

samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JUHO LEHTINEN

Teollisuuden sähköverkon mallin- taminen

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN TUTKINTO-
OHJELMA
2024

TIIVISTELMÄ

Lehtinen, Juho: Teollisuuden sähköverkon mallintaminen
Opinnäytetyö, AMK
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Huhtikuu 2024
Sivumäärä: 51

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä teollisuuslaitoksen sähköverkkoon ja luoda verkosta mallinnus Schneider Ecodial -ohjelmalla. Työn tilaajana toimi Motoseal Components Oy. Tehtaan sähköverkko koostui rakennuksen vanhasta osasta, uudesta laajennusosasta sekä pihalla sijaitsevasta uudesta muuntamosta, jossa sijaitsee tehtaan kaksi jakelumuuntajaa.

Työ aloitettiin tutustumalla tehtaan olemassa olevaan sähköverkkoon ja sen jakelutekniikoihin sekä suojalaitteisiin. Työn alussa perehdyin myös yleiseen teoriaan teollisuuden sähköverkoista etsimällä aiheesta tietoa eri lähteistä. Työn alussa rajasimme myös työn tilaajan kanssa mallinnettavan sähköverkon laajuuden. Mallinnettavan kohteen sähköverkosta oli saatavilla eri dokumentteja. Kaikkia tietoja ei kuitenkaan löytynyt dokumenteista, joten vierailin tehtaalla ja tarkastin puuttuvat tiedot.

Työn lopputuloksena saatiin luotua yksi tapa sähköverkon mallintamisesta Schneider Ecodial -ohjelmalla. Tehtaan sähköverkon toimivuus ja vaatimusten täyttäminen saatiin myös tarkastettua valmiin mallinnusohjelman avulla. Tämän lisäksi tehtaan sähkökaavioiden paikkansapitävyys saatiin todettua ja tehtyä kaavioihin muutokset, joita ei vielä ennen ollut tehty.

Avainsanat: Teollisuus, sähköverkko, mallintaminen, suojausmenetelmät

ABSTRACT

Lehtinen Juho: Modeling of Industrial Electrical Distribution Network

Bachelor's thesis

Electrical and automation engineering

April 2024

Number of pages: 51

The purpose of this thesis was to become familiar with the electrical network of an industrial plant and to create a modeling of the network using the Schneider Ecodial program. The client of the work was Motoseal Components Oy. The factory's electricity network consisted of the old part of the building, a new extension, and a new transformer plant in the yard, where the factory's two distribution transformers are located.

The work began by getting to know the factory's existing power grid and its distribution technologies as well as protective equipment. At the beginning of the work, I also studied the general theory of industrial electricity networks by looking for information on the subject from different sources. At the beginning of the work, we also limited the scope of the electric grid to be modelled with the client. Various documents were available on the grid of the object to be modelled. However, not all of the information was found in the documents, so I visited the factory and checked the missing information.

The end result of the work was to create one way of modeling the electricity network using the Schneider Ecodial program. The functionality of the factory's electricity network and the fulfilment of requirements were also checked with the help of a ready-made modeling program. In addition, the accuracy of the factory's electrical diagrams was established, and changes made to the diagrams that had not been made before.

Keywords: Industry, power grid, modeling, protection methods

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA	7
3 SÄHKÖN SIIRTO JA JAKELU	8
3.1 Suurjännite	8
3.2 Keskijännite	9
3.3 Pienjännite.....	9
3.4 Pienoisjännite	9
3.5 Teollisuudessa käytettävät jännitetasot	10
3.6 Sähkönjakelun varmentaminen teollisuudessa.....	11
3.7 Jakelujärjestelmät.....	12
3.7.1 TN-C-järjestelmä.....	12
3.7.2 TN-S-järjestelmä	12
3.7.3 TN-C-S-järjestelmä	13
3.7.4 TT-järjestelmä.....	13
3.7.5 IT-järjestelmä	14
4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELU JA VERKOT	15
4.1 Teollisuusverkko.....	15
4.2 Teollisuusverkkojen rakenne	16
4.2.1 Säteittäinen verkko	17
4.2.2 Rengasverkko.....	17
4.2.3 Silmukoitu verkko.....	17
4.3 Teollisuusverkkojen laitteet	18
4.4 Sähköasema	18
4.5 Keskukset.....	19
4.5.1 Jakokeskukset	19
4.5.2 Kennokeskukset	19
4.5.3 Kotelokeskukset.....	20
4.5.4 Muut keskustyyppit	21
4.6 Kiskosto	22
4.6.1 Yksikiskojärjestelmä	22
4.6.2 Apukiskojärjestelmä.....	23
4.6.3 Kaksoiskatkaisijajärjestelmä	23
4.7 Muuntajat.....	24
4.8 Katkaisijat	26
4.9 Relesuojaus.....	27

4.10 Loistehon kompensoinnin laitteet	29
4.11 Suurvirtakaapelit.....	30
5 SÄHKÖVERKON SUOJAUSRAKENTEET	31
5.1 Sulakesuojaus	31
5.2 Relesuojaus.....	32
5.2.1 Ylivirtarele	34
5.2.2 Vakioaikaylivirtarele	34
5.2.3 Valokaarirele.....	35
5.3 Katkaisijat	36
5.3.1 Ilmakatkaisijat	37
5.3.2 Kompaktikatkaisija	37
6 MAADOITUS.....	38
6.1 Teollisuusverkkojen maadoitukset.....	38
6.2 Maasulku	40
6.3 Kaksoismaasulku	40
7 SÄHKÖVERKON MALLINTAMINEN	41
7.1 Sähköverkko.....	41
7.2 Muuntamo	42
7.3 Sähköpääkeskus	43
7.4 Kuormat.....	43
7.4.1 Alakeskukset.....	43
7.4.2 Tuotantokoneet.....	44
7.5 Sähköverkon mallinnus	44
7.6 Tulokset ja yhteenveto.....	47
8 YHTEENVETO.....	49
LÄHTEET.....	50

1 JOHDANTO

Suomessa on monia erilaisia tehtaita, joissa tuotetaan päivittäin suuria määriä uusia tuotteita markkinoille ja asiakkaille. Tehtaat koostuvat usein monista eri osista ja ne ovat laajoja kokonaisuuksia. Tehtaan toiminnalle on eilinehtona toimiva ja toimintavarma sähköverkko, jonka avulla koneet saadaan pidettyä käynnissä ja tuotanto toiminnassa. Tehtaan tuotannon kasvaessa, tarvitaan usein uusia koneita, jonka avulla tuotantoa saadaan kasvatettua. Uusi laite on sähköverkolle aina lisäkuormitusta ja laitteen hankinta vaatii usein muutoksia jo olemassa olevaan sähköverkkoon.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä Raumalla sijaitsevan Motoseal Oy:n tehtaan sähköverkkoon ja luoda verkosta mallinnus Schneider Ecodial -ohjelmistolla. Schneider Ecodial -ohjelmisto on ilmaiseksi ladattava laskentaohjelmisto, jonka avulla voidaan mallintaa ja simuloida erilaisten verkkojen toimintaa ja kuormituksia.

Työssä perehdytään aluksi yleisesti teollisuuden sähköverkkoihin, sähkön siirtoon ja jakeluun, laitteisiin sekä eri suojausmenetelmiin, joita sähköverkoissa voidaan käyttää. Työn teoriaosuuden tiedonhaku toteutetaan suurimmaksi osaksi internetissä olevista eri lähteistä ja saatavilla olevasta kirjallisuudesta, joka koskee sähköverkkoja.

Työn tavoitteena on suorittaa tehtaan sähköverkon mallintaminen laskentaohjelmalla ja selvittää miten mallinnus tulee toteuttaa ja mitä se vaatii onnistuakseen. Sähköverkkoon perehtyessä voidaan myös varmistaa verkosta olemassa olevien dokumenttien paikkansapitävyys ja tarpeen vaatiessa tehdä niihin muutoksia.

2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA

Motoseal Components Oy on raumalainen muovi- ja metallituotteita suunnitteleva, valmistava sekä myyvä yritys. Yrityksen tehdas sijaitsee Raumalla (kuva 1). Yritys on alkujaan perustettu vuonna 1979 ja jo samana vuonna Motoseal toimitti ensimmäiset traktorin lokasuojat Fordille. Vuonna 1993 yrityksen toiminta muutettiin toimimaan Motoseal Components Oy:n nimissä. Vuonna 2023 yrityksen liikevaihto on ollut 10,3 miljoonaa euroa ja yritys on työllistänyt 63 henkilöä. (Finder, 2024.)

Yrityksen valmistavat tuotteet jakautuvat kahteen eri pääryhmän, jotka ovat lokasuojat sekä Masi-lumi- ja pihatyövälineet. Yritys toimittaa lokasuojia monille traktori- ja työkonevalmistajille, joita ovat muun muassa JCB, Kubota, Valtra, New Holland, Wacker/Weidemann sekä Veekmas. (Motoseal Components, 2024.)

Yrityksen valmistaviin Masi-tuotteisiin kuuluvat lumikolat, lumentyöntimet, lumilapiot sekä pihatyövälineet ja puutarhan käsityökalut. Pihatyövälineitä ovat muun muassa lakaisu- ja puutarhakärryt, puutarhatraktoreiden peräkärret sekä hiekoittimet. (Motoseal Components, 2024.)



Kuva 1. Motoseal Components Oy keväällä 2024.

3 SÄHKÖN SIIRTO JA JAKELU

Suomessa erilaiset sähköverkot jaetaan eri siirto- ja jakeluverkkoihin niiden käytämän jännitetason perusteella. Suomessa sähkön siirtoverkkoihin kuuluu jokainen johto, jossa kulkee 110, 400 tai 220 kilovoltin jännite. Edellä mainitut siirtoverkkojen johdot muodostavat yhdessä sähköasemien kanssa koko Suomen kattavan valtakunnallisen kantaverkon. Kantaverkon sisällä toisiinsa yhdistyy voimalaitoksia ja sähkösyöttöasemia, joita käytetään kulutusalueilla sähkön siirtämiseen. Koko Suomen kantaverkon omistaa Fingrid Oyj, joka on perustettu vuonna 1996. Suomen kantaverkosta on kaapeliyhteydet Ruotsin, Norjan ja Venäjän sähköverkkoihin. Kaapeliyhteydet muihin maihin mahdollistavat sähkön tuonnin ja viennin naapurimaidemme kanssa. (Korpinen, 1998, s. 1.)

Suomessa on myös eri sähköyhtiöiden omistamia alueverkkoja, jonka kautta siirretään sähköä kantaverkosta jakeluverkkoon. Sähköyhtiöiden omistamat alueverkot muodostuvat 110 kV johdoista, sähköasemista sekä harvinaisemmista 30 ja 45 kV johdoista, jotka eivät kuulu kantaverkkoon. (Korpinen, 1998, s. 1.)

Jakeluverkkoa puolestaan käytetään sähkön siirtoon kulutusalueilla pienille ja keskisuurille sähkökäyttäjille. Jakeluverkot jaetaan keski- ja pienjänniteverkkoihin. Useimmiten Suomessa käytetään keskijännitettä 20 kV mutta joissain kaupungeissa on käytössä myös alle 10 kV jännite. Pienjänniteverkoissa käytetään 400 V jännitettä. Valtaosalle tavallisista sähkökäyttäjistä tutuin on 230 V jännite, joka on pienjänniteverkon vaihejännite. Pienjänniteliityntä on valtaosalle sähkökäyttäjistä sopivin laitteiden käyttöjännitteen kannalta. (Korpinen, 1998 s. 1.)

3.1 Suurjännite

Suurjännite on jännite, jonka suuruus on 110 kV tai enemmän. Suurjännite on käytössä kantaverkossa sähkö siirtämisessä. Kantaverkkoon on liittynyt suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot. Kyseiset verkot muodostavat alueellisen rungon sähkö siirrolle. Kantaverkon jännitetasoina käytetään 400 kV: a, 220kV: a ja 110 kV: a. Verkossa käytettävään jännitteen tasoon vaikuttaa siirrettävä tehon määrä sekä siirtomatka. Käyttämällä suurta jännitettä, voidaan virtaa pienentää mahdollisimman pieneksi, jonka seurauksena sähkönsiirtohäviöt saadaan kohtuullisiksi. (Lyytikäinen, 2011, s. 9.)

Ainoastaan tärkeimmät 110 kV johdoista kuuluvat kantaverkkoon ja suurin osa 110 kV johdoista kuuluu alueverkkoihin. Alueverkolla tarkoitetaan alueellista suurjänniteverkkoa tai johtoa ja lisäksi se muodostuu vähintään 100 kV verkosto-osista, jotka eivät kuulu kantaverkkoon. (Lyytikäinen, 2011, s. 9.)

3.2 Keskijännite

Jännitettä, joka on suuruusluokaltaan 1 kV – 35 kV, kutsutaan keskijännitteeksi. Pääsääntöisesti keskijännite jakeluverkolla tarkoitetaan 20 kV jännitetasoa, sillä Suomessa keskijänniteverkossa on käytössä lähes poikkeuksetta kyseinen jännite. Keskijänniteverkko liitetään sähköaseman kautta kanta- tai alueverkkoon. Suuret kiinteistöt ja laitokset voivat olla liittynyt sähköverkkoon myös keskijännitteellä. Tällöin sähkö siirretään käyttäjälle 20 kV jännitteenä ja muunnetaan kiinteistömuuntajalla pienjännitteeksi. Tehonkulutuksen kasvaessa suureksi, on suositeltavaa liittyä sähköverkkoon suuremmalla jännitteellä. (Lyytikäinen, 2011, s. 9.)

3.3 Pienjännite

Pienjännite on vaihtojännitettä, joka on suuruusluokaltaan 50 V - 1000V. Tämä jännitetaso on kaikista tutuin tavalliselle kuluttajalle ja sähkön käyttäjälle. Asuin-kiinteistöissä käytetään pääjännitettä 400 V. Pääjännite on kahden vaihejohtimen välillä oleva jännitetaso. Sähkönkuluttajille tunnetumpi vaihejännite 230 V, saadaan jakamalla pääjännitteen arvo $\sqrt{3}$:lla. Tavallisesti liityntä sähköverkkoon tehdään pienjännitteellä. Tyypillisesti normaaleiden sähkölaitteiden käyttöjännitteet ovat 400 / 230 V, joten liityntä pienjännitteellä on sopivin vaihtoehto. (Lyytikäinen, 2011, s. 10.)

3.4 Pienoisjännite

Pienoisjännitettä, ELV (Extra Low Voltage) on alle 50 V vaihtojännite sekä alle 120 V tasajännite. Pienoisjännitteiksi luokitellaan lisäksi:

- SELV (Safety ELV = turvallinen pienoisjännite)
- FELV (Functional ELV = toiminnallinen pienoisjännite)
- PELV (Protected ELV = suojaava pienoisjännite)

Edellä mainittuja sähköjärjestelmiä voidaan kutsua myös suojajännitteiksi. Monet erilaiset sähkölaitteet toimivat pienoisjännitteellä. Tällaisia sähkölaitteita on esimerkiksi mobiililaitteiden laturit, valosarjat sekä lelut, jotka toimivat sähköllä. Pienoisjännitteellä toimivan sähkölaitteen tunnistaa tyypillisesti siitä, että se on liitetty sähköverkkoon pistotulpalla. Pienoisjännitteellä toimivien sähkölaitteiden pistotulpassa sijaitsee muuntaja, jonka avulla voidaan muuttaa pistorasiasta tuleva 230 V jännite, sähkölaitteelle sopivaksi. Pienoisjännite sähkölaitteet ovat niiden virta-arvoiltaan niin pieniä sekä niiden käyttöjännite on muuntajan ansios-

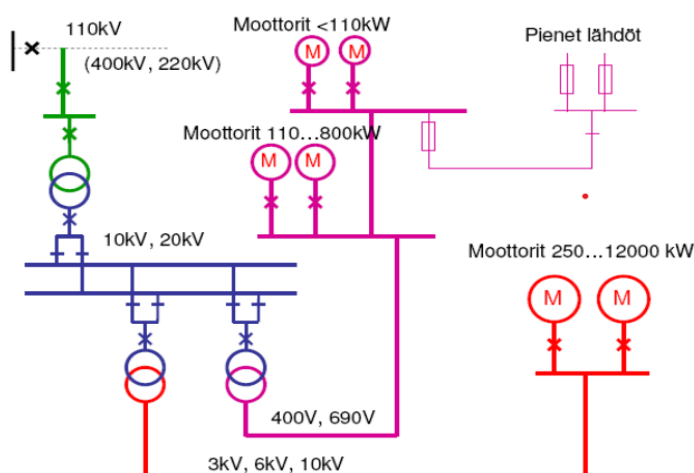
ta niin pieni että niistä ei koidu ihmisen hengelle välitöntä vaaraa. (Lyytikäinen, 2011, s. 9.)

3.5 Teollisuudessa käytettävät jännitetasot

Sähkönjakelujärjestelmän osiin teollisuudessa kuuluvat liityntä yleiseen sähköverkkoon, keskijännitejakelu sekä käyttösähkön jakelu kulutuskohteille (kuva 2). Teollisuudessa käytettävät jännitetasot poikkeavat jonkin verran siitä mitä käytetään sähkön siirrossa ja jakelussa. Tuotantolaitoksen liityntäjännite sähköverkkoon riippuu tuotantolaitoksen koosta sekä laitoksessa käytössä olevasta tehomäärästä. Tyypillisesti tuotantolaitokset liittyvät sähköverkkoon 110 kV, 20 kV tai 0,4 kV jännitetasolla. Suuremmat tuotantolaitokset, joissa tarvitaan suurta tehoa 10MW tai enemmän, liittyvät sähköverkkoon usein 110 kV jännitetasoon. Pienempitehoisissa teollisuuslaitoksissa riittää joko 20 kV, 10 kV tai 0,4 kV jännitetaso. Suurissa teollisuuslaitoksissa on myös lisäksi omaa sähkövoimantuotantoa, jolla katetaan osa laitoksen tarvitsemasta sähköstä. (Lyytikäinen, 2011, s. 10.)

Teollisuuden tuotannossa poikkeuksetta suurin sähköenergian kuluttaja on moottorit. Suomessa käytössä olevat moottorit toimivat 10 kV, 6 kV, 3 kV, 690 V ja 230 VAC jännitteillä. Pienissä ja keskisuurissa tuotantolaitoksissa 400 V on yleisimmin käytetty jännitetaso. Moottorin käyttöjännitteen valintaan vaikuttaa muun muassa suurimpien moottoreiden teho, tehoalueen laajuus, jakelumuuntajan oikosulkuteho, huipputeho sekä laitoksissa käyttöönotetut jännitetasot. Laitoksissa suurien moottoreiden käyntiin lähteminen aiheuttaa laitoksensähköverkolle jännitteenalenemistä. Sähköverkossa oleville muille laitteille ei saa aiheutua haittaa jännitteenalenemasta. (Lyytikäinen, 2011, s. 11.)

Teollisuuslaitoksen jakelujännitteenä voidaan käyttää yhtä tai useampaa jännitetasoa. Pääjakelujännitteeksi valitaan se jännitetaso, jolla sähkönjakelu pääosin tapahtuu ja johon jakelumuuntajat ovat liitetty. Pääjakelun jännitteenä käytetään yleensä 6 kV, 10 kV tai 20 kV jännitettä. Pienissä teollisuuslaitoksissa, joissa verkon liittymisjännite sähköverkkoon on 400 V, käytetään sitä myös laitoksen pääjakelujännitteenä. (Lyytikäinen, 2011, s. 11.)



Kuva 2. Teollisuuden jännitetasoja (Lyytikäinen, 2011, s. 12).

3.6 Sähkönjakelun varmentaminen teollisuudessa

Käytösähkön jakelu teollisuuden kulutuskohteisiin jaetaan tavallisesti eri osiin. Eri osia ovat esimerkiksi tuotannon sähkönjakelu, valaistus- ja huoltosähköverkko sekä apusähköjärjestelmä. Apusähköjärjestelmällä tarkoitetaan varmennettua järjestelmää, jonka avulla laitoksen tärkeimmät sähköverkon osat voidaan ylläpitää päällä myös silloin kun sähköverkkoon ilmestyy keskeytys sähkönjakeluun. Sähköverkon varmentaminen tehdään usein UPS-järjestelmillä. UPS-järjestelmät ovat akkuvarmennettu tasajännitejärjestelmiä tai vaihtojännitejärjestelmiä. Verkon varmentaminen on mahdollista toteuttaa myös erilaisilla dieselkäyttöisillä generaattoreilla. Varavoimaverkon tulee havaita sähkönjakelun katkeaminen automaattisesti ja varavoima sähkönsyötön on käynnistyttävä sekuntien kuluttua sähkönjakelun katkeamisesta. Toimivalla varavoimaverkolla on tärkeä tehtävä myös välttää henkilövahinkoja. (Rytkönen, 2009.)

Varavoimaverkon käyttövarmuus riippuu eri tekijöistä. Näitä tekijöitä on esimerkiksi:

- verkonsyöttö
- varavoimalaitos ja laitoksen apujärjestelmät ja niiltä vaadittava käytettävyyysluku
- varavoimaverkon rakenne
- huolto- ja ylläpitotoimet
- verkon kuormien määrä ja niiden ominaisuudet
- turvasyöttöjärjestelmälle määrätyt vaatimustasot

Sähköverkon varvoimajärjestelmän suunnittelussa suureen rooliin nousevat sähköverkon sähkön laatu ja sille määrätyt vaatimukset sekä sallittavat poikkeamat. Varmennettuja sähkönjakelujärjestelmiä koskee omat niille asennetut

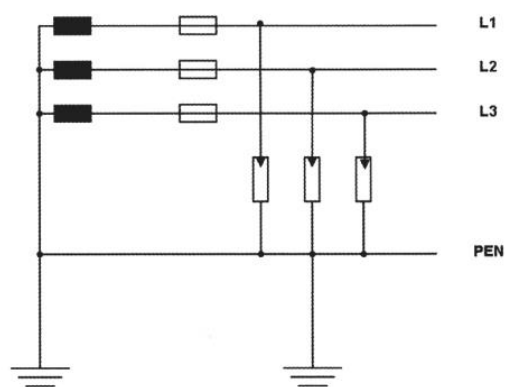
standardit ja määräykset. Järjestelmistä on olemassa lukuisia erilaisia toteutus-tapoja. (Lyytikäinen, 2011, s. 13.)

3.7 Jakelujärjestelmät

Pienjänniteverkot jaetaan eri jakelujärjestelmiin sen perusteella, miten verkon maadoitus on toteutettu. Pienjänniteverkoissa käytettyjä erilaisia jakelujärjestelmiä on TN-, TT-, ja IT-järjestelmät. TN-järjestelmistä on käytössä vielä erikseen kolme eri järjestelmää, jotka jaetaan sen mukaan, miten verkon suojajohdinta on käytetty. Nämä kolme eri TN-järjestelmää ovat TN-S, TN-C ja TN-C-S. Samat jaottelut ovat käytössä myös tasajännitteellä toimivilla järjestelmillä. (Paju, 2017, s. 13.)

3.7.1 TN-C-järjestelmä

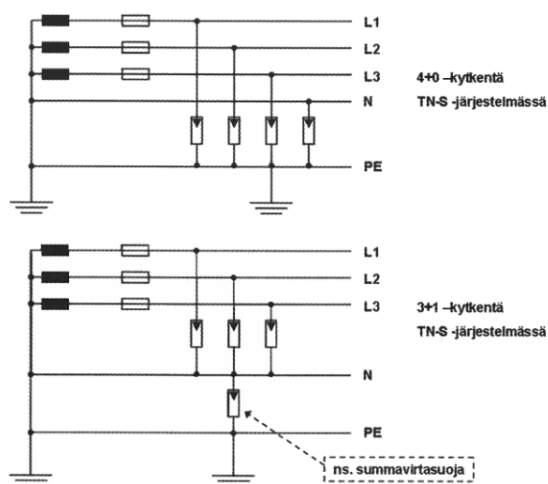
TN-C-järjestelmässä PEN-johdinta käytetään järjestelmän suojamaadoitus- ja nollajohtimena (kuva 3). Järjestelmä tiedetään myös 4-johdinjärjestelmänä. TN-C-järjestelmää käytetään kolmivaihejärjestelmänä, jossa johtimia on kolme vaihejohtinta sekä yksi PEN-johdin. TN-C-järjestelmässä ylijännitesuojauksen toteutetaan yhdistämällä kaikki vaihejohtimet ylijännitesuojien kautta maadoitukseen. (Paju, 2017, s. 13.)



Kuva 3. TN-C-järjestelmä (Paju, 2017, s. 13).

3.7.2 TN-S-järjestelmä

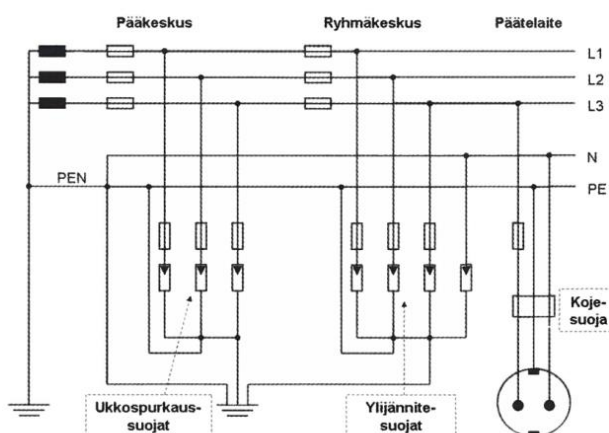
TN-S-järjestelmä koostuu 5-johtimesta. Järjestelmässä on käytössä erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet (kuva 4). Järjestelmä tunnetaan 5-johdinjärjestelmänä. TN-S-järjestelmän N-johdin tulee myös suojata, mikäli PEN-johdin on haaroitettu ja matka ylijännitesuojille on yli kaksi metriä. TN-S-verkon suojauksessa on mahdollista käyttää 4+0 tai 3+1 kytkentää. (Paju, 2017, s. 14.)



Kuva 4. TN-S-järjestelmä (Paju, 2017, s. 14).

3.7.3 TN-C-S-järjestelmä

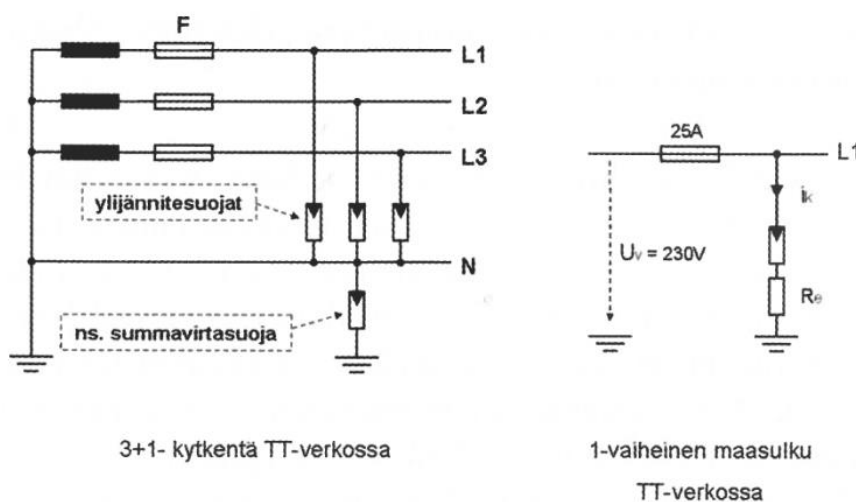
TN-C-S-järjestelmä tunnetaan Suomen yleisimpänä verkkomuotona. Verkko- muodossa pääkeskukseen tullaan 4-johdinsyötöllä, jotka ovat 3 vaihejohdinta ja PEN-johdin (kuva 5). Pääkeskuksella otetaan käyttöön 5-johdin- eli TN-S-järjestelmä. Tällöin pääkeskuksessa riittää vain kolminapainen suoja, mutta nousu- ja ryhmäkeskuksissa suojataan myös nolajohdin. (Paju, 2017, s. 14.)



Kuva 5. TN-C-S-järjestelmä (Paju, 2017, s. 15).

3.7.4 TT-järjestelmä

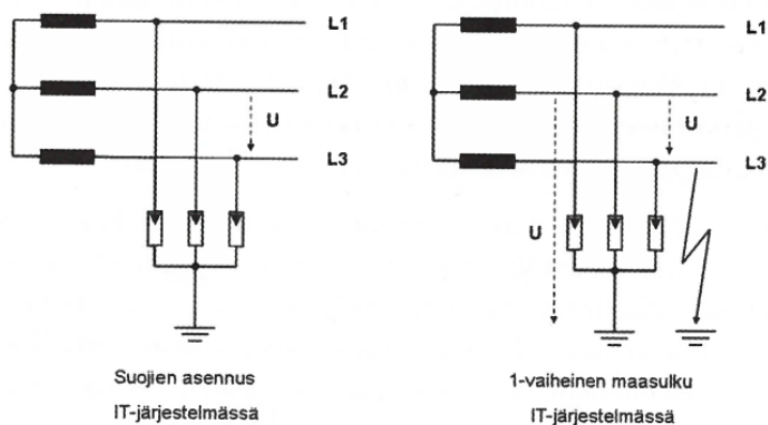
TT-järjestelmässä muuntajan tähtipiste maadoitetaan suoraan (kuva 6). Tämän lisäksi sähkölaitteistot ja -laitteet maadoitetaan erillisten maadoituselektrodien avulla, joiden tulee olla sähköisesti erillisiä syöttävän verkon maadoituselektrodiin nähden. TT-järjestelmää ei käytetä Suomessa, mutta Keski- ja Etelä-Euroopassa järjestelmä on käytössä. (Paju, 2017, s. 15.)



Kuva 6. TT-järjestelmä (Paju, 2017, s. 16).

3.7.5 IT-järjestelmä

IT-sähköverkko on maasta erotettu järjestelmä, jossa ei ole nollajohdinta (kuva 7). Järjestelmää voidaan kutsua myös kelluvaksi järjestelmäksi. Sähkölaitteiden jännitteelle alttiina olevat osat kytketään suojamaadoitusjohtimen välityksellä maadoituselektrodeihin tai yhteen yhteiseen elektrodiin. IT-järjestelmä voidaan toteuttaa kytkemällä järjestelmä maahan impedanssin välityksellä. Impedanssin suuruus valitaan tällöin käyttökohteen perusteella. IT-järjestelmä on käytössä muun muassa teollisuudessa ja sairaaloiden leikkaussalien jakelujärjestelmissä. (Paju, 2017, s. 16.)



Kuva 7. IT-järjestelmä (Paju, 2017, s. 17).

4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELU JA VERKOT

4.1 Teollisuusverkko

Teollisuusverkoksi kutsutaan teollisuusalueella tai -laitoksella sijaitsevaa omaa sähköverkkoa. Teollisuudessa olevalle sähköjakeluverkolle on tyypillistä verkon suuri tehonkulutus pienellä alueella. Teollisuusverkon sähköenergiasta suunnataan suurin osa laitoksessa oleville moottorikäyttöille. Tästä syystä sähköverkkoa suunniteltaessa verkon mitoituksessa ja rakenteen muodostamisessa käytetään pohjatietoina verkossa olevien sähkökäyttöjen lukumäärää ja niiden nimellistehoja. Teollisuusverkon erona normaaliin jakeluverkkoon on lyhyet sähköjakeletäisyydet ja suuri tehonkulutus. (Häkkinen, 2020, s. 2.)

Teollisuusverkon suuren tehonkulutuksen vuoksi verkko vaatii vahvan liitännän jakeluverkkoon ja usein paljon tehokkaita muuntajia. Jakeluverkko liityntöjä voidaan toteuttaa useammalla kuin yhdellä liityntäpisteellä. Teollisuusverkko liitetään yleiseen sähköverkkoon tyypillisesti 110 kV, 20 kV, 10 kV tai 0,4kV jännitetasolla. Syöttöjännite lasketaan verkon päämuuntajilla teollisuusjakeluun soveltuvalle tasolle esimerkiksi 20 kV, 10 kV, 6 kV tai 3 kV tasoon. Suurimmilla teollisuuslaitoksilla on usein käytössä myös omaa sähköenergiantuotantoa. (Häkkinen, 2020, s. 2.)

Teollisuusverkossa on tyypillisesti useita tehokkaita muuntajia ja paljon moottoreista aiheutuvaa kuormitusta. Tästä syystä verkon eri osissa on suuria oikosulkuvirtoja. Teollisuusverkko rakennetaan usein säteittäiseksi, koska silloin verkon oikosulkuvirtaa ja ohjauksen sekä suojauksen järjestäminen voidaan toteuttaa helpommin. Teollisuusverkon toiminnoilta odotetaan usein suurta toimintavarmuutta. Tällöin on mahdollista käyttää verkon rakenteena silmukoitua verkkoa sekä kaksoiskiskotettuja sähkökeskuksia ja varavoimageneraattoreita. (Häkkinen, 2020, s. 3.)

Teollisuusverkon suunnittelussa tulee huomioida muuttuvat olosuhteet ja tilat, joita tavallisesti tuotantolaitoksissa voi sijaita. Suunnittelussa huomioitavaa on myös ympäristön muuttuvat lämpötilat, kosteus sekä erilaiset epäpuhtaudet kuten likaisuus ja pölyisyys. Edellä mainittujen lisäksi huomioitavaa on kohteelle aiheutuvat värinät ja mahdolliset mekaaniset rasitukset. (Häkkinen, 2020, s. 3.)

Tietyt sähkölaitteet, esimerkiksi sähkökeskukset tai ohjausjärjestelmät eivät sovellu haastaviin olosuhteisiin. Tällöin laitteille on järjestettävä laitoksessa omat tilat. Tiettyjen sähkölaitteiden tulee toimia haastavissakin olosuhteissa, joissa voi olla lämpötilavaihtelua, epäpuhtauksia tai värinää. (Häkkinen, 2020, s. 3.)

Yhdessä sähköverkossa voi olla suuria ikäjakaumia sähkölaitteiden kesken. Vanhoissa teollisuuslaitoksissa on käytössä jopa 50-luvulla tehtyjä sähkökojeita. Sähkölaitteiden tyypillinen teknistaloudellinen käyttöikä on 20-40 vuotta, laitteesta riippuen. Tyypillisesti vanhemmat sähkölaitteet aiheuttavat vikatilanteita enemmän. Vikatilanteista voi seurata sähköjakeluun keskeytyksiä. Keskeytyksistä aiheutuu teollisuuslaitoksien tuotantoon häiriöitä, jotka aiheuttavat usein suuria taloudellisia menetyksiä. Tästä syystä sähköverkon käytettävyys on tärkein peruste teollisuuslaitoksen sähköverkon uusinnassa. (Mäkelä, 2017, s. 47.)

Teollisuuslaitosten sähköverkkoja päivitetään ja niitä muutetaan jatkuvasti uusien prosessien ja sähkölaitteiden käyttöönoton vuoksi. Muutoksien avulla pyritään korjaamaan sähköverkkoa ja luomaan uusia investointeja tuotannon kehittämiseksi. Sähköverkon teknisten arvojen tulisi säilyä vaadittavissa raja-arvoissa ja lisäksi sähkön tulisi säilyä tasaisena vielä uusien muutosten jälkeenkin. Teollisuuslaitoksen verkon toimivuuden ja laadun varmistamiseksi verkkoon on hyvä tehdä säännöllisin väliajoin eri mittauksia, laskelmia sekä tarkistuksia. Sähköverkkoon tehtäviä laskelmia on esimerkiksi oikosulkuvirtalaskelmat, vikavirtojen laskelmat, kytkentätilojen optimointi, kuormitusten analysointi sekä erilaiset laatuselvitykset jännitteille. Näillä mainituilla mittauksilla voidaan selvittää sähköverkon toimivuutta ja muutostarpeita sekä varmistua siitä että sähköverkko toimii vaaditulla tavalla. (Mäkelä, 2017, s. 48.)

Sähköjakelussa verkon käyttövarmuus ja varmatoimisuus pohjautuu joustaviin verkkoratkaisuihin sekä laadukkaisiin primäärilaitteisiin ja laitteille rakennettuun automaatioon. Sähköasemien kojeistot ja niiden suojausmenetelmät, mittaukset, valvonta sekä ohjausjärjestelmät perustuvat eri järjestelmiin ja sähkölaitosten automaatioon. (Mäkelä, 2017, s. 48.)

4.2 Teollisuusverkkojen rakenne

Sähköverkkojen rakenne voidaan jakaa erilaisiin tyypeihin, joita ovat silmukoitu verkko, säteittäinen verkko ja rengasverkko. Eri verkkorakenteilla on jokaisella omat hyvät ja huonot puolensa. Verkkotyyppinä suunniteltaessa tulee huomioida verkon käyttöön liittyviä teknistaloudellisia kohtia, kuten esimerkiksi hinta investoinnille, verkon luotettavuus ja taloudellisuus, mahdollisuudet varavoimasyötölle sekä suojalaitteiden mahdollisuudet. (Lyytikäinen, 2011, s. 26.)

4.2.1 Säteittäinen verkko

Säteittäinen verkko on teollisuudessa yleisimmin käytetty verkkotyyppi. Säteittäiseen verkkoon törmää tyypillisesti sähkönjakelussa keski- ja pienjännitteellä. Säteittäisellä verkkorakenteella on etuna selkeä rakenne ja käytettävyys. Verkkorakenne on lisäksi helppoa suojata ja yksinkertainen mitoittaa. Säteittäisen verkon haittoina on sen varmistamismahdollisuuksien puutteellisuus sekä huolto- ja korjaustoimenpiteiden käyttökeskeytyksistä aiheutuvat pitkät sähkökatkokset. Verkkoon on mahdollista rakentaa varasyöttöyhteys, jonka avulla voidaan parantaa verkon käytettävyyttä ja turvata tärkeimmät toiminnot katkosten aikana. (Lyytikäinen, 2011, s. 26.)

4.2.2 Rengasverkko

Rengasverkko rakennetaan usein, kun verkossa käytetään suurempia jännitteitä. Verkko rakennetaan niin että se muodostaa renkaan, jonka avulla sähkönjakelu voidaan tehdä varmistetusti. Rengasverkon etuja säteittäiseen verkkomalliin verrattuna on verkon tasaisempi jännitteenlaatu sekä tehohäviöiden pienentyminen. Haittapuolia verkkomallissa on suojalaitteiden monimutkaisempi toteutus sekä mahdolliset käyttäjälle aiheutuvat riskit verkkoa käytettäessä. Verkon kaikki syöttösuunnat ovat tärkeä ottaa huomioon huolto- ja korjaustöitä tehdessä riskien ja tapaturmien välttämiseksi. Useiden syöttösuuntien takia koko verkko tai verkko-osa on tehtävä jännitteettömäksi, jotta työt voidaan suorittaa turvallisesti. (Lyytikäinen, 2011, s. 26.)

4.2.3 Silmukoitu verkko

Silmukoitu verkko sekä rengasverkko ovat ominaisuuksiltaan samankaltaisia. Silmukoidussa verkossa on kuitenkin sisällä myös syöttörenkaan sisäisiä väliyhteyksiä. Näiden yhteyksien avulla voidaan parantaa sähkönsyöttöjen varmistusmahdollisuuksia sekä verkon jännitteen vakavuutta ja lisäksi verkon tehohäviöitä pystytään saamaan pienemmiksi. Silmukoidun verkon haittana voidaan pitää verkon käytön vaikeutumista sekä suojaustoimien kalleutta. Silmukoitua verkko-rakennetta ei yleisesti käytetä Suomessa, sillä se on kantaverkkoon liittyvä verkon tyyppi 220 kV ja 400 kV jännitteillä. (Lyytikäinen, 2011, s. 27.)

4.3 Teollisuusverkkojen laitteet

Jakeluverkoissa tulisi pyrkiä aina korkeaan käyttövarmuuteen sekä laadukkaisiin käyttö- ja kunnossapito-ominaisuuksiin. Ominaisuuksiin pyrkiessä tulee kiinnittää huomiota sähkölaitteistojen suunnitelmalliseen ennakkohuoltoon ja kunnonvalvontaan. Sähkölaitteistoiden sähkön laadusta tulee myös itse varmistua ja lisäksi on hyvä ottaa huomioon erilaiset ympäristön olosuhteet, joissa laitteita käytetään. Laitteiden eri kunnossapidontarpeet määräytyvät laitteen tai järjestelmän käyttötarkoituksesta, olosuhteista, kunnonmuutoksista sekä laitteen iästä. Myös samanlaisista laitteista saatujen kunnossapidon kokemuksista ja tiedoista on hyötyä. Sähköverkon laitteiden sovellettava kunnossapidon strategia määräytyy kohteen tuotannollisesta tärkeydestä, vauriokustannuksista, vikaantumistavoista sekä vikaantumisen seurantomahdollisuuksista ja laitteiden odotetusta eliniästä. Kunnonvalvontakohteita voi olla esimerkiksi laitteiston tai järjestelmän toimintakunto, turvalaitteisto tai sähkön laatu. Kunnonvalvonnalla kerättyjen tietojen avulla voidaan tarkasti tehdä laitteen kunnonseurantaa sekä sitä voidaan käyttää tulevien huoltotarpeiden tai korjausten suunnittelussa. Pyrkimällä tehokkaaseen ja järjestelmälliseen kunnonvalvontaan sekä huolellisesti tehtäviin kunnossapidontoimenpiteisiin on mahdollista pitää laitteet toimintakuntoisina mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti. Kunnollisella kunnonvalvonnalla pystytään myös parantamaan laitteiden käyttövarmuutta. (Mäkelä, 2017, s. 51.)

4.4 Sähköasema

Sähkön jakeluverkossa olevalla sähköasemalla tarkoitetaan jakeluverkon kohtaa, jossa jaetaan sähköä eri johdoille, muunnetaan jännitettä ja suoritetaan kytkentöjä. Sähköasemat sisältävät muuntajia sekä erilaisia laitteita ja kojeita, jotka tyypillisesti hankitaan tehdasvalmisteisina valmiina kojeistona. Nämä kojeistot sisältävät katkaisijat, erottimet, mittamuuntajat, suojareleet ja pienjänniteverkossa suojavarokkeet. (Suutarinen, 2022, s. 14.)

Teollisuuden sähköasemaa pidetään yleensä rajapintana sähkönjakelun vastualueisiin jakeluverkon haltian ja loppukäyttäjän välillä. Sähköasemalla loppukäyttäjällä oleva tehtaan sisäinen sähköverkko liitetään jakeluverkkoon. Sähköasemalla olevien kytkinlaitteilla suoritetaan kytkennälliset toimenpiteet, joita ovat virtapiirien kytkeminen ja erottaminen. Kytkinlaitteita on erilaisia ja siksi niiden ominaisuudet määrittelevät sen, millaisia ja missä olosuhteissa kytkentätoimenpiteitä voidaan suorittaa. (Suutarinen, 2022, s. 14.)

Sähköasemalla kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteista muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan kojeistoksi. Kojektorakenteet jaetaan kojeiston nimellijännitteen mukaan suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. Alle 1000 V kojeis-

toa kutsutaan usein jakokeskukseksi. Kojeistot voidaan jakaa ulko- tai sisätiloihin soveltuviksi. Kojeistot voivat myös olla avorakenteisia tai koteloituja sekä niissä voidaan käyttää eristeenä ilman sijasta kaasua. (Kuusisto, 2017, s. 7.)

4.5 Keskukset

4.5.1 Jakokeskukset

Jakokeskukset, joita kutsutaan myös sähkökeskuksiksi ovat pienjännitesähkön-jakeluverkoissa käytössä olevia haaroituspisteitä. Keskuksien avulla mahdollistetaan muiden eri sähkölaitteiden liittyminen sähköverkkoon. Jakokeskukset sisältävät erilaisia komponentteja, joita ovat esimerkiksi keskukseseen liitettyjen laitteiden kaapeloinnin suoja- ja ohjauslaitteet. Keskukset pyritään pääsääntöisesti sijoittamaan rakennuksissa aina erillisiin tiloihin, jotka ovat tehty vain sähköverkon laitteille. Vanhoissa teollisuuslaitoksissa vielä kuitenkin usein näkee keskuk- sia sijaitsevan yleisissä tuotantotiloissa. (Riikonen, 2023, s. 32.)

Pääkeskus on sähkökeskus, jonka sähkönsyöttö tulee suoraan jakelumuuntajal- ta. Pääkeskus syöttää usein sähköä eri alakeskuksiin, joita on sijoitettu eri puolil- le teollisuuslaitosta. Sähkökeskuksia voidaan nimetä myös erilaisten käyttötar- koitusten mukaan, joita voi olla esimerkiksi moottori-, hälytys-, ja ohjauskeskuk- set. Keskukset valmistetaan lähes poikkeuksetta muovista tai metallista. Kes- kusten tulee kestää eri käyttöpaikkojen ympäristöolosuhteista ja niiden on oltava sähköturvallisuuden kannalta asianmukaisesti suojattuja. Jakokeskusstandar- dissa SFS-EN 61439-1 otetaan kantaa keskuksille asetettuihin vaatimuksiin. (Riikonen, 2023, s. 32–33.)

4.5.2 Kennokeskukset

Kennokeskus on teollisuudessa käytössä oleva yleinen keskustyyppi (kuva 8). Kennokeskuksia on sähkönjakelussa käytössä pää-, ala- ja ryhmäkeskuksina, moottorikeskuksina sekä mainittujen keskusten yhdistelminä. Kennokeskukset asennetaan seinään kiinnitettynä tai lattialle seisovana ja ne valmistetaan teräk- sestä. Keskukset ovat kotelointiluokaltaan tyypillisesti IP20 tai IP30 suojattuja. Markkinoilta on saatavilla myös IP55 kotelointiluokan omaavia keskuksia vaati- vimpiin käyttöolosuhteisiin. Suuria kennokeskuksia on mahdollista tilata tietyn kokoisina osina niin että ne kasataan kokoon vasta keskukselle suunnitellulla paikalla. Välillä keskus joudutaan asentamaan ahtaaseen tilaan ja keskuksen saamiseksi kohteeseen ei ole muuta vaihtoehtoa kuin tilata se osissa. Ken- nokeskuksia saa tilattua eri jännitetasoille, joita ovat esimerkiksi 400, 500 ja 690

V. Keskuksien nimellisvirrat voivat nousta jopa tuhansiin ampeereihin. (Riikonen, 2023, s. 33.)

Kennokeskuksen sisäinen sähköjakelu toteutetaan alumiinista tai kuparista valmistettujen virtakiskojen avulla, niin että pääkytkimen syöttö liitetään vaakasuuntaiseen kokoomakiskostoon, joka sijoitetaan kotelon ylä- tai alaosaan. Kokoomakiskostossa pystysuunnassa olevien haaroituskiskojen avulla mahdollistetaan kenttien eri kennojen kytkeytyminen sähkönsyöttöön. Kennokeskuksien kennoja on saatavilla kiinteinä tai ulosvedettävänä malleina. Ulosvedettävän mallin etuna on kunnossapitotöiden helpottuvuus, kun kenno pystytään turvallisesti irrottamaan keskuksesta huoltotoimenpiteiden ajaksi. (Riikonen, 2023, s. 34.)



Kuva 8. N400 Kennokeskus (UTU, 2022).

4.5.3 Kotelokeskukset

Kotelokeskukset koostuvat toisiinsa liitetyistä kotelosta, jotka ovat valmistettu metallista tai muovista (kuva 9). Kotelokeskuksia käytetään usein tuotantotiloissa sähköverkon ryhmä- tai alakeskuksina. Keskuksset kuuluvat yleensä IP44 kotelointiluokkaan, mutta markkinoilta saa myös IP65 luokituksella olevia keskuksia vaativiin olosuhteisiin. Kotelokeskukset asennetaan tyypillisesti suoraan seinälle tai kannattelevaan telineeseen, joka on tehty keskukselle. Kotelokeskusten nimellisvirrat ovat huomattavasti pienempiä kuin kennokeskuksien. Kotelokeskuksessa käytetään usein pääkytkimenä kuormakytkintä ja tyypillisesti keskuksen sisäinen sähköjakelu toteutetaan keskuksen alaosassa sijaitsevan vaakasuunnassa olevan kokoomakiskoston avulla. Kokoomakiskostosta sähkönjakelu kotelolle toteutetaan johtimilla. (Riikonen, 2023, s. 34.)



Kuva 9. AHMA-kotelokeskus (UTU, 2022).

4.5.4 Muut keskustyyppit

Teollisuudessa käytetään sähkönjakelussa monia muitakin keskustyypppejä. Kuitenkin aiemmin esitellyt kenno- ja kotelokeskukset soveltuvat parhaiten erilaisiin moottorilähtöihin. Teollisuudessa lisäksi käytössä olevia keskustyypppejä ovat muun muassa:

- kaappikeskus
- kytkentäkaappi tai -kotelo
- pistorasia- tai työmaakeskus

Kaappikeskukset soveltuvat parhaiten sähköisten toimilaitelähtöjen sekä automaatiojärjestelmien komponenttien (prosessiasemat, IO-kehikot) kotelointiin. Kaappikeskukset sijoitetaan niissä olevien tärkeiden komponenttien vuoksi sähkötiloihin. Keskus on rakenteeltaan yleensä lattialla seisova. Kytchentäkaapit -ja kotelot varustetaan ovilla ja niiden sisällä on taustalevyyn kiinnitetyt asennuskiskot ja kaapelikourut. Koteloida voidaan valmistaa teräslevystä, lasikuidusta ja muovista sekä lisäksi koteloida on IP-luokituksestaan saatavilla myös vaativimpiin asennuspaikkoihin. Kytchentäkaappeja on käytössä puolestaan erilaisissa ohjauksissa, sähköpneumatiikan asennuksissa sekä instrumentointikaapeloinnin riviliitinkoteloina. Pistorasiakeskukset ovat keskuksia, joissa on pelkästään pistorasioita. Pistorasiakeskuksia on käytössä tuotantotiloissa ja niitä käytetään huolto- ja korjaustoimenpiteissä. Keskuksen pistorasialähdöt voivat olla 1 -tai 3-vaiheisia ja keskuksia on saatavilla monilla eri nimellisvirroilla. (Riikonen, 2023, s. 35–36.)

4.6 Kiskosto

Virtakiskoja voidaan käyttää useaan erilaiseen tarpeeseen. Kiskostojen käyttötarkoitus vaihtelee keskusvalmistajan ja keskuksen tarpeiden mukaan. Mikäli sähkökeskuksessa käytetään vain kahta kenttää tai sen virrankestoisuus on alle 400 A, on helpompaa käyttää pelkästään haaroittamista ja virran jakamista pyöröjohdinkaapeleilla eri jännitelähdöille, koska kiskojen toteuttaminen on työläämpää. Mikäli taas keskuksessa on suurempia lähtöjä ja keskuksen kentän koko nousee suuremmaksi, on silloin järkevämpää rakentaa virtakiskosto järjestelmän edullisuuden sekä tilansäästämisen vuoksi. (Markkanen, 2023, s. 2.)

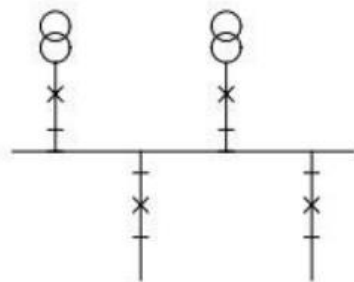
Nykyaikana Suomessa olevien rakennusten keskuksen valmistuksessa käytetään alumiinista tai kuparista tehtyä kiskostoa. Kiskoston materiaali riippuu virtankestoisuuden tarpeesta keskuksessa sekä lähtöjen lukumäärästä. Aikaisemmin enemmän käytetty kuparista tehty pyörökisko, on poistunut kokonaan käytöstä. (Markkanen, 2023, s. 2.)

Virtakiskoja käytetään esimerkiksi:

- syöttämään keskusta toiselta keskukselta
- lähtöihin keskukselta muille keskuksille
- johtojen haaroituksena
- kuljetuskatkojen tekemiseen keskuksen kenttien välille
- komponenttien asentamiseen kiskoston päälle.

4.6.1 Yksikiskojärjestelmä

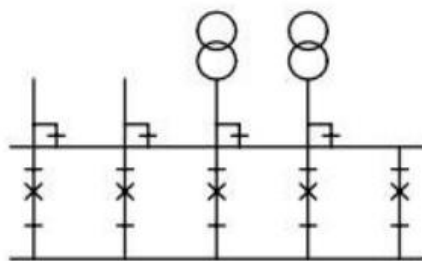
Yksikiskojärjestelmä on edullinen toteuttaa sekä rakenteeltaan yksinkertainen (kuva 10). Järjestelmä on myös helppo suojata. Mikäli kojeistossa tapahtuu jokin vaurio, aiheuttaa se aina sähkönjakeluun keskeytyksen. Keskeytyksen huolto- ja korjaustyöt tulee aina suorittaa niin että järjestelmä on kytketty verkosta irti. (Suutarinen, 2022, s. 14.)



Kuva 10. Yksikiskojärjestelmä (Suutarinen, 2022, s. 15).

4.6.2 Apukiskojärjestelmä

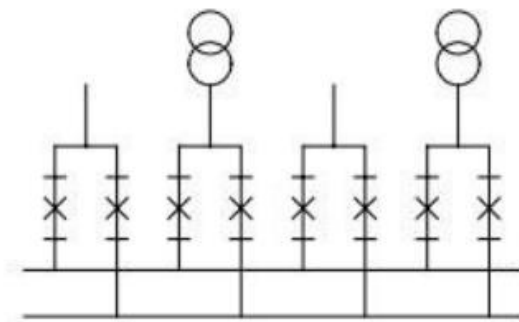
Apukiskojärjestelmä verrattuna yksikiskojärjestelmään on toiminnaltaan luotettavampi. Apukiskolla voidaan kytkeä ohi apukiskojärjestelmän katkaisijat, jonka ansiosta huolto- ja korjaustyöt katkaisijoilla on mahdollista tehdä ilman häiriöitä (kuva 11). Mikäli vika kuitenkin on pää- tai apukiskostossa aiheuttaa se keskeytyksen sähköjakelussa. Suojaukset kiskostossa on mietittävä myös poikkeavia tilanteita varten. (Suutarinen, 2022, s. 15.)



Kuva 11. Apukiskojärjestelmä (Suutarinen 2022, s. 15).

4.6.3 Kaksoiskatkaisijajärjestelmä

Verrattuna muihin järjestelmiin, on kaksoiskatkaisijajärjestelmä niistä luotettavin (kuva 12). Järjestelmässä voidaan huoltaa tai korjata kiskostoja tai katkaisijoita ilman että toimenpiteistä aiheutuu häiriöitä sähköjakeluun. Katkaisijat ja kiskostot on mahdollista saada jännitteettömäksi käytön aikana huolto- ja korjaustoimenpiteitä varten. Järjestelmän haittapuolena on kalliit rakennuskustannukset sekä hankalat suojausjärjestelmät. (Suutarinen, 2022, s. 15.)



Kuva 12. Kaksoiskatkaisijajärjestelmä (Suutarinen, 2022, s. 16).

4.7 Muuntajat

Muuntaja on sähkömagneettiseen induktioon perustuva sähkölaite, jonka tehtävänä on muuntaa vaihtojännite- ja virta toiselle jännitetasolle. Teollisuusverkkoon on kytketty usein monia eri muuntajia, joista yleisimpiä ovat generaattorimuuntaja, päämuuntajat ja jakelu- eli tehomuuntajat. Teollisuusverkoissa päämuuntajien avulla muunnetaan siirtoverkon jännite jakelujännitteen suuruiseksi, kun taas generaattorimuuntajilla sähkön tuottoon tarkoitettut generaattorit liitetään suoraan yleensä 110 kV verkkoon. Jakelujännite saadaan muunnettua kulutuslaitteille sopivaksi jakelumuuntajien avulla. Muuntajien muuntosuhdetta on mahdollista muuttaa väliottokytkimen avulla, silloin kun muuntaja on jännitteetön. Jännitteellisenä muuntosuhteen muuttaminen toteutetaan käämikytkimen avulla. Muuntosuhteiden säätöön tarkoitettu laite on yleisesti pää- ja generaattorimuuntajissa käämikytkin ja jakelumuuntajissa väliottokytkin. (Mäkelä, 2017, s. 51.)

Teollisuudessa muuntajat ovat lähes poikkeuksetta aina öljyeristeisiä, joka tarkoittaa sitä, että muuntajassa sisällä olevaa öljyä käytetään sähköisenä eristeenä, eristyspaperin impregnointiaineena sekä häviölämmön johtimena. Muuntajan öljyssä olevat eri ominaisuudet muuttuvat ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Muuttuminen johtuu siitä, että öljy on aina alttiina kosteudelle, lämpötilan muutoksille sekä sähköisille ilmiöille. Ajan saatossa öljyyn muodostuu saostumia, epäpuhtauksia, vettä sekä happamia yhdisteitä. Teollisuuslaitoksissa on joitain paikkoja, jossa ei paloturvallisuusriskien vuoksi ole mahdollista käyttää öljyeristeisiä muuntajia. Tällöin ainoa vaihtoehto on käyttää kuivamuuntajia. (Mäkelä, 2017, s. 16.)

Muuntajia varustetaan niiden käyttöä ja seuranta varten erilaisilla suojakomponenteilla. Komponenttien avulla suojataan muuntajan öljyä kosteudelta ja lial-

ta sekä samalla tarkkaillaan muuntajan öljyn ja käämityksen lämpötiloja. Muuntajille tärkeitä varusteita ja suojakomponentteja ovat:

- sulkuventtiili
- kaasurele
- paisuntasäiliö
- ilmankuivain
- ylipaineventtiili
- öljynkorkeuden osoitin
- lämpömittarit
- käämin lämpötilan kuvaaja

Tehomuuntajia suojataan myös sähköisellä relesuojauksella. Suojaukseen ja sen toteutustapaan vaikuttavat jännite, nimellisteho ja muuntajan käyttötarkoitus. Sähköinen tehomuuntajien relesuojaus sisältää tyypillisesti seuraavia osia:

- ylivirtasuojaus
- maasulkusuojaus
- käämisulkusuojaus ja kierrossulkusuojaus
- käämikytkinsuojaus
- ylijännitesuojaus
- ylikuormitussuojaus

Muuntajien tulee toimia luotettavasti ja niiden huoltoja ja korjausta vaativia vikoja tulisi ennakoida. Ennakoiminen on mahdollista tehdä käytönaikaisella kunnonvalvonnalla, joka jaetaan eri tarkastuksiin ja mittauksiin. Muuntajista saatavilla olevien tilastotietojen avulla, voidaan huomata käämityksien eri vaurioiden aiheuttavan suuren osan muuntajien vioista. Tällöin käämitysten kunnonseurannan tärkeys nousee korkeammalle. (Mäkelä, 2017, s. 52–53.)

Muuntajille tehtävä kunnonvalvonta ja -seuranta jaetaan määräaikaistarkastuksiin, muuntajan öljyn tehtäviin analyysiin sekä kiinteiden eristeiden tutkimuksiin ja mittauksiin. Kunnonseurannasta tehdään pitkällä aikavälillä, jolloin kunnonseurannasta syntyy tuloksena kehitystrendi, joka auttaa muodostamaan kokonaiskuvan muuntajan tilasta. Muuntajille suoritetaan tiettyihin määräaikoihin perustuvia huoltotoimenpiteitä kunnonvalvontatoimenpiteiden lisäksi. Huoltotoimenpiteillä pyritään ennaltaehkäisemään muuntajien vikaantumista. Muuntajista huolletaan ja tarkastetaan määräajoin muuntajan tärkeimmät toimi- ja suojalaitteet. (Mäkelä, 2017, s. 53.)

4.8 Katkaisijat

Sähkönjakeluverkoissa tarvitaan laitteita, joilla voidaan avata tai sulkea virtapiirejä. Näitä laitteita kutsutaan katkaisijoiksi. Markkinoilta on saatavilla käsiohjattuja tai täysin automaattisia katkaisijoita. Tyypillinen automatisoitu katkaisijatoiminto aktivoituu ylivirran vaikutuksesta, kun samaan virtapiiriin kytketty rele lähettää katkaisijalle käskyn avautua. Katkaisijoiden etuna on oikosulkupiirin avaaminen ja sulkeminen vaurioitumatta vaikka virta on moninkertainen katkaisijan nimellisvirtaan verrattuna. Normaaleista kytkimistä ei löydy tällaista ominaisuutta, sillä kytkimet pystyvät katkaisemaan vain oman nimellisvirtansa mukaisen virran. (Mäkelä, 2017, s. 54.)

Katkaisijat ovat tärkeä osa teollisuuden sähköverkkojen laitteistoa, ja tämän takia katkaisijoille tehtäviin huolto- ja tarkastustoimenpiteisiin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Katkaisijassa sijaitsevassa katkaisukammiossa käytetään eri väliaineita, joiden avulla katkaisijat voidaan jakaa eri ryhmiin. Tyypillisiä katkaisijatyyppejä ovat:

- ilmakatkaisijat
- öljykatkaisijat
- vähäöljykatkaisijat
- paineilmakatkaisijat
- kaasukatkaisijat
- tyhjiökatkaisijat

Katkaisijoita tulisi huoltaa tietyin väliajoin. Katkaisijoiden huoltovälien pituus riippuu katkaisijan rakenteesta, katkaistavan tehon määrästä, virran laadusta, katkaisijoiden toimintamäärästä sekä vallitsevasta käyttö- ja asennusolosuhteista. Katkaisijat kulumat käytössä mekaanisesti sekä sähköisesti. Lisäksi kulumista on myös katkaisijoiden vanheneminen ja väsyminen. Kulumisen katkaisijoissa voidaan jakaa näihin neljään eri pääluokkaan. (Mäkelä, 2017, s. 54–55.)

Teollisuudessa on useita eri katkaisijoita, joille täytyy tehdä tarkastuksia. Katkaisijoille tehtävä tyypillisin tarkastus on silmämääräinen tarkastus, joka suoritetaan samalla koko sähkölaitteistoille. Tarkastuksen avulla halutaan varmistua laitteiston toiminnasta, toimintaedellytyksien täytymisestä sekä lisäksi laitteiston puhtaudesta ja eheydestä. Silmämääräisen tarkastuksen aikana laitteiden eri indikoinnit ja toimintalaskurien lukemat tarkastetaan. Tehtäessä tarkastuskierroksia, olisi suositeltavaa tehdä erinäisiä toimintakokeita katkaisijoille. Katkaisijoille voidaan tehdä erilaisia mittauksia silmämääräisen tarkastuksen lisäksi. Tehtävillä mittauksilla voidaan selvittää katkaisijan kuntoa ja määrittelämään akuutit huolto- ja korjaustarpeet. Katkaisijoiden huoltoväliä voidaan pidentää ja maksimoida

oikein tehdyillä mittauksilla. Teollisuudessa käytössä olevien eri katkaisijoiden huoltoväli on keskimäärin viisi vuotta, jonka jälkeen katkaisijoille tehdään ohjainlaitehuolto. Katkaisijoille tehdään näiden lisäksi avaava huolto, niiden eliniän ollessa puolivälissä. (Mäkelä, 2017, s. 55.)

4.9 Relesuojaus

Sähkönjakeluverkkoihin rakennetaan suojausjärjestelmä, jonka tehtävänä on ohjata lähimpänä vikaa oleva katkaisija auki. Suojarele on laite, jonka tehtävänä on antaa ohjausimpulssi katkaisijalle, kun verkkoon ilmenee vika tai häiriö. Suojarele on mahdollista kytkeä myös suoraan sähköverkon päävirtapiiriin primääri-releen avulla. Toisioreleiksi kutsutaan releitä, jotka on kytketty päävirtapiiriin mittamuuntajan avulla. Sähköverkon relesuojaus on rakennettava selektiiviseksi siten, että vika tilanteen käynnistäessä mahdollisimman pieni osa laitoksen sähköverkosta joutuu pois käytöstä. Sähköverkon suojaus on myös toimittava niin nopeasti, että verkolle aiheutuvat vauriot saadaan minimoitua mahdollisimman pieniksi. Edellä mainittujen ehtojen lisäksi releillä toteuttavan suojaus on suojattava koko sähköjärjestelmää ja sen tulee olla yksinkertainen ja käyttövarma. Relesuojaus on pystyttävä myös käytön aikana koestamaan tarkastuksia varten. (Mäkelä, 2017, s. 56.)

Suojareleen toiminta perustuu siihen, että rele tarkkailee suureita, ja kun releen tarkkailema suure ylittää tai alittaa releelle annetun havahtumisarvon se alkaa toimia. Releille asetetaan tietty toiminta-aika, jonka jälkeen rele lähettää katkaisijalle toimintatiedon. Suojareleiden rakenne koostuu tyypillisesti releen havahtumiselimestä, mittaelimestä, aikaelimestä sekä suuntaelimestä. Releitä on saatavilla erilaisilla teknisillä toteutuksilla ja ne voidaan jakaa sen mukaan eri päätyyppeihin, joita on sähkömekaaniset, staattiset ja mikroprosessoriohjatut suojarleet. (Mäkelä, 2017, s. 56.)

Releet jaetaan tärkeimpiin suojarelalajeihin mitattavan suureen mukaisesti. Tärkeimpiä ja käytetyimpiä reletyyppejä ovat:

- virtareleet
- taajuusreleet
- tehoreleet
- jännitereleet
- epäsymmetriareleet
- vertoreleet
- ali-impedanssireleet

Oikosulkusuojina käytetään pääsääntöisesti virtareleitä, joiden vaikuttava suure on virta mittauspisteessä. Jännitereleiden avulla voidaan suojata sähköverkkoa ylijännitteiltä ja alijännitteiltä, ja niitä käytetään paljon alijännitereleinä sähkömoottoreiden suojauksessa sekä ylijännitereleinä käynnistettäessä tahti-generaattoreita. Taajuusreleiden avulla voidaan tarkkailla ja reagoida verkon taajuuden liiallisiin nousuihin ja laskuihin. Rele reagoi, kun verkon taajuus ylittää tai alittaa asetetun arvon. Releitä käytetään sähköntuotantolaitoksien ja generaattoreiden suojauksessa ja niitä voidaan käyttää myös erilaisten sähköverkon kuormitusten irti- ja takaisinkytkentätilanteissa. Tehoreleet mittaavat sähköverkon suuruuksia ja virtaussuuntia, kun taas epäsymmetriareleillä pystytään mittaamaan virta- ja jännite-epäsymmetrioita. Verkon eri kohdissa olevia virtoja tai tehoja on mahdollista mitata vertoreleillä. Sähköverkoissa käytössä oleva tunnetuin vertoreletyyppi on differentiaali- eli erovirtarele. Releen ja sähköverkon vikapaikan välillä olevaa impedanssia mitataan ali-impedanssireleillä virran sekä jännitteen avulla. Tärkein suojarere, joka hyödyntää toiminnassa ali-impedanssirelettä on distanssirele, jonka avulla voidaan määrittämään vikapaikan etäisyys impedanssimittauksen avulla. (Mäkelä, 2017, s. 56–57.)

Teollisuudessa käytössä oleville suojarereille tulee tehdä määrävälein relekoestukset sekä kokonaan uusiksi tehdyille lähdoille käyttöönotto-koestukset. Käyttöönotto tulee suorittaa oikealla tavalla ja tämän jälkeen suojarereiden kuntoa tulee seurata suunnitelmallisesti. Relesuojaukselle suoritetaan määräajoin tehtäviä tarkastuksia ja suojauksen toimivuutta tarkastellaan osana käyttötoimintaa. Jokainen suojauksessa esiintyvä vika tulee korjata ja selvittää vian aiheuttaja mahdollisimman tarkasti. Myös verkossa tapahtuville häiriöille voidaan suorittaa eri syy- ja tapahtumaselvityksiä. Edellä mainittujen tarkastusten lisäksi, relesuojaukselle suoritetaan silmämääräisiä tarkastuksia, joissa huomio tulisi kiinnittää mekaanisten vaurioiden, hapettumisen tai syöpymisen ilmenemiseen tai epäpuhtauksien kuten pölyn kerääntymiseen. Teollisuuslaitoksissa tehtyjen tarkastuksien puutteet ja havainnot kirjataan tyypillisesti laitoksessa käytössä olevaan kunnossapito -järjestelmään. Kirjaamisen lisäksi puutteista ja vioista luodaan uudet vikailmoitukset ja työmääräykset. (Mäkelä, 2017, s. 57.)

Suojareleille tulee suorittaa kunnan ja toiminnan tarkastus enintään kolmen vuoden välein. Releiden toimivuus todetaan relekoestuksen avulla. Koestuksessa jokainen rele testataan ensiö-, toisio-, valehäiriökoestuksella tai irrottavalla koestuksella. Ensiökoestusta tehdessä releen liittimiin syötetään koestusvirtaa sekä koestusjännitettä. Järjestelmän toimivuus tarkastetaan aina katkaisijan toimintaan asti. Toisiokoestusta tehdessä mittamuuntajasta erotetaan toisiopiirit ja niihin syötetään koestusjännite ja -virta. Suojauksen toimivuus tarkastetaan tässäkin tilanteessa katkaisijan toimintaan asti. Mikäli käyttötekniiset haitat katkaisijan toiminnassa on merkittäviä, voidaan myös mitata laukaisupiirin tilanne.

Valehäiriökoestus puolestaan perustuu tarkoituksella tehtyyn ensiöpuolen viikaan, jonka avulla voidaan todeta relesuojauksen toiminta vikatilanteessa. Irrrotavassa relekoestuksessa suojarele kytketään irti suojausvirtapiiristä ja kytketään erillään olevaan relekoestuslaitteistoon. Koestuslaitteiston koestusarvoilla voidaan mitata releen toiminta-arvot sekä toiminta-ajat. Edellä mainituista releen koestustavoista, luotettavin on ensiökoestus. Ensiökoestus on suojauksista luotettavin, sillä siihen sisältyy jokainen virtapiirissä mukana oleva laite. Ensiökoestus kuitenkin jää teollisuusverkoissa usein teknisistä- ja turvallisuussyistä tekemättä sillä koestuksen aiheuttamat käyttötekniiset haitat ovat usein suuria. (Mäkelä, 2017, s. 58.)

4.10 Loistehon kompensoinnin laitteet

Sähköverkossa esiintyvä loisteho aiheuttaa verkolle erilaisia ylimääräisiä häviöitä ja se vaikuttaa myös verkon jännitetaso. Loistehoa ei ole järkevää siirtää pitkiä matkoja koska loistehon siirtohäviöt ovat suuria verrattuna pätötehon häviöihin. Loistehoa tulisi tuottaa ja käyttää niin lähellä sen kulutus- tai tuotantopistettä kuin mahdollista. Loistehotasapainoa voidaan hallita ja ylläpitää käyttämällä generaattorien magnetoinnin säätöä, eri muuntajien muuntosuhteiden säätöä tai käyttämällä kondensaattoreita ja reaktoreita. (Mäkelä, 2017, s. 55.)

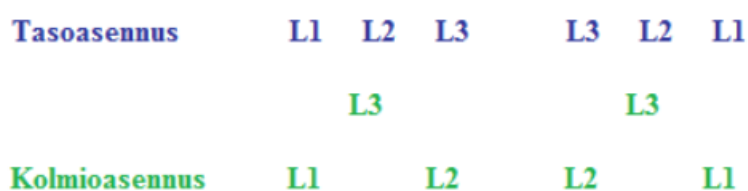
Jakeluverkon loistehon kompensoinnissa käytetään pääsääntöisesti rinnakkaiskondensaattoriparistoja tahtigeneraattoreilla suoritettuna kompensoinnin lisäksi. Suurjännitekondensaattoriparisto on yli 660 voltin nimellisjännitteellä toimiva paristo, joka koostuu useasta rinnan sekä sarjaan kytketystä kondensaattoriyksiköstä. Sarjaan kytkettyjen yksiköiden lukumäärä riippuu sähköverkon nimellisjännitteestä sekä kondensaattoriyksikön nimellisjännitteestä. Rinnankytkettyjen yksiköiden lukumäärä riippuu puolestaan pariston tehomäärästä. Yliaaltopitoisten sähköverkkojen resonanssia voidaan ehkäistä varustamalla kondensaattorit estokeloilla. Kondensaattoriparistot tulee mitoittaa niin että ne kestävät 1,3-kertaista nimellisvirtaa jatkuvasti ilman lämpenemistä. (Mäkelä, 2017, s. 55.)

Teollisuudessa käytössä oleville kompensointilaitteistoille tulee suorittaa kunnonvalvontaa samalla tavalla kuin verkon muille sähkölaitteille. Silmäääräisen tarkastuksen avulla tarkastetaan laitteistossa olevat ulkoisesti näkyvät vauriot. Laitteiston tarkastus- ja huoltotoimet suoritetaan valmistajalta saatavien ohjeistuksen mukaisesti. Kompensointilaitteistoille olisi myös suotavaa suorittaa lämpökamerakuvauksia ennen kuin ryhdytään kunnolla huoltotoimenpiteisiin. (Mäkelä, 2017, s. 56.)

4.11 Suurvirtakaapelit

Teollisuuden sähköverkoissa on usein suuria virtoja, jonka takia sähköjakelussa tulee käyttää yksijohtimisia suurvirtakaapeleita. Suurvirtakaapeleita on saatavilla useille eri jännitetasoille sekä johdinpoikkipinnoille ja niitä valmistetaan joko kuparista tai alumiinista. (Lyytikäinen, 2011, s. 35.)

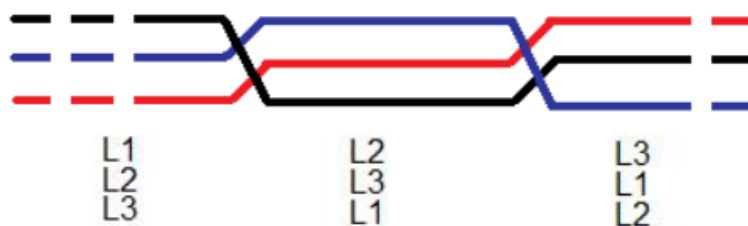
Yksijohdinkaapeleita käytettäessä pyritään pääsemään mahdollisimman tasaiseen virranjakoon. Tästä syystä kaapeleiden asentamisessa käytetään samantaisia ja samanpituisia kaapeleita. Suurvirtakaapelit asennetaan tasoasennuksena rinnakkain, jolloin kaapelit kulkevat tasolla rinnakkain ja kaapeleiden väleissä on ilmarako. Kaapelit voidaan asentaa myös kolmion muotoon kaapeleiden päistä katsottuna (kuva 13). Yksijohdinkaapelin haaroitusta tehdessä tulee haaroitettavan vaiheen jokainen johdin kytkeä yhteen haaroituskohdassa. Johtimien lämpeneminen pyritään saavuttamaan mahdollisimman tasaisesti niin että osajohtimesta mitattu virta ei saa poiketa vaiheen osajohtimen virtojen keskiarvosta $\pm 10\%$ enempää. Tämä poikkeama on kyettävä todistamaan myös erillisellä mittauksella. Rinnankytketyt kaapelit ovat asennusvaihtoehtona, silloin kun yksijohdinkaapeleita ei ole mahdollista käyttää. Rinnankytkettyjä kaapeleita käyttäessä on käytettävä aina samaa kaapelilajia, jotta verkon virranjako saadaan pidettyä tasaisena. Monijohdin kaapeleita on mahdollista käyttää myös yksivaihekaapelina, tällöin kuitenkin suoja-, PEN- ja nollajohtimet tulee asentaa erillisinä kaapeleina. Tällaisessa tilanteessa suojajohtimen maadoituksen ja yhdistyksen saa suorittaa vain kaapelin toisessa päässä. (Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto, 2009, s. 224–225.)



Kuva 13. Yksijohdinkaapelien asennustavat esitettynä (Lyytikäinen, 2011, s. 35).

Vaihtovirtakäytössä olevien yksijohtimisten kaapeleiden metallivaippoihin indusoituu jännitteitä, jonka takia kaapeleiden metallivaipat tulee liittää yhteen ja lisäksi maadoittaa kaapelin molemmissa päissä. Metallivaippoihin indusoituvaa jännitettä on suoraan verrannollinen taajuuteen, virtaan ja eri johdin- ja vaippapariin välisiin keskinäisinduktansseihin, jotka kulkevat kaapelissa. Metallivaippojen yhdistämisellä kaapelin päissä ja jatkoksissa, saa indusoituneet jännitteet aikaan metallivaipoissa tasausvirtoja, joka synnyttää häviöitä lisää ja kasvattaa kaapelin lämpenemistä sekä pienentää kuormitettavuutta. Indusoitunut jännitteen suuruus on verrannollinen kaapelin pituuteen. Vaihejohdinten vuorotteluperiaatetta

voidaan käyttää, kun kyseessä on pitkä yksijohdinkaapelointi (kuva 14). (Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto, 2009, s. 224–225.)



Kuva 14. Voimajohtojen vuorottelun periaate (Lyytikäinen, 2011, s. 36).

5 SÄHKÖVERKON SUOJAUSRAKENTEET

Suomessa sähköturvallisuuslaki 1135/2016 velvoittaa että sähköverkossa sijaitsevat sähkölaitteistot ja -laitteet on rakennettava, valmistettava, suunniteltava ja korjattava sekä niitä tulee huoltaa ja käyttää niille määrätyn käyttötarkoituksen mukaisesti, niin että laitteistosta tai laitteista ei aiheudu terveydelle hengelle tai omaisuudelle mitään vaaraa. Sähkölaitteisto ei myöskään saa häiriintyä sähköisesti tai sähkömagneettisesti eikä niistä saa aiheutua kohtuutonta häiriötä sähköisesti tai sähkömagneettisesti. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, 1 luku § 6 mom.)

Sähköasennusten perusvaatimuksena suojauksessa on vikasuojauksen ja ylivirtasuojauksen toteutumisen varmistaminen laskelmien avulla tai muulla tavoin, jolla toteutuminen voidaan todentaa. Taloudellisesta näkökulmasta edullisinta on varmistaa suojausten toiminta jo niiden suunnitteluvaiheessa. Sähkölaitteistojen suojausmenetelminä voidaan käyttää kosketussuojausta jännitteisissä osissa, rajoittamalla virtaa vaarattoman pieneksi tai katkaisemalla virtapiiri vian sattessa.

5.1 Sulakesuojaus

Teollisuuden pienjännitejakeluverkoissa käytetään yleisimmin oikosulku- ja ylikuormitussuojana sulaketta. Sulakkeen rakenne koostuu metallilangasta- tai liuskasta, joka sijaitsee sulakkeen sisällä. Ylikuormitustilanteessa sulakkeen sisällä oleva lanka tai liuska katkeaa, jolloin virransyöttö verkkoon loppuu. Tämän vuoksi sulakkeet ovat kertakäyttöisiä. Sulakkeisiin merkitään niiden nimellisvirta ja -jännite sekä käyttöluokka ja katkaisualue. Kahvasulakkeisiin merkitään myös niiden rakennekokoluokka. (Riikonen, 2023, s. 55–56.)

Sulakkeiden etuna on hyvä ylikuormitus- ja oikosulkuvirran rajoituskyky. Rajoituskyvyllä voidaan vähentää huomattavasti vikatilanteista syntyviä vahinkoja. Sulakkeen kyky rajoittaa virtaa perustuu sulakkeen sisällä sijaitsevan väliaineen kykyyn jäähdyttää ylivirrasta aiheutuvaa höyrypatsasta sulakelangasta niin että valokaara ei synny. Resistanssi höyrypatsaassa pysyy vikatilanteessa suurena, joka rajoittaa virtaa niin että se lopulta katkeaa. (Riikonen, 2023, s. 55–56.)

Tulppa- ja kahvasulakkeita käytetään pienjänniteasennuksissa. Sulakkeet tunnetaan myös Diazed (D-tyyppi) ja NH-sulakkeina. Tulppasulakkeiden katkaisukyky on määritelty standardissa niin että sen tulee olla vähintään 50 kA. Kahvasulakkeilla puolestaan on suuri katkaisukykyvirta välillä 50–150 kA. Katkaisuvirta on oikosulkuvirran suurin tehollisarvo, jonka sulake pystyy kytkemään pois luotettavasti. Kahvasulakkeiden ominaisuuksiin kuuluu myös erinomaiset virranrajoituskyvyt ja niitä voidaan käyttää rajoittamaan myös oikosulkuvirtoja. (Timlin, 2020, s. 21.)

Erilaiset sulakkeet voidaan jakaa erilaisiin ryhmiin sulakkeen käyttötarkoituksen ja käyttöpaikan perusteella. Sulakkeiden käyttöluokka ilmaistaan eri koodeilla, jotka muodostuvat kirjainyhdistelmistä taulukon 1 mukaan. Sähköverkoissa yleisimmin käytössä oleva sulake tyyppi on gG-sulake, jonka tehtävänä on suojata kohdetta ylikuormalta ja oikosuluilta. gG-sulake soveltuu hyvin keskuksien oikosulkusuojaksi ja niitä on mahdollista käyttää myös kaapeleiden ylikuormitussuojana. Ylikuormitussuojalla pyritään estämään kaapelin liiallinen kuormitus. (Timlin, 2020, s. 22.)

Taulukko 1. Sulakkeiden käyttöluokat (Timlin, 2020, s. 22).

1. kirjain	Kirjaimen selite
g	Kokoaluealuesuoja. Oikosulku- ja ylikuormitusuoja
a	Osa-aluesuoja. Yleensä vain oikosulkusuojaus
2.kirjain	
G	Kaapeli- ja johdinsuoja
M	Moottoriin suoja
R	Puolijohdesuoja
Tr	Muuntajille tarkoitettu sulake

5.2 Relesuojaus

Relesuojaus muodostaa tärkeän osan sähköjakoverkossa, sillä relesuojauksen ansiosta sähköverkko saadaan toimimaan selektiivisesti. Relesuojaus on suojausavusteiden avulla tehty sähköverkon suojaustapa. Suojausavusteiden tarkoitus on

lähettää katkaisijoille kytkentävirike. Releiden suojaustoiminnassa tärkeitä asioita on releiden nopea toiminta ja oikea herkkyys. Rele saa virta- ja jännitetiedot mittamuuntajalta, joka muuttaa sähköverkon arvot suojuareleille sopivan koiseksi. Suojuareleen tehtävänä on lauetta siinä tilanteessa, kun releelle asetetut raja-arvot ja laukaisuviiveet tulevat täyteen. (Niskanen, 2019, s. 8.)

Sähköverkon suojaamiseen on käytetty vuosikymmeniä suojuareleita. Suojuareleitä voi löytää vielä tänäkin päivänä teollisuuslaitoksista käytöstä, jotka on valmistettu viime vuosisadan puolella. Vanhojen suojuareleiden etuna on niiden varmatoimisuus, sillä releet niiden kelaparistonsa avulla, eikä ne siitä syystä tarvitse apusähköä toimiakseen. (Niskanen, 2019, s. 9.)

ABB toi vuonna 1982 ensimmäisen mikroprosessoritekniikkaan perustuvan releen markkinoille. Viimeisten vuosien aikana tekniikan kehittyessä on samalla myös suojuareleet kehittyneet. Osoituksena tästä on esimerkiksi se, että markkinoille on tuotu suojuareleita, jotka sisältävät mikroprosessoritekniikan lisäksi myös älyä. (Niskanen, 2019, s. 10.)

Sähköverkossa suojuareleiden tehtävänä on tarkkailla verkon toimintaa ja reagoida verkossa tapahtuviin häiriöihin ja vikoihin (kuva 16). Pelkästään suojuareleellä ei pysty katkaisemaan sähköverkon virtaa vikatilanteessa, vaan suojuarele tarvitsee toimiakseen rinnalleen katkaisijan, jonka avulla virta saadaan katkaistua vikatilanteessa. Suojuarele tarkkailee ja mittaa verkon suureita mittamuuntajien toisiopuolelta. Suureiden kasvaessa yli tai ali suojuareleille asetettujen arvojen, rele havahtuu. Releen havahtumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa rele havaitsee sen valvomassa sähköverkon kohdassa normaalista poikkeavan tilanteen. Havahtuneessa tilassa suojuareleessä käynnistyy ajan laskeminen ja mikäli aika kuluu yli suojuareleelle määritellyn arvon, lähettää rele katkaisijalle laukaisukäskyn. Laukaisukäskyn lisäksi releen lähettämä hälytystieto voidaan lähettää haluttuun paikkaan esimerkiksi tehtaan valvomoihin. Hälytystiedon avulla on mahdollista erottaa verkon vikaantunut osa pois verkosta. Mikäli verkon vika poistuu ja verkko palautuu takaisin normaalitilaan releen laskiessa aikaa, palautuu se normaalitilaan jatkamaan verkon tarkkailua. Mahdollisen vikapaikan selvittäminen ja erotus muusta verkosta on tärkeää saada tehtyä nopeasti, sillä oiko- ja maasulkuvikaa saada erotettua muusta verkosta, voi tilanteessa olla kohtalokkaat seuraukset ihmisille, eläimille, laitteille tai omaisuudelle. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 335.)



Kuva 16. ABB:n valmistama suojarele (ABB, 2017).

5.2.1 Ylivirtarele

Ylivirtareleillä voidaan suorittaa verkon tärkeiden komponenttien suojaus ylikuormitusta vastaan. Verkon tärkeitä komponentteja ovat esimerkiksi moottorit, generaattorit, kaapelit yms., jotka suojataan integroivalla ylikuormitussuojalla. Releiden toiminta perustuu suojattavan laitteen vaihevirtojen jatkuvaan mittaukseen. Vian syntyessä suojarele hälyttää, ohjaa katkaisijaa tai käynnistää ulkoiset jälleenkytkentätoiminnot, jotka riippuvat suojaustavasta, joka on valittu. Ylivirtarele havahtuu, kun jonkin vaiheen virta ylittää ylivirtaportaalle asellun arvon $I>$. (Lyytikäinen, 2011, s. 46.)

Sähköverkossa olevien pyörivien sähkökoneiden ja muuntajien suojauksessa, tulee käyttää suojaukseen soveltuvia releitä. Osa sähköverkon laitteista kuten eri muuntajat lisäävät verkon impedanssia runsaasti. Sähköverkon osassa, jossa on impedanssia lisääviä laitteita, voidaan suojaamisessa käyttää virtaselektiivisyyttä. Mikäli koneiden suojaus perustuu virtaselektiivisyyteen, täytyy suojauksen toiminta varmistaa aina erillään olevalla varasuojauksella. Käytettäessä virtaselektiivistä suojausta, sopii verkon varasuojasuojalaitteeksi hyvin ylivirtarele. Teollisuuslaitoksissa käytettävän yleisen säteittäisen sähköverkon maasulkusuojaus voidaan ratkaista käyttämällä ylijänniterelettä, joka mittaa nollajännitteitä ja ylivirtarelettä, joka mittaa nollavirtoja tai maasulun sulun suuntarelettä. (Lyytikäinen, 2011, s. 47.)

5.2.2 Vakioaikaylivirtarele

Vakioaikaylivirtarele on toiminta-ajallisesti aseteltava rele, joka saadaan aikaan yhdistämällä ylivirtarele sekä aikarele. Releen käänteisaikaan perustuva toiminta tarkoittaa, että rele toimii sitä nopeammin mitä suurempi on mitattu virta. Releen toiminta ei ole täten riippuvainen ylivirran suuruudesta. Kun releellä mitattu virta ylittää releeseen asetetun arvon, rele havahtuu ja alkaa toimia sen ollessa ha-

vahtuneessa tilassa asetetun ajan verran. Vakioaikaylivirtareleiden avulla voidaan toteuttaa säteittäisiin sähköverkkoihin oikosulkusuojaus. niin että eri releiden toiminta-aikoja porrastetaan. Tällaisessa tilanteessa sähköverkon suojauksesta saadaan luotua selektiivinen. Releiden suojauksen toiminta-aikaa saadaan lyhennettyä käyttämällä lukitusta suojausportaiden välillä, koska suojarelle, joka on havahtunut, lukitsee aikaisemman suojarelleen toiminnan. (Lyytikäinen, 2011, s. 47.)

Sähköverkon selektiivistä suojausta rakentaessa on helpointa käyttää aikaselektiivisyyttä. Aikaselektiivinen suojaus perustuu releiden suojausten toiminta-aikojen porrastukseen, niin että rele, joka on lähimpänä verkon vikakohtaa, toimii ensimmäisenä. Aikaselektiivisen suojauksen toteutus on mahdollista ylivirtareleiden avulla. Ylivirtareleiden tulee toimia vakioaikaisina tai käänteisaikaisina. Aikaselektiiviseen suojaukseen perustuva menetelmä soveltuu parhaiten säteittäisten verkkojen suojaukseen. (Lyytikäinen, 2011, s. 47.)

Käänteisaikaisesti toteutettu suojaustapa soveltuu hyvin myös säteittäisten verkkojen suojaukseen, silloin kun kytkentätilanteiden muutokset aiheuttavat vain pieniä vaihteluita verkon oikosulkuvirtatasoihin tai silloin kun oikosulkuvirtojen väliset erot ovat suuria kaapeleiden päiden välillä. Tällaisissa tilanteissa verkon suojauksen toiminta-aikaa on mahdollista pienentää käyttämällä suurilla vikavirroilla käänteisaikasuojausta verrattuna vakioaikasuojauksen käyttöön. Selektiivinen suojaus on mahdollista toteuttaa helposti myös käänteisaika suojauksena sulakkeiden kanssa. (Lyytikäinen, 2011, s. 47.)

5.2.3 Valokaarirele

Sähköverkon vikatilanteessa valokaarivaurio, joka tapahtuu kojeiston sisällä, on pahin sähkönjakelulle tai sähkökäytölle tapahtuva onnettomuus. Valokaarivaurioista aiheutuu aina suuria aineellisia vahinkoja ja sen lisäksi valokaaresta syntyy suuri vaara sähkölaitteiston käyttö- ja huoltohenkilöille. Valokaaren syntyminen voi johtua ulkoisista tai sisäisistä syistä. Tilanteita, joissa valokaari voi syntyä, on esimerkiksi tapahtuma missä johtavaa materiaali sisältävä esine on joutunut sähkökeskukseen sisälle huoltotöiden aikana tai tilanne, jossa epäpuhtauksia on epäsuotuisissa olosuhteissa kerääntynyt keskuksen tukieristinsiin. Valokaari syntyy tilanteessa, jossa keskuksen käyttöympäristöön syntyneet kaasut ja liat kehittävät kahden vaiheen välille virtaa johtavan sillan, jonka jälkeen vaiheiden välille syntyy valokaari, joka voi olla tuhansien ampeerien suuruinen. Valokaaren lämpötila voi olla korkeimmillaan jopa 10000 °C suuruinen. Valokaaren syntyminen aiheuttaa kojeiston sisään suuren paineen, joka pahimmassa tapauksessa

voi rikkoa kojeiston rakenteita. Valokaari ilmenee myös suurena lämpötilan nousuna, kojeistopaloina sekä myrkyllisinä kaasuina. (Lyytikäinen, 2011, s. 48.)

Sähkökojeistojen suunnittelu tulisi aina pyrkiä tekemään niin että siinä on minimoitu mahdollisuudet valokaarien syttymiselle. Taloudellisesta näkökulmasta sähkökojeistoa on mahdoton toteuttaa niin että ne olisi kokonaan suojattu valokaarilta. Tämän takia kojeistojen rakenteet toteutetaan niin että valokaarista aiheutuvat haittailmiöiden seuraukset jäisivät mahdollisimman pieniksi. Valokaarivaurioiden vahinkojen kannalta suurin ja tärkein tekijä on valokaaren palamisai-ka. Valokaarten palamis aikaan on kehitetty valokaarireleitä ja valokaarivahteja, jotka ovat suojauslaitteita, joiden avulla valokaaren palamis aika saadaan minimoitua. Valokaarireleiden olennaisin ja tärkein komponentti on valokaaren syttymisen havaitseva anturi. (Lyytikäinen, 2011, s. 48.)

Valokaarireleitä valmistaa useat eri yritykset, joista yksi on ABB. Esimerkiksi ABB:n valikoimasta löytyy kahta erilaista valokaarianturia. Releeseen on lisätty kuitukaapelisensori, joka pystyy havaitsemaan valoa koko pituudeltaan. Koko matkalta valon havaitseminen on etuna silloin kun tehdään nykyaikaista pitkälle koteloidun kojeiston suojausta. Yhtä ja samaa kuitua kierrättämällä usean eri osaston kautta, saadaan luotua parhain mahdollinen suojaus valokaaria vastaan koko sähkökojeiston osalta. Anturityypeistä toinen on linssityyppinen anturi, joita tarvitaan usein yksi valvottavaa tilaa kohden. Linssityyppisen anturin käytön etuina on anturin helppo asennettavuus, valmiisiin kojeistoihin sekä anturin mekaaninen kestävyys. Valokaarireleissä on mahdollisuus tapahtua myös virhelaukaisuja, jotka on mahdollista välttää lisäehtoa käyttämällä. Lisäehtona käytetään laukaisun ylivirtatietoja esimerkiksi niin että valokaarireleen koskettimien kanssa kytketään sarjaan yksi ylivirtareleen kosketin. Tällöin valokaarireleen havahtuessa, virran täytyy myös nousta oikosulkuvirran suuruutta vastaavaksi. (Lyytikäinen, 2011, s. 48.)

5.3 Katkaisijat

Katkaisija on kytkinlaite, jota käytetään virtapiirien ohjaukseen ja suojaukseen. Katkaisijoita käytetään oikosulkusuojina sekä ylikuormitussuojina ja lisäksi niillä pystytään kytkemään oikosulkuvirtoja pois. Katkaisijan rakenne koostuu koskettimista, joiden ohjaus tehdään sähköisesti tai mekaanisesti. Katkaisijoiden mahdollisuus katkaista suuriakin vikavirtoja perustuu katkaisijan nopeuteen toimia, kontaktien väliseen etäisyyteen sekä valokaarisammuttimiin. Katkaisijoita voidaan asentaa keskuksien pääkytkimiksi, kiskojen tai kaapeleiden suojaksi tai moottorinsuojakytkimiksi. (Timlin, 2020, s. 30.)

Katkaisijan ohjaus voidaan tehdä joko manuaalisesti katkaisijassa olevista napista tai automaattisesti suojarleen antaman laukaisukäskyn avulla. Katkaisijoiden ohjaus tehdään tyypillisesti samaan sähköverkkoon kytketyillä suojarleillä, jotka lähettävät katkaisijalle vikatilanteessa laukaisutiedon. Katkaisijat pystyvät pääsääntöisesti avaamaan ja sulkemaan virtapiiriin ilman vaurioitumista, vaikka virtapiirissä olisi huomattavasti suurempi virta kuin mitä katkaisijan nimellvirta on. Katkaisijalla voidaan myös sulkea virtapiiri, mikäli suojarleellä on jälleenkytkentä toiminto käytössä. Katkaisija ei pysty itse päättämään koska virtapiiri on suljettava tai avattava vaan katkaisija tarvitsee aina laukaisutiedon suojarleeltä. (Elovaara & Laiho 1988, s. 245.)

5.3.1 Ilmakatkaisijat

Ilmakatkaisijat ovat ilmaeristeisiä katkaisijoita, joka tarkoittaa, että katkaisijan rakenteessa olevat kosketinkammiot ja kammioissa liikkuvat kosketinkärjet ovat normaalin ilmanpaineen alaisena. Kammioissa on lisäksi valokaarisuojat, jotka pystyvät sammuttamaan kytkentä hetkellä valokaaresta aiheutuvan liekin. Ilmakatkaisijoita asennetaan usein pelkästään pienjännitekojeistoihin, sillä katkaisijan kytkentäkärkien välissä on pelkästään ilmaa. (Elovaara & Laiho, 1988, s. 252.)

5.3.2 Kompaktikatkaisija

Kompaktikatkaisija on rakenteeltaan eristysaineella täytetty kiinteästi valettu kotelo, joka muodostuu kaksi- tai nelinapaisesta rungosta ja siihen valitusta suojarleestä. Kompaktikatkaisijoita käytetään erityisesti pienjännite jakeluverkkojen ylivirtasuojauksessa, moottori käynnistimien suojauksessa sekä kuormien erottamisessa. Kompaktikatkaisijan pääkoskettimet ovat yleensä käyttövivulla mekaanisesti käytettäviä. Kompaktikatkaisijoissa on sähköturvallisuuden kannalta luotettava käyttövivun asennon osoitin sekä käyttövivussa on mahdollisuus lukitukseen huolto- ja korjaustöiden ajaksi. Kompaktikatkaisijaan on saatavilla myös lisävarusteita kuten alijännitekela, työvirtalaukaisin, vikavirtasuojakytkin, apukosketin tai moottorinohjain. Kompaktikatkaisijoita on saatavilla aina 690 V asti sekä katkaisukyvyltään 150 kA asti. (Lyytikäinen, 2011, s. 50.)

6 MAADOITUS

Maadoituksen tarkoitus on luoda sähköinen liitäntä järjestelmän, asennuksen tai laitteen jonkin pisteen ja paikallisen maan välille. Yhteyden muodostamiseksi tarvitaan vähintään maahan yhteydessä oleva kappale, eli maadoituselektrodi. Tämän lisäksi maadoituksen saamiseksi tarvitaan maadoitusjohdin, joka yhdistää maadoituselektrodin maadoitettavaan pisteeseen. Teollisuuden maadoitusjärjestelmät ovat yleensä laajoja kokonaisuuksia ja niihin sisältyy monia maadoituskiskoja, joihin on yhdistetty suojajohdin- ja potentiaalintasausjärjestelmät. Teollisuudessa käytössä olevat sähköjärjestelmät koostuvat usein pienjännite- ja suurjänniteasennuksista sekä asennuksien maadoituksista. Mikäli asennuksen syöttö on toteutettu suurjännitteellä, tulee huomioida, että suurjännite- sekä pienjänniteasennusten maadoitusjärjestelmälle on määrätty vaatimukset. Standardissa SFS 6000 annetaan pienjännitejärjestelmien maadoituksien vaatimukset, kun taas puolestaan suurjännitejärjestelmien maadoituksien vaatimukset antaa standardi SFS 6001. (Hietalahti, 2013, s. 14–26.)

Teollisuuslaitoksiin rakennetaan maadoitusjärjestelmiä kolmen eri syyn takia. Hyvin tehdyn maadoitusjärjestelmän avulla pystytään parantamaan laitoksen sähköturvallisuutta, häiriösuojausta sekä ukkossuojausta. Maadoittamista käytetään järjestelmän turvallisuuden sekä toiminnallisten ominaisuuksien parantamiseen. Standardissa vaatimuksena on määrätty, että maadoitusjärjestelmien päällimmäinen tarkoitus on aina sähköturvallisuuden takaaminen. (Kallio & Mäkinen, 2004, s. 31.)

6.1 Teollisuusverkkojen maadoitukset

Tyypillisesti kiinteistössä on käytössä yksi maadoitusjärjestelmä, johon tulee liittää kaikki maadoitusta tarvitsevat järjestelmät. Teollisuusverkoissa on monesti tavallisen sähköverkon maadoitusten lisäksi muita erilaisia maadoitusjärjestelmiä. Teollisuuslaitoksien muita erilaisia maadoitusjärjestelmiä on esimerkiksi suurjännitepuolen maadoitukset, tietoliikennejärjestelmien maadoitukset, toiminnalliset maadoitukset sekä ylijännitesuojaus- ja salamasuojausjärjestelmän maadoitukset. (Saloniemi, 2023, s. 15.)

Rakennuksen suurjänniteasennuksiin liittyvät maadoitukset yhdistetään usein yhteen pienjännitepuolten maadoitusten kanssa muuntamoissa tai rakennuksen muuntamotiloissa. Mikäli käytössä olevaan maadoitusjärjestelmään kuuluu pienjännite- sekä suurjännitepuolen maadoituksia, tulee maadoitusten täyttää standardien SFS 6000 sekä SFS 6001 asettamat vaatimukset. Maadoitusjärjestelmissä maadoituksille voidaan käyttää myös yhteistä maadoituselektrodia, kun-

han se täyttää edellä mainittujen standardien vaatimukset. Maadoituselektrodina voi toimia pysty- ja vaakamaadoituselektrodit, maadoituslevyt, rakennusperustusten kaivantoihin tai kaapeliojiin asennettu maadoitusköysi, rakennusperustusten betoni-raudoitus tai joku edellä mainittujen ratkaisujen yhdistelmä. Maadoituselektrodin vastakkaisiin kulmiin tulee liittää päämaadoitusjohtimet. Päämaadoitusjohtimet tuodaan päämaadoituskiskolle mahdollisuuksien mukaan eri reittejä. (Saloniemi, 2023, s. 15.)

Teollisuuden tuotantotehtaiden päämaadoituskisko asennetaan yleensä rakennuksen pääkytkinlaitokselle. Päämaadoituskiskoon (MEB-kisko), yhdistetään tehtaalla jokainen PE-kisko, potentiaalintasaus- ja lisämaadoituskiskot (LPT, LPK, EB), verkon päämaadoitusjohtimet, metalliset putkistot, rakennuksen rakenteet, jotka ovat johtavia, toiminnallisen maadoituksen kiskot (FE) sekä tehtaalla puhelin- ja antennilaitteiden maadoitukset. (Saloniemi, 2023, s. 15.)

Muuntamoihin tai sähkö- ja automaatiotiloihin voidaan tarpeen mukaan asentaa lisämaadoituskiskoja. Lisämaadoituskiskoihin voidaan yhdistää vaarallisilta kosketusjännitteiltä suojattavien sähkölaitteiden suojamaadoitusjohtimet. Lisämaadoituskiskostojen voi tarpeen vaatiessa kiinnittää useamman vierekkäin. Lisämaadoituskiskostot tulee asentaa paikkaan, jossa kiskoihin pääsee helposti käsiin, sähköverkolle tehtävien tarkastuksen ja mittausten suorittamiseksi. Toiminnalliseen maadoitukseen liittyviä kiskostoja (FE), sijoitetaan tehtaalla automaatiotiloihin sekä muihin vastaavanlaisiin tiloihin. Kiskostoihin liitetään lisäksi häiriöiltä suojattavien laitteiden häiriösuojajohtimet. Toiminnallista maadoitusjärjestelmää on ennen kutsuttu häiriöttömäksi maadoitukseksi, joten on mahdollista, että vanhoissa teollisuuden tehtaissa on käytössä vielä järjestelmän vanha nimitys. (Saloniemi, 2023, s. 15.)

Teollisuuslaitoksien maadoituspiirustusten osalta dokumentointi tulee tehdä sekä pitää ajan tasalla standardeissa SFS 6000 ja SFS 6001 määriteltujen vaatimusten mukaisesti. Maadoitusjärjestelmästä tulisi olla tehtynä asemapiirustus, josta ilmenee maadoitusjärjestelmässä olevien maadoituselektrodien asennuspaikantiedot, valmistusmateriaali, maadoituselektrodien haaroituspisteet sekä niiden asennussyvyudet. Mikäli maadoitusjärjestelmässä on jouduttu tekemään erityistoimenpiteitä kosketusjänniteraja-arvojen saavuttamiseksi, tulee ne olla esitettyinä myös asemapiirroksessa sekä lisäksi niiden tulee olla kuvattuna maadoitusjärjestelmän dokumenteissa. Teollisuuslaitoksen myös sisäisestä PE- ja FE-maadoitusverkoista tulee luoda kaavio, josta selviää järjestelmässä käytössä olevien kiskojen sijoituspaikat sekä tunnuksat. (Saloniemi, 2023, s. 15.)

6.2 Maasulku

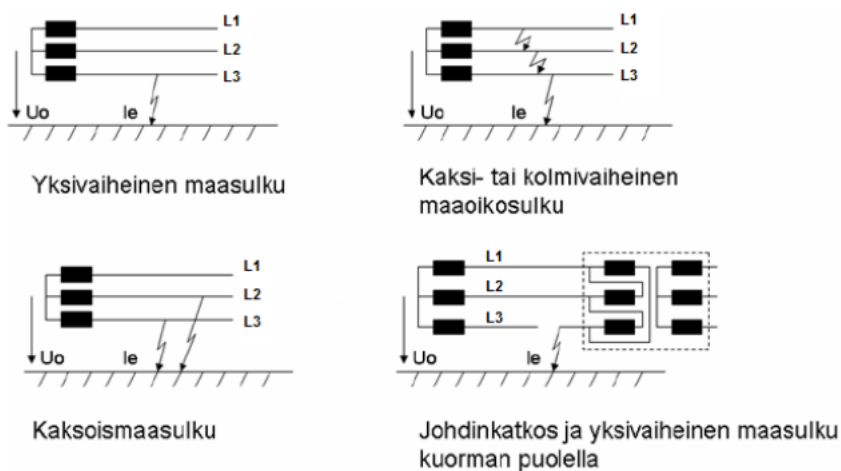
Maasuluksi kutsutaan sähköverkossa tapahtumaa tilannetta mikä syntyy silloin kun jännitteisenä oleva johdin päätyy kosketukseen maapotentiaalin kanssa. Maasulku on mahdollista aiheutua suoraan tai valokaaren välityksellä. Maasuluksi kutsutaan sähköistä vikatilannetta, jonka aikana eristeaineessa syntyy jännitteisen osan ja maan välille läpilyönti -tilanne. Tilanne, jossa maasulku voi tapahtua on esimerkiksi tilanne, jossa maankaivuutöissä vaurioitetaan maassa olevan kaapelin eristettä, jonka seurauksena maajohdin pääsee kosketukseen vaihejohtimen kanssa. Maasulku voi tapahtua myös tilanteessa, kun kaapelin vaihejohdin katkeaa tai irtoaa liittimestään aiheuttaen samalla maasulun. (Lyytikäinen, 2011, s. 52.)

Maasulun syntyemisessä muodostuu vikavirtapiiri, minkä virran suunta on vikaantuneesta vaiheesta aina kohti maata. Virtaa, joka muodostuu tällaisessa tilanteessa, kutsutaan maasulkuvirraksi. Maasulussa syntyvä virta vaikuttaa aina suoraan maadoitusjännitteeseen ja aiheuttaa sitä kautta vaarajännitteitä sähköverkkoon. Maasulkuvikoja voi esiintyä myös useammassa vaiheessa samaan aikaan. Tällöin tilannetta kutsutaan kaksivaiheiseksi maasuluksi eli kaksoismaasuluksi tai kaksivaiheiseksi tai kolmivaiheiseksi maaosuluksi (kuva 17). (Lyytikäinen, 2011, s. 52.)

6.3 Kaksoismaasulku

Tilannetta, jossa eri kohdissa johtoa tapahtuu kahden vaiheen eristysvika, kutsutaan kaksoismaasuluksi. Kaksoismaasulku muistuttaa paljon kahden vaiheen välillä syntyvää oikosulkua, koska kaksoismaasulkutapauksissa vikavirta on usein suuri ja se kulkee osan matkastaan maan kautta. Kaksoismaasulussa esiintyvät vikapaikat voivat sijaita kaukana toisistaan, joka vaikeuttaa kaksoismaasulun havaitsemista suojarleiden avulla, koska maasulkuvirrat jäävät pieniksi kaukana toisistaan sijaitsevien vikapaikkojen vuoksi. (Lyytikäinen, 2011, s. 52.)

Tilannetta, jossa kaksivaiheinen maasulku syntyy, on usein edeltänyt yksivaiheinen maasulku, minkä jännite toimivissa vaihejohtimissa on kasvanut ja aiheuttanut läpilyönnin toisessakin vaihejohtimessa. Kaksoismaasulku voi aiheutua myös maasulun alkutilanteen muutosilmiöiden seurauksena. Tällainen tilanne on teollisuudessa, jossa on paljon metallisia rakenteita erittäin vaarallinen sillä rakenteet tulevat kaksoismaasulun seurauksena jännitteisiksi. Kaksoismaasulusta aiheutuvia haittavaikutuksia saadaan pienennettyä varmistamalla maasulun suojausten nopeasta ja luotettavasta toimintatavasta. (Lyytikäinen, 2011, s. 52–53.)



Kuva 17. Erilaisia maasulkutapauksia (Lyytikäinen, 2011, s. 53).

7 SÄHKÖVERKON MALLINTAMINEN

Työn tarkoituksena oli mallintaa Motoseal Components Oy:n Raumalla sijaitsevan tuotantotehtaan sähköverkko ja sen osat. Työ rajataan niin että sähköverkko mallinnetaan muuntajalta alakeskukseen sekä suurimpiin tehtaan tuotantokoneisiin.

Työn mallinnus suoritetaan Schneiderin valmistamalla EcoStructure Power Design – Ecodial ohjelmalla. Ohjelma on sähköverkoille tarkoitettu suunnittelu- ja laskentatyökalu. Ohjelmalla piirretään sähköverkon pääkaavio ja määritetään sen sähkötekniset ominaisuudet, joita ovat kuorman teho, napaisuus, maadoitusjärjestelmä, kaapelin pituus sekä käyttöolosuhteet. Ohjelman avulla voidaan tarkastaa sähkökeskusten ja suositeltujen laitteiden välisten valintojen yhdenmukaisuuden. Ohjelma ilmoittaa kaikista poikkeamista pääkaaviosta. Ohjelmisto on ilmainen ja sen käytöstä löytyy kattavasti opetusvideoita Schneiderin omilta sivuilta. (Schneider, 2024.)

7.1 Sähköverkko

Tehtaan sähköverkko koostuu eri osista, joita ovat esimerkiksi muuntamo, pääkeskus, alakeskukset sekä eri tuotantokoneet, joita tehdas käyttää tuotteiden valmistukseen. Sähköverkossa on paljon kuormituksia, joita verkon suoja- sekä syöttölaitteiden tulee kestää. Sähköverkon kuormitukset ja käytössä olevat suojalaitteet sekä kaapelit tulee selvittää mallinnusta varten. Sähköverkon mallinnuksessa on tärkeää selvittää oikeat tiedot. Tällöin ohjelma osaa laskea oikeat arvot oikein ja lopputulokseen ei tule virheellisiä tietoja.

7.2 Muuntamo

Rakennuksen pihalla sijaitsee tehtaan muuntamo, joka on uusittu vuonna 2020 (kuva 18). Muuntamossa on kaksi eri jakelumuuntajaa, jotka syöttävät tehtaan sähköverkkoa. Jakelumuuntajat ovat Siemensin öljyeristeisiä muuntajia, jotka ovat nimellisarvoiltaan 800 kVA / 20 kV.



Kuva 18. Muuntamo rakennuksen pihalla.

Jakelumuuntajat ovat jaettu niin että niistä toinen syöttää tehtaassa olevaa sähköpääkeskusta ja erilaisia tuotantokoneita, jakokeskusta sekä autoille tarkoitettuja lämmitystolppia. Muuntamossa on kaksi pääkiskostoa, jotka ovat nimeltään PKT1 sekä PKT2. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty muuntajien syöttämät sähköverkon osat.

Taulukko 1. PKT1 Jakelumuuntajan laitteet, sulakkeet sekä kaapeloinnit.

Laite	Tunnus	Sulake / A	Kaapeli
JN2	4F	63	MCMK 4x16/16
JN4	5F	80	MCMK 4x35/16
JN4	6F	63	MCMK 4x16/16
CMS	7F	250	AMCMK 4x300/88 AN
CMS	8F	250	AMCMK 4x300/88 AN
CMS	9F	250	AMCMK 4x300/88 AN
JK10	10F	250	AMCMK 4x300/88 AN
AUTOLÄM	11F	63	MCMK 4x16/16

Taulukko 2. PKT2 Jakelumuuntajan laitteet, sulakkeet sekä kaapeloinnit.

Laite	Tunnus	Sulake / A	Kaapeli
SPK	1F	250	AMCMK 4x300/88 AN
SPK	2F	250	AMCMK 4x300/88 AN
SPK	3F	250	AMCMK 4x300/88 AN

7.3 Sähköpääkeskus

Tehtaan sisällä sijaitsee tehtaan sisäistä sähköverkkoa syöttävä sähköpääkeskus. Sähköpääkeskus sijaitsee rakennuksessa erillisessä lukolla suljetussa tilassa. Keskus on rakenteeltaan kehikkokeskus sekä keskuksen kalusteet ovat asennettuna kiinteästi. Sähköpääkeskusta suojaa kolme 250 ampeerin rinnakkain kytkettyä kahvasulaketta, jotka sijaitsevat muuntamossa. Taulukossa 3 esitetään sähköpääkeskuksen sähkötekniset tiedot.

Taulukko 3. Sähköpääkeskuksen sähkötekniset tiedot.

Nimellisjännite	400 V
Nimellisvirta	1250 A
Nimellistaajuus	50 Hz
Oikosulkuvirta	6880 A

Sähköpääkeskus syöttää tehtaan sisäistä sähköverkkoa, johon sisältyy alakeskuksia, työstökoneita sekä eri valaistusryhmiä. Suurimpina kuormina keskukselle on tehtaassa sijaitsevat alakeskukset, maalaamo sekä eri tuotantokoneet.

7.4 Kuormat

Tehtaassa on erilaisia koneita, joita käytetään osien tekemiseen eri työvaiheissa. Tehdas valmistaa muovituotteita, joten koneet ovat pääsääntöisesti muovin työstämiseen tarkoitettuja. Tehtaassa on myös oma maalaamo sekä hitsaamo, jotka tuottavat sähköverkolle suurta kuormaa, tuotantokoneiden lisäksi.

7.4.1 Alakeskukset

Sähköpääkeskus syöttää rakennuksessa sijaitsevia eri alakeskuksia (taulukko 4). Alakeskuksia sähköpääkeskukseen kytkettyinä on yhteensä kahdeksan. Alakeskukset sijaitsevat eri puolilla rakennusta ja ne on jaettu käyttötarkoituksen mukaan syöttämään eri kokonaisuuksia.

Taulukko 4. Sähköpääkeskukseen liitetyt alakeskukset.

Keskus	Ryhmä	Sulake / A	Kaapeli
Maalaamolinjankeskus	5.1	125	AMCMK 4x185+57 Cu
Maalaamolinjankeskus	5.2	125	AMCMK 4x185+57 Cu
JK5	8	100	AMCMK 4x50 Al + 16 Cu
JK7 ja JK8 laajennusosa	12	250	AMCMK 4x185 + 57 Cu
JK3 Hitsaamo/Osavalmistus	14	250	AMCMK 4x185Al / 57 Cu
JK6 LVI-Keskus	15	160	AMCMK 4x70 Al + 21 Cu
JK2 Osavalmistus	17	100	AMCMK 4x50 Al + 16 CuS
JK4 Toimisto	18	63	MCMK 4x16 +16
JK1 Muoviosasto	21	250	AMCMK 4x185 / 57 Cu

7.4.2 Tuotantokoneet

Tuotantokoneita käytetään muovituotteiden valmistuksessa eri työvaiheisiin, joita ovat esimerkiksi muovaus, murskaus ja lämmitys. Sähköpääkeskukseen on liitetty kaksi muovauskonetta sekä yksi muovikone (taulukko 5). Lisäksi keskukseen on liitetty yksi muovilämmitin sekä murskain.

Taulukko 5. Sähköpääkeskukseen liitetyt tuotantokoneet.

Työstökone	Ryhmä	Sulake / A	Kaapeli
Muovios. /Muov.Ko. Lämm	9	80	AMCMK 4x50 Al + 16 CuS
Murskaimen keskus	16	160	MCMK 4x70 / 35
Muovauskone	22	125	AMCMK 4x70 / 21 Cu
Muovauskone ALAL.	23	125	AMCMK 4x70 / 21
Muovikone VCE2	24	160	AMCMK 4x95 / 29

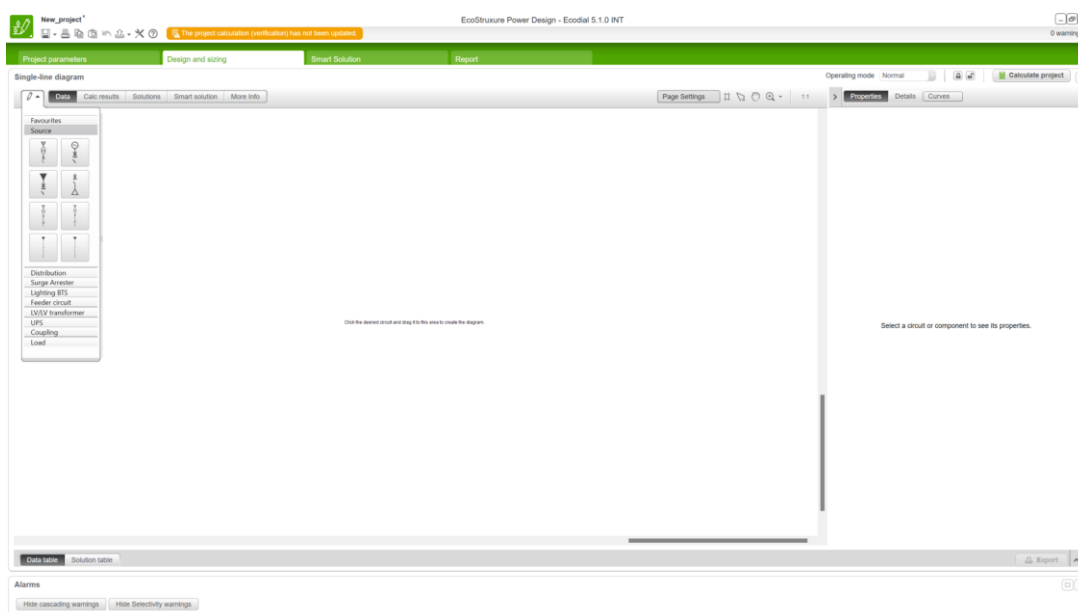
Taulukossa 5 kuvatut tuotantokoneet on liitetty muuntamon jakelumuuntajan PKT2 -kiskostoon. Tehtaassa käytössä olevat muut tuotantokoneet, joita ovat CMS, JN2 ja JN4 on liitetty jakelumuuntajan PKT1 -kiskoon.

7.5 Sähköverkon mallinnus

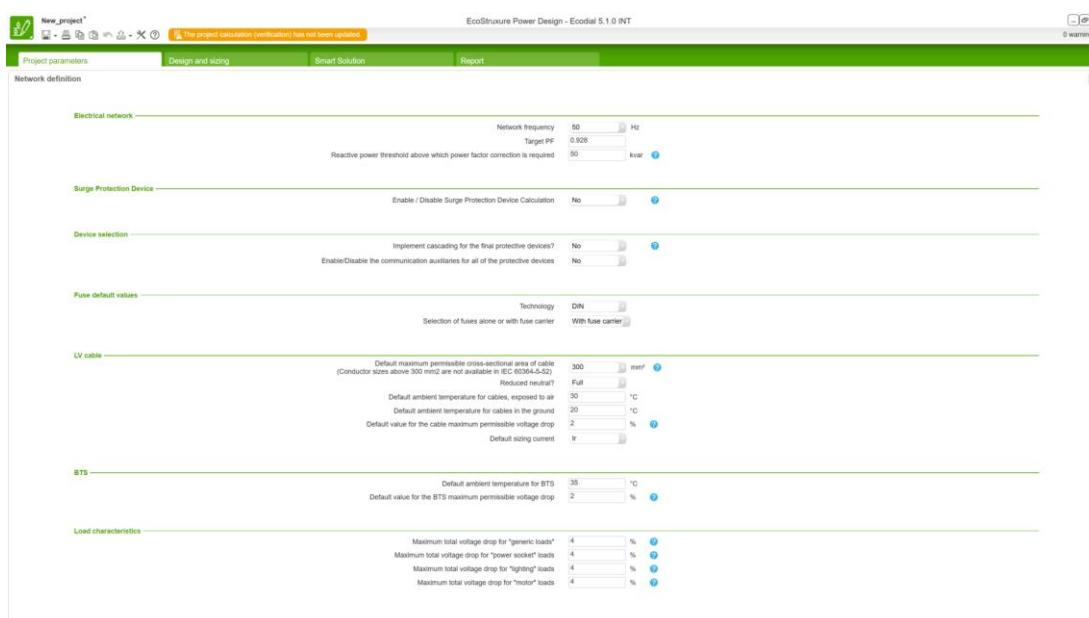
Verkon mallintamisen alussa luodaan Ecodial -ohjelmaan uusi projekti, johon tehtaassa sähköverkko mallinnetaan. Projektin alussa kartoitetaan kohteesta olevien dokumenttien ja sähkökuvien avulla, millainen sähköverkko on kyseessä ja mitä siihen sisältyy. Mallinnuksessa on tärkeää, että tekijä itse hahmottaa ja ymmärtää, mitä on mallintamassa.

Motoseal Components Oy:n tehtaan sähköverkon mallinnus rajattiin niin että työ käsittää osuuden jakelumuuntajalta alakeskuksille sekä suurimmille tuotantolaitteille. Mallinnuksen tekemiseen oli saatavilla osa rakennuksen päivitetyistä sähkökuvista. Kuvista kuitenkin oli saatavilla tärkeimmät nousujohtokaaviot sekä keskuskäviöt.

Projektin luominen oli ohjelmalla helppoa ja projektin aloitusarvot olivat helposti muutettavissa (kuva 19). Aloitusarvoihin määritellään sähköverkon taajuus, suojalaitteiden ja kaapeleiden valintaominaisuudet sekä jännitteenaleneman varoitusrajat. Aloitusarvojen valinnan jälkeen voidaan aloittaa mallintamaan sähköverkkoa (kuva 18). Mallinnus on helppoa aloittaa muuntamolta ja edetä loogisesti aina viimeiseen mallinnukseen kuuluvaan pisteeseen saakka.

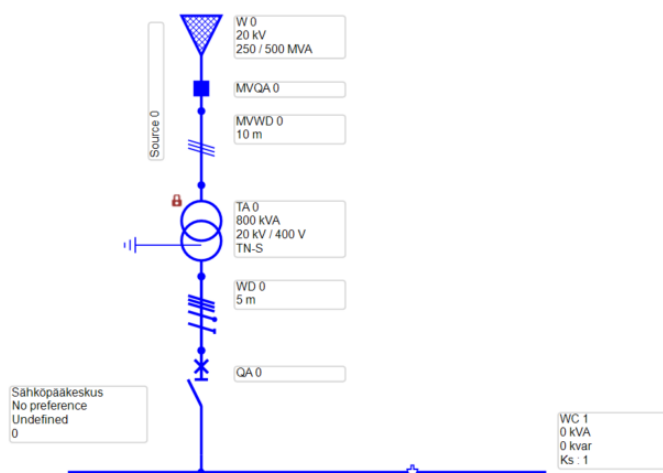


Kuva 18. Suunnittelunäkymä.



Kuva 19. Yleisten asetusten määrittely.

Ecodialissa normaaliverkko luodaan piirtämällä yksiviivakaavio manuaalisesti. Ohjelmassa valitaan kohteeseen sopiva tehollähde, johon syötetään lähtötietoja vastaavat arvot (Kuva 20). Projektiin sisältyy kaksi tehonlähdettä, sillä muuntamolla on kaksi jakelumuuntajaa, jotka syöttävät tehtaan sähköverkkoa. Tehonlähteiden lisäämisen jälkeen voidaan piirtää sähköpääkeskuksen kiskosto muuntajan perään.



Kuva 20. Sähköpääkeskuksen kiskosto lisättynä tehonlähteeseen.

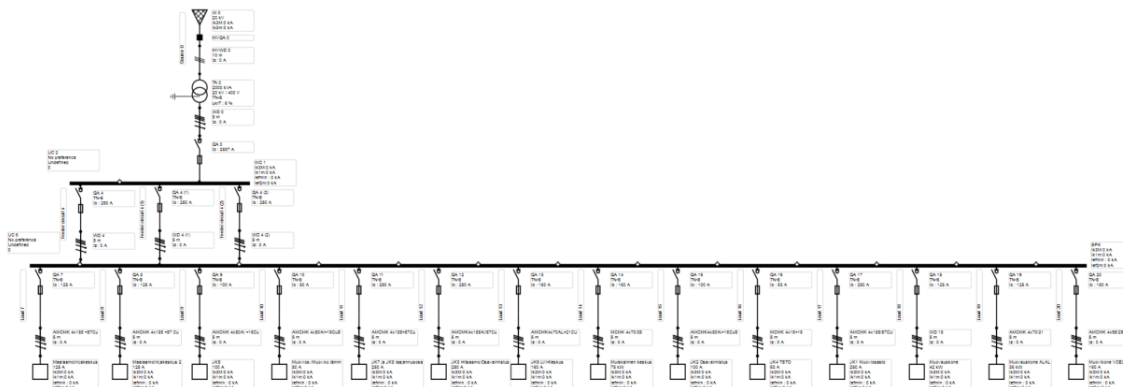
Tehonlähteen ja sähköpääkeskuksen kiskoston lisäämisen jälkeen aloitetaan lisäämään kuormia. Sähköpääkeskuksen kuormia ovat projektissa alakeskukset sekä eri tuotantokoneet (kuva 21). Kuormista on hyödyllistä tehdä listaus, johon määrittelee itselle kuorman arvot, suojauslaitteet sekä kaapelin ja sen pituuden. Listaus helpottaa kuormien lisäämistä ohjelmaan ja listaus samalla vähentää virheen mahdollisuutta.

Circuit Load 5	
Type of system earthing	TN-S
lb (A)	0
Cable length (m)	5
Sr (kVA)	0
Pr (kW)	0
Ir (A)	0
P.F.	0.85
Nbr. of circuits	1
Number and type of conductors	3Ph+N

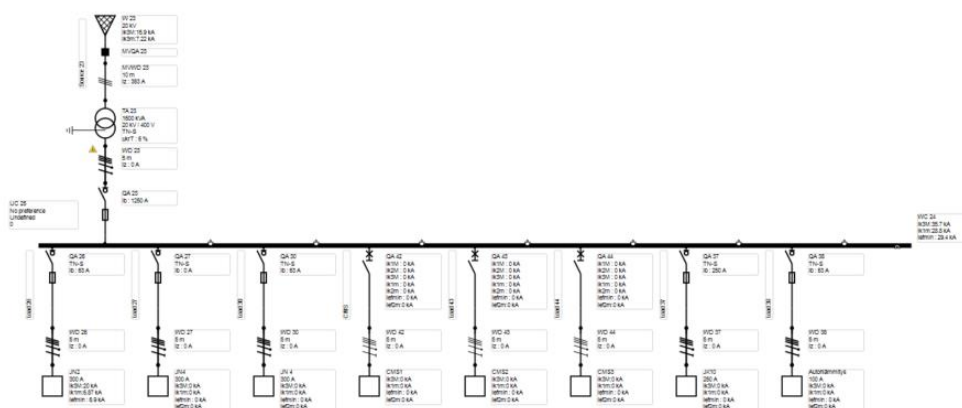
Kuva 21. Kuorman määrittäminen.

Kuormista tarvitsee määrittellä ohjelman haluamat eri tiedot ja arvot. Arvoihin tarvitsee myös laittaa syöttävän kaapelin pituus. Projektissa kaapelin pituudet on mitattu paikan päällä tehtaassa. Mittaaminen on varmintä tehdä paikan päällä, sillä pituuksia pystyy harvoin mittaamaan varmuudella pohjapiirroksista tai muista dokumenteista. Taulukoihin 4 ja 5 tehtyjen kuormalistausten mukaan, voidaan piirtää ohjelmaan tehtaan sähköverkko. Ohjelmaan piirretään molempien jake-

lumuuntajien syöttämät sähköverkot (kuvat 22 ja 23). Verkon piirtämisen jälkeen ohjelma pystyy laskemaan verkon arvot ja kokoamaan niistä raportin käyttäjälle.



Kuva 22. Muuntajan PKT2 -kiskoston syöttämä sähköverkko piirrettynä ohjelmaan.



Kuva 23. Muuntajan PKT1 -kiskoston syöttämä sähköverkko piirrettynä ohjelmaan.

7.6 Tulokset ja yhteenveto

Ohjelmalla sai mallinnettua tehtaan sähköverkon. Mallintaminen kuitenkin vaati ensiksi paljon tiedon selvittämistä sähköverkosta ja sen osista, esimerkiksi kaapeleista ja niiden pituuksista. Tarkkoja kaapeleiden pituuksia on harvoin saatavilla sähkökuvista, joten tässäkin tapauksessa kaapeleiden reititykset tarkastettiin paikan päällä, jonka jälkeen pituudet laskettiin Cadmatic -suunnitteluohjelman avulla.

Ecodial -ohjelmisto kokoaa mallinnuksesta lopuksi raportin. Raportti on hyvin laaja ja tässäkin tapauksessa ohjelma loi mallinnuksesta yhteensä 82 sivua pitkän raportin. Raportista selviää sähköverkon keskeisimmät arvot, kuormat sekä suojalaitteet (kuvat 24 ja 25). Raportissa on myös runsaasti tietoa, joka ei välttämättä ole niin tarpeellista ja hyödyllistä.

1.3 List of loads

1.3.1 Generic loads

Name	Sr (kVA)	Pr (kW)	Ir (A)	Cosp	Nbr	Polarity	Non linear load	THDI 3 (%)
Maalaa molinjak eskus	96.5	82	139	0.85	1	3Ph+N	No	0
Maalaa molinjak eskus 2	96.5	82	139	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK5	81.2	69	117	0.85	1	3Ph+N	No	0
Muovios. /Muov.ko .lämm	64.7	55	93.4	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK7 ja JK8 laajennu sosa	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK3 Hitsaam o/Osaval mistus	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK6 LVI- Keskus	129	110	187	0.85	1	3Ph+N	No	0
Murskai men keskus	69.4	59	100	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK2 Osavalm istus	81.2	69	117	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK4 TSTO	50.6	43	73	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK1 Muovios asto	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
Muovaus kone	82.4	70	119	0.85	1	3Ph+N	No	0
Muovaus kone ALAL	82.4	70	119	0.85	1	3Ph+N	No	0

Kuva 24. Raportin lista sähköverkon kuormista.

Muoviko ne VCE2	82.4	70	119	0.85	1	3Ph+N	No	0
JN2	51.8	44	74.7	0.85	1	3Ph+N	No	0
JN4	64.7	55	93.4	0.85	1	3Ph+N	No	0
JN 4	51.8	44	74.7	0.85	1	3Ph+N	No	0
CMS3	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
CMS2	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
CMS1	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0
JK10	204	173	294	0.85	1	3Ph+N	No	0

Kuva 25. Raportin lista sähköverkon kuormista.

Ohjelma tarkkailee mallinnettua sähköverkkoa ja ilmoittaa verkkoon ilmestyvistä poikkeamista. Ohjelmalla voidaan myös laskea sulakkeiden ja suojausten kookoa, mikäli niitä ei entuudestaan tiedetä. Tämä ominaisuus on kätevä esimerkiksi, silloin kun lisätään uusia laitteita verkkoon, jonka kuorma tiedetään. Sulakkeiden arvot voi laskea käsin ja tarkastaa sen jälkeen ohjelmalla, tai antaa ohjelman laskea halutut arvot. Ohjelma sopii erinomaisesti pienempiin projekteihin tai sähköverkon riittävyuden toteamiseen esimerkiksi uuden laitehankinnan takia.

Schneider Ecodial -laskentaohjelma on kätevä apuväline sähköverkkojen mallintamiseen ja verkon arvojen määrittämiseen. Ohjelma on ilmaiseksi saatavilla Schneiderin kotisivuilta, jonka ansiosta kynnys ohjelman hankkimiselle on matala.

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön päätavoitteena oli kokonaisvaltaisesti mallintaa Raumalla sijaitsevan Motoseal Oy:n tehtaan sähköverkko. Tehtaan sähköverkon mallintamiseen käytettiin Schneider Ecodial -ohjelmistoa. Tehtaan sähköverkkoon perehdyttiin ennen varsinaisen työn aloitusta. Sähköverkon mallinnus rajattiin niin että se kattaa verkon muuntamolta suurimmille alakeskuksille. Rajaus oli onnistunut ja verkon laajuus oli sillä tasolla, että mallinnus oli mahdollista tehdä.

Tehtaan sähköverkosta oli saatavilla rajatusti dokumentteja käyttöön. Saatavilla olevista dokumenteista ei ilmennyt kaikkia sähköverkon laitteiden tietoja, joten puuttuvat tiedot tarkastettiin erillisellä käynnillä tehtaassa. Tarkastuskierroksella sain puuttuviin tietoihin vastaukset, jonka jälkeen pystyin saattamaan sähköverkon mallinnuksen loppuun. Sähköverkon mallintamisessa pääsin tavoitteisiin, jotka työlle oli annettu.

Työn tekeminen antoi kattavan kuvan teollisuuden sähköverkoista sekä niiden laitteista. Työn avulla sai perehdyttyä laajasti teollisuuden sähköverkkoihin sekä verkkojen eri laitteisiin ja suojausmenetelmiin. Teollisuusverkoissa on monia eri osia ja niiden tunteminen on tärkeää, mikäli verkkoa halutaan myöhemmässä vaiheessa laajentaa tai muuttaa.

Sähköverkkojen mallintaminen laskentaohjelmien avulla on vaivatonta ja verkon mallintamisella voidaan poistaa virheiden määrää. Laskentaohjelmisto on hyvä työväline muiden työmenetelmien rinnalla. Laskentaohjelmia on otettu käyttöön useassa paikassa ja uskon että niiden käyttö tulee lisääntymään vielä tulevaisuudessa yhä useammalle sektorille.

LÄHTEET

ABB. (2017). Älykäs sähköverkko kiinteistöissä. Haettu 4.4.2024 osoitteesta https://new.abb.com/docs/librariesprovider113/fi_buildingspace_webinars/valoka_arisuojaus-ja-relesuojaus.pdf?sfvrsn=2b074d14_2

Elovaara, J. & Haarla, L. (1988). Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. jatkopainos. Helsinki: Otatieto Oy.

Elovaara, J. & Haarla, L. (2011). Sähköverkot II. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto Oy.

Finder. (2024). Motoseal Components Oy Haettu 16.4.2024 osoitteesta <https://www.finder.fi/Kiinteist%C3%B6huoltokoneet+kiinteist%C3%B6huoltotarvikkeet/Motoseal+Components+Oy/Rauma/yhteystiedot/158417>

Hietalahti, L. (2013). Sähkövoimatekniikan perusteet. 1.painos. Vantaa: AMK-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Häkkinen, J. (2020). Sähkönjakelun ohjausjärjestelmät teollisuudessa [AMK-opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/342538/H%C3%A4kkinen_Jasmin.pdf?sequence=2

Kallio, R. & Mäkinen, M. (2004). Teollisuuden sähköasennukset. 1. painos. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Korpinen, L. (1998). Sähkön siirto- ja jakeluverkot. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf

Kuusisto, A. (2017). Sähköaseman ylivirta- ja maasulkusuojausasettelujen määrittäminen [AMK-opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/131329/Kuusisto_Arttu.pdf?sequence=1

Lyytikäinen, H. (2011). Teollisuuden sähkönjakeluverkon mallintaminen [AMK-opinnäytetyö, Savonia ammattikorkeakoulu]. Theseus.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38348/Lyytikainen_Heikki.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Markkanen, S. (2023). Sähkökeskuksen virtakiskojärjestelmät 125-3000 A [AMK-opinnäytetyö Metropolia ammattikorkeakoulu]. Theseus.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/791611/Markkanen_Samuli.pdf?sequence=2

Motoseal Components. (2024). Haettu 16.4.2024 osoitteesta <https://www.motoseal.fi/>

Mäkelä, K. (2017). Teollisuuden sähköjakeluverkon luotettavuus metsäteollisuusintegraatissa [Diplomi-työ, Lappeenrannan teknillinen yliopisto].

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/134340/Diplomityo%c3%b6_M%c3%a4kel%c3%a4_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Niskanen, A. (2019). Teollisuuden sähköjakeluverkon relesuojaus [AMK-opinnäytetyö Metropolia ammattikorkeakoulu]. Theseus.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/227899/Niskanen_Aapo.pdf?sequence=2

Paju, J. (2017). Teollisuuden sähköjakeluverkkojen ylijännitesuojaus [Diplomi-työ Lappeenrannan teknillinen yliopisto].

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/134168/Diplomityo_Paju_Jussi.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Riikonen, J. (2023). Teollisuusverkon 500 ja 400 V jakelujännitteiden vertailu case Kemira chemicals Kuusankosken tehtaat [Diplomi-työ Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT].

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165383/Diplomityo%c3%b6_Riikonen_Janne.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rytkönen, P. (2009). Teollisuuden sähköasennukset ja verkot. Luentomateriaali. Viitattu 4.4.2024 osoitteesta

<http://momenthits.fi/ESV5230/>

Saloniemi, V. (2023). Haapaniemen voimalaitoksen maadoitusjärjestelmän kartoitus [AMK-opinnäytetyö Savonia ammattikorkeakoulu]. Theseus.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/802160/Saloniemi_Valteri.pdf?sequence=2

Schneider Electric. (2024). Exostructure Power Design – Ecodial. Haettu 5.4.2024 osoitteesta <https://www.se.com/fi/fi/product-range/61013-ecostruxure-power-design-ecodial/#overview>

Suutarinen, J. (2022). Sähkönsyötön suunnittelu teollisuuden tuotantolaitteille [AMK-opinnäytetyö, Lapin ammattikorkeakoulu]. Theseus.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/753704/Suutarinen_Jussi.pdf?sequence=2

Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto. (2009). D1-2009 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Helsinki. Painokurki Oy.

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Haettu 3.4.2024 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135#Lidm46651394465440>

Timlin, L. (2020). Sähkökeskuksen oikosulkukestoisuus [AMK-opinnäytetyö Oulun ammattikorkeakoulu]. Theseus.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/336144/Timlin_Lauri.pdf?sequence=5&isAllowed=y

UTU. (2022). Kennokeskukset. Haettu 4.4.2024 osoitteesta <https://www.utugroup.com/fi/tuotekategoria/sahkokeskukset/kennokeskukset/>

UTU. (2022). Kotelokeskus AHMA. Haettu 4.4.2024 osoitteesta <https://www.utugroup.com/fi/tuotekategoria/sahkokeskukset/kiinteistokeskukset/kotelokeskus-ahma-630a-ip44-54/>