

# Sähköasemakoestajan käsikirja

Opas 110/20 kV sähköasemien käyttöönotto-koestuksiin ja laitteisiin

Tuomas Kääpä

OPINNÄYTETYÖ  
Helmikuu 2022

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

KÄÄPÄ, TUOMAS

Sähköasemakoestajan käsikirja  
Opas 110/20 kV sähköasemien koestuksiin ja laitteisiin

Opinnäytetyö 45 sivua  
Tammikuu 2022

---

Tämän opinnäytetyön aiheena oli luoda perehdytysmateriaalia sähköasemien käyttöönottokoestuksiin. Käsikirja on tukena koestuksissa ja on sisällöltään tiivis sekä visuaalinen, jotta tarvittava tieto löytyisi nopeasti työmaalla. Käsikirjan aineisto perustui omaan kokemukseen ja vanhempien koestajien neuvoihin.

Opinnäytetyön julkinen raportointiosa pitää sisällään teoriaa sähköaseman eri laitteista kuten päämuuntajista, mittamuuntajista ja kytkinlaitteista. Pääpainona ovat 110/20 kV jännitetaso muuntoasemat, jotka syöttävät säteittäistä jakeluverkkoa. Raportti käsittelee myös jakeluverkon ja muuntajan relesuojausta. Pääpainona säteittäisen jakeluverkon suunnattumaasulkusuojaus ja ylivirtasuojaus. Raportissa käsitellään myös koestusta yleisellä tasolla menemättä yksityiskohtiin, sillä varsinainen käsikirja jää yrityksen käyttöön salassa pidettäväksi materiaaliksi.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Sähkölandia Oy, joka on erikoistunut sähköasema-  
maurakointiin ja teollisuuden sähköistykseen.

---

Asiasanat: sähköasema, koestus, relesuojaus

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

KÄÄPÄ, TUOMAS

Substation commissioner's handbook  
Guide to 110/20 kV substations commissioning and devices

Bachelor's thesis 45 pages  
January 2022

---

The topic of this thesis was to create introduction material for electrical substation commissioning and testing. The material would be a supporting factor when working in the field and its content is condensed and visual, so that the necessary information would be quickly available. The material behind the handbook is based on my own experience and the advice of senior engineers.

The public part of this thesis contains theory about electrical substations different devices such as transformers and switchgear. Main focus is on 110/20 kV voltage level substations, which feed a radial network. The report also entails on the theory of network and transformer relay protection. Main focus is on directed earth fault protection and overcurrent protection. Substation commissioning and protection testing is described on a general level in the report, since the handbook remains as a confidential document to the client.

The client of this thesis is Sähkölandia Oy, which specializes on electrical substation contracting work and industrial electric projects.

---

Key words: substation, relay protection, commissioning

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	SÄHKÖASEMAN LAITTEET .....	7
2.1	Päämuuntaja .....	7
2.1.1	Kolmivaihemuuntajan kytkentäryhmät ja rakenne .....	9
2.1.2	Käämikytkin .....	10
2.1.3	Paisuntasäiliö .....	11
2.1.4	Ilmankuivain .....	11
2.1.5	Lämpömittarit ja -releet.....	11
2.1.6	Kaasurele .....	12
2.2	Mittamuuntajat.....	12
2.2.1	Virtamuuntaja .....	13
2.2.2	Mittausvirtamuuntaja .....	15
2.2.3	Suojausvirtamuuntaja .....	16
2.2.4	Kaapelivirtamuuntaja .....	17
2.2.5	Jännitemittamuuntaja .....	18
2.3	Kytkinlaitteet.....	19
2.3.1	Katkaisija .....	20
2.3.2	Erotin .....	23
2.4	Kojeisto .....	24
2.5	Rinnakkaisreaktorit.....	25
2.6	Sähköaseman maadoitukset.....	26
3	RELESUOJAUS .....	28
3.1	Numeerinen suojarele .....	28
3.2	Jakeluverkon suojaukset.....	29
3.2.1	Ylivirtasuojaus .....	29
3.2.2	Suunnattu maasulkusuojaus .....	32
3.2.3	Kaksoismaasulkusuojaus .....	34
3.3	Muuntajan differentiaalisuojaus.....	35
4	KOESTUS.....	38
4.1	Aistinvarainen tarkastus .....	38
4.2	Suojausten koestus.....	39
4.2.1	Ylivirta- ja maasulkusuojaukset .....	41
4.2.2	Muuntajan differentiaalisuoja .....	41
4.2.3	Suojausten kausikoestus.....	42
4.3	Sähköaseman omakäyttö.....	43
4.4	Sähköaseman yleiset virtapiirit.....	44

4.4.1 Tasasähköjärjestelmä.....	45
4.4.2 Hälytys-, lukitus- ja laukaisupiirit.....	45
4.5 Ylimenovastus- ja maadoitusmittaukset.....	46
4.6 Mittamuuntajien koestus .....	47
4.7 Suurjännitekatkaisijan koestus.....	48
4.8 Erottimen koestus .....	49
4.9 Kaukokäyttökoestus.....	50
5 POHDINTA .....	51
LIITE 1. Koestuskäsikirjan sisällysluettelo .....	52
LÄHTEET.....	53

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni aiheena oli luoda Sähkölandia Oy:lle perehdytysmateriaalia sähköasemien käyttööntokoeistuksiin käsikirjan muodossa. Materiaalin on tarkoitus olla tukemassa työntekijää koestustehtävissä, sillä ne voivat olla laajoja ja sisältää paljon yksityiskohtia, jotka eivät välttämättä ole aina muistissa. Käsikirjan sisältö pyrittiin pitämään tiiviinä ja visuaalisena, jotta tarvittava tieto löytyisi nopeasti työmaalla. Perehdytysmateriaalin aineisto perustuu omaan kokemukseen ja vanhempien koestajien neuvoihin.

Opinnäytetyön raportointiosa käsittelee pääasiassa 110/20 kV muuntoasemia, jotka syöttävät säteittäistä jakeluverkkoa. Raportointiosa käsittelee sähköasemilla esiintyvien laitteiden, sähköverkon suojauksien teoriaa, joiden ymmärrys edesauttaa koestuksien onnistumisessa. Teoriakäsittelyssä ei kuitenkaan paneuduta kaikkiin yksityiskohtiin, vaan raportti pyrkii antamaan yleismaailmallisen kuvan sähköasemista.

Raportointiosa aloitetaan käsittelemällä sähköasemilla esiintyviä laitteita kuten päämuuntajaa, mittamuuntajia ja kytkinlaitteita. Toisessa käsittelyluvussa käydään läpi säteittäisen jakeluverkon ja päämuuntajan relesuojausta. Raportin käsitellessä käyttööntokoeistuksia keskitytään suojareleista pelkästään moderneihin numeerisiin suojareleisiin. Raportin viimeisessä luvussa käydään läpi varsinaisia koestusmenetelmiä yleisesti, ilman yksityiskohtiin paneutumista, sillä varsinainen koestuskäsikirja jää yrityksen salassa pidettäväksi aineistoksi. Koestuskäsikirjan sisällysluettelo on lisätty liitteeksi tähän raporttiin.

## 2 SÄHKÖASEMAN LAITTEET

Sähköasemaa voidaan pitää sähköverkon solmupisteenä, jossa voidaan suorittaa erilaisia kytkentöjä, muuttaa jännitetasoa tai jakaa sähköenergiaa pienemmille johtolähdöille. Aseman rakenne voi koostua laajemmasta aidatusta alueesta, jolla sijaitsee ulkokytkentäkenttä ja kojeistorakennus. Pienempiä kokonaan sisätiloissa sijaitsevia asemia kutsutaan kompakteiksi sähköasemiksi ja niitä käytetään paljon esimerkiksi kaupunki- ja taajamaympäristöissä, joissa on pinta-ala rajoituksia.

Sähköaseman sijoittamiseen verkkoon vaikuttaa moni tekijä kuten aseman läpi kulkeva teho ja sen tulevaisuuden kasvunäkymät ja millainen vaikutus sähköasemalla sen laajoine ulkokenttineen on ympäristöön ja sen maisemointiin. Lisäksi tärkeinä tekijöinä on taloudellisuus ja kuinka helposti sähköasemaa voidaan laajentaa tulevaisuudessa, mikäli sähkön jakelutarpeet kasvavat tai muuttuvat.

Sähköasema voi pääsääntöisesti olla pääteasema, johon siirtoverkko päättyy tai johdonvariasema, johon alueen läpikulkevasta siirto linjasta otetaan sähköistä tehoa esimerkiksi 20 kV jakeluverkkoon. Sähköasemaa suunniteltaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota suurista oikosulkuvirroista aiheutuviin vaikutuksiin ja ylijännitekestoisuuksiin. Sähköasemien yhteydessä on yleensä toteutettu loistehonkompensointi joko kondensaattoriparistoilla tai rinnakkaiskuristimilla eli reaktoreilla. Nykyään yleistyvän jakeluverkon maakaapeloinnin takia kapasitiivisen loistehon kompensointi tarve on kasvanut. (Hietalahti 2013, 106.)

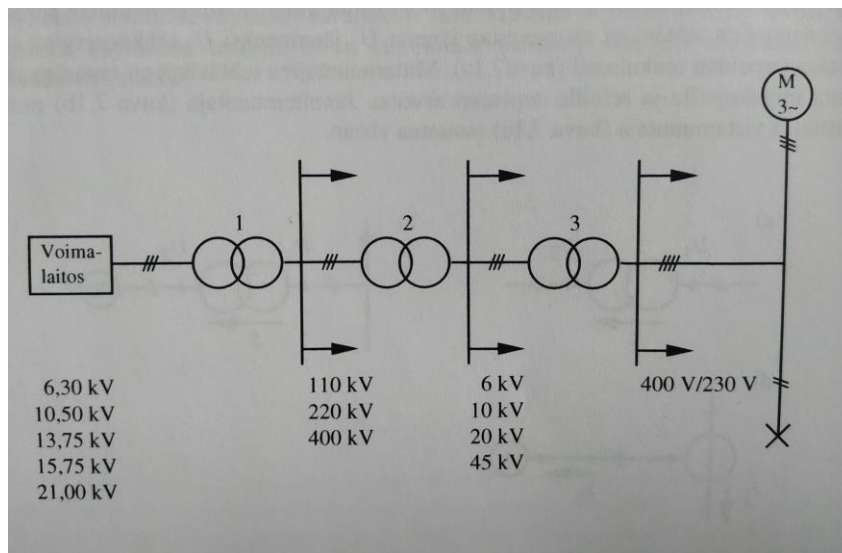
### 2.1 Päämuuntaja

Muuntaja on ehkä tärkein laite koko vaihtosähköverkossa, sillä sen avulla jännitetasoa voidaan muuttaa halutulle tasolle. Jännitetasoa muuttamalla se myös eristää kaksi eri jännitetasoista verkkoa toisistaan. Kuvassa 1 on ABB:n vuonna 2020 valmistama 25 MVA YND11-päämuuntaja.



Kuva 1. Sähköaseman päämuuntaja. 2021

Muuntajan merkitys sähköverkoissa selvenee ehkä parhaiten, kun seuraa energian kulkemaa matkaa aina tuotannosta kiinteistön kulutuspisteeseen (Kuva 2). Ensiksi sähköenergia tuotetaan verkkoon voimalaitoksessa, jonka generaattorin tuottama jännite ei voi juurikaan ylittää 30 kilovoltia sen käämitysten eristysteknisistä syistä. Tämä jännitetaso on liian alhainen, mikäli energiaa halutaan siirtää pitkiä matkoja ilman suuria häviöitä, sillä tehohäviöt kasvavat virran neliössä. Tämän takia voimalaitoksen yhteydessä on muuntaja, joka nostaa generaattorin tuottaman jännitteen 110, 220 tai 400 kV tasolle. Energia on tällöin siirtynyt alue- tai kantaverkkoon. Seuraavaksi jännitetaso muunnetaan jakeluverkko tasolle, joka on tyypillisesti Suomessa 20 kV. Lopullinen jännitteen muutos tapahtuu jakelumuuntamalla, joka tiputtaa jännitteen 400 V tasolle joka kiinteistöjen sähkönjakelun pääasiallinen jännitetaso Suomessa. (Aura & Tonteri 2009, 267-268.)



Kuva 2. Vaihtosähköverkon jännitetasot (Aura & Tonteri 2009, 268.)

### 2.1.1 Kolmivaihemuuntajan kytkentäryhmät ja rakenne

Kolmivaihemuuntajan käämitysten eri kytkennöillä voidaan vaikuttaa sen sähköisiin ominaisuuksiin. Käämit voidaan kytkeä joko tähti- (Y), kolmio- (D) tai hakatähtikytkentään (Z). Tähti- ja kolmiokytkentään käytetään sekä ylä- että alajännitetasoissa. Hakatähtikytkentään voidaan käyttää vain alajännitetasossa. Kuvassa 3 on taulukoitu kaikki standardisoidut muuntajan kytkennät. Ne voidaan jakaa neljään eri ryhmään, joilla on tunnusluvut 0, 5, 6 ja 11. Luku muodostuu toision ja ensiön välisestä vaihe-erosta, jota kuvataan kellotaulun lukemana. Ensiön vaihejännitteen osoitin voidaan kuvitella olevan minuuttiviisari, joka on lukemassa 12 tai 0. Toision osoitin on tällöin tunti viisari, joka osoittaa jotain neljästä aiemmin mainitusta lukemasta. Esimerkiksi Dy11 kytkennässä muuntajan toisio on yhden kellotaulun pykälän jäljessä eli  $360^\circ/12 = 30^\circ$ . 110/20 kV muuntoasemien päämuuntajien kytkentäryhmä on yleensä YNd11. (Aura & Tonteri 2009, 282.)

TUN- NUS- LUKU	KYT- KEN- TÄ	OSOITINKUVAT		KYTKENNÄT	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	DY5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Kuva 3. Kolmivaihemuuntajien kytkentäryhmät (Aura & Tonteri 2009, 281.)

Tehomuuntajat ovat usein metallirunkoisia ja öljytäytteisiä. Niiden sydämet on yleensä koottu noin 3 mm vahvaisista rautalevyistä, jotka on niputettu yhteen. Levyrakenne ja niiden pinnassa oleva pieni eristekerros pienentää muuttuvan magneettikentän aiheuttamia pyörrevirtoja, jotka lämmittävät sydäntä ja sitä ympäröivää öljyä. Rautasydämen ympärille kiedotut käämitykset ovat usein alumiinia tai kuparia. Ylä- ja alajännitekäämitykset ovat usein kiedottuna päällekkäin magneettisen hajavuon vähentämiseksi. Käämitykset on kuitenkin eristetty toisistaan eristelieryöllä, jossa on jäähdytyskanavia. Itse käämilanka on yleensä eristetty joko paperilla tai lakalla. (Aura & Tonteri 2009, 280.)

### 2.1.2 Käämikytkin

Suurien tehomuuntajien jännitetasoa on pystyttävä säätämään sen ollessa jännitteinen ja kuormitettu. Tämä toteutetaan käämikytkimen avulla, joka muuttaa muuntajan yläjännitetasoa johdinluku moottoriohjaimen avulla, jolloin muuntajan muuntosuhde muuttuu. Säätö tehdään muuntajan yläjännitepuolella virtojen

ollessa paljon pienempiä alajännitepuoleen verrattuna. 110/20 kV muuntoasemien päämuuntajien tyypillinen käämikytkimen säätö alue on  $\pm 9 \times 1,67 \% = \pm 15 \%$ . (Aura & Tonteri 2009, 282–283.)

### 2.1.3 Paisuntasäiliö

Öljytäytteisen muuntajan lämpeneminen vaikuttaa sen sisälle olevan öljyn tilavuuteen, jolloin muuntajan sisälle muodostuu ali- tai ylipainetta. Painevaihtelun takia muuntajan sisälle vuotaa ilmaa ja sen mukana öljyyn päätyy vettä ilman kosteuden mukana. Tämän takia öljytäytteisissä muuntajissa on erillinen paisuntasäiliön, jossa on tyhjää tilaa öljyn tilavuuden laajenemisen varalle. Paisuntasäiliö on yleensä hieman irti muuntajan muusta rungosta, jonka takia sen sisältämä öljy on viileämpää. Kosteus tiivistyy paisuntasäiliön pohjalla, jonka kautta se voidaan poistaa.

### 2.1.4 Ilmankuivain

Öljyn tilavuuden vaihtelun takia, paisuntasäiliöstä joko poistuu ilmaa lämpölaajenemisen aiheuttaman ylipaineen takia, tai sinne virtaa ilmaa öljyn jäähtymisen aiheuttaman alipaineen takia. Tätä ilmanliikettä kutsutaan muuntajan hengittämiseksi. Ilmankosteuden siirtymisen muuntajan sisälle minimoimiseksi, paisuntasäiliön ilma-aukossa on ilmankuivain. Tämän kuivaimen sisällä on yleensä sili-kageeliä, joka imee sisälle virtaavasta ilmasta kosteuden pois. Tämä geelipanos on vaihdettava säännöllisin väliajoin.

### 2.1.5 Lämpömittarit ja -releet

Muuntajan sisäistä lämpötilaa on mitattava mahdollisten vikatilanteiden varalta. Tätä varten muuntajan runkoon on tyypillisesti asennettu kaksi eri lämpömittaria. Muuntajalle kannella sijaitsevaan öljytäytteiseen lämpömittaritaskuun asennetaan kosketinlämpömittari. Muuntajan kylkeen on tyypillisesti asennettu kapillaarilämpömittari, jonka tuntoelin menee myös kannella sijaitsevaan lämpömittaritaskuun. Molemmissa mittareissa on kaksi sulkeutuvaa kosketinta, toinen laukaisua ja toinen hälytystä varten. 110/20 kV muuntoasemilla muuntajan lämpösuojaus laukaisee yleensä ulkokenttää syöttävän 110 kV katkaisijan, jolloin muuntaja

poistuu verkosta. Lämpömittarit myös yleensä ohjaavat muuntajan runkoon liitettyjen öljylauhduttimien tuulettimia.

### **2.1.6 Kaasurele**

Muuntajan sisällä tapahtuvan paikallisen kuumenemisen, purkaus- tai valokaari-ilmiöiden takia muuntajan käämitysten eristeaineet ja pääsäiliön sisältämä öljy alkavat hajoamaan kaasuksi. Muuntajan paisuntasäiliön ja pääsäiliön väliseen yhdysputkeen on yleensä asennettu kaasurele, johon tämä kaasu kerääntyy. Kaasun kerääntyminen releelle aiheuttaa uimurikytkimien sulkeutumisen, josta sähköasemalle välittyy hälytys, tai 110 kV katkaisija laukeaa, jolloin muuntaja ei ole enää verkossa. (Aura & Tonteri 2009, 288–289)

## **2.2 Mittamuuntajat**

Mittamuuntajien tehtävänä on muuntaa sähköaseman päävirtapiirissä esiintyviä virtoja ja jännitteitä suojareleille ja energiamittareille sopivaan arvoon. Lisäksi ne mahdollistavat mittausvirtapiirin galvaanisen erotuksen suuritehoisesta päävirtapiiristä. Mittamuuntajien toisioarvot ovat standardisoituja, mikä helpottaa laitteistojen yhteensovitusta keskenään. Mittamuuntajien ensiökäämitys on merkattu tunnuksella P (primary) ja toisiokäämitys tunnuksella S (secondary). Tunnukset ovat merkattuna yleensä muuntajien koteloihin ja liitäntöihin. Lisäksi mittamuuntajien toisiopiiri on maadoitettava yhdestä pisteestä vaarallisten ylijännitteiden muodostumisen estämiseksi.

Suurien jännitteiden ja virtojen mittaamiseen tarkoitettujen antureiden valmistus on sekä kallista, että hankala toteuttaa. Tästä syystä mittamuuntajat ovat teknilistaloudellisesti parempi ratkaisu. Mittamuuntajien ansiosta suojareleiden ja mittalaitteiden ei tarvitse olla päävirtapiirin välittömässä läheisyydessä, joka helpottaa sähköaseman rakentamisen teknistä toteutusta. Mittamuuntajien rakenne on hyvin samankaltainen verrattuna tehomuuntajiin, sillä niiden ensiö- ja toisiokäämitys on myös kiedottu rautasydämen ympärille. Sydämeen syntyy vaihtosähkön ansiosta magneettivuo, joka kytkee ensiön ja toision magneetti-

sesti toisiinsa. Ulkokentälle asennettavat mittamuuntajat ovat usein öljytäytteisiä, kun sähköaseman kojeistotilaan asennettavat muuntajat ovat sen sijaan vahartsieristeisiä. Mittamuuntajia on pääsääntöisesti kahta tyyppiä: virtamuuntajia ja jännitemuuntajia. Kuvassa 4 näkyy öljytäytteisiä ulkokentän virtamuuntajia



Kuva 4. Ulkokentän virtamuuntajat. 2021.

### 2.2.1 Virtamuuntaja

Virtamuuntajan tarkoituksena on muuttaa päävirtapiirissä esiintyvä suuri sähköinen virta suojarelleille ja energiamittareille sopivaan arvoon. Sähköverkossa esiintyvien virtojen suuri vaihtelu tuottaa haasteita niiden mittauksiin, sillä normaali kuormitusvirta voi olla vain kymmenesosa vikatilanteesta esiintyvästä virrasta.

Virtamuuntajan kaksi yleisintä rakennetyyppiä ovat läpivienti- eli kiskovirtamuuntaja ja reikävirtamuuntaja. Kiskovirtamuuntajan ensiö muodostuu sen läpi kulkevasta kuparikiskosta, kun taas reikävirtamuuntajassa johdin viedään muuntajan reiän muotoisen sydämen läpi. Reikävirtamuuntajan muuntosuhdetta

voidaan muuttaa viemällä johdin sydämen läpi useita kertoja. (Wallin 1998, 53–54.)

Virtamuuntajien nimelliset virrat ilmoitetaan suoraan ensiö- ja toisiovirtojen suhteella. Ensiön käämityksen nimellisvirrat on määritelty kansainvälisessä standardissa IEC 61869-2. Sen mukaan ensiön virtamuuntajan ensiön nimellinen virta täytyy olla lukujen 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 tai 75 kymmenkerrannainen. Virtamuuntajan muuntosuhdetta voidaan kuitenkin muuttaa kytkemällä sen sisäisiä käämityksiä sarjaan tai rinnan. Tämän ansiosta esimerkiksi 800/5 muuntosuhde on toteutettavissa. Yleensä vaihtokytkennät tehdään muuntajan ensiöpuolella.

Toision nimellisvirrat voivat olla joko 1 A tai 5 A, mutta myös 2 A nimellisvirran omaavia virtamuuntajia on käytössä. 5 A nimellisen toisiovirran virtamuuntajia käytetään yleensä kohteissa, joissa kaapelointietäisyydet ovat lyhyitä, sillä pienemmällä 1 A nimellisvirralla toisioon siirtyy suurempia ylijännitteitä oikosulkutilanteessa muuntajan muuntosuhteen takia. Mikäli mittamuuntajan toisioon on kytketty pidempi virtapiiri, on syytä käyttää 1 A nimellisvirrallista virtamuuntajaa, sillä 5 A virralla tehohäviöt kaapeleissa olisivat kohtuuttomat. (Mörsky 1993, 106.)

Virtamuuntajille on määritelty terminen nimellisvirta, jolla virtamuuntajaa voidaan kuormittaa kaikissa lämpötiloissa. Sen suuruus on yleensä 1,2 kertaa nimellisvirta, mutta voi myös olla vain nimellisvirran suuruinen. (Mörsky 1992, 103.)

Muista muuntajista poiketen, virtamuuntajan ensiökäämitys on kytkettynä sarjaan kuormituksen kanssa. Jotta virtamittaus olisi mahdollisimman tarkka, on virtamuuntajan päävirtapiiriin aiheuttama impedanssi oltava mahdollisimman lähellä nollaa. Virtamuuntajille on määritelty IEC-standardin mukaan nimellistaakat, eli toisioliittimien väliin kytketty impedanssi nimellisellä virralla. Toisioon kytketyn taakan suuruus määrää monia virtamuuntajan ominaisuuksia, kuten mittaustarkkuutta. Taakka ilmoitetaan näennäistehona eli voltiampeereina. Nimellistaakalla on laadittu IEC 61869-2-standardiin arvot: 1.5, 3, 5, 10, 15, 20,

30, 45 ja 60 VA. Virtamuuntajan tarkkuus on parhaimmillaan, kun toisioon kytketty taakka on 25 % - 100 % nimellistaakasta. (Mörsky 1992, 106–108.)

Käytössä olevan virtamuuntajan toisioliittimiä ei saa jättää aukinaiseksi sillä ilman toisiossa syntyvää vastakkaista magnetomotorista voimaa muuntajan sydän kyllästyy suuren ensiövirran takia ja alkaa kuumenemaan rauta- ja magneetintihäviöiden takia. Virtamuuntajan toisiossa suuren johdinkierrosmäärän takia, toisio liittimiin indusoituu kymmenien kilovolttien suuruinen jännite, joka voi olla vaarallinen niin käyttäjille, kuin laitteiden eristyksille. Virtamuuntaja tuhoutuu lopulta, mikäli toisiota ei oikosuljeta tai ensiövirtaa katkaista. Tämän takia virtamuuntajan toisiovirtapiirissä ei ole sulakesuojausta tai avattavia kytkimiä.

Virtamuuntajan sydänmateriaalin ominaisuudet vaikuttavat sen mittaustarkkuuteen, eli kuinka hyvin se pystyy toistamaan ensiössä esiintyvän virran toisiossaan. Tämän takia sähkönjakeluverkoissa käytetyissä virtamuuntajissa on useampi sydän, joilla on eri käyttötarkoitukset.

### **2.2.2 Mittausvirtamuuntaja**

Mittauspiireihin tarkoitettu sydän on kiinteää rautakappale, jonka takia sen magneettinen johtokyky on hyvä. Tämän takia magneettisista hajavuota syntyy vähän ja muuntaja pystyy toistamaan tarkasti ensiössä esiintyvät virrat toisiossaan. Tämä ominaisuus on tärkeä energiamittauksessa, jolloin halutaan päästä suuriin tarkkuuksiin taloudellisista syistä. Mittamuuntajan kiinteä rautasydän kylästäyy suurista ensiövirroista, jolloin sen magneettipiiri ei pysty siirtämään enempää energiaa toisioon. Tämä suojaa toisioon kytkettyjä mittareita ja laitteita liian suurilta virroilta esimerkiksi oikosulkuutilanteesta. Kuviossa 1 on mittausvirtamuuntajien tarkkuusluokat, jotka on laadittu IEC 61869-2 standardin mukaisesti. Taulukossa on kerrottu mittausvirhe eri kuormituksilla, sekä ensiön ja toisiossa välillä syntyvä vaihe-ero, joka ilmaistaan kellotaulun minuutteina (1 tunti vastaa 30 astetta). Lisäksi taulukon oikean reunan sarake kertoo kyseisen tarkkuusluokan käyttötarkoituksen.

Class	For burdens <sup>1)</sup>	Limits of errors			Application
		at % rated current	Ratio error %	Phase displacement minutes	
0.1	25-100% of rated burden	5	0.4	15	Laboratory
		20	0.20	8	
		100	0.1	5	
		120	0.1	5	
0.2	25-100% of rated burden <15 VA 1 VA-100%	5	0.75	30	Precision revenue metering
		20	0.35	15	
		100	0.2	10	
		120	0.2	10	
0.2S	25-100% of rated burden <15 VA 1 VA-100%	1	0.75	30	Precision revenue metering
		5	0.35	15	
		20	0.2	10	
		100	0.2	10	
0.5	25-100% of rated burden	5	1.5	90	Standard commercial metering
		20	0.75	45	
		100	0.5	30	
		120	0.5	30	
0.5S	25-100% of rated burden	1	1.5	90	Precision revenue metering
		5	0.75	45	
		20	0.5	30	
		100	0.5	30	
		120	0.5	30	

Kuvio 1. Mittausvirtamuuntajien tarkkuusluokat (ABB 2015, 48)

### 2.2.3 Suojausvirtamuuntaja

Suojauksiin käytettävien virtamuuntajien on pystyttävä toistamaan vikavirrat toisiossa, jotta suojarele pystyy laukaisemaan oikean suojausportaan. Esimerkiksi ensimmäisen ja kolmannen ylivirtaportaan ero voi olla peräti kiloampeerin verran, jonka takia niiden kohdalla rautasydämen kyllästyminen ei haluttua. Tämän takia sydämeen on jätetty pieni ilmapäli, jonka ansiosta sydän ei kyllästy suurista ensiövirroista. Magneettinen hajavuo on kuitenkin paljon suurempi kuin kiinteissä rautasydämissä, jonka takia virtamuuntajan tarkkuus kärsii, mutta tämä on hyväksyttävä ominaisuus suojaustoiminnan kannalta. Taulukossa 1 on lueteltu suojausvirtamuuntajan IEC 61869-2 standardin mukaiset tarkkuusluokat nimellisvirralla.

TAULUKKO 1 Suojausvirtamuuntajan tarkkuusluokat (Mörsky 1992, 111.)

Tarkkuusluokka	Virtavirhe (%)	Vaihe-ero minuutteina
5P	1	60
10P	3	-

Taulukosta voidaan huomata, että suojaustarkoituksiin käytettyjen virtamuuntajien tarkkuusvaatimukset ovat paljon väljemmät verrattuna mittausvirtamuuntajiin. 5P luokituksen virtamuuntajia käytetään yleensä keskijännitteillä, sillä niissä on täysin suljettu sydän. 10P-luokituksen virtamuuntajia taas sen sijaan käytetään suurjännitteillä, sillä niiden sydämessä on ilmarako. Tämän takia kyseisellä tarkkuusluokalla ei ole vaihe-erovaatimusta. (Mörsky 1992, 111–112.).

#### 2.2.4 Kaapelivirtamuuntaja

Keskijänniteverkossa tapahtuvan maasulun nollavirran havaitseminen toteutetaan sähköasemalla kaapelivirtamuuntajan avulla. Sähköaseman 20 kV lähdön kolmivaihekaapeli viedään kaapelivirtamuuntajan renkaan muotoisen sydämen läpi. Normaalisissa käyttötilanteissa virtamuuntajan toisioon ei indusoidu merkittävää virtaa, sillä kaikkien kolmen vaiheen aiheuttaman magneettivuon nollasummaehto täyttyy. Maasulun aiheuttaman epäsymmetrian takia kaapelivirtamuuntajan toisioon indusoituu nollavirtaa. Maasuluissa esiintyvien pienien virtojen takia kaapelivirtamuuntajat ovat yleensä suojausvirtamuuntajien sijaan mittausvirtamuuntajia. Kuvassa 5 nähdään kaapelivirtamuuntaja, jonka läpi on viety 20 kV johtolähdön syöttökaapeli.



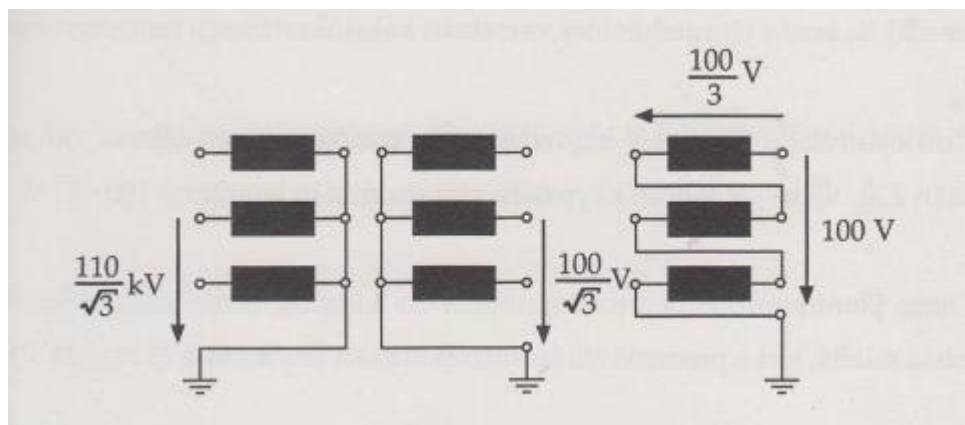
Kuva 5. 20 kV lähtökennon kaapelivirtamuuntaja. 2021.

Kaapelivirtamuuntajan läpi vietävän kaapelin suojajohdin tai vaippa on palautettava takaisin virtamuuntajan läpi, jonka jälkeen se yhdistetään sähköaseman maadoitukseen. Paljas vaippa taikka suojajohdin ei myöskään saa koskea johta-

viin rakenteisiin ennen kaapelivirtamuuntajaa. Tällä menettelyllä estetään kaapelin vaipassa mahdollisesti kulkevan virran aiheuttama maasulkusuojauksen vikalaukaisu. (Mörsky 1992,126.)

### 2.2.5 Jännitemittamuuntaja

Jännitemuuntajan tehtävänä on muuttaa sähköaseman päävirtapiiriin suuret jännitteet mittalaitteille ja suojuureille sopiviksi jännitteiksi. Virtamuuntajasta poiketen, jännitemuuntaja kytketään rinnan mitattavan ensiöpiiriin kanssa ja niillä on yleensä vain yksi rautasydän, jolla on toteutettu mittaus- sekä suojaustoiminnot. Jännitemuuntajan toisiossa on yleensä vaihekäämityksen lisäksi avokolmiokäämitys, jota käytetään pelkästään maasulkusuojauksen toteuttamiseen. Avokolmiokytkennässä jännitemuuntajan vaiheet ovat sarjassa, mutta viimeinen ja ensimmäinen vaihe ovat yhdistämättä mistä seuraa aukinainen kolmiokytkentä. Tällöin avoimilta navoilta voidaan mitata kolmivaihejärjestelmän tähtipisteen jännite. Samoin kuin virtamuuntajalla, jännitemuuntajan tosion virtapiiristä on maadoitettava yksi piste ylijännitesuojauksen vuoksi. Jännitemuuntajan toisiovirtapiiriä ei sen sijaan saa oikosulkea ja se täytyy suojata oikosululta sekä ylikuormitukselta. Kuvassa 6 on kuvattuna jännitemuuntajan käämien kytkentä.



Kuva 6. Jännitemuuntajan kytkentä (Mörsky 1992, 87)

Jännitemuuntajat voidaan jakaa rakenteeltaan kahteen eri luokkaan: magneettisiin ja kapasitiivisiin jännitemuuntajiin. Magneettisen jännitemuuntajan ensiökäämitys on suoraan kytkettynä päävirtapiiriin ja sen sijaiskytkentä on lähes identtinen tehomuuntajan kanssa. Kapasitiivinen jännitemuuntajan ensiössä sen

sijaan on kondensaattoreilla toteutettu kapasitiivinen jännitteen jako, jonka perään on kytketty tavallinen magneettinen jännitemuuntaja. Jännitteenjaolla päävirtapiirin jännite tiputetaan noin kymmeneen kilovolttiin, ja jännitemuuntajan muuntaa halutun toisiojännitteen mittareille ja laitteille. (Mörsky 1992, 96.)

IEC 61869-2-standardi antaa paljon liikkumavaraa jännitemuuntajan nimellisen ensiojännitteen suhteen ja se voidaan valita käyttökohteen mukaan. Suomessa jännitemuuntajan toision nimellinen jännite, kun se on kytkettynä vaiheen ja maan väliin on  $200/\sqrt{3}$  V tai  $100/\sqrt{3}$  V, joista ensimmäistä käytetään, mikäli ensiön jännitetaso on ainakin 220 kV. Kuitenkin näissäkin tapauksissa  $100/\sqrt{3}$  V jännitettä käytetään enenevässä määrin. Toision avokolmiokäämityksen nimellisjännite on yleensä  $200/3$  V tai  $100/3$  V. (Mörsky 1992, 88.)

Tyhjäkäyvän jännitemuuntajan induktanssin ja sähköasemalla esiintyvien kapasitanssien kuten esimerkiksi tyhjäkäyvien kiskostojen välille saattaa muodostua resonanssiipiiri. Tätä värähtelyä kutsutaan ferroresonanssiksi ja sillä saattaa olla hyvinkin haitallista vaikutuksia kuten maasulkusuojaukset tarpeettomia laukaisuja tai jopa jännitemuuntajan tuhoutuminen liiallisesta kuumenemisestä. Ferroresonanssia vaimennetaan lisäämällä resistiivinen vastus jännitemuuntajan avokolmiokäämityksen napojen väliin. Vastuksen mitoittamiseen vaikuttaa jännitemuuntajan rautasydämen massa. (Mörsky 1992, 95.)

### 2.3 Kytkinlaitteet

Kytkinlaitteiden tarkoitus on tarvittaessa muuttaa verkon kytkentätilannetta, jolloin sähköverkossa liikkuvaa energiaa voidaan ohjata. Kytkinlaitteiden avulla myös voidaan erottaa sähköverkon vioittunut osa, jolloin vahingot sekä vaarat jäävät vähäisiksi ja muun verkon normaali toiminta voi jatkua. Kytkinlaitteet toimivat myös tarvittaessa erotuskohtina eri sähköverkkojen välillä. Tärkeimmät sähköverkossa käytetyt kytkinlaitteet ovat katkaisijat, erottimet ja kuormaerottimet. Kytkinlaitteilla on seuraavia tärkeitä ominaisuuksia:

- Katkaisukyky, joka ilmoittaa kuinka suuren virran laite pystyy erottamaan.
- Sulkemiskyky
- Kuinka suuren jatkuvan virran kytkinlaite kestää.

- Oikosulkukestoisuus, niin virran katkaisun kannalta kuin oikosulun aiheuttamat mekaaniset rasituksien kannalta.
- Nimellisjännite

### 2.3.1 Katkaisija

Sähkösiirtoverkon kallein kytkinlaite on katkaisija ja sen täytyy pystyä katkaisemaan sähkösiirtoverkossa suurimmatkin esiintyvät virrat vaurioitumatta. Katkaisijoita voidaan ohjata kiinni tai auki käsin tai automaattisesti. Tyypillisesti katkaisijan avautumiskäskyn antaa sähköasemalla suoja- tai maasulkuvian sattua. 110/20 kV sähköasemien katkaisijat ovat pääasiassa jousiohjattuja.

Katkaisijan pääkoskettimien avautuessa virrankulku ei heti katkea vaan jatkuu hetkellisesti valokaarena, kunnes se saadaan sammutettua sitä kaarta venyttämällä ja jäädyttämällä. Myös valokaarta ympäröivän väliaineen ominaisuudet vaikuttavat sen pitkäkestoisuuteen. Vaihtosähköverkossa virran katkaisuun käytetään hyväksi virran luonnollista nolakohtaa. Sähkövirran katkaisutapahtuman synnyttämä hetkellinen valokaari vaurioittaa katkaisijan pääkoskettimia höyrystämällä siitä pienen määrän metallia. (Elovaara & Haarla 2011, 163.)

Katkaisijat voidaan jakaa ryhmiin joko sisältämänsä väliaineen tai rakenteen mukaan. Katkaisijarakennetyyppejä on kaksi: live-tank -ja dead-tank-tyyppi. Termeillä viitataan siihen, onko katkaisijan kosketinkammiot suurjännitteen potentiaalissa tai ei. Dead-tank-katkaisijoiden etuna on se, että niiden yhteyteen voidaan sijoittaa helposti esimerkiksi virtamuuntajia eivätkä ne vaadi suurta tilaa. Tätä katkaisijatyyppeä käytetään enimmäkseen Yhdysvalloissa, mutta Suomessa lähes kaikki suurjännitekatkaisijat ovat live-tank-tyyppisiä. Kuvassa 7 nähdään live-tank-tyyppinen 110 kV jännitetason SF6-katkaisija. (Elovaara & Haarla 2011, 169–170.)



Kuva 7. Ulkokentän SF6-katkaisija. 2021.

Yleisempi tapa jakaa katkaisijat ryhmiin on jakaa ne niiden sisältämän väliaineen mukaan seuraavanlaisesti:

- Ilmakatkaisijat
- Öljykatkaisijat
- Vähäöljykatkaisijat
- Paineilmakatkaisijat
- SF<sub>6</sub>-katkaisijat
- Tyhjiökatkaisijat

Näistä tyypeistä käytetään nykyään eniten SF<sub>6</sub> ja tyhjiökatkaisijoita, mutta ilmakatkaisijat ovat vielä suosittuja käyttökohteissa, joissa on suuri kytkentätiheys ja pitkät huoltovälit. Tyypillinen tällainen sovellus on moottorikatkaisija.

SF<sub>6</sub>-katkaisijan katkaisukammion väliaineena käytetään sinkkiheksafluoridi-kaasua, jonka etuna on palamattomuus ja hyvä sähköneristyskyky. SF<sub>6</sub>-katkaisija ovatkin taloudellisin katkaisijavaihtoehto 123–765 kV jännitteillä. Myös huoltovälit

ovat uusimmilla katkaisijoilla yli 10 vuotta sekä mekaaninen elinikä on 5000–10000 toimintakertaa. Pääkoskettimet kestävät 10–20 katkaisua täydellä oikosulkuvirralla ja tuhansia toimintakertoja mitoitusvirralla. (Elovaara & Haarla 2011, 180.)

Tyhjiökatkaisijan rakenne on hyvin yksinkertainen verrattuna muihin katkaisijatyyppeihin. Sen rakenne koostuu vain kiinteästä ja liikkuvasta koskettimesta, jotka on sinetöity tyhjiösäiliöön. Tyhjiökatkaisijan etuina on sen pitkä elinikä ja pitkät huoltovälit. Sähköinen elinikä on noin 20–100 toimintaa täydellä oikosulkuvirralla ja 10 000–20 000 toimintakertaa mitoitusvirralla. Mekaaninen elinikä on parhaimmillaan 30 000 ohjauksetta. Katkaisijatyypistä tekee taloudellisesti kilpailukykyisen sen vähäinen huollontarve: jousiohjain mekanismi tarvitsee voidella noin kerran kymmenessä vuodessa. Kuvassa 8 nähdään Siemensin valmistama 20 kV tyhjiökatkaisija. (Elovaara & Haarla 2011, 182.)



Kuva 8. 20 kV vaunukatkaisija. 2021.

### 2.3.2 Erotin

Erottimien tehtävänä on muodostaa luotettava avausväli erotettavan virtapiirin ja muun järjestelmän välille esimerkiksi sähköaseman päämuuntajan ja putkikiskon välille. Erotus on välttämätön turvallista työskentelyä varten. Erottimien avausvälin jännitelujuus on myös oltava suurempi kuin sitä ympäröivien eristeiden. Lisäksi ne on varustettava luotettavalla mekaanisella asennonosoituksella.

Erottimien tehtävänä ei ole katkaista kuormitettua virtapiiriä, jonka takia niiltä ei vaadita erityistä virrankatkaisu tai -sulkukykyä. Mikäli erotinta ohjataan kuormitettuna, on suuri riski, että pääkoskettimien välille syntyy pitkäkestoinen valokaari, sillä erottimen avautumis- ja sulkunopeus on erittäin hidaskuormitettuna verrattuna katkaisijaan. Erotintyyppi, joka pystyy erottamaan kuormavirtoja ja pieniä oikosulkuvirtoja kutsutaan kuormaerottimeksi, joka on tavallaan katkaisijan ja erottimen väli-muoto. Kuormaerottimia käytetään paljon keskijänniteverkossa kytkentä tilanteiden muuttamiseen. (Elovaara & Haarla 2011, 190–191.)

Tyypillinen 110 kV sähköaseman ulkokentillä käytetty erotintyyppi on kolmi- tai kaksipilarin vaakatasossa liikkuva center break-kiertoerotin, joihin on myös yhdistetty maadoitusveitset. Erottimet voivat olla moottori- tai käsiohjattavia, mutta maadoituserottimet ovat pääsääntöisesti vain käsiohjattavia. Kuvassa 9 nähdään 110 kV ulkokentän center break-tyyppinen erotin, jossa on maadoitusveitset kummallakin puolella.



Kuva 9. Ulkokentän kiertoerotin. 2021.

## 2.4 Kojeisto

Sähköaseman kojeistolla tarkoitetaan rakennekokonaisuutta, johon sisältyy käyttötarkoituksen mukaiset kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Suurjännitetason kojeistot voidaan jakaa sisä- ja ulkokojeistoihin. Kojeisto keskeisenä osana on kokoojakisko, josta sähköenergiaa jaetaan eri kytkinlaitteiden avulla.

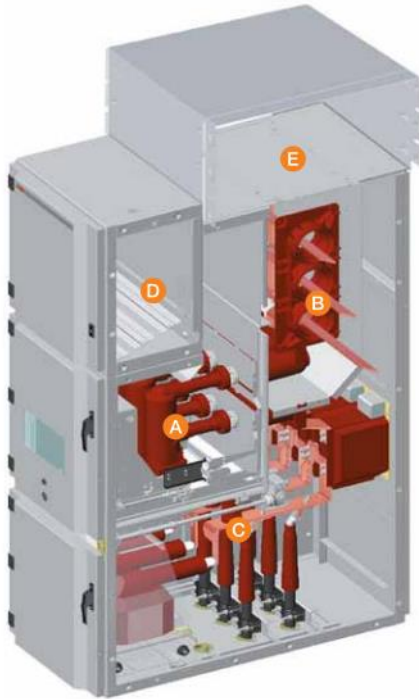
Avorakenteisella kojeistolla viitataan kojeistojärjestelmään, joka on rakennettu ulos ja sen kokoojakiskojen eristeenä toimii ilma. 110 kV jännitetason kojeistot ovat usein avorakenteisia varsinkin, kun ulkotilaa on runsaasti käytettävissä. Avorakenteinen kojeisto on edullisempi toteuttaa verrattuna koteloituun suurjännitekojeistoon, mutta esimerkiksi kaupunkiympäristön asettamat rajoitteet tilan suhteen tekevät siitä varteen otettavan vaihtoehdon. (Elovaara & Haarla 2011, 117–119.)

Sähköaseman 20 kV jännitetason kojeisto on yleensä koteloitu ilmaeristeinen sisäkojeisto. Myös SF6-eristeisiä kojeistoja käytetään, mikäli kojeisto halutaan saada mahdollisimman kompaktiksi. 20 kV jännitetason kojeistot sijaitsevat yleensä sähköasemarakennuksen sisällä ja niiden rakenne on kennomainen.

1970-luvun aikana siirryttiin pääasiassa käyttämään vaunukatkaisijatyyppejä kojeistoja. Vaunukatkaisija pystytään vetämään ulos kennosta, jolloin sen ja kokoojakiskon väliin muodostuu turvallinen ilmaväli. Tällöin kennossa ei ole tarvetta erillisille erottimille, jolloin sen rakenne yksinkertaistuu. (Elovaara & Haarla 2011, 120–124.)

Kuvassa 10 nähdään poikkileikkaus ABB:n ZS1 kojeiston kennosta. Vaunukatkaisijakennot jaetaan yleensä vähintään kolmeen eri osaan: katkaisijatilaan (A) ja kiskotilaan (B) sekä toisiolaitetilaan (D). Katkaisijatilassa sijaitsee itse katkaisija, kaapelipäätteet sekä mittamuuntajat. ZS1-kojeistosta löytyy myös oma osasto kaapelipäätteille ja mittamuuntajille (C). Virtamuuntajat ovat usein kiinnitettynä kojeiston takaseinään ja mittajännitemuuntajat sijaitsevat usein kojeiston pohjalla. Kiskotilassa sijaitsee kojeiston kokoojakisko. Katkaisijan ollessa kennosta ulkona, kiskotilan läpiviennit ovat usein suljettuna shutter-pellillä kosketussuojauksen takaamiseksi. Kennon toisiolaitetilassa sijaitsee katkaisijaa ohjaava

suojarele ja sen tarvitsemat johdotukset ja apureleet. Myös mittamuuntajien toisiokaapeloinnit tuodaan toisiolaitetilaan.



Kuva 10. ABB ZS1 kojeisto. ABB 2013.

## 2.5 Rinnakkaisreaktorit

Jakeluverkon maakaapeloinnin yleistyessä, sen tuottamaa kapasitiivista loistehoa pyritään kompensoimaan sähköasemilla rinnakkaiskuristimien eli reaktoreiden avulla, jolloin sähköverkon pätoitehon siirtokyky paranee. Reaktorien käämitykset ovat tyypillisesti kytketty tähteen ja niiden rakenne on kosketussuojattu, jolloin niiden läheisyydessä on turvallista työskennellä, vaikka ne olisivat verkossa.

110/20 kV sähköasemille asennettavat reaktorit ovat tyypillisesti öljytäytteisiä, ja niillä on lähes samat hälytykset ja laukaisupiirit kuten muuntajilla. Reaktoreille on tyypillisesti varattu 20 kV katkasijakenno ja se on varustettu suojareleellä. Tyypillisessä 110/20 kV sähköasemasaneerauksessa asemalta puretaan pois kondensaattoriparisto ja tilalle asennetaan rinnakkaiskuristin.

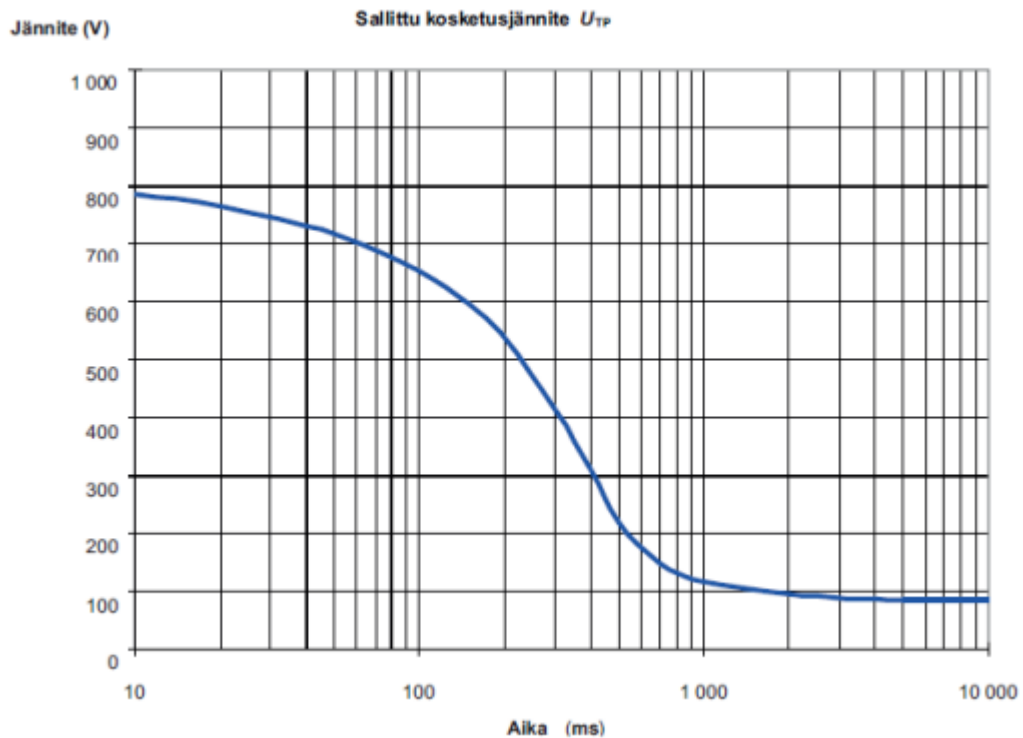
## 2.6 Sähköaseman maadoitukset

Sähköaseman maadoituksilla on tarkoitus yhdistää laitteet tai virtapiirin osat mahdollisimman tehokkaasti maan potentiaaliin metallisen kappaleen tai johtimen avulla, jota kutsutaan maadoituselektrodiksi. Maadoituksen tehokkuutta mitataan maadoitusresistanssin avulla, joka muodostuu elektrodin kautta kulkevan virran ja sen sähköisen potentiaalin osamääränä (kaava 1).

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \quad 1$$

Maadoitukset jaetaan kahteen alaryhmään: käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoitusten tarkoituksena on yhdistää virtapiirin osa maadoituksiin joko suoraan tai pienen impedanssin välityksellä. Käyttömaadoituksen pääasiallisena tehtävänä on pitää virtapiirin johtimen jännite sellaisella tasolla, ettei se aiheuta vaaratilanteita tai vaurioita laitteita. Esimerkiksi ylijännitesuojien maadoitukset ovat käyttömaadoituksia. Käyttömaadoitusten toinen pääsääntöinen tehtävä on vähentää jännite-epäsymmetriaa ja pitää maavirta niin pieninä, ettei niistä olisi haittaa heikkovirtajärjestelmille kuten esimerkiksi puhelinjohdoille. (Elovaara & Haarla 2011, 427–428.)

Suojamaadoittamisessa maadoitusverkkoon yhdistetään virtapiiriin kuulumaton jännitteelle altis osa esimerkiksi sähkölaitteen metallinen kotelo tai runko. Suojamaadoituksen tehtävänä on siis estää vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen, jolla tarkoitetaan ihmiskehon kosketuskohdan ja maan välillä tietyllä hetkellä vaikuttavaa jännitettä. Kosketusjännite voi syntyä esimerkiksi eristysviasta. Suomessa yli 1000 V jännitetason järjestelmissä SFS 6001 standardi määrittää enimmäisarvot kosketusjännitteelle vikavirran ajallisen keston mukaan (kuvio 2). Näiden raja-arvojen perustana on sähkön vaarallisuus ihmiselle, joten ne ovat verkon jännitetasosta riippumattomia. (Elovaara & Haarla 2011, 428–429.)



Kuvio 2. Sallittu kosketusjännite ajan funktiona. (SESKO ry 2018, 93.)

Sähköaseman maadoitus on yleensä toteutettu verkkomaisella maadoitusruudukolla, johon on liitetty laitteiden ja rakennusten maadoitukset. Maadoitusverkkoon liitetään myös sähköasemalta lähtevien ilmajohtojen ukkosjohtimet. Maadoitusverkon ja siihen liitettyjen maadoitusjohtimien avulla pyritään siihen, ettei kosketus- tai askeljännitteet nouse vaarallisen suuriksi sähköasemalla vikatilanteen sattuessa.

Maadoitusverkon ruudukon tiheyttä ei mitoiteta maadoitusjännitteen mukaan, vaan se lähinnä määräytyy sähköaseman ulkokentän laitteiden vaatiman tilan ja niiden maadoitus perusteella. Ruudukon tiheydellä on myös vaikutusta muodostuviin maadoitusjännitteisiin: mitä tiheämpi ruudukko, sitä pienempiä potentiaali eroja esiintyy verkon alueella. (Elovaara & Haarla 2011, 446–450.)

### 3 RELESUOJAUS

Sähköverkoissa esiintyvien vikatilanteiden kuten oikosulkujen ja maasulkujen takia, sähköasemat täytyy varustaa suojalaitteilla, joista osan muodostavat suojarleet. Suojareleet monitoroivat verkon tilaa ja tarvittaessa suorittavat säätöjä ja katkaisijoiden laukaisuja automaattisesti. Sähköasemien relesuojausjärjestelmä sää käyttöenergiansa tyyppillisesti akustoista, jolloin aseman toimilaitteet ovat toiminnassa aseman pääasiallisen vaihtojännitesyötön katketessa.

Relesuojauksen toiminta on oltava selektiivistä, jotta vain mahdollisimman pieni osa verkosta jää pois käytöstä vian sattuessa. Suojauksen on myös toimittava tarpeeksi nopeasti ja herkästi, että vian aiheuttamat vaarat, vauriot sekä häiriöt jäävät mahdollisimman kohtuullisiksi. Verkon vakauden on myös säilyttävä joka tilanteessa. Relesuojauksen tulee myös kattaa koko suojattava järjestelmä, sekä se täytyy olla koestettavissa käyttökohteessa. Varsinaisen suojausjärjestelmän vioittumisen varalta tietyt kriittiset käyttökohteet kuten sähköaseman 20 kV kiskon syöttökenno varustetaan paikallisella varasuojauksella. (Mörsky 1992, 15–16.)

#### 3.1 Numeerinen suojarle

Mikroprosessorien kehityksen myötä digitaaliset suojarleet tulivat käyttöön sähköverkkoihin 1980-luvun aikana. Digitaalisten suojarleiden yhtenä ominaisuutena on suojattavan kohteen eri suojaustoimintojen kuten ylivirtasuojauksen ja maasulkusuojauksen sisällyttäminen yhteen suojarleeseen, jolloin laukaisukäskyt tulevat vain kosketintietona. Tämän monipuolisuuden takia, digitaalisia suojarleitä voidaan soveltaa lukuisisiin käyttökohteisiin aina johtolähdön suojauksesta muuntaja- ja generaattorisuojauksiin. (Mörsky 1992, 25.)

Numeerisissa suojarleissä on myös suojaustoimintojen lisäksi lisätoimintoja kuten häiriötallennin, joka tallentaa mittaussuureita vian sattuessa. Suojareleistä myös tyyppillisesti löytyy itsevalvontaominaisuus, joka ilmoittaa mahdollisista releyksikön häiriöistä. Ylivirtalaukaisuissa rele pystyy laskemaan vikareaktanssin avulla vikapaikan etäisyyden sähköasemalta. Digitaalisessa suojarleessä ei tyyppillisesti ole juurikaan liikkuvia mekaanisia osia, jolloin sen huoltovälit ovat pitkiä.

Kuvassa 11 on ABB:n valmistama REF630 suojarahle, jota käytetään paljon sähköverkkojen suojauksessa. (Elovaara & Haarla 2011, 345.)



Kuva 11. ABB REF630-suojarahle. (ABB 2011, 3)

Numeeristen suojarahleiden tarjoamien lukuisten ominaisuuksien takia, niiden konfigurointi ohjelmointisovellusten avulla voi olla työlästä. Releiden käyttöön-otoissa täytyykin olla erityisen tarkkana, ettei mahdollisten ohjelmointivirheiden takia sähköverkon käytettävyys heikenny ja että releet toimivat halutulla tavalla.

## 3.2 Jakeluverkon suojaukset

Jakeluverkkoa pidetään sähköverkon osana, joka alkaa 110 kV tasolta ja päättyy aina kuluttajan 400 V sähköliittymispisteeseen. Tärkeimmät 110 kV linjat luokitellaan kuuluvaksi kantaverkkoon ja säteittäiset yksittäisten sähköasemien syöttölinjat katsotaan kuuluvaksi jakeluverkkoon. Luokittelu ei kuitenkaan ole täysin täsmällinen. Normaalitilanteessa 20 kV jakeluverkko on lähes aina säteittäistä, pois lukien kaupunkiverkot. (Mörsky 1992, 295.)

### 3.2.1 Ylivirtasuojaus

Sähköaseman lähtöjen johtimia ja komponentteja on suojattava oikosulku- tai ylikuormitusvirran aiheuttamalta kuumenemiselta ja mekaanisilta vaurioilta. Säteittäisen verkon oikosulkusuojaus on lähes aina toteutettu vakioaikaylivirtasuojauksella, joka havahtuu mittausvirran ylittäessä asetteluarvon ja laukaisee katkaisijan asetetun aikaviiveen jälkeen. Mikäli peräkkäiset katkaisijat ovat suojattu va-

kioaikaylivirtasuojauksella, on tärkeää jättää tarpeeksi iso aika porrastus selektiivisen laukaisun toteutumiseksi. Toisaalta jos aikaportaat jäävät liian suuriksi, hidastaa se liikaa syöttösuunnassa olevien katkaisijoiden toimintaa. Aikaporrastusta laskettaessa on huomioitava niin suojareleen, katkaisijan ja suojalaitteiden toiminta-aikojen hajonnasta johtuva varmuusaika. 20 kV johtolähdön ylivirtasuojauksessa tyydytään korkeintaan kolmeen ylivirtaportaaseen (Mörsky 1992, 295.)

Käänteisaikaylivirtasuojauksen toimintahidastus virtaan nähden on käänteinen, jolloin se laukaisee suurivirtaiset viat nopeammin pois verrattuna pieniin vikavirtoihin. Suojauksen laukaisuaika voidaan laskea IEC 60255-3 standardin määritelmiltä käyriltä kaavan 2 mukaisesti

$$t_{trip} = \frac{A \cdot k}{\left(\frac{I}{I_{>}}\right)^P} \quad 2$$

jossa I on verkon vikavirta, I> on releelle aseteltu havahtumisvirta, k on laukaisuaika parametri, A ja P ovat käyrien kertoimia, jotka on lajiteltu taulukossa 2. (Elovaara & Haarla 2011, 346.)

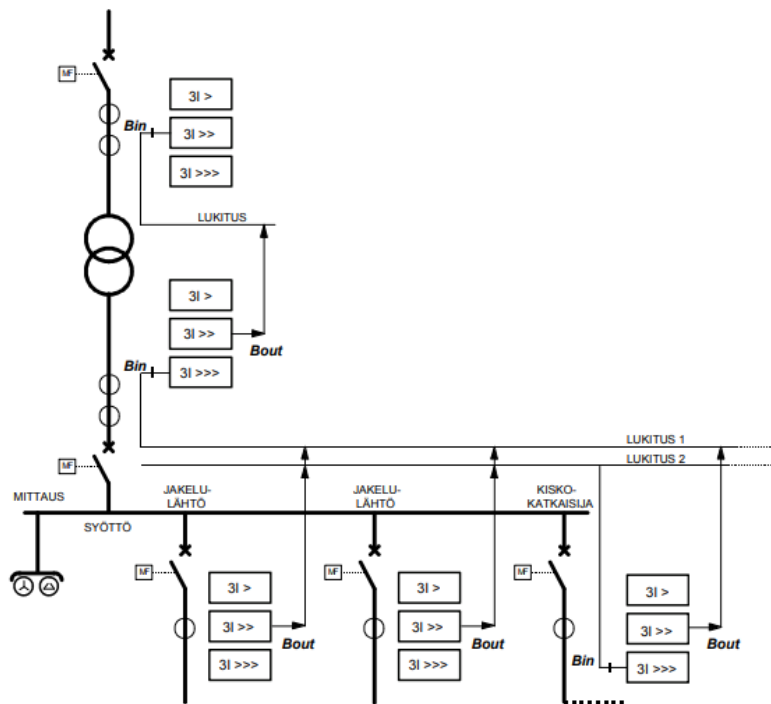
TAULUKKO 2. IEC 60255 käänteisaikaylivirtareleen parametrit. (Elovaara & Haarla 2011, 347.)

Käyrän jyrkkyys	A	P
Normal	0,14	0,02
Very inverse	13,5	1
Extremely inverse	80	2
Long time inverse	120	1

Silmukoidussa verkossa oikosulkusuojaus toteutetaan yleensä distanssireleillä, jotka laskevat etäisyyden vikapaikkaan monitoroimalla vioittuneen lähdön virtoja ja jännitteitä. Sähköaseman lähellä sijaitsevat johdot ja kaapelit voivat joutua suurienkin oikosulkuvirtojen kuormittamaksi. Niiden termisen oikosulkukestoisuuden takia, ne voidaan suojata joko viiveettömällä vakioaikaylivirtasuojan pikalaukaisulla tai käänteisellä ylivirtasuojauksella. (Mörsky 1992, 296.)

Selektiivisen laukaisun varmistamiseksi sähköaseman kojeisto varustetaan yleensä lukitussuojauksella. Johtolähtöjen suojausten ylivirtasuojauksen havahduttua, ne lukitsevat syöttökentän suojaaleen ylivirran ylemmän suojausportaan. Kuviossa 3 nähdään yksi esimerkki ylivirtasuojauksen lukituksista. Johtolähtöjen toinen ylivirtaporras lukitsee syötön kolmannen ylivirtaportaan. Syötön toinen ylivirtaporras sen sijaan lukitsee muuntajaa syöttävän katkaisijan toisen ylivirtaportaan. Lukitussignaalit voidaan viedä suojaareleille kaapeleilla tai siirtää tiedonsiirtoväylää käyttäen. Lukitussuojien suojausalueet eivät peitä toisiaan, ja koska ne eivät myöskään ulotu suojausketjussa seuraavien suojausten suojausalueille, on niiden rinnalla aina käytettävä myöskin aikaselektiivistä suojausta.

(ABB 2000, 228–229.)

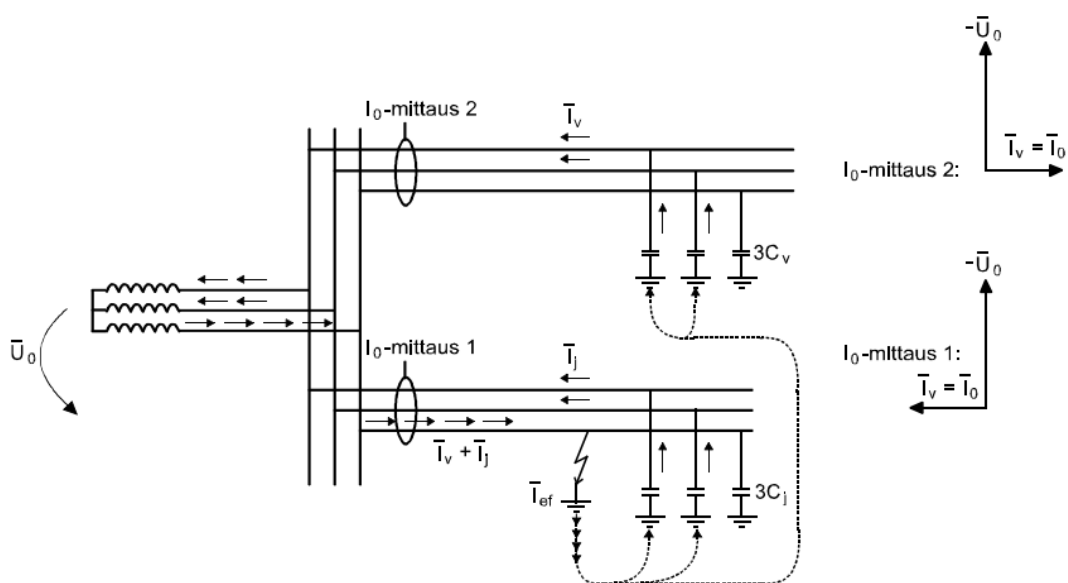


Kuvio 3. Kojeiston lukitussuojaus. (ABB 2000, 229.)

### 3.2.2 Suunnattu maasulkusuojaus

Maasta erotetussa verkossa vaihejohtimilla ei ole johtavaa yhteyttä maahan muualla paitsi jännitemuuntajissa. Normaalisessa verkon käyttötilanteessa vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla.

Yksivaiheisessa maasulussa vaihejohtin joutuu suoraan tai vikaimpedanssin kautta yhteyteen maapotentiaalin kanssa. Tässä tilanteessa viallisen vaiheen jännite ja varausvirta tippuu, mutta terveillä vaiheilla jännite maata vasten sen sijaan kasvaa. Maasulkuvirta kiertää terveiden vaiheiden ja taustaverkon maakapasitanssien kautta takaisin muuntajan käämityksiin ja sitä kautta vikapaikkaan. Maasulun aiheuttaman jännite-epäsymmetrian takia tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista eli syntyy niin sanottu nollijännite. Pääjännitteet vaiheiden välillä pysyvät ennallaan ja kuormitukset eivät koe häiriötä ennen katkaisijan laukeamista. Kuviossa 4 on esitettyä vikavirran kulku maasta erotetun verkon yksivaiheisessa maasulussa. (Mörsky 1992, 298.)

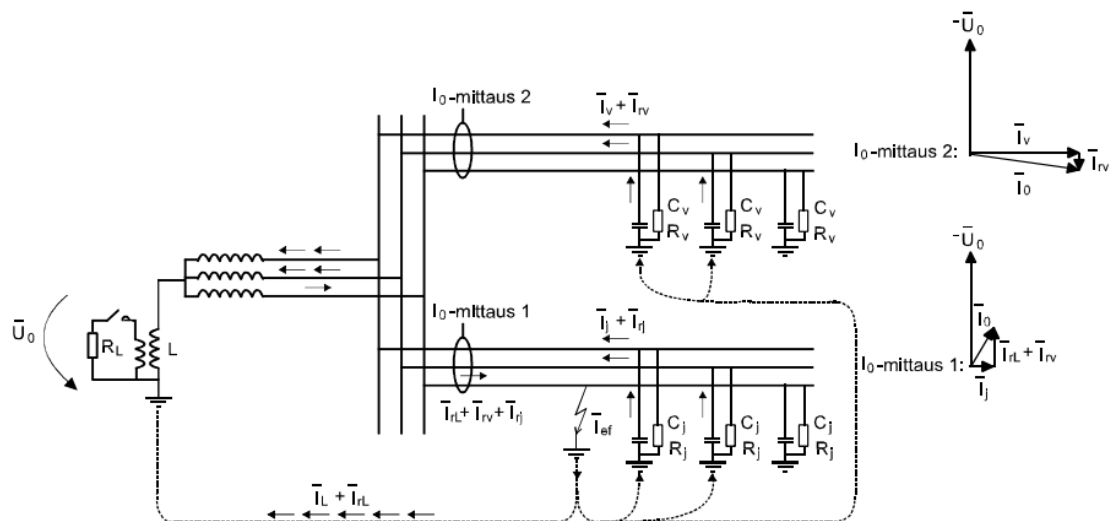


Kuvio 4. Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa (ABB 2000, 255.)

Maasulkuvirta aiheuttaa mahdollisesti vaarallisen kosketusjännitteen vikapaikan läheisyydessä ja tästä syystä maasulku on poistettava sähköturvallisuusmääräysten mukaisesti. Turvallisuusstandardin vaatimukset voidaan toteuttaa joko

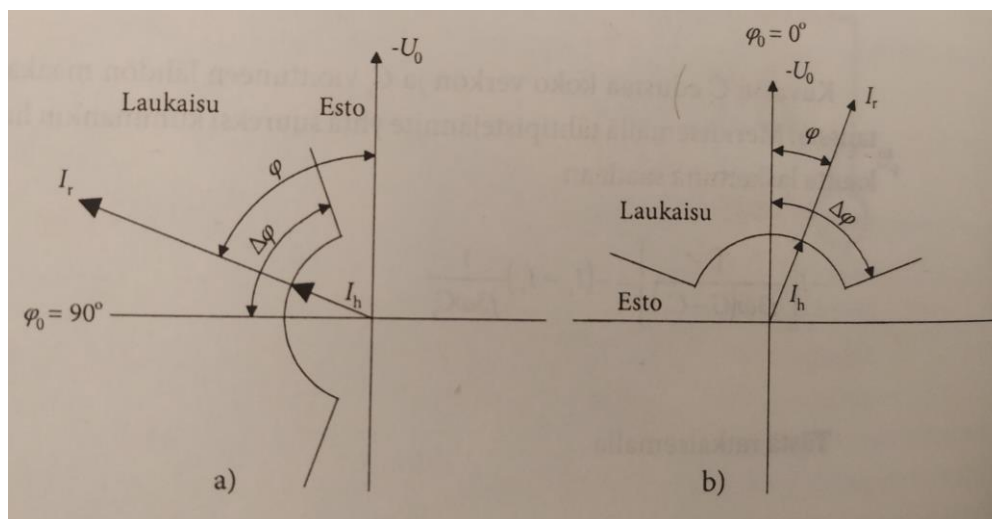
parantamalla verkon maadoituksia, tai pienentämällä maasulun vikavirtaa pilkkomalla verkkoa galvaanisesti erillään oleviin osiin. (Lakervi & Partanen 2009, 182-183.)

Toinen tapa pienentää kosketusjännitettä on vikavirran pienentäminen lisäämällä muuntajan tähtipisteeseen sammutuskuristin, jonka tarkoituksena on kompensoida induktanssillaan maasulun kapasitiivista vikavirtaa. Kompensointikela on tyypillisesti säädettävä ja sitä ohjaa kompensointisäätäjä, joka hakee resonanssipisteen automaattisesti verkon kytkentätilanteiden muuttuessa. Kuviossa 5 on esitetty vikavirran kulku sammutetun verkon yksivaiheisessa maasulussa.



Kuvio 5. Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa. (ABB 2000, 257.)

Maasulkuvirran suuruus riippuu verkkoon galvaanisesti liitettyjen johtimien pituudesta ja se on riippumaton missä kohdassa verkkoa vika ilmenee. Verkossa tapahtuva maasulku havaitaan sähköasemalla mittamuuntajien avulla. Maasulkuvirta havaitaan kaapelivirtamuuntajalla tai vaihevirtamuuntajien summakytkenällä. Nollajännitettä mitataan jännitemuuntajien avokolmiokäämityksen avulla. Maasulkusuojausten oikean toiminnan ja katkaisijan selektiivisen laukaisun varmistamiseksi, on sille asetettava kolme ehtoa: tähtipistejännitteen suuruus, vikavirran suuruus sekä tähtipistejännitteen ja vikavirran välinen vaihe-ero (Kuva 11). Vaihe-eron perusteella voidaan selvittää virran kulkusuunta ja laukaista oikean lähdon katkaisija. (Lakervi & Partanen 2009, 190–192.)



Kuva 11. Maasulkusuojausajan virtakulmadiagrammi. a) Maasta erotettu verkko, b) sammutettu verkko. (Lakervi & Partanen 2009, 192.)

Maasta erotetussa verkossa kaapelivirtamuuntajan läpi kulkevan vikavirran osoitimen on oltava noin 90 astetta maan ja tähtipisteen välisen jännitteen osoitinta edellä. Laukaisusektorin ehdoksi siis määräytyy  $90^\circ - \Delta\varphi < \varphi < 90^\circ + \Delta\varphi$ . Resistanssin vaikutus maasulkuvirtaan on vähäinen, jolloin toleranssi  $\Delta\varphi$  voi olla maasta erotetun verkon suojausasetteluilla melko pieni.

(Lakervi & Partanen 2009, 192.)

Sammutetussa verkossa suojausalueen havaitsema vikavirta  $I_f$  muodostuu pääasiassa sammutuskelan rinnalle kytketyn resistanssin läpi kulkevasta pätövirrasta. Tästä syystä tähtipistejännitteen ja nollavirran kulmaero on enintään  $\pm\Delta\varphi$ . Kompensoinnin aiheuttaman resonanssitilanteen läheisyyden vuoksi sallittu toleranssi  $\Delta\varphi$ :lle voi olla suuri melko suuri, esimerkiksi  $80^\circ$ .

(Lakervi & Partanen 2009, 193.)

### 3.2.3 Kaksoismaasulkusuojaus

Kaksoismaasulussa sähköverkon kaksi eri vaihetta ovat maakosketuksissa. Viikapaikat voivat olla kaukanakin toisistaan. Kaksoismaasulun vikavirrat voivat olla suuria, jopa oikosulkuvirtojen tasolla. Maan johtavuuden ollessa huono, voivat nämä suuret vikavirrat aiheuttaa vahinkoja kaapeleille.

Tyypillinen kaksoismaasulkuun johtava tilanne alkaa yksivaiheisesta maasulusta, jolloin terveiden vaiheiden jännite maata vasten kasvaa. Nousun takia jännite lyö läpi piilevästä eristeviasta tai aiheuttaa virheellisen ylijännitesuojien toiminnan, jolloin syntyy kaksoismaasulku.

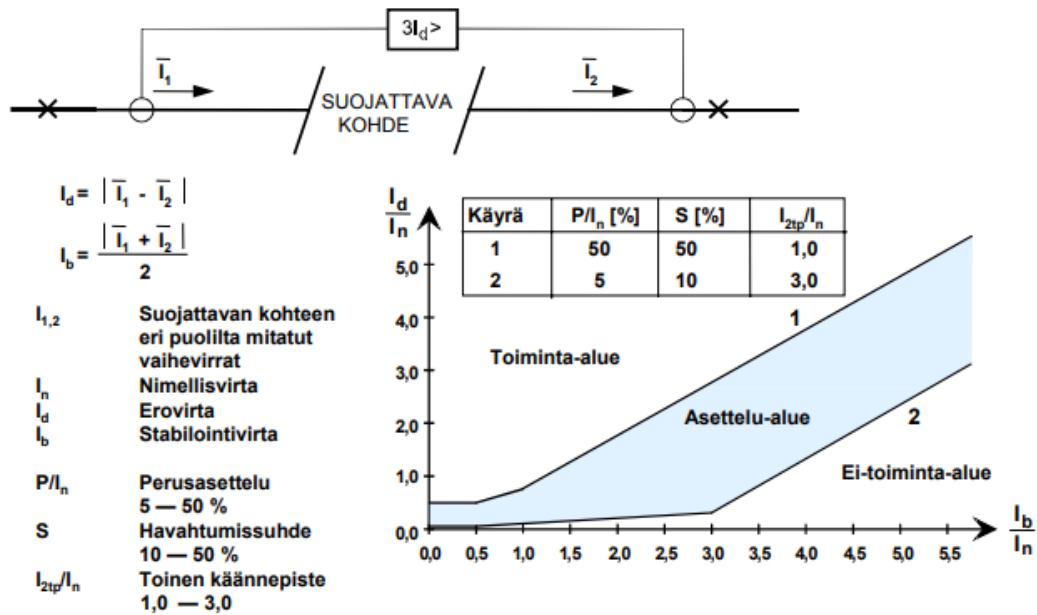
Kaksoismaasulun haitallaisia vaikutuksia voidaan vähentää nopealla suojauksella ja huoltamalla ylijännitesuojauksia. Kaksoismaasulkujen nopeaan pois kytkentään käytetään tyypillisesti suojareleen ylivirtasuojasta, joka on aseteltu mittaamaan kaapelivirtamuuntajan havaitsemaa nollavirtaa. Suojauksen toimintaehdona on ainoastaan nollavirran suuruus, joka on tyypillisesti satoja ampeereja. (Lakervi & Partanen 2009, 198.)

### 3.3 Muuntajan differentiaalisuojaus

Muuntajan vanhetessa se on altis sisäisille vioille käämitysten eristysten huonontuessa esimerkiksi osittaispurkausten, yllämpötilojen ja ilmastollisten vaikutusten takia. Muuntajaviat ovat kuitenkin yleisesti harvinaisia, mutta niistä voi syntyä suuria kustannuksia ja korjaukset voivat kestää pitkään. Tämän takia on tärkeää suojata varsinkin suuret ja kalliit päämuuntajat, joita esiintyy sähköasemilla. (Mörsky 1992, 192.)

Differentiaali- eli erovirtasuojaus on tyypillisesti päämuuntajan pääasiallinen suoja. Suojarele vertailee muuntajan yläjännite- ja alajännitepuolella liikkuvia virtoja ja tiputtaa muuntajan pois verkosta, mikäli erovirran  $I_d$  asetteluarvo ylittyy. Erovirtaa käytännössä esiintyy aina muuntaja tyhjäkäyntivirran ja virtamuuntajien mittausrvirheiden takia.

Virhelaukaisujen välttämiseksi on differentiaalisuojaus vakavoitava, jolloin laukaisuun vaaditaan suurempi erovirta kuormituksen kasvaessa. Vakavointivirta  $I_b$  muodostetaan muuntajan molemmin puolin mittatuista vaihevirroista. Differentiaalisuojan toimintakäyrän muodon määräävät perusasettelu, havahtumissuhde sekä toinen käänne piste (kuvio 6).



Kuvio 6. Differentiaalisuojauksen asetelukäyrä (ABB 2000, 230.)

Perusasettelu määrää suojauksen perusherkkyyden suojattavan kohteen tyhjäkäynnin aikana. Asettelussa on otettava huomioon muuntajan magnetointivirta ja johdon varausvirrat käyttöjännitteellä, jotta virhelaukaisuilta vältyttäisiin. Perusasettelu myös vaikuttaa koko toimintakäyrän tasoon ja siten myös suojauksen tarkkuuteen suuremmilla virroilla. Suojareleen aseteluissa on myös otettava huomioon muuntajan kytkentäryhmä, jonka takia ensiön ja toision virroilla voi olla vaihe-eroa. (ABB 2000, 230.)

Havahtumissuhde ottaa huomioon muuntajan läpimenevään virtaan suoraan verrannolliset erovirran lähteet, kuten esimerkiksi virtamuuntajien mittausvirheet. Yhdessä toisen käänneasteen kanssa se määrää suojauksen toimintaherkkeyden muuntajan ollessa kuormitettuna. Toisella käänneasteella on myös vaikutus suojauksen vakauttamiseen suojausalueen ulkopuolella tapahtuvia vikoja vastaan, jolloin suojaus ei laukaise näennäisten erovirtojen vaikutuksesta. Toisen käänneasteen määrittelyssä täytyy ottaa huomioon virtamuuntajien toistokyky, vikavirtatasot, syöttösuunnat ja suojattavan kohteen vaatimat herkkyyden vaatimukset. (ABB 2000, 230.)

Vakavoidun differentiaalisuojan stabiilisuus voi järkkäytyä muuntajan kytkentävirtasysäyksestä, joka näkyy suojareleelle pelkkänä erovirtana, jolloin pelkkä vakavointi ei riitä estämään virhelaukaisua. Muuntajan kytkentävirtasysäys sisältää

tunnetusti runsaasti toista harmonista yliaaltoa, jolloin suojarieleellä voidaan ottaa käyttöön siihen perustuva suojauksen lukitusehto. Toinen differentiaalisuojan stabiilisuutta haittaava tekijä on muuntajan ylimagnetoituminen ylijännitteiden vaikutuksesta. Tämän estämiseksi suojaukseen voidaan ottaa käyttöön muuntajan magnetointivirran viidenteen yliaaltoon perustuva lukitus. Kyllästyneen muuntajan magnetointivirta sisältää juuri runsaimmin viidettä yliaaltoa. Mikäli ylimagnetointi kasvaa entisestään, voidaan suojauksen lukitus poistaa, jolloin suoritetaan syöttävän katkaisijan laukaisu muuntajan suojaamiseksi. (ABB 2000, 231.)

## 4 KOESTUS

Sähkölaitteiston saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönottotarkastuksessa on selvitetty, ettei siitä aiheudu hengen, terveyden tai omaisuuden vaaraa. Käyttöönottotarkastuksesta suoritetuista mittauksista on laadittava sähköaseman haltijan käyttöön tarkastuspöytäkirja, jonka jälkeen laitteisto on valmis käyttöönotettavaksi. (STUL ry 2019, 5–6).

Koestamisella tarkoitetaan järjestelmällistä testaamista, jonka tarkoituksena on varmistaa käyttöönotettavan laitteiston tai suojausjärjestelmien oikea toiminta. Käyttöönottokoestukset sisältävät käytännön toimintojen testaamista sekä suojausien ja säätäjien toiminnan testaamista simuloimalla käyttö- ja vikatilanteita. Käyttöönottokoestuksissa suoritettujen mittausten tarkkuus ei ole laboratoriotasoa, vaan niiden tarkoituksena on varmistaa laitteiston varma toiminta käytön vaatimalla tarkkuudella. Käyttöönotoissa on tarkastettava ja koestettava muun muassa

- Sähköaseman omakäyttökeskus ja -jakelu
- Tasasähkökeskus ja -järjestelmä
- Hälytykset
- Kojeistojen lukitukset
- Mittamuuntajat
- Relesuojaus

(Mörsky 1992, 368.)

### 4.1 Aistinvarainen tarkastus

Koestuksien ensimmäisenä vaiheena on laitteiston aistinvarainen tarkastus. Käytännössä tarkastus ajoittuu koko sille ajalle, jolloin sähkölaitteistoa on rakennettu ja havaitut puutteet korjataan työn edetessä tai viimeistään ennen käyttöönottoa. (STUL ry 2018, 343–344)

Aistinvaraisessa tarkastuksessa käydään läpi koko muutettu sähkölaitteisto ja sen asennukset läpi. Siihen sisältyy asennettujen kaapelien ja laitteiden siisteys,

oikeat kytkennät ja turvallisuus. Tarkastus sisältää paljon johtimien seuraamista riviliittimille, jotta voidaan varmistaa niiden oikea kytkentä. On myös syytä varmistaa, että käyttämättömät johtimet on tulpattu oikein, ettei niistä synny vaaraa.

Sähköiskulta suojaaminen edellyttää, että laitteiden perussuojaus on kunnossa. Koteloiden on oltava ehjiä ja johtojen eristysten on oltava kunnossa. Lisäksi on varmistuttava, että asennuksissa on käytetty suunnitelmien mukaisia johdinpoikkipinta-aloja ja asennustapoja. (STUL ry 2018, 344)

Tarkastuksessa käydään läpi myös varokkeiden ja kytkinten merkinnät, jotka on oltava riittävät niiden tunnistamiseen. Myös sähköasemalta löytyvien piirustusten ja varoituskilpien on oltava ajan tasalla. (STUL ry 2018, 348)

Aistinvaraisessa tarkastuksessa on erityisen tärkeää huomioida uusien ja muutettujen keski- ja suurjännitelaitteistojen jännitteisten osien vähimmäisetäisyydet vaiheen ja maan sekä vaiheiden väliltä. Taulukossa 3 on listattu SFS6001-standardissa määritetyt 24 kV ja 123 kV jännitetason vähimmäisilmavälit.

TAULUKKO 3. SFS6001 Keski- ja suurjännitelaitteistojen vähimmäisilmavälit. (SESKO ry 2018, 38)

Jännitetaso	Vähimmäisilmaväli
24 kV	Vaihe-maa: 160 mm Vaihe-vaihe: 220 mm
123 kV	Vaihe-maa: 900 mm Vaihe-vaihe: 1100 mm

## 4.2 Suojausten koestus

Sähköaseman relesuojauksen käyttöönotto-koestus täytyy suorittaa perusteellisesti, jotta voidaan todeta kaikkien toisiinsa liittyvien suojalaitteiden toimivuus ja toimimattomuus. Relesuojauksen koestus olisi paras suorittaa ensiökoestuksena, jolloin sähköaseman päävirtapiirin läpi syötetään vikatilanteissa vastaavia virtoja ja jännitteitä. Käytännössä suojareleille suoritetaan kuitenkin toisiokoestus, jossa niiden toisiomittauspiiriin syötetään koestuslaitteella vikavirtoja ja -jännitteitä vastaavat arvot. Siten toisiokoestus on ensiökoestukseen verrattuna

yleisemmin käytetty koestusmenetelmä sen helpomman toteutettavuuden takia. (Mörsky 1992, 366.)

Suojauksien testauksessa, koestuslaitteella syötetään virtaa ja jännitettä suoja-releen mittauskanaviin katkaisijan ollessa tyypillisesti auki. Syötettyjen suureiden arvoja kasvatetaan, kunnes suoja-rele havahtuu ja pyrkii laukaisemaan katkaisijan. Mikäli suoja-rele havahtuu halutussa arvossa, katkaisija ohjataan kiinni ja koestus toistetaan, jotta suoja-releen havahtuman ja katkaisijan aukeamisen välinen aikaväli voidaan mitata. Mikäli aika vastaa asetteluita on koestus onnistunut ja mitatut arvot kirjataan releen koestuspöytäkirjaan. Suojauksessa ollessa jälleenkytkenät käytössä, on jokaisesta kytkennästä otettava toiminta-aika sekä varmistaa että jännitteetön aika kytkentöjen välissä vastaa asetteluita.

Suojauksien asetteluarvot eivät ole koestajan vastuulla, vaan vastuu niistä on sähkölaitteiston käyttäjällä, esimerkiksi sähköaseman omistavalla jakeluverkkoyhtiöllä. Sähkölaitteiston omistajan käytännöistä riippuen on suoja-releen suojaukset koestettava uudelleen, mikäli sen konfiguraatioon tehdään muutoksia. (Mörsky 1992, 371.)

Suojausten toisiokoestamiseen käytetään siirrettävää koestuslaitetta (kuva 12), jolla voidaan syöttää erillisillä johtimilla releen mittauskanaviin tarvittavat jännitteet ja virrat. Laitteita ohjataan tyypillisesti tietokoneella ja niissä on lukuisia binaarituloja, kosketinlähtöjä ja oma tasajännitesyöttö.



Kuva 12. Omicron CMC 356-koestuslaite (Omicron 2021)

### 4.2.1 Ylivirta- ja maasulkusuojaukset

Ylivirtasuojauksien koestuksessa, koestuslaitteella syötetään virtaa suojareleen vaihevirtojen mittauskanaviin. Suojauksen havahtumat ja toiminta-ajat otetaan jokaiselta suojausportaalta. Lisäksi johtolähtöjen ylivirtasuojia koestettaessa, on varmistettava, että syöttökennon ylivirtalukitukset toimivat. Mikäli ylivirtasuojaus on suunnattu, on myös varmistettava, että suojaus havahtuu ainoastaan asetellusta suunnasta tulevasta ylivirrasta.

Suunnatun maasulkusuojauksen koestus noudattaa hyvin paljon samaa kaavaa kuin ylivirtasuojauksen koestus. Tässä tapauksessa virtaa syötetään suojareleen maasulkuvirran mittauskanavaan ja jännitettä nollajännitteen mittauskanavaan. Suojaukselle on tyypillisesti annettu kolme havahtumaehto: maasulkuvirran suuruus, nollajännitteen suuruus ja niiden välinen kulma (kuva 11). Koestuksessa täytyy ottaa arvot ylös näistä kaikista ehdoista. On myös tärkeää muistaa ottaa havahtumat laukaisusektorin molemmista laidoista. Koestus toistetaan kaikilla suojausportailta maasta erotetun verkon ja sammutetun verkon asetteluilla.

Käyttöönottojen yhteydessä maasulkusuojaukselle tehdään tyypillisesti valehäiriökoestus eli maasulkukoe, jossa jakeluverkkoon tehdään keinotekoinen yksivaiheinen maasulku. Kokeen tarkoituksena on testata suojareleen maasulkusuojauksen oikea toiminta ja varmistaa kompensoinnin vaikutus maasulkuvirtaan häiriötallenteita analysoimalla. Vian aikana sähköasemalle palaavien maasulkuvirtojen avulla pystytään myös tarkistamaan, että muiden 20 kV lähtökenttien kaapelivirtamuuntajat ovat asennettu oikein. Oikea kytkentä varmistetaan tarkistamalla häiriötallenteesta maasulkuvirran suunta.

### 4.2.2 Muuntajan differentiaalisuoja

Differentiaalisuojan havahtumat testataan asettelukäyrän perusasetteluun, havahtumissuhteen ja toisen käännepisteen jälkeen. Suojareleelle syötetään aluksi muuntajan nimellistä virtaa vastaavat toisiovirrat ja erovirtaa kasvatetaan, kunnes suoja havahtuu. Differentiaalisuojauksen koestuksessa on erityisen tärkeää varmistaa, että sen asettelut ovat kunnossa ja koestukset on tehty oikein. Virheelli-

nen asettelu ja väärin suoritettu koestus voivat aiheuttaa päämuuntajan tippumisen verkosta, josta syntyy laajamittainen sähkökatko verkon asiakkaille. Suojauksen konfiguroinnissa ja koestuksessa on otettava huomioon:

- Päämuuntajan nimellisvirrat
- Ylä- ja alajännitepuolen virtamuuntajien muuntosuhteet sekä kytkennät
- Käämikytkimen porrastus
- Päämuuntajan kytkentäryhmä
- Virran 2. ja 5. yliaaltoon perustuvat lukitusehdot

Muista suojauksista poiketen sähköaseman päämuuntajan differentiaalisuojaus tyypillisesti koestetaan myös ensiöpuolella oikosulkukokeella, jolla selvitetään, onko virtamuuntajien kytkentä aseteltu oikein suojareleelle. Muuntajan läpi liikkuvia virtoja monitoroidaan suojareleeltä ja koestus on onnistunut, jos virrat ovat suojarelemanuaalin mukaiset ja ero virtaa ei esiinny.

#### **4.2.3 Suojausten kausikoestus**

Sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava, että luokkien 2 ja 3 sähkölaitteistoille laaditaan turvallisuutta ylläpitävä kunnossapito-ohjelma. Haltijan on myös valvottava laitteiston kuntoa ja turvallisuutta sekä korjattava mahdolliset viat ja puutteet mahdollisimman nopeasti. (Työ- ja elinkeinoministeriö §47–48, 2016)

Sähköaseman relesuojauksen kunnonvalvontaan kuuluu tarkastukset, joilla varmistetaan sen toiminta vikatilanteissa. Tätä prosessia kutsutaan kausikoestukseksi. Suojausten säännöllinen koestus on erityisen tärkeää, sillä verkon vikatilanteet voivat välillä olla harvinaisia ja suojaukset ei välttämättä laukaise katkaisijaa pitkiin aikoihin, jolloin niiden toimintavarmuudesta ei ole tietoa.

Määräaikainen koestus ja huolto on erityisen tärkeää sähkömekaanisille suojareleille, sillä ne ovat alttiimpia pölyn ja lian haitallisille vaikutuksille. Myös niiden mekaaniset osat saattavat jäykistyä käytön puutteen vuoksi. Nykyaikaiset digitaaliset suojareleet on varustettu itsevalvonnalla, jonka avulla ne ilmoittavat mahdollisesta sisäisestä viasta. (Mörsky 1992, 23, 25, 377.)

Kausikoestukset sisältävät yleensä suojarleen suojausten havahtumisen ja laukaisujen koestuksen sekä releelle tuotujen hälytysten ja lähtökoskettimien testauksen. Myös releen mahdollinen itsevalvontahälytys testataan. Koestuksissa on myös syytä tarkistaa aistinvaraisesti laukaisupiirien eheys.

Käyttöönotto-koestuksista poiketen kausikoestukset voivat aiheuttaa asiakkaille sähkön jakelun keskeytyksen, jonka aikana johtolähdön katkaisijan toiminta-ajat mitataan. Sähkökatkolta voidaan välttyä, mikäli kyseisen johtolähdöllä olevat asiakkaat voidaan verkon kytkentöjen avulla siirtää eri syötön perään. Tämä voi kuitenkin heikentää verkon käyttövarmuutta.

Jännitetason noustessa ihanteellinen koestusväli lyhenee, koska sähkölaitteiston on yleensä oltava sitä luotettavampi mitä suurempi jännite. Taloudellisuus ja käyttövarmuus vaikuttavat kuitenkin ratkaisevasti kuitenkin koestusvälin pituuteen. (Mörsky 1992, 379.)

Relehuollon kustannuksia voidaan pienentää harventamalla koestuksia, mutta tämä lisää virhetoimintojen mahdollisuuksia, sillä viallista suojarlettä ei välttämättä löydetä tarpeeksi ajoissa. Myös itse koestuksessa voi syntyä vahinkoja kuten virheellisiä katkaisijan laukaisuja, piileviä vikoja tai virheellisiä kytkentöjä. (Mörsky 1992, 379.)

Koestusvälin pituus voidaan laskea luotettavuuslaskennan avulla, jos tilastolliset tiedot suojausien luotettavuudesta ovat saatavissa. Ihanteellinen koestusväli voidaan myös määrittää sen mukaan, millä aikavälillä koestuksen kokonaiskustannukset minimoitumat. Käytännössä kuitenkin koestusväli kuitenkin määritetään kokemuspohjaisesti. (Mörsky 1992, 379.)

### **4.3 Sähköaseman omakäyttö**

Sähköaseman PJ-järjestelmän koestus sisältää käytännössä SFS6000 standardin vaatiman käyttöönottotarkastuksen, johon sisältyy:

- Suojajohtimen jatkuvuuden mittaus
- Sähkölaitteiston eristysresistanssin mittaus

- Syötön automaattinen poiskytkennän toiminnan testaus
- Vikavirtasuojan toiminnan testaus
- Kolmivaihejärjestelmän kiertosuunnan testaus
- Toiminnalliset kokeet
- Jännitteenaleneman mittaus

Omakäytön koestukseen käytetään tyypillisesti PJ-asennustesteriä (kuva 13), jolla pystytään suorittamaan kaikki aikaisemmin mainitut mittaukset.



Kuva 13. Fluke 1662-asennustesteri (Fluke 2016)

#### 4.4 Sähköaseman yleiset virtapiirit

Sähköaseman yleisien virtapiirien ja hälytysvirtapiirien koestukset suoritetaan käytännön kokein. Sähköasemien ollessa vanhoja ja niiden virtapiirien ollessa monimutkaisia, voi niissä esiintyä vikoja tai virheellisiä kytkentöjä. Näiden vikojen selvittämiseen parhaimmat työkalut ovat ruuvimeisseli, yleismittari, piirikaaviot ja hyvä kyky lukea niitä. Koestettaviin virtapiireihin kuuluu muun muassa:

- Sähköaseman toisilaitteiden tasasähköjakelu
- Kytkinlaitteiden ohjaus- ja lukituspiirit
- Hälytyspiirit
- Päämuuntajan suojiin laukaisu- ja hälytyspiirit
- Käämikytkimen ohjauspiirit
- Kompensointilaitteiston ohjauspiirit ja hälytykset

Kytkinlaitteiden toimintoja koestettaessa tarkistetaan myös niiden tilatietojen päivityminen niitä ohjaaville suojarelleille.

#### **4.4.1 Tasasähköjärjestelmä**

Sähköaseman toisilaitteet kuten suojareleet ja kompensointikelan säätäjät saavat käyttöenergiansa tyypillisesti kahdennetusta 110 V tasasähköjärjestelmästä, joilla on omat akut, varaajat ja tasasähkökeskukset. Vanhemmilla sähköasemilla esiintyy myös 24 V ja 48 V DC-järjestelmiä.

Järjestelmän käyttöönotto tehdään hallitusti portaittain syötöstä kohti kuormitusta. Tasasähkönjakelun jännitteettömille johdotuksille tehdään aistinvarainen tarkastus, jonka jälkeen varmistetaan yleismittarilla, ettei kyseisen johdon suojalaitteen plus- ja miinusnavat ole oikosulussa. Varmistuksen jälkeen suojalaite nostetaan 1-asentoon ja toimenpide toistetaan seuraavan portaan suojalaitteelle, kunnes järjestelmä on täysin käytössä.

Koko tasasähköjärjestelmän ollessa käytössä on hyvä tarkistaa sen varaajan kuormitustaso. Mikäli varaajan kuormitus on korkea niin sanotussa tyhjäkäynti tilanteessa, jolloin mikään aktiivinen laite kuten esimerkiksi katkaisijan viritysmoottori ole käynnissä, voi se kertoa joko varaajan alimitoituksesta tai siitä että järjestelmässä on vika kuten oikosulku.

Tasasähköjärjestelmän suojauksien selektiivisen toiminnan varmistamiseksi järjestelmälle voidaan asiakkaan pyynnöstä tehdä oikosulkukoe. Kokeessa järjestelmän plussa ja miinus oikosuljetaan yhteen sen kauimmaisessa pisteessä, tyypillisesti ulkokentän erottimien tai katkaisijan kotelolla, jolloin järjestelmän ylivirtasuojalaite laukeaa. Koe on onnistunut, jos vikapaikan lähin suojalaite katkaisee virtapiirin.

#### **4.4.2 Hälytys-, lukitus- ja laukaisupiirit**

Sähköaseman lukuisien hälytyspiirien koestus suoritetaan käytännön kokein kuten esimerkiksi virittämällä johdonsuojakytkimen hälytyskosketin hälytysasentoon ja tarkastamalla suojareleelta, onko kyseinen hälytys päällä. Hälytykset on testattava yksi kerrallaan, jotta voidaan varmistua niiden luotettavasta toiminnasta. Tämä on erityisen tärkeää, jos hälytyksiä on summattu kytkemällä koskettimia rinnan ennen kuin ne on johdotettu hälytyskeskukselle tai suojareleelle.

Sähköaseman laukaisupiireillä tarkoitetaan katkaisijan auki ohjaukseen käytetty virtapiirejä, jotka muodostuvat suojalaitteiden sulkeutuvista koskettimista, katkaisijan laukaisukelasta sekä niiden välisistä johdotuksista. Laukaisupiirien koestus noudattaa samaa kaavaa kuin hälytyksien koestus. Niiden toiminta koestetaan käytännön testeillä, joilla varmistetaan, että suojalaite kuten esimerkiksi muuntajan lämpörele laukaisee muuntajaa syöttävän ulkokentän suurjännitekatkaisijan.

Lukituspiireille tarkoitetaan virtapiirejä, jotka estävät kytkinlaitteiden tahattoman ohjauksen. Ehtojen täytyessä virtapiirit lukitsevat magneettien avulla tietyt kytkinlaitteet, jolloin niiden ohjaaminen auki tai kiinni ei ole mahdollista. Tyypillisenä esimerkkinä näistä on ulkokentän erottimien lukitukset, jotka menevät päälle, jos erottimen takana on kuormitusta. Lukitusten avulla vältetään tilanteilta, jotka mahdollistavat vaarallisten valokaarien tai oikosulkujen synnyn. Lukituspiireihin kuuluu myös kojeiston lukitussuojauksen johdotukset, joilla varmistetaan ylivirtasuojauksen selektiivinen laukaisu.

#### 4.5 Ylimenovastus- ja maadoitusmittaukset

Sähköaseman käyttöönotto-koestuksissa kojeistojen päävirtapiirin liitoksille suoritetaan tyypillisesti ylimenovastusmittaus, joka tehdään mikro-ohmimittarilla (kuva 14). Mittari toimii vakiovirtalähteen tavoin syöttäen tyypillisesti 100 A tasavirtaa liitoksen läpi ja mittaamalla sen yli muodostuvaa jännitettä. Näiden kahden tiedon avulla laite ilmoittaa liitoksen yli olevan resistanssin mikro-ohmin tarkkuudella.



Kuva 14 Megger MOM200A mikro-ohmimittari (Megger 2017)

Mittaus paljastaa kojeiston virtapiirissä olevat mahdolliset löysät liitokset, jotka ilmenevät poikkeuksellisen suurina resistansseina. Suuritehoisissa laitteistoissa huono liitos voi kuumentua huomattavasti ja aiheuttaa vakavia ongelmia.

Sähköaseman rakenteiden ja laitteiden maadoitusten resistanssi sähköaseman yleiseen maadoitusverkkoon nähden mitataan myös mikro-ohmimittarilla. Mittauksen tarkoituksena on todentaa, että yksittäiset maadoitukset ovat yhdistetty sähköaseman laajaan maadoitusjärjestelmään. (SESKO ry 2018, 132)

Mittaus suoritetaan kytkemällä toinen mittapää maadoitusverkkoon ja toinen mittapää mittauskohteeseen. Mittauksissa käytetään tyypillisesti samaa 100 A virtaa kuin ylimenovastusmittauksissa. Mikäli mitattavaan kohteeseen liittyy useampi maadoitusjohdin, on ne mitattava yksi kerrallaan, jotta varmistetaan jokaisen johdinten olevan maadoitusverkossa kiinni.

#### **4.6 Mittamuuntajien koestus**

Mittamuuntajien koestus aloitetaan silmämääräisellä tarkastuksella, jolla todetaan, että laitteet on asennettu oikein. Tarkastukseen sisältyy ensiövirtapiirin liitoksien kiristysmerkintöjen tarkistus. Asennusvaiheessa kiristetyt liitokset tyypillisesti merkitään tussilla koestajia varten. Merkintöjen lisäksi päävirtapiirin liitoksille suoritetaan ylimenovastusmittaus oikean kiristysmomentin varmistamiseksi. Ulkokentän öljytäytteisiä mittamuuntajia koestettaessa on syytä tarkistaa niiden öljyn pinnankorkeus, jolle on tyypillisesti indikaattori mittamuuntajien rungon kyljessä. Indikaattori ilmoittaa öljyn sen hetkisen pinnan korkeuden sekä sen minimi- ja maksimirajat.

Seuraavana tarkistuskohteena on mittamuuntajien toisiokaapeloinnit ja -maadoitukset. Kaapeloinnit tarkistetaan silmämääräisesti ja varmistetaan että ne ovat täysin ehjiä ja oikein asennettuja. Virtamuuntajien käyttämättömät toisiokäämit täytyy olla oikosuljettu, sillä avoimen toisiopiirin napoihin syntyy vaarallisia ylijännitteitä virtamuuntajan ensiön ollessa kuormitettu. Jännitemittamuuntajien toisiopiirit sen sijaan eivät saa olla oikosulussa. Oikosulutilanne aiheuttaisi suuria vahinkoja muuntajalle, sillä se on kytkettynä pääkuormituksen rinnalle.

Tarkistuksissa varmistetaan myös, että mittamuuntajien toision maadoitus on suoritettu mahdollisimman lähellä sen liittimiä ja vähintään 2,5 mm<sup>2</sup> poikkipintalaisella kuparijohtimella. Mikäli maadoitukset eivät ole mekaanisesti suojattuja, tarvitsee johtimen olla vähintään 4 mm<sup>2</sup> kuparijohtinta. (SESKO ry 2018, 117)

Jännitemittamuuntajien avokolmiokäämityksen toisiomaadoitukseen on syytä kiinnittää erityistä huomiota, sillä ainoastaan viimeisen vaiheen dn-piste saa olla maadoitettuna. Avokolmiokytkennässä kaikkien vaiheiden käämitykset on kytketty sarjaan (kuva 6) ja mikäli kaksi pistettä tästä kytkennästä on maadoitettu, oikosulkisi se jonkin kolmesta käämistä.

Mittamuuntajienkoestukset jatkuvat mittausvirtapiirien testauksella, joka suoritetaan aikaisemmin mainitulla koestuslaitteella. Virtamuuntajan kytkentä ja oikea konfigurointi suojareleelle voidaan varmistaa syöttämällä koestuslaitteella virtaa muuntajan ensiöön ja tarkistamalla suojareleeltä vastaavatko ilmoitetut arvot syötettyjä arvoja. Jännitemittamuuntajien toisiopiirit koestetaan syöttämällä koestuslaitteella jännitettä niiden ensiöön ja varmistamalla yleismittarilla toisiosta, että jännitemittauspiirin jännitteet ovat oikeanlaisia. Siirreltävä koestuslaite ei pysty tuottamaan kilovolttiluokan jännitteitä mittamuuntajien ensiöön, joten mittauspiirin toimintaa ei voida todentaa suoraan suojareleeltä. Jännitemittauspiiri tyypillisesti kulkee koko kojeiston läpi, joten sen oikeat kytkennät on varmistettava jokaiselta suojareleeltä.

#### **4.7 Suurjännitekatkaisijan koestus**

Ennen ulkokentän suurjännitekatkaisijan käyttöönottamista on varmistuttava sen mekaanisen rakenteen ja eristeiden eheydestä ja oikeasta asennustavasta. Posliinieristeiden on oltava täysin ehjät ja puhdistetut sekä telinerakenteiden kiristysmomentit täytyy olla kunnossa. SF<sub>6</sub>-katkaisijan käyttöönotossa on lisäksi tarkistettava katkaisijan sisäisen kaasun paine suhteutettuna ulkoiseen lämpötilaan.

Tarkistusten jälkeen katkaisijaa voidaan ohjata kiinni ja auki. Ensimmäiset ohjaukset on syytä suorittaa etäältä, sillä mikäli laitteeseen on tullut sisäisiä vaurioita joko asennuksen tai kuljetuksen aikana voi katkaisijan sisällä oleva kova paine tai jousimekanismin vika aiheuttaa räjähdysten ohjausten vaikutuksesta.

Tarkistusten ja ensimmäisten ohjausten jälkeen voidaan aloittaa koestukset, jotka pitävät sisällään kaikkien kolmen vaiheen avautumis- ja sulkeutumisan mittauksen sekä ylimenovastusten mittaamisen. Koestuksissa varmistetaan myös jokaisen laukaisu- ja sulkemiskelan toiminta ja mitataan niiden minimitoimintajännite.

Katkaisijan koestukset voidaan suorittaa aikaisemmin mainitulla koestuslaitteella tai varsinaisella katkaisijatesterillä (kuva 15). Testeriin on integroitu kaikki aikaisemmin mainitut mittaukset ja se tarvitsee vain liityntäjohdot katkaisijan riviliittimille ja pääkoskettimille.



Kuva 15. DV-Power CAT03-katkaisijatesteri (DV-Power, 2022)

#### 4.8 Erottimen koestus

Erottimen koestus aloitetaan aistinvaraisella tarkastuksella, jolla varmistetaan sen eheydestä ja oikeasta asennustavasta. Erottimen pääkoskettimet tulee olla voideltu. Voitelu pienentää erottimen avautumisen yhteydessä tapahtuman pienen valokaaren kuluttavaa vaikutusta. Pääkoskettimelle suoritetaan ylimenovastusmittaus, jotta varmistutaan hyvästä johtavuudesta.

Erottimen mekaanisten liikeratojen tulee olla sulavat ja pääkoskettimien täytyy mennä luotettavasti kiinni. Lisäksi jos erottimessa löytyy erillinen maadoitusveitsi, on varmistettava, että se on luotettavasti yhteydessä sähköaseman maadoitusverkkoon. Moottoriohjatun erottimen ohjaus on testattava suojareleeltä asti.

## 4.9 Kaukokäyttökoestus

Kaukokäyttökoestus pitää sisällään monia jo aikaisemmin mainittuja vaiheita, mutta niiden tarkoituksena on testata sähköaseman tietoliikennelaitteiston liittymää sähköverkon haltijan SCADA-järjestelmään. Koestuksissa testataan muun muassa kytkinlaitteiden etäohjaus, mittauksien etäluenta, suojarleiden itsevalvonta, hälytyksien etäluenta ja suojauksien merkinannot.

Koestaja suorittaa kaukokäyttökoestukset ollessaan puhelinyhteyksissä jakeluverkkoyhtiön asema-automaatiovastaan kanssa. Koestettavia signaaleja on lukuisia, joten niistä on tyypillisesti laadittu oma signaalilista, jonka avulla koestuksista suoriudutaan. Lista myös varmistaa, ettei mitään signaaleja jää koestamatta.

## 5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön raportointiosan tavoitteena oli antaa laaja tietopohja sähköasemiin ja sen on varsinkin suunnattu uudelle koestajalle tai muulle tuoreelle työntekijälle, joka työskentelee sähköasemien parissa. Varsinainen koestuskäsikirja jää yrityksen käyttöön salassa pidettäväksi aineistoksi.

Käsikirjasta muodostui tiivis paketti, jossa käsitellään sähköaseman laitteiden ja suojausien koestukset vaiheittain. Ohjeistuksien alussa mainittiin mihin kohteisiin kyseinen koestus tehdään ja mitä laitteita tai työkaluja prosessiin tarvitaan. Ohjeistuksiin on myös pyritty lisäämään visuaalista elementtiä esimerkiksi merkkamalla piirikaavioihin oikeat liitännät koestuslaitteelle. Käsikirjassa ei käsitelty yksittäisten laitteiden tarkkoja käyttöönoton yksityiskohtia, vaan tarkoituksena on tarjota tukiaineistoa yleisistä koestusmenetelmistä.

Koestuskäsikirjan seuraava kehityskohde olisi sisältää ohjeistukset eri laitteiden konfigurointiin käyttöönotoissa. Ohjeistukset olisivat varsin hyödyllisiä varsinkin kompensointikelan säätäjissä, joissa käyttöönottovaiheen konfiguroinnit muuttuvat usein esimerkiksi ohjelmistojen muutosten takia.

## LIITE 1. Koestuskäsikirjan sisällysluettelo

# Sisältö

**Koestuskäsikirja**

koestuskäsikirja .....	3
maadoitusmittaukset osa 1 .....	4
Maadoitusmittaukset osa 2 .....	5
PJ-mittaukset .....	6
KJ-mittaukset.....	10
Ylimenovastusmittaus.....	11
Ulkokentän virtamuuntajien koestus.....	12
20 kV kennon Virtamuuntajien koestus.....	14
Ulkokentän Jännitemuuntajien koestus.....	17
20 kV Jännitemuuntajien ja jännitemittausketjun koestus.....	18
Johtolähdön suojausten koestus .....	19
Muuntajaterminaalin koestus.....	27
ulkokentän katkaisijan koestus ja käyttöönotto.....	36

## LÄHTEET

ABB. 2015. Instrument transformers application guide. PDF-dokumentti. Luettu 08.11.2021.

<https://library.e.abb.com/pub-lic/94c2ba5a2f381077c1257df000504e0c/1HSM%209543%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed4.pdf>

ABB. 2013. UniGear ZS1 Medium voltage, arc-proof, air insulated switchgear up to 24 kV insulated voltage. PDF-dokumentti. Luettu 13.11.2021.

[https://library.e.abb.com/public/0863c56209c44bb69e565b15f7448b31/Catalogue%20UG%20ZS1\\_RevF\\_2013\\_12\\_en.pdf](https://library.e.abb.com/public/0863c56209c44bb69e565b15f7448b31/Catalogue%20UG%20ZS1_RevF_2013_12_en.pdf)

ABB. 2011. 630 series Technical Manual. PDF-dokumentti. Luettu 11.01.2022.

[https://library.e.abb.com/pub-lic/c0a0a5145c74dc8bc1257b0c0055ff0d/RE\\_630\\_tech\\_756508\\_ENb.pdf](https://library.e.abb.com/pub-lic/c0a0a5145c74dc8bc1257b0c0055ff0d/RE_630_tech_756508_ENb.pdf)

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa.

Aura, L. & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6. painos. Helsinki: WSOYpro Oy.

DV-Power. 2022. Cat standard series esite. PDF-dokumentti. Luettu 21.02.2022.

[https://www.dv-power.com/wp-content/uploads/2019/02/Brochure-CAT-Standard-series-B-CATSTA-109-EN\\_2022-02-01.pdf](https://www.dv-power.com/wp-content/uploads/2019/02/Brochure-CAT-Standard-series-B-CATSTA-109-EN_2022-02-01.pdf)

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki: Otatieto Oy

Fluke. 2016. Fluke 1660-sarja esite. PDF-dokumentti. Luettu 19.01.2022

[https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902083\\_FIN\\_A\\_W\\_0.PDF?HSyFY-qwIC1gyuyY0SZb9ybFvsQ6j6Ecq](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902083_FIN_A_W_0.PDF?HSyFY-qwIC1gyuyY0SZb9ybFvsQ6j6Ecq)

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Lakervi, E & Partanen, J. 2000. Sähkönjakelutekniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto Oy

Megger. 2017. MOM200A esite. PDF-dokumentti. Luettu 19.01.2022

[https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/xivfy0jbrf/MOM200A\\_DS\\_en.pdf?u=k67mr7](https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/xivfy0jbrf/MOM200A_DS_en.pdf?u=k67mr7)

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto Oy

Omicron. 2021. CMC 356 esite. PDF-dokumentti. Luettu 19.01.2022.

<https://www.omicronenergy.com/download/document/0056076E-AA6E-4E77-975F-FE459785B7C3/>

Suomen Standarditoimisto SFS. 2018. SFS6001:2018 Suurjännitesähköasennukset. 5. painos. Helsinki: SESKO ry

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2018. D1-2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 26. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2019. 1-20 kV suurjännitelaitteistojen käyttöönottotarkastusohjeisto. 4. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2016. Sähköturvallisuuslaki 1135/2016.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2016/20161135>

Wallin, P. 1991. Sähkömittaustekniikan perusteet. 5. painos. Helsinki: Otatieto Oy