0,32	0,63	0,15

UPS-laitteen syöttäessä:

Keskus	Mitoitusvirta (A)	I <sub>c</sub> (kA)	I <sub>pk</sub> (kA)	I <sub>min</sub> (kA)
W23 PK U1	1250	3,42	3,42	0,92
W23 JK U1	63	1,89	2,72	0,73
W23 JK U1.2	63	1,82	2,5	0,68
W29 JK U1.21.UPS	63	0,35	0,54	0,16
W29 JK U1.22.UPS	63	0,34	0,53	0,16

U-esimerkkitapauksessa toistuu yleinen ongelma verkon saamisesta selektiiviseksi, oikosulkujen nopeasta katkaisusta ja syöttökyvyn riittävydestä. Keskuksia voidaan syöttää kolmesta eri jakelujärjestelmästä (normaaliverkko, generaattori, UPS-laite). Tämän lisäksi suojaerotusmuuntopiirit, joilla toteutetaan henkilösuojaus G2-luokan lääkintätiloissa, pienentävät oikosulku virtaa merkittävästi erottamissaan verkon osissa.

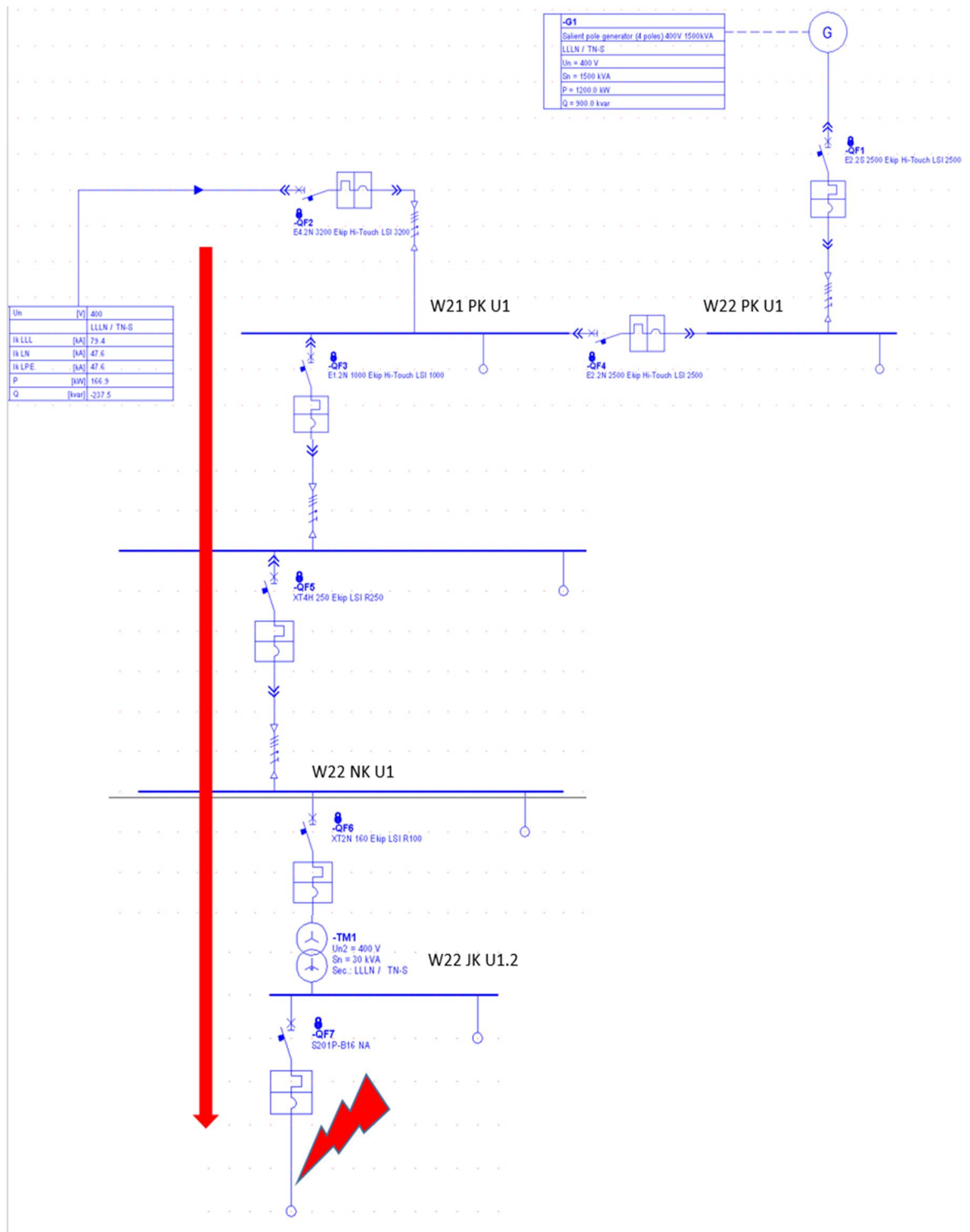
Kuitenkin verkon suojauksen, selektiivisyyden ja syötön on toimittava kaikissa syöttötapaauksissa turvallisesti ja tehokkaasti. Koska etukojeet ja kaapelit ovat samat huolimatta syöttölaitteesta ja sen tarjoamasta oikosulkuvirran syöttökyvystä, on suojauksien saaminen toimivaksi haasteellista.

Rakennuksessa U oikosulun kannalta vaikein tilanne on suojaerotusmuuntajien syöttämät keskuksat W29 JK U1.22 ja W29 JK U1.21.UPS (taulukko 5). Keskusta W29 JK U1.22 syötetään 35 A gG-tyypin sulakkeella ja W29 JK U1.21.UPS 32 A gG-tyypin sulakkeella.

Nimellisvirraltaan 35 A:n gG-tyypin kahvasulake palaa 230 A:n virralla noin 0,8 s. 32 A nimellisvirraltaan oleva gG-tyypin kahvasulake palaa 130 A:n virralla noin 3,3 s. Nämä virta-arvot ovat siis kyseessä pienimmässä mahdollisessa oikosulkutilanteessa, eli tilanteessa, jossa on kyseessä yksi vaiheinen oikosulku eli ns. maasulku ja jossa virtaa on rajoitettu etukojeella.

SFS 6000 -standardin vaatima viitearvo keskusten syöttöjen automaattiselle poiskytkenälle on alle 5 s. Periaatteessa arvot täyttävät kyseiset raamit ja ovat standardin määräysten mukaisia. Kuitenkin useiden sekuntien mittainen ylivirta, josta voi syntyä valokaaria, voi vaurioittaa keskuksia ja kuumentaa kaapeleita.

## 7.3.2 Katkaisijoilla ja väylöuhjauksella toteutettuna



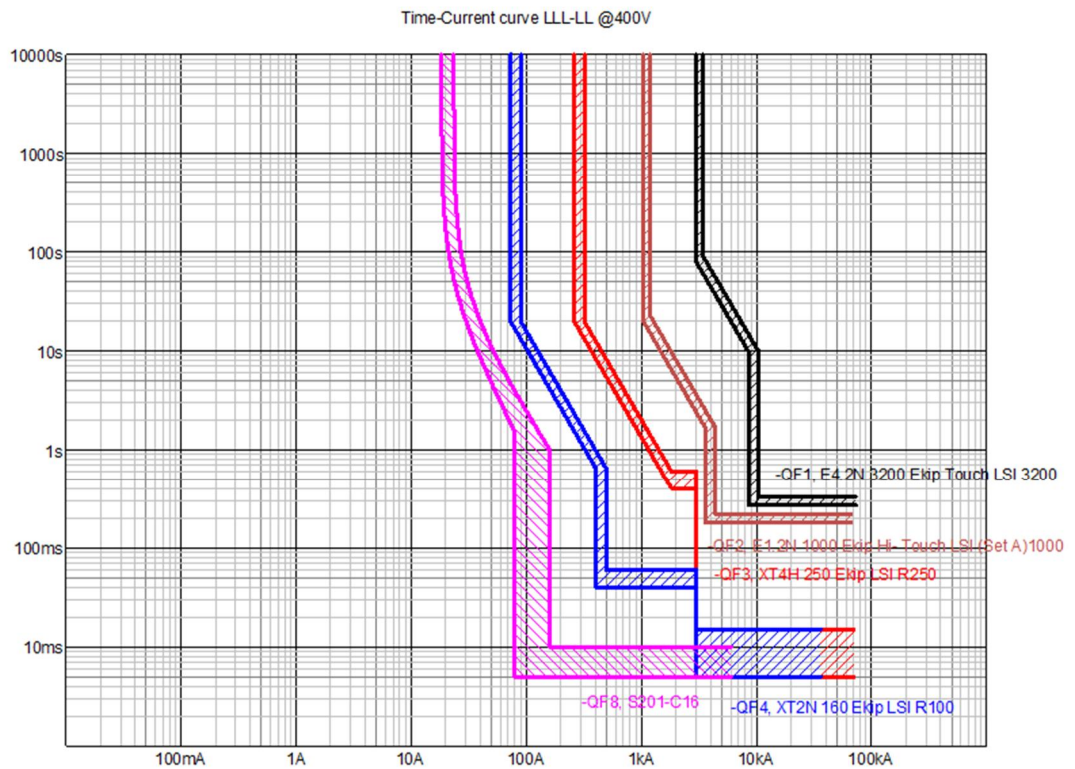
Kaavio 10. Oikosulku keskuksen W29 JK U1.21.UPS toisiopuolella muuntajan syöttäessä.

400 V  
**-QF1, E4.2N 3200 Ekip Touch LSI 3200**  
 L: IEC60947-2  
 I1: 0.90  
 t1: 12s  
 S function on t=k  
 I2: 3.00  
 t2: 0.30s  
 I - off  
 INST 2 - off  
**-QF2, E1.2N 1000 Ekip Touch LSI 1000**  
 L: IEC60947-2  
 I1: 1.00  
 t1: 3s  
 S function on t=k  
 I2: 4.00  
 t2: 0.2s  
 I - off  
 INST 2 - off  
 t2: 0.1s  
 I - off

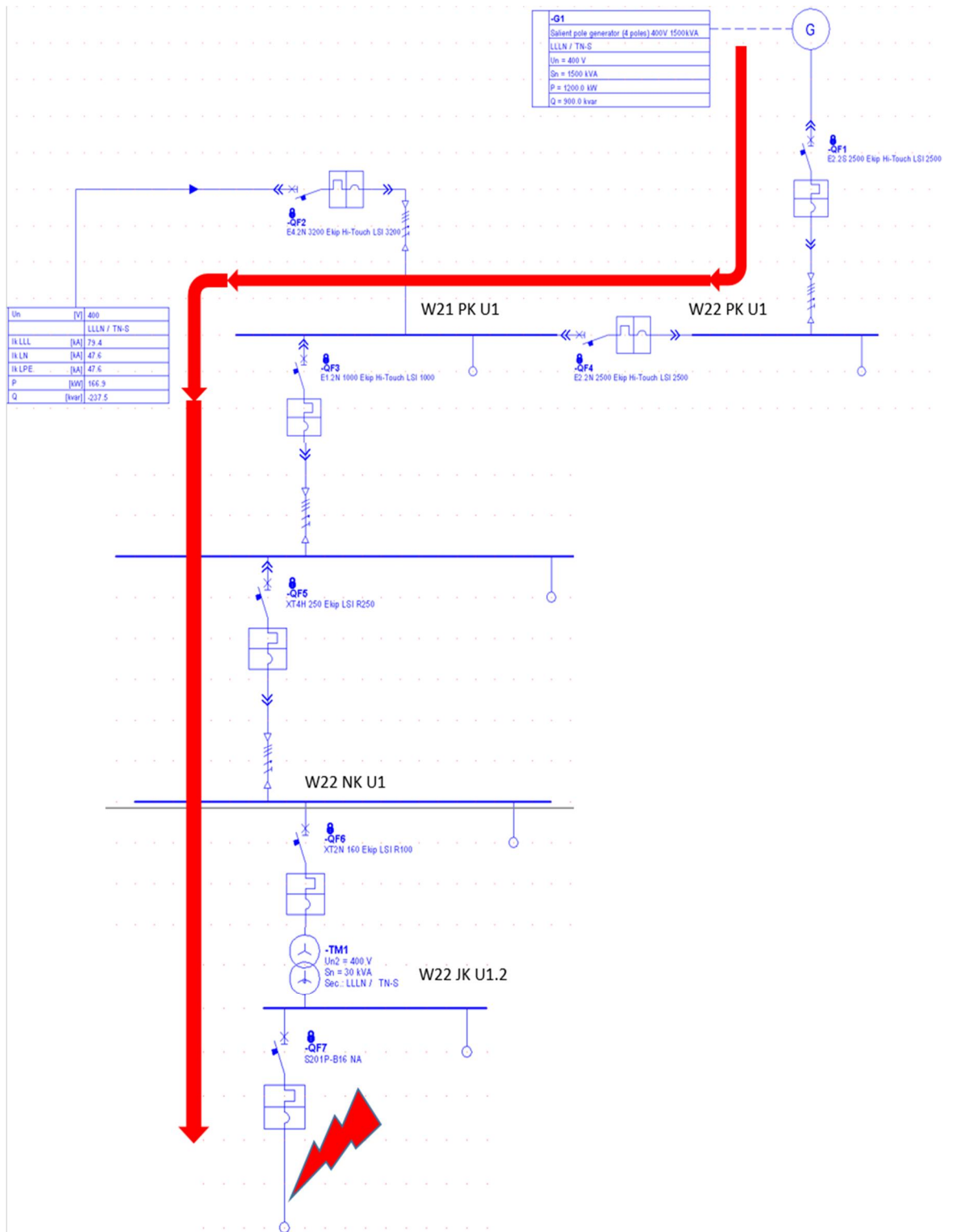
**-QF3, XT4H 250 Ekip LSI R250**  
 I1: 1.00  
 t1: 3s  
 S function on  $I^2t=k$   
 I2: 7.00

**-QF4, XT2N 160 Ekip LSI R100**  
 I1: 0.70  
 t1: 3s  
 S function on t=k  
 I2: 4.50  
 t2: 0.05s  
 I - off

**-QF5, S201P-B16 NA**  
 Rated voltage: 231 [V]  
 Circuit: LN  
 Distribution system: TNS  
 Ith: 16.00  
 Im: 80.00



Kaavio 11. Katkaisijoiden asettelut muuntajalta syötettäessä.



Kaavio 12. Oikosulku keskuksen W29 JK U1.21. UPS toisiopuolella generaattorin syöttäessä.



400 V

**-QF7, E2.2S 2500 Ekip Hi-Touch LSI 2500 (SET A)**

L: IEC60947-2

I1: 0.80

t1: 3s

S function on t=k

I2: 1.20

t2: 0.45s

I - off

**-QF6, E2.2N 2500 Ekip Hi Touch LSI 2500 (SET B)**

L: IEC60947-2

I1: 0.40

t1: 3s

S function on t=k

I2: 0.70

t2: 0.30s

I3: 2.30

INST 2 - off

**-QF2, E1.2N 1000 Ekip Touch LSI 1000 (SET B)**

L: IEC60947-2

I1: 0.55

t1: 3s

S function on t=k

I2: 1.20

t2: 0.16s

I3: 4.00

INST 2 - off

• **-QF3, XT4H 250 Ekip Hi Touch R250 (SET B)**

• I1: 1.00

• t1: 3s

• S function on t=k

• I2: 2.50

• t2: 0.1s

• I - off

• **-QF4, XT2N 160 Ekip Hi-Touch R100 (SET B)**

• I1: 0.70

• t1: 3s

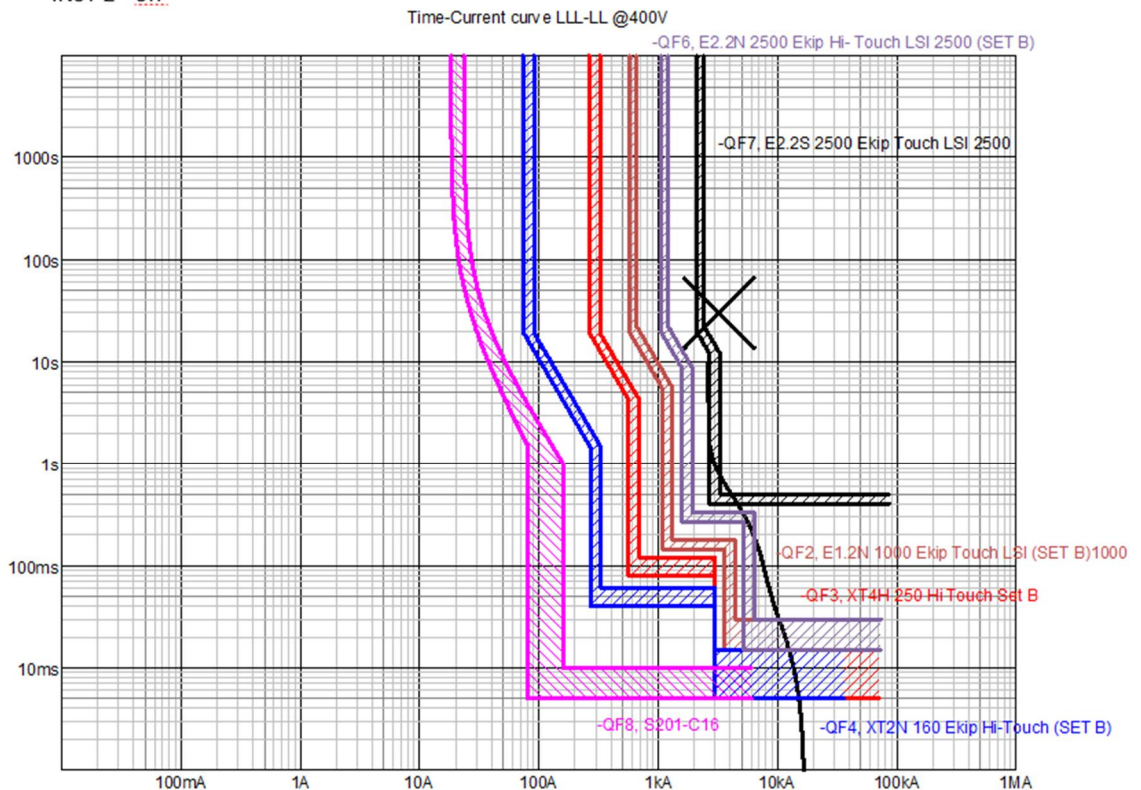
• S function on t=k

• I2: 3.00

• t2: 0.05s

• I - off

• INST 2 - off

• **-QF5, S201P-B16 NA**• I<sub>th</sub>: 16.00• I<sub>m</sub>: 80.00

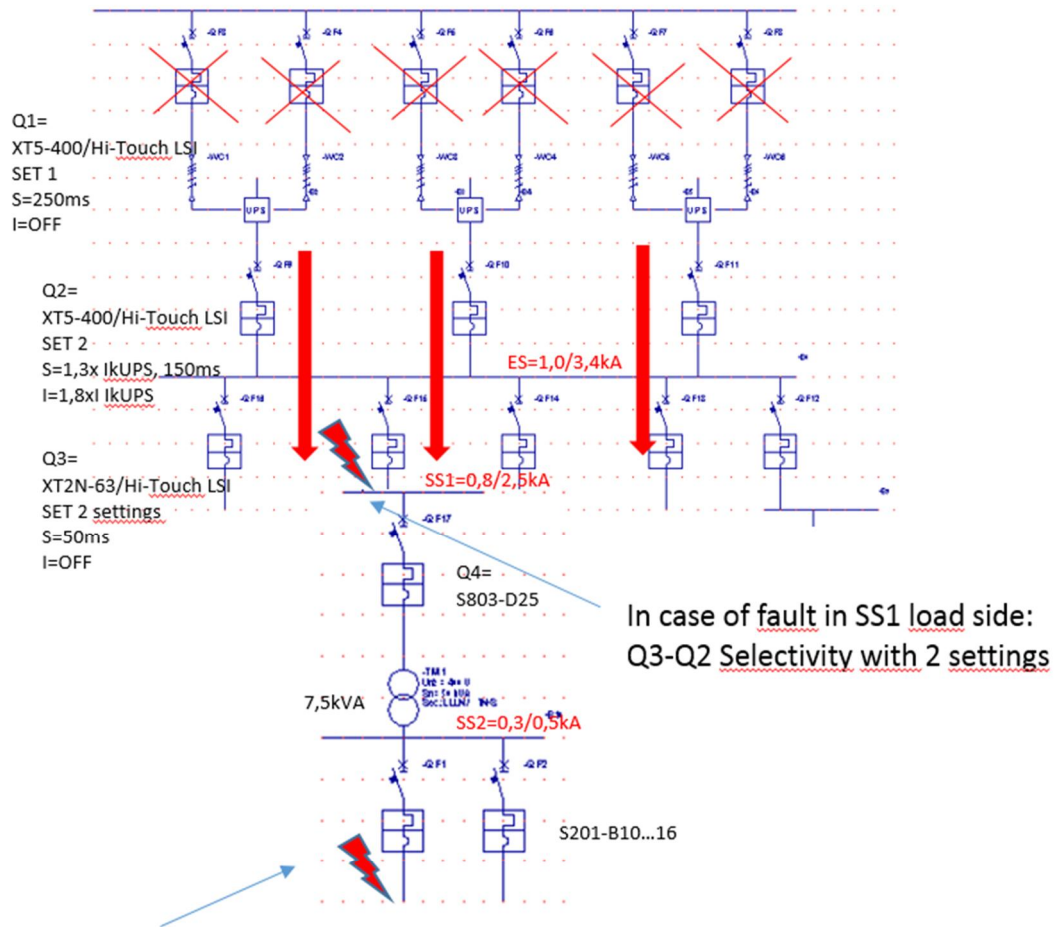
Kaavio 13. Katkaisijoiden asettelu generaattorilta syötettäessä.

Technology		MCCB																							
PR		Tmax XT																							
Series		XT2																							
Version		N,S,H,L,V					N,S,H,L,V																		
Relay		EL		TM		EL					TM														
Iu		160																							
Icu		36,50,70,85,100					36,50,70,120,150																		
In		125	160	125	160	10	25	63	100	160	12.5	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160			
B,C		Page 1 of 1																							
		0.5..4					T	T	T	T	T		T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
		6						T	T	T	T			5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	T	T	T	T		
		8						T	T	T	T				5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	T	T	T	T		
		10						T	T	T	T					3	3	3	4.5	7.5	7.5	T	T	T	
		13						T	T	T	T						3	3	4.5	7.5	7.5	T	T	T	
		16						T	T	T	T							3	4.5	5	7.5	T	T	T	
		20						T	T	T	T								3	5	6	T	T	T	
		25						T	T	T	T										5	6	T	T	T
		32						T	T	T	T										3	6	7.5	T	T
40									T	T											7.5	T	T		

Taulukko 6. Selektiivisyystaulukko Tmax XT2 – S200 johdonsuoja.

### Situation 2. feed from UPS

Proposal, 3 pcs (n pcs) UPS 200kVA in parallel  
With static switch

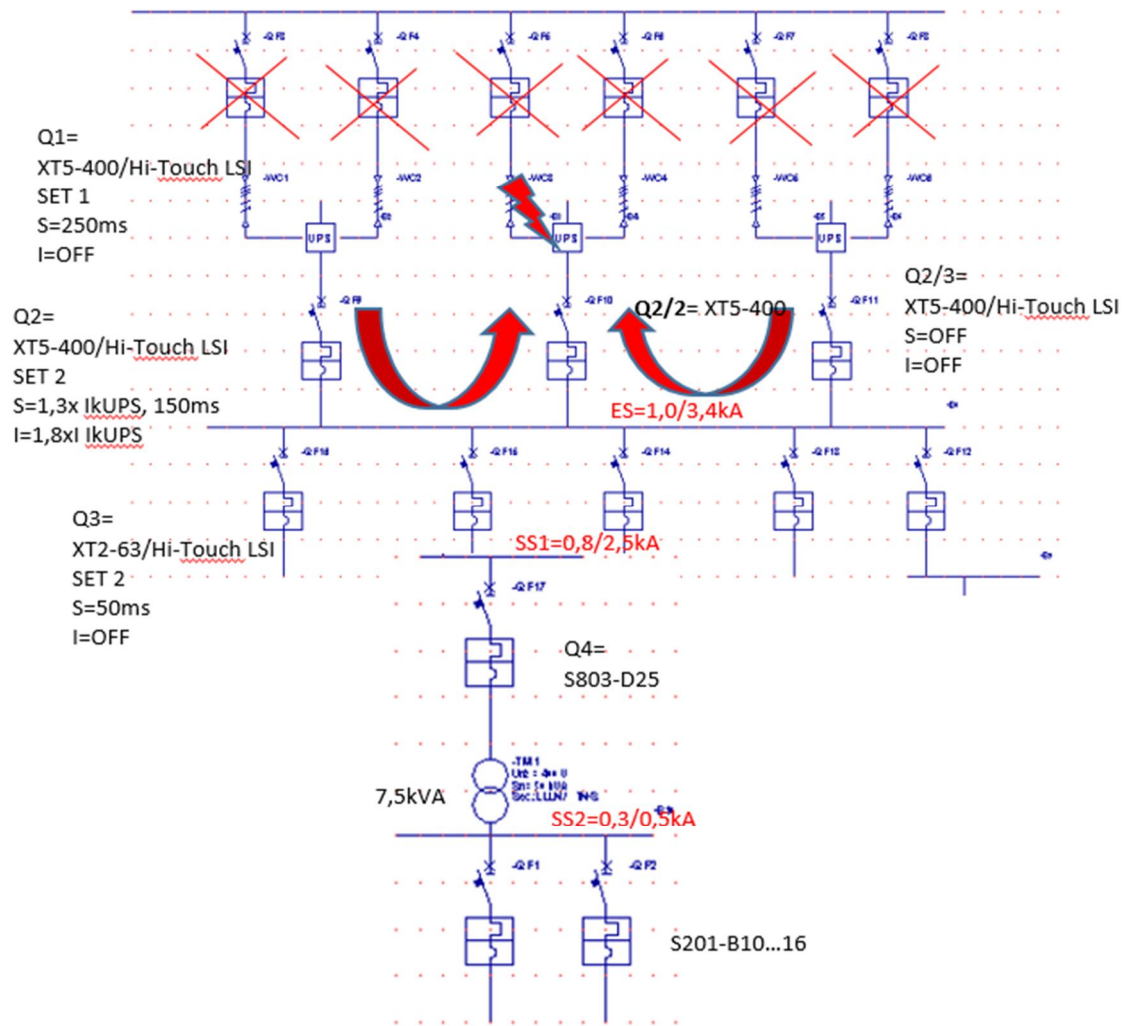


In case of fault in SS2 load side:  
S201 – Q4 Selectivity OK  
Q4 – Q3 Selectivity OK  
Q3-Q2 Selectivity with 2 settings

## Situation 2. feed from UPS

Proposal, 3 pcs (n pcs?) UPS 200kVA in parallel

With static switch



If fault in UPS =>

Q2 => SET2 settings

S=1,3x IkUPS, 150ms

I=1,8xI IkUPS

=> The middle CB will trip by I-protection (2xUPS feeding)

while left-right only 1 UPS feeding => no trip

Edellä olevista kaavioista (kaaviot 10-15) käy ilmi, että vaihdettaessa sulakkeiden tilalle XT-sarjan kompaktikatkaisijat, joihin ohjelmoidaan kaksi asetusarvo-settiä ja jotka voidaan lukita keskenään ohjelmallisesti, saavutetaan nopeampi oikosulkujen katkaisukyky.

Kaavioissa katkaisijat on merkitty Q-tunnuksella ja välitasot kuvaavat keskuksia. Punaisella on kuvattu oikosulkupiste ja tarvittaessa virran kulkusuunta. Kaavioihin on myös lisätty näkyviin taulukko selektiivisyydestä ja laukaisukäyrästöt.

Simuloinnissa ja kytkennöissä osoittautui, että kytkinvarokkeiden korvaaminen katkaisijoilla on ainoa tapa jolla rinnan syöttävät UPS-laitteet voidaan saada selektiiviseksi keskenään. Katkaisijoiden keskustellessa keskenään oikosulku ja virtapiirin katkeaminen voidaan rajoittaa vain yhteen haaraan.

Katkaisijoihin asetetaan portaittainen 50–150 ms hidastus UPS:n tai generaattorin syöttäessä ja 80–200 ms hidastus muuntajan syöttäessä. Lisäksi rinnansyöttävät katkaisijat lukitaan keskenään 100 ms. viiveellä. Tämän lisäksi niihin asetetaan valvonta, joka tunnistaa virran kulkusuunnan.

## 8 Tulokset ja yhteenveto

Tähän työhön valittua tutkimusongelmaa ei ole tutkittu juuri lainkaan, joka tekee siitä erinomaisen päättötyön aiheen. Nykyisen informaatioteknologian lisääntyessä ja energian säästön ollessa kaikkien huulilla, on varsinainen sähköverkko jäänyt kehityksessä paljolti 50-luvulle.

Rakennusautomaation, tietojärjestelmien, turvallisuusjärjestelmien, valaistusohjausten yms. valtava kehitys menee osin hukkaan, mikäli varsinainen syöttöverkko on pois käytöstä. Näin ollen on korkea aika kohdistaa kehitystä takaisin varsinaista energiaa kuljetetaan, mutta usein unohtuvaan sähköverkkoon, joka on kaikkien modernien tietoliikenne, ja ohjausjärjestelmien selkäranka tämänkin päivän rakennuksissa.

Aiemmin verkostoautomaatiota on sovellettu HUS:ssa vain keskijänniteverkkoon ja siinäkin vain katkaisijoiden yksinkertaiseen ohjaukseen auki ja kiinni. Kuitenkin rakennuksessa tai alueella kuten Meilahti, jossa sähkökatkoilla on merkitystä yhteiskunnan huoltovarmuuden kannalta ja katkoista voi syntyä vaaraa potilaille, on myös pienjänniteverkon toimittava luotettavasti.

Normaalitilanteessa keskusten komponenttien vaihto tarkoittaisi usean päivän katkosta keskuksen syöttämällä alueella. Meilahden sairaala-alueen tapauksessa tämä onnistuisi suhteellisen vaivattomasti, koska kaikkiin kojeistoihin, pääkeskuksiin, nousukeskuksiin ja ryhmäkeskuksiin on tehty varasyöttöyhteys toisen keskuksen kautta. Keskuksen syöttöpuolen keskus pystytään näin ollen kytkemään jännitteettömäksi vaihdon ajaksi ja syöttämään syötettävät keskuksat varavoimaverkon tai UPS -verkon keskuksen kautta.

Yleensä nousukeskuksia tai ryhmäkeskuksia ei ole suunniteltu kestäväksi prospektiivista oikosulkuvirtaa, vaan ne on mitoitettu etukojeella rajoitetuksi. Niinpä syötettävän etukojeen muuttuessa sulakkeesta katkaisijaksi oikosulku muuttuu rajoittamattomaksi, eli sen huippuarvo on paljon suurempi. Keskuksen komponenttien, kiskoston tai rungon oikosulkuvirtakestoisuuden parantaminen ei onnistu jälkeenpäin. Käytännössä siis kaikki ryhmä- ja nousukeskuksat olisi vaihdettava, mikä olisi itsessään mahdotonta jo pelkkien kustannusten ja sähkökatkosten vuoksi. Meilahden sairaala-alueella kaikki sähkökeskuksat on kuitenkin mitoitettu kestäväksi nimenomaan rajoittamaton oikosulkuvirta.

## 8.1 Selektiivisyys ja turvallisuus

Syöttävien sulakkeiden vaihtaminen kompaktikatkaisijoihin ja Goose -väylän tuonti paransi ja nopeutti oikosulkujen katkaisukykyä merkittävästi. Sulakkeisiin perustuvaan vaihtoehtoon nähden syötön automaattinen poiskytkentä nopeutui parhaimmillaan 3,3 sekunnista jopa 0,2 sekuntiin. Lisäksi verkon selektiivisyys parani selkeästi, kun virran suunta pystytään valvomaan, jolloin rinnakkain syöttävien lähtöjen välinen selektiivisyys on saavutettavissa. Lisäksi katkaisijoiden välinen keskinäinen lukitus varmistaa syötön jatkumisen vikatilanteessakin verkon vioittumattomiin osiin.

Verkostoautomaatio katkaisijoissa takaa myös selektiivisyyden toteutumisen ohjelmallisella aikahidastuksella verkon eri portaiden välillä ilman, että viivettä tarvitsee kasvat-  
taa tai ilman oikosulun keston pitenemistä. Koska oikosulkuvirrat ovat suuria syöttövirtoihin nähden, niissä on suuria termodynaamisia ja mekaanisia rasituksia. Näin ollen niiden nopea katkaiseminen säästää komponentteja ja keskuksen kiskostoa vaurioilta.

Käytönvalvonta ja vian määrittäminen paransi huomattavasti, kun järjestelmä tallentaisi sähköverkon tapahtumat tietokantaan. Tällöin vikakohtaan määrittäminen nopeutuisi ja helpottuisi, kun tiedetään vian tarkka kohta ja syntyhetki. Lisäksi viat, jotka eivät aiheuta sähkökatkoa tulisivat helpommin havaittaviksi. Leikkaussaleissa tai tehohoidossa vian määrittämiseen on käytettävissä rajallinen aika.

UPS-pääkeskuksen ensiöpuolen saaminen selektiiviseksi on mahdollista ainoastaan katkaisijoilla, joilla on keskinäinen lukitus eli käytännössä aikahidastus ja virran suunnan tunnistus. Rinnan syöttävien UPS-laitteiden hankinta ja varmuus nousee kyseenalaiseksi, mikäli ei voida taata niiden pystyvän syöttämään verkkoa huolimatta yhden vioittumisesta. Lisäksi kyseessä ovat varsin kalliit laitteet, jotka tarvitsevat erillisen tilavaruuden, jäähdytystä yms. tekniikkaa.

Lisäämällä katkaisijat pystyttäisiin myös lisäämään UPS-syöttöverkkoon nousukeskukset, jolloin verkkoon saataisiin normaaliin tapaan enemmän portaita ja erotuskohtia.

## 8.2 Toiminta ja käytettävyys

Erillisiä alijännitereleitä ei tarvita, koska katkaisijassa itsessään tietoisuus. Tällöin varavoiman ohjaus helpottuu. Tällöin ylimääräiset kaapeloinnit valvonta-alakeskusten ja keskusten välillä vähenevät ja erilaisten RAU-ohjelmien väliset integraatio-ongelmat poistuvat. Mittauksien kulkeminen samassa verkossa ohjausten kanssa myös selkeyttää urakkarajoja, kun kaikki kaapelointi, kytkentä ja käyttöönotto voidaan sisällyttää sähköurakkaan.

Koska muuntajasyötössä generaattorin syöttäessä tai UPS -laitteen syöttäessä on erisuuruinen syöttöteho, ei yksillä asetteluarvoilla säädetty katkaisija toimi kaikissa tilanteissa. Käytännössä siis suojarieleen virta- aikakestoisuutta on muutettava syöttötavan vaihtuessa. Tämä tehdään pyörittämällä suojarieleessä olevaa mittakiekkoa ruuvimeiselillä. Automaation lisäämisellä katkaisijoiden eri syöttötilanteiden asetellut voitaisiin tallentaa ja ottaa käyttöön automaattisesti oli käytössä sitten normaali-, varavoima- tai UPS-syöttötilanne. Tällöin kenenkään ei tarvitsisi fyysisesti käydä säätämässä releitä.

Erilliset energiamittaukset ja niiden väylät voitaisiin myös jättää pois, koska katkaisijoita ja niiden ethernet-yhteyksillä olisi suoraan saatavissa energian mittaustietoja. Tällöin julkisissa hankinnoissa ja kilpailutuksissa tulleet eri valmistajan mittarien välisiä kommunikaatio ja integraatio-ongelmia ei syntyisi.

Koska pääkeskukset, nousukeskukset ja pääkeskukset on kaikki suunniteltu ja mitoitettu kestävästi rajoittamaton oikosulkuvirta ja koska niissä kaikissa on varasyöttöyhteys, voidaan perustellusti esittää pääkeskusten ja nousukeskusten kytkinvarokelähtöjen korvaamista kompaktikatkaisijoilla.

Kun sulakkeiden virranrajoitus saataisiin eliminoitua verkosta, voitaisiin kaapeleiden mitoitus pienentää verkon kokonaisimpedanssin kärsimättä. Tämä puolestaan toisi isoja säästöjä rakennusvaiheessa.

Lisäksi riisutun verkostoautomaatiojärjestelmän (ABB:n Scada) infrastruktuurin ollessa jo alueella olemassa ja käytössä olisi automaation lisääminen katkaisijoille pienjänniteverkkoon helppo ja halpa toteuttaa. Valvomon, käyttöjärjestelmän ja ala-asemien ollessa kalleimmat ja tilaa vievimmat osat järjestelmää ei automaation vienti pienjännitepuolelle olisi kustannuksiltaan tavallista I/O-pistettä kalliimpaa.



## Lähteet

Lauri Aura & Antti Tonteri. 1993 Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY.

Lasse Autio, tuotepäällikkö. Haastattelu 3.2.2017. ABB Oy.

Communication functions with SACE Emax 2 circuit breakers. Esite. ABB 2017.

Communication interface for Emax 2 trip units. Esite. ABB 2018.

Pekka Heinonen, myyntipäällikkö. Haastattelu 20.5.2018. ABB Oy.

Juha Huurinainen. 2011. Keskijänniteverkon vikojen ja suojauksen simulointi. Joensuu: Pohjois-karjalan ammattikorkeakoulu.

Riku-Petteri Kivelä. 2014 Pienjännitekatkaisijan toiminnallisuus. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.

Kalevi Käyhkö, sähkön käytönjohtaja. Haastattelu 14.4.2017. HUS Oy.

Lauri Lehtomäki. 2014. Kennotermiinalin konfigurointi ja käyttöönotto. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Matti Lepistö. 2015. IEC 61850-standardin käyttö vesivoimalaitoksilla. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.

MicroSCADA Pro – Sähköverkon valvonta- ja ohjausjärjestelmä. Esite. ABB 2016.

Matias Mäkinen. 2013 Omicron CMC850- ja 356-testilaitteiden käyttöönotto ja simulointi. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.

Jorma Mörsky. 1992. Relesuojaustekniikka. Espoo: Otatieto.

Jari Nieminen, tuotepäällikkö. Haastattelu 11.9.2018. ABB Oy.

Joonas Saarela. 2011 Pienjännitekatkaisijoiden säätö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.

ABB:n TTT-käsikirja 2000 Sähköverkon hallinta kiinteistöissä. Esite. ABB 2016

VAMP 57 –monitoiminen suojarele. Esite. Schneider Electric 2015

Uuden sukupolven pienjännitekatkaisija energian hallintaan. Verkkodokumentti. ABB Oy: ABB:n tuotesivusto

<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/5bbeb618287e4b13c1257b7a003b2820.aspx>

## HUS Verkonohjauskaavio (SALATTU)





