

Juha Pitkänen

## **MUUNTAJAN SUOJARELEEN KOESTUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN**

# MUUNTAJAN SUOJARELEEN KOESTUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN

Juha Pitkänen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2022  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-  
ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

---

Tekijä: Juha Pitkänen

Opinnäytetyön nimi: Muuntajan suojarleen koestusohjelman kehittäminen

Työn ohjaajat: Heikki Kurki (OAMK), Tuomas Kekki (Enersense), Joonas Nokia (Enersense)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2022

Sivumäärä: 61

---

Tämä opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Enersense Oyj:n ja Oulun Ammattikorkeakoulun kanssa. Olen työskennellyt Enersensellä yhdeksän kuukautta järjestelmäkoestajana. Keskustelimme esimieheni Tuomas Kekin kanssa opinnäytetyöstä ja alkavista projekteista. Eräässä projektissa otettiin käyttöön uudentyyppinen differentiaalirele. Differentiaalireleelle ei ollut vielä valmista koestusohjelmaa, joten se sopi minulle hyvin opinnäytetyön aiheeksi.

Työn käytännön osuus koostuu differentiaalireleen koestusohjelman rakentamisesta ja kehittämisestä projektin testausprosessin aikana. Käytännön osuus noudattaa projektin testausaikataulua. Työn raportoinnin teoriaosuudessa käsitellään sähköasemia ja niiden komponentteja yleisellä tasolla, sekä perehdytään hieman syvemmin muuntajaan ja muuntajan suojaukseen.

Työn tuloksena Enersense Oyj sai käyttöönsä differentiaalireleen koestusohjelman. Koestusohjelma on helppokäyttöinen ja helposti uudelleenkäytettävissä. Koestusohjelmaa käytettiin työhön liittyvän projektin testausprosessissa ja se todettiin toimivaksi.

Työn tuloksena valmistunut koestusohjelma on määritelty luottamukselliseksi, joten sitä ei julkaista opinnäytetyön yhteydessä.

---

Asiasanat: Sähköasema, käyttöönotto, muuntaja, differentiaalisuoja

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Electrical Engineering

---

Author: Juha Pitkänen

Title of thesis: Development of Transformer Protection Relay Commission Procedure

Supervisors: Heikki Kurki (OAMK), Tuomas Kekki (Enersense), Joonas Nokia (Enersense)

Term and year when the thesis was submitted: spring 2022

Number of pages: 61

---

This thesis was done in collaboration with Enersense Oyj and Oulu University of Applied Sciences. I have worked for Enersense as a commissioning engineer for nine months. We discussed about my thesis and starting projects with my supervisor Tuomas Kekki. A new type of differential relay was used in one project. There was no test program for the differential relay yet, so it suited me well as the topic of my thesis.

The practical part of the work consists of building and developing a testing program for the differential relay during the testing process of the project. The practical part follows the testing schedule of the project. The theoretical part of the work report introduces substations and their components at a general level and goes a little deeper into transformer and transformer protection.

As a result of the work, Enersense received a test program for the differential relay. The test program is easy to use and easy to reuse. The testing program was used in the testing process of a thesis-related project and it worked well.

The test program was created but because it has been classified as confidential, it will not be published in connection with the thesis.

---

Keywords: Substation, commissioning, transformer, differential protection

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	ENERSENSE INTERNATIONAL OYJ .....	8
3	SUOMEN SÄHKÖVERKKO .....	9
3.1	Suomen sähköverkon rakenne .....	9
3.1.1	Kantaverkko .....	9
3.1.2	Alue- ja jakeluverkot .....	11
3.2	Sähköverkkoon liittyminen .....	11
4	SÄHKÖASEMA .....	13
4.1	Kiskostot .....	15
4.2	Katkaisijat .....	16
4.3	Erottimet .....	18
4.4	Mittamuuntajat .....	19
4.4.1	Jännitemuuntajat .....	20
4.4.2	Virtamuuntajat .....	21
4.5	Kompensointilaitteistot .....	23
4.6	Ylijännitesuojat .....	24
4.7	Asema-automaatio ja kaukokäyttö .....	26
4.8	Suojausjärjestelmä .....	27
4.9	Apusähkö- ja omakäyttöjärjestelmät .....	28
5	MUUNTAJA .....	30
5.1	Tehtävä .....	30
5.2	Toimintaperiaate .....	31
5.3	Kolmivaihemuuntajan rakenne .....	32
5.3.1	Kytkentäryhmät .....	34
5.3.2	Käämikytkin .....	35
5.3.3	Tähtipiste .....	35
5.3.4	Tertiääri .....	37
5.4	Jäähdytys .....	37
5.5	Kytkentäsysäsvirta ja yliaallot .....	38
6	MUUNTAJAN SUOJAUS .....	39
6.1	Sähköiset suojalaitteet .....	39

6.1.1	Differentiaalirele .....	40
6.1.2	Harmoninen salpa .....	42
6.1.3	Ylivirtarele .....	43
6.1.4	Distanssirele .....	44
6.1.5	Nollavirtarele .....	46
6.2	Mekaaniset suojalaitteet .....	47
6.2.1	Kaasurele .....	47
6.2.2	Virtaus- ja painerele .....	48
6.2.3	Öljyn lämpötila .....	48
6.2.4	Käämin lämpötila .....	48
6.2.5	Muut ei-sähköiset suojat .....	49
7	TESTAUS JA KÄYTTÖÖNOTTO .....	50
7.1	Määräykset ja vaatimukset .....	50
7.2	Testausprosessi .....	51
7.3	Käyttöönotto .....	52
8	TESTAUSLAITTEISTO .....	53
8.1	Omicron CMC-356-testilaite .....	53
8.2	Omicron test universe -ohjelma .....	54
9	KOESTUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN .....	55
10	POHDINTA .....	58
	LÄHTEET .....	59

# 1 JOHDANTO

Suomen sähköverkko ja energian tuotanto elävät tällä hetkellä suurta murroskautta. Energia-ala on keskeisessä asemassa ilmastonmuutoksen torjunnassa, joten globaalit ja kansalliset tavoitteet ja strategiat ilmaston lämpenemisen hidastamiseksi, päästöjen vähentämiseksi ja luonnonvarojen säästämiseksi pakottavat energia-alojen toimijat muutos- ja kehityspaineen alle.

Energiamurros näkyy sähköverkkoalalla suurien investointien ja kehityshankkeiden muodossa. Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj pyrkii vahvistamaan ja kehittämään Suomen kantaverkkoa, jotta energian tuotanto ja siirto tukisi ilmastotavoitteita. Fingrid investoi 2020 luvulla sähköverkkoon ennätyselliset kaksi miljardia euroa. Investointien tarkoituksena on mahdollistaa Suomeen rakennettavan uusiutuvan energian tuotannon liityntä kantaverkkoon, vahvistaa siirtoyhteyksiä valtakunnan rajoilla ja sisämaassa sekä varmistaa, että sähkön siirtoverkko ja koko järjestelmä täyttää sille asetetut vaatimukset nyt ja tulevaisuudessa. Investointiohjelma sisältää myös vanhojen sähköasemien ja voimajohtojen peruskorjauksia. (1.)

Eräessä hiljattain alkaneessa 400/110 kV:n muuntoasemaprojektissa toteutetaan muuntajan suojaus Siemensin Siprotec 5 -sarjan uudella differentiaalisuojalla. Uudelle suojalaitteelle ei vielä ole valmista testiohjelmaa rakennettuna, joten ohjelmalle on selkeä tarve. Keskustelimme esimieheni Tuomas Kekin kanssa aiheesta ja totesimme, että differentiaalireleen testausohjelman rakentaminen olisi hyvä opinnäytetyön aihe ja samalla minulle erittäin hyvä mahdollisuus syventää osaamistani ja kehittyä järjestelmäkoestajana.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää muuntajan suojareleelle koestusohjelma, joka on helpposti jatkokehitettävissä, selkeä ja helppolukuinen kaikille koestajille ja tilaajan tarkastajille, sekä testausprosessin ajankäytön kannalta optimoitu. Koestusohjelma rakennetaan Omicron test universe -ohjelmistolla. Testiohjelma jää luottamuksellista tietoa sisältävänä yrityksen sisäiseen käyttöön, eikä ohjelmaa tai sen tarkkaa rakentamista käsitellä tässä dokumentissa.

## 2 ENERSENSE INTERNATIONAL OYJ

Työn toimeksiantajana toimii Enersense Oyj. Enersense on vuonna 2005 perustettu yhtiö, joka on toiminut yli 40 maassa. Enersensen päätoimialat ovat teollisuus, rakentaminen, energia ja tietoliikenne. Yhtiön pyrkimyksenä on mahdollistaa em. alojen kansainvälisten yritysten menestyminen toimimalla ensisijaisena yhteistyökumppanina sekä olla mukana luomassa päästöttömiä ja kestäviä ratkaisuja, jotka johtavat kohti mahdollistamista päästöttöntä yhteiskuntaa.

Enersense yhdistyi vuonna 2020 yrityskaupan kautta Enersense-Empower konserniksi. Tämän konsernin pro forma -liikevaihto, eli yhdistetty liikevaihto, vuodelle 2020 oli noin 241 miljoonaa euroa. Yhtiö on listautunut julkisesti Helsingin pörssiin. Enersense jakautuu neljään liiketoiminta-alueeseen, jotka ovat Smart industry, Power, Connectivity ja International operations. Yhtiöllä on noin 2400 työntekijää. (2.)

Työskentelen yhtiössä järjestelmäkoestajana sähköasemat-yksikössä, joka kuuluu Power -liiketoimintaan. Sähköasemayksikkö toimii pääasiassa Suomessa sähköasemien rakentamisen, huollon ja kunnossapidon parissa. Työt ovat projektiluontoisia ja työkohteiden sijainti vaihtelee. Yksikkö toimittaa sähköasemia asiakkaille ns. avaimet käteen -palveluna. Asiakkaita ovat kantaverkkoyhtiöt, alueverkkoyhtiöt, energiayhtiöt ja teollisuus.

Koestajan työtehtäviin kuuluu toimitukseen kuuluvien sähkölaitteistojen toiminnan testaaminen ja niiden käyttöönotto sekä laitteiden konfigurointi- ja asettelutöitä. Projektit voivat olla esim. kokonaan uuden sähköaseman rakentaminen, vanhan käytössä olevan aseman saneeraus tai kunnossapitotyöt.



### **3 SUOMEN SÄHKÖVERKKO**

Suomen sähköverkko koostuu erilaisista osista, jotka asettavat toisilleen tietynlaisia vaatimuksia ja kehitystarpeita. Yhden sähköverkon osan kehittyminen tai muuttuminen pakottaa koko järjestelmän muutokseen ja adaptoitumaan. Sähköverkko elää siis jatkuvan kehityksen ja muutoksen armoilla. Muutosten suurimpia aiheuttajia ovat ilmastonmuutoksen ja energiamurroksen aikakauden aiheuttamat poliittiset ja strategiset päätökset. Energian kulutusta pyritään optimoimaan ja fossiilisia polttoaineita hyödyntäviä energiantuotantomuotoja vähennetään rajusti, samalla kun uusiutuvia energianlähteitä hyödyntäviä tuotantomuotoja pyritään lisäämään. Lisäksi sähköverkon ikääntyessä ja sähköverkkotekniikan kehittyessä eteen tulee myös välttämättömiä päivitys- sekä peruskorjaustarpeita.

#### **3.1 Suomen sähköverkon rakenne**

Suomen sähköverkon osia ovat kantaverkko, energiantuotanto, suurjännitteiset jakeluverkot, keskijännitejakeluverkot, pienjännitejakeluverkot sekä sähkön kuluttajat. Suomen sähköverkko kuuluu yhteispuhjoismaiseen sähköjärjestelmään yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Suomesta on sähkön siirtoyhteydet myös Venäjälle ja Viroon.

(3.)

##### **3.1.1 Kantaverkko**

Kantaverkko (kuva 1) on sähkönsiirron runkoverkko, johon liittyvät suuret energiantuotantolaitokset ja teollisuus sekä alueelliset jakeluverkot. Suomen kantaverkon valvonnasta, käytönsuunnittelusta, rakentamisesta, kehittämisestä sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistämisestä vastaa Fingrid Oyj. Kantaverkkoon kuuluu (1.1.2020): 110–400 kilovoltin voimajohtoja yhteensä noin 13 700 kilometriä, 116 sähköasemaa sekä HVDC-siirtokaapeleita (suurjännitteistä tasasähköä) noin 270 kilometriä. (3.) Fingridin hallinnoima kantaverkko mahdollistaa sähkön tuottajien ja kuluttajien välisen kaupankäynnin valtakunnallisella tasolla sekä valtakunnan rajat ylittävällä tasolla. Suurin osa suomessa kulutetusta ja tuotetusta sähköstä siirretään kantaverkon kautta.



KUVA 1. Kantaverkko kartalla (4)

Fingrid investoi kantaverkkoon vuosina 2020–2030 noin kaksi miljardia euroa. Investoinnit pohjautuvat valtakunnallisiin pitkän aikavälin ilmasto- ja energiatavoitteisiin, joilla pyritään vähentämään päästöjä, pienentämään sähkön tuontiriippuvuutta ja korvaamaan fossiilisia energiantuotantomuotoja, sekä parantamaan sähköverkon toimintavarmuutta. (3.)

Suomen kantaverkko on toteutettu pääasiassa ilmajohtoilla, koska maakaapelointi olisi liian kallista ja aiheuttaisi turvallisuuden kannalta suuren määrän maa-alueita koskevia rajoittavia toimenpiteitä kaapelointien läheisyydessä. Kantaverkon jännitetasot ovat 110 kilovoltista 400 kilovolttiin saakka, koska suurjännitteellä siirtohäviöt saadaan minimoitua. Tällä hetkellä kantaverkkoa vahvistetaan ja siirtoyhteyksiä lisätään johtuen suurista investoinneista mm. tuulivoimatuotantoon ja uusiutuvaan energiaan ympäri Suomea. Myös energian kulutuksen ja tuotannon sijainti vaikuttaa kantaverkon rakenteeseen. Kulutuksen ollessa kaukana tuotannosta siirtoyhteyksien tulee olla vahvat, jotta saavutetaan riittävä toimintavarmuus ja matalat siirtohäviöt.

### **3.1.2 Alue- ja jakeluverkot**

Kantaverkkoon kuulumattomat 110 kV voimajohtot muodostavat suurjännitteisen jakeluverkon, jota kutsutaan myös alueverkoksi (5). Alle 110 kV sähköverkot, jotka eivät kuulu kantaverkkoon tai alueverkkoihin, ovat keski- tai pienjännitejakeluverkkoja. Suomessa jakeluverkkoja hallinnoivat jakeluverkonhaltijat, joiden verkkoluvassa on määrätty maantieteellinen vastuualue. Koko Suomen maantieteellinen pinta-ala on jaettu eri jakeluverkkoyhtiöiden ei-päällekkäisiin vastuualueisiin. Vastuualueellaan jakeluverkkoyhtiöllä on yksinoikeus harjoittaa sähkönjakelutoimintaa. Jakeluverkko ja kantaverkko voivat toimia maantieteellisellä alueella päällekkäisesti, koska ne toimivat pääsääntöisesti eri jännitetasoilla ja toteuttavat eri tehtäviä. (6.) Sähköverkkotoiminta on luvanvaraista toimintaa. Kaikki Suomessa toimivat verkkoyhtiöt ovat kirjattuna energiaviraston ylläpitämässä rekisterissä.

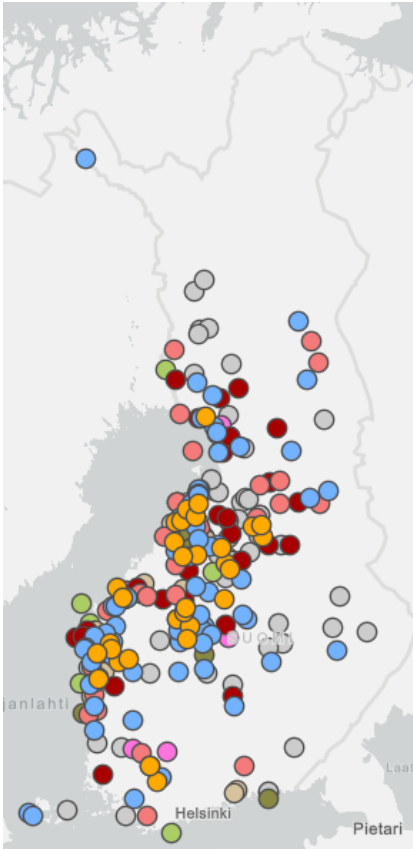
## **3.2 Sähköverkkoon liittyminen**

Sähköverkkoon liittamisestä on kirjoitettu energiaviraston internet-sivuilla seuraavasti:

”Sähköverkonhaltijalla on velvollisuus liittää pyynnöstä kaikki toiminta-alueensa halukkaat verkon käyttäjät verkkoonsa. Liittämisvelvollisuus koskee sekä uuden sähkönkäyttöpaikan tai voimalaitoksen liittämistä ja sovitun siirtotehon muutosta olemassa olevassa liittymässä.” (7.)

Tästä on Euroopan komissio antanut kolme erillistä verkkoliitäntävaatimuksia koskevaa verkkosäätöä. Vaatimukset koskevat tuotantolaitosten, kulutuksen ja suurjännitteisten tasasähköjärjestelmien liittämistä sähköverkkoon. Nämä kolme yhtenäistä säätöä varmistavat selkeän oikeudellisen asetelman verkkoliitäntöille, Euroopan unionin laajuisen sähkökaupan helppouden, käytövarmuuden, uusiutuvien energialähteiden helpon liittymän verkkoon, kilpailumahdollisuuden ja sähköverkon ja resurssien tehokkaamman käytön kuluttajien hyödyksi.

Verkkoon liittämisestä annetut säännökset ovat osaltaan vaikuttaneet energiamurrokseen. Säännösten vuoksi verkonhaltijoilla ja kantaverkon haltijalla on käynnissä useita sähköasema- ja voimajohtoprojekteja ympäri Suomea, jotta kaikki rakenteilla oleva uusiutuva energiantuotanto saadaan yhdenvertaisesti liitettyä verkkoon. Verkkoon liittyjiä on tulevina vuosina useita, koska pelkästään tuulivoimarakentaminen on lisääntynyt Suomessa viime vuosina rajusti. Kuvassa 2 on esitettyinä kaikki Suomessa syksyllä 2021 esisuunnittelussa, kaavoituksessa, lupamenettelyssä tai rakenteilla olevat tuulivoimalahankkeet. Voimalahankkeiden toteutuessa ne liittyvät sähköverkkoon ja aiheuttavat muutostöitä paikallisen jakeluverkon- tai kantaverkonhaltijan sähköasemilla ja voimajohtoilla. Suomen sähköverkko on siis suuren muutospaineen alla ja kehittyy jatkuvasti.



KUVA 2. Kaikki Suomessa käynnissä olevat tuulivoimalahankkeet (8)

## 4 SÄHKÖASEMA

Tässä luvussa käsitellään sähköaseman komponentteja ja suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä yleisellä tasolla syventymättä yksittäiseen osa-alueeseen enempää. Sähköaseman muuntajia sekä muuntajan suojalaitteita käsitellään tarkemmin luvuissa 5 ja 6.

Sähköasema on sähkön siirto- tai jakeluverkon osa, jossa voidaan suorittaa kytkentätoimenpiteitä, muuntaa jännitetasoa, liittää verkkoon energian tuotantoa tai kulutusta sekä keskittää tai jakaa sähköenergian siirtoa eri liityntähaaroille (9, s.76). Sähköaseman rakenteeseen vaikuttaa olennaisesti sähköaseman tehtävä osana sähköverkkoa, pienimmät liityntäasemat voivat koostua vain muutamasta johtolähdöstä. Suurimmat muuntoasemat voivat sisältää useita suurjännitemuuntajia, useamman jännitetason kenttiä ja kiskostoja sekä kondensaattoriyksiköitä ja reaktoreja. Sähköaseman tärkeimpiin komponentteihin kuuluvat edellä mainittujen osien lisäksi katkaisijat, erottimet ja mittamuuntajat. Suomessa on käytössä pääasiassa kahdentyyppisiä sähköasemia, nämä ovat kaasueristeinen sähköasema GIS (Gas Insulated Substation) (kuva 3) sekä ilmaeristeinen sähköasema AIS (Air Insulated Substation) (kuva 4). Ilmaeristeiset sähköasemat on yleensä sijoitettu taivasalle ja ne vievät enemmän tilaa. Kaasueristeisen aseman komponentit on sijoitettu eristekäskulla paineistettuihin suljettuihin kammioihin. Kaasueristeiset sähköasemat voidaan sijoittaa sisätiloihin ja ne vievät vähemmän tilaa, koska eristekäsku mahdollistaa pienemmät jännitteisten osien minimietäisyydet.

Sähköaseman suunnittelu on monimutkainen prosessi. Suunnittelussa on huomioitava lukuisia asioita, jotta asema palvelee käyttötarkoitustaan mahdollisimman täydellisesti. Tärkeitä asioita suunnittelussa ovat muun muassa:

- aseman välittämä teho ja tehon kasvun ennuste
- sijaintipaikka
- taloudellisuus
- muuntajien lukumäärä
- rakennusmateriaalin kuljetusmahdollisuudet
- voimajohtojärjestelyt asemaliitynnöissä
- laajennettavuus
- mitoitusvirrat ja oikosulkukestoisuus
- kiskostojärjestelmät

- luotettavuus ja käyttövarmuusvaatimukset
- jännitetasot
- yksittäisten kojeiden ja laitteiden mitoitus
- tietoliikenneyhteydet
- omakäytösähkön tarpeet
- paloturvallisuus. (9, s. 96–97.)

Lisäksi suunnitteluun vaikuttavat ympäristö ja olosuhteet. Haastavimpia suunnittelukohteita ovat vanhojen sähköasemien perusparannustyöt, sillä työt joudutaan tekemään ilman suuria käyttökeskeytyksiä. Saneeraustöissä tulee jo suunnitteluvaiheessa keskittyä erityisesti turvallisuuteen.



KUVA 3. Kaasueristeisen sähköaseman (GIS) rakenteita (10)



KUVA 4. Ilmaeristeisen sähköaseman (AIS) rakenteita (10)

## 4.1 Kiskostot

Sähköaseman kokoojakiskoston tehtävänä on mahdollistaa erilaiset kytkentäratkaisut erilaisissa käyttötilanteissa. Pääkiskoksi kutsutaan kiskoa, johon liitytään katkaisijalla. Apukiskoon liitytään pelkästään erottimella. Sähköaseman kiskojärjestelmän valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

- liittyvät johdot ja muuntajat sekä niiden lukumäärä
- mahdollisuus suorittaa kytkentöjä
- mahdollisuus ja tarve huolto- ja korjaustöille joko keskeytyksellä tai ilman sitä
- kuormitusten ryhmittelytarpeet
- aseman luotettavuus ja käytettävyyksivaatimukset
- yksinkertaisuus
- kiskovian aiheuttama käyttökato
- tilan tarve, resurssit ja kustannukset. (9, s.102.)

Kiskojärjestelmiä on useita ja eri käyttötarkoituksiin. Esittelen tässä kappaleessa Suomessa yleisesti 400 kV sähköasemilla käytetyn kaksikatkaisija- eli duplex -järjestelmän. Muita kiskojärjestelmien yleisimpiä perustyyppisiä ei tässä käydä tarkemmin läpi, mutta niitä ovat muun muassa:

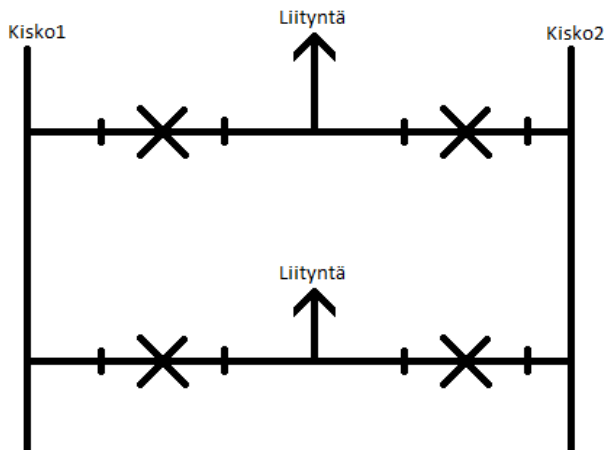
- kiskoton järjestelmä
- yksikiskojärjestelmä
- yksikisko-apukiskojärjestelmä
- kaksoiskiskojärjestelmä
- kaksoiskisko-apukiskojärjestelmä
- 1 ½ -katkaisijajärjestelmä
- rengaskiskojärjestelmä. (9, s. 102.)

**Duplex-järjestelmän** suurimpia etuja ovat:

- käyttö- ja huoltotilanteiden järjestämisen yksinkertaisuus
- laajennettavuus
- käytön jaon helppous
- yksinkertaisempi relesuojauksen toteutus, koska apukiskoa tai kiskokatkaisijaa ei tarvita.

Duplex-järjestelmä (kuva 5) on kuitenkin muihin järjestelmiin verrattuna kallis, koska virtamuuntajia ja katkaisijoita tarvitaan enemmän. Vähemmän tärkeiden kuormitusten liittämällä eri kiskoihin tai

vain toiseen kiskoista, virtamuuntajien sijoittelulla ja erotinlaitteiden karsimisella saadaan hankintahintaa alemmas, mutta samalla käyttövarmuus heikkenee. Em. halvempi toteutustapa on ns. ”riisuttu duplex”. (9, s. 102.)



KUVA 5. Duplex-kiskojärjestelmä

## 4.2 Katkaisijat

Katkaisija on sähköaseman peruskomponentti. Katkaisijan tehtävänä on muuttaa tarvittaessa verkon kytkentätilannetta ja ohjata näin tehon kulkua verkossa, erottaa viallinen osa verkosta ja toimia erotuskohtana eri verkon osien välillä (9, s. 161). Katkaisija on kytkinlaite, jonka voi avata ja sulkea kuormitettuna. Katkaisijan on kyettävä katkaisemaan vaurioitumatta suurimmatkin verkossa esiintyvät virrat.

Katkaisijoita voidaan ohjata sekä käsin että automaattikalla. Tyypillinen katkaisijan automaattinen ohjaus tapahtuu oikosulku- tai maasulkutilanteessa suojalaitteen ylivirtahavahtumisen aiheuttaman laukaisun seurauksena. Mittamuuntajiin kytketty suojalaite lähettää tällöin mittaamiensa suureiden ja laskutoimituksilla havaitun vian perusteella avauskäskyn katkaisijalle. Toteutustavasta riippuen vian jälkeen saattaa tapahtua automaattinen kiinniohjaus jälleenkytkentäfunktion aikaansaamana.

Avaustilanteissa katkaisijan avautuvien koskettimien välille syttyy valokaari. Valokaaren sammumiseksi on katkaisijan rakenteen oltava sellainen, että kytkentä tapahtuu kammiossa, jossa on väliaine. Väliaine osallistuu valokaaren sammuttamiseen sekä joissain katkaisijatyypeissä myös katkaisukohdan jännitteisten osien eristämiseen katkaisijan muista osista. Katkaisijat voidaan väliaineen perusteella luokitella mm. seuraaviin ryhmiin:



- ilmakatkaisijat
- öljykatkaisijat
- paineilmakatkaisijat
- kaasukatkaisijat esim.  $SF_6$
- tyhjiökatkaisijat. (9, s. 161–169.)

Toinen mahdollinen luokittelutapa katkaisijoille on katkaisukammion potentiaaliero maahan nähden. Niin sanotussa Live tank -katkaisijassa (kuva 6) kammio on suurjännitteen määräämässä potentiaalissa ja Dead tank -katkaisijassa (kuva 7) kammio on maan potentiaalissa. Dead tank -katkaisijan etuna on virtamuuntajan liittäminen suoraan katkaisijan rakenteeseen, joten erillisiä virtamuuntajia ei tarvitse asentaa ja säästetään kustannuksissa. (9, s. 169.)



KUVA 6. Live tank katkaisija (11)



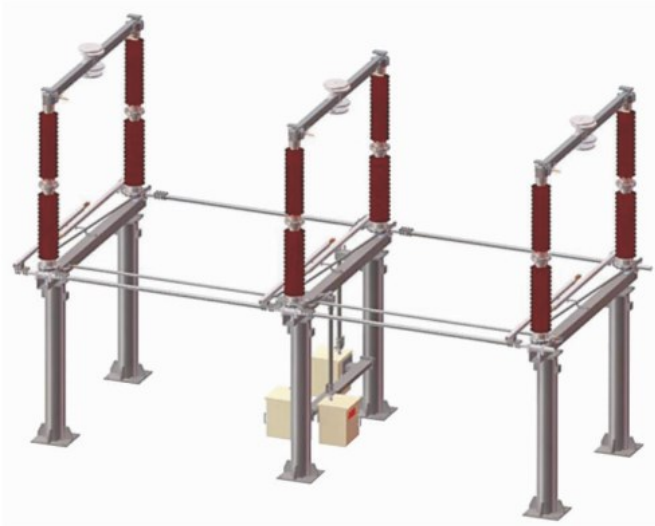
*KUVA 7. Dead tank katkaisija (12)*

### **4.3 Erottimet**

Erottimen tehtävä kytkinlaitteena on muodostaa turvallinen ja riittävän suuri avausväli erotettavan virtapiiriin ja muun laitteiston välille tai saada virtapiiristä tietty osa jännitteettömäksi turvallista työkentelyä varten. Erottimen avausvälin on oltava luotettava. Edellytyksenä on, että avausväli on oltava silmännähtävissä tai erottimessa on oltava mekaanisesti erotinlaitteistoon liitetty luotettava asennonosoitin. Lisäksi erottimen avausvälin tulee jännitelujuudeltaan olla suurempi kuin ympäröivän eristyksen jännitelujuus. (9, s. 190–198.) Erotinta ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiirin avaamiseen tai sulkemiseen, eikä erottimilta vaadita virrankatkaisu tai -sulkemiskykyä. Käytännössä erottimella voidaan kuitenkin erottaa mm. muuntajan tyhjäkäyntivirta. Erotin on oltava lukittavissa kiinni ja auki asentoihin, jotta tahattomat vaaraa aiheuttavat ohjaukset estetään.

Maadoituserottimia käytetään estämään vikavirtojen ja indusoituneiden jännitteiden vaaroja asemilla ja voimajohdoilla työskenneltäessä. Maadoituserotin kytkee halutun verkon osan maapotentiaaliin ja estää yhdessä työmaadoituksen kanssa oikein suunnitellussa ja toteutetussa huolto-, korjaus- tai rakennustyössä mahdolliset vaaratilanteet.

Suomessa sähköasemilla yleisesti käytettyjä erottimia maadoituserottimien lisäksi ovat ns. kieroerotin (kuva 8) ja tartuntaerotin (kuva 9). Lisäksi mainittakoon kuormanerotin, jolla voi avata ja sulkea pieniä kuormitusvirtoja. Katkaisijoille, erottimille ja muille kytkinlaitteille on laadittu kansainvälinen standardisarja IEC 62271. (9, s. 190–198.)



KUVA 8. Kierroerotin (13)



KUVA 9. Tartuntaerotin (14)

#### 4.4 Mittamuuntajat

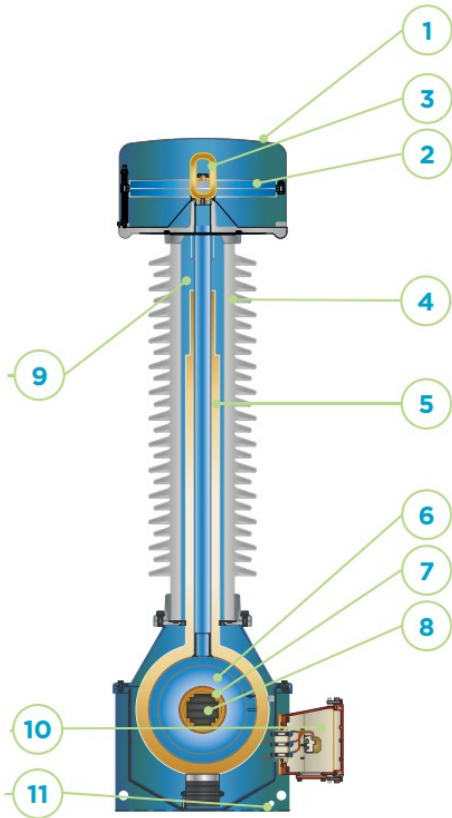
Mittamuuntajat ovat muuntajia, jotka on tarkoitettu virtojen ja jännitteiden mittaukseen. Mittamuuntajat erottavat mittauspiirin galvaanisesti suurjännitteisestä päävirtapiiristä, muuttavat mitattavan suureen mittausalaa mahdollistaen mittalaitteiden helpomman standardoinnin tietyille arvoille, suojaavat mitta- ja suojalaitteita suurilta virroilta ja ylikuormalta sekä mahdollistavat mitta- ja suojalaitteiden sijoittamisen kauemmaksi mitattavasta kohteesta. Sähköasemilla suurjännitteiset mittamuuntajat sijaitsevat tyypillisesti ulkona (GIS-laitoksissa sisällä) ja suojalaitteet asemarakennuksessa tai erillisessä tilassa. Mittamuuntajat muuntavat jännitteet ja virrat suojarelleille ja mittalaitteille soveltuvaan suuruuteen. Standardisarja IEC 60044 käsittelee mittamuuntajia.

Mittamuuntajan tehtävä on toistaa mitattua virta tai jännite mahdollisimman virheettömästi. Käytännössä mittamuuntajissa syntyy virhetulosta tyhjäkäyntivirroista ja käämitysten hajaimpedansseista. Nämä aiheuttavat virhettä jännitteissä ja virroissa sekä niiden kulmissa. (9, s. 198.)

#### 4.4.1 Jännitemuuntajat

Jännitemuuntajan ominaisarvot ja vaatimukset on esitetty standardissa IEC 60044-2 ja teknillisessä spesifikaatiossa IEC 60044-5. Em. asiakirjoissa asetetaan vaatimukset kaikille jännitemuuntajille sekä erityisesti suojaustarkoitukseen ja mittaustarkoitukseen käytettäville jännitemuuntajille. Vaatimuksista mittauksen kannalta tärkeimpiä ovat jännitteen ja sen vaihekulman mittaustarkkuutta koskevat vaatimukset. Jännitemuuntajan pitää pystyä mittaamaan jännite vaaditulla tarkkuudella standardissa määritellyissä rajoissa, vaikka ensiöjännite nousee tai laskee nimellisjännitetasosta. Jännitemuuntajan pääasiallinen tehtävä on muuntaa ensiöpiirin jännite toisilaitteille, eli suoja- ja mittauslaitteille, sopivaksi. Jännitemuuntajan muuntosuhde voi olla esimerkiksi  $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{3}$  kV, missä ensiöjännite on 400 kV ja toisiojännite 100 V jännitemuuntajan käämien ollessa kytkettynä vaiheen ja maan välille. (9, s. 215–223.)

Jännitemuuntajat voivat olla toimintaperiaatteeltaan induktiivisia tai kapasitiivisia. Jännitemuuntajat rakennetaan yleensä yksivaiheisina. Induktiivisia jännitemuuntajia käytetään yleensä alle 245 kV käyttöjännitteillä, tätä suuremmilla jännitteillä kapasitiiviset jännitemuuntajat ovat yleensä edullisempia toteuttaa (9, s. 217).



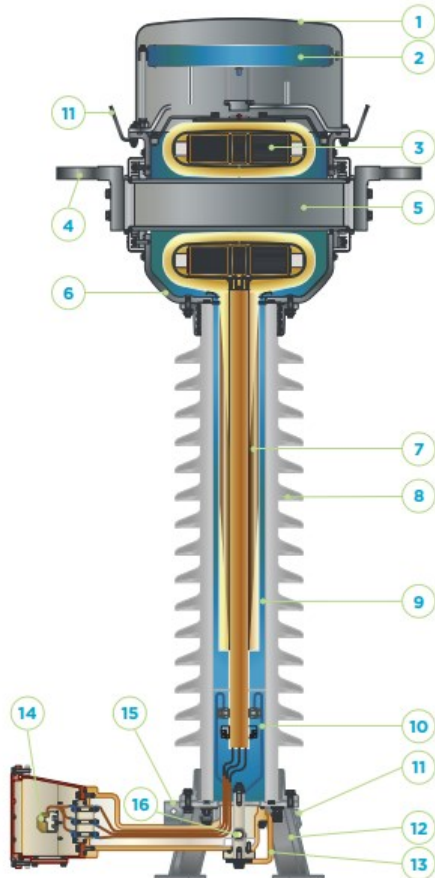
KUVA 10. Induktiivinen jännitemuuntaja. 1) paisuntatila, 2) öljytilavuuden kompensointilaite, 3) öljyn korkeuden osoitin, 4) eristin, 5) ensiöjohtimen kapasitiivinen eristys, 6) ensiökäämitys, 7) toisiökäämitys, 8) rautasydän, 9) eristävä öljy, 10) toisioliitinkotelo, 11) maadoituspiste. (15.)

#### 4.4.2 Virtamuuntajat

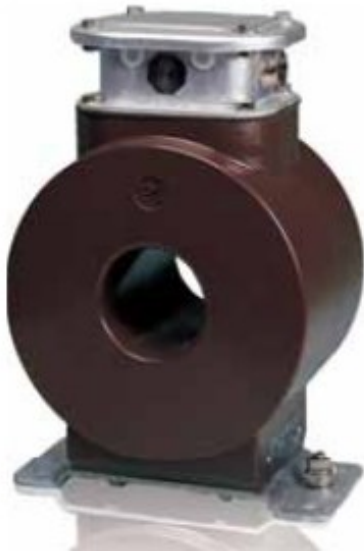
Virtamuuntajien ominaisarvot on määritelty standardissa IEC 60044-1. Virtamuuntajat on standardissa jaettu käyttötarkoituksensa mukaan samalla tavalla kuin jännitemuuntajat, eli *mittaustarkoituksiin* ja *suojaustarkoituksiin* valmistettuihin virtamuuntajiin. Käyttötarkoitustensa eroavaisuuksien vuoksi suojaus- ja mittausvirtamuuntajat eroavat toisistaan vaatimuksiltaan ja mitoituksiltaan. (9, s. 198.)

Virtamuuntaja muuntaa ensiövirran suoja- tai mittalaitteelle sopivaksi. Sähköverkossa esiintyvät vikavirrat saattavat kasvaa normaaliin nimelliskuormitusvirtaan verrattuna moninkertaisiksi. Suojausvirtamuuntajan on kyettävä säilyttämään riittävä tarkkuus suurillakin virran vaihteluilla. Nykykäsillä sähköasemilla toisilaitteille valitaan tyypillisesti toisionimellisvirraltaan 1 A tai 5 A virtamuuntaja.

Nykyaikaisissa virtamuuntajissa voi olla useampia mittaus- ja suojaussydämiä. Joissain virtamuuntajatyypeissä voi olla lisäksi saatavilla kapasitiivinen jännitemittaus, jota voi hyödyntää mm. tahdistukseen tai tyhjäkäyvän muuntajan tai johtolähdön jännitemittauksena, mikäli erillisiä jännitemuuntajia ei ole. Ilmaeristeisillä sähköasemilla käytetään Suomessa yleisesti kuvan 11 kaltaisia suurjännitevirtamuuntajia. Kuvassa 12 on esitetty kaapelivirtamuuntaja.



KUVA 11. 1) paisuntatila, 2) öljytilavuuden kompensointilaite, 3) sydämet ja toisiokäämitys, 4) ensiöliitin, 5) ensiökäämitys, 7) ensiöjohtimen kapasitiivinen eristys, 8) eristin, 9) eristävä öljy, 10) vahvistettu maadoitusliitintä, 11) nostoreijät, 12) jalka, 13) tangent delta liitin, 14) toisiliitinkotelo, 15) maadoituspiste, 16) öljynäyteventtiili. (16.)



*KUVA 12. Artechin valmistama kaapelivirtamuuntaja (17)*

Virtamuuntajan toisiopiiriä ei saa käyttö- tai testitilanteessa koskaan avata. Virtamuuntajan toisiossa esiintyvä jännite on normaalissa suljetussa virtapiirissä alhainen. Jos toisiossa avaa, ensiövirta magnetoi sydämen, joka voi kyllästyä todella nopeasti. Avoimien toisioliittimien välinen jännite voi nousta laitteille ja ihmisille erittäin vaarallisiin arvoihin, jopa kilovoltteihin. Tästä syystä toisiopiiriä ei saa missään tilanteessa avata, eikä sinne saa asentaa varokkeita. Käyttämättömät virtamuuntajan toisiosydämet tulee oikosulkea navoistaan ja maadoittaa turvallisuuden varmistamiseksi. (9, s. 198–215.)

#### **4.5 Kompensointilaitteistot**

Sähköverkoston tulee palvella varmatoimisesti määrätyissä taajuus- ja jänniterajoissa. Suuria taajuus- tai jännitekuoppia tai -piikkejä ei sallita, ja ne tulee säätää tai vikatilanteessa kytkeä kokonaan irti verkosta. Jännitettä voidaan säätää loistehon avulla ja taajuutta verkkoon kytkettyjen laitteiden pätötehoa säätämällä. Johtuen sähköteknisen fysiikan lainalaisuuksista sähköverkossa vallitsee jatkuva tuotetun ja kulutetun tehon tasapaino. Tämä koskee pätötehoa ja loistehoa.

Verkon taajuutta säädetään käytännössä säätämällä verkon pätötehoa esimerkiksi voimalaitoksilla generaattorisäädöissä. Kun verkon ottama pätöteho kasvaa suuremmaksi kuin tuotanto, kuormitus ottaa tehonsa tahtigeneraattorin pyöriä osien liike-energiasta ja generaattorin taajuus laskee.

Yliuotannossa ilmiö on päinvastainen. Suomessa on käytössä käyttö- ja häiriöreservit, jotka taajuuden muutostilanteissa aktivoituvat ja pyrkivät säätämään verkon taajuuden 50 Hz nimellistaajuuteen. (18, s. 347–364.)

Loistehon tuotantoon jakeluverkoissa käytetään yleensä rinnakkaiskondensaattoreita. Kantaverkossa ja voimansiirtoverkoissa tasapainon ylläpitoon tarvitaan kondensaattoreiden lisäksi reaktoreita.

**Reaktori** on yleensä ilmasydäminen, ilmajähdytteinen, kiinteäeristeinen laite. Suomessa on myös käytössä muutamia öljyeristeisiä reaktoreja. Reaktorit kytketään kantaverkossa kolmivaiheisena tyyppillisesti 400/110/20 kV muuntajan 20 kV tertiäärikäämiin. Reaktorit asennetaan tasakyllisen kolmion kärkiin samaan tasoon, jotta saavutetaan mahdollisimman tasainen reaktori-impedanssi ja sähkömagneettisten kenttien leviäminen saadaan minimoitua. Reaktorit kompensoivat 400 kV verkon siirtojohtojen kehittämää loistehoa. Pitkä 400 kV siirtojohto tuottaa verkkoon varausloistehoa, mikä saattaa nostaa 400 kV verkon jännitettä. Reaktorilla pyritään kuluttamaan tämä syntynyt loisteho ja näin ollen ikään kuin säädetään verkon jännitettä. Tällaisella ratkaisulla mm. pienellä kuormalla käyvää 400 kV johtoa ei tarvitse kytkeä irti verkosta. (18, s. 368.)

**Kompensointikondensaattoria** käytetään, jos aseman jännite alenee. Kondensaattoria voidaan käyttää rinnakkaiskompensointiin tai sarjakompensointiin. Rinnakkaiskompensointia käytetään tyyppillisesti kuormituksen rinnalla kulutusalueen tai laitteiston vaatiman loistehon syöttöön. Sarjakompensoinnilla pyritään pienentämään johdon induktiivista reaktanssia kytkemällä kondensaattori johdon kanssa sarjaan. Tällä kompensointitavalla pyritään lisäämään jännite- tai kulmastabiiliuden rajoittamien johtojen siirtokapasiteettia. (18, s. 368–371.)

#### 4.6 Ylijännitesuojat

Sähköverkossa voi esiintyä ylijännitteitä, jotka saattavat vahingoittaa sähköverkossa olevia laitteita ja komponentteja. Ylijännitteitä voi syntyä mm. kytkentätilanteissa tai luonnonilmiöiden seurauksena esimerkiksi salamaniskusta. Ylijännitteitä ja niiden kestoa voidaan rajoittaa verkon suunnittelulla ja verkkosuunnittelun lähtökohdat tiedostavalla käytöllä, mikä tarkoittaa esim. kytkentä- tai kytkentätilanteiden välttämistä, siellä missä ylijännitteitä voi syntyä. (9, s. 30–31.)



Salamaniskujen aiheuttamia ylijännitteitä voidaan pyrkiä välttämään rakenteellisella suunnittelulla. Avojohtoille vedettävät ukkosköydet ja sähköasemille asennettavat ukkospiikit toimivat ukkosenjohdattimina ja pyrkivät johtamaan salamaniskun aiheuttamat suurimmat energiapurkaukset maihin. Ukkosenjohdattimia käytettäessä on huomioitava riittävät pylväs- ja rakennemaadoitukset.

Sähköasemien tärkein ylijännitteitä rajoittava komponentti on venttiilisuoja (kuva 13), jota käytetään sähköaseman käyttö kriittisten ja kalliimpien laitteiden suojaamiseen. Venttiilisuoja kytketään yleensä suojattavan laitteen ja maan kanssa rinnan, joskus kuitenkin myös vaiheiden välille. Venttiilisuoja on ikään kuin epälineaarinen vastus. (9, s. 36–39.)



KUVA 13. Erilaisia venttiilisuoja (19)

Pienillä pylväsmuuntajilla keskijänniteverkoissa voidaan käyttää myös kipinävälisuoja, mutta se ei ole läheskään yhtä tarkka ja tehokas suoja kuin venttiilisuoja. Kipinävälisuoja on halpa ja yksinkertainen, mutta haittoja on useita: toiminnasta mahdollisesti aiheutuvan maasulun syntyminen ja sen aiheuttama jännitekuoppa ja suojalaitteen toiminta, kipinävälin ylilyöntijännitteen suuri vaihtelu niin, että se saattaa kasvaessaan ylittää suojattavan laitteen kestotason. (9, s. 35–36.)

Metallioksidisuojuilla on suurempi energianpurkamiskyky kuin kipinävälisuojuilla. Metallioksiditeknikka mahdollistaa myös alemman suojaustason laitteelle kuin kipinävälitekniikkaa käytettäessä.

Metallioksidisuojat pystyvät toimimaan myös järjestelmissä, joissa virralla ei ole luonnollista nolla-kohtaa (esim. tasasähköjärjestelmät). (9, s. 37.)

#### **4.7 Ohjausjärjestelmä ja kaukokäyttö**

Sähköverkon käyttö ja valvonta perustuu pääasiassa etämittauksiin, kauko-ohjauksiin ja paikallisiin automaattisesti tapahtuviin toimenpiteisiin. Paikallisia automaattisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi suojarleen toiminta ja jälleenkytkentätoiminnot. Suomessa sähköasemat ovat miehittämättömiä, kauko-ohjattuja ja -valvottuja järjestelmiä. (9, s. 385–414.)

Ohjausjärjestelmän tarkoituksena on kerätä sähköaseman kaikki informaatio ja mahdollistaa turvallinen käyttöympäristö. Ohjausjärjestelmän kautta tapahtuu aseman valvonta ja ohjaukset. Tiedon keräämisessä käytetään apuna älykkäitä IED-laitteita (Intelligent Electronic Device) sekä niihin liitettyjä I/O-kortteja, jotka keräävät digitaalisia ja analogisia mitta- ja tilatietoja sähköjärjestelmän tilasta. IED- ja I/O-laitteet ovat yhteydessä IEC 61850-standardin mukaiseen asemaväylään. IED-laitteita ovat esimerkiksi suojarleet, kenttäyksiköt ja kennotermiinit. Asemaväyläyhteys laitteiden välillä on tyypillisesti kahdennettu, jotta toisen väyläyhteyden vikaantuessa järjestelmän toiminta säilyy vakaana.

Paikallisyhteys ohjausjärjestelmään tapahtuu IED-laitteen tai paikallistyöaseman kautta. Kenttäyksikkö tai kennotermiini ohjaa tyypillisesti yhtä yksittäistä sähköaseman kenttää ja sen toimilaitteita. Kenttäyksiköstä ja kennotermiinalista on mahdollista suorittaa ohjauskomentoja paikallisesti.

Paikallistyöasema eli HMI (Human Machine Interface) mahdollistaa koko sähköaseman prosessien paikallisen tarkastelun ja ohjaukset. Paikallistyöasema on valvomorakennuksessa sijaitseva tietokone, joka kerää aseman hälytys- ja tapahtumasiinaalit asemaväyläyhteyden avulla käyttäjän tarkasteltavaksi. Hälytys- ja tapahtumalistoille tallennetaan myös suojarleiden lähettämät signaalit ja tilatiedot.

Kaukokäytön ala-asema eli RTU (Remote Terminal Unit) mahdollistaa ohjaukset ja tarkastelun käytönvalvontajärjestelmän valvomosta. RTU välittää valvomoon tietoja sähköjärjestelmän tilasta ja mahdollistaa sähköjärjestelmän ohjauksen valvomosta lähetettyjen komentojen avulla. RTU on yhteydessä käytönvalvontajärjestelmään reaaliajassa.

Kaukokäyttöyhteys mahdollistaa sähköaseman ohjaukset ja käytönvalvonnan etänä. Kaukokäyttöyhteys on liikennöintiä asema-automaation ja käytönvalvontajärjestelmän välillä RTU:n avulla. Kaukokäyttöjärjestelmä toimii reaaliajassa. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjälle välittyy jatkuvasti tieto sähköaseman reaaliaikaisesta tilasta. Tästä johtuen informaation siirron on toteuduttava nopeasti ja luotettavasti. Ohjauksen on mentävä luotettavasti perille ilman suuria viiveitä. (9, s. 385–414.)

Informaation siirrossa on tärkeää tarvittavan informaation määrittely, jotta kaukokäyttöyhteys ei kuormitu epäolennaisesta informaatiosta. Tyypillisesti informaatio on jaettu tärkeyden perusteella esimerkiksi ohjauksiin, mittauksiin, hälytyksiin ja tapahtumiin. (9, s. 385–414.)

#### **4.8 Suojusjärjestelmä**

Suojusjärjestelmä käsittää sähköverkon osan suojarleet. Hyvin toteutettu suojausjärjestelmä toimii nopeasti, luotettavasti, selektiivisesti sekä riittävän herkästi. Selektiivisyys tarkoittaa suojausjärjestelmän toteuttamista siten, että ainoastaan vikaantunut verkon osa tai komponentti kytkeytyy irti vikatilanteessa. Selektiivisyydellä minimoidaan keskeytysajat ja haitat verkon käyttäjille. (9, s. 342–384.)

Releen toimintanopeus on relesuojauksen kannalta erittäin tärkeää. Mitä nopeammin vika saadaan poistettua sähköverkosta, sitä pienemmät ovat vikavirran aiheuttamat vahingot ihmisille ja laitteille. Sähkön siirtoverkossa ja kantaverkossa vian kesto aika vaikuttaa myös verkon stabiiliuteen. Liian pitkään kestänyt vika voi aiheuttaa sähköverkossa taajuus- ja jännitekuoppia ja johtaa verkon suurhäiriöön. Releen toimintanopeudella on vaikutuksensa myös selektiivisyyteen. Yleensä lähellä olevat viat laukaistaan nopeammin kuin kauempana verkossa olevat viat. (9, s. 342–384.)

Suojareleen havahtuminen, toiminta ja palautuminen tapahtuu releen mittaamien suureiden perusteella. Rele on normaalitilassa, jos releen mittaamat suureet eivät sivuuta aseteltua arvoa. Kun releen mittaama suure sivuuttaa asetellun arvon, rele havahtuu. Rele lähettää laukaisukäskyn katkaisijalle, mikäli rele pysyy havahtuneena yli asetellun laukaisuajan. Kun suure poistuu releen toiminta-alueelta, rele palautuu normaalitilaan. Jos rele palautuu havahtuneesta tilasta ennen asetel-

lun laukaisuajan ylittymistä, laukaisukäskyä ei lähetetä. Rele lähettää toiminnastaan myös signaaleja asemaväylään, jotta käytönvalvonta saa tiedot verkon tapahtumista mahdollisimman nopeasti. (9, s. 342–384.)

Suojauksen luotettavuuteen pyritään vaikuttamaan monella tavalla. Kantaverkossa esimerkiksi johdosuojaus toteutetaan tyypillisesti kahdella distanssireleellä, joiden asetteluilla pyritään suojaamaan myös vasta-aseman ”takana” olevia osia. Näin distanssireleet toimivat vasta-aseman releille varasuojana. Varasuojan laukaisu-aika on aina pääsuojan laukaisu-aikaa pidempi, jotta varasuoja ei turhaan laukaise vikatilanteessa liian suurta verkon osaa pois käytöstä. (9, s. 342–384.)

#### **4.9 Apusähkö- ja omakäyttöjärjestelmät**

Aseman apusähköjärjestelmä voidaan jakaa jännitteiden perusteella kahteen osaan. Tasasähköjärjestelmä toimii suojaus-, ohjaus- ja kaukokäyttöjärjestelmän apusähkön lähteenä. Tasasähköjärjestelmän jännitetasot ovat tyypillisesti 12–220 VDC. Tasasähköjärjestelmä on sähköaseman toiminnan kannalta erittäin kriittinen. Jos tasasähköjärjestelmä vikaantuu ja tasasähkö katoaa asemalta, asema menettää etäyhteydet ja ohjattavuuden. Tällainen tila voi aiheuttaa vakavia omaisuuteen tai henkeen kohdistuvia vahinkoja.

Tasasähköjärjestelmä on kantaverkkoasemilla akustovarmennettu käyttövarmuuden turvaamiseksi. Lisäksi tasasähköjärjestelmät on usein kahdennettu kahdella samanlaisella järjestelmällä. Tasasähkö syötetään laitteille tasasähkökeskuksesta. Tasasähkökeskusta johon akusto on kytketty, syöttää omakäyttöjärjestelmään liitetty tasasuuntaaja.

Vaihtosähkö- eli omakäyttöjärjestelmä syöttää tasasuuntaajan lisäksi aseman yhteisiä järjestelmiä.

Yhteisiin järjestelmiin kuuluvat muun muassa:

- pistorasiat ja valaistus sisällä ja ulkona
- ilmanvaihto
- paloilmoin
- lämmitys
- jäähdytys
- kulunvalvonta
- kameravalvonta

- sulanapidot.

Omakäyttöjärjestelmää voidaan syöttää muun muassa jakeluverkosta tai aseman päämuuntajaan asennetun apukäämin eli "poikasmuuntajan" avulla. Omakäyttöjärjestelmälle täytyy olla myös varasyöttö käyttövarmuuden turvaamiseksi. Varasyöttö voi olla esimerkiksi dieselgeneraattori, joka käynnistyy automaattisesti omakäyttöjärjestelmän pääsyötön vikaantuessa.

## 5 MUUNTAJA

Muuntaja on sähköaseman kallein yksittäinen komponentti. Tässä luvussa käsitellään muuntajan toimintaperiaate lyhyesti. Lisäksi luvussa käsitellään ominaisuuksia ja ilmiöitä, jotka vaikuttavat relesuojaukseen.

Kaikilla sähköasemilla ei välttämättä ole muuntajaa. Muuntajaa tarvitaan aina kun jännitetasoa halutaan nostaa tai laskea.

### 5.1 Tehtävä

Muuntaja on sähkölaite, joka muuntaa sähkömagneettisen induktion avulla vaihtovirtaa ja -jännitettä kahden tai useamman käämityksen välillä. Käyttökohde ja käyttötarkoitus määräävät muuntajan rakenteen, muuntosuhteen ja muut sähkötekniset ominaisuudet.

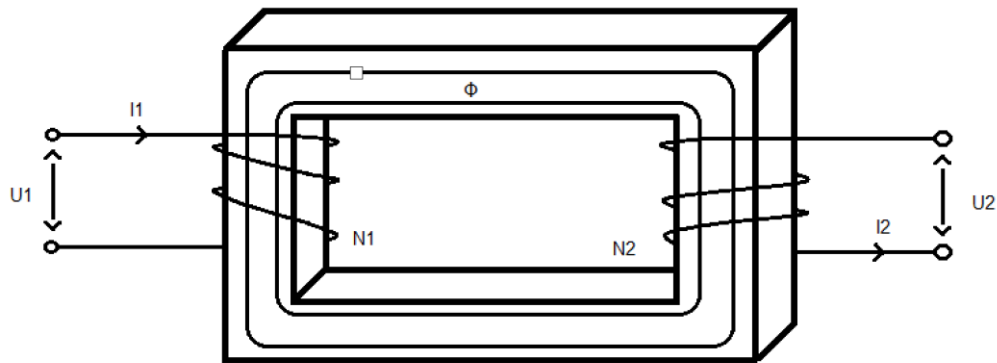
Kantaverkossa muuntajat ovat jännitetasoltaan tyypillisesti 400 kV, 220 kV tai 110 kV. Kantaverkon muuntajia kutsutaan tehomuuntajiksi. Tehomuuntajan päätarkoitus on jakaa tehoa sähkönsiirtoverkossa eri jännitetasoille. Voimalaitokset liittyvät sähköverkkoon yleensä 110/20 kV muuntajalla. Kuvassa 14 on eräs kantaverkon suurmuuntaja, teholtaan 400 MVA ja jännitetasoltaan 400/110/20 kV (22).



KUVA 14. 400 MVA muuntaja (22)

## 5.2 Toimintaperiaate

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Tarkastellaan ideaalista yksivaihemuuntajaa kuvassa 15. Ensiökäämityksen kierroksissa kulkeva vaihtovirta  $I_1$  synnyttää muuntajan rautasydämeen muuttuvan magneettivuon  $\Phi$ . Rautasydämen muuttuva magneettivuo indusoi toisiokäämitykseen vaihtovirran  $I_2$ , koska ensiö- ja toisiokäämitykset ovat samalla rautasydämellä. (24, s. 56.)



KUVA 15. Yksivaihemuuntaja

Muuntajan käämien päiden jännitteet ovat verrannollisia käämityksien kierroslukuun muuntosuhteen kaavan mukaisesti.

KAAVA 1. Muuntosuhde.

$$\mu = \frac{N1}{N2} = \frac{U1}{U2}$$

Kaavassa 1  $\mu$  on muuntosuhde,  $N1$  on ensiökäämityksen kierroslukumäärä,  $N2$  on toisiökäämityksen kierroslukumäärä,  $U1$  on ensiökäämin päiden jännite ja  $U2$  on toisiökäämin päiden jännite.

Muuntajassa teho siirtyy rautasydämessä esiintyvän vaihtomagneettivuon avulla, kun muuntajan toisiota kuormitetaan. Muuntajan läpi siirtyvästä tehosta osa kuluu virtalämpöhäviöihin ja sydämen rautahäviöihin. Toisioon vaikuttavaa magneettivuota pienentää myös hajavuoilmiö. Edellämainituista syistä johtuen muuntajan läpi siirtyvä teho riippuu muuntajan nimellisarvoista, muuntajan hyötysuhteesta ja muuntajaan syötettävästä tehosta. (25, s. 269–283.)

### 5.3 Kolmivaihemuuntajan rakenne

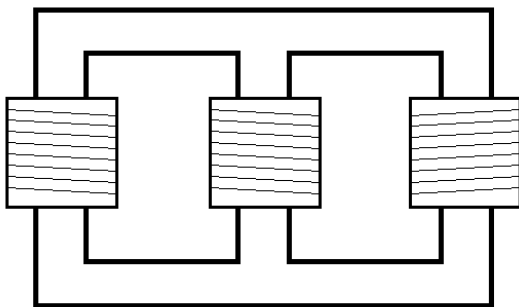
Suurmuuntajissa käytetään edelleen eristeaineina paperia, prespaania ja muuntajaöljyä. Muuntajaöljy toimii lisäksi myös jäähdytyksen väliaineena. Muuntajaöljy siirtää käämityksissä ja rautasydämessä syntyvän lämmön muuntaja-astian runkoon. (9, s. 141–160.)



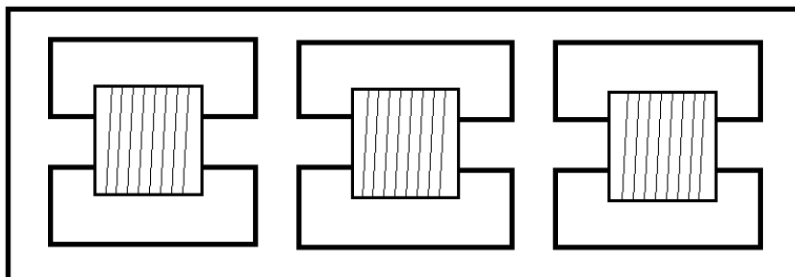
Jakelujännitteillä voidaan käyttää sisäasennuksiin soveltuvia kuivamuuntajia. Kuivamuuntajassa eristeaineena käytetään hartseja ja muita vastaavia aineita. Kuivamuuntajan jäähdytysväliaineena toimii ilma. Joissain sovelluksissa kuivamuuntaja on paineistettu SF6 kaasulla tai muuntaja on täytetty palamattomalla nesteellä. (9, s. 141–160.)

Muuntajan rautasydän valmistetaan tyypillisesti 0,23–0,35 mm kylmävalssatuista kidesuunnatuista teräslevyistä. Sydämen rakenne vaikuttaa olennaisesti muuntajan häviöihin. Suurmuuntajien käämityksissä käytetään kuparia, mutta alumiiniakin voidaan käyttää esimerkiksi jakelumuuntajissa. (9, s. 141–160.)

Kolmivaihemuuntajat voidaan jakaa rautasydämen tyypin mukaan vaippa- ja sydänmuuntajiin. Yleisimmin käytetty rautasydänrakenne on kolmivaiheinen sydänmuuntaja. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty kolmivaiheiset vaippa- ja sydänmuuntajat. Lisäksi voidaan käyttää 5-pylväsrakennetta, mikä on ikään kuin sekoitus vaippa- ja sydänrakenteista. Ylä- ja alajännitekäämit voidaan käämiä lieriömäisesti sisäkkäin tai vuorokäämityksenä vuorotellen rautasydämen pylväälle. (9, s. 141–160.)



KUVA 16. Kolmivaiheinen sydänmuuntaja



KUVA 17. Kolmivaiheinen vaippamuuntaja

### 5.3.1 Kytkentäryhmät

Kolmivaiheisen muuntajan käämitysten kytkennällä voi vaikuttaa muuntajan ominaisuuksiin. Käämit voidaan kytkeä kolmioon (D, d, delta) tai tähteen (Y, y, star). Jakelujännitteillä voidaan käyttää myös hakatähtikytkentää (Z, z, zigzag). Yläjännitepuolen kytkentä ilmoitetaan isolla kirjaimella, alajännitepuoli pienellä. Lisäksi yksivaihemuuntajalle on varattu tunnukset I ja i, sekä säästökytketylle muuntajalle A ja a. Mikäli muuntajan tähtipiste on tuotu muuntajan kannelle, se ilmoitetaan tunnukella N tai n. (9, s. 142.)

Käämien kytkentä määrää myös ylä- ja alajännitekäämien vaiheensiirtoeron. Vaihe-ero ilmaistaan numerolla 0-11 taulukon 1 mukaisesti. Numero ilmaisee, kuinka paljon alajännitepuolen yksittäinen vaihe on yläjännitepuolen samaa vaihetta jäljessä. Esimerkkinä muuntajan kytkentäryhmä voidaan ilmoittaa YNyn0d11, jossa yläjännitepuoli on kytketty tähteen ja tähtipiste tuotu kannelle, alajännitepuoli samalla tavalla 0 asteen vaihesiirrolla ja tertiääri kolmioon 330 asteen vaihesiirrolla yläjännitettä jäljessä. (9, s. 142.)

TAULUKKO 1. Vektoriryhmänumerot ja niitä vastaavat vaiheensiirtokulmat

vaiheensiirto	0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°	-180°	-210°	-240°	-270°	-300°	-330°
vektoriryhmän numero	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tähtikytkennässä vaihekäämin yli vaikuttava jännite on 58 % käämiin liittyvän verkon pääjännitteestä. Tähtikytkentä sopii hyvin suurille jännitteille ja pienille virroille, vinokuormitustarpeeseen sekä verkkoon, jossa tarvitaan tähtipistemaadoitusta. (9, s. 142.)

Kolmiokytkennässä käämivirta on 58 % vaihevirrasta. Kolmiokytkentä on taloudellisempi pienille jännitteille ja suurille virroille. Kolmiokytkennässä vaihekäämiin vaikuttaa liittyvän verkon pääjännite. (9, s. 142.)

### 5.3.2 Käämikytkin

Verkon erilaiset käyttö- ja kuormitustilanteet aiheuttavat jännitetasoissa muutoksia. Verkon jännitettä pyritään säätämään luvussa 4.5 esitellyillä kompensointilaitteilla. Muita säätötapoja ovat generaattorin jännitteensäätö sekä verkkomuuntajan jännitteensäätö käämikytkimen tai väliottokytkimen avulla.

Suuret tehomuuntajat voidaan varustaa käämikytkimellä. Käämikytkimellä voi säätää muuntajan jännitettä. Käämikytkimelle tyypillinen säätöalue on  $\pm 15\%$ . Säätö tapahtuu yleensä muuttamalla ensiön käämityksen kierrosmäärää. Ensiön kierrosmäärää muuttamalla säädetään muuntajan alajännitettä. (9, s. 146.)

Käämikytkin sijoitetaan omaan öljysäiliöönsä, jotta käämikytkimen kytkentätapahtumassa syntyvät kaasut eivät sekoita varsinaisen muuntajaöljyn kaasuanalyysiä. Käämikytkintä voi operoida virralisena, toisin kuin pienemmissä muuntajissa käytettyä väliottokytkintä. (9, s. 146.)

Käämikytkimen operointi tapahtuu käsin tai automaattisesti. Käämikytkimen toiminnassa on oltava riittävä hidastus, jotta jännitteen nopeat vaihtelut eivät aiheuta edestakaista säätöä. Käämikytkimen asennon uudelleentarkastelu on tärkeää, jos verkossa on ollut käyttökeskeytys. Jännitteen palautusvaiheessa onkin hyvä miettiä käämikytkimen palauttamista keskiasentoon, jotta verkkoa palauttaessa käämikytkin ei ole ääriasennossaan. (18, s. 377.)

### 5.3.3 Tähtipiste

Verkossa epäsymmetristen vikojen aikana vaikuttaviin jännitteisiin ja virtoihin voidaan vaikuttaa erilaisilla verkon maadoitustavoilla. Vikojen aikana vaiheiden ja maan väliset jännitteet sekä tähtipisteen potentiaali maahan nähden voivat muuttua. Muutokset ja niiden suuruus riippuvat verkon muuntajien ja generaattorien tähtipisteiden maadoitustavasta. Tähtipisteen maadoitustavalla on myös vaikutuksensa relesuojaukseen ja suojausperiaatteisiin. (18, s. 209.)

**Maasta erotettu verkko** ei ole yhdestäkään tähtipisteestä yhteydessä maahan suoraan tai impedanssin kautta. Maasta erotetun verkon nollaimpedanssi muodostuu galvaanisesti yhteen kytketystä johtopituudesta. Tällöin nollaimpedanssi on suuri, joten maasulkuvirta on hyvin pieni. Tästä

syystä verkon käyttöä voidaan maasulkutilanteessa jopa jatkaa, mikäli varmistetaan, että käytöstä ei aiheudu vaaraa hengelle tai omaisuudelle. Maasulkua on vaikea todentaa tai paikallistaa mitauksilla. Vian aikana terveiden vaiheiden jännitteet maahan nähden voivat kasvaa pääjännitteen suuruiseksi ja tähtipisteen jännite vaihejännitteiden suuruiseksi. Kohonnut vaihejännite vaikuttaa verkossa käytettävien laitteiden eristysmitoituksiin ja voi maasulkutilanteessa aiheuttaa läpilyönnin ja kaksoisvian, mikäli laitteen eristys on heikentynyt tai pettänyt. Suomessa keskijänniteverkko (10–45 kV) on suurilta osin maasta erotettu. (18, s. 210.)

**Sammutetussa verkossa** tähtipisteen ja maan väliin on asennettu vastus tai kuristin. Kuristimen induktanssi pyritään mitoittamaan siten, että johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva virta kumoutuu. Näin maasulku ikään kuin sammuu itsestään ja verkkoa kutsutaan sammutetuksi. Sammutetun verkon kapasitansseissa ja kelassa kulkevat virrat ovat lähes 180 asteen vaihesiirrossa. Jos virrat ovat itseisarvoltaan yhtä suuret, ne lähes kumoavat toisensa. Sammutetun verkon ongelmana on muuttuva verkon kapasitanssi. Verkkoon galvaanisesti kytketty johtopituus saattaa käyttötilanteiden mukaan vaihdella, tästä syystä myös verkon kapasitanssit vaihtelevat. Käytännössä jos maakapasitanssi halutaan kompensoida lähes kokonaan, on myös maadoituskuristimen induktanssin oltava säädettävissä verkon kapasitanssin mukaisesti. Tämän vuoksi sammutetun verkon tähtipisteissä voidaan käyttää maadoitusmuuntajaa tai induktanssiltaan säädettävää kela (ns. Petersenin kela). (18, s. 210–211.)

**Maadoitetussa verkossa** tähtipisteet kytketään maahan joko suoraan tai virtaa rajoittavan impedanssin kautta. Pienjänniteverkossa maadoitusta käytetään suojaustoimenpiteenä: maadoitetussa verkossa maadoitusvastus ja kosketusjännitteet pysyvät alhaisina, joten sähkön käyttöturvallisuus kasvaa. (18, s. 210–211.)

Maadoitetun verkon maasulkuvirta on lähes aina oikosulkuvirran suuruinen. Suojaus on helppo toteuttaa ja se toimii nopeasti ja luotettavasti. Kantaverkon tähtipisteet maadoitetaan virtaa rajoittavien kuristimien kautta. (18, s. 210–211.)

### 5.3.4 Tertiääri

Muuntaja voidaan varustaa tertiäärikäämityksellä, toisin sanoen kolmioon kytketyllä tasauskäämityksellä. Tertiäärikäämistä käytetään erityisesti Yy-kytketyynöillä täys- ja säästökytketyissä muuntajissa, joilla on enintään yksi tähtipistemaadoitus. (9, s. 157.)

Tertiäärin tarvetta voidaan perustella seuraavilla asioilla:

- tertiääri tasapainottaa pääjännitteitä epäsymmetrisessä kuormitustilanteessa
- tertiääri pienentää tähtipisteen läpi kulkevan tyhjäkäyntivirran kolmatta yliaaltoa
- tertiääri pienentää muuntajan nollareaktanssia
- tertiääriin voidaan kytkeä verkon kompensointilaitteistoa, esimerkiksi kondensaattoreita tai reaktoreita
- tertiääri voi toimia tarvittaessa sähköaseman apusähkön lähteenä (9, s. 158.)

### 5.4 Jäähdytys

Muuntaja mitoitetaan IEC-standardin mukaan. Standardin mukaan muuntajan käyttö +20 °C lämpötilassa on normaaliajaoa. Standardit antavat muuntajalle lämpötilarajan, jonka yli lämpötila ei saa normaalikäytössä nousta. Suomen olosuhteissa muuntajalle syntyy luontaista ylikuormitettavuutta, sillä keskilämpötila Suomen olosuhteissa on noin +6 °C. Muuntajalle suoritetaan standardin IEC 70076-3 mukaan lämpenemiskoe, jolla selvitetään muuntajalle soveltuva kuormitettavuuskäyrästä. (9, s. 152.)

IEC-standardi 6007–2 määrittelee muuntajan jäähdytyksen perusominaisuudet. Standardissa on lisäksi määriteltynä merkkikoodaus muuntajan eri jäähdytystypeille. Jäähdytysväliaineille on varattu seuraavat merkit: O = mineraaliöljy (*oil*), A = ilma (*air*), W = vesi (*Water*), L = palamaton neste (*liquid*), G = muu kaasu kuin ilma (*gas*) ja S = jokin kiinteä aine (*solid*). Kierrätystavoille on myös omat merkkinsä: N = luonnollinen kierto (*natural*), F = tehostettu kierto pumpulla tai puhaltimella (*forced*) ja D = pumppusyöttöinen ohjattu öljynkierto käämityksessä (*directed*). Muuntajan jäähdytystapa voi esimerkiksi olla ONAF 75 % / 100 %. Tämä tarkoittaa, että muuntajan kuormitettavuus on 75 % öljyn ja ilman luonnollisella kierrolla. Muuntajan 100 %:n kuormitettavuus saavutetaan kierrättämällä ilmaa tehostetusti esimerkiksi puhaltimien avulla. (9, s. 152.)

Tyypillisin väliaineen eli öljyn jäähdytys toteutetaan muuntaja-astian kylkeen asennetuilla radiaattoreilla. Öljy johdetaan radiaattoreihin, joissa ilman luonnollinen tai puhaltimin pakotettu kierto hoitaa jäähdytyksen. (9, s. 152.)

## 5.5 Kytkeäsysäsvirta ja yliaallot

Kun muuntaja kytketään sähköverkkoon, muuntaja ottaa suuren määrän magnetoimisvirtaa. Virran suuruus riippuu rautasydämessä kytkentähetkellä olleesta jäännösvuosta eli remanenssista sekä kytkentähetkellä vaikuttavasta jännitteestä. Muuntajan magneettivuolla ja jännitteellä on 90 asteen vaihesiirto. Vaihesiirrosta johtuen suurin kytkentävirta esiintyy tilanteessa, missä kytkentä tapahtuu jännitteen nollakohdassa. Jännitteen ollessa nollakohdassa magneettivo on huippuarvossaan. Jos kytkentähetkellä rautasydämessä on jäännösvuo, tilanne pahenee, koska vuon huippuarvoon lisätään remanenssivo. (9, s. 153.)

Muuntajan ottamaa magnetoimisvirtaa kutsutaan kytkentäsysäsvirraksi. Kytkeäsysäsvirran suuruus voi olla jopa kymmenkertainen muuntajan mitoitusvirtaan nähden. Käämityksen resistanssi, rautasydämessä tapahtuvat häviöt ja verkossa tapahtuvat häviöt pienentävät kytkentäsysäsvirtaa, joten kytkentäsysäsvirta vaimenee muuntajalle ominaisessa ajassa. (9, s. 154.)

Kytkeäsysäsvirran suuruuteen voidaan vaikuttaa käyttämällä katkaisijan sulkemisvastuksia tai napasynkronointia. Napasynkronointilaite sulkee katkaisijan vaihekohtaiset navat yksitellen jännitteen ollessa huippuarvossa, jotta magneettivo on kytkentähetkellä nollakohdassa.

Kytkeäsysäsvirta aiheuttaa verkkoon suurten virtojen lisäksi muitakin haitallisia ilmiöitä. Sysäsvirta voi aiheuttaa turhia laukaisuja, mikäli niiden välttämiseksi ei ole asennettu esimerkiksi salparelettä. Kytkeäsysäsvirta aiheuttaa äkillistä loistehon kulutusta sekä äkillisen jännitteenaleneman. Lisäksi verkossa esiintyy kytkentätilanteissa parillisia ja parittomia yliaalloja. Yliaallot voivat aiheuttaa verkossa resonanssin, mikäli piirikomponenteilla on sama ominaistaajuus. Yliaalloja voidaan hyödyntää kytkentäsysäsvirran erottamiseen vikavirrasta. (9, s. 154.)

## 6 MUUNTAJAN SUOJAUS

Muuntajan suojaustarpeet vaihtelevat muuntajan koon, käyttötarkoituksen ja hinnan mukaan. Tässä luvussa perehdytään 400/110/20 kV muuntajan suojaukseen. Muuntajan tertiäärikäähin 20 kV jännitetaso ei ole käytössä, joten jännitetasolla on käytössä vain differentiaali- ja ylivirtatoiminnot.

Kantaverkon muuntajat ovat yleensä suuritehoisia, kalliita ja käyttövarmuuden kannalta kriittisiä. Kantaverkon muuntajat täytyy suojata mahdollisimman täydellisesti sähköverkossa esiintyviä vikoja ja muuntajassa ilmeneviä mekaanisia vikoja vastaan. Sähköisten suojiin suojausalue kattaa tyypillisesti muuntajakenttien virtamuuntajien välisen alueen (9, s. 378). Muut suojat ovat yleensä mekaanisia tai termisiä laitteita, jotka laukaisevat muuntajan verkosta vikatilanteessa.

### 6.1 Sähköiset suojalaitteet

Muuntajan sähköiset suojalaitteet perustuvat jännitteen ja virran mittauksiin. Sähköiset suojalaitteet eli releet (kuva 18) lähettävät vikatilanteessa laukaisukäskyn muuntajan katkaisijoille ja irrottavat muuntajan verkosta.



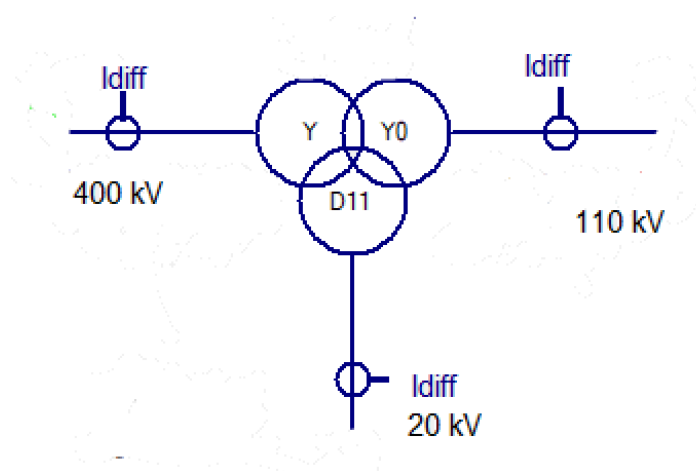
KUVA 18. Siemens Siprotec 5 7UT86 differentiaalirele

Muuntajasuojauksessa on tärkeää huomioida selektiivisyys ja vikapaikan sijainti. Muuntajan suojauspiirin ulkopuolella tapahtuvat viat eivät saisi pudottaa koko muuntajaa verkosta. Muuntajan käyttäytyminen kytkentätilanteissa aiheuttaa suojausjärjestelmälle lisävaatimuksia.

Sähköasemaprojekteissa tilaaja toimittaa sähköverkon osan tietojen perusteella lasketut suojausasettelut. Sähköasematoimittajan tehtävä on tarkastaa asettelut ja konfiguroida releet asettelujen mukaisesti.

### 6.1.1 Differentiaalirele

Differentiaalirele eli erovirtarele mittaa muuntajan kolmivaihevirrat kaikilta jänniteportailta (kuva 19) ja lähettää laukaisukäskyn katkaisijoille, jos erovirran määrä ylittää releen asettelut. Differentiaalirele on muuntajan pääsuoja ja se on usein kahdennettu. Differentiaalireleiden apusähkönsyöttö tuodaan vielä eri tasajännitelähteiltä, jotta tasajännitejärjestelmän vika ei pudota kumpaakin differentiaalisuojaa pois käytöstä samanaikaisesti.



KUVA 19. Differentiaalisuojan virtamittaukset

Differentiaalinen erovirta-asettelu on tyypillisesti 40 % muuntajan nimellisvirrasta. Tämä tarkoittaa, että differentiaalisuoja laukaisee muuntajan verkosta, jos se havaitsee 0,4 kertaa muuntajan nimellisvirran suuruisen määrän erovirtaa (9, s. 380). Differentiaalitoiminnon laukaisua ei yleensä hidasteta.



Differentiaalirele huomioi erovirtalaskennassa muuntajan vektoriryhmän aiheuttaman vaihesiirtokulman, jänniteportaiden nimellisvirrat, maadoitetussa verkossa nollakomponentin ja virtamuuntajien toisiopiirin vaihesiirtokulman. Näin differentiaalisuoja osaa verrata kolmivaihevirtoja oikeissa vaihekulmissa. (29, s. 523–577.) Normaalitilanteessa virtojen laskennallinen summa on nolla, koska kaikki virta kulkee suojattavan kohteen suojausalueen lävitse (9, s. 355).

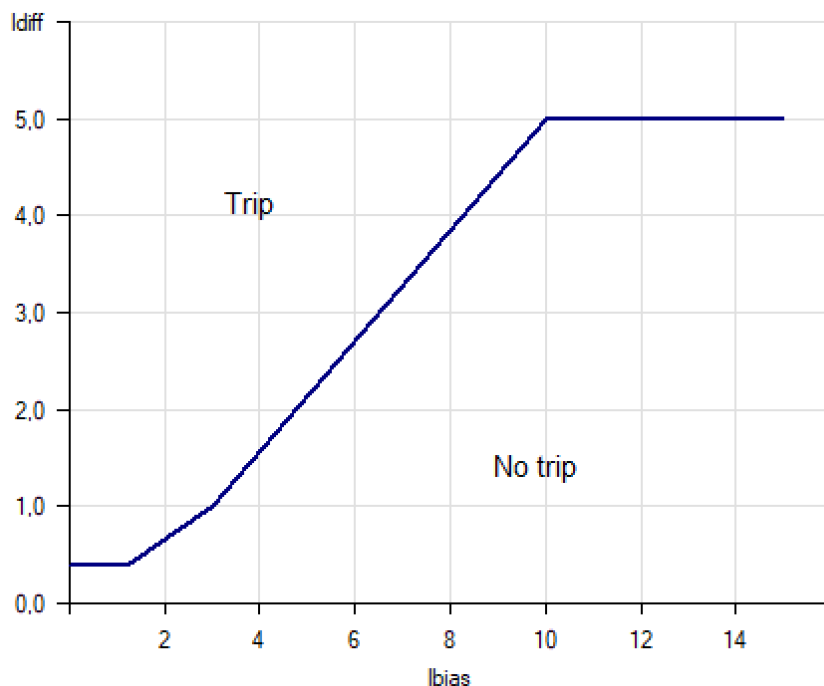
Koska muuntajan eri puolilla vaikuttaa eri jännitetasot, myös nimellisvirrat ovat erisuuria. Differentiaalirele laskee jänniteportaan nimellistehon ja -jännitteen perusteella jokaiselle jänniteportaalle omat nimellisvirrat. Differentiaalirele suorittaa erovirtalaskennan jokaisen jänniteportaan nimellisvirran perusteella. Rele laskee nimellisvirran kaavalla 2. (29, s. 557.)

KAAVA 2. Nimellisvirta.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times V_n}$$

Kaavassa 2  $I_n$  on jänniteportaan nimellisvirta,  $S_n$  on jänniteportaan nimellisteho ja  $V_n$  on jänniteportaan nimellisjännite.

Differentiaalisuojaan asetellaan tyypillisesti vakavointia. Vakavointiasettelulla pyritään estämään differentiaalisuojan turhat laukaisut suurivirtaisissa muuntajan suojauspiirin ulkopuolisissa vioissa. Vakavointiasettelulla sallitaan suurempi määrä erovirtaa, kun muuntaja kuormittuu yli nimellisvirran. Kuvassa 20 on vakavointiasettelu kuvaaja. Kuvaajan vaaka-akselilla on kuormitusvirran suhde nimellisvirtaan ( $I_{bias}$ ) ja pystyakselilla erovirran suhde nimellisvirtaan ( $I_{diff}$ ). Trip -alueella rele laukaisee, no trip-alueella rele ei laukaise. (29, s. 523–577.)

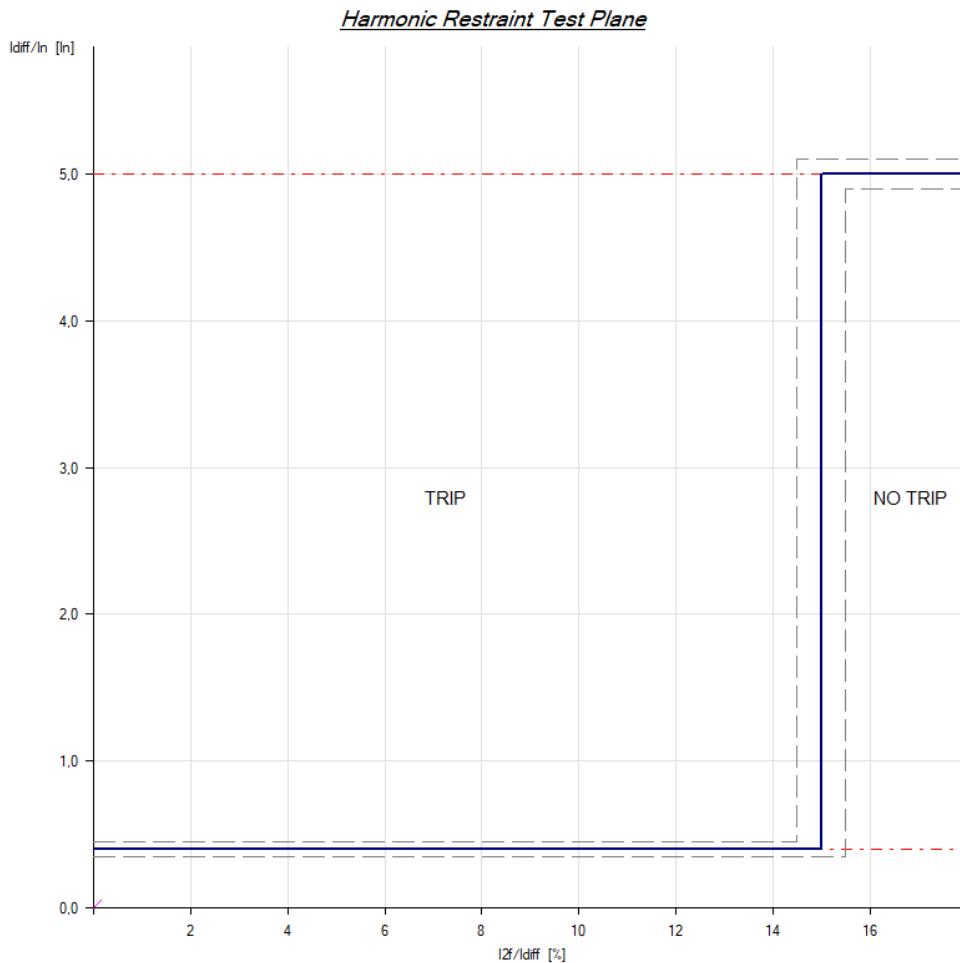


KUVA 20. Differentiaalisuojan vakavointikäyrä

### 6.1.2 Harmoninen salpa

Muuntajan kytkentätilanteissa sähköverkossa esiintyy luvussa 5.5 mainituista syistä kytkentäsäysvirtoja ja yliaaltoja. Edellä mainitut ilmiöt voivat aiheuttaa muuntajan virhelaukaisun kytkentätilanteessa. Differentiaalireleeseen on aseteltavissa salpatoiminto, joka havahtuessaan lukitsee differentiaalisuojan toiminnan, jotta virhelaukaisua ei tapahdu. Kytkentätilanteessa esiintyy verkon 50 hertsin taajuuksien virtojen lisäksi nimellistaajuuden kerrannaisia. Toista monikertaa eli 100 hertsin taajuudella esiintyvää virtakomponenttia voidaan käyttää kytkentäsäysvirran ja vikavirran erottamiseen. Jos salpa havaitsee virrassa 100 Hz taajuisia komponenttia asetellun raja-arvon ylitävän määrän, salpa havahtuu ja lukitsee differentiaalitoiminnon. (9, s. 154.)

Kuvassa 21 on salpareleen asettelu kuvaaja. Vaaka-akselilla on 100 Hz taajuisen virtakomponentin suhde erovirtaan (prosenttia erovirrasta) ja pystyakselilla erovirran suhde nimellisvirtaan. Kuvan mukaisessa tapauksessa salpa lukitsee differentiaalitoiminnon, jos 100 Hz taajuisia virtaa on yli 15 % erovirrasta ja erovirran määrä on 0,4–5 kertaa muuntajan nimellisvirta.

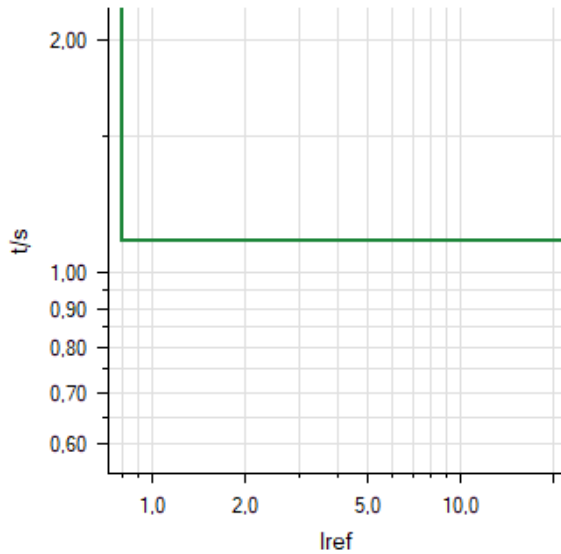


KUVA 21. Yliaaltosalvan asettelun kuvaaja

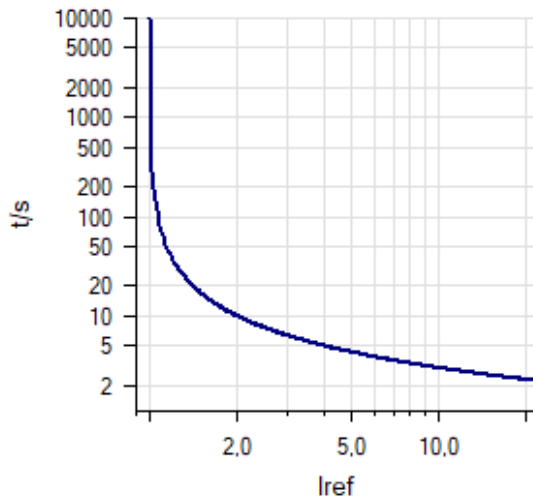
### 6.1.3 Ylivirtarele

Ylivirtarele havahtuu, jos mitattu virta ylittää asetteluarvon. Ylivirtarelettä voidaan käyttää ylikuormitussuojana tai varasuojana esimerkiksi distanssireleessä tai differentiaalireleessä. Ylivirtarele ei havaitse virran suuntaa (9, s. 346).

Ylivirtareleen voi asettaa toimimaan vakioaikaylivirtakäyrällä (kuva 22). Vakioaikaylivirtatoiminto lähettää laukaisukäskyn asetellulla vakioajalla havahtumisen jälkeen, mikäli virta ylittää asetellun arvon. Käänteisaikaylivirtatoiminnolla releen laukaisuaika riippuu releen havaitseman virran suuruudesta (kuva 23). Käänteisaikaylivirtatoiminnon käyrien jyrkkyydet noudattavat standardia IEC 60255-3. (9, s. 346.)



KUVA 22. IEC 60255-3 mukainen definite time -käyrä



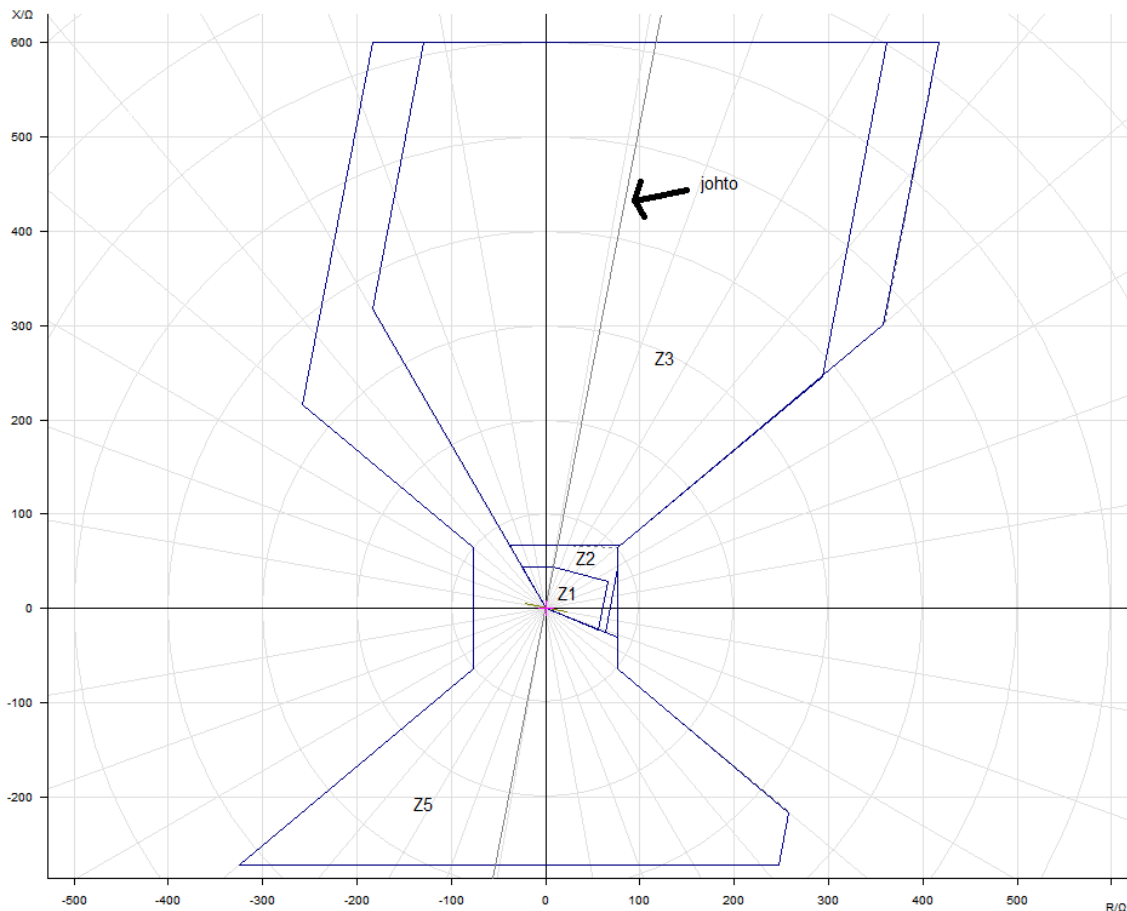
KUVA 23. IEC 60255-3 mukainen käännteisaikaylivirtakäyrä "normal inverse"

#### 6.1.4 Distanssirele

Distanssirelettä käytetään tyypillisesti johtosuojaukseen. Distanssireleen toiminta perustuu virran ja jännitteen mittaukseen. Rele laskee suojattavan johdon virran ja johdon alkupään jännitteen perusteella impedanssin. Distanssirele päättää virran ja jännitteen vaiheensiirtokulmasta vikavirran suunnan, joten se on hyvä suojaustapa silmukoidussa verkossa. (9, s. 348.)

Distanssireleeseen asetellaan suojauskuvio, joka koostuu suojausvyöhykkeistä Z1-Z5 (kuva 24). Suojauskuvion pystyakselilla on reaktanssi X ja vaakakselilla resistanssi R. Jos releen mittaama

impedanssi osuu jollekin suojausvyöhykkeelle, rele havahtuu. Jos rele pysyy havahtuneena yli suojausvyöhykkeelle asetellun ajan, rele lähettää laukaisukäskyn katkaisijalle.



KUVA 24. Distanssin suojauskuvio

Distanssireleen suojausvyöhykkeiden asettelulla on suuri vaikutus suojausjärjestelmän selektiivisyyteen ja varmuuteen. Suojattavan johdon pituudesta noin 80 % asetellaan 1-vyöhykkeelle. 1-vyöhykkeen laukaisua ei yleensä hidasteta. 2-vyöhyke kattaa 120 % suojattavan johdon pituudesta ja laukaisuaikaa hidastetaan 400 millisekuntia (9, s. 348). Distanssirele voi toimia myös varasuojana ”taaksepäin” kiskolle ja kiskolta lähteville johdoille sekä vasta-aseman takana oleville johdoille. Vyöhykkeitä 3–6 käytetään yleensä varasuojauksessa.

Muuntajan suojauksessa distanssirelettä voidaan käyttää 110 kV jännitetasolla maakaapeloinnin suojana sekä differentiaalireleen varasuojana. Distanssireleen suunnattu maasulkutoiminto havaitsee myös maasulkuvat muuntajakentän johdolla. Distanssireleen asettelussa on huomioitava, että vain muuntajaa kohti olevat suojausvyöhykkeet saavat laukaista koko muuntajan verkosta. Esimerkiksi distanssireleen havahtuminen ja laukaisu taaksepäin 110 kV kiskon suuntaan ei saa laukaista

muuntajan 400 kV katkaisijoita, koska pelkän 110 kV katkaisijan avaaminen estää muuntajaa syöttämästä vikavirtaa.

### 6.1.5 Nollavirtarele

Nollavirtarele mittaa vaihevirtojen summavirtaa. Nollavirtarele toimii maasulkutilanteessa. Nollavirtarele ei tunnista vikavirran suuntaa. Nollavirtareleen herkkään toimintaan käytetään yleensä käännteisaikaylivirtakäyrää, jotta saavutetaan selektiivinen toiminta. Karkeammin vikavirtalaskennan perusteella asetellut nollavirtareleet toimivat yleensä vakioaikaylivirtakäyrillä ja selektiivisyys toteutetaan eri portaiden eripituisilla laukaisuajoilla. (9, s. 354.)

Maasulkusuojaukseen voidaan käyttää myös suunnattua maasulkusuojaa. Suunnattu maasulkusuoja päättelee virran suunnan nollajännitteen ja nollavirran vaiheensiirtokulmista. Distanssireleeseen on yleensä mahdollista asetella suunnattu maasulkutoiminto ja sitä käytetään suojattavaan johtoon päin.

Muuntajan tähtipisteessä käytetään nollavirtarelettä, jos tähtipiste on maadoitettu. Verkon maasulkutilanteessa osa maasulkuvirrasta kiertää muuntajan tähtipisteen kautta takaisin verkkoon. Nollavirtarele toimii tähtipistevirtamuuntajan mittaustiedon perusteella. Tähtipisteen nollavirtarele voi toimia sellaisenaan muuntajan suojuksessa sekä kisko- ja johtomaasuluissa varasuojana. (9, s. 380.)

Muuntajan tähtipistenollavirtareleen asettelulla on suuri merkitys selektiivisyydelle. Laukaisuajat asetellaan siten, että johtosuoja ja kiskosuoja laukaisevat maasulut suojausalueillaan ennen tähtipistenollavirtareleen toimintaa, jotta muuntajaa ei turhaan pudoteta verkosta (9, s. 380).

Muuntajan kytkentätilanteessa sysäysvirtaa esiintyy myös muuntajan tähtipisteessä, mikäli se on maadoitettu. Tästä syystä 400 kV puolen tähtipistenollavirtarele kannattaa varustaa yliaaltosalpa-toiminnolla. Yliaaltosalpaa käsitellään tarkemmin luvussa 6.1.2.

## 6.2 Mekaaniset suojalaitteet

Muuntajassa voi esiintyä vikoja, joita virtaan perustuvat releet eivät kykene havaitsemaan. Muuntajan suojaukseen käytetään siksi myös releitä, jotka valvovat esimerkiksi öljyn kaasuuntumista, virtausta tai lämpötilaa.

Releissä voi olla hälytysporras ennen laukaisuporrasta, jotta mahdollinen vaurioita aiheuttava vika voidaan havaita ennen suurempia ongelmia. Hälytykset välittyvät kaukokäyttöyhteyden välityksellä valvomoon.

### 6.2.1 Kaasurele

Kaasurelettä käytetään öljytäytteisen muuntajan ja reaktorin suojarelleenä. Kaasureleen eli Buchholz-releen toiminta perustuu öljyn kaasuuntumiseen. Rele sijoitetaan putkeen, joka yhdistää muuntaja-astian ja öljyn paisuntasäiliön (23). Kaasureleen sisällä on aina öljyä ja kaasua. Öljyn kuumentuessa vian seurauksena öljy kaasuuntuu. Kaasurele on rakenteeltaan sellainen, että kaasu kertyy releeseen. Releeseen kertynyt kaasu saa releessä olevan öljyn pinnan laskemaan. (9, s. 359.)

Releessä on kaksi porrasta, joiden toiminta perustuu öljyn pinnan laskuun. Ensimmäinen porras aiheuttaa hälytyksen ja toinen laukaisun. Kun kaasua muodostuu hitaasti, öljyn pinta ei pääse laukaisurajalle asti ja kaasukuplat nousevat paisuntasäiliöön. Jos muuntajassa tapahtuu suurempi vika, mikä aiheuttaa öljyn voimakkaan kaasuuntumisen ja virtauksen kohti paisuntasäiliötä, öljyn pinta laskee laukaisurajalle. Esimerkiksi läpilyönti muuntajan eristyksessä saa öljyn kuumenemaan paikallisesti ja kaasuuntumaan voimakkaasti. (9, s. 359.) Tyypillisesti kaasurele lähettää laukaisukäskyn muuntajan differentiaalireleille, jotka monistavat laukaisukäskyn muuntajan kaikkien jänniteportaiden katkaisijoille.

### 6.2.2 Virtaus- ja painerele

Käämikytkintä suojataan virtausreleellä. Virtausrele asennetaan öljytilan paisuntaputkeen. Jos käämikytkimen kytkentä epäonnistuu ja syttyy valokaari, öljy pyrkii voimakkaasti virtaamaan öljyn paisuntasäiliöön. Virtausrele laukaisee muuntajan verkosta havaittuaan öljyn virtauksen paisuntaputkessa.

Ylipaineventtiilillä suojataan käämikytkintä ja muuntajaa räjähdykseltä. Ylipaineventtiilissä voi olla laukaisukosketin, joka venttiilin toimiessa laukaisee muuntajan verkosta. Ylipaineventtiili toimii yleensä virtausrelettä nopeammin. Käämikytkimen paisuntasäiliön lisäksi ylipaineventtiileitä voi olla sijoitettuna muuntaja-astian kannelle. (9, s. 379.)

### 6.2.3 Öljyn lämpötila

Öljyn lämpörele mittaa esimerkiksi kapillaariputken avulla muuntajaöljyn lämpötilaa. Mittari on varustettu koskettimilla. Hälytys- ja laukaisukoskettimien raja-arvot ovat käyttäjän aseteltavissa. Hälytyskoskettimen aktivoituminen viestii välittömästä muuntajan kuormituksen vähentämisen tarpeesta. Kuormitustilanteen jatkuessa ja öljyn lämpötilan noustessa edelleen, lämpörele lähettää laukaisukäskyn.

400 MVA muuntajat ovat kooltaan suuria, joten paikallisia öljyn lämpötilaeroja voi esiintyä. Tästä syystä suurmuuntajiin asennetaan kaksi lämpörelettä eripuolille muuntajaa. (9, s. 379.)

### 6.2.4 Käämin lämpötila

Muuntajan käämin lämpötilan kuvaaja mittaa käytännössä käämiä ympäröivän öljyn lämpötilaa. Lämpötilamittaukseen voidaan käyttää myös releessä olevaa lämmitysvastusta. Vastukseen syötetään virtaa, joka on suoraan verrannollinen käämissä kulkevaan virtaan. Näin ikään kuin matkitaan käämin lämpötilaa. 400/110/20 kV muuntajassa on käämin lämpötilamittaus jokaisen jänniteportaan käämissä. Kuvaajassa on aseteltavissa hälytys- ja laukaisukoskettimet. (9, s. 379.)

Uusissa muuntajissa on käytössä optinen lämpötilan mittaus. Käämien lämpötilaa monitoroidaan valokuituyhteyksien avulla ja monitorointijärjestelmä voi tarvittaessa laukaista muuntajan verkosta



mittaamansa datan perusteella (9, s. 379). Optinen lämpötilan mittaus voi ohjata muuntajan jäähdytykseen käytettäviä tuuletinryhmiä.

### **6.2.5 Muut ei-sähköiset suojat**

Muuntajan ja käämikytkimen öljyn korkeutta mitataan öljyn paisuntasäiliöstä. Muuntajan paisuntasäiliössä mittauksia voi olla kaksi, käämikytkimen paisuntasäiliössä tyypillisesti yksi. Öljyn korkeuden mittaus ei laukaise muuntajaa verkosta. Öljyn korkeuden mittaukselle voidaan asettaa rajat pinnan laskiessa liikaa tai noustessa liikaa. Kun öljyn pinta saavuttaa ylä- tai alarajan, mittalaite lähettää hälytyksen kaukokäyttöjärjestelmään.

Uusimmissa muuntajissa voi olla käytössä muuntajaöljyn kaasuanalysaattori. Analysaattori mittaa öljyn kaasuuntumista ja lähettää tiedon asema-automaatiojärjestelmään milliampeeriviestinä tai tietoliikenneyhteydellä.

Muuntajaa suojataan ylijännitteiltä luvussa 4.6 esitellyillä ylijännitesuojilla. Ylijännitesuojat voidaan asentaa vaiheen ja maan välille. Suojat asennetaan kaikille jänniteportaille sekä tähtipisteelle. 20 kV puolella ylijännitesuojia käytetään joissain tapauksissa myös vaiheiden välille kytkettynä.

## 7 TESTAUS JA KÄYTTÖÖNOTTO

Sähköaseman suojarleiden asennuksia ja käyttöönottoja koskevat sähkölaitteistoille yleisesti annetut määräykset laitteiden turvallisuudesta ja yhteensopivuudesta. Suojareille suoritetaan sähköturvallisuuteen ja määräyksiin liittyvien tarkastuksien lisäksi myös laajat toiminnalliset testaukset.

Ennen suojarleiden käyttöönottoa on hyvin tärkeää varmistaa suojarleen oikea toiminta. Releen tulee toimia asiakkaan laatimien asetteluiden ja suojauslogiikan mukaisesti.

### 7.1 Määräykset ja vaatimukset

Suomessa on voimassa sähköturvallisuuslaki STL 1135/2016. Laki ja sen noudattaminen varmistaa sähköturvallisuuden perusvaatimusten täyttymisen sekä sähkölaitteiston käytön turvallisuuden. Lisäksi laissa on tarkat määräykset sähkömagneettisten häiriöiden haitallisten vaikutusten estämiseksi. Laissa on ohjeistus sähkötöiden ja -laitteistojen vaatimustenmukaisuuteen ja niiden valvontaan. Lakia sovelletaan kaikkiin sähkölaitteisiin ja -laitteistoihin. Määräysten toteutumista valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKES. (27, s. 12–13.)

Suomen valtioneuvosto on antanut sähköturvallisuuslakiin perustuvan asetuksen VNa 1434/2016. Asetus koskee sähkölaitteistojen kunnossapitoa, huoltoa ja tarkastuksia. (28.)

Sähköaseman laitteistoja koskevia SFS-standardeja on useita. Tärkeimpiä ovat yli 1 kV vaihtojännitejärjestelmiä koskeva standardi SFS 6001, sekä alle 1 kV järjestelmiä koskeva standardi SFS 6000 (9, s. 76). Yksityiskohtaisempia laitekohtaisia vaatimuksia on asetettu kansainvälisissä IEC- ja CENELEC-standardeissa. Näitä vaatimuksia noudatettaessa oleelliset turvallisuusvaatimukset täyttyvät automaattisesti. (9, s. 76.)

Tähän opinnäytetyöhön liittyvässä projektissa tilaaja on asettanut omat vaatimuksensa. Sähköaseman asennukset, suunnitelmat, laitekonfiguraatiot ja testaukset suoritetaan tilaajan laatimien speksien mukaisesti. Speksien tarkoituksena on luoda yhdenmukaisuutta eri sähköasemaprojektien välille. Projekteilla voi olla eri toimittaja, joten toimittajien välillä voi olla eroavaisuuksia. Yhtenäisillä

toteutustavoilla huolto-, kunnossapito- ja korjaustyöt ovat huomattavasti helpompi suunnitella ja toteuttaa.

## 7.2 Testausprosessi

Relesuojauksen testauksella pyritään todentamaan laitteiston toiminta ennen käyttöönottoa. Laitteet ja järjestelmät ovat monimutkaisia, joten varhainen testaaminen ja käyttöönottoon valmistautuminen on välttämätöntä.

FAT-testaus eli factory acceptance test suoritetaan tyypillisesti laitteiden valmistajan tai sähköasematoimittajan tiloissa. FAT-testaus suoritetaan yhdessä tilaajan kanssa valmistellun testausohjelman pohjalta. Testausten tarkoituksena on suorittaa mahdollisimman laajat testaukset ennen työmaavaihetta, jotta suurimmat ongelmakohdat eivät kasaannu projektin loppuvaiheille. FAT-vaiheessa on vielä mahdollista tehdä muutostöitä ilman suurta vaikutusta projektin kokonaisaikatauluun. Testausta valvoo laitteiston tilaaja. Suojausjärjestelmän osalta FAT-testaus sisältää muun muassa seuraavat toimenpiteet, jotka eivät ole listattuna tärkeysjärjestyksessä:

- relekaapin silmämääräinen tarkastus
- laitteiden tyyppin ja valmistusnumeroiden tarkastukset
- laitekonfiguraatioiden tarkastus, lataus ja päivitykset
- releen toiminnallisuustestaukset testilaitteella
- releen sisääntulojen, lähtöjen ja väläsignaloinnin testaus
- piirikaavioiden ja suunnitelmien tarkastus ja päivitykset
- relekaapin sisäisten virtapiirien toiminnallinen testaus ja tarkastus.

SAT-testaus eli site acceptance test on lopullinen käyttöönottoon valmisteleva testausprosessi. SAT-testaukset noudattavat samankaltaista kaavaa kuin FAT-testit. SAT-testauksissa testataan kaikki sähköaseman toiminnot suojaus-, ohjaus-, apusähkö- ja yhteisten järjestelmien osalta. Myös SAT-testausta valvoo tilaaja. SAT- testaukset tehdään tilaajan kanssa yhteistyössä laaditun suunnitelman mukaisesti. SAT-testausten jälkeen laitteistojen tulisi olla valmiina käyttöönottoon. Testivaihe voi alkaa, kun suurin osa aseman laitteistoista on asennettu ja lopullista asennusta vastavassa tilassa.

### 7.3 Käyttöönotto

Ennen sähköaseman käyttöönottoa suoritetaan luvussa 7.1 esitelyjen standardien ja määräysten mukaiset tarkastukset. Tarkastuksia, tai niiden sisältöä ei tässä käydä tarkemmin läpi. Käyttöönotto voidaan aloittaa, kun tarkastukset on tehty ja vaaditut havaitut puutteet korjattu. Käyttöönotto suoritetaan urakoitsijan laatiman ja tilaajan hyväksymän käyttöönotto-ohjelman mukaisesti. Käyttöönotto-ohjelma sisältää kaikki suoritettavat toimenpiteet yksityiskohtaisesti suoritusjärjestyksessä. (27.)

Jännitteistä käyttöönottoa varten tarvitaan kytkentäpäätös. Kytchentäpäätöksen perusteella laaditaan kytkentäohjelma. Kytchentäohjelma on suunnitelma kytkennöistä, joilla sähköasema tai sen osa saatetaan jännitteiseksi. (27.)

Kun sähköaseman osa on tehty jännitteiseksi, suojarieleille suoritetaan jännitteiden ja virtojen varmistusmittauksia. Suojauksen toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että rele mittaa jännitteet ja virrat oikein. Mittausten oikeellisuus varmistetaan mittaamalla jännitteet ja virrat yleismittarilla jostaisesta relekaapista suojarielelle meneviltä riviliittimiltä. Mittaukset on hyvä suorittaa käyttöönoton yhteydessä.

## 8 TESTAUSLAITTEISTO

Suojareleiden suojausfunktioiden ja -toimintojen testauksessa tarvitaan laitetta, jolla voidaan syöttää releelle normaalin toimintatilanteen ja vikatilanteiden suuruisia jännitteitä ja virtoja. Testilaitteella pitää pystyä simuloimaan kaikki mahdolliset suojauskohteen vikatyypit.

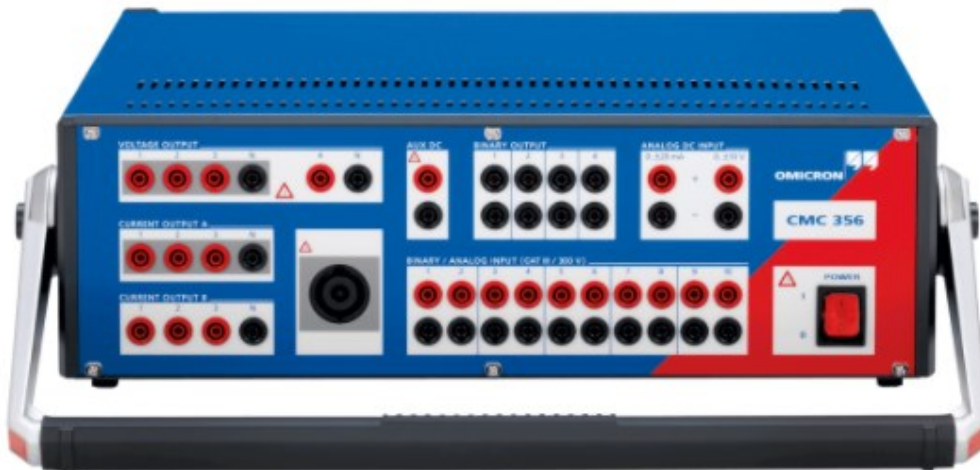
Laitteelle rakennetulla ohjelmalla simuloidaan vikatilanteita ja tallennetaan releen käyttäytyminen. Testiohjelmaa voi jälkikäteen tarkastella ja todeta releen oikea toiminta. Käyttäjä voi itse kytkennöillä valita, mitä tietoja releeltä tallennetaan.

### 8.1 Omicron CMC-356-testilaite

Tässä opinnäytetyössä releiden testaamiseen käytettiin Omicronin valmistamaa CMC-356-testilaitetta (kuva 25). Laitteella pystyy testaamaan kaikki sähköverkon suojarleet (21). Testauksissa käytettiin lisäksi Omicron ISIO -lisälaitetta, jolla saa käyttöön lisää binäärituloja ja -lähtöjä. Testilaite yhdistetään tietokoneeseen ethernet-kaapelilla.

Laitteessa on käytettävissä ja ohjelmoitavissa:

- jänniteulostuloja 4 x 300 V
- virtaulostuloja 6 x 32 A
- tasajännitelähde 0–246 VDC ulkoisille laitteille
- 4 binääristä ulostuloa
- 10 binääristä sisääntuloa
- analoginen mittauskanava 0–10 V
- analoginen mittauskanava
- IEC 61850 väyläliityntä (21.)



KUVA 25. Omicron CMC-356-testilaite (21)

## 8.2 Omicron test universe -ohjelma

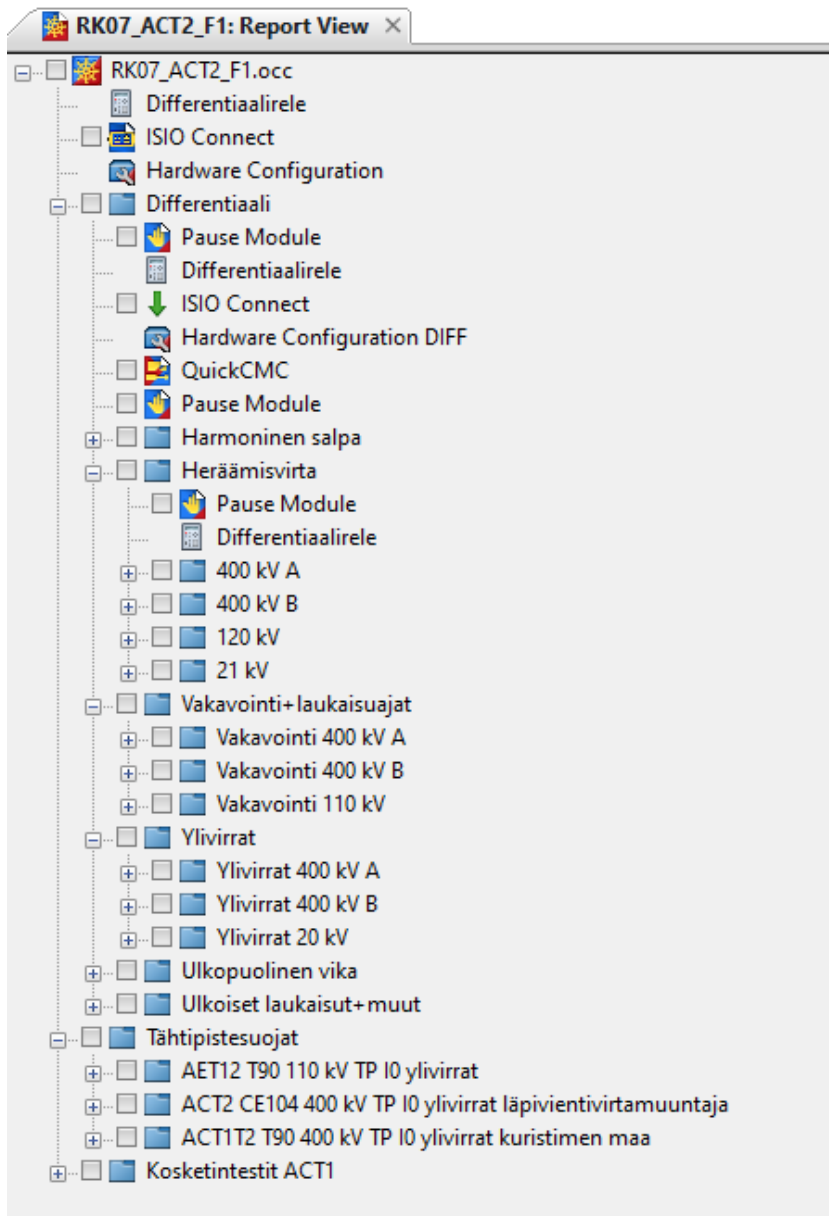
Testilaitetta käytetään Omicron test universe -ohjelmistolla. Test universe on ohjelmistokirjasto, joka sisältää erilaisia testimoduuleita. Suojareleen koestusohjelma rakennetaan useista erilaisista testimoduuleista. Yhdellä testimoduulilla testataan yleensä yhden suojausfunktion toiminta. Esimerkiksi overcurrent-moduulilla voidaan testata ylivirtasuojan havahtumis- ja palautumisajat sekä -virrat. Testimoduulit ovat hyvin muokattavissa testaustarpeiden mukaan, ja oikein rakennettuna koestusohjelmaa voi käyttää uudelleen vain pienillä muutoksilla. Ohjelmaan voi tuoda releen asetelut suoraan RIO-tiedostona, jolloin testimoduulien varsinainen tekeminen helpottuu huomattavasti.

## 9 KOESTUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN

Hyvin tehty koestusohjelma on projektin etenemisen kannalta tärkeä. Projekti pysyy aikataulusaan, kun koestusohjelma on ajankäytöllisesti optimoitu. Ohjelman pitää testata suojausfunktiot riittävällä tarkkuudella ja täyttää laajuudeltaan asiakkaan vaatimukset.

Koestusohjelman rakentaminen aloitetaan käytännössä nollasta. Aluksi luodaan testiobjekti, johon määritellään testattavan suojausalueen kaikki asetellut. Asetellut sisältävät kaikki differentiaalitoiminnot, ylivirtakäyrät ja nollavirtakäyrät. Ohjelma tehdään muuntajan differentiaalireleelle, joten testiobjektiin syötetään myös muuntajan nimellisarvot. Differentiaalisuojaus on integroituna myös ylivirta- ja tähtipistesuojaus, joten testiobjektiin määritellään suojaustoimintoja suhteellisen paljon.

Toisessa vaiheessa jäsenellään testiohjelman suoritusjärjestystä ja luodaan ensimmäinen hardware-konfiguraatio. Hardware-konfiguraatiossa määritellään koestuslaitteen kytkentä relekaappiin. Optimaalisessa koestusohjelmassa erilaisia hardware-konfiguraatioita käytetään mahdollisimman vähän, mutta kuitenkin riittävän kattavasti, jotta kaikki releen koskettimet tulee testattua. Testiohjelman suoritusjärjestys kannattaa rakentaa mahdollisimman selkeäksi ja ryhmitellä testimoduulit suojausfunktioiden mukaan. Näin ohjelma etenee loogisesti ja sitä on helppo käyttää ja seurata. Kuvassa 26 näkyy lopullisen testiohjelman kansiorakenne.



KUVA 26. Koestusohjelman kansiorakenne

Kolmannessa vaiheessa luodaan tarvittava määrä testimoduuleita jokaiseen ryhmään. Yhden testimoduulin rakentaminen on suhteellisen hidasta, joten useamman samankaltaisen testimoduulin luonnissa kannattaa hyödyntää edellisen kopiointia. Testimoduulit rakennetaan releasettelujen ja tilaajan vaatimusten perusteella. Tilaaja on laatinut jokaiselle suojauskohteelle yksityiskohtaisen koestusohjeen, minkä mukaan testiobjektit rakennetaan.



Ohjelmaan kannattaa lisätä kommentteja mahdollisimman paljon, jotta ohjelman käyttö olisi selkeää myös muille koestajille. Lopulliseen ohjelmaan tuli yhteensä 283 osaa, joten oikea ryhmittely, testimoduulien johdonmukainen nimeäminen sekä kommentointi on erittäin tärkeää.

Neljännessä vaiheessa ohjelma on lähes valmis ja varsinainen koestus voidaan aloittaa. Koestusohjelman edetessä huomataan lähes aina kehittymismahdollisuuksia, jotka helpottavat tai nopeuttavat testausta. Koestusohjelma kehittyy käytännössä jokaisella testauskerralla. Ensimmäisen releen testaaminen vie tyypillisesti hieman enemmän aikaa, sillä ohjelman yksityiskohtia joutuu yleensä optimoimaan.

Ensimmäisen releen koestamiseen meni aikaa noin kaksi päivää. Toiseen releeseen aikaa käytettiin noin viisi tuntia. Valmis ohjelma jäi käyttöön ja sitä varmasti hyödynnetään muissakin projekteissa sekä kehitetään jatkossa lisää. Testiohjelma on luottamuksellinen, joten sitä ei tässä raportissa julkaista.

## 10 POHDINTA

Opinnäytetyön aikana työskentelin eräässä sähköasemaprojektissa relekoestajana. Muuntajan koestusohjelma rakennettiin 400 kV järjestelmän FAT-testauksien yhteydessä ja sillä testattiin kaikki projektin muuntajien differentiaalisuojat. Työn aihe oli erittäin hyvä, koska syventyminen differentiaalireleeseen ja muuntajan suojausteoriaan kehitti varmasti ammattitaitojani.

Opinnäytetyössä päästiin mielestäni hyvin tavoitteeseen. Koestusohjelmasta tuli selkeä ja helppokäyttöinen. Ajallisesti ohjelman tekeminen noudatti sähköasemaprojektin testausaikataulua, eikä ohjelman rakentaminen vaikuttanut projekti aikatauluun.

Opinnäytetyön raporttiin oli helposti saatavilla materiaalia. Raportin aihealueen rajaamisessa ja käsittelyssä oli hieman haasteita. Koestusohjelman, releasetteluiden ja projektimateriaalin luottamuksellisuus rajoittaa paljon raportissa julkaistavaa sisältöä.

## LÄHTEET

1. Fingrid 2021. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2019–2030. Hakupäivä 29.10.2021. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon\\_kehittamissuunnitelma-2019-2030.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon_kehittamissuunnitelma-2019-2030.pdf).
2. Enersense 2021. Tietoa Meistä. Hakupäivä 22.10.2021. <https://enersense.fi/tietoa-meista/>.
3. Fingrid 2021. Suomen sähköjärjestelmä. Hakupäivä 24.10.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>.
4. Fingrid 2020. Fingridin sähkösiirtoverkko. Kuvakaappaus. Hakupäivä 24.10.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>.
5. Säteilyturvakeskus 2021. Sähkösiirto ja -jakelu. Hakupäivä 31.10.2021. <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>.
6. Energiavirasto 2021. Verkkotoiminnan luvanvaraisuus. Hakupäivä 31.10.2021. [https://energia-  
virasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus](https://energia-<br/>virasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus).
7. Energiavirasto 2021. Verkkoon liittäminen. Hakupäivä 31.10.2021. <https://energiavirasto.fi/verkkoon-liittaminen>.
8. Tuulivoimayhdistys 2021. Tuulivoima Suomessa kartta. Kuvakaappaus. Hakupäivä 31.10.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/kartta>.
9. Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto.
10. ABB 2016. Substation care. Hakupäivä 5.11.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A6175&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

11. ABB 2020. Ekotehokas vaihtoehto SF<sub>6</sub>-kasvihuonekaasuun pohjautuville suurjännitekatkaisijoille. Hakupäivä 5.11.2021. <https://new.abb.com/news/fi/detail/61852/ekotehokas-vaihtoehto-sf6-kasvihuonekaasuun-pohjautuville-suurjannitekatkaisijoille>.

12. ABB 2021. Dead tank circuit breakers. Hakupäivä 5.11.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107992A1056&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

13. ABB 2018. Horizontal center break disconnecter. Hakupäivä 6.11.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1YVA000106&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

14. ABB 2018. Semi-pantograph disconnecter. Hakupäivä 6.11.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1YVA000109&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

15. Artech 2021. INDUCTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS. Hakupäivä 7.11.2021. <https://www.artech.com/en/ut-series-inductive-high-voltage-transformers>.

16. Artech 2021. High voltage current transformers. Hakupäivä 7.11.2021. <https://www.artech.com/en/ca-series-hv-current-transformers>.

17. Artech 2021. Low voltage current transformers. Hakupäivä 7.11.2021. <https://www.artech.com/en/current-transformers-1>.

18. Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto.

19. ABB 2019. High voltage surge arresters Buyer's guide. Hakupäivä 31.10.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HSM954312-00en&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

20. ABB 2018. Overvoltage protection Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems. Hakupäivä 31.10.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HC0075561&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
21. Omicron 2021. CMC-356 brochure. Hakupäivä 21.11.2021. <https://www.omicronenergy.com/download/document/0056076E-AA6E-4E77-975F-FE459785B7C3/>.
22. Fingrid 2020. Tiedote. Hakupäivä 22.11.2021. <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2020/tehomuuntaja-saapui-sloveniasta-pyhanselan-sahkoasemalle/>.
23. ABB 2020. Transformer insulation & components. Hakupäivä 27.11.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A3302&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
24. Halmemies, Reino 1981. Sähkökoneet ja muuntajat. Helsinki: Helsingin liikekirjat Oy.
25. Aura, Lauri & Tonteri, Antti 2002. Teoreettinen sähkötekniikka. Helsinki: WSOY.
26. Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Vantaa: Tammertekniikka.
27. Heikonen, Markus 2021. Opinnäytetyö. Sähköaseman käyttöönottoprosessin hallinta ja kehittäminen. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 8.1.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500344/Markus\\_Heikonen.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500344/Markus_Heikonen.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
28. Valtioneuvoston asetus sähkölaitteistoista Vna 1434/2016. Hakupäivä 8.1.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161434>.
29. Siemens 2021. SIPROTEC 5 7UT82/85/86/87 Transformer Differential Protection – Manual. Hakupäivä 8.1.2022. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742405/siprotec-5-7ut82-85-86-87-transformer-differential-protection-manual?dti=0&pnid=25306&lc=en-WWW>.