



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

RONI VARJONEN

Käytännön järjestelyt 10 kV verkon jännitteen nostossa

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN TUTKINTO-OH-
JELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Varjonen, Roni: Käytännön järjestelyt 10 kV verkon jännitteen nostossa
Opinnäytetyö, AMK
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka
Tammikuu 2023
Sivumäärä: 63

Tämän opinnäytetyön aiheena oli perehtyä Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkkojen vanhan 10 kV jännitetason nostamiseen 20 kV tasolle erityisesti käyttöönoton näkökulmasta. Työssä perehdyttiin mm. sähköverkkoon yleisesti, keskijänniteverkon vikoihin, sähköverkon kunnonvalvontaan, verkon varasyöttöihin sekä kytkentöjen suorittamiseen.

Työ tehtiin perehtymällä aluksi opinnäytetyön alueen sähköverkkoon, jonka jälkeen perehdyttiin kirjallisuuteen, verkostosuosituksiin sekä standardeihin. Lisäksi työssä haettiin aiheeseen näkökulmia ja kokemuksia vastaavanlaisista toteutuksista haastatteluilla.

Tavoitteena oli löytää yleisiä ohjeita ja toimintamenetelmiä tulevaisuudessa mahdollisesti toteutettaviin keskijänniteverkon jännitetason nostoihin, jotta muutostyöt onnistuisivat mahdollisimman sujuvasti ja olisi ennalta tiedossa mihin tulisi varautua. Pääpaino on sellaisissa sähköverkoissa, joissa verkon komponentit on jo pidemmän aikaa rakennettu 20 kV jännitteelle sopiviksi, mutta käytetty 10 kV tasossa.

Lopputuloksena työssä saatiin hyvä käsitys mihin on syytä varautua, kun keskijänniteverkon jännitetason nostamista lähdetään toteuttamaan. Työn lopuksi tehtiin liitteeksi listaus jännitetason noston käytännön vaiheista. Työssä löydettiin myös mahdollisia kehityskohtia yleisiin toimintatapoihin.

Avainsanat: keskijänniteverkko, jännitetason nosto, toimitusvarmuus, maa-kaapeleiden mittaukset, sähköverkon käyttöönotto

Abstract

Varjonen, Roni: Practical arrangements for raising the voltage of the 10 kV network

Bachelor's thesis

Degree programme: Electrical and automation engineering

January 2023

Number of pages: 63

The topic of this thesis was to study about raising the 10 kV voltage level of Turku Energia Sähköverkot Oy's medium voltage networks to the 20 kV level, especially from the point of view of introduction of the electricity grid. The work includes, e.g., the electric networks in general, faults in the medium voltage network, monitoring the condition of the electric network, backup power supplies for the network and perform connections.

The work was done by first familiarizing the area's electricity network, after which the literature, then network recommendations and standards were familiarized. In addition, the work sought perspectives on the topic and experiences from similar implementations through interviews.

The goal was to find out general instructions and operating methods for raising of the voltage level of the medium voltage network in the future, so that the modification works would be successful as smoothly as possible, and it would be known in advance what to prepared for. The focus is on electrical networks where the components of the network have been built for a long time to be suitable for 20 kV voltage but used at the 10 kV level.

As a result of the work is, a good understanding of what should be prepared for when raising the voltage level of the medium voltage network. At the end of the work, a listing of the practical stages of raising the voltage level was made as an attachment. The work also found possible development points for general methods of operation.

Keywords: medium voltage network, raising the voltage level, security of supply, cable measurements, introduction of the electricity grid

ALKUSANAT

Erittäin mielenkiintoisesta opinnäytetyö aiheesta sekä hyvästä työskentelyilmapiiristä haluan kiittää tämän työn toimeksiantajaa Turku Energian Sähköverkot Oy:tä. Lisäksi haluan erityisesti kiittää työn ohjaajaa Jari Lepistöä sekä työhön haastattelemiani henkilöitä, sillä heillä oli merkittävä vaikutus työn lopulliseen sisältöön.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 OY TURKU ENERGIA – ÅBO ENERGI AB.....	8
2.1 Turku Energia Sähköverkot Oy	8
3 SÄHKÖNJAKELUVERKKO	8
3.1 Sähköasemat	10
3.2 Jakelumuuntamot	11
3.2.1 Jakelumuuntajat.....	12
3.2.2 Jakelumuuntajan jännitesäätö	12
3.3 Keskijänniteverkko	15
3.3.1 Tähtipisteen maadoitus.....	17
3.4 Maadoitusjärjestelmä.....	18
3.4.1 Laaja maadoitusjärjestelmä	18
3.5 Asiakkaiden keskijänniteverkko	19
3.5.1 Kuivaeristeiset muuntajat.....	20
4 JÄNNITETASON NOSTON PERUSTA	22
4.1 Häviöt ja tehonsiirto	23
5 SÄHKÖVERKON KOMPONENTIT	24
5.1 Keskijännitekojeistot.....	25
5.1.1 SF6-kaasu	26
5.1.2 Keskijännitesulakkeet	27
5.2 Maakaapelit	28
5.3 Eristeen vanheneminen kaapeleissa	29
5.3.1 Osittaispurkaukset	29
5.3.2 Vesi- ja sähköpuut	30
5.4 Öljyeristeiset muuntajat	31
6 MITTAUKSET JA KUNNONVALVONTA	32
6.1 Eristysresistanssimittaus	32
6.1.1 Muuntajan eristysresistanssimittaus	33
6.2 Osittaispurkausmittaus	33
6.2.1 Off-line-mittaukset.....	34
6.2.2 On-line-mittaukset.....	35
6.3 Häviökerroinmittaus.....	35
6.4 Vaipaneheysmittaus	36
6.5 Vaihtojännitetestaus	36
6.6 Lämpökuvaus	37

7 TOIMITUSVARMUUS	38
7.1 Vikatapaukset	38
7.1.1 Ylijännitteet	39
7.1.2 Oikosulut	40
7.1.3 Kolmiaiheinen oikosulku	40
7.1.4 Epäsymmetriset oikosulut	40
7.1.5 Maasulut	41
8 VARASYÖTTÖ JA RENGASKÄYTTÖ	41
8.1 Varavoimakone	42
8.2 Kuormitus	43
8.3 Sähkönlaatu	44
8.3.1 Jännitteenalenema pienjänniteverkossa	45
8.4 Muuntajien rinnankytkentä	45
8.4.1 Muuntajien kytkentäryhmät	46
9 KYTKENTÖJEN SUORITTAMINEN	47
9.1 Työturvallisuus keskijänniteverkon kytkentätoimenpiteissä	48
9.2 Käyttökeskeytys	50
9.3 Muuntamon jännitetason vaihto	51
9.3.1 Jakelumuuntajan kytkentä jännitteiseksi	52
9.4 10 kV ja 20 kV verkkojen järjestelyt	53
10 HAASTATTELUT	53
10.1 Nieminen P., TESV Oy	53
10.2 Rasi, S., Lahti Energia Sähköverkot Oy	54
11 TULOKSET	55
12 YHTEENVETO	57
LÄHTEET	59
LIITE 1: TOIMENPIDELISTA	63

1 JOHDANTO

Työn aiheena on selvittää keskijänniteverkon jännitetason nostoa erityisesti käyttöönoton näkökulmasta. Työssä perehdytään erityisesti sähköverkkoon, jota on pidemmän aikaa rakennettu 20 kV komponenteilla, mutta käytetty 10 kV tasossa. Työssä käydään läpi sähköverkkoa ja sen komponentteja sekä näissä mahdollisesti tapahtuvia vaurioita ja vanhenemista. Vaurioiden havaitsemiseen on pyritty löytämään sopivia keinoja, jotta mahdolliset viat voisi löytää ennen uuden jännitetason käyttöönottoa. Lopuksi työssä on perehdytty kuinka jännitteenvaihto voisi käytännössä toteutua.

Tavoitteena työssä oli löytää yleisiä ohjeita tulevaan jännitetason nostoon, eikä tehty niinkään tietyn alueen suunnitelmaa. Lisäksi työllä on tavoitteena vähentää jännitetason noston mukanaan tuomia odottamattomia yllätyksiä, jotka voisivat pahimmillaan johtaa sähkönjakelun keskeytyksiin.

Työn aihe on ajankohtainen Turku Energia Sähköverkot Oy:lle, sillä keskijänniteverkon jännitetason nosto on ollut suunnitteilla jo pidemmän aikaa. 20 kV Jännitetasolla verkon suunnittelussa ei ollut niinkään mitään selvittelyä vaativaa, mutta käyttöönotto ja toimitusvarmuuden turvaamisessa oli enemmän avoimia kysymyksiä opinnäytetyössä selvitettäväksi. Turussa on osa sähköverkosta nostettu 10 kV:sta 20 kV:iin jo 90-luvulla pääosin ilmajohtoista muodostuneessa saariston sähköverkossa. Aiempien kokemusten perusteella verkon häiriöt ovat hieman lisääntyneet. Tällä työllä pyrittiin löytämään keinoja, joilla voidaan välttyä ylimääräisiltä vioilta erityisesti maakaapeliverkossa. Työssä kysyttiin myös näkemyksiä toisen verkkoyhtiön kokemuksista vastaavanlaisessa projektissa. Lopuksi työhön lisättiin liitteeksi työn pohjalta laadittu toimenpidelista, jossa on käyty läpi, miten jännitetason nostossa käytännössä edetä vaihe vaiheelta.

2 OY TURKU ENERGIA – ÅBO ENERGI AB

Vuonna 1898 perustettu Oy Turku Energia - Åbo Energi Ab on yksi Suomen suurimmista energiayhtiöistä, ja alansa johtava yhtiö Varsinais-Suomessa. Yhtiön omistajana toimii Turun kaupunki. Turku Energia -konsernin liiketoimintoihin kuuluvat sähköenergian myynti ja sähkön jakelu, verkostourakoinnin ja kunnossapidon palvelut sähköverkoille, sekä kaukolämmön palvelut kaukolämpö, kaukojäähdytys ja höyry. Turku Energian tytäryhtiöitä ovat Turku Energia Sähköverkot Oy (100 %) ja Turun Seudun Kaukolämpö Oy (60,75 %), lisäksi yhtiöllä on myös osakkuuksia energian tuotannossa. (Turku Energia, n.d.a.)

2.1 Turku Energia Sähköverkot Oy

Turku Energia Sähköverkot Oy on tämän työn toimeksiantaja, josta käytän tässä työssä myöhemmin lyhennettä TESV Oy. TESV Oy vastaa sähkönjakelusta, verkon toimitusvarmuudesta ja verkkopalvelusta, sekä sähköverkkomaisuuden hallinnasta ja kehittämisestä. Jakeluverkkoalue kattaa lähes koko Turun, pois lukien Paattisten alue. (Turku Energia, n.d.a.)

3 SÄHKÖNJAKELUVERKKO

Sähkönjakelujärjestelmä Suomessa koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista ja sähkönkuluttajista. Kantaverkko on sähkösiirron runkoverkko, johon on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot. Kantaverkkoon kuuluu 400 kV, 220 kV sekä 110 kV voimajohtoja, HVDC-tasajännite kaapeleita, jotka ovat omistuksessa yhdessä vastapuolen kanssa sekä vuonna 2020 kantaverkkoon kuului 116 sähköasemaa. Kantaverkon suuret jännitetasot johtuvat pitkistä siirtomatkista, jolloin suurilla jännitteillä saadaan karsittua sähkönsiirron häviöitä.

Kantaverkko on yhteydessä myös muiden maiden sähköjärjestelmiin. Kanta-verkon toimivuudesta vastaa Suomessa Fingrid. (Fingrid, n.d..)

Sähköverkko koostuu TESV Oy:n alueella 110 kV suurjännitejakeluverkosta, 10 kV ja 20 kV keskijänniteverkosta sekä 400 V pienjänniteverkosta. TESV Oy:n sähköasemilla suurjänniteverkkoa ei ole maadoitettu muuntajien tähtipisteistä, mutta Liedon Fingrid Oyj:n omistamalla sähköasemalla muuntajien tähtipisteet ovat maadoitettu. TESV Oy:n keskijänniteverkossa 10 kV verkko on maasta erotettu, ja 20 kV verkko on sammutettu muuntajien tähtipisteestä sammutuskuristimilla. Kaikkiaan sähköasemia on TESV Oy:n alueella 16, joista vain kahdella asemalla on 20 kV verkkoa. Tulevaisuudessa on tarkoitus kasvattaa 20 kV keskijänniteverkon osuutta, ja verkkoa onkin jo vuodesta 1988 lähtien rakennettu 20 kV komponenteilla. Syynä 20 kV verkon laajentamiseen on kasvava tehontarve kaupungin kasvun ja energianjärjestelmän sähköistymisen vuoksi (Lepistö,2022). Maakaapeloituuna on koko sähköverkosta noin 70 %. (Lehto, 2021, s. 8–10.) Kuvassa 1 on esitettyä TESV Oy:n jakeluverkko.



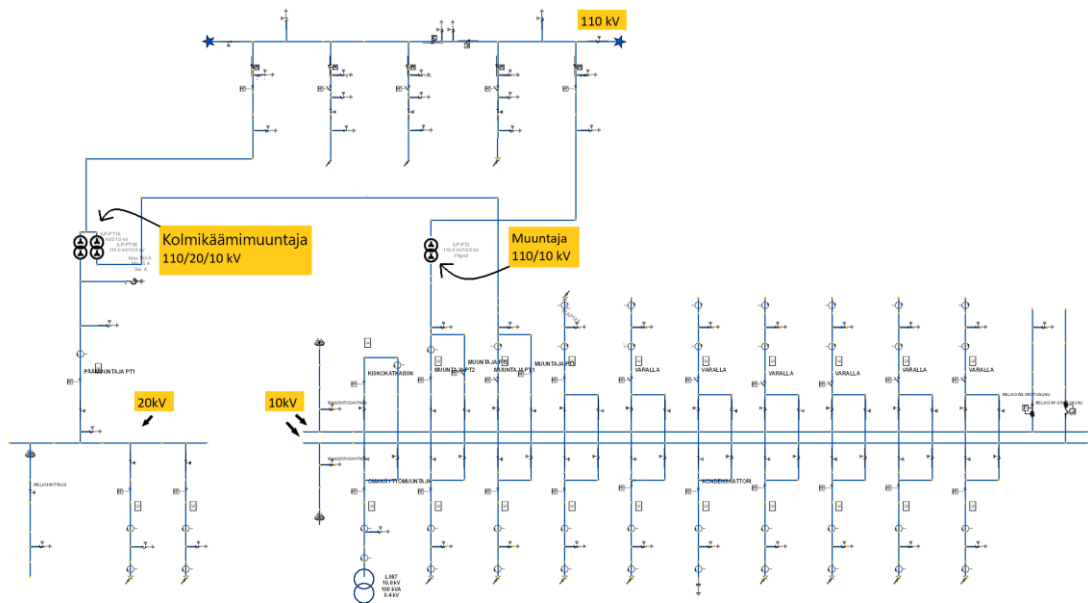
Kuva 1. TESV Oy:n jakeluverkkoalue. (Turku Energia, n.d.a.)

Verkon jännitetasot on toteutettu niin, että Hirvensalon sähköasemalla on 110/20 kV päämuuntaja, josta lähtevä 20 kV verkko on yhteydessä 10 kV verkkoon 20/10 kV välimuuntajien kautta. Verkossa on myös toinen sähköasema, jolla on 20 kV jännitettä. Tällä sähköasemalla kolmikäämipäämuuntajalla 110 kV jännite muunnetaan 20 kV sekä 10 kV jännitteelle. Sähköasemalta 20 kV keskijännitettä syötetään saaristoon, jossa verkko on pääosin 20 kV tasossa. Tuleva 20 kV jännitetaso toteutus on tarkoitus toteuttaa myös kolmikäämipäämuuntajalla, joka tulisi Kemppilän sähköasemalle. Koska molemmilla keskijännitetasoilla on sama kytkentäryhmä pää- ja jakelumuuntajissa, 10 kV alueen ja 20 kV alueen pj-verkon jännitteissä ei ole kulmaeroa (Nieminen, 2022).

Suurjännitteinen jakeluverkko ja keskijänniteverkko eroaa yksittäisestä pienjänniteverkosta siinä, että niissä verkon kehittäminen on usein jatkuva prosessi, joka ei tule koskaan valmiiksi. Suunnittelussa ei pyritä vain täyttämään verkon vaatimuksia nykyisellä kuormituksella, vaan suunnitteluun vaikuttavat myös kehitystekijät, kuten kuormituksen tason alueelliset ja ajalliset muutokset. (Lakervi & Partanen, 2009, s.118.)

3.1 Sähköasemat

Sähköasema on tärkein yksittäinen sähköjakeluverkon rakenneosana. Sähköasema, joka syöttää keskijänniteverkkoa ottaa alueverkosta usein 110 kV jännitettä ja muuntaa sen 20 kV tai 10 kV tasolle. Sijaintiin ja aseman kokoon vaikuttavat pääosin keskijänniterunkojohtojen pituus, mitoitus ja paljolti myös varayhteydet. Sähköasemalla sijaitsee mm. suuri osa verkon suojarileistä, sekä muusta automaatiosta. Usein syy uuden sähköaseman rakentamiselle on sähkötoimituksen laadun parantaminen tai ylläpito. (Lakervi & Partanen, 2009, s.119.) Kuvassa 2 on esitettyä erään kolmikäämimuuntajalla varustetun sähköaseman kaaviokuva. Kuvasta voi nähdä miten eri jännitetasot on toteutettu.



Kuva 2. Erään sähköaseman kaaviokuva, johon merkittynä päämuuntajat ja jännitetasot. (Tietoevry NIS, 2021.)

Tulevaisuudessa Kempin sähköasemalle on tarkoitus tulla vastaavanlainen 20 kV/10 kV keskijännitetoteutus, kuin on kuvan 2. sähköasemalla. Kuvan 2. kolmikäämisestä päämuuntajasta saadaan 10 kV sekä 20 kV jännitettä. Samaa muuntajaa voi käyttää myös välimuuntajana, jolloin se toimii muuntajana 20/10 kV välillä. Kempin sähköasemalla ei kuitenkaan vielä ole 20 kV jännitetasolle sopivia kojeistoja, joten sähköasema vaatii vielä melko paljon muutostöitä ennen 20 kV jännitetason käyttöönottoa.

Kolmikäämimuuntajan käytettävyydelle haasteena on jännitteensäätö, jonka referenssijännite on mahdollista valita vain toiselle alajännitetasolle. Käämikytkin säättää kumpaakin muuntosuhdetta yläjännitepuolen käämikytkintä ohjaamalla. Välimuuntajana käytettäessä jännitteensäätöä ei ole käytettävissä lainkaan. (Uurasjärvi, 2023.)

3.2 Jakelumuuntamot

Jakelumuuntamolla muunnetaan 20 kV tai 10 kV jännite yleensä 400 V tasolle. Jakelumuuntamoita on erityyppisiä esimerkiksi puisto- tai pylväsmuuntamoita,

ja niiden rakennuskustannukset eroavat toisistaan suuresti. Taajamissa käytettävät muuntajat ovat yleensä paljon kalliimpia, ja ne vaativat enemmän tehoa kuin haja-asutusalueiden muuntamot. Jakelumuuntamossa on vikavirta – ja ylikuormitussuojaus pienjänniteverkkoon. (Lakervi & Partanen, 2009, s.157.)

Jakelumuuntamo pitää sisällään keskijännitekiskoston, yhden tai useamman muuntajan, pienjännitelähdöt sekä siellä saattaa olla myös apujännitejärjestelmä. Taajamaverkkojen muuntamot ovat usein osana keskijännitekaapelin rengasta. Lähdöissä on joko katkaisijat tai tehoerottimet. Muita ominaisuuksia taajamaverkon muuntamoilla on yleensä, että ne ovat puisto- tai kiinteistömuuntamoita, keskijännitekojeistot voivat olla SF6-eristeisiä sekä niiden nimellisteho on usein 1000 kVA luokkaa. (Lakervi & Partanen, 2009, s.157–158.)

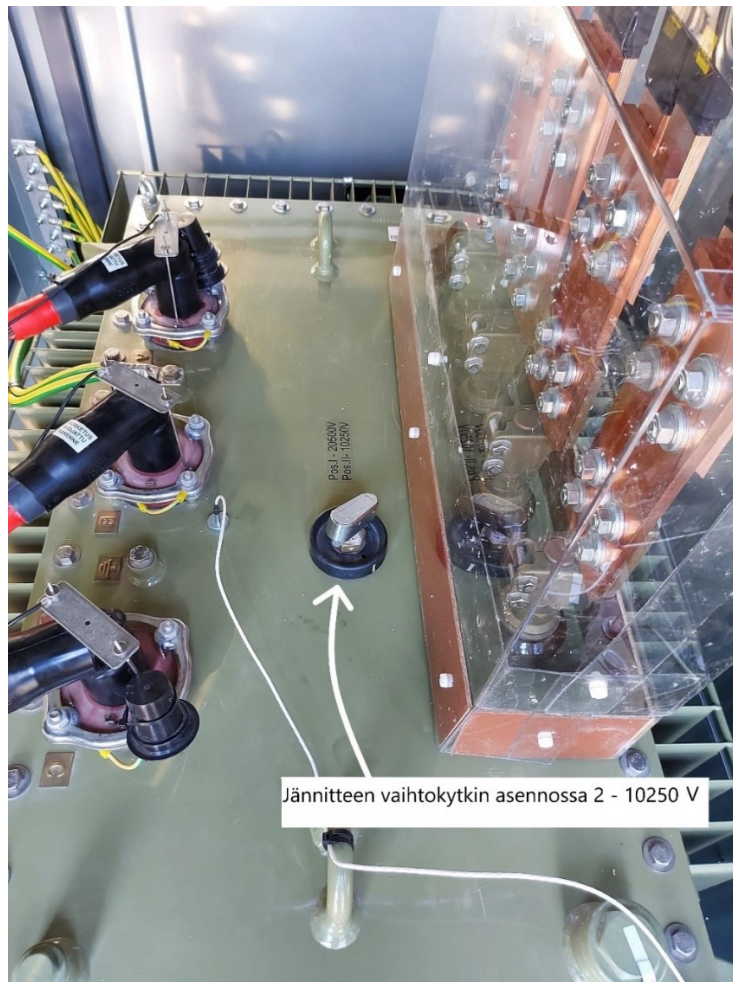
3.2.1 Jakelumuuntajat

Teho- tai toisin sanoen voimamuuntajat voidaan jakaa kahteen ryhmään pientehomuuntajat ja suurtehomuuntajat. Pientehomuuntajilla tarkoitetaan jakelumuuntajia. Jakelumuuntajien jännitteet ovat yläjännitepuolella $U_{1n} \leq 20\,000\text{ V}$ ja alajännitepuolella $U_{2n} = 400\text{ V}$, ja tehoa niillä on $S_n \leq 3150\text{ kVA}$. Nimellisjännitteeltään tai teholtaan suurempia muuntajia kutsutaan suurtehomuuntajiksi. Jakelumuuntajien rakenteita ovat esimerkiksi paisuntasäiliölliset öljyeristeiset jakelumuuntajat, hermeettiset jakelumuuntajat, pylväsmuuntajat ja valuhartsieristeiset jakelumuuntajat. (Aura & Tonteri, 1986, s. 79–80.) TESV Oy:n suurimmat omat jakelumuuntajat ovat kooltaan 1250 kVA, ja pienimmät ovat 50 kVA (Tietoevry NIS, 2022).

3.2.2 Jakelumuuntajan jännitesäätö

Jännitteensäätöä varten on muuntajassa yleensä väliotto- tai käämikytkin. Väliottokytkimellä jännitteen säätö tapahtuu jännitteettömänä. Yleensä kytkimellä säädetään yläjännitekäämityksen kierrosmäärää, asentoja löytyy normaalisti 3 tai 5 ja säätöalue on $\pm 5\%$. Väliottokytkimen säätöakseli kulkee muuntajan

kannen tai säiliön läpi. Akselin päästä löytyy kääntökahva, asennonosoitin ja lukituslaite. Käännettäessä kytkintä on varmistuttava lopuksi, että lukituslaite tulee kiinni, joka varmistaa väliottokytkimen käyttöasentoon asettumisen. Väliottokytkimiä tulisi käyttää ääriasennoissa noin vuoden välein, etenkin jos kytkintä käytetään harvoin. (ABB Transmit, n.d. s.30.) Muuntajan väliottokytkimet pyritään pitämään aina keskiasennossa. Yleensä TESV Oy:lle tulevissa uusissa muuntajissa ei enää ole väliottokytkintä, vaan niissä on ainoastaan jännitteen vaihtokytkin. (Lepistö, 2022.) Jännitteen vaihtokytkimellä voidaan yläjännitepuolen nimellisjännitettä muuttaa esim. 10 kV ja 20 kV välillä. Kuvassa 3 on esitettyä erään muuntajan jännitteen vaihtokytkin ja sen asento.



Kuva 3. Muuntajan kannella näkyy jännitteen vaihtokytkin ja sen asento.

Kuvassa 4 on esitettyä muuntajan tyyppikilpi, josta on nähtävissä mm. muuntajan nimellisjännitetasot jännitteen vaihtokytkimen eri asennoissa.



Kuva 4. Edellisessä kuvassa esitetyn muuntajan tyyppikilpi.

Kuvassa 5 on esitettyä eräs muuntaja, jossa on sekä väliottokytkin että jännitteen vaihtokytkin. Lisäksi on muuntajan kytkimet ovat erilaiset kuin aiemmin esitetystä kuvassa 3 olleen muuntajan jännitteen vaihtokytkin.



Kuva 5. Jännitteen vaihtokytkimiä on erilaisia.

Kuvassa 6 on esitettyä kuvan 5 muuntajan tyyppikilpi. Jännitteen vaihtokytkimellä valitaan 20 kV tai 10 kV alue, ja lisäksi väliottokytkimen asentoja voi olla useampia.



Kuva 6. Edellisessä kuvassa esitetyn muuntajan tyyppikilpi.

3.3 Keski-jänniteverkko

Suomessa keski-jänniteverkon jännitetaso on 20 kV tai 10 kV, joista 10 kV:n jännitetasoa on käytössä vain joissakin kaupungeissa. Keski-jänniteverkolla on suuri vaikutus sähköverkkojen käyttövarmuuteen, sillä suurin osa sähkönkäyttäjille aiheutuvista keskeytyksistä on peräisin keski-jänniteverkon vioista. Keski-jänniteverkon kautta on myös mahdollista muodostaa varayhteyksiä 110 kV:n johtojen ja sähköasemien vikojen varalle. Varsinkin taajamissa keski-jänniteverkon suunnittelussa on keskeistä pohtia mahdollisia lähtöjen ja sähköasemien korvattavuuskysymyksiä. (Lakervi & Partanen, 2009, s.125.)

Keskijänniteverkon yhteydessä monesti puhutaan 24 kV tai 20 kV jännitteestä, tämä perustuu siihen, että IEC:n toimesta on nimetty jatkuvan jännite-
rasituksen yläraja, eli verkon suurin käyttöjännite. Tällä tarkoitetaan vaiheiden välistä jännitteen tehollisarvoa, joka on ajasta ja paikasta riippumaton. Lisäksi on määritetty laitteen ja kojeiston suurin käyttöjännite, jonka mukaan on toteutettu laitteen tekninen ja toiminnallinen suunnittelu. IEC:n mukaisesti esimerkiksi 10 kV nimellisjännitteisessä verkossa 12 kV on laitteiden ja kojeistojen suurin käyttöjännite ja 20 kV nimellisjännitteisessä verkossa laitteiden ja kojeistojen suurin käyttöjännite on 24 kV. Lisäksi termillä mitoitusjännite tarkoitetaan samaa kuin nimellisjännitteellä. (Elovaara & Haarla, 2011, s.78–79.)

Sinimuotoisella vaihtojännitteellä voidaan jännitteen huippuarvo laskea kertomalla jännitteen tehollisarvo neliöjuuri 2:lla, jolloin 20 500V pääjännitteellä vaihejännitteen tehollisarvon ollessa noin 12 000 V vaihejännite vaihtelee välillä noin +17 000 V ...- 17 000 V. Puolestaan 10 250 V pääjännitteellä, jossa vaihejännite on tehollisarvoltaan noin 6 000 V vaihtelee vaihejännite välillä noin +8 500 V ... - 8 500 V. Jännitteen huipusta huippuun arvot ovat vastavasti 20 500 V jännitteellä noin 33 500 V ja jännitteellä 10 250 V se on noin 17 000 V. (Laine,n.d.a.)

Keskijänniteverkko on monesti rakennettu silmukoiduksi, sitä kuitenkin käytetään säteittäisenä. Silmukoidun verkon käyttö säteittäisenä onnistuu, kun silmukkaverkosta avaa yhden erottimen. Erotuskohtaa voidaan muuttaa joko käsin tai kauko-ohjatuilla erotinkojeistoilla. Silmukoiden käytössä on kuitenkin riskinä, että lyhyissä maakaapeli yhteyksissä eri sähköasemille menevät silmukat muodostavat suuria kapasitiivisia tasoitusvirtoja (Lakervi & Partanen, 2009, s.125). Keskijänniteverkon kytkentä tilantarkastelussa pyritään löytämään normaalin käyttötilanteen kytkentätila, jossa saavutetaan hyvä käyttövarmuus ja jännitetaso sekä mahdollisimman pienet häviöt verkossa. (Lakervi & Partanen, 2009, s.154.)

Keskijänniteverkko voi olla toteutettu maasta erotettuna tai sammutuskuristimen kautta sammutettuna. Sammutetussa verkossa muuntaja on

nollapisteestä yhdistetty maahan induktanssin välityksellä, jolloin kapasitiivinen vikavirta saadaan jäämään hyvinkin pieneksi. (Aura & Tonteri, 1993, s.165.) Sähköasemalta lähtevän keskijännitelähdön suojana on katkaisija, johon on liitetty ylivirtarele, maasulkurele ja jälleenkytkentärele. Maakaapelilähdöillä ei ole avojohtojen tavoin aikajälleenkytkentää. Avojohtoverkossa ai-noastaan ylivirtareleet toimivat oikosulkusuojana, eikä niillä ole käytössä ylivirtasuojauksia kuormitusvirran suhteen. (Lakervi & Partanen, 2009, s.125.)

3.3.1 Tähtipisteen maadoitus

Vikavirran suuruuteen ja kestoon voidaan vaikuttaa tähtipisteen maadoitustavalla merkittävästi. Maadoitustavalla on myös vaikutusta, kun valitaan eristystasoa, ylijännitesuojia sekä suojarkeitä. Tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa lisäksi maadoitusjärjestelmän suunnitteluun. Tähtipisteen maadoitustavan valinta voi perustua esimerkiksi paikallisiin määräyksiin, kosketus- ja askeljännitteisiin tai maasulkujen aiheuttamien laitevaurioiden rajoittamiseen. Järjestelmällä, joka on liitetty galvaanisesti yhteen, on oltava vain yksi tähtipisteen maadoitustapa. Erilaiset tähtipisteen maadoitustavat ovat hyväksyttäviä käyttöolosuhteissa, joissa järjestelmät ovat galvaanisesti toisistaan erotettuja. Esim. täysmuuntajien yli ei ole galvaanista yhteyttä, sillä yhteys muodostuu vain magneettivuon välityksellä (Elovaara & Haarla, 2011b, s.146–147). Tähtipisteen maadoitustapoja ovat esim.:

- maasta erotettu järjestelmä (Turussa 10 kV verkko)
- sammutettu järjestelmä (Turussa 20 kV verkko)
- suuren impedanssin kautta maadoitettu järjestelmä
- pienen impedanssin kautta maadoitettu järjestelmä. (SFS 6001:2018, 2018, s.28–29.)

Kun verkon jännitetasoa nostetaan, on keskijänniteverkolla muutettava tähtipisteen maadoitustapa maasta erotetusta sammutettuun järjestelmään, jotta verkko voi olla galvaanisessa yhteydessä muuhun 20 kV verkkoon. Myös verkon suojauksessa täytyy kiinnittää huomiota, että mahdolliset ylijännitesuojat sekä suojarkeitä ovat sopivat.

3.4 Maadoitusjärjestelmä

Vikavirran suuruus, vian kesto aika ja maaperän maadoituselektrodien ominaisuudet ovat olennaiset tekijät maadoitusjärjestelmän mitoittamiseen (SFS 6001:2018, 2018, s.88).

Maadoitusjärjestelmille on toiminnallisia vaatimuksia, joiden mukaan:

- komponenttien ja potentiaalintasaussuojaimien täytyy kyetä purkamaan ja jakamaan vikavirta toiminta-aikaan perustuvia varasuojauksen termisiä ja mekaanisia suunnitteluraja-arvoja ylittämättä
- toimintakunto on säilyttävä asennusten odotettavan eliniän ajan. On huomioitava korroosiota ja mekaanista rasitusta
- on oltava riittävä suorituskyky estämään laiteviat, jotka johtuvat, nousevasta maadoitusjännitteestä, suurista hajavirroista ja potentiaalieroista väärissä osissa, joissa ei kuuluisi kulkea vikavirtaa
- askel- ja kosketusjännitteet sekä siirtyvät potentiaalit on pysyttävä normaaleissa jännite rajoissa suojaruleiden ja katkaisijoiden normaalien toiminta-aikojen puitteissa. (SFS 6001:2018, 2018, s.88.)

3.4.1 Laaja maadoitusjärjestelmä

Laaja maadoitusjärjestelmä tarkoittaa maadoitusjärjestelmää, joka toteutuu yleensä kaupunki keskustoissa sekä teollisuus- ja kaupunkialueilla, laajalla alueella sijaitsevien suur- ja pienjännite maadoitusten ansiosta. Vaadittava yhtenäinen maadoitusjärjestelmä toteutetaan paikalliset maadoitusjärjestelmät yhteen kytkemällä. Laajalla maadoitusjärjestelmällä vältytään vaarallisen korkeilta kosketusjännitteiltä, lähemmäs kytkettyjen maadoitusjärjestelmien ansiosta. Laajan maadoitusjärjestelmän muodostuminen voidaan todeta joko mitauksilla tai laskennallisesti, kun kyseessä on tyypillinen järjestelmä. (SFS 6001:2018, 2018, s.20.)

TESV Oy:n 10 kV keskijänniteverkko kuuluu osin laajaan maadoitusjärjestelmään, sillä muuntamoiden välillä on usein kaksi keskijänniteyhteyttä muihin

muuntamoihin ja useilla muuntamoilla on myös kolme yhteyttä, joiden lisäksi maadoitukset yhdistyvät toisiinsa myös pienjänniteyhteyksillä.

3.5 Asiakkaiden keskijänniteverkko

Osalla asiakkaista on sähkön kulutus niin suurta, että on tarve omalle keskijänniteliittymälle. Suurimmat TESV Oy:llä tarjolla olevat pj-liittymät ovat kooltaan nykyään 1000 A. Keskijänniteasiakkaan liittymiskohta on rengasverkossa asiakkaan kytkinlaitteistossa, jolloin rengasverkon kaapelit jäävät TESV Oy:n omistukseen. Säteittäisen verkon liittymässä johtojen omistusraja sovitaan erikseen. Tilanteissa, joissa yhdellä asiakkaalla on useampia keskijänniteverkon liittämiskohtia samalla tontilla, samassa kiinteistössä tai sitä vastaavassa kiinteistöryhmässä, asiakkaan omilla keskijänniteyhteyksillä kytkettyinä toisiinsa, voidaan erikseen sovittaessa tällaista kokonaisuutta käsitellä yhtenä keskijänniteliittymänä. Keskijänniteverkkoon liittyvän asiakkaan liittymissopimukseen sovelletaan Energiaviraston vahvistamia, kulloinkin päteviä sähkönkäyttöpaikkojen liittymisehtoja, jos liittymissopimuksella ei ole sovittu toisin. (Turku Energia, n.d.c.)

TESV Oy:n verkkoon liittyvät asiakasmuuntamot tulee rakentaa 20 kV jännitteelle sopiviksi, vaikka verkko olisi vielä 10 kV jännitetasossa. Vanhan 10 kV muuntamon 20 kV jännitetason vaihdon yhteydessä TESV saattaa tarjota myös vaihtoehtoa muuntamon haltuunotosta. (Turku Energia, n.d.b.)

Lahti Energia Sähköverkko Oy:n käyttö- ja kunnossapitoinsinöörin Rasin haastattelun perusteella on syytä varautua, että asiakasmuuntamoiden vuoksi jännitetason noston aikataulu saattaa välillä venyä. Yksi hankaloittava tekijä asiakasmuuntamoissa on, että käytössä saattaa olla kuivamuuntajia, joiden jännitetason vaihto on eroava öljyeristeisiin muuntajiin. (Rasi, 2022.)

Asiakkaiden muuntamot, kaikki kojeistot ja verkko täytyy jokaisessa kohteessa selvittää erikseen, että kaikki ovat varmasti 20 kV tasolle sopivia (Lepistö, 2022). Erikoistapauksissa on mahdollista, että verkkoyhtiön ja asiakasverkon

välille tulee 20/10 kV välimuuntaja. Välimuuntajan käyttö voisi tulla kysymykseen kohteissa, joissa asiakkaalla on paljon keskijänniteverkkoa. Välimuuntajat ovat kuitenkin merkittävästi kalliimpia kuin 20/0,4 kV muuntajat. Asiakasmuuntajat kojeistoinen voivat olla merkittävä kustannuserä, jos asiakkaiden kanssa ei päästä edullisiin sopimuksiin. Kustannustenjako on todennäköisesti helpompaa kohteissa, joissa asiakaskojeiston ikä on korkea, jolloin kojeistojen jäännösarvo on pieni. (Tiippana, 2011, s.69.)

3.5.1 Kuivaeristeiset muuntajat

Kuivamuuntajia on käytössä joissakin asiakasmuuntamoissa, sillä niiden käyttö voi olla perusteltua kohteissa kuten: sairaalat, päiväkodit, koulut, kaivokset, väestösuojat sekä teollisuuslaitokset, joissa muuntaja viedään suurten koneiden lähelle. Kuivaeristeiset muuntajat eroavat O1 luokan eristysnestemuuntajista eli öljyeristeisistä muuntajista ominaisuuksiltaan, joita ovat mm.:

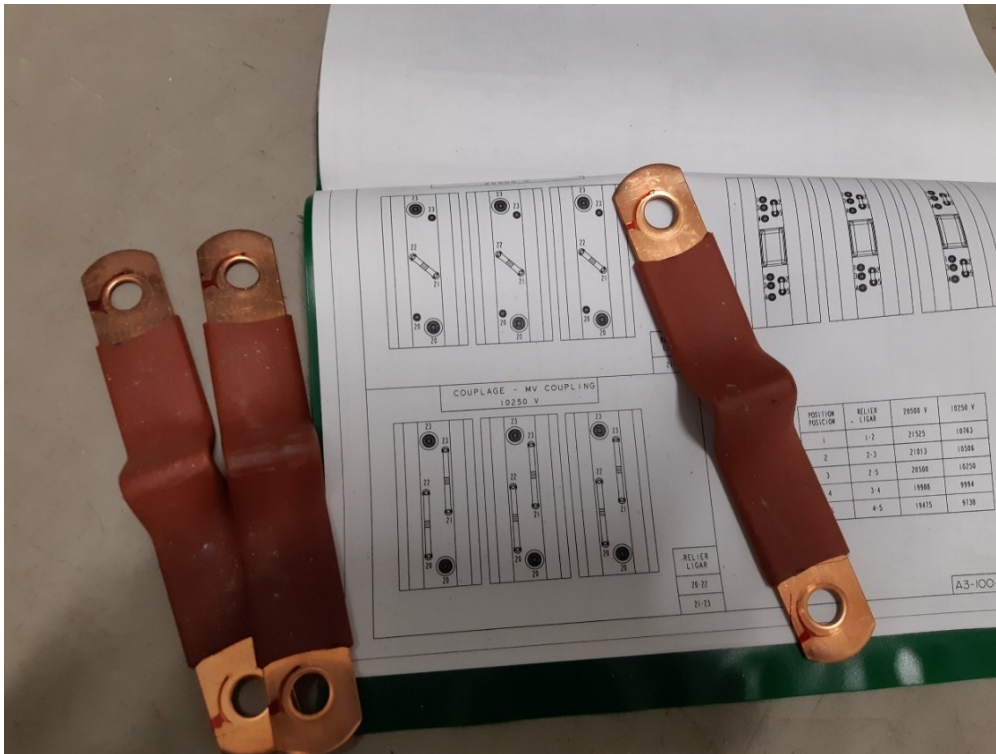
- selkeästi pienempi palokuorma
- heikompi pitkäaikaisen ylikuormituksen sieto
- vaatimukset jäähdytykselle suuremmat
- suurempi ääni
- merkittävin eroavaisuus jännitetason nostoa ajatellen on, että jälkepäin tehtävä 10 → 20 kV jännitetasonvaihto on kallis, hankala ja usein jopa mahdoton toteuttaa. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, s.30.)

Käyttökokemusten perusteella kuivamuuntajissa on ilmennyt jopa pahoja luotettavuusongelmia. Osa muuntajista on toimitettu koestettuna vain 95 kV syöksykoejännitteellä, vaikka SFS 6001 suosittelee 125 kV käyttöä syöksykoejännitteenä 20 kV käyttöjännitteisille kojeille ja kojeistoille. Ainoastaan 95 kV syöksykoejännitteellä koestettu muuntaja saattaa vaurioitua, jopa kaapeliverkossa mahdollisesti syntyvistä kytkentäylijännitteistä. Niinpä muuntaja tulisi pienemällä syöksykoejännitteellä koestettuna suojata suoraa muuntajaan kytketyillä ylijännitesuojilla. Normaalisti maakaapeliverkossa ei tarvitse kiinnittää erityistä huomiota ylijännitesuojaukseen. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, 30–31.) Kuvassa 7 on esitettyä eräs kuivamuuntaja 10 kV kytkennällä.



Kuva 7. Kuvassa eräs kuivamuuntaja 10 kV kytkennällä. (Rasi, 2022.)

Kuvassa 8 on esitettyä naparuuvien väliin tulevat kupariliuskat, joilla muuntajan yläjännite saadaan 20 kV tasolle. Taustalla näkyy myös kytkentäohje eri jännitetasoille, jossa ylempänä 20 kV kytkentä ja alempana 10 kV kytkentä.



Kuva 8. Kuvassa on naparuuvien väliin tulevat kupariliuskat. (Rasi, 2022.)

4 JÄNNITETASON NOSTON PERUSTA

Suomessa monissa kaupungeissa on jäljellä 10 kV keskijänniteverkkoa. Se on suureksi osaksi peräisin ajoilta, jolloin komponenttien hintaerot olivat suuria. Lisäksi aiemmin ei ollut valtakunnallista suositusta käyttää 20 kV verkkoa. 10 kV verkko tuo usein haasteita kaapeleiden kuormituksessa ja verkon jännitteenalennemien kanssa. Jännitettä nostaessa siirtokyky kasvaa nopeasti, mutta vaatii myös verkon komponenteilta parempaa eristystasoa. Jännitetason muuttamiseen onkin usein varauduttu pitkällä aikavälillä rakentamalla verkkoa 20 kV komponenteilla. Esimerkiksi muuntajat voivat olla 10 kV väliotolla olevia 20 kV muuntajia. (Lakervi & Partanen, 2009, s.77.)

Erkki Tiippanan Lappeenrannan Energia Oy:lle tehdyssä diplomityössä ”Sähköverkkoyhtiön 10 kV keskijänniteverkon kehittämisuunnitelma” on tarkasteltu 10 kV:n jännitetason nostoa 20 kV:iin erityisesti kausi-investointien

kannalta. Tulokset ovat kannustavia jännitteen noston puolesta. Erityisesti kannattavia alueita ovat jännitteen noston kannalta ne, joilla komponentit ovat jo pitkälti valmiiksi 20 kV jännitetasolle sopivia tai alueet, joissa komponenttien teknistaloudellinen ikä alkaa olemaan korkea. Erityisesti 10 kV jakelualueiden reuna alueilta on hyvä lähteä liikkeelle. Tulosten pohjalta on todettu, että vain jännitteen nostosta aiheutuvat lisäkustannukset jäävät maltillisiksi. Lisäkustannuksiksi lasketaan kulut, jotka muodostuvat mm. komponenteista, jotka vaihdetaan ennen kuin niiden teknistaloudellinen käyttöikä on tiensä päässä. Tarkastelussa kustannukset on todettu kohtuullisiksi, sillä sähköverkoilla on joka tapauksessa jatkuva uudistamisentarve. 10 kV Jännitetason noston 20 kV:in on myös nousevien kuormitusten ja yleisen saneeraustarpeen näkökulmasta, todettu kannattavaksi. (Tiippana, 2011, s.72–73.)

Tietoevry NIS tietojärjestelmän mukaan TESV Oy:n muuntamoista 426 on rakennettu tai saneerattu ennen vuotta 1988, jolloin niissä on todennäköisesti vielä vain 10 kV jännitetasolle soveltuvat komponentit. Puolestaan vuoden 1988 jälkeen rakennettuja tai saneerattuja TESV Oy:n omia muuntamoita on tietojärjestelmän mukaan noin 646, näissä olisi todennäköisesti valmiudet 20 kV jännitetason käyttöönottoon. Näiden lisäksi verkossa on noin 160 asiakasmuuntamoita, joissa osassa on puutteellisia tietoja. (Tietoevry NIS, 2022.) Tarkastusten yhteydessä tulee kartoittaa asiakasmuuntamoiden tilannetta tarkemmaksi.

4.1 Häviöt ja tehonsiirto

Siirrettävä sähköteho saadaan kaavasta:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

jossa P on siirrettävä teho, U on jännite, I on virta ja $\cos \varphi$ on tehokerroin

Jännitetaso kaksinkertaistamalla saadaan siirrettyä sama teho puolet pienemällä virralla. Kaapelin virran ja resistanssin avulla voidaan laskea kaapelin pätötehohäviö, joka on:

$$P_h = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (2)$$

jossa P_h on siirtohäviö, R on johtimen resistanssi ja I on johtimen virta

Johtimen jännitehäviö puolestaan saadaan kaavasta:

$$U_h = I \cdot \sqrt{3} \cdot l \cdot (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (3)$$

jossa, U_h on Jännitehäviö, I on Johtimen virta, l on Johtimen pituus, r on Resistanssi (Ω/km), x on Reaktanssi (Ω/km) ja φ on vaihekulma.

Joten jännitettä nostamalla 10 kV:sta 20 kV:iin voidaan johtimien tehohäviötä pienentää neljäsosaan. Toisin sanoen häviöteho johtimissa kasvaa suhteessa virran neliöön. Myös jännitehäviötä saadaan pienennettyä merkittävästi. Jännitetason nostolla siis mahdollistetaan pidemmät sekä vahvemmat siirtoyhteydet, suuremmilla tehoilla ja pienemmällä jännitehäviöillä. (Laine, n.d.b.) Taajamien maakaapeliverkossa vahvalla keskijänniteverkolla on tärkeä rooli, koska se voi tarvittaessa toimia varayhteytenä mahdollisissa 110 kV verkon vioissa (Lakervi & Partanen, 2009, s.77).

5 SÄHKÖVERKON KOMPONENTIT

TESV Oy:n sähköverkkojen komponentit on jo vuodesta 1988 lähtien valittu 20 kV verkkoon sopiviksi. Verkon kaikki komponentit on kuitenkin tärkeää tarkastella läpi, ennen 20 kV jännitteen kytkentää, sillä tietojärjestelmissä voi olla väärää tai puutteellista tietoa. Melko uusissakin muuntamoissa voi olla tilanne, että esimerkiksi muuntaja on vanha 10 kV muuntaja, jossa ei ole jännitteen vaihtokytkintä 20 kV jännitteelle.

5.1 Keskijännitekojeistot

Yleisesti kojeistolla tarkoitetaan rakennekokonaisuutta, johon sisältyy tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Kojektorakenteita voidaan luokitella suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. Pienjännitekojeistoa voidaan nimittää myös jakokeskukseksi. Suurjännitekojeistojen luokittelu perusteita ovat: ulko- ja sisäkojeistot, avorakenteiset ja koteloidut kojeistot sekä eristystavan mukainen luokittelu. (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 117.)

Nykyisin kojeistot ovat usein SF₆ -eristeisiä eli GIS-laitoksia (gas insulated switchgear). GIS-laitoksia keskijänniteverkoilla ovat varsinaiset katkaisijakytkinlaitokset, kuormaerottimin varustetut kytkinlaitoskennot tai ilmaeristeisiä kuormanerotinkojeistoja korvaavat muuntamokojestot eli RMU-kojeistot (Ring Main Unit). Laitteistojen koko keskijännitealue on tyypillisesti katettu yhdellä rakenteella, ja jännitelujuusominaisuudet eri jänniteportaille saavutetaan kaasun painetta nostamalla. RMU-kojeistoja käytetään niin ulkotiloissa puistomuuntamoissa, kun sisätiloissakin kiinteistömuuntamoissa. Kaasutilan paine kojeistoissa on niin alhainen, että SF₆-kaasu ei pääse nesteytymään edes -40 °C lämpötilassa. Kuormaerottimet ja maadoitusveitset ovat kaikki samassa teräslevyllä vuoratussa kaasutilassa, jonka jäännöskosteuden ja SF₆:n hajoamistuotteet saadaan sidottua suodattimella. Kytkinlaitteiden on oltava erittäin toimintavarmoja, sillä niitä ei pystytä huoltamaan. RMU-kojeistossa keskijännitevarokkeet ovat yksivaiheisissa koteloissa ilmaeristeisinä tai kouruissa niin, että niiden välille ei synny vuotovirtoja. Maadoitetussa tai kosketussuojaisessa lähdössä varokkeet saa vaihdettua käsin tai pihtien avulla. (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 136–138.) Kuvassa 9 on esitettyä eräs tyypillinen RMU-kojeisto, jossa on vasemmalta alkaen kolme kuormanerotinta ja yksi varokekuormaerotin, joka syöttää muuntajaa.



Kuva 9. Siemensin RMU-kojeisto.

Varokekuormaerotinta käytetään sekä kytkinlaitteena, että oikosulkusuojana esim. jakelumuuntajalle tai johtohaaralle. Sen rakenne on melko samanlainen kuin kuormaerottimilla, mutta siinä on lisäksi paikat suurjännitesulakkeille. Suurjännitesulakkeissa on laukaisunastat, joista yhden tai useamman laukettaessa varokekuormaerotin katkaisee virtapiirin. Erotinta ei pysty myöskään sulkemaan ennen, kuin kaikki sulakkeet ovat vaihdettu ehjiin. (Monni, 2003, s.132.)

5.1.1 SF6-kaasu

SF6-kaasu eli rikkiheksafluoridi on yleinen eristysaine suurjännitetekniikassa. Hyvien eristysominaisuuksien vuoksi sitä käytetään koteloituissa kytkinlaitoksissa eli GIS-laitoksissa, jolloin kojeistot on mahdollista rakentaa pienempi kokoisiksi. SF6-kaasun hyvä ilmaan nähden 2,5-kertainen jännitelujuus perustuu sen elektronegatiivisuuteen. Se tarkoittaa aineen molekyyliin kykyä sitoa vapaita elektroneja, jotka ovat läpilyönnin edellyttävä tekijä. Yleensä SF6-kaasua käytetään normaalia painetta korkeammassa paineessa, jotta jännitelujuus

paranisi. (Aura & Tonteri, 1993, s.208.) SF6-kojeistojen käyttökokemukset Suomessa ovat hyviä. Vertailevien tutkimusten pohjalta on voitu todeta, ilmaeristeisten kojeistojen olevan noin 4–5 kertaa vikaherkempiä SF6-kojeistoihin verrattuna. (ST 53.11, 2018, s.12.)

SF6-kaasun on mahdollista nesteytyä alhaisissa lämpötiloissa, joita myös Suomen talviolosuhteissa voi tulla vastaa. Kaasun nesteytyminen johtaa läpilyöntiin ja laitteiston tuhoutumiseen. SF6-eristeisissä kojeistoissa on syytä huolehtia, siitä että lämpötila ja kaasun paine pysyvät sallitulla alueella. Sähkökentän epähomogeenisuus heikentää voimakkaasti kaasun sähkölujuutta. Myös esimerkiksi kosteus heikentää eristyskykyä. Normaaleissa olosuhteissa SF6-kaasu on melko vaaraton, kuitenkin valokaaren vaikutuksesta kaasu voi hajota vaarallisiksi yhdisteiksi. (Aura & Tonteri, 1993, s.208–209.)

5.1.2 Keskiännitesulakkeet

Keskiännitesulakkeiden tehtävä muuntajan varokekuormanerotuksessa on suojata muuntajaa, muuntajan suurjännitekaapelia, pienjännitekeskuksen syöttöjohtoa ja pienjännitekeskusta. Sulakkeilla saadaan pienennettyä muuntamopalon riskiä sekä parannettua henkilöturvallisuutta muuntamossa. Myös muuntajan käämien vauriot oikosulkuilanteissa jäävät sulakkeilla pienemmiksi. K_j-sulakkeilla pystytään suojamaan pienjännitekeskuksessa oikosulun aiheuttamia lämpö-, häikäisy- ja painevaikutuksia. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, s.22.)

Keskiännitesulakkeet tulee valita sulake- ja kojeistovalmistajien suositusten mukaan, sillä eri valmistajien sulakkeiden sulamiskäyrät voivat olla huomattavan erilaisia. Erityisesti SF6-kojeistojen huonompi jäähtymiskyky ilmaeristeisiin kojeistoihin verrattuna, korostaa sulakkeiden valinnan merkitystä valmistajien ohjeiden mukaisesti. Oikosulkuvalokaaren aiheuttamat riskit saadaan minimoitua parhaiten, kun valittu sulake toimii mahdollisimman nopeasti ja luotettavasti. Esimerkiksi pienjännitepuolen oikosulut voivat aiheuttaa sulakkeelle vain pientä ylivirtaa, jonka seurauksena sulakkeen kuitenkin pitäisi toimia.

Sulakkeita valittaessa on lisäksi syytä ottaa huomioon keskijännite- ja pienjännitesulakkeiden selektiivisyys, etenkin <500 kVA tehoisissa muuntamoissa. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, s.22.)

Taulukko 1. Ohjeellinen muuntajaa suojaavan keskijännitesulakkeen valinta 10 kV ja 20 kV jännitteillä. (ST 53.11, 2018, s.13.)

Muunta- ja kVA	200	315	500	800	1000	1250	1600
Jännite 10 kV	25	40	63	63	100	100	100
Jännite 20 kV	16	25	25	40	63	63	63

5.2 Maakaapelit

Opinnäytetyön kohdealueella keskijännitekaapelit ovat tyypiltään AHXAMK-W 3x185/35, jonka nimellisjännitetaso on 20 kV. Kaapeleita on tähän asti käytetty 10 kV jännitetasossa. AHXAMK-W 3x185/35 kaapelilla on kolme erillistä yksivaihejohdinta ja kuparinen keskusköysi (Reka, 2022, s.1).

Maakaapeli koostuu keskijänniteverkossa johtimista, johdinsuojasta, johdineristyksestä, hohtosuojasta, kosketussuojasta ja ulkoisista suojakerroksista. Johtimet ovat yleensä alumiinia varsinkin suuremmilla poikkipinnoilla. (Aura & Tonteri, 1993, s.140.)

Kaapelin osat ja niiden tehtävät:

- Johdinsuojat ovat johtimen pinnalla ja valmistettu puolijohtavasta materiaalista. Tarkoitus on poistaa johtimen pinnan epätasaisuuksia, jolloin kenttävoimakkuushuiput vähentyvät
- Johdineristys on yleensä materiaaliltaan suuritiheyksistä polyeteeniä, vanhemmissa kaapeleissa myös kyllästettyä paperia
- Hohtosuojan tarkoitus on tasata sähkökenttää ja estää kenttävoimakkuushuippuja johtosuojien ohella

- Kosketussuojan tarkoitus on olla kulkureittinä varaus- ja vikavirroille, häiriö- ja turvallisuussuojana
- Ulkovaippa ja ulkoiset suojakerrokset suojaavat kaapelia mekaaniselta rasitukselta sekä estävät korroosiota. (Aura & Tonteri, 1993, s.140.)

Reka:n valmistaman AHXAMK-W 12/20 (24) kV 3-johdin keskijännitekaapelissa eriste on PEX-muovia eli ristisilloitettua polyeteeniä sekä johdin ja hohtosuoja ovat puolijohtavaa PEX-muovia. Lisäksi kaapelissa on puolijohtava vesitiivistysnauha ja kosketussuoja on tiukasti laminoitua alumiininauhaa. (Reka, 2022, s.1.)

5.3 Eristeen vanheneminen kaapeleissa

PEX- eristyksessä tapahtuva rappeutuminen muuttaa ominaisuuksia eristysmateriaalissa, jotka on mahdollista havaita kemiallisilla analyyseilla. PEX eristyksessä tapahtuvat muutokset voivat alentaa jännitekestoisuutta. PEX eristys on erityisen herkkä osittaispurkauksille toisin kuin vanhojen öljykaapelien eristeet. Pahimmat rasitteet PEX- eristeaineeseen johtuvatkin usein sähköisistä syistä kuten osittaispurkauksista, sähköpuista ja vesipuista. Nämä viat vaikuttavat satunnaisesti ja paikallisesti kaapeleihin ja lopullinen vikaantuminen on yleensä paikallinen ilmiö. (Hyvönen, 2008, s.6,16–20.)

5.3.1 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus tapahtuu sähkökentän voimakkuuden ylittäessä eristyskohdan sähkölujuuden. Osittaispurkauksessa ei kuitenkaan tapahdu elektrodivälin oikosulkua. Luokituksia osittaispurkauksille ovat sisäiset eli ontelopurkaukset, pintapurkaukset eristeen pinnalla sekä koronapurkaukset johtimen pinnalla. Vaihtojännitteellä osittaispurkaukset toistuvat yleensä joka jaksolla, jonka vuoksi ne ovat erityisesti vaihtojännitteellä ongelmallisia. Nykyään yleisessä käytössä oleville muovikaapeleille osittaispurkaukset ovat erityisen haitallisia, sillä ontelopurkaukset aiheuttavat eristeessä eroosiota. Purkauksissa syntyy

lämpöä purkauskanaaviin, sekä eristettä syövyttäviä happoja ja kaasuja. (Aro ym., 2011, s.76.)

Jännitetason nostoa ajatellen osittaispurkauksien merkitystä ja voimakkuutta kuvaavista suureista mielenkiintoisia, ovat etenkin niiden syttymis- ja sammumisjännitteet. Osittaispurkauksen syttymisjännitteellä nimittäin kuvataan pienintä jännitettä, jolla suuruudeltaan tietyn raja-arvon ylittäviä osittaispurkauksia havaitaan ensimmäisen kerran, kun jännitettä nostetaan vähitellen. Sammumisjännite puolestaan kuvaa jännitettä, jossa tietyn raja-arvon suuruisia purkauksia ei enää tapahdu, kun jännitettä vähitellen pienennetään. Yhden purkauksen muuntunut energia on verrannollinen eristysrakenteen ulkopuolelta mitattavaan näennäisvaraukseen sekä purkauksen syttymisjännitteeseen. Monissa tapauksissa on annettu merkillepantavien purkausten suuruudelle raja-arvot standardien tai hankintasopimusten mukaan. (Aro ym., 2011, s.85.)

5.3.2 Vesi- ja sähköpuut

Vesipuu voi alkaa muodostua, kun eristeessä on kosteutta. Kosteus voi olla eristeessä monesta syystä esimerkiksi valmistuksesta asti, se voi olla kulkeutunut ulkokuorenläpi tai kaapelipäätteen kautta. Varsinkin vanhimmissa ensimmäisensukupolven PEX-kaapeleissa on ollut valmistuksesta johtuneita vesipuuongelmia. Suomessa käytetyissä kaapeleissa vesipuuongelmia ei kuitenkaan tiettävästi ole esiintynyt (Pakonen ym., 2018, s. 119). Sähkökentän mukaan etenevä vesi saa eristeessä aikaan puuta muistuttavan muodostelman. Vesipuu voi kasvaessaan lävistää koko eristeen, ja näin ollen aiheuttaa läpilyönnin. Kuitenkin kaapelin kuivuessa vesipuiden kasvu saattaa pysähtyä. (Hyvönen, 2008, s.20–18.) Vesipuita ei pystytä havaitsemaan osittaispurkauksimittauksella, eikä niitä yleensä pystytä käytön aikaisilla mittauksilla havaitsemaan. Havaitseminen sen sijaan on tehokasta häviökerroinmittauksella. (Aro ym., 2011, s.156–157.)

Sähköpuut ovat pienten johtavien kanavien verkosto eristeessä, jotka etenevät verraten nopeasti eristeen läpi aiheuttaen vian. Puut voivat saada alkunsa esimerkiksi likahiukkasesta, vesipuista tai pienistä onkaloista eristeaineessa. Onkaloissa tapahtuu osittaispurkauksia ja ontelot kasvavat entisestään, ja alkavat muodostaa puuta muistuttavaa muodostelmaa. Toisin kuin vesipuut, sähköpuut eivät voi hävitä eristeestä enää muodostumisen jälkeen. Sähköpuut voivat kasvaessaan johtaa eristeen läpilyöntiin. (Hyvönen, 2008, s.20–19.)

5.4 Öljyeristeiset muuntajat

Jotta öljyeristeisillä muuntajilla saavutetaan pitkä elinikä ja hyvä käyttövarmuus, on niiden kunnossapidosta huolehdittava asianmukaisesti. Muuntajissa kosteus edistää paperin vanhenemista sekä heikentää paperin ja öljyn sähköistä eristyskykyä. Muuntajasta otettavilla öljynäytteillä voidaan todeta eristyksen kosteus ja vanhenemisaste. Tarvittaessa muuntajan eristeet on kuivatava, jos ne on todettu liian kosteiksi. Menetelmiä muuntajan kuivaamisen löytö useita. Öljynäytteet on mahdollista ottaa muuntajan ollessa jännitteinen. Öljyllä on muuntajassa tehtävänä olla sähköisenä eristeenä sekä kuljettaa lämpöä pois aktiivisista osista. Öljy kuitenkin likaantuu ja vanhenee käytössä vähitellen, ja onkin käyttövarmuuden kannalta tärkeää tarkkailla öljyn kuntoa säännöllisesti. (ABB Transmit, n.d. s.27–28.)

Muuntajan käämien lämpötilan nouseminen liian korkeaksi, voi johtaa nopeasti muuntajan eristysrakenteen vanhenemiseen tai jopa muuntajan tuhoutumiseen. Kiinteistömuuntamoissa lämpötila on tavanomaisesti korkeampi, jolloin kuormituksen on oltava pienempi. Kylmällä säällä ulkona sijaitsevat muuntajat tai tuuletuksella varustetut muuntajat kestävät myös ylikuormitusta. (Lakervi & Partanen, 2009, s.77.) Normaali käyttöikä muuntajalle on määritelty sen perusteella, minkä ajan muuntaja kestää jatkuvasti nimelliskuormitettuna +20°C jäähdytysilmalla. Kuormitus ei kuitenkaan ole tasaista, jolloin muuntajan eristyksen vanhenemisnopeus vaihtelee kuormituksen mukaan. Hetkellisistä

ylikuormituksista huolimatta muuntajan keskimääräinen vanheneminen voi silti olla normaalia. (Verkostosuositus SA 2:21, 2022, S.9.)

Kokemusten mukaan TESV Oy:n verkossa muuntajat ovat olleet hyvin toimintavarmoja, joten öljynäytteitä ei ole todettu kannattaviksi. Öljynpinnan tasoa on sen sijaan seurattu tarkastusten yhteydessä. Pää- ja välimuuntajilla on kuitenkin otettu öljynäytteet säännöllisesti. Lisäksi lämpötilaa on seurattu etämittauksella ja lämpökuvauksilla. (Lepistö, 2022.)

6 MITTAUKSET JA KUNNONVALVONTA

Ennen 20 kV jännitteen kytkentää tulisi varmistaa, että nykyiset kaapelit ja kojeistot ovat ehjiä ja kestävätkä korkeamman jännitetason käyttöönoton. Toimitusvarmuuden kannalta on keskeistä tutkia, millaisilla mittauksilla kaapeleiden ja kojeiden kunto voidaan parhaiten todeta. Esimerkiksi osittaispurkaus mittaukset alkavat olla melko yleisiä monessa verkkoyhtiössä, ja niitä onkin suoritettu mm. Vaasan Sähköverkoilla uusien kaapeliyhteyksien laadun tarkastukseen jo usean vuoden ajan (Prysmian Group, 2019).

6.1 Eristysresistanssimittaus

On olemassa ristiriitaisia näkemyksiä sähköverkkoalalla kannattaako eristysresistanssimittauksia suorittaa keskijännitekaapeleille, sillä mittaus paljastaa vain vakavia eristysvikoja esimerkiksi naulan kaapelissa, mutta siihen liittyy riski kaapelin vaurioitumisesta. Eristysresistanssimittauksia ei myöskään ole vaadittu standardeissa keskijännitekaapeli asennusten yhteydessä (Verkostosuositus RK 1:16, 2016. s.30). Osassa verkkoyhtiöistä on keskijännitekaapelit mitattu 5 kV tasajännitteellä. Tällä eristysresistanssi mittauksella on kirjallisuuslähteiden mukaan vähimmäisarvo eristysresistanssille 300 GΩm. Eristeen mahdollinen vaurioituminen aiheutuu siitä, että tasajännitteellä tehtävässä mittauksessa polymeerieristeisen kaapelin eriste polarisoituu.

Seurauksena polarisoitumisesta saattaa jopa ehjä kaapeli vaurioitua, jos sähköstaattiset varaukset vaurioittavat eristettä. (STUL, 2013, s.15.) Sähköverkoilla yleisesti käytetyssä AHXAMK-W kaapelissa on käytetty PEX-eristystä, joka on ristosilloitettua polyeteeniä ja kuuluu polymeerieristeisiin (Muoviteollisuus Ry, n.d.).

6.1.1 Muuntajan eristysresistanssimittaus

Muuntajan eristysresistanssimittaus on syytä tehdä muuntajalle varsinkin, jos on epäilyksiä muuntajavauriosta. Mittaustulosten poikkeavuudet voivat viitata muuntajavaurioon. Mittaus suoritetaan eristysresistanssi mittarilla 500 V koestusjännitteellä. Mittausjärjestelyjen jälkeen muuntaja on jännitteetön, mitaus on turvallinen suorittaa ja muuntajan läpivientieristimet ovat puhtaat ja kuivat. Mittauksia suorittaessa on huomioitava mittausjännite sekä mittauksen jälkeen tulee mittauksen aiheuttama varaus purkaa. Mittauksia on kolme ja ne suoritetaan mittaamalla:

- eristysvastus keskenään keskijännite- ja pienjännitenavoille, sekä pienjännitenapojen ja N-navan väliltä
- eristysvastus napojen ja maan välillä
- eristysresistanssi saman vaiheisten keskijännite- ja pienjännitenapojen väliltä. (HeadPower, n.d.a.)

6.2 Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkausmittaus on yleiskäyttöisimpiä kunnonvalvontamenetelmiä sähköverkoille. Mittauksella on mahdollista havaita eristysvikoja sekä valmistus- ja asennusvirheitä ennenaikaisesti monissa suurjännitelaitteissa, kuten kaapelijärjestelmissä. Mittauksia voidaan suorittaa käytön aikana tai käyttökeskeytyksen aikana mittalaitteen syöttämällä mittausjännitteellä. (Pakonen ym., 2018, s. 32) Osittaispurkausmittaukset uusissa asennuksissa voivat olla hyödyksi myös koulutuksellisenä keinona, sillä asentajat saavat siten suoran palautteen tehdyn työn laadusta. Kuitenkin vain päteväitynyt mittausalan

ammattilainen voi suorittaa osittaispurkausmittauksen. (Verkostosuositus RK 1:16, 2016. s. 32.)

Osittaispurkausmittauksia veloitetaan tekemään esimerkiksi Helen Sähköverkoilla uusissa kaapeliasennussopimuksissa, jotta voidaan taata työn ensiluokkainen laatu. Mittauksia on suoritettu off-line-menetelmällä keskijännitejärjestelmille, joissa on kaapeleita ja keskijännitekojeistoja. Tulosten pohjalta on voitu huomata, että useita eri kaapeleita sisältävät järjestelmät ovat tuloksissa keskimäärin heikompia kuin yhden kaapelityypin järjestelmät. PEX-eristeisistä kaapeleista koostuvissa verkoissa heikoimmat kohdat löytyvät useimmiten jatkoksista ja päätteistä. (Loukkalahti ym., 2019.)

Tampereen Teknillisen Yliopiston tutkimuksessa ”Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla” on vertailtu erilaisia offline ja online osittaispurkausmittauksia. Tulosten mukaan yleisesti offline-mittauksilla osittaispurkauksia löytyy useammin kuin online-mittauksilla. Välillä offline-mittauksilla löydettyt suuret purkaukset, eivät olleet online-mittauksissa edes havaittavia. Mittalaitteet eroavat toisistaan paljon jo kokonsa puolesta, sekä mittauksille on erilaisia rajoittavia tekijöitä. Tutkimuksessa painotetaan mittaustulosten asiantuntevan tulkinnan merkitystä. (Pakonen ym., 2018, s.108–109.)

6.2.1 Offline-mittaukset

Offline osittaispurkausmittauksessa jännitteettömään kaapeliin syötetään mittalaitteella mittaajännitettä. Mittausjännitettä voidaan säätää nimellisjännitettä korkeammaksi, jotta saadaan tarkempia mittaustuloksia. Säädettävän mittaajännitteen ansiosta mittaaminen mahdollistaa esim. purkausten syttymisjännitteiden määrittämisen. Offline-mittaus ei onnistu normaalin käytön aikana toisin kuin online-mittaus. Orastavat viat ovat kuitenkin huomattavissa usein aiemmin offline-mittauksella kuin online-mittauksella. Paikantamalla purkauslähde kulkuajamittauksen (TDR, time domain reflectometry) perusteella, sillä on myös mahdollista paikantaa esimerkiksi kaapeleissa olevia vikakohtia.

Offline-mittauksia ovat esimerkiksi VLF (Very Low Frequency) eli matalataajuinen mittaus ja DAC (damped ac voltage) eli vaimeneva vaihtojännitemittaus (Pakonen ym., 2018, s. 32.)

6.2.2 Online-mittaukset

Osittaispurkausmittaus on mahdollista tehdä online-mittauksella, jolloin mittaus tapahtuu sähköverkon normaalikäytön aikana. Mittaus ilman katkoa onnistuu, jos anturit pystytään asentamaan jännitteiseen kaapeliin. Menetelmällä voidaan mitata kaapelia pitkäaikaisesti normaalissa käytössä, jolloin pystytään huomioimaan esimerkiksi lämpötilan ja kuorman vaihteluiden vaikutus osittaispurkauksiin kaapelissa. Menetelmää rajoittaa koejännite, jota ei yleensä pystytä säätämään. Myös online-mittalaitteilla on mahdollista paikantaa vikakohtia, vaikka se voi vaatia joissain mittareissa lisälaitteita. Online-mittauksia ovat esimerkiksi Pry-Cam-mittaus ja HFCT-mittaus (high frequency current transformer). Pry-Cam-mittaus perustuu osittaispurkausvirran aiheuttamien sähkömagneettisten lähikenttien mittaamiseen. HFCT-mittauksessa anturina käytetään suurtaajuusvirtamuuntajaa, joka on asennettu kaapelin ympärille tai maadoitusjohtimeen. (Pakonen ym., 2018, s. 35, 109.)

6.3 Häviökerroinmittaus

Mittauksella saadaan käsitys koko kaapelijärjestelmän kunnosta, mutta sillä ei voida paikantaa vikakohtia. Mittaus perustuu pääeristyksen läpi kulkevan virran resistiivisen- ja kapasitiivisenkomponentin suhteeseen. Mittausta toistetaan usein eri jännitteillä ja jokaisella jännitetasolla useaan kertaan. Mittaustuloksena saadaan vaihekohtaiset häviökerroin lukemat, sekä mm. häviökertoimien muutos jännitteen funktiona. Erityisesti muovikaapeleissa on resistiivinen virta niin pieni verrattuna kapasitiiviseen virtaan, että se tuo mittalaitteen erotelukyvyllä haasteita. (Pakonen ym., 2018, s. 29–30.)

Tampereen Teknillisen Yliopiston tutkimuksen ”Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla” loppuraportissa on

todettu, että VLF-häviökerroinmittaus voisi soveltua kaapelijärjestelmien kunnonvalvontaan esimerkiksi osittaispurkausmittauksien rinnalla. Menetelmän avulla saadaan tietoa kaapelijärjestelmästä, joka pelkällä osittaispurkausmittauksella jäisi saamatta. Häviökerroinmittauksella on mahdollista saada tietoa kaapelissa olevista vesipuu ongelmista ennen niiden näkymistä osittaispurkausmittauksissa. Vesipuut voivat lopulta johtaa osittaispurkauksien syntyyn, ja näin suurempiin vaurioihin, jotka näkyvät aikanaan myös osittaispurkausmittauksissa. Asennuksen laadun mittaamiseen häviökerroinmittalaitteistot yksinään eivät ole kovin käytännöllisiä, sillä huonosti tehdyt kaapelipäätteet ja jatkokset on havaittavissa sekä paikannettavissa paremmin osittaispurkausmittauksella. (Pakonen ym., 2018, s. 119–121.)

6.4 Vaipaneheysmittaus

Ulkovaipan eheydenmittausta on suositeltavaa käyttää etenkin uusille kaapeleille, jos ne on asennettu auraamalla tai ovat kivisessä maastossa. Mittauksella varmistetaan kaapelin ulkovaipan olevan ehjä vielä asennuksen jälkeen. Jotta mittauksen voi suorittaa, on kaapelilla oltava metallinen mekaaninen kosketussuoja. Esimerkiksi AHXAMK-W kaapelissa on metallinen mekaaninen kosketussuoja. Mittaus perustuu tasajännitteellä tapahtuvaan vuotovirtamittaukseen kaapelin kosketus suojan ja kaapelin ulkoisen metallikomponentin välillä. AHXAMK-W kaapelissa mittauksen voi suorittaa kuparisen keskusköyden ja alumiinisen kosketussuojan väliltä. Mahdolliset vaippavauriot ilmenevät suurena vuotovirtana tai mittausjännitteen aiheuttamana läpilyöntinä. Itse vauriokohdan voi paikantaa läpilyöntitesterillä, joka polttaa korjausta vaativan reiän kaapelin vaippaan. (Verkostosuositus RK 1:16, 2016. s.31–32.)

6.5 Vaihtojännitetestaus

Vaihtojännitetestausta käytetään usein asennuksen jälkeen uusille kaapeleille, ja monet kaapelivalmistajat suosittlevatkin jännitetestausta standardin IEC 60502-2 mukaisilla menetelmillä (STUL, 2013, s.13). IEC 60502-2:2014 kohdan 20.3.1 mukaisia vaihtojännitetestaus menetelmiä ovat ainakin:

- Normaalin käyttöjännitteen kytkeminen kaapeliin kuormattomana 24 h ajaksi
- VLF-testi eli matalataajuinen vaihtojännitekoe, jossa johtimien ja kosketussuojan välissä käytetään enintään $2,0\text{--}3,0 \times U_0$ (r.m.s eli tehollisarvo) suuruista vaihtojännitettä 0,1 Hz taajuudella 15 minuutin ajan. Testin yhteydessä on mahdollista suorittaa myös osittaispurkausmittaus. (Verkostosuositus RK 1:16, 2016. s.30.)

6.6 Lämpökuvaus

Säännöllisiä lämpökuvaksia käytetään yleisesti sähköverkkoyhtiöillä osana verkon kunnan valvontaa. Lämpökuvauksessa kuvataan yleensä monia erilaisia kohteita, käyttämällä useita eri kuvakulmia. Etenkin sähköasema ympäristössä erottimet, virtamuuntajat ja kaapelipäätteet voivat aiheuttaa ylimääräistä lämpöä vikaantuneena, joka on huomattavissa lämpökameralla. Keski-jännitteellä kaapelipäätteiden lämpeneminen voi johtua esim. huonosta asennuksesta tai hitaasti kehittyvästä kaapelivaipan vetäytymisestä. Usein kuitenkin nopeasti etenevät viat, eivät tule lämpökuvauksessa huomatuksi. Lämpökuvauksen ongelmana ovat pitkät toteutusvälit. (Alanen, ym. 2019 s. 4–19.)

Perinteisen lämpökuvauksen rinnalle on kehitelty jatkuvatoimiseen lämpökuvaukseen soveltuvia lämpökameroita. Näillä pystytään valvomaan tietyn kohteen lämpötilaa pidemmällä aikavälillä, niin että mittauksissa voidaan huomioida esim. kuormituksen vaihtelua. Kamerat voidaan asentaa sähköasemalla tai muussa kohteessa valvomaan yhtä kohdetta kuten erotinta, josta sillä voitaisiin välittää lämpökamerakuvia analysoitavaksi tietojärjestelmään. (Alanen, ym. 2019 s. 3–5.)

7 TOIMITUSVARMUUS

Käyttövarmuudella kuvataan sähkönjakelun luotettavuutta. Sähkönjakelun keskeytykset voidaan jakaa suunniteltuihin keskeytyksiin ja häiriökeskeytyksiin. Suunnitelluista keskeytyksistä asiakasta on tiedotettu etukäteen, sillä ne johtuvat jakeluverkossa tehtävistä töistä. Häiriökeskeytykset eivät ole ennustettavissa ja ovat satunnaisia tapahtumia, jotka voidaan luokitella pitkiin sekä lyhyisiin keskeytyksiin ja jännitekuoppiin. Pitkä vikakeskeytyks tarkoittaa ajallisesti yli 3 minuutin keskeytystä. Lyhyt keskeytyks puolestaan on alle 3 minuuttia kestävä ohimenevän vian aiheuttama keskeytyks. Jos jakelujännite laskee nopeasti 1–90 %:iin nimellisjännitteestä ja palautuu nopeasti, on kyseessä jännitekuoppa. Useimmiten jännitekuopat kestävät alle 1 s, sekä ovat suuruudeltaan alle 60 %:n jännitteenalenemana. (Lakervi & Partanen, 2009, s.77.)

Sähkömarkkinalaki määrittää tiukat toimitusvarmuusvaatimukset sähkönjakelelle. Asemakaava alueilla on sähköverkkoyhtiöiden toimittava niin, että yli 6 tunnin yhtäjaksoisia keskeytyksiä ei esiinny myrskyn tai lumikuorman seurauksena. TESV Oy:n sähköverkko muodostuu kuitenkin pääosin kaupunkiympäristössä sijaitsevasta sähköverkosta, jossa toimitusvarmuuden ehdot eivät edellytä merkittävästi normaalia suurempia verkkoinvestointeja. Kaupunkiympäristön ulkopuolella toimitusvarmuusvaatimusten täyttäminen voi vaatia erittäin suuria investointeja. (Partanen ym., 2020 s.6.)

7.1 Vikatapaukset

Normaalia sähköverkon toimintaa varten on estettävä mm. vaarallisten jännitteiden syntyminen, ja että virtapiireissä virrat eivät vaurioita laitteita tai vahingoita ympäristöä korkeilla lämpötiloilla. Sähköverkon vikoja aiheuttaa mahdollisesti ylikuormitus, ylijännitteet, laiteviat tai häiriöt sekä inhimilliset virheet. Sähköverkon on oltava turvallinen käyttää, mutta myös käyttövarma niin, että vioista ei synny tarpeettomia keskeytyksiä. (Aura & Tonteri, 1993, s.159.)

7.1.1 Ylijännitteet

Verkon eristysmitoituksessa on otettava huomioon jänniterasitukset, jotka muodostuvat jatkuvasta käyttöjännitteestä sekä lyhytaikaisista ylijännitteistä. Ylijännitteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat transienttiylijännitteet ja pienitaajuiset ylijännitteet. Transienttiylijännitteet ovat lyhytaikaisia ja voimakkaasti vaimenevia, kun taas pientaajuiset ylijännitteet ovat pitkäkestoisempia ja vaimenemattomia tai hitaasti vaimenevia. (Elovaara & Haarla, 2011b, s.11–12.)

Pientaajuiset ylijännitteet syntyvät yleensä verkon kytkentäoperaatioista ja verkon tilan muutoksista. Yleisiä aiheuttajia ovat esim. maasulut ja kuorman äkillinen pois kytkeminen. Maasuluissa verkon tähtipisteen maadoitustavalla onkin merkitystä, sillä siitä riippuu pitkälti muodostuvien ylijännitteiden suuruus. Sammutetussa verkossa maasulkuvirtojen haittavaikutukset jäävät pienemmiksi kuin muilla järjestelmillä, sillä kuristimet kompensoivat kapasitiivista maasulkuvirtaa. Maasulku kuitenkin nostaa jännitettä merkittävästi terveissä vaiheissa niin sammutetuissa kuin maasta erotetuissakin verkoissa. (Elovaara & Haarla, 2011b, s.11–16.)

Transienttiylijännitteet voidaan jakaa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttiylijännitteisiin. Ryhmät eroavat toisistaan jänniterasituksen kestoajassa, jolla on suuri merkitys jännitelujuustarkastelussa. Yleensä jyrkät transienttiylijännitteet aiheutuvat ukkosesta. Loivat transienttiylijännitteet useimmiten vikojen ja niitä seuraavien kytkentöjen vaikutuksesta. Puolestaan SF₆-eristeiset erottimet saavat aikaan erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä. (Elovaara & Haarla, 2011b, s.11–13.)

Normaalisti kaapeliverkossa sijaitsevassa muuntamossa ei ole välttämätöntä olla ylijännitesuojausta. Jos muuntamossa kuitenkin on kj-ilmajohtoon liittyviä kaapeleita, tulisi aina tarkistaa ylijännitesuojaus. Riittävän ylijännitekestoisuuden saavuttamiseksi tulisi 20 kV kojeistot olla valmistajan toimesta koestettu 125 kV syöksykoejännitteellä. Jos kojeistot on koestettu vain 95 kV syöksykoejännitteellä, ja ne kytketään 20 kV jännitteeseen, tulisi koje suojata suoraan

kojeeseen kytkettävillä ylijännitesuojilla. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, s.31.) Esimerkiksi IEC 60298 mukaisesti SF6-eristeisen 12 kV RMU-kojeiston syöksyjännitelujuus tulisi olla 75 kV ja 24 kV RMU-kojeiston 125 kV (ABB, n.d.b, s.27).

Ylijännitteen aiheuttama tilanne muuntamolla on vaikein silloin, kun salama- tai kytkentäylijännite kohdistuu avoimeen kytkinlaitteeseen. Kohdatessaan avoimen erottimen ylijännite kaksinkertaistuu, jolloin se voi aiheuttaa ylilyönnin vaiheiden välille tai vaiheen ja kojeiston rungon välille. (Verkostosuositus RM 3:16, 2016, s.31.)

7.1.2 Oikosulut

Jännitetason nostossa on mietittävä, miten verkko käyttäytyy oikosulkutilanteissa. Tällä hetkellä TESV Oy verkossa 10 kV verkko on maasta erotettu ja 20 kV verkko on sammutettu. Muuntajan tähtipisteen maadoitustavalla on suuri vaikutus erilaisissa epäsymmetrisissä oikosulkutilanteissa syntyviin vikavirtoihin (Aura & Tonteri, 1993, s.159–162).

7.1.3 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheinen oikosulku on sähköverkkoa eniten rasittava vika, sillä se voi aiheuttaa 30–40 kertaisen oikosulkuvirran verrattuna nimellisvirtaan. Korkea oikosulkuvirta vaurioittaa mahdollisesti johtimia ja laitteistoja, siksi se on pyrittävä sulkemaan pois mahdollisimman nopeasti. Oikosulkuvirran tuhoisuuden vuoksi laitteille on ilmoitettu suurimpien sallittujen virtojen sallitut kestoajat. (Aura & Tonteri, 1993, s.159.)

7.1.4 Epäsymmetriset oikosulut

Maasulku ja kaksivaiheinen oikosulku ovat epäsymmetrisiä vikoja. Kaksivaiheinen oikosulku voi olla kuitenkin samalla myös maasulku. Erityisesti maakaapeloidussa verkossa maasulkuvirrat voivat olla suuria. Kaksivaiheinen

oikosulku maakosketuksella tai ilman sekä yksivaiheinen oikosulku jäykästi maadoitetussa järjestelmässä merkitsevät aina oikosulkua verkon kannalta. Tämä tarkoittaa, että niiden varalta verkko on suojattu oikosulkusuojilla, ja verkko on mitoitettu niin, että oikosulkusuojat toimivat vastaavissa tilanteissa. (Aura & Tonteri, 1993, s.162.)

7.1.5 Maasulut

Erityisen ongelmallinen tilanne on maasulku maasta eristetyssä verkossa, sillä vikavastus maasulkukohdassa voi vaihdella laajasti. Kun vikavastusta on vaikea määrittää, on myös vaikea havaita ja poistaa vikaa. Maasulku voi huonontaa sähkönjakelun turvallisuutta, aiheuttamalla vaarallisen suuria kosketusjännitteitä verkkoon. Maasulku jäykästi nollapisteestä maadoitetussa verkossa on aina oikosulku, eikä sen laskeminen ole yhtä haastavaa kuin eristetyissä tai sammutetuissa verkoissa. (Aura & Tonteri, 1993, s.162–163.) Maasulussa ehjissä vaiheissa tapahtuva jännitteen nousu voi aiheuttaa kaksoismaasulun, jos eristeet eivät kestäkään noussutta jännitettä. Tällainen kahden eri maasulun vika voi aiheuttaa suuria maassa kulkevia virtoja, jotka ovat vaarallisia, sillä niiden kulkureittejä takaisin syöttölähteeseen ei voida tietää. (Elovaara & Haarla, 2011b, s.342.)

8 VARASYÖTTÖ JA RENGASKÄYTTÖ

Uuden 20 kV jännitetason käyttöönotto ilman asiakkaille aiheutuvia katkoksia, vaatii ainakin lyhytaikaista verkon rengaskäyttöä pienjännitepuolelta. Olisi selvitettävä millaisessa mittakaavassa 10 kV ja 20 kV verkkoja voidaan turvallisesti käyttää renkaassa pienjänniteverkon puolelta, jotta mahdollisissa vikatilanteissa ja jännitteen vaihdon aikana saadaan hyödynnettyä varayhteyksiä pienjänniteverkossa. Usean 10 kV muuntamon välillä olisi riittävän vahvoja kaapeli yhteyksiä toimimaan varasyöttönä, sillä lähes koko 10 kV verkko on melko tiheää maakaapeliverkkoa. TESV Oy:n verkossa on ollut aiemmin jo

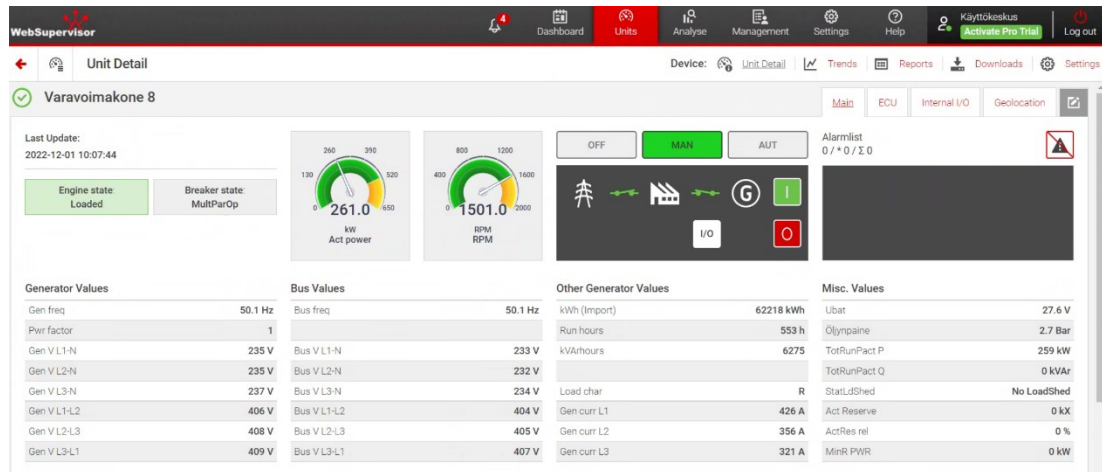
tilanteita, joissa hetkellisesti on ollut rinnakkain 10 kV ja 20 kV jakelumuuntajat pienjännitepuolelta. Ongelmia ei aiempien kokemusten pohjalta ole ilmennyt, kun verkko on ollut lyhyitä aikoja renkaassa.

Keskijänniteverkossa on kaupunkiympäristössä usein monia mahdollisia varasyöttö mahdollisuuksia. Yleensä on periaatteena, että verkossa on silmukoita hetkellisesti vain samalta sähköasemalta tulevien lähtöjen kautta. Eri sähköasemien välisen silmukkakytkennän avaaminen jakelumuuntamon erottimella, voi olla vaarallista kapasitiivisten tasoitusvirtojen takia. Kaupunkiympäristössä maakaapeleiden impedanssit ovat usein pieniä lyhyiden välimatkojen takia, jolloin tasoitusvirrat voivat olla suuria. (Lakervi & Partanen, 2009, s.125.) Verkon silmukkaan kytkemisen eri sähköasemien välille voi estää myös verkkojen tähtipisteiden erilainen maadoitustapa (SFS 6001:2018, 2018, s.28–29). Kyt kentöjen aikana rengaskäytössä sammutussäätäjän toiminta on huomioitava ja kytkentöjen kestäessä pidempään voidaan säätäjä asettaa käsikäytölle tai sammutus irrottaa. (Uurasjärvi, 2022.)

8.1 Varavoimakone

Tarvittaessa sähköverkon katkoilta voidaan välttyä käyttämällä siirrettäviä varavoimakoneita. Varavoimakoneita voidaan käyttää joko rinnan pj-verkon kanssa tai saarekkeessa, jolloin se syöttää pientä aluetta yksinään. Jos muuntamoilla ei ole pj-verkon välisiä yhteyksiä toisiin muuntamoihin tarvitsee varavoimakonetta käyttää silloin saarekkeessa. Saareke käytössä varavoimakone on aluksi rinnan verkon kanssa, jolloin se saadaan tahdistettua ja vaiheistettua verkon mukaan. Rinnankäytön jälkeen voidaan muuntaja kytkeä pois, jonka jälkeen varavoimakone syöttää verkkoa yksinään. Varavoimakoneen tehoa ja kierroksia pystytään valvomaan reaaliajassa etänä. (Lepistö, 2022.) Suuremmat varavoimakoneet ovat yleensä rakennettu perävaunuihin, putkikehikoihin tai kontteihin. Tehoa niillä saattaa olla jopa 2000 kVA, ja voimanlähteenä suuremmissa koneissa on yleensä dieselmoottori. (ST 52.40, 2019 s.4.) Varavoimakone voidaan kytkeä verkkoon esimerkiksi jakokaapilla, muuntamossa tai pienjännitekeskuksessa (Monni, 2002, s. 36).

Kuvassa 10 on esitettyä jo edellä mainittuja varavoimakoneen etänä nähtäviä käyntitietoja.



Kuva 10. Erään varavoimakoneen etänä nähtävät käyntitiedot.

8.2 Kuormitus

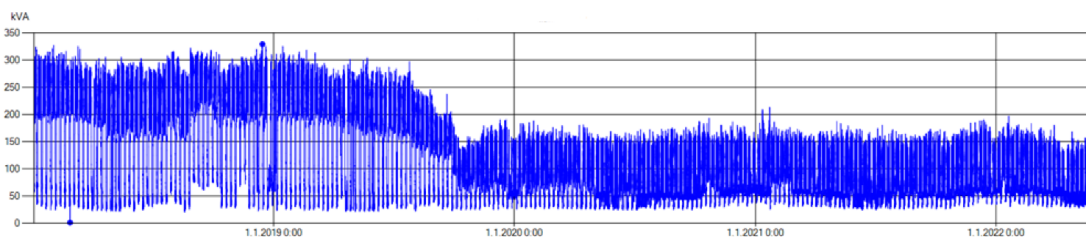
Jotta muuntamoa voidaan syöttää pienjänniteverkonpuolelta, on muuntamoiden väliset kaapeli yhteydet oltava tarpeeksi vahvoja. Lisäksi syöttävien muuntajien on kestävä aiheutuva lisäkuormitus. Pienjänniteverkossa voi helposti myös oikosulkuvirta jäädä liian pieneksi syöttäviin sulakkeisiin nähden.

Jakelumuuntajilla ylikuormitus aiheuttaa liiallista lämpenemistä, mutta mitoitusteho on määritelty kansainvälisten standardien mukaisesti 20 °C ympäristölämpötilaan. Suomen olosuhteissa muuntaja toimii usein alhaisemmissa lämpötiloissa, jolloin muuntaja kestää ylikuormitusta paremmin. Ylärajana kuormitukselle voidaan kuitenkin pitää 30 % yli mitoitustehon olevaa kuormitusta. (Elovaara & Haarla, 2011a, s.158.) Muutostöiden aikana muuntajia voi hetkellisesti ylikuormittaa enemmänkin, kuitenkin muuntamon lämpötilahuomioiden.

Taulukko 2. Jakelumuuntajan hätäkuormitettavuuksia nimellistehoon suhteutettuna. (Verkostosuositus SA 2:21, 2022, s.10.)

Muuntopiiri	Muuntamon lämpötila			
	- 20 °C	0 °C	+ 20 °C	+ 40 °C
Pientaloalue, sähkölämmitys	1,6	1,5	1,4	1,2
Kerrostaloalue	1,7	1,6	1,4	1,3
Keskusta-alue	1,6	1,5	1,4	1,2
Teollisuusalue	1,7	1,6	1,5	1,3
Maaseutualue	1,7	1,6	1,4	1,3

Muuntajien kuormituksesta ja sen huippujen jakautumisesta voidaan saada käsitys esim. Tietoevry NIS tietojärjestelmän vuosienergioiden perusteella lasketuilla kuormitustiedoilla tai muuntamoilla sijaitsevien WIMO-sähkölaatumittareiden mittaamalla kuormitustuloksilla. Kuvassa 11 on esitettyä WIMO-sähkölaatumittarin mittaamana erään 1000 kVA muuntajan kuormitustuloksia tunneittain neljän vuoden otannalla.



Kuva 11. WIMO:n mittaamat kuormitustulokset. (PQNet, 2022.)

8.3 Sähkönlaatu

Sähkönlaatua määriteltäessä otetaan yleensä huomioon vain häiriötön sähkönjakelu ja jännitteen tason pysyminen tietyissä rajoissa. Nämä molemmat ovat

teknisiä ja erityisesti taloudellisia kysymyksiä. Muita laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat taajuus, yliaallot sekä lyhytaikaiset jännitteenalenemat ja ylijännitteet. (Monni, 2002, s. 9.)

8.3.1 Jännitteenalenema pienjänniteverkossa

Pienjännite sähkötoimituksen standardilaatu eli minimitaso vaatii että 95 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista välillä 207–253 V. Puolestaan 100 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista on oltava välillä 196–253 V. Laatu jakelujännitteelle todetaan asiakkaan liittymiskohdasta, joka käytännössä yleensä on todettavissa asiakkaan mittauskeskuksesta. (Verkostosuositus SA 2:21, 2021, S.32.) Jännitteenalenemat tulee ottaa huomioon, jos esimerkiksi muuntamoaa syötetään keskijännitteen jännitetason vaihdon ajan pienjänniteverkon puolelta. Osa pienjänniteverkon korvausyhteyksistä on erittäin pitkiä.

Jännitteenalenemaa laskettaessa on huomioitava muuntajassa ja johdoissa syntyvä jännitteenalenema. Muuntajan jännitteenalenemaan vaikuttaa muuntajan kuormitus suhteessa nimelliskuormaan, muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi sekä muuntajan kuormituksen virran ja jännitteen välinen vaiheensiirtokulma. Jännitteenalenemat nimelliskuormalla vastaavilla 20/0,4 kV ja 10/0,4 kV muuntajilla eroavat hyvin vähän toisistaan oikosulkuimpedanssien pienten kulmaerojen takia. (Verkostosuositus SA 2:21, 2021, S.35–36.)

8.4 Muuntajien rinnankytkentä

ABB Transmit Oy:n ”Öljyeristeiset jakelumuuntajat, suuret jakelumuuntajat ja erikoismuuntajat” asennus-, käyttö- ja hoito-ohjeistossa on listattuna ehtoja muuntajien rinnankäynnille:

- Muuntajien tunnusluvut, jotka merkitty muuntajan arvokilpeen on oltava samat, jotta muuntajat voivat käydä rinnan. Lisäksi tunnusluvuilla 5 ja 11 olevat muuntajat soveltuvat rinnankäyttöön tietyin ehdoin.

- On oltava sama muuntosuhde. Nimellisjännitteiden U_{1n} ja U_{2n} on oltava suunnilleen yhtä suuret, ja saavat olla korkeintaan 5 % toleranssilla (Aura & Tonteri, 1986, s. 79–80).
- ± 10 % Tarkkuudella oltava sama oikosulkuimpedanssi, jotta kuormitus jakautuu riittävän tasaisesti.
- Nimellistehot muuntajilla eivät saa yleensä poiketa yli 1:3. (ABB Transmit, n.d. s.22–23.)

Rinnakkain muuntajia kytkettäessä on huolehdittava, että mikään niistä ei ylikuormitu. Muuntaja, jonka mitoitusvirralla syntyvä jännitehäviö eli suhteellinen oikosulkujännite on pienin, määrittää rinnankytkettyjen muuntajien suurimman sallitun jännitehäviön. Muuntajien yhteinen kuormitettavuus voisi olla pienempi, kuin niiden mitoitusasteiden perusteella laskettu kuormitettavuus. Seuraavalla yhtälöllä voidaan laskea rinnakkain kytkettyjen muuntajien suurin yhteinen kuormitus:

$$S = u_{k,min} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_{Ri}}{u_{ki}} \quad (4)$$

jossa $u_{k,min}$ on suhteellinen oikosulkujännite (pienin arvo), u_{ki} on muuntajan i suhteellinen oikosulkuimpedanssi ja S_{Ri} muuntajan i mitoitusaste. (Elovaara & Haarla, 2011b, s.150–151.)

8.4.1 Muuntajien kytkentäryhmät

Muuntajien kytkentäryhmä selviää kirjainsymboleista ja tunnusluvusta. Kolmivaihemuuntajissa käämien kytkentää kuvataan seuraavasti: Y tai y tähtikytkentä, D tai d kolmiokytkentä, Z tai z hakatähtikytkentä sekä III tai iii avoin kolmivaihekäämitys. Iso kirjain kertoo käämituksen, joka on muuntajan suurimmalla jännitteellä, se on myös merkinnän ensimmäinen kirjain. (ABB, n.d.a, s.3.)

Turussa päämuuntajat ovat alajännitetasosta riippumatta YNyn0 kytkentäisiä, jossa N ja n kirjaimet kuvaavat liittimelle tuotua tähtikäätymisen tähtipistettä.

Tunnusluku puolestaan kuvaa kytkennän aiheuttamaa vaihesiirtoa. Tunnusluvulla 0 kuvataan, että muuntajan ala- ja yläjännitteiden jännitevektorit ovat saman suuntaiset. Muut tunnusluvut kuvaavat vaihesiirtoa kellotaulun mukaisesti esim. tunnusluku 11 kuvaa alajännitteen olevan 30 astetta yläjännitettä edellä, sillä yläjännitepuolen jännitevektori kuvitteellisesti asetetaan kello 12:een. (ABB, n.d.a, s.3.)

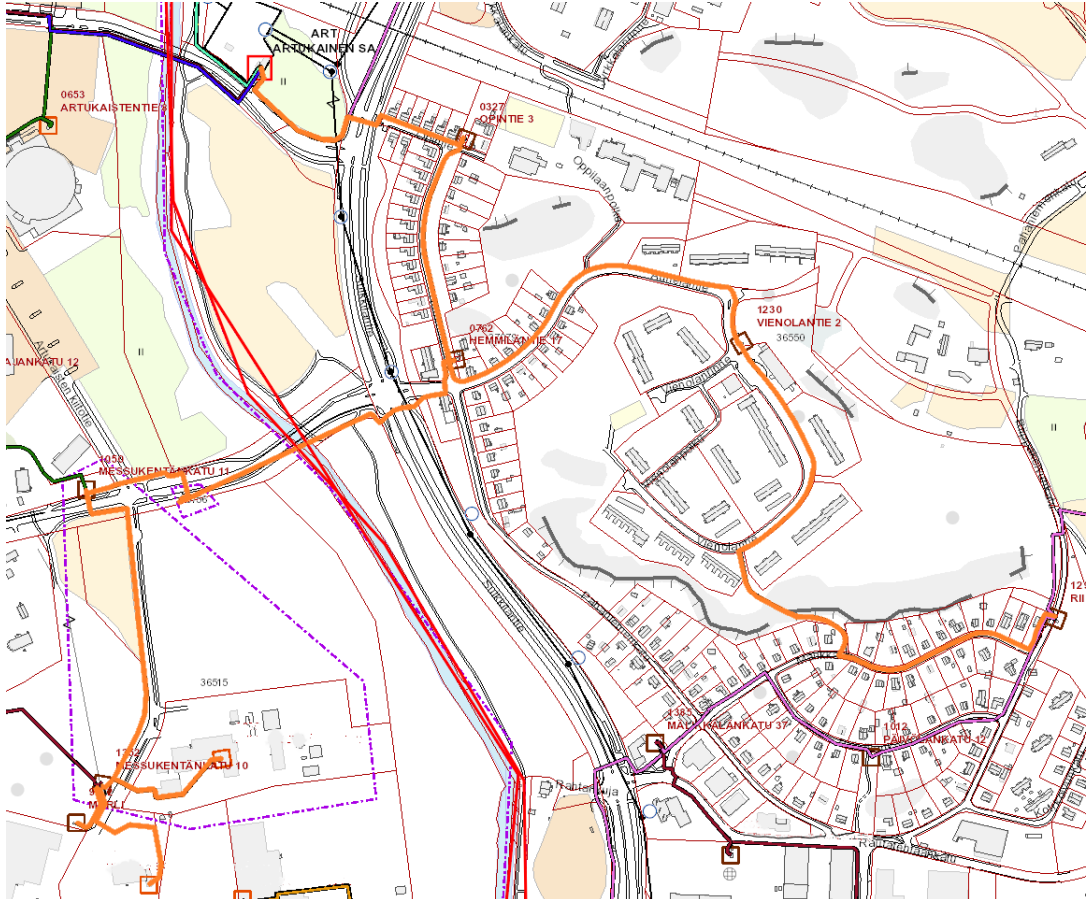
Turussa jakelumuuntajat ovat kaikki Dyn11 kytkentäisiä, joten yläjännitepuoli on kytkettynä kolmioon ja alajännitepuoli tähteen sekä tähtipiste on tuotu liittimelle. Molempien sekä 20 kV ja 10 kV verkkojen vaihejännitteet ovat siis alajännitepuolelta 30 astetta edellä yläjännitteen jännitevektoria. Kytkentäryhmien puolesta pienjännitettä olisi mahdollista käyttää renkaassa 20 kV ja 10 kV muuntamoilta, sillä kulma eroja jännitevektoreihin ei muodostu. (ABB, n.d.a, s.3.)

9 KYTKENTÖJEN SUORITTAMINEN

Sähköverkon käyttötoiminnassa työskentely tapahtuu aina jännitteisessä verkossa, jännitteisen verkon läheisyydessä tai jännitteettömäksi otetussa verkossa. Tämän vuoksi on tärkeä toimia käytönjohdon ohjeiden ja sähköturvallisuusstandardin sekä sähköturvallisuuslain määräysten mukaisesti (Monni, 2002, s. 9). Suurjännitetöissä tulee normaalisti käyttää määrätyn muotoisia yksityiskohtaisia kirjallisia ohjeita eli niin sanottua kytkentäohjelmaa erottamisessa ja tarpeen mukaan myös maadoittamisessa, jotta välttytään väärinymmärryksiltä (SFS 6002:2015, 2015 s.30).

Jännitetason noston käytännön toteutus vaatii huolellista suunnittelua, sillä on pystyttävä samanaikaisesti muuttamaan mm. useita jakelumuuntamoita uudelle jännitetasolle sopiviksi. Muutostöiden viimeinen vaihe toteutetaan tyypillisesti keskijännitelähtö tai sen osa kerrallaan muuttamalla yön aikana. Kokonaisuudessa verkon jännitetason muuttamiseen menee vuosia tai jopa

kymmeniä vuosia. (Lakervi & Partanen, 2009, s.77.) Kuvassa 12 oranssilla esimerkki tyypillisestä sähköaseman keskijännitelähdöstä Turun 10 kV alueella, jossa on useampia mahdollisia syöttösuuntia.



Kuva 12. Yhden keskijännitelähdön kattama alue. (Tietoevry NIS, 2022.)

9.1 Työturvallisuus keskijänniteverkon kytkentätoimenpiteissä

TESV Oy:n käyttö-, kunnossapitoja viankorjaustöiden turvallisuusasiakirja mukaisesti toimenpiteet suoritetaan aina käsi- ja kaukokäyttöohjauksilla kytkentäsuunnitelman mukaisesti. Ohjauksia suoritetaan ainoastaan käyttökeskusten luvalla, eikä esim. aikaan perustuen. Ennen kuin kytkinlaitetta ohjataan, tulee varmistaa, että varmasti on ohjaamassa oikeaa kytkinlaitetta. Työskentelyssä tulee noudattaa SFS 6002 sähkötyöturvallisuus standardin ohjeita, jonka lisäksi kytkinlaitteita ohjattaessa tulee noudattaa mm. seuraavia ohjeita:

- Kytkinlaitteen kytkentäkyky, sekä SF6-kojeistossa riittävä kaasunpaine tulee varmistaa, ennen kytkinlaitteen ohjausta

- Jos kyseessä on ilmajohtoverkko, ei tule seistä tarpeettomasti johtimien tai erottimien alapuolella
- Ohjauksen jälkeen varmistetaan, että kytkinlaite toimi oikein, usein kytkinlaitteen tilan näkee luotettavasti mekaanisesta asennonosoittimesta. Tämän jälkeen toistetaan kytkennän johtajalle tehdyt kytkennät ja kytkinlaitteen nykytila
- Ohjaukset annetaan puheviestinnällä ohjattavalla kohteella, sekä käskyjen oikea ymmärtäminen varmistetaan toistamalla käskyt ääneen
- Kytkentäpahtumien aikana on alueella olevien työryhmien oltava irti jännitteelle alttiista osista, jotta suunnittelemattomasti väärään paikkaan väärinkäsityksen, virheen tai laitevian vuoksi tuleva jännite ei aiheuta henkilövaaraa
- Kaikille työkohteen jännitteisistä osista erottaville kytkinlaitteille ja tarpeen vaatiessa maadoituskytkimille lisätään "älä kytke" -kieltokilpi ja sen lisäksi kytkinlaite lukitaan joko mekaanisesti tai laitteen ohjaus estetään lukolla. Kieltokilvessä tulee olla kirjattuna asettajan nimi, yhteystiedot ja kilven asennus päivämäärä. Normaalisti kilven asettaa työssä oleva työryhmä ja vain kilven asettaja saa poistaa kilven. Erityistapauksissa kilven voi poistaa asettaneen työryhmän tai kytkennänjohtajan luvalla.
- Jos "älä kytke" -kieltokilpeä käytetään vikaantunutta johtoa tai muuta kuin työstä johtuvan kytkentäkiellon merkitsemiseen, tulee se kirjata kilpeen selkeästi esim. "älä kytke, pää maassa". Tällöin mikäli vika on, korjattu ja käyttöönottovalmiusilmoitus annettu voi kilven poistaa.
- Jos kytkennän kieltävän kilven ja lukon kytkinlaitteen ohjaimeen asettaminen ei ole mahdollista, pyritään kilpi asettamaan mahdollisimman lähelle erotinta ja lisäksi lukitaan tila. (Uurasjärvi & Toivonen, 2021, s.19–20.)

Kuvassa 13 on esitetty eräs kytkettyä oleva "älä kytke" -kieltokilpi, jossa nippuside on mekaanisena esteenä estämässä erottimien ohjauksen.



Kuva 13. Esimerkki varoituskilvestä RMU-kojeistossa.

9.2 Käyttökeskeytys

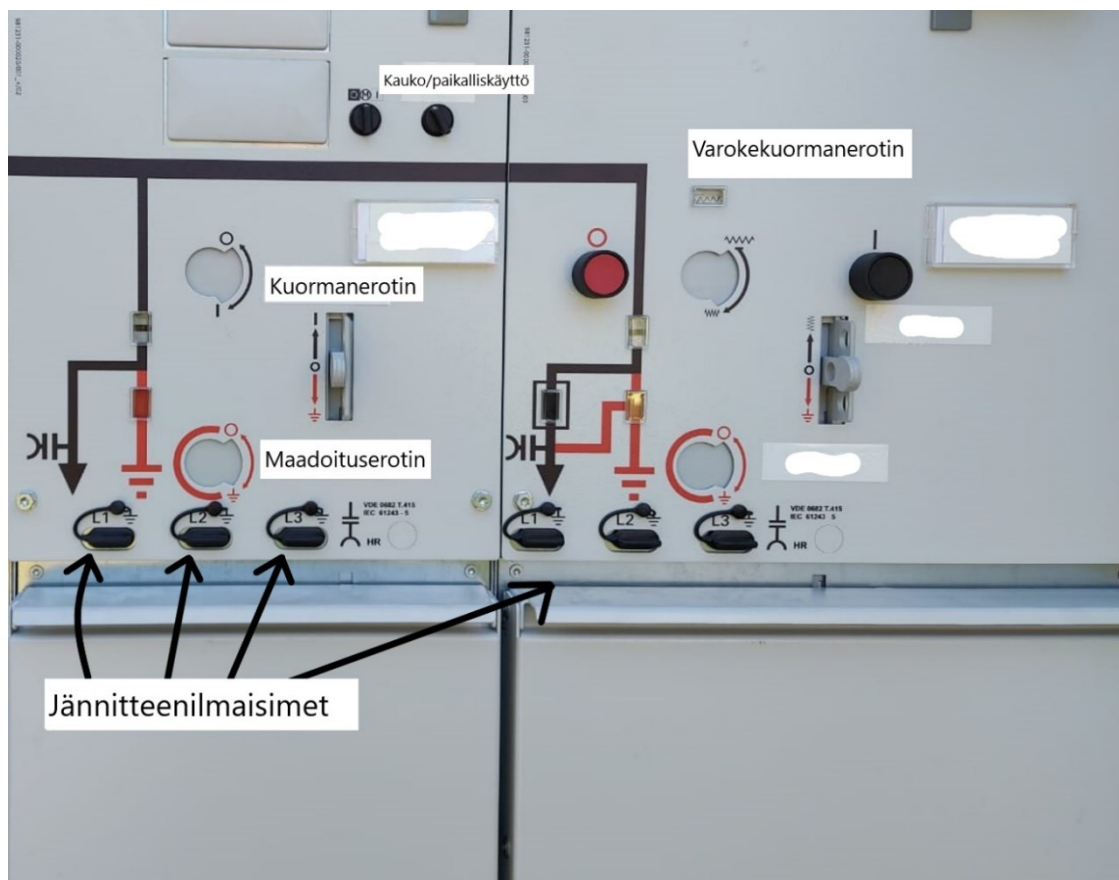
Jännitetason nosto voi vaatia käyttökeskeytystä joissakin tilanteissa. Suunnitelluista käyttökeskeytyksistä asiakkaille koituvaa haittaa voidaan pienentää oleellisesti kiinnittämällä huomiota erityisesti seuraaviin tekijöihin:

- töiden hyvä suunnittelu ja valmistelu ennalta, jotta keskeytys on mahdollisimman lyhytaikainen
- varasyöttöjen paras mahdollinen hyödyntäminen
- keskeytysajankohdan sovittaminen asiakkaalle sopivaksi, jotta siitä ei aiheudu kohtuutonta haittaa
- ilmoitus keskeytyksestä asiakkaille hyvissä ajoin
- hyödynnetään keskeytys mahdollisimman hyvin, tekemällä kaikki samalla kertaa tehtävissä olevat keskeytystä vaativat työt. (Monni, 2002, s. 18.)

9.3 Muuntamon jännitetason vaihto

Ensimmäiseksi on varmistettava, että kaikki muuntamon keskijännitekomponentit ovat 20 kV nimellisjännitteelle sopivia.

Vaiheistuksen tarkistus tulee suorittaa aina ennen asennusten aloittamista sekä asennusten jälkeen. Keskijännitekaapeleiden vaiheistuksen saa tarkastettua esimerkiksi RMU-kojeistossa olevilla kapasitiivisilla jännitteen ilmaisimilla. (Verkostosuositus RU B3:11, 2012, s.14.) Muuntamossa on jännitetason nostossa erotettava muuntaja suur- ja pienjännitepuolelta, jotta voidaan vaihtaa muuntajalähdön varokekuormaerottimeen pienemmät kj-sulakkeet ja kääntää muuntajan jännitteenvaihtokytkintä 10 kV asennosta 20 kV asentoon. Kun nämä vaiheet on suoritettu, ja muuntajalle on saatu kytkettyä 20 kV jännite, on pienjännitepuolelta tarkastettava vaiheistus ja pyörimissuunta ennen muuntajan kytkentää verkkoon. Kuvassa 14 on esitettyä jo edellä mainittuja RMU-kojeiston osia.



Kuva 14. RMU-kojeiston osia nimettynä.

Kuvan 14 kojeistosta pystytään nyt luotettavasti toteamaan mekaanisista asennonosoittimista, että molempien lähtöjen kuormanerotimet ovat auki ja maadoituserottimet ovat kiinni. Molempiin erottimiin on omat erilaiset ohjaussauvat.

Keskijänniteverkossa normaali tilanteessa ilmaeristeisessä kojeistossa vaiheistus onnistuu eristesauvallisella vaihevertailijalla. Vaihevertailijaa käytetään erottimen eripuolilla jännitteisissä osissa ja vaiheiden sopiessa näyttää vertailija esim. vihreää valoa. Suljetussa kojeistossa käytetään vaiheistukseen normaalisti kojeistossa olevia kapasitiivisia jännitteenilmaisimia, ja niihin soveltuvaa vaihevertailijaa. Vaihevertailijalla nähdään mittauspisteistä sekä kaapeleiden jännitteisyys, että onko mittapisteiden välillä oikea vaiheistus. (HeadPower, n.d.b.) Ongelmana saattaa olla 20 kV ja vanhan 10 kV järjestelmän kaapeleiden saman vaihejärjestyksen toteaminen ennen muuntamon jännitetaso muutosta. Vaihejärjestys ja pyörimissuunta kuitenkin tarkistetaan lopuksi vielä pienjännitepuolelta. Vaiheistus tulee olla tarkastettuna 10 kV jännitetasolla.

9.3.1 Jakelumuuntajan kytkentä jännitteiseksi

Ennen jännitteen kytkentää on arvioitavamahdollisia riskejä. Huomioitava on ainakin seuraavia tekijöitä:

- muuntajan mekaaniset vauriot, kuten säiliön muuttunut muoto, öljyvuo-dot sekä eristimien kunto
- muuntajan kannella mahdollisesti olevat oksat tai eläimet tulee poistaa
- muuntajan lämpötilan havainnointi joko aistinvaraisesti, infrapunalämpömittarilla tai lämpökameralla.
- on syytä havainnoida myös muuntamon toimintaan vaikuttavia tekijöitä, kuten muuntajan ylikuormitus tai mahdollisten ylijännitesuojien vauriot. (HeadPower, n.d.a.)

Uusia jakelumuuntajia tulisi käyttää jännitteen kytkennän jälkeen kuormittamattomana valmistajan määrittämän ajan. Kun muuntajaa on pidetty jännitteisenä riittävän kauan, voi sitä alkaa kuormittamaan arvokilvessä ilmoitetun enimmäiskuorman mukaisesti. Muuntajan suojalaitteiden laukeamisen syy tulee aina selvittää ennen kuin muuntaja kytketään uudelleen toimimaan. (Head-Power, n.d.a.)

9.4 10 kV ja 20 kV verkkojen järjestelyt

Tavoitteena on, että 10 kV ja 20 kV verkot eivät olisi samassa RMU-kojeistossa. 10 kV ja 20 kV verkkojen välillä olisi korkeintaan jännitteetön kaapeli tai kaapeleita, jotka olisivat molemmissa päissä erottimilla avattuina. Kaapeleiden lisäksi myös kojeiston kisko voi ajaa saman asian. Kojeistoihin olisi lisäksi tul-tava lukitukset ja varoitus laput estämään eri jännitetasojen yhteen kytkemisen tahattomasti. Jännitteettömän kaapelin avulla voidaan välttyä tilanteelta, jossa yhden erottimen sulkeminen yhdistäisi 10 kV ja 20 kV verkot galvaanisesti. Nykyisessä verkossa 20 kV ja 10 kV verkkojen välillä ei ole keskijännite kaapeleita, mutta ne ovat kuitenkin yhteydessä toisiinsa 10/20 kV välimuuntajien välityksellä. Hyvällä kytkentäsuunnittelulla voidaan ehkäistä, että edes jännitteen vaihdon aikana samassa RMU-kojeistossa ei ole erottimen eripuolilla eri jännitetasoja.

10 HAASTATTELUT

10.1 Nieminen P., TESV Oy

Turussa kaikki päämuuntajat ovat YNyn0 kytkentäisiä riippumatta alajännitetasosta, jolloin 20 kV ja 10 kV verkkojen jännitteiden välille ei synny kulmaeroa. Kaikissa jakelumuuntajissa on keskijännitetasosta riippumatta käytetty samaa Dyn11 kytkentää, joten sen osalta 10 kV ja 20 kV muuntopiirien pj-verkot pitäisi olla mahdollista kytkeä yhteen. TESV Oy:n verkossa on 110/20/10 kV

kolmikäämimuuntajia ja 20/10 kV välimuuntajia, joita ei ole esimerkiksi Helsingissä, jossa on myös 10 kV ja 20 kV verkkoa. (Nieminen, 2022.)

Muuntamoita olisi mahdollista siirtää ylemmälle jännitetasolle ilman keskeytystä pienjänniteverkossa, kun tehdään kuormansiirtoja niiden muuntamoiden osalta, jotka ovat pj-verkon vahvuuden kannalta riittäviä. Täysin keskeytyksetön jännitetaso nosto vaatisi ainakin hetkellistä rengaskäyttöä, mutta katkolla tapahtuvassa toteutuksessa kaiken onnistuessa jäisi katko hyvin lyhytaikaisiksi. Mahdolliseen jännitteenvaihtokytkimen rikkoutumiseen voisi varautua esimerkiksi varamuuntajalla. (Nieminen, 2022.)

Osittaispurkausmittauksia on käytetty Helsingissä uusille kaapeleille, ja tulosten pohjalta muovikaapeleissa viat liittyvät usein kaapelijatkoksiin tai -päätteisiin. TESV Oy:n verkoilla osittaispurkausmittauksia ei ole samalla tavalla hyödynnetty. Mittauksilla saisi tärkeää tietoa kaapeleiden kunnosta, sillä korkeampi jännitetaso voisi lisätä osittaispurkauksien syntymistä kaapeleissa. (Nieminen, 2022.)

10.2 Rasi, S., Lahti Energia Sähköverkot Oy

Lahdessa jännitetaso nostoa on toteutettu jo pidemmän aikaa, tavoitteena on jännitetaso noston valmistuminen viimeisiinkin 10 kV muuntamoihin lähivuosina. Viivästymistä aikatauluun loppupäässä on aiheutunut muun muassa asiakasmuuntamoista. Yleisesti ottaen jännitteenvaihdot ovat sujuneet hyvin, eikä jännitteen noston ole havaittu aiheuttaneen kasvanutta häiriötiheyttä käyttöönoton jälkeen. Jännitteen nostoa on saatu tehtyä suurelta osin saneerauksien yhteydessä. (Rasi, 2022.)

Muuntajien jännitteenvaihto on onnistunut kokemusten mukaan hyvin, eikä kaapeleissa ole ilmennyt ongelmia uudella jännitteellä. 10 kV verkossa on ollut paljon käytössä vanhoja öljypaperikaapeleita, jotka on uusittu muutostöiden yhteydessä AHXAMK-W kaapeliksi. Osittaispurkausmittauksia on hyödynnetty ja hyödynnetään jatkossakin kaapeleissa, jotka ovat olleet pidemmän aikaa 10

kV käytössä. Uudemmissa asennuksissa ei ole tehty osittaispurkausmittauksia muuten kuin pistokoeluoonteisesti. Ongelmallisia ovat esimerkiksi asiakkaiden kuivamuuntajat, joilla ei ole öljyeristeisten muuntajien tapaan jännitteen vaihtokytintä. Kuivaeristeisissä kahdella ensiökäämityksellä olevissa muuntajissa jännitteen vaihto tapahtuu muuntajan kyljessä olevien naparuuvien väliin tulevilla kupariliuskoilla, joiden löytäminen ja vaihtaminen voi viedä aikaa muutostyötä toteutettaessa. (Rasi, 2022.)

Itse jännitetason vaihto on tapahtunut yöaikaan, jossa kaikki jännitetason vaihdot on toteutettu ennalta sovitulla katkoilla. 10 kV ja 20 kV Verkon rengaskäyttöä pienjännitepuolelta ei ole kokeiltu muutostöiden yhteydessä. Muuntamon jännitteen nostoa on ollut toteuttamassa yleensä kaksi asentajaa muuntamoa kohden. Katkojen aikana on käännetty jännitteenvaihtokytintä ja vaihdettu muuntajalähdön varokekuormaerottimeen pienemmät kj-sulakkeet, sekä tehty vaiheistuksen tarkistus. Kj-sulakkeiden vaihtaminen muuntamon kj-kojeistoon on ollut yleisesti aikaa vievin osuus keskeytyksessä. Jännitteen vaihtotöitä on tehty vyöryttämällä muuntamolta toiselle ja usein yön aikana jännitteenvaihto on saatettu tehdä useammalle muuntamolle. (Rasi, 2022.)

11 TULOKSET

Tulosten pohjalta on todettavissa, että Turussa tilanne alkaa olla melko hyvä jännitteen noston kannalta. Suuri osa verkon komponenteista on jo soveltuvia 20 kV jännitetasolle. Verkon jännitetason nosto vaatii kuitenkin toteutusvaiheessa paljon huolellista suunnittelua, jotta verkon käyttövarmuus kärsisi muutostöistä mahdollisimman vähän. Muutostöiden edetessä saadaan koko sähköverkosta kuitenkin entistä toimitusvarmempi, vahvempien keskijännite yhteyksien ansiosta. Korkeammalla jännitteellä saadaan myös pienennettyä merkittävästi verkossa tapahtuvia häviöitä, jolloin kertyy säästöjä häviöenergia kustannuksissa. Myös mahdollisesti kasvava tehon tarve ei tule ongelmaksi, sillä 20 kV jännitteellä tehoa saadaan siirrettyä huomattavasti enemmän.

Lisäksi on rohkaisevaa, että haastattelun mukaan Lahdessa ei jännitetason nosto ole huomattavasti lisännyt häiriötiheyttä.

Turussa muutostöissä voi olla iso apu, että verkko on mahdollista käyttää kokemusten mukaan ainakin lyhyitä aikoja 10 kV ja 20 kV verkon pienjännitepuolelta renkaassa. Tämä mahdollistaisi keskeytyksettömän jännitetason vaihdoksen, jos pj yhteydet ovat riittäviä tai käytetään varavoimakonetta. Muuntajien rinnankäynnin ehtona oli kuitenkin useiden eri lähteiden mukaan, että muuntajilla täytyy olla sama muuntosuhde. Saman muuntosuhteen ehto ei tässä tapauksessa toteudu. Puolestaan muut rinnankäynnin ehdot täyttyvät monien muuntamoiden välillä.

Jännitetasoa nostaessa todennäköisesti asiakasmuuntamot ja asiakkaiden keskijänniteverkot tulee olemaan hankaloittava tekijä. Liittymissopimuksiin ja niiden ehtoihin sekä erikseen sovittuihin asioihin olisi hyvä perehtyä tarkasti. Tässä työssä jääkin avoimeksi esim. miten kustannusten jako toteutuu asiakaskohteissa. Työssä tuli kuitenkin jo hyvin ilmi asiakasmuuntamoiden kuivamuuntajien mahdolliset ongelmat.

Koska muutostöiden aikana voi keskijännitteen korvausyhteyksiä olla vaikeampi järjestää, olisi hyvä käyttää tässä työssä käsiteltyjä kaapeleiden mittaus-tapoja. Mittauksia kannattaa tehdä varsinkin kriittisille kaapeliyhteyksille, joissa 20 kV jännite otetaan käyttöön. Kaapeleissa voi olla piileviä vikoja, jotka kehittyvät vähitellen. Jännitetason noustessa voi myös esiintyä enemmän osittaispurkauksia, jotka voivat johtaa läpilyöntiin myöhemmin. Etenkin kaapelijatkokset ja kaapelipäätteet ovat alttiita osittaispurkauksille. Kaapeleiden ja kojeistojen mittaukseen löytyy paljon erilaisia vaihtoehtoja, joista tilanteen mukaan on valittava kulloinkin sopivin toimintatapa. Mittaukset voivat olla kalliita toteuttaa ja vaatia paljon järjestelyjä. Esimerkiksi Lahdessa käytetty mittaustapa, jossa vanhempia 20 kV kaapeleita on mitattu osittaispurkausmittauksella ja uudemmille kaapeleille tehty mittauksia pistokoeluoontoisesti olisi todennäköisesti hyvä tapa toimia myös Turussa. Osittaispurkausmittauksia on jo monessa muussa verkkoyhtiössä käytetty uusien asennusten käyttöönoton yhteydessä,

joten mittauksia olisi todennäköisesti tulevaisuudessa kannattavaa tehdä enenevässä määrin myös TESV Oy:n verkossa.

Lopuksi mietimme opinnäytetyön ohjaajan Jari Lepistön kanssa toimenpidelistan, miten tulevassa jännitetason nostossa tulisi edetä. Lista on kerättyinä asioita, jotka ovat tulleet ilmi tätä työtä tehdessä sekä asioita sähköverkkojen yleisistä toimintatavoista. Toimenpidelistasta on esitettyä liitteessä 1.

12 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää hyvä pohja jännitetason noston käytännön toteutukseen TESV Oy:n verkossa, jotta toimitusvarmuus ei vaarantuisi ja asiakashaitat saataisiin minimoitua. Tuloksena saatiin kattavaa pohjatietoa mihin jännitetason nostossa on syytä varautua, sekä millaisia kokemuksia muualla on.

Tässä työssä on käsitelty paljon asiaa, ja melko nopeasti työn aloitettuani huomasin jännitetason nostoon liittyvän monenlaisia kysymyksiä. Työssä käsiteltiin monta sellaista aihetta, josta olisi voinut jo pelkästään tehdä oman opinnäytetyön. Tämän vuoksi osa asioista on käsitelty aika pintapuolisesti. Työssä opin itse paljon sellaisia asioita, joista olisi ollut hyvä tietää enemmän jo työskennellessäni harjoittelijan verkonrakennus tehtävissä. Olisi ollut hyvä tietää enemmän esimerkiksi keskijännitekaapeleiden jatkosten ja päätteiden alttiudesta osittaispurkauksille. Muutenkin työ tarjosi paljon uutta tietoa asioista, jotka olivat jo entuudestaan jokseenkin tuttuja.

Haastavan työstä teki se, että tietoa vastaavanlaisista toteutuksista löytyy hyvin niukasti ja työssä oli yhdisteltävä paljon eri lähteistä löytyvää tietoa yhdeksi kokonaisuudeksi. Tähän työhön kävin paljon läpi erilaisia materiaaleja, kuten

kirjoja, verkostosuosituksia sekä standardeja. Kokonaisuutena olen tyytyväinen työhön ja siinä esille nostettuihin asioihin.

LÄHTEET

ABB. (n.d.a) ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: Luku 11: Tehomuuntajat. http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/11_Tehomuuntajat.pdf

ABB. (n.d.b) ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: Luku 13: Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot. http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/13_S%84hk%94asemat-kojaistot-muuntamot.pdf

ABB Transmit Oy. (n.d.). Öljyeristeiset jakelumuuntajat, suuret jakelumuuntajat ja erikoismuuntajat: Asennus-, käyttö- ja hoito-ohjeet.

Alanen, E., Heikkilä, T., Viiliäinen, S. & Niemi, H. (2019) Autonominen lämpökamera sähköverkon kunnonvalvontaan. Energiateollisuus. https://energia.fi/files/4384/Autonominen_lampokamera_sahkooverkon_kunnonvalvontaan_-_UnSeen_20191112.pdf

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. (2011) Suurjännitetekniikka, painos 3. Otatieto.

Aura, L. & Tonteri, A. (1993). Sähkölaitostekniikka. WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. (1986). Sähkämiehen käsikirja 2. WSOY.

Elovaara, J. & Haarla, L. (2011a). Sähköverkot I. Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. (2011b). Sähköverkot II. Otatieto.

Fingrid. (n.d.). Suomen sähköjärjestelmä. Haettu 03.11.2022 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

HeadPower. (n.d.a) Jakelumuuntajan jännitteiseksi kytkeminen. Haettu 22.12.2022 osoitteesta <https://headpower.fi/>

HeadPower. (n.d.b) Kaapelityöt (video): Keskijännitekaapelin vaiheistaminen [video]. Vimeo. <https://headpower.fi/>

Hyvönen, P. (2008). Prediction of insulation degradation of distribution power cables based on chemical analysis and electrical measurements [Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu]. Aaltodoc. <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/4498/isbn9789512294039.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Laine, J. (n.d.) Osa 1. Vaihtosähkötekniikka, kertaus. [luentomateriaali]. SAMK Moodle. <http://moodle.samk.fi/>

Laine, J. (n.d.) Osa 6. Jännitteenalenema ja tehohäviöt. [luentomateriaali]. SAMK Moodle. <http://moodle.samk.fi/>

Lakervi, E. & Partanen, J. (2009). Sähkönjakelutekniikka. Otatieto.

Lehto, K. (2021). Turku Energia Sähköverkot Oy:n keskijänniteverkon suojaus selvitys [AMK-opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/503667/Lehto_Kaarle.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Lepistö, J. (01.12.2022). TESV Oy:n kunnossapitomestari Jari Lepistön haastattelu.

Loukkalahti, M., Hämäläinen, A., Vepsäläinen, J., Siirto, O. (26.03.2019). Helsinki Restores High Reliability. T&D World. <https://www.tdworld.com/test-and-measurement/article/20972389/helsinki-restores-high-reliability>

Muoviteollisuus ry. (n.d.). Muovisanastoa. Haettu 04.11.2022 osoitteesta <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=16&tag=93>

Monni, M. (2003). Sähkölaitos asentajan ammattioppi 3: Jakelumuuntamotyöt, Sähköasematyöt. 4. painos. Laine Direct Oy.

Monni, M. (2002). Sähkölaitos asentajan ammattioppi 4: Jakeluverkon käyttötehtävät. 4. painos. Laine Direct Oy.

Nieminen, P. (08.11.2022). TESV Oy:n yleissuunnittelija Petteri Niemisen haastattelu.

Pakonen, P. Verho, P. Keränen, J. Muranen, S. (2018). Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Tampereen teknillinen yliopisto. https://energia.fi/files/2838/Keskijannitekaapeleiden_kunnan_arviointi_haviokerroin-ja_osittaispurkausmittauksilla_Loppuraportti_2018.pdf

Partanen, J. Lassila, J. Haakana, J. (2020). Sähkönjakeluverkkoliiketoiminnan sääntely ja kehittäminen. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto. https://energia.fi/files/5637/Sahkonjakeluverkkoliiketoiminnan_saan_tely_ja_kehittaminen_LUT_2020.pdf

PQNet. (2022). Muuntamo [Tilasto].

Prysmian Group. (2019). Osittaispurkausmittaukset varmistavat kaapeli asennusten laadun. Haettu 21.11.2022 osoitteesta <https://fi.prysmiangroup.com/node/10556>

Rasi, S. (17.11.2022). Lahti Energia Sähköverkko Oy:n Käyttö- ja kunnossapitoinsinööri Sami Rasin puhelinhaastattelu.

Reka. (2022). AHXAMK-W 12/20 (24) kV 3-johdin: Tuoteryhmän datalehti. [AHXAMK-W 12/20 \(24\) kV 3-johdin - Reka Kaapeli](#)

SFS 6001:2018, Suurjännitesähköasennukset. (2018). Suomen standardisointiliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS 6002:2015, Sähkötyöturvallisuus. (2015). Suomen standardisointiliitto. <https://online.sfs.fi>

STUL ry. (2013). 1–20 kV suurjännitelaitteistojen käyttöönottotarkastusohjeisto. Sähköinfo.

ST 52.40, (2019). Siirrettävän, pienjännitteisen moottorigeneraattorin liittämisen sähkölaitteistoon. Sähkötieto. <https://severi.sahkoinfo.fi>

ST 53.11, Kuluttajamuuntamot. (2018). Sähkötieto. <https://severi.sahkoinfo.fi>

Turku Energia. (n.d.a). Turku Energia lyhyesti. Haettu 01.11.2022 osoitteesta <https://www.turkuenergia.fi/tietoa-meista/turku-energia-lyhyesti/>

Turku Energia. (n.d.b). Siirtyminen 24 kV -rakennejännitteeseen keskijänniteverkossa. Haettu 22.11.2022 osoitteesta <https://www.turkuenergia.fi/sahko-verkot/sahkoliittyma-ja-sahkon-mittaus/ohjeet-sahkoammattilaisille/sahko-verkkoon-liittymisen-tekniset-ohjeet/siirtyminen-24-kv-rakennejannitteeseen-keskijanniteverkossa/>

Turku Energia. (n.d.c). Liittymishinnasto 1.12.2020 alkaen. Haettu 20.12.2022 osoitteesta <https://www.turkuenergia.fi/sahkoverkot/tietoa-sahkoverkostamme/sahkonjakelutuotteet-hinnastot-ja-sopimusehdot/liittymishinnasto/>

Tietoevry NIS. (2021) Sähköasema [Verkkotietojärjestelmä]. Haettu 14.11.2022.

Tietoevry NIS. (2022) [Verkkotietojärjestelmä]. Haettu 16.12.2022.

Tiippana, E. (2011). Sähköverkkoyhtiön 10 kV keskijänniteverkon kehittämissuunnitelma [Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto]. TESV Oy sisäinen aineisto.

Uurasjärvi, J. & Toivonen, T. (2021). Turku Energia Sähköverkot Oy:n käyttö-, kunnossapito ja viankorjaustöiden turvallisuusasiakirja. <https://headpower.fi/>

Uurasjärvi, J. (30.1.2023). TESV Oy:n käyttöpäällikkö Juho Uurasjärven sähköpostin liite.

Verkostosuositus SA 2:21, Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen (2022). Energiateollisuus Ry. <https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuositukset>

Verkostosuositus RK 1:16, Maakaapeliverkon rakentamisen vaatimukset 0,4 kV - 45 kV. (2016). Energiateollisuus Ry. <https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuositukset>

Verkostosuositus RM 3:16, Kaapeliliitännäinen verkonhaltijan muuntamo. (2016). Energiateollisuus Ry. <https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuosituksset>

Verkostosuositus RU B3:11, Yleinen työselostus. (2012) Energiateollisuus Ry. <https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuosituksset>

LIITE 1: TOIMENPIDELISTA

Toimenpidelista

1. Verkon osien 20 kV soveltuvuuden toteaminen

- Tarkistetaan kojeistojen kunto, muuntajien jännitteen vaihto mahdollisuus, ym.
- Asiakasmuuntamoiden tilanteen kartoitus
- Oikeiden tietojen päivitys tietojärjestelmään

2. Mittaustoimenpiteiden valinta/suunnittelu

- Valitaan kohteeseen parhaiten soveltuvat mittaukset ja miten ne toteutetaan, joko järjestelmällisesti tai pistokoe luontoisesti.
- Osittaispurkausmittaukset käytön aikana on-line-menetelmällä / jännitteettömänä off-linen-menetelmällä.
- Muita kunnonvalvonta menetelmiä tarvittaessa

3. Vyörytyssuunnitelman laatiminen

- Missä järjestyksessä muuntamoita käännetään 20 kV tasolle
- Vyörytys alueiden jakaminen sopivan kokoiisiin osiin esim. keskijännitelähtö tai sen osa

4. Kytkentäohjelman laatiminen vyörytyssuunnitelman pohjalta

- Laaditaan määrätyn muotoinen kirjallinen kytkentäohjelma väärinymmärrysten välttämiseksi.
- Varavoimakoneet ja verkon kytkennät
- Toimenpiteet muuntamoilla (jännitteen vaihtokytkimen kääntö, keskijännitesulakkeet)

5. Kytkennät

- Noudattaen tarkasti kytkentäohjelmaa

6. Käyttöönottomittaukset

- Jännite, kierto-suunta ja vaiheistus

7. Dokumentaation pitäminen ajantasaisena

- Tietoevry NIS järjestelmän päivitys ajantasaiseksi