

SÄHKÖNSYÖTÖN SUUNNITTELU TEOLLISUUDEN TUO- TANTOLAITTEILLE

Suutarinen Jussi

Opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2022

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jussi Suutarinen	Vuosi	2022
Ohjaaja	Ins. (YAMK) Aila Petäjäjärvi		
Toimeksiantaja	Prysmian Group Finland Oy Ins. Matti Arvola		
Työn nimi	Sähkönsyötön suunnittelu teollisuuden tuotantolaitteille		
Sivu- ja liitesivumäärä	42 + 1		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella muuntamosuunnittelun sähkötekniisiä periaatteita. Opinnäytetyössä käsiteltiin keskijännitekojeistoja, maakaapelointia ja muuntajia. Muuntamon toteutuksen ja käyttöönoton hyvän onnistumisen kannalta hyvä suunnittelu on tärkeää.

Opinnäytetyössä perehdyttiin Prysmian Group Finland Oy:n Pikkalan tehdasalueen sähköverkkoon ja siihen liitettävän uuden muuntamon suunnitteluun. Suunnittelussa perehdyttiin lakeihin ja standardeihin, jotka määrittelevät kaapeleiden ja komponenttien sähkötekniset minimivaatimukset.

Opinnäytetyön tulokseksi saatiin muuntamon suunnittelun olennaiset sähkötekniset asiat. Opinnäytetyö tulee olemaan apuna Pikkalan tehtaan sähkötöiden johtajalla, kun muuntamon rakentaminen tullaan toteuttamaan tulevina vuosina.

Electrical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Jussi Suutarinen	Year	2022
Supervisor	Aila Petäjäjärvi, M.Eng.		
Commissioned by	Prysmian Group Finland Oy		
	Matti Arvola, B.Eng.		
Subject of thesis	Designing Power Supply for Industrial Production Equipment		
Number of pages	42 + 1		

The aim of this thesis was to examine the electrotechnical principles of distribution substation design. The thesis deals with medium voltage switchgear, underground cabling and transformers. Good planning is important for the good success of distribution substation implementation and commissioning.

The thesis examined the electrical network of Prysmian Group Finland Oy Pikkala factory area and the design of a new distribution substation to be connected to it. The design was based on laws and standards that define the minimum electrical requirements for cables and components.

The results of the thesis are the essential electrotechnical aspects of the distribution substation design. The thesis will be of assistance to the manager of electrical work at the Pikkala plant when the construction of the distribution substation will be completed in the coming years.

Key words power supply, transformer, 10 kV switchgear

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	PRYSMIAN GROUP OY	9
3	TEOLLISUUDEN SÄHKÖVERKON SUUNNITTELU	11
3.1	Teollisuuden sähköverkkojen rakennevaihtoehdot	11
3.1.1	Säteittäisverkko	11
3.1.2	Rengasverkko	12
3.1.3	Silmukkaverkko	12
3.2	Sähköverkon suunnittelu	12
3.3	Tehdasalueen pääsähköasema ja sähköverkko	13
4	TEOLLISUUDEN SÄHKÖLAITTEISTOT	14
4.1	Sähköasema	14
4.2	Kiskostot	14
4.2.1	Yksikiskojärjestelmä	14
4.2.2	Kisko – apukiskojärjestelmä	15
4.2.3	Kaksoiskatkaisijajärjestelmä	15
4.3	Muuntamo	16
4.4	Kaapelit	16
4.5	Keskijännitekaapeleiden mitoitus	17
4.6	Sähkökeskus	18
4.7	Muuntamon maadoitus	18
5	UUSI MUUNTAMO	20
5.1	Muuntamon suunnittelu	20
5.2	Keskijännitekaapelin mitoittaminen	22
5.2.1	Keskijännitekaapelin mitoittaminen taulukoista	22
5.2.2	Keskijännitekaapelin mitoittaminen laskemalla	28
5.3	Yhteys viereiselle muuntamolle	29
5.4	Keskijännitekojeisto	29
5.5	Muuntajat	31
5.6	Sähköpääkeskus	34
6	POHDINTA	39

LÄHTEET	40
LIITTEET	42

ALKUSANAT

Haluan kiittää Prysmian Group Finland Oy mielenkiintoisesta opinnäytetyöaiheesta ja ohjaajia hyvästä ohjauksesta ja kärsivällisyydestä. Suuret kiitokset myös perheelle kärsivällisyydestä ja varsinkin avopuolisolle, joka jaksoi kuunnella ja tukea synkkinä hetkinä.

Keminmaassa 19.05.2022

Jussi Suutarinen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

U_n	nimellisjännite
kV	kilovoltti
MVA	megavolttiampeeri
A	ampeeri
Cu	kupari
Al	alumiini
kVA	kilovolttiampeeri
Hz	hertsi
I	virta
SF ₆	rikkiheksafluoridi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on tarkastella uuden muuntamon sähkötekniistä toteutusta ja muuntamolta lähtevien uusien teollisuuslaitteiden sähkönsyöttöä Prysmian Group Finland Oy:n Kirkkonummella sijaitsevan tehtaan alueella. Uusi muuntamo tulee osaksi tehdasalueen rengasverkkoa, joka sisältää jo useita muuntamoita. Aihe opinnäytetyöhön lähtee Prysmian Group Finland Oy:n tarpeesta rakentaa tulevaisuudessa uusi muuntamo Pikkalan tehdasalueelle.

Aihe rajattiin käsittelemään vaan muuntamon ja sähkönsyötön sähkötekniisiä osia. Muuntamon suunnitteluun ja rakentamiseen liittyy myös maankäyttö ja rakennustekniisiä asioita, jotka jätettiin opinnäytetyön ulkopuolelle. Opinnäytetyö rajataan käsittelemään sähkönsyöttöä pääsähköasemalta muuntamolle, muuntamon rakennetta ja sähkönsyöttöä muuntamolta uusille tuotantolaitteille.

Prysmian Group Finland Oy:n lisätessä tuotantokapasiteettia Kirkkonummella on tarve myös rakentaa uusi muuntamo syöttämään sähköä uusille teollisuuslaitteille. Uusi muuntamo rakennetaan lähitulevaisuudessa, ja suunnitteluvaiheessa Kirkkonummen tehtaan sähkötöiden johtaja voi hyödyntää opinnäytetyön tuloksia.

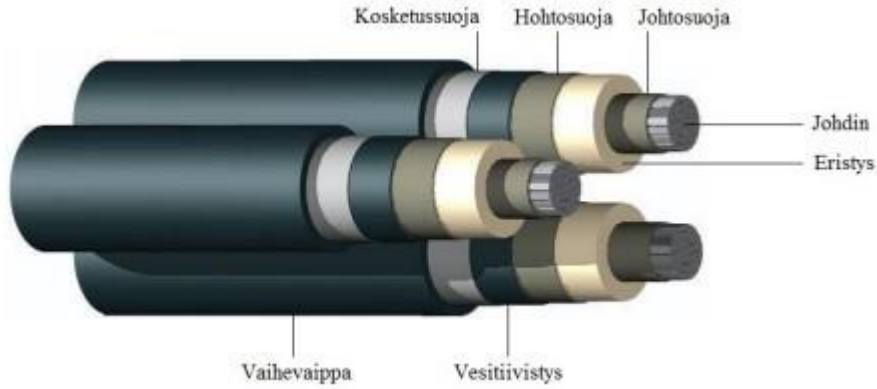
2 PRYSMIAN GROUP OY

Prysmian Group Oy on maailman suurin kaapelin valmistaja. Prysmian Group työllistää noin 30 000 henkilöä yli 50 maassa. Tehtaita sillä on 112 ja tuotekehitystä tehdään 25 tuotekehityskeskuksesta ympäri maailmaa (Prysmian Group Finland Oy 2022a.)

Prysmian Group Finland Oy on osa Prysmian Group Oy:tä. Prysmian Group Finland Oy:n historia ulottuu 1900-luvun alkuun. Vuonna 1912 Helsingin Punavuorella aloitti Suomen Punomotehdas, joka myöhemmin tunnettiin nimellä Nokian Kaapeli. Siitä monien vaiheiden kautta on tultu nykytilanteeseen, jossa Prysmian Group Finland Oy:lla on kaksi tehdasta Suomessa, Kirkkonummen Pikkalassa ja Oulussa Ruskossa. Prysmian Group Finland Oy työllistää noin 500 henkilöä (Prysmian Group Finland Oy 2022a.)

Prysmian Group Finland Oy:lla on Suomen laajin kaapelivalikoima. Tuotteita löytyy niin energiaverkkoja kuin telecomia varten sekä rakentamiseen ja teollisuuteen. Prysmian myös valmistaa tuotteita esimerkiksi tukemaan sähköverkkojen kunnossapitoa ja vikojen selvitystä (Prysmian Group Finland Oy 2022b.)

Kaapeleiden valmistuksessa on erilaisia valmistusvaiheita riippuen kaapelin käyttötarkoituksesta. Tässä opinnäytetyössä käsitellään keskijännitekaapeleita, joita käytetään sähköenergian siirtoon. Keskijännitekaapelit koostuvat johtimesta, eristyksestä ja suojauksesta (Kuva 1). Johdinmateriaalina käytetään joko alumiinia tai kuparia. Kun puhutaan kaapelin poikkipinta-alasta niin silloin puhutaan kaapelin johtimen poikkipinta-alasta. Johtimen poikkipinta-ala määrittää kaapelin kuormitettavuuden. Johtimen valmistuksessa on kaksi eri vaihetta: johtimen langan vetäminen ja hehkuttaminen haluttuun halkaisijaan sekä kertaus, jossa johtimen lankoja kerrataan niin monta kertaa, että saavutetaan haluttu poikkipinta-ala. Sen jälkeen johdin suojataan ja eristetään halutuilla materiaaleilla ja kerroksilla. Suojauksen ja eristyksen materiaalit ja kerrokset riippuvat kaapelin käyttötarkoituksesta.



Kuva 1. AHXAMK-W kaapelin rakenne (Reka 2022, muokattu)

Prysmian Group Finland Oy:n Pikkalan tehtaalla erikoisuutena on merikaapelin valmistus. Merikaapelia käytetään sähköenergian siirtoon vesistöjen yli tai erittäin hankalissa olosuhteissa esimerkiksi kaivoksissa. Merikaapelissa on kaapelin suojana lyijyvaippa sekä teräslanka-armeeraus. Merikaapelin sisälle voidaan myös asentaa valokuitu tiedon siirtoa varten. Merikaapeli lastataan laivaan Pikkalan tehtaalla rannassa (Kuva 2) ja laiva kuljettaa ja laskee merikaapelin haluttuun paikkaan.



Kuva 2. Merikaapelin lastaus käynnissä (Prysmian Group Finland Oy 2022d)

3 TEOLLISUUDEN SÄHKÖVERKON SUUNNITTELU

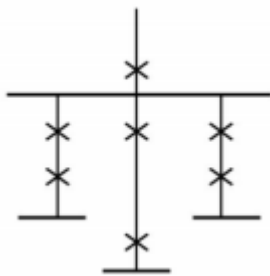
Teollisuuden sähköverkko on yksittäisen teollisuusalueen sisäinen sähköverkko. Yleensä pienelle alueella rajoittuvassa sähköverkossa on lyhyet sähköenergian siirtoetäisyydet ja suuri sähköenergian kulutus. Teollisuuden sähköverkko koostuu yleensä pääsähköasemasta ja muuntamoista. Teollisuuden sähköverkolta vaaditaan vahvaa liityntää sekä suurien oikosulkuvirtojen kestoa. Teollisuuden sähköverkko voidaan jakaa eri osiin käytön perusteella. Käyttö jakaantuu tuotannon sähköjakeluun, valaistus- ja huoltosähköverkkoon ja apusähköjärjestelmään (Korpinen 1998, luku 3, 9.)

3.1 Teollisuuden sähköverkkojen rakennevaihtoehdot

Teollisuuden sähköverkoissa on käytössä muutamia erilaisia rakennevaihtoehtoja. Jokaisella sähköverkon rakennetyypillä on omat hyötynsä ja haittansa. Teollisuuden sähköverkkoa suunniteltaessa on otettava huomioon sen käyttöön liittyvät tekniset ominaisuudet. Teollisuuden sähköverkkoa suunniteltaessa on huomioitava käytön taloudellisuus ja luotettavuus, varasyöttöjen mahdollisuus, investoinnin hinta ja erityisesti sähköverkon suojaukseen liittyvät näkökohdat (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1.)

3.1.1 Säteilteisverkko

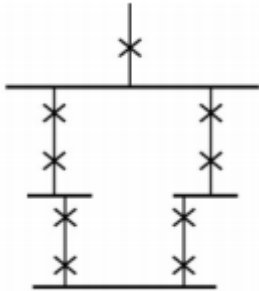
Säteilteisverkon etuja ovat suojauksen helppous ja käytön yksinkertaisuus. Huonoina puolina voidaan pitää käyttövarmuuden puuttuminen ja huoltojen aiheuttamat keskeytykset käytössä (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1.)



Kuva 3. Säteilteisverkko (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1)

3.1.2 Rengasverkko

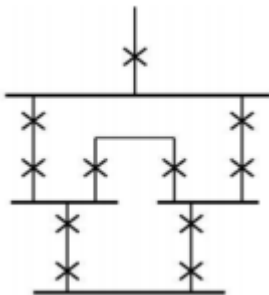
Rengasverkon etuna on parempi jännitevakaus, pienemmät tehohäviöt ja käyttövarmuus. Huonoja puolia ovat käytön vaikeus ja suojauksen monimutkaisuus (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1.)



Kuva 4. Rengasverkko (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1)

3.1.3 Silmukkaverkko

Silmukkaverkon etuja ovat rengasverkkoakin paremmat syötön käyttövarmuudet, jännitteen vakauden ja pienemmät tehohäviöt. Huonona puolena on vielä rengasverkkoakin vaikeampi käyttö ja suojaus (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1.)



Kuva 5. Silmukkaverkko (ABB:n TTT-käsikirja 07-2000, 1)

3.2 Sähköverkon suunnittelu

Sähköverkon suunnittelu on yksinkertaisuudessa sähköntuotannon ja -kulutuksen yhdistämistä. Sähköverkon suunnittelun tärkeimpiä tavoitteita ovat:

- Sähkönjakelun ja -siirron on oltava taloudellista.
- Sähkönjakelun ja -siirron on oltava luotettavaa.

- Sähköverkon ja sen komponenttien on oltava pitkäikäisiä.
- Sähkönjakelu ja -siirto ei saa aiheuttaa vaaraa ihmisille eikä omaisuudelle tai häiritä ympäristöä kohtuuttomasti (Elovaara & Haarla 2019a, 73.)

Verkon on myös toimittava ilman vaurioita ja mahdollisimman hyvin erilaisissa vikatapauksissa. Myös sähkön laadun on oltava riittävää (Elovaara & Haarla 2019a, 73.)

Sähkölaatu on määritelty standardeissa. Laatuvaatimukset on jaettu kolmeen eri ryhmään: pienjännite, keskijännite ja suurjännite. Pienjännitteestä puhutaan, kun jännitteen nimellinen tehollisarvo on $U_n < 1 \text{ kV}$, keskijänniteellä nimellinen tehollisarvo on $1 \text{ kV} < U_n \leq 36 \text{ kV}$ ja suurjänniteellä nimellinen tehollisarvo on $36 \text{ kV} < U_n \leq 150 \text{ kV}$ (SFS-EN 50160:2010, 9-10.)

3.3 Tehdasalueen pääsähköasema ja sähköverkko

Pikkalan tehdasalueen pääsähköasemalla syöttö 10 kV kojeistolle tulee päämuuntajalta, joka on 110/10,5 kV 20 MVA muuntaja ja varasyöttönä toimii puisto-
muuntamo, jossa on 21/10,5 kV 3,5 MVA muuntaja. Pääsähköaseman 10 kV kojeistolta on 1250 A ja 630 A lähtöjä eri muuntamoille. Eri muuntamoiden välillä on myös kaapelointi, joten Pikkalan tehdasalueen sähköverkko on niin kutsuttu rengasverkko (Kuva 4).

Vaikka Pikkalan tehdasalueen sähköverkko on rakennettu rengasverkoksi, niin sitä käytetään säteittäisverkkona helpomman suojauksen vuoksi. Yhteydet eri muuntamoiden välillä eivät ole normaalissa tilanteessa kytkettynä ja niitä käytetään vain vikatilanteissa tai huoltotilanteissa.

4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖLAITTEISTOT

Teollisuuden sähkölaitteistolla käsitetään kokonaisuutta joka muodostuu sähkölaitteista, sähkökeskuksista, kaapeleista yms (Tukes 2022). Tässä opinnäytetyössä käsitellään teollisuuden sähkösyöttöön liittyviä sähkölaitteita ja kaapeleita.

4.1 Sähköasema

Sähköasemalla tarkoitetaan sähkön jakeluverkossa sellaista jakeluverkon kohtaa, missä voidaan jakaa sähköä eri johdoille, muuntaa jännitettä ja suorittaa kytkentöjä. Sähköasemilla on muuntajia ja erilaisia laitteita ja kojeita, jotka hankitaan yleensä tehdasvalmisteisina valmiina kojeistoina. Kojestot sisältävät katkaisijat, erottimet, mittamuuntajat, suojareleet ja pienjänniteverkossa suojavarokkeet (Elovaara & Haarla 2019b, 76.)

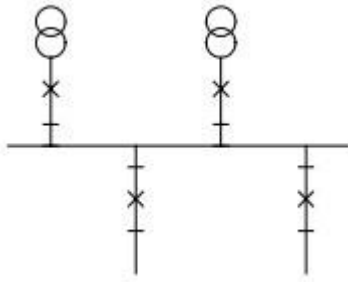
Teollisuuden sähköasema on yleensä rajapinta vastuualueisiin sähkönjakelun verkkoyhtiön ja yrityksen välillä. Sähköasemalla yrityksen sisäinen sähköverkko liitetään jakeluverkkoon. Sähköaseman kytkinlaitteilla suoritetaan kytkennälliset toimenpiteet, joita on virtapiirien kytkeminen ja erottaminen. Kytkinlaitteiden ominaisuuden määrittelevät sen, millaisia ja missä olosuhteissa kytkentätoimenpiteitä voidaan suorittaa (Aura & Tonteri 1993, 330.)

4.2 Kiskostot

Kiskostojen avulla sähköasemalla sähköä jaetaan tarkoituksenmukaisimmalla tavalla. Kiskostojärjestelmiä on monenlaisia ja jokaiseen käyttötarkoitukseen. Kiskostojärjestelmän valinta on riippuvainen käytön taloudellisuudesta ja luotettavuudesta, varasyöttöjen mahdollisuudesta ja investoinnin hinnasta (Aura & Tonteri 1993, 332.)

4.2.1 Yksikiskojärjestelmä

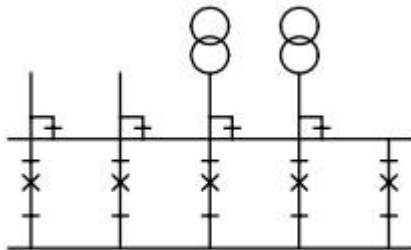
Yksikiskojärjestelmä on yksinkertainen ja halpa rakentaa. Kojestossa tapahtuva vaurio aiheuttaa aina keskeytyksen sähkönjakeluun ja huolto ja korjaus voidaan suorittaa vain verkosta irti kytkettynä. Yksikiskojärjestelmä on yksinkertainen ja helppo suojata (Aura & Tonteri 1993, 332.)



Kuva 6. Yksikiskojärjestelmä (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 1)

4.2.2 Kisko – apukiskojärjestelmä

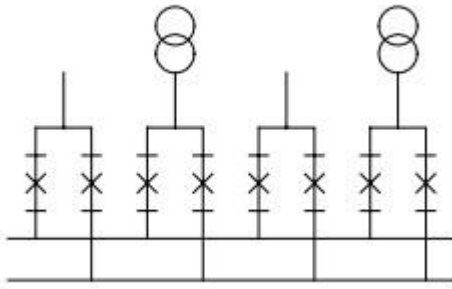
Kisko-apukiskojärjestelmä on luotettavampi kuin yksikiskojärjestelmä. Kisko-apukiskojärjestelmässä voidaan katkaisijat ohi kytkeä apukiskon avulla ja näin huolto- ja korjaustoimenpiteet katkaisijoilla voidaan suorittaa ilman häiriötä sähköjälkelussa, mutta vika pää- tai apukiskossa aiheuttaa keskeytyksen sähköjälkelussa. Suojaukset on mietittävä myös poikkeavia tilanteita varten (Aura & Tonteri 1993, 333.)



Kuva 7. Kisko-apukiskojärjestelmä (ABB:N TTT-käsikirja 2000-07, 2)

4.2.3 Kaksoiskatkaisijajärjestelmä

Kaksoiskiskojärjestelmä on luotettavin järjestelmä. Siinä voidaan huoltaa tai korjata kiskostoja tai katkaisijoita ilman häiriötä sähköjälkelussa. Ne saadaan jännitteettömäksi käytön aikana huoltoa tai korjausta varten. Haittapuolena on kalliit rakennuskustannukset ja hankalat suojausjärjestelmät (Aura & Tonteri 1993, 334.)



Kuva 8. Kaksoiskatkaisijajärjestelmä (AAB:n TTT-käsikirja 2000-07, 4)

4.3 Muuntamo

Muuntamolla tarkoitetaan sellaista sähköverkon osaa, jossa jakelujännite muunnetaan loppukäyttäjälle pienjännitteeksi. Muuntamon komponentteja ovat keski-jännitekojeisto, muuntaja sekä pienjännitelähtö. Muuntamossa on myös pienjänniteverkon ylikuormitus- ja vikavirtasuojaus. Suomessa yleisimmät muuntamotyypit ovat puisto-, pylväs- tai kiinteistömuuntamo (Lakervi & Partanen 2008, 157.)

4.4 Kaapelit

Sähkön siirrossa käytettävät johdot ovat joko kaapeleita tai ilmajohtoja. Yleensä kaapeleiksi tulkitaan johdot, joissa johtimen eristämiseen on käytetty muuta kuin ilmaa, mutta määräysteknisesti raja kulkee asennustavassa. Kaapelit asennetaan sisätiloissa kaapelihyllylle tai vastaavalle ja ulkona maahan tai veteen, ilmajohdot ripustetaan ulos pylväiden varaan (Elovaara & Haarla 2019b, 250.)

Kaapeleiden rakenne riippuu niiden käyttötarkoituksesta ja kaapeli voi koostua johtimesta, johdinsuojasta, johdineristeestä, hohtosuojasta, kosketussuojasta, vaipasta, armeerauksesta ja korroosiosuojasta. Johdinmateriaalina käytetään yleensä kuparia tai alumiinia. Alumiinia käytetään varsinkin suurissa johdinpoikkipinta – alan kaapeleissa keveytensä vuoksi. Alumiinin heikkoutena on kuitenkin kuparia suurempi resistiivisyys, joten saavuttaakseen saman virranjohtokyvyn kuin kuparijohdin alumiinijohtimen tulee olla poikkipinta-alaltaan noin 50 % suurempi (Elovaara & Haarla 2019b, 307.)

4.5 Keskijännitekaapeleiden mitoitus

Keskijännitekaapelissa on tehdasvalmisteinen korroosiota ja kosteutta ja mekaanista rasitusta kestävä vaippa suojaamassa yhtä tai useampaa johdinta. Suuntaus on kohti muovieristeisiä kaapeleita: Suomessa lopetettiin 1980-luvun puolivälissä paperieristeisten 20 kV kaapeleiden valmistus (Elovaara & Haarla 2019b, 303.)

Keskijännitekaapelin valinnassa ja mitoittamisessa on otettava huomioon:

- Kuormitettavuus
- Jännitteen alenema
- Oikosulkukestoisuus
- Käyttövarmuus
- Taloudellisuus
- Sähköturvallisuusmääräykset (Verkostosuositus SA 5:94, 3.)

Lisäksi huomioon tulee ottaa johtoreittien valinta, maaston tyyppi, tiet ja muiden virtapiirien läheisyys. Nämä kaikki vaikuttavat keskijännitekaapelin poikkipinta – alaan. Keskijännitekaapelin poikkipinta-ala, asennustapa, ympäristön lämpötila ja muut mahdolliset lähelle asennetut kaapelit määrittelevät kaapelin kuormituskestävyyden (Elovaara & Haarla 2019b, 250.)

Kaikille asennustavoille ja muille asioille mitä kaapelin mitoituksessa tulee ottaa huomioon löytyy korjauskertoimet taulukoista. Esimerkiksi Kuva 9 on taulukot korjauskertoimen määrittelyyn maanlämpöresistiivisyyden mukaan (SFS 6000-5-52:2017, 51.)

Lämpöresistiivisyys, K·m/W	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5	3
Korjauskerroin putkiin asennetuille kaapeleille	1,28	1,20	1,18	1,1	1,05	1	0,96
Korjauskerroin suoraan maahan asennetuille kaapeleille	1,88	1,62	1,5	1,28	1,12	1	0,90
<p>HUOM. 1 Tässä annetut korjauskertoimet ovat keskiarvoja taulukoissa B.52.2 – B.52.5 esitetyistä johdintyypeistä ja ko'ista. Korjauskertoimien yleinen tarkkuus on $\pm 5\%$.</p> <p>HUOM. 2 Korjauskertoimet soveltuvat maahan upotettuihin putkiin asennetuille kaapeleille. Korjauskertoimet ovat suurempia suoraan maahan, jonka lämpöresistiivisyys on vähemmän kuin 2,5 K·m/W, asennetuille kaapeleille. Jos tarvitaan tarkempia arvoja, ne voidaan laskea IEC 60287-sarjassa esitetyillä menetelmillä.</p> <p>HUOM. 3 Korjauskertoimet soveltuvat enintään 0,8 m syvyyteen asennetuille suojaputkille.</p> <p>HUOM. 4 Oletetaan maan ominaisuuksien olevan tasaisia. Kosteuden pienenemistä kaapelin lähellä, joka voi johtaa kaapelin lähellä korkean lämpöresistiivisyyden alueeseen, ei ole otettu huomioon. Jos maaperän osittainen kuivuminen halutaan ennakoita, sallittu kuormitettavuus pitäisi määrittellä IEC 60287-sarjassa esitetyillä menetelmillä.</p>							

Kuva 9. Korjauskertoimet kaapeleille käytettäväksi asennustavan D kuormitettavuuksille (SFS 6000-5-52:2017, 51)

4.6 Sähkökeskus

Sähkökeskuksella tarkoitetaan sähköverkon osaa, jossa muuntajalta tuleva syöttö jaetaan eteenpäin. Sähkökeskuksessa on käyttötarkoituksesta riippuen pääkytkin ja johdonsuojat jokaisella lähdöllä. Pääkytkimen tulee mitoittaa niin, että se kestää muuntajan ylikuorman. Pääkytkin tulee olla myös kuormakytkin, joka voi avata ja sulkea ylikuormassa olevan muuntajan. Yli 1000 A sähkökeskus tulee varustaa maadoituskytkimillä (ST 53.11 2018, 14.)

4.7 Muuntamon maadoitus

Maadoituksen tarkoituksena on yhdistää kojeisto maahan mahdollisimman tehokkaasti maadoituselektrodin välityksellä. Sen tehtävänä on maadoittaa virtapiirin kuuluva osa, joka on jännitteelle altis esimerkiksi keskijännitekojeiston metallinen runko (Elovaara & Haarla 2019b, 427.)

Muuntamoille on aina rakennettava maadoituselektrodi ja verkonhaltijalta tiedustellaan maadoituselektrodeille vaadittua impedanssia. Maadoituselektrodi voi olla rakenteeltaan:

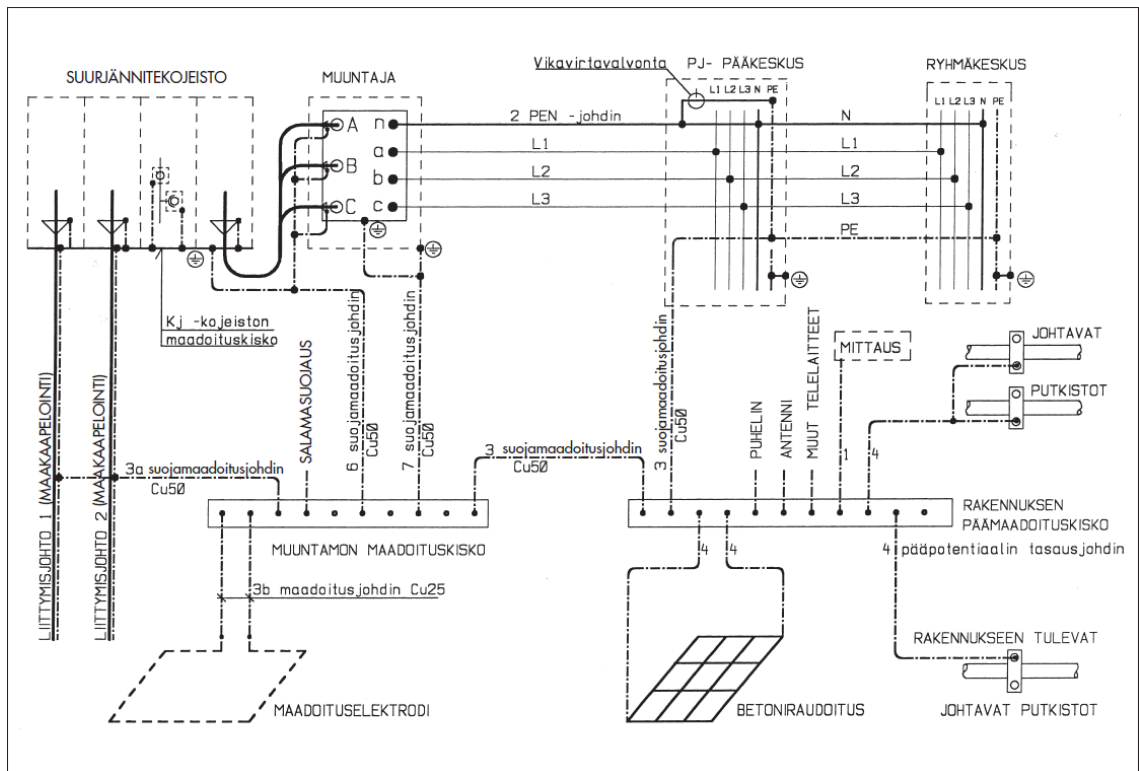
- *Syvämaadoitukset rakennettuna paalutuksen yhteydessä. Esimerkiksi 2–4 paalun mukana asennetaan 25 mm² Cu - köydet, jotka yhdistetään puristusliitoksiin ja tuodaan muuntamoon kahdella 25 mm²:n köydellä.*

- Rakennuksen kiertävä 25 mm² Cu-maadoitusköysi, jonka kumpikin pää tuodaan muuntamon maadoituskiskoon.
- Liittymisjohtojen ojaan asennetut 2 kpl 25 mm² Cu – maadoitusköydet, yksi kummankin liityntäkaapelin ojaan (ST 53.11 2018, 15)

Kuva 10 on muuntamon ja siihen liittyvän sähköverkon esimerkkimaadoitus. Maadoituksella voidaan estää vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen sekä vaarallisten valokaarien, kipinäiden ja vuotovirtojen syntyminen. Maadoituksella myös saadaan aikaan vikavirrälle ohjattu reitti maahan, jolloin vikavirta on niin suuri, että suojalaitteet toimivat niille asetettujen vaatimusten mukaan (Orrberg & Tiainen 2017, 99.)

Standardissa 6001 on määritelty tarkemmin maadoituksen mitoitukset ja mitoitustavat. Olennaiset tekijät maadoituksen mitoittamiseen on vikavirran suuruus, vikavirran kestoaika ja maadoituselektrodin ja maaperän ominaisuudet. Standardissa myös määritellään maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta – alat:

- kupari 16 mm²
- alumiini 35 mm²
- teräs 50 mm² (SFS 6001:2018, 87)



Kuva 10. Muuntamon maadoitukset (ST 53.11 2018, 20)

5 UUSI MUUNTAMO

Pikkalan tehdasalueella on monta muuntamo, mutta tulevaisuudessa tuotantolinjojen ja -kapasiteetin lisääntyessä suunnitteilla on uusi muuntamo. Muuntamon kapasiteetistä on vielä vain alustavia laskelmia, mutta pääsähköasemalla syötön suojana toimii 630 A katkaisija aseteltavalla suojareleellä. Tätä tietoa käytetään sähkösuunnittelun lähtökohtana. Sähkösuunnittelussa ja laskelmissa pyritään huomiomaan myös tulevaisuuden laajentumistarpeet. Muuntajat ovat samanlaisia muuntajia mitä tehdasalueella on jo käytössä, 10/0,4 kV 1600 kVA muuntajia. Jokaisen muuntajan syöttää sähköpääkeskusta, josta on kolme yhtä suurta lähtöä. Tämä sallii sähköaseman vaiheittaisen rakentamisen, kun keskijännitekojeistot ja muuntajat ovat kaikki samanlaisia. Lopullisessa suunnitteluvaiheessa tarvitsee huomioida vain laitteiden vaatima tila.

5.1 Muuntamon suunnittelu

Sähköasemien, muuntamoiden ja kojeistojen suunnittelussa ja mitoituksessa on otettava huomioon olosuhteet missä niitä käytetään, syöttävän verkon ominaisuudet sekä Suomessa noudettavat sähkölait, sähköturvallisuusmääräykset, standardit ja asetukset. Näiden lisäksi rakennuksien osalta tulee huomioida ja noudattaa maankäyttö- ja rakennuslakeja sekä asetuksia. Standardissa 6001 määritellään nimellisjännitteeltään yli 1 kV ja nimellistaajuudeltaan enintään 60 Hz vaihtojännitteisten sähköasennusten suunnittelua ja rakentamista. Standardissa luetaan suurjänniteasennuksiksi:

- *Sähköasemat, mukaan lukien sähköradan syöttöasemat*
- *Pylväisiin ja mastoihin sijoitettavat sähkölaitteistot*
- *Sähkötilojen ulkopuolella sijaitsevat kojeistot ja/tai muuntajat*
- *Samassa paikassa sijaitseva yksi tai useampi voimalaitos*
 - o *Sähköasennus käsittää generaattorit ja muuntajat ja kaikki niihin liittyvät kojeistot ja apusähköpiirit. Eri paikoissa sijaitsevien voimalaitosten väliset liitännät eivät kuulu tämän standardin piiriin.*
- *Tehtaan, teollisuuslaitoksen tai muun teollisen, maatalouden, kaupallisen tai julkisen kiinteistön sähköjärjestelmä*
- *Merellä olevilla alustoilla sijoitetut sähköasennukset, esim. merituulipuistot (SFS 6001:2018)*

SFS 6001 standardin lisäksi sähköasemien ja muuntamoiden suunnittelussa pitää ottaa huomioon monia muita lakeja ja standardeja, esimerkiksi:

- Sähköturvallisuuslaki 1135/2016
- SFS 6000 Pienjänniteasetukset
- SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus
- ST-kortisto 53.11 Kuluttajamuuntamot

Lyhyesti sanottuna kauppa- ja teollisuusministeriö on antanut päätöksen (1193/1999) sähkölaitteistojen turvallisuudesta. Siinä käsitellään sähköturvallisuuslain 1. luvun 4 § tarkoitetujen sähkölaitteistojen toiminnallista ja rakenteellista turvallisuutta. Kun sähkölaitteistot on suunniteltu standardien mukaan, silloin myös turvallisuusvaatimukset täyttyvät.

Sähköasemien suunnittelu aloitetaan yleensä tarpeesta. Johonkin on tarve siirtää sähköenergiaa ja sen sähköenergian määrän tarve määrittelee sähköaseman suunnittelun lähtökohdat. Suunnittelun aloittamiseksi ei välttämättä tarvita kuin muutama asia. Kun tiedetään sijaintipaikka, jännitetaso ja siirrettävän tehon määrän, voidaan alkaa suunnittelemaan sähköasemaa. Suunnitteluprosessin aikana on mietittävä ja ratkaistava monta asiaa, esimerkiksi:

- Tehon kasvuennuste
- Ympäristöolot
- Maisemakysymykset
- Rakennusajankohta
- Taloudellisuus
- Muuntajien lukumäärä
- Muuntajien kuljetusmahdollisuudet
- Maapohjan kantavuus
- Johtojärjestelyt aseman ulkopuolella
- Laitososien keskinäinen sijainti
- Ajo- ja huoltotiet
- Laajennettavuus
- Kiskojärjestelmät ja kojeistorakenteet
- Luotettavuusvaatimukset
- Mitoitusvirrat ja oikosulkukestoisuus
- Eristystasot
- Yksittäistenkojeiden ja laitteiden mitoitus
- Käyttö-, suojaus-, ohjaus- ja asennonosoitusjärjestelmät

- Teleyhteydet
- Sähköaseman oma sähköntarve
- Tasasähköjärjestelmät
- Maadoitus
- Paloturvallisuus (Elovaara & Haarla 2019b, 96-97)

5.2 Keskijännitekaapelin mitoittaminen

Pääsähköaseman ja keskijännitekojeiston välisen kaapelin jännitteen alenemalla ei ole niin suurta merkitystä, koska muuntajat ovat käämikytkinmuuntajia. Käämikytkimellä varustetulla muuntajalla voidaan säätää muuntajan toisiojännite vakioksi vaikka muuntajan ensiojännite muuttuisi. Tämän vuoksi voidaan sallia kaapeloinnilta jopa 10 % jännitteen aleneman.

5.2.1 Keskijännitekaapelin mitoittaminen taulukoista

Keskijännitekaapelia voidaan mitoittaa kahdella erilaisella tavalla, joko laske-
malla kuormituksen mukaan tai katsomalla taulukosta keskijännitekaapelia suo-
jaavan sulakekoon mukaan. Nykyisin yleisempi tapa on katsoa taulukkoa kaape-
lin suojauksen mukaan.

Jos kaapelin suojana on sulake, täytyy kaapelin kuormituksessa huomioida su-
lakkeen epätarkkuus ja hitaus Kuva 11 olevan taulukon mukaan. Sulakkeen ol-
lessa epätarkka virran suhteen vaaditaan kaapelilta enemmän kuormitettavuutta.
Tehdasalueen suojauksena käytetään releistystä, joka on sulaketta tarkempi ja
herkempi ja laukaisuaika on aseteltavissa. Kun kaapelin suojana käytetään re-
leistystä, voidaan käyttää mitoituksessa Kuva 13 olevaa taulukkoa.

gG tyyppisen sulakkeen nimellisvirta A	Johtimen kuormitettavuuden minimiarvo A
6	8
10	13,5
16	18
20	22
25	28
32	35
35	39
40	44
50	55
63	70
80	88
100	110
125	138
160	177
200	221
250	276
315	348
400	441
500	552
630	695
800	883

Kuva 11. Johtimen kuormitettavuuden minimiarvot erilaisilla sulakkeilla (SFS 6000-5-52:2017, 76)

ABB:n TTT-käsikirjan taulukosta (

Kuva 12) katsottuna, 630 A kuormitusvirralla tarvitaan poikkipinta-alaltaan 630 mm² alumiinikaapeli asennettuna maahan kolmioon. 630 mm² 10 kV kaapelin ollessa harvinainen ja kallis kannattaa miettiä, voidaanko kaapelointi toteutettua pienemmällä kaapelilla rinnankytkennällä. Rinnankytkennässä kaksi kaapelia kytketään molemmista päistä samaan vaiheeseen. Kaapeleiden rinnan kytkennässä on varmistettava, että kuormitusvirta jakaantuu tasan rinnankytkettyjen kaapeleiden välillä. Tämän vaatimuksen katsotaan täyttyvän, jos:

- kaapelit ovat saman pituisia, johdin samaa materiaalia ja niillä on sama poikkipinta-ala
- kaapelit ovat monijohdinkaapeleita tai eristettyjä kaapeleita tai kierrettyjä yksijohdinkaapeleita (Kaipia 2013, 22)

Johtimen poikkipinta mm ²	Kuormitusvirta							
	A							
	Kaapelit ilmassa				Kaapelit maassa			
	tasossa		kolmiossa		tasossa		kolmiossa	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
50	255	205	250	195	220	170	205	155
70	320	255	295	235	270	215	255	200
95	380	310	355	280	315	250	295	235
120	430	350	410	325	345	280	335	265
150	480	395	465	370	385	315	380	300
185	535	440	535	425	425	350	425	330
240	615	515	620	490	485	395	485	385
300	685	580	705	565	530	440	545	435
400	785	680	835	680	590	500	625	510
500	870	755	940	775	645	550	695	570
630	960	840	1035	880	700	610	755	635
800	-	1010	-	1010	-	650	-	695

Kuva 12. Kolmen PEX-eristeisen yksijohdinkaapelin sallitut jatkuvat kuormitusvirrat. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 11)

Näin kuormitus voidaan jakaa molemmille kaapelille tasan, kun käytetään rinnankytkennässä kahta samanlaista kaapelia, eli kuormitusvirta kaapelia kohden on 630 A jaettuna kahdella. Kaapelin kuormitusvirraksi näin ollen tulee 315 A. Kaapelin kuormitettavuudessa on otettava huomioon myös asennustapa ja lähellä olevat kaapelit. Kaapelit asennetaan vierekkäin maahan kaapelikaivantoon 0,7 m:n syvyyteen. Kaapelia valittaessa kaapelin kuormitettavuudella katsotaan korjauskertoimet taulukoista asennustavasta riippuen. Maahan asennettaessa on huomioitava asennussyvyys 0,7 m ja korjauskerroin 1 (Kuva 14). Vierekkäisten kaapeleiden läheisyys 0 mm, joten korjauskertoimeksi tulee 0,79 (Kuva 15). Maan lämpöresistiivisyyden vaikutus, maalajina puolikuiva savi ja kostea sora, korjauskertoimeksi tulee 1 (Kuva 16). Maan lämpötilan vaikutus, lämpötila 15°C, korjauskertoimeksi tulee 1 (Kuva 17). Maalajien lämpöresistiivisyydestä esimerkkejä:

- Kuiva hiekka (kosteus 0%) 3,0 Km/W
- Kuiva sora ja savi 1,5 Km/W
- Puolikuiva sora, suomuta ja hiekka (kosteus 10%) 1,2 Km/W
- Puolikuiva savi ja kostea sora 1,0 Km/W
- Kostea savi ja hiekka 0,7 Km/ (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 10)

Kun kuormitusvirta jaetaan asennustavan korjauskertoimella, tulokseksi saadaan virta määrä minkä kaapelin tulee kestää. Kokonaiskorjauskertoimeksi tulee 0,79 ja kun 315 A jaetaan luvulla 0,79 saadaan tulokseksi 399 A. Kaapelin tulee siis kestää 399 A kuormitus. Kuva 13 olevassa taulukosta voidaan katsoa, että 240 mm² kaapeli kestää 425 A kuormituksen. Kaapeliksi valitsemme Wiski®-maakaapeli AHXAMK-W 3x240 Al+35 Cu. Kuva 18 valmistajan datalehti, josta näemme Wiski®-maakaapeli AHXAMK-W 3x240 Al+35 Cu tarkemmat ominaisuudet.

Johtimen pikkipinta mm ²	≤ 6/10 (12) kV								>6/10 (12) ≤ 18/30 (36) kV			
	Kupari				Alumiini				Kupari		Alumiini	
	PVC		XLPE tai EPR		PVC		XLPE tai EPR		XLPE tai EPR		XLPE tai EPR	
	Ilmassa	Maassa	Ilmassa	Maassa	Ilmassa	Maassa	Ilmassa	Maassa	Ilmassa	Maassa	Ilmassa	Maassa
25	120	130	155	160	93	100	120	125	160	160	125	125
35	145	160	190	190	115	120	145	150	195	190	150	145
50	175	185	225	225	135	145	175	175	230	225	175	175
70	215	230	280	275	165	180	215	215	280	270	220	210
95	260	275	340	330	205	210	260	255	345	330	265	255
120	300	310	385	370	235	240	300	290	395	370	305	290
150	340	345	445	420	265	270	345	325	450	415	345	320
185	385	390	510	470	300	305	395	365	510	465	395	360
240	450	450	590	540	355	350	465	425	600	540	470	420

Kuva 13. 3 - johtimisien kaapeleiden sallittu jatkuva kuormitusvirta (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 10)

Asennus-syvyys m	Kaapelin nimellisjännite		
	0,6 / 1 kV	6/10...12 / 20 kV	64 / 110 kV
0,50...0,70	1,00	1,00	1,05
0,71...0,90	0,97	0,99	1,02
0,91...1,10	0,95	0,98	1,00
1,11...1,30	0,93	0,96	0,97
1,31...1,50	0,92	0,95	0,95

Kuva 14. Asennussyvyyden vaikutus maassa (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 11)

Kaapelin tai 1 johdinkaapeli- ryhmien vapaa välimatka mm	Vierekkäisten kaapelien tai yksijohdinkaapeleiden lukumäärä						
	2	3	4	5	6	8	10
	Korjauskertoimen						
0	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,5	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Kuva 15. Maassa olevien vierekkäisten kaapeleiden läheisyyden vaikutus (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 11)

Maan lämpöresistivisyys K · m / W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
0,6 / 1 kV							
25 mm ² saakka	1,11	1	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35...95 mm ²	1,13	1	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120...500 mm ²	1,14	1	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63
6 / 10 kV							
25 mm ² saakka	1,09	1	0,95	0,88	0,80	0,74	0,69
25...95 mm ²	1,11	1	0,94	0,87	0,78	0,72	0,66
120...500 mm ²	1,12	1	0,93	0,86	0,77	0,70	0,65
12 / 20 kV							
25 mm ² saakka	1,08	1	0,96	0,90	0,81	0,75	0,70
35...95 mm ²	1,10	1	0,95	0,89	0,79	0,73	0,67
120...500 mm ²	1,11	1	0,94	0,88	0,78	0,72	0,66
18 / 30 - 34,6 / 60 kV							
95 mm ² saakka	1,08	1	0,95	0,90	0,82	0,76	0,71
120...500 mm ²	1,09	1	0,95	0,89	0,80	0,74	0,69

Kuva 16. Maan lämpöresistivisyyden vaikutus (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 12)

Johtimen lämpötilä °C	Maan lämpötilä °C					
	5	10	15	20	25	30
	Korjauskerroin					
80	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88
70	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85
60	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84

Kuva 17. Maan lämpötilän vaikutus (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 12)

TUOTTEEN NIMI			AHXAMK-W 3x50Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x95Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x120Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x150Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x185Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x240Al+35Cu 10 kV	AHXAMK-W 3x300Al+35Cu 10 kV
Sähkönumero			0624150	0624152	0624153	0624154	0624155	0624156	0624157
RAKENNETIETOJA (1)									
Johtimen halkaisija	mm		8,0	11,3	12,7	14,1	15,7	18,1	20,3
Vaihevalpan halkaisija	mm		24	27	29	30	32	35	37
Kaapelin ulkohalkaisija (ympäri piirretyn ympyrän halkaisija)	mm		54	61	64	67	70	76	81
Massa	alumiini kupari kaapeli	kg/km kg/km kg/km	500 305 1800	890 305 2450	1100 305 2750	1330 305 3100	1650 305 3500	2100 305 4200	2600 305 4950
TOIMITUSTIETOJA									
Vakiotoimituspituus	m		500	500	500	500	500	500	500
Toimituskela			K22	K24	K24	K24	K26	K26	K26
Massa (1)	kaapeli+kela	kg	1310	1680	1830	2000	2650	3000	3380
MEKAANISIA ARVOJA (3)									
Pleinin sallittu taiputussäde asennusvedossa	vaihe kaapeli	m	0,36 0,43	0,41 0,49	0,44 0,51	0,45 0,54	0,48 0,56	0,53 0,61	0,56 0,65
Pleinin sallittu taiputussäde lopullisessa asennuksessa (4)	vaihe kaapeli	m	0,25 0,30	0,28 0,34	0,30 0,36	0,32 0,38	0,34 0,39	0,37 0,43	0,39 0,45
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla		kN	2,2	4,3	5,4	6,8	8,3	8,5	8,5
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä		kN	7,5	14,3	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3)									
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johtin 20°C	Ω/km	0,641	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1) (2)	johtin 65°C johtin 90°C	Ω/km Ω/km	0,76 0,82	0,38 0,41	0,30 0,33	0,25 0,27	0,20 0,21	0,15 0,16	0,12 0,13
Keskusköyden maks. tasavirtaresistanssi	johtin 20°C	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,43	0,38	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32
Käyttökapasitanssi (1)		μF/km	0,25	0,32	0,35	0,38	0,41	0,47	0,52
Varausvirta (1)		A/km	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9
Maasulkuvirta (1)		A/km	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8
KUORMITETTAVUUS (3)									
Maassa (2)	johtin 65°C	A	155	235	265	300	330	385	435
Ilmassa (2)	johtin 65°C	A	160	230	265	300	345	400	460
	johtin 90°C	A	195	280	325	370	425	490	565
TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (3)									
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohtin (5)	kA	4,7	8,9	11,3	14,1	17,4	22,6	28,3
	kosketussuoja (6)	kA	2,1	2,4	2,5	2,5	2,7	3,0	3,3
	keskusköysi (7)	kA	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Kuva 18. Wiski®-maakaapeli AHXAMK-W 10 kV datalehti (Prysmian Group 2022)

Jännitteen alenema pääsähköaseman ja keskijännitekojeiston välillä voidaan laskea kaavalla 1. Kaavassa 1 reaktanssi on induktiivista reaktanssia ja se voidaan laskea kaavalla 2. Jännitteenaleneman laskemista varten tulee tietää kuormituksen pätö – ja loisteho. Näiden avulla voidaan määrittää vaihejännitteen ja vaihevirran välinen vaihesiirtokulma.

$$U_h = I(R * \cos\varphi + X * \sin\varphi) \quad (1)$$

jossa U_h on vaihejännitteen alenema
 I on johtimen virta
 R on johtimen resistanssi
 X on johtimen reaktanssi

φ on vaihejännitteen ja vaihevirran välinen vaihe-
siirtokulma

$$X = 2 * \pi * f * L \quad (2)$$

jossa f on taajuus
 L on induktanssi

5.2.2 Keskijännitekaapelin mitoittaminen laskemalla

Keskijännitekaapelin poikkipinta-ala voidaan myös laskea kaavalla 3. Tässä vaiheessa suunnittelua ei vielä tiedetä kuormitusta ja kuormituksen pätötehoa, joten kaavasta korvataan pätöteho näennäisteholla. Näennäisteho lasketaan kaavalla 4, kaapelin suojana olevan releistyksen avulla. Kaapelin poikkipinta-alaksi saadaan laskemalla 670 mm². Sen jälkeen katsotaan valmistajan sivuilta sitä lähellä olevan kaapeli ja datalehddestä näemme, onko siinä riittävät ominaisuudet meidän vaatimuksiimme. Lähin kaapeli on 630 mm² kaapeli ja Kuva 12 olevassa taulukosta toteamme saman kuin aikaisemmin, 630 mm² kaapelin jatkuva kuormitusvirta saa olla 635 A maahan kolmioon asennettuna.

$$A = \frac{100 * P * l}{p * \gamma * U^2} \quad (3)$$

jossa A on Kaapelin poikkipinta – ala
 P on Pätöteho
 l on Kaapelin pituus
 p on Sallittu jännitteen alenema
 γ on Kaapelin johdinaineen sähkönjohtavuus
 U on Jännite

(Aura & Tonteri 1993, 86)

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (4)$$

jossa S on Näennäisteho
 U on Jännite
 I on Virta

5.3 Yhteys viereiselle muuntamolle

Tehdasalueen sähköverkko on rengasverkko, joten uudelta muuntamolta luodaan yhteys myös viereiselle muuntamolle. Uutta muuntamoita voidaan syöttää joko pääsähköasemalta tai viereiseltä muuntamolta. Myös viereistä muuntamoita voidaan syöttää uuden muuntamon kautta. Viereisen muuntamon ja uuden muuntamon yhteys rakennetaan myös samanlaisella kaapeloinnilla kuin uuden muuntamon ja pääsähköaseman välinen kaapelointi on toteutettu.

5.4 Keskijännitekojeisto

Keskijännitekojeistolla tarkoitetaan rakennekokonaisuutta, joka sisältää suojaus-, ohjaus-, kytkentä- ja valvontalaitteet. Keskijännitekojeisto käytetään sähköjohdossa, missä tarvitaan katkaisua, erotusta, suojausta ja ohjausta. Keskijännitekojeiston eristysaineena voidaan käyttää ilmaa, eristyskaasua tai hartsieristystä. Tehdasalueen keskijännitekojeiston eristysaineena on käytössä SF₆-suojakaasu. SF₆-suojakaasulla on erinomainen eriste- ja valokaaren sammutuskyky (Elovaara & Haarla 2019b, 177-178.)

Keskijännitekojeistot rakennetaan lähes aina tehdasvalmisteisina. Tehdasvalmisteisten kojeistojen etuna on hinta ja ne noudattavat kansainvälisiä normeja ja niiden edellyttämiä testauksia. Myös kaasueristeisten kojeistojen rakentaminen onnistuu vain tehdasmaisesti (Aura & Tonteri 1993, 348.)

Uuden muuntamon keskijännitekojeisto noudattelee myös tehdasalueella käytössä olevien keskijännitekojeistojen rakennetta ja kojeistot tilataan valmiina pakettina toimittajalta. Tehdasalueella olevat keskijännitekojeistot sisältävät kolme tulokennoa, pääkatkaisija- ja suojauskennon, mittauskennon sekä tarvittavat lähtökennot muuntajille. Liitteessä 1 on keskijännitekojeiston pääkaavio.

Tulokennoa on kolme: yksi kenno syöttöä varten pääsähköasemalta, yksi kenno rengassyöttöä varten viereiseltä keskijännitekojeistolta ja yksi kenno varalta. Tulokennot ovat tyypiltään kuormaerotinkenoja. Kuormaerotinkenoja käytetään erottamaan toisistaan kuormitusvirrallisia verkon osia ja ne voidaan avata ja sulkea jännitteellisenä.

Pääkatkaisija- ja suojauskennon tehtävänä on suojata verkkoa esimerkiksi oikosulku- ja maasulkuvirroilta. Pääkatkaisija kykenee katkaisemaan turvallisesti virtapiirin suurimman mahdollisimman virran. Suojauskennossa on relesuojaus ja releenä käytetään ABB:n REF620 releitä (Kuva 19). REF620 releellä voidaan asettaa arvot monelle eri mittaukselle ja suojaukselle.



Kuva 19. ABB:n REF620 (ABB 2022c)








Muuntajien lähtökenttien tehtävänä on syöttää jännitettä muuntajille. Lähtökenttien ovat tyypiltään varokekuormaerotinkenttiä. Varokekuormaerotinkenttiä käytetään muuntajien kytkinlaitteena ja suojausena. Varokekuormaerotinkenttien varokkeen koko määritetään muuntajan mukaan kaavalla 5, tulokseksi tulee muuntajan ensiövirta. Kaavalla 5 laskettaessa ensiön virraksi saadaan 93 A. Lähimmät varokekoot ovat joko 80 A tai 100 A. 80 A varoke estäisi muuntajan nimelliskuormituksen, joten varokkeeksi valitaan 100 A.

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N1}} \quad (5)$$

jossa	S_N	on	muuntajan teho
	U_{N1}	on	ensiön jännite
	I_{N1}	on	ensiön virta

Muuntajan syöttökaapeliksi valitaan Prysmian Groupin valmistama teollisuuskäyttöön tarkoitettu alumiinijohtiminen PEX-eristeen halogeeniton keskijännitekaapeli, joka sopiva kiinteisiin hyllyasennuksiin sisällä. Kaapelin kuormituksen kesto pitää olla vähintään 110 A, jos kaapelin suojana on 100 A varoke (Kuva 11). Prysmian Group:n valmistama AHXCMK-HF B2ca kaapelin pienin poikkipinta-ala on 95 mm². Kuva 20 voimme katsoa sen suurimman sallitun

kuormituksen asennustavalla E. Asennustapa E on tikashyllyjärjestelmä, jossa ilma pääsee vapaasti virtaamaan kaapelin ympärillä. Tikashyllyssä on metalliosaa vähemmän kuin 10% pohjan pinta-alasta (SFS 6000-5-52:2017, 34). AHXCMK-HF B2ca 3x95/25 kaapelia saa kuormittaa 227 A virralla, kun asennustapa on E.

Johtimien nimellis- poikkipinta mm ²	Taulukon B.52.1 mukaiset asennustavat							
	Monijohdinkaapelit		Yksijohdinkaapelit					
	Kaksi kuormitettua johdinta	Kolme kuormitettua johdinta	Kaksi kuormitettua johdinta koskettavat toisiaan	Kolme kuormitettua johdinta kolmiossa	Kolme kuormitettua johdinta, tasossa	Erillään		
						Koskettavat toisiaan	Vaakatasossa	Pystytasossa
								
	Tapa E	Tapa E	Tapa F	Tapa F	Tapa F	Tapa G	Tapa G	
	1	2	3	4	5	6	7	8
2,5	28	24	-	-	-	-	-	-
4	38	32	-	-	-	-	-	-
6	49	42	-	-	-	-	-	-
10	67	58	-	-	-	-	-	-
16	91	77	-	-	-	-	-	-
25	108	97	121	103	107	138	122	
35	135	120	150	129	135	172	153	
50	164	146	184	159	165	210	188	
70	211	187	237	206	215	271	244	
95	257	227	289	253	264	332	300	
120	300	263	337	296	308	387	351	
150	346	304	389	343	358	448	408	
185	397	347	447	395	413	515	470	
240	470	409	530	471	492	611	561	
300	543	471	613	547	571	708	652	
400	-	-	740	663	694	856	792	
500	-	-	856	770	806	991	921	
630	-	-	996	899	942	1 154	1 077	

HUOM. 1 Johtimien oletetaan olevan pyöreitä poikkipintaan 16 mm² saakka. Suuremmilla poikkipinnoilla arvot viittaavat muun muotoisiin johtimiin ja niitä voi turvallisesti käyttää pyöreisiin johtimiin.

HUOM. 2 D_e on kaapelin ulkohalkaisija.

Kuva 20. Kaapelin kuormitettavuus PEX- tai EPR-eristys ja alumiinijohtimet (SFS 6000-5-52:2017, 49)

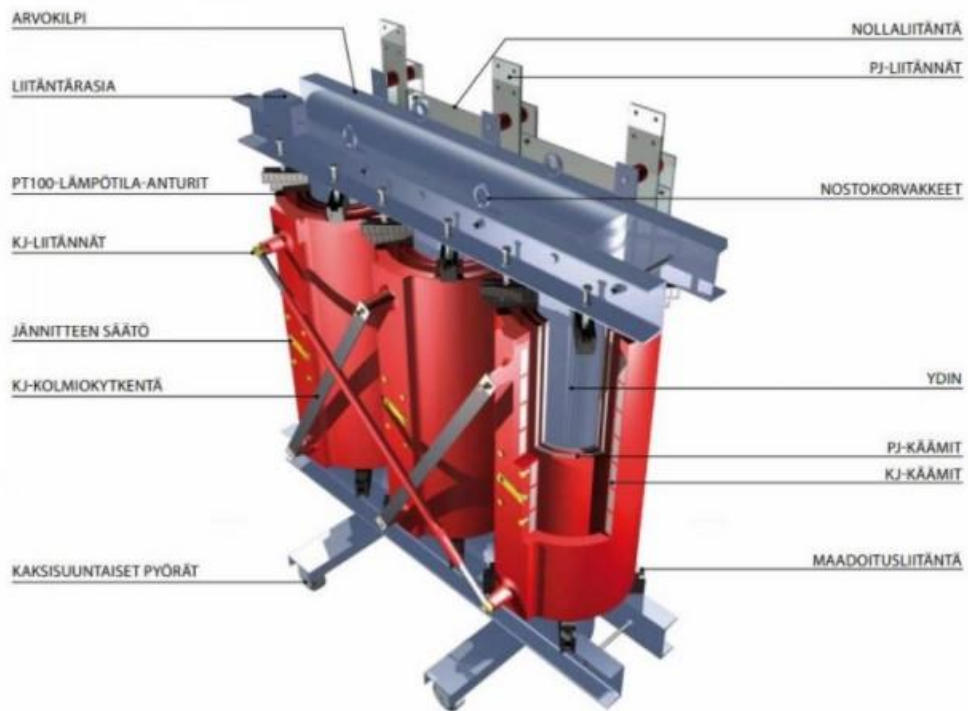
5.5 Muuntajat

Muuntaja on laite, jolla muunnetaan ja usein myös säädetään vaihtosähköjärjestelmässä jännitettä ja virtaa käämyksien välillä sähkömagneettista induktiota hyväksi käyttäen. Muuntajat jaotellaan eri ryhmiin käyttötarkoituksen perusteella.

Muuntajia on esimerkiksi tehomuuntajia ja mittamuuntajia (Elovaara & Haarla 2019b, 141.)

Tehomuuntajia käytetään yleisesti sähköjakeluverkossa, jossa jännitetaso muunnetaan toiseksi. Tehomuuntajille on olemassa kansainvälinen standardi IEC 60076, jonka mukaan tehomuuntajat valmistetaan ja koestetaan (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 1). Esimerkiksi tehdasalueella on pääsähköasemalla 20 MVA päämuuntaja, jolla muunnetaan Carunan jakeluverkon 110 kV jännitetaso tehdasalueen 10 kV jännitetasoon. Tehdasalueella sähköä siirretään pääsähköasemalta muuntamoille 10 kV jännitetasossa ja muuntamoilla on käytössä 1600 kVA (Kuva 22) muuntajia, jolla jännitetasoksi muunnetaan 0,4 kV. Se on jännitetaso, jota käytetään tuotantolaitteiden sähkönsyötössä.

Tehdasalueella on käytössä ABB:n 10/0,4 kV 1600 kVA hermeettisiä muuntajia. Hermeettisessä muuntajassa muuntajan jäähdytys on toteutettu öljyllä. Muuntaja on kokonaan täytetty öljyllä ja öljysäiliö on suljettu, joten öljyyn ei pääse vaikuttamaan happi tai kosteus. Suljetun öljysäiliön ansiosta muuntajan huoltojen yhteydessä öljyä ei tarvitse vaihtaa tai öljyn laatua ei tarvitse analysoida. Nykypäivän ympäristön suojelun vaatimukset ovat myös nousseet muuntajatekniikoissa ja yhä enemmän keskijännitealueella käytetään hartsieristeisiä muuntajia (Kuva 21). Öljyeristeisien muuntajien käyttöä on monissa paikoissa rajoitettu ja ne vaativat erityisiä palosuojia. Hartsimuuntaja on hyvä vaihtoehto pienen palokuorman ja itsestään sammuvuuden vuoksi (AAB:n TTT-käsikirja 2000-07, 13.)



Kuva 21. Hartsieristeisen muuntajan rakenne (Eurolaite Oy 2022)



Kuva 22. ABB:n muuntaja 10 $\pm 2 \times 2,5\%$ /0,4 kV 1600 kVA

Mittamuuntajia käytetään yleisesti jännitteen tai virran mittauksessa ja niiden tehtävänä on

- suojata ylikuormitukselta mittapiiriä
- mahdollistaa mittarien sijoittamisen etäälle mittapaikasta
- muuntaa jännitettä tai virtaa mitta – alueelle
- eristää päävirtapiiristä mittaussiiri (Aura & Tonteri 1993, 297)

Mittamuuntajalla muunnetaan virta- tai jännitetaso mittalaitteelle sopivaksi. Mittalaitteet ovat mittamuuntajia monimutkaisempia ja kalliimpia valmistaa, joten on helpompaa valmistaa mittalaitteet vain tietyille virta- ja jännitetasoille. Käytettävissä olevan virta- ja jännitetason mukaan valitaan mittamuuntaja, jolla muunnetaan virta- tai jännitetaso mittalaitteelle sopivaksi. Kuva 23 on ABB:n keskijänniteverkkoon tarkoitettu virtamuuntaja 25/5 A muuntosuhteella.



Kuva 23. ABB:n virtamuuntaja 25/5 A

5.6 Sähköpääkeskus

Sähköpääkeskus on sähkökeskus, jolla jaetaan muuntajan teho eri laitteille ja jolla suojataan muuntajaa liian suurilta virroilta (Kuva 24). Sähköpääkeskuksella

voidaan syöttää suoraan laitteita tai pienempi sähkökeskuksia. Tehdasalueella on molempia toteutuksia. Suunnitteilla olevilta sähköpääkeskuksilta syötetään suoraan laitteita ilman, että välissä olisi vielä sähkökeskus.



Kuva 24. Sähköpääkeskus

Sähköpääkeskusten vaatimukset määritellään SFS-EN 61439 pienjännitekeskukset-standardissa. Standardissa kerrotaan laajasti mitä kaikkea pitää ottaa huomioon ja määrittellä pienjännitekeskusta suunnitellessa. Standardin mukaan seuraavat arvot on määriteltävä:

- *käyttöyksikön erityisistä käyttöoloista johtuvat lisävaatimukset (esim. koordinaatiotyyppi, ylikuormitusominaisuudet)*
- *likaantumisaste*
- *maadoitustavat, joihin keskus on suunniteltu*
- *sisäasennus ja/tai ulkoasennus*
- *kiinteä tai siirrettävä*
- *kotelointiluokka*
- *ammattihenkilöille tai maallikoille tarkoitettu käyttö*
- *sähkömagneettisesti yhteensopivuuden (EMC) luokittelu*
- *erityiset käyttöolosuhteet, tarvittaessa*
- *ulkoinen rakenne*
- *suojaus mekaanisilta vaikutuksilta, tarvittaessa*

- *rakenteen tyyppi – kiinteät tai ulosvedettävät osat*
- *oikosulkusuojien tyyppi*
- *sähköiskulta suojaamisen menetelmät*
- *vaadittaessa kokonaismitat*
- *vaadittaessa paino (SFS-EN 61439 – 1 2013, 58)*

Syöttö muuntajalta sähköpääkeskukselle toteutetaan virtakiskolla, pienen jännitteen ja suuren nimellisvirran vuoksi (Kuva 25). Muuntajan toision nimellisvirta voidaan laskea kaavalla 5. Toision nimellisvirraksi saadaan 2309 A. Nimellisvirran avulla myös mitoitamme sähkökeskuksen pääkatkaisijan virran keston. Pääkatkaisijana käytetään ABB:n E3N-A 2500 katkaisijaa (Kuva 26). Katkaisijan suurin virran kesto on 2500 A, mutta se voidaan asetella 2300 A:iin, jolloin se sallii kuormittaa muuntajaa nimellisvirran verran.



Kuva 25. Syöttö muuntajalta sähköpääkeskukselle on toteutettu alumiinisilla virtakiskoilla



Kuva 26. ABB E3N - A 2500 katkaisija (ABB 2022b)

Sähköpääkeskukseen asennetaan myös maadoituskytkin ja valokaarisuoja. Maadoituskytkin on asennettava kaikkiin teollisuuden sähkökeskuksiin, joiden nimellisvirta on enemmän kuin 1000 A tai on olemassa takajännitevaara (PSK 1801, 20). Maadoituskytkintä käytetään huoltojen ja korjauksien yhteydessä. Valokaarisuojauksella myös parannetaan henkilöturvallisuutta sähkökeskuksen läheisyydessä työskennellessä. Sähkötyöturvallisuusstandardi SFS 6002 edellyttää luotettavaa suojausta valokaarelta, koska sen esiintymistä ei voida sulkea pois (SFS 6002 2015, 46.)

Sähköpääkeskukseen rakennetaan kolme lähtöä. Lähdöt ovat samansuuruisia, joten niiden koko on pääkatkaisijan aseteltu virta-arvo jaettuna kolmella eli 766 A. Lähtöjen suojaksi asennetaan ABB E1B-A 800 katkaisija, johon asetellaan virta-arvoksi 750 A (Kuva 27). Virta on suuri pienjännitekaapelille, joten toteutamme lähdön kaapeloinnin rinnankytkennällä. Kaapelin pitää siis kestää puolet 750 A eli 375 A. Tähän sopii Prysmian Group:n kosketussuojattu 1 kV voimakaa- peli MCMK 3x185/95 AN, jonka virrankesto on 386 A asennustapa E (Kuva 28).



Kuva 27. ABB E1B - A 800 katkaisija (ABB 2022a)

TUOTTEEN NIMI			MCMK 3x25/16 AN 1 kV	MCMK 3x35/16 AN 1 kV	MCMK 3x50/25 AN 1 kV	MCMK 3x70/35 AN 1 kV	MCMK 3x95/50 AN 1 kV	MCMK 3x120/70 AN 1 kV	MCMK 3x150/70 AN 1 kV	MCMK 3x185/95 AN 1 kV	MCMK 3x240/120 AN 1 kV
Sähkönumero			0602158	0602159	0602160	0602161	0602162	0602163	0602164	0602165	0602166
RAKENNETIETOJA (1)											
Kaapelin ulkohalkaisija	mm		22	24	27	32	36	39	43	48	54
Massa	kupari kaapeli	kg/km	800	1100	1500	2100	2900	3730	4500	5600	7400
		kg/km	1200	1500	2000	2700	3700	4700	5600	7000	9200
TOIMITUSTIETOJA											
Vakiotoimituspituus	m		500	500	500	500	500	500	500	500	500
Toimituskela			K11	K11	K12	K14	K14	K16	K18	K20	K24
Massa (1)	kaapeli+kela	kg	640	800	1100	1500	2000	2600	3000	3900	5100
MEKAANISIA ARVOJA (2)											
Pienin sallittu taivutussäde asennusvedossa	m		0,27	0,29	0,33	0,39	0,44	0,47	0,52	0,58	0,65
Pienin sallittu taivutussäde lopullisessa asennuksessa (3)	m		0,18	0,20	0,22	0,26	0,29	0,32	0,35	0,39	0,44
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla	kN		1,5	2,1	3,0	4,2	5,7	7,2	8,5	8,5	8,5
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä	kN		3,5	5,2	7,5	10,5	14,2	20,0	20,0	20,0	20,0
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)											
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20 °C	Ω/km	0,727	0,524	0,387	0,268	0,193	0,153	0,124	0,0991	0,0754
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70 °C	Ω/km	0,87	0,63	0,47	0,32	0,23	0,19	0,15	0,12	0,097
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20 °C	Ω/km	1,15	1,15	0,727	0,524	0,387	0,268	0,268	0,193	0,153
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,45	0,55	0,60	0,65	0,75	0,80	0,80	0,85	0,85
KUORMITETTAVUUS (2)											
Maassa, asennustapa D	johdin 65 °C	A	130	160	190	240	285	325	370	420	480
Ilmassa, asennustapa E	johdin 70 °C	A	107	134	162	208	252	292	338	386	456
TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (2)											
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (4) PE-johdin (5)	kA	2,8	4,0	5,7	8,0	10,9	13,7	17,2	21,2	27,5
		kA	2,6	2,6	4,4	5,7	7,2	10,4	10,4	13,4	16,6

Kuva 28. MCMK 0,6/1 kV voimakaapelin datalehti (Prysmian Group 2022d)

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli keskittyä muuntamon suunnittelun sähkötekniseen tarkasteluun. Muuntamon suunnittelussa on paljon osa-alueita ja opinnäytetyön ongelmana olikin aiheen rajaus. Aiheen rajauksella saatiin mukaan kaikki muuntamon suunnittelun halutut osa-alueet.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin laadittua tarkastelu muuntamon suunnittelusta, jota voidaan käyttää tukena, kun muuntamo on toteutusvaiheessa. Työssä käsiteltiin paljon maakaapeleiden valintaan ja asennuksiin liittyviä asioita. Tämä osa-alue oli opinnäytetyössä heti alusta lähtien keskeinen. Keski- ja suurjännitte maakaapeleiden suunnitteluun ja valintaan ei löydy paljoa kirjallisuutta.

Aiheena opinnäytetyössä käsitelty muuntamosuunnittelun sähkötekniinen tarkastelu on laaja ja mielenkiintoinen. Opinnäytetyössä tuli vastaan paljon asioita joita ei ollut ajatellut kuuluvan muuntamon suunnitteluun. Hyvällä yhteistyöllä ja ohjeistuksella saatiin asiat selvitettyä ja ratkaistua. Opinnäytetyön aikana tuli kyllä selväksi, että olen oikean suuntautumismuutoksen valinnut sähkötekniikan opiskeluissani. Keski- ja suurjännitteiden parissa tulen varmasti tulevaisuudessa työskentelemään.

LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. 1993. Sähkölaitostekniikka. 1.painos. Helsinki: WSOY

ABB 2022a. Katkaisija E1B – A 800. Viitattu 10.04.2022. <https://new.abb.com/products/fi/1SDA057207R1/e1b-a-800-pr121-p-li-in-800a-3p-f-hr>

ABB 2022b. Katkaisija E3N – A 2500. Viitattu 10.04.2022. <https://new.abb.com/products/fi/1SDA057421R1/e3n-a-2500-pr122-p-lsig-in-2500a-3p-w-mp>

ABB 2022c. REF620. Viitattu 17.04.2022. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref620-ansi>

ABB:n TTT-käsikirja 07-2000. Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot. Helsinki: ABB Oy

D1-2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista 2018. 27.painos. Espoo: STUL ry

Elovaara, J & Haarla, L. 2019a. Sähköverkot I. 2.painos. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J & Haarla, L. 2019b. Sähköverkot II. 2.painos. Helsinki: Otatieto.

Kaipia, T. 2013. BL10A3000 Sähköturvallisuus. Viitattu 03.04.2022. <https://docplayer.fi/6871451-BI10a3000-sahkoturvallisuus.html>

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikan opus. Viitattu 17.04.2022. <http://leenakorpinen.com/fi/julkaisut/opetusaineistoja/>

Lakervi, E & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto

Orrberg, M & Tiainen, E. 2017. Sähköasennukset osa 1. 4.painos. Helsinki: Sähköinfo Oy

Prysmian Group Oy 2022a. Historia. Viitattu 26.02.2022. [https://fi.prysmiangroup.com/about-us/history A](https://fi.prysmiangroup.com/about-us/history-A)

Prysmian Group Oy 2022b. Prysmian Group. Viitattu 26.02.2022. <https://fi.prysmiangroup.com>

Prysmian Group Oy 2022c. Laivaan lastaus. Viitattu 26.02.2022. <https://fi.prysmiangroup.com/node/10530>

Prysmian Group Oy. MCMK 0,6/1 kV voimakaapeli. Viitattu 10.04.2022. https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20MCMK%201kV%20yli16mm2%20180118.pdf

Reka 2022. AHXAMK-W kaapeli. Viitattu 17.04.2022. <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0117?dl=1>

SFS 6000-5-52:2017. Pienjännitesähköasennukset. Helsinki: SFS

SFS 6001:2018. Suurjänniteasetukset. Helsinki: SFS

SFS 6002. 2015. Sähkötyöturvallisuus. Helsinki: SFS

SFS-EN 50160:2010 +A1:2015 +A2:2019 +A3:2019. 2019. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki: SFS

SFS-EN 61439-1. 2013. Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset. 2.painos. Helsinki: SFS

ST-kortisto 53.11. 2018. Kuluttajamuuntamot. Espoo: Sähköinfo Oy

Tukes 2022. Sähkölaitteistot. Viitattu 05.06.2022. <https://tukes.fi/sahko/sahkolaitteistot/suunnittelu>

LIITTEET

Liite 1. 10 kV keskijännitekojeiston pääkaavio

Liite 1 10 kV keskijännitekojeiston pääkaavio

