



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sami Sorvala

KESKIJÄNNITEVERKKOMALLIN PÄIVITYS

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Sami Sorvala
Opinnäytetyön nimi	Keskijänniteverkkomallin päivitys
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	52 + 2 liitettä
Ohjaaja	Mikko Västi

Tämä opinnäytetyö toteutettiin VEO Oy:lle. Opinnäytetyössä suunniteltiin uusi 20 kilovoltin sähkönjakeluverkkomalli Vaasan ammattikorkeakoulun laboratorioympäristöön Technobothnialle. Jakeluverkkomallissa mallinnetaan jakeluverkkoa ja sähköasemaa, jossa on kahdeksan kenttää. Verkkomallissa on neljä johtolähtöä. Johtolähdöistä kaksi voidaan kytkeä rengasverkoksi tai niitä voidaan syöttää säteittäisverkkona.

Opinnäytetyöhön kuului jakeluverkkomallin piirikaavioiden suunnittelu, tietoliikennekaavion suunnittelu sekä useiden työhön kuuluvien komponenttien mitoitus. Piirikaaviosuunnittelu toteutettiin EPLAN-ohjelmistolla. Työssä käsiteltiin myös muun muassa maasulkuvirtojen laskentaa ja johtojen mallintamista sijaiskytkentöjen avulla.

Lopputuloksena opinnäytetyöstä saatiin valmiit suunnitelmat opiskelijakäyttöön soveltuvaan, uniikkiin keskijänniteverkkomalliin. Uudistetusta jakeluverkkomallista tulee hyötymään lukuisat opiskelijat tulevina vuosina.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikka

ABSTRACT

Author	Sami Sorvala
Title	Upgrade of the Medium Voltage Grid Model
Year	2022
Language	Finnish
Pages	52 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Mikko Västi

This thesis was carried out for VEO Oy. In the thesis, a new 20 kilovolt electricity distribution network model was designed for the Technobothnia laboratory at Vaasa University of Applied Sciences. In the distribution grid model, a distribution grid, and a substation with eight bays were modeled. The grid model has four feeder bays. Two of the feeder bays can be connected to form a ring grid or they can be used as radial power lines.

The thesis included the design of the circuit diagrams of the distribution grid model, the design of the communication diagram and the dimensioning of several components included in the thesis. The circuit diagram design was carried out using the EPLAN software. The thesis also dealt with the calculation of earth fault currents and the modeling of cables using equivalent circuits.

The result of the thesis is completed plans for a unique medium voltage grid model that suits for student use. Numerous students will benefit from the renewed distribution grid model in the coming years.

Keywords	Power distribution, electrical design, substation, and medium voltage
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoitteet ja hyödyt	9
1.2	VEO Oy	9
2	MALLINNETTAVA VERKKO.....	11
2.1	Sähköaseman esittely	11
2.2	Sähköverkon skaalaukset	13
2.3	Sähköverkon maadoitukset	14
2.4	Sähköverkon tuottama maasulkuvirta	16
2.5	Sähköverkon kuormitukset	17
3	JOHTOLÄHTÖJEN MALLINTAMINEN	20
3.1	Maakaapeleiden sijaiskytkennät.....	20
3.2	Avojohtojen sijaiskytkennät	24
4	KOJEISTON ESITTELY.....	28
4.1	Vector.....	28
4.2	Vecos-ohjaustaulut.....	30
5	KOJEISTON SUUNNITTELU.....	32
5.1	EPLAN	32
5.2	Vikatilanteen simulointi.....	32
5.2.1	Maasulku	33
5.2.2	Oikosulku.....	34
5.2.3	Vaihekatkos	35
5.3	Muuntamoiden kytkentä	36
5.4	Katkaisijoiden ohjaus.....	37

5.5 Suojareleiden esittely	38
5.5.1 ABB REF615	39
5.5.1 ABB RET620	41
5.5.2 ABB REX640	42
5.5.3 Arcteq AQ-F255.....	44
5.5.4 Schneider Electric P3F30	45
5.6 Käämikytkimen ohjaus	46
5.7 Tietoliikenne	47
6 YHTEENVETO JA POHDINTA	50
LÄHTEET	51
LIITTEET	53

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Vanha keskijänniteverkkomalli.	8
Kuvio 2. Sähköverkkomallin pääkaavio.	11
Kuvio 3. Sähköverkon maadoituskaavio.	16
Kuvio 4. 2000 kVA tehoisen muuntamon piirikaavio.	18
Kuvio 5. Johdon yksinkertaistamaton sijaiskytkentä.	20
Kuvio 6. Maakaapelin sijaiskytkentä.	21
Kuvio 7. Avojohton sijaiskytkentä.	25
Kuvio 8. Vector-keskijännitekojeisto.	29
Kuvio 9. Ohjaustaulujen kokoonpanosuunnitelma.	31
Kuvio 10. Maasulkulaatikon piirikaavio.	34
Kuvio 11. Oikosulkulaatikon piirikaavio.	35
Kuvio 12. Vaihekatkoslaatikon piirikaavio.	36
Kuvio 13. Muuntamon JM1 kytkentä johtolähtöön J02.	37
Kuvio 14. Johtolähdön J02 katkaisijan ohjauspiiri.	38
Kuvio 15. REF615-suojarele.	40
Kuvio 16. RET620-suojarele.	41
Kuvio 17. REX640-suojaterminaali.	43
Kuvio 18. Arcteq AQ-F255-suojarele.	44
Kuvio 19. Schneider Electric P3F30-suojarele.	45
Kuvio 20. Käämikytkimen ohjaus, asennot 1–10.	47
Kuvio 21. Mallissa käytetty Ethernet-kytkin.	48
Taulukko 1. Jakelumuuntajien nimellisarvot.	19
Taulukko 2. Maakaapeleiden alumiinilaminaattien resistanssiarvot.	22
Taulukko 3. Maakaapeleiden komponenttiarvot.	24
Taulukko 4. Avolinjan parametrit.	26
Taulukko 5. Avolinjojen komponenttiarvot.	27

LIITELUETTELO

LIITE 1. Prysmian Groupin AHXAMK-W kaapelien tekniset tiedot.

LIITE 2. Ilmajohtojen tekniset tiedot SA 5:94-verkostosuosituksesta.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli suunnitella uusi sähkönjakeluverkkomalli Vaasan ammattikorkeakoulun laboratorioympäristöön Technobothnialle. Työn toimeksiantajana toimi VEO Oy. Vaasan ammattikorkeakoulun vanha keskijänniteverkkomalli alkoi olemaan jo vanhanaikainen, joten sen tilalle suunniteltiin uusi keskijännitemalli. Vanha malli on esitetty kuviossa 1. Kuviossa näkyy myös vanha ABB:n keskijännitekojeisto.



Kuvio 1. Vanha keskijänniteverkkomalli.

Työ aloitettiin mittaamalla komponentit, joilla sähköverkkoa mallinnetaan. Mitoitettavia komponentteja olivat muun muassa päämuuntaja, maadoitusmuuntaja, virtamuuntajat sekä johtoja ja jakelumuuntajia mallintavat kelat, kondensaattorit ja vastukset. Mitoitustyön jälkeen siirryttiin suunnittelemaan

piirikaaviot ja layoutkuvat uusittaville kaapeille. Suunnitteluohjelmistona käytettiin EPLAN-ohjelmistoa.

1.1 Tavoitteet ja hyödyt

Opinnäytetyön päätavoite oli suunnitella toimiva sähköjakeluverkkomalli opiskelijakäyttöön Technobothnialle. Verkkomallin kokonaisuuteen kuuluu neljä eri kojekaappia: VEO:n Vector-keskijännitekojeisto sekä kolme Vecos-ohjaustaulua.

Vanha sähköjakeluverkkomalli on ollut käytössä jo pitkään, joten verkkomallin päivitys oli ajankohtaista. Vanha tyhjiökatkaisijakin oli jo elinkaarensa päässä. Vanhaan verkkomalliin verrattuna uuden verkkomallin etuja ovat muun muassa nykyaikaisempi rakenne, paremmat vikasimuloinnit, selkeämpi mimiikka sekä malliin saatiin enemmän suojareleitä. Uudessa mallissa on myös mahdollisuus tutkia rengasverkon toimintaa.

Opiskelijat pääsevät jakeluverkkomallin valmistumisen myötä myös perehtymään VEO:n tuotteisiin jo opiskeluaikana. VEO Oy työllistää useita Vaasan ammattikorkeakoulusta valmistuneita opiskelijoita.

1.2 VEO Oy

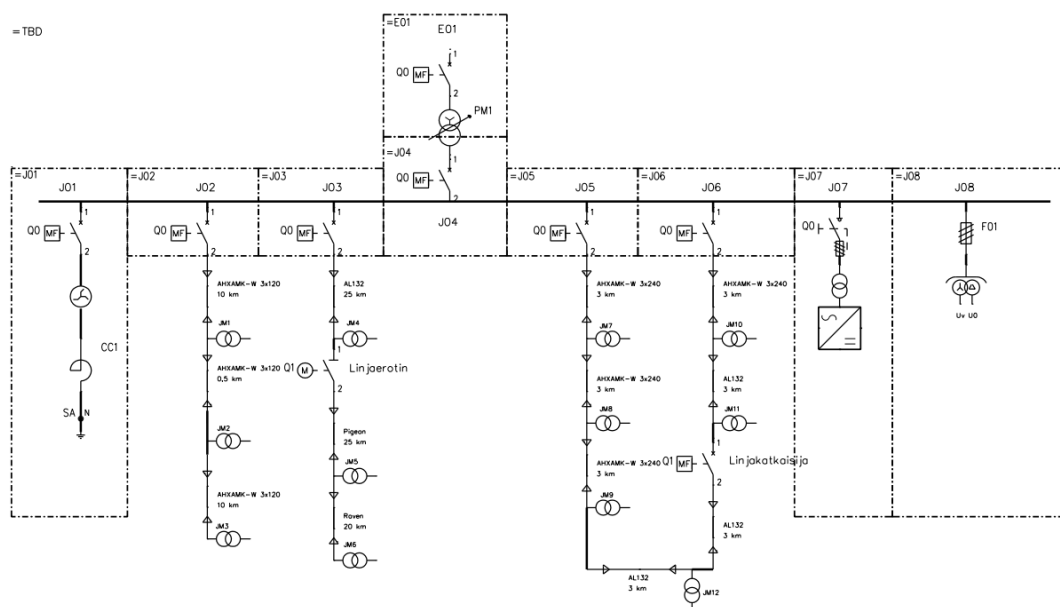
Vaasa Engineering Oy on perustettu vuonna 1989. Yritys vaihtoi nimensä virallisesti VEO Oy:ksi vuonna 2012. VEO Oy on vaasalainen energia-alan yritys, jonka toiminta on alusta alkaen perustunut vahvaan projektiosaamiseen. VEO Oy tuottaa erilaisia automaatio- ja sähköistysratkaisuja energian tuotantoon, siirtoon, jakeluun ja käyttöön maailmanlaajuisesti. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Vaasassa, jonka yhteydessä on myös tehdastilat. Suomessa VEOn toimipisteet Vaasan lisäksi Seinäjoella, Rovaniemellä sekä Paimiossa. VEO Groupilla on toimipisteet Suomen lisäksi Ruotsissa, Norjassa sekä Iso-Britanniassa. VEO Group työllistää yli 500 henkilöä

Suomessa ja ulkomailla. Koko konsernin liikevaihto vuonna 2021 oli noin 125 miljoonaa euroa.¹

¹ VEO Oy. Company.

2 MALLINNETTAVA VERKKO

Sähkönjakeluverkkomallilla pyritään tutkimaan ja simuloimaan jakeluverkon toimintaa. Verkkomallilla mallinnetaan 110/20 kV sähköasemaa ja 20 kilovoltin jakeluverkkoa. Sähköaseman pääkaavio on kuvion 2 mukainen. Katkoviivalla rajatut alueet kuvastavat sähköasemaa, ja rajaamattomat alueet ovat sähköaseman ulkopuolisia.



Kuvio 2. Sähköverkkomallin pääkaavio.

2.1 Sähköaseman esittely

Sähköasemalla on kahdeksan erilaista kenttää, joilla on jokaisella oma tarkoitus. Sähköasemalla on omat kentät syöttökentälle, mittauskentälle, kompensointilaitteistolle, omakäyttömuuntajalle ja neljälle johtolähdölle. Sähköverkkomalliin ei ole suunniteltu erottimia eikä maadoituskytkimiä yksinkertaisuuden säilyttämiseksi. Jokaisella kentällä on oma katkaisija Q0 – lukuun ottamatta omakäyttömuuntajakenttää J07 ja mittauskenttää J08.

Kentällä yksi sijaitsee maadoitusmuuntaja ja maasulkuvirran kompensointilaite. Sähköasemalla on käytössä keskitetty kompensointi, joten kentän tarkoitus on kompensoida koko sähköverkon maasulkuvirtaa. Maadoitusmuuntajaa tarvitaan, koska kompensointikelaa ei voida liittää suoraan päämuuntajaan YNd11-kytkennän vuoksi². Sähköverkkomallin maadoitusmuuntajan kytkentäryhmä on ZN ja nimellisteho 10 VA. Kompensointikelaa ei suunniteltu malliin sisäisesti, koska Technobothnialla on olemassa ulkoinen kompensointilaite. Ulkoisen kompensointilaitteen tarkoituksena on, että opiskelijat pääsevät opettelemaan kompensointilaitteen virittämistä. Sen sijaan ohjaustaulun OT1 oveen suunniteltiin turvaliittimet, jotta ulkoisen kompensointilaitteen liittäminen malliin olisi helppoa. Ohjaustaulun ovesa on myös turvaliittimet kompensointilaitteen tarvitsemalle 230 voltin käyttöjännitteelle.

Kentällä kaksi on johtolähtö, joka on maakaapeliverkkoa. Johtolähdöllä sijaitsee myös kolme 20/0,4 kV jakelumuuntajaa. Jakelumuuntajat ovat merkitty tunnuksilla JM1, JM2 ja JM3. Koko johtolähtö on kaapeloitu kaapelityypillä AHXAMK-W 3x120. Johtolähdön yhteispituus on 20,5 kilometriä.

Kentällä kolme on johtolähtö, joka on avojohtolinjaa. Johtolähdöllä on myös kolme jakelumuuntajaa JM4, JM5 ja JM6. Johtolähdön ensimmäisen jakelumuuntajan JM4 jälkeen on linjaerotin. Erottimen avulla linjan loppupää saadaan tarvittaessa jännitteettömäksi. Johtolähdössä on käytetty kolmea eri avojohtotyyppiä: AL132, ACSR 85/14 Pigeon sekä ACSR 54/9 Raven. Johtolähtö on sähköaseman pisin, sen pituuden ollessa 70 kilometriä.

² Multirel Oy. Maadoitusmuuntaja.

Kenttä neljä on syöttökenttä. Syöttökenttä sisältää syöttävän verkon, päämuuntajan sekä kaksi katkaisijaa. Toinen katkaisija on sijoitettu muuntajan yläjännitepuolelle ja toinen alajännitepuolelle. Päämuuntaja on kytkentäryhmältään YNd11, ja sen nimellisteho on 100 VA. Muuntajan todellinen muuntosuhde on 400/20 V, mutta se skaalataan simulaatiotasoon 110/20 kV. Päämuuntajaa merkitään tunnuksella PT1. Päämuuntajaan toteutettiin 19-asentoinen käämikytin, jolla voidaan säätää muuntajan yläjännitepuolen jännitettä $\pm 15\%$.

Kentät viisi ja kuusi ovat johtolähtöjä. Ne ovat sekaverkkoa, mikä tarkoittaa, että niissä on sekä maakaapelia että avojohtoa sekaisin. Kummallakin johtolähdöllä on kolme jakelumuuntajaa. Johtolähdön viisi jakelumuuntajaa merkitään tunnuksilla JM7, JM8 ja JM9. Johtolähdön kuusi jakelumuuntajaa merkitään tunnuksilla JM10, JM11 ja JM12. Johtolähdöt viisi ja kuusi voidaan kytkeä rengasverkoksi sulkemalla linjakatkaisija. Linjakatkaisija sijaitsee johtolähdöllä kuusi jakelumuuntajan JM11 jälkeen. Johtolähtöjen yhteenlaskettu pituus on 21 kilometriä.

Kentällä seitsemän on omakäyttömuuntaja. Sähköverkkomallissa tällä kentällä ei ole mitään toiminnallisuuksia, vaan se on pelkkä kuva mimiikassa. Todellisella sähköasemalla omakäyttömuuntajaa tarvittaisiin esimerkiksi syöttämään asemarakennukselle sähköä.

Mittauskenttä on kenttä kahdeksan. Kentän tarkoitus on mitata sähköaseman kiskoston jännitteet jännitemuuntajien kautta. Kentältä voidaan mitata pää- ja vaihejännitteiden lisäksi nollajännite.

2.2 Sähköverkon skaalaukset

Jakeluverkkomallin virta- ja jännitetasot skaalattiin sopivalle tasolle, koska olisi vaikeaa ja vaarallista toteuttaa todellista 110/21 kV sähköasemamallia. Jakeluverkkomallissa päätettiin skaalata virta- ja jännitetasot tuhannella:

järjestelmässä yksi voltti vastaa yhtä kilovolttia, ja yksi ampeeri vastaa yhtä kiloampeeria. Tällöin mallin teho skaalautuu suhteessa 1:1 000 000, koska näennäisteho määräytyy kaavan 1 mukaisesti.

$$S = U * I, \tag{1}$$

jossa S = näennäisteho,

U = jännite,

I = virta.

Sähköverkkomallin jännitetaso skaalattiin jännitemuuntajilla. Jännitemuuntajilla mitataan sähköaseman kiskoston jännitettä. Jännitemuuntajilla mitataan vaihe- ja pääjännitteiden lisäksi nollajännitettä. Työssä käytettiin avokolmiomittauskytkentää. Avokolmiokytkentä rakennettiin kolmesta eri jännitemuuntajasta.

Sähköverkkomalliin ei toteutettu todellisia virtamuuntajia kustannussyistä. Päätettiin, että johtolähdöt johdotetaan suoraan suojarileen läpi, jotta saadaan virta mitattua. Tällöin suojarilettä asetellessa täytyy asetella suojarileeseen virtamuuntajan kooksi 1000/1 A.

Summavirtamuuntajat kuitenkin toteutettiin kullekin johtolähdölle. Summavirtamuuntajat olivat kokoa 1/1 A. Summavirtamuuntajien ensiökäämiin pyöritettiin 10 kierrosta johdinta, jotta summavirtamuuntajalla voidaan simuloida 100/1 A muuntajaa.

2.3 Sähköverkon maadoitukset

Sähköverkolle mallinnettiin todellista tilannetta vastaava maadoituspiiri. Maadoituksia suunniteltaessa käytettiin termejä globaali maa sekä paikallinen maa. Globaalilla maalla tarkoitetaan sitä pistettä, joka tullaan todelli-

sesti maadoittamaan laboratoriossa, kun jakeluverkkomalli on valmis. Paikallisella maalla tarkoitetaan jotakin sähköverkon tiettyä pistettä, esimerkiksi muuntamo.

Sähköaseman maadoituselektrodia approksimoitiin 1Ω vastuksella. Tämän takia paikallisen maan kisko yhdistettiin globaaliin maahan 1Ω vastuksen kautta. Jokainen muuntamo yhdistettiin globaaliin maahan 10Ω vastuksen kautta, koska todellinenkin muuntamo olisi maadoitettu. 10Ω vastuksella mallinnetaan muuntamon maadoitusresistanssia. Sähköverkolle luotiin havainnollistava maadoituskaavio (Kuvio 3.) Kuviosta huomataan, että maakaapeleiden maadoitukset käyttäytyvät eri tavalla kuin avolinjojen maadoitukset. Tämä johtuu siitä, että maakaapeleille on mallinnettu alumiinilaminaatit ja keskusköydet, jotka kytkeytyvät maahan. Näitä ei avolinjalla ole.

Jotta sähköverkolle voitaisiin mitoittaa sopiva kompensointilaite, täytyy tietää verkon tuottama maasulkuvirta. Mitä suurempi sähköverkko on, sitä enemmän se tuottaa maasulkuvirtaa. Maakaapelit tuottavat maasulkuvirtaa reilusti enemmän kuin avojohdot. Verkon suurin tuottama maasulkuvirta laskettiin kaavalla 2.⁴ Ennen kuin kaavaa voidaan hyödyntää, täytyy laskea koko verkon yhteenlaskettu maakapasitanssi C_e . Tämä tapahtuu laskemalla kaapelien pituudet yhteen ja kertomalla pituus kaapelivalmistajan ilmoittamalla kapasitanssiarvolla kilometriä kohden. Tulokseksi saatiin 9,12 mikrofaradia.

$$I_E = \sqrt{3} * \omega * C_e * U = \sqrt{3} * 2 * \pi * 50 \text{ Hz} * 9,12 \mu\text{F} * 20 \text{ V} = 99,25 \text{ mA},$$

(2)

jossa I_E = maasulkuvirta,

ω = verkon kulmataajuus,

C_e = verkon maakapasitanssi,

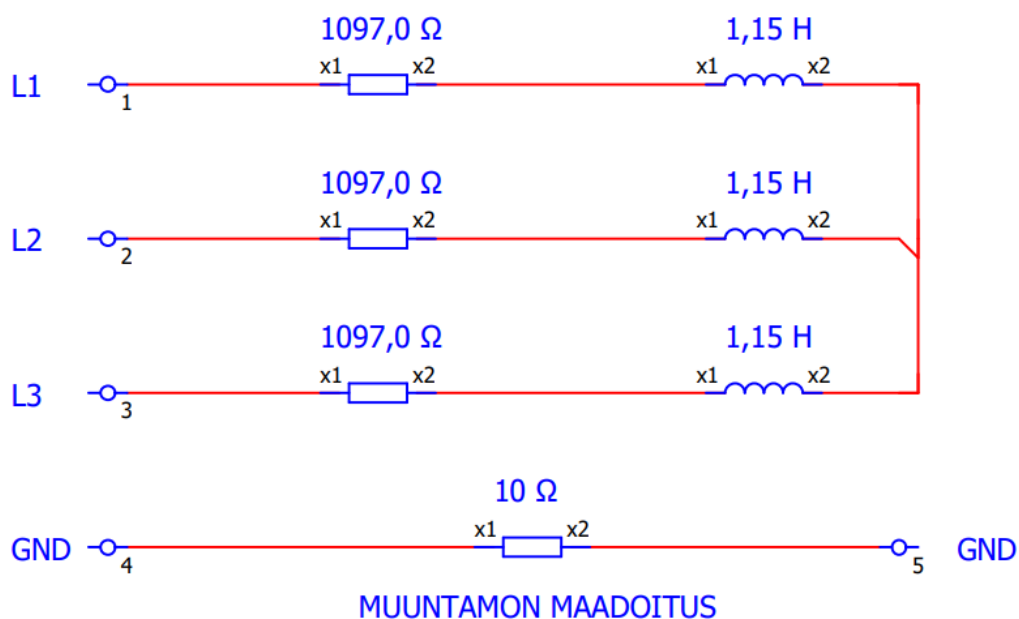
U = verkon pääjännite.

2.5 Sähköverkon kuormitukset

Jakeluverkkomallissa kuormitustilanteita simuloidaan kytkemällä 20/0,4 kV jakelumuuntajat päälle. Jakelumuuntajien ohjaus toteutettiin yksinkertaisesti 0–1-nokkakytkimillä. Malliin ei valmistettu todellisia muuntajia, vaan muuntamoille laskettiin sopivat komponenttiarvot keloille, vastuksille ja kondensaattoreille, jotka valmistettiin piirilevyille. Piirilevyille asennettiin liittimet, jotta muuntamot saatiin liitettyä sähköverkkomalliin.

⁴ Mäkinen, O. 2008, 166. Sähköverkot.

Alun perin tarkoitus oli kytkeä muuntamoiden kuormat kolmioon, koska se häiritsisi vikatilanteessa vähemmän kuin tähtikytkentä. Komponentteja mitoittaessa huomattiin, että kolmiokytkennällä komponenttien arvot kohoaisivat melko suuriksi, mikä johtaisi siihen, että komponentit olisivat kalliimpia hankkia sekä fyysiseltä kooltaan suurempia. Päätettiin, että kuormat kytetään tähteen. Kuviossa 4 on esitetty muuntamoiden piirikaavio.



Kuvio 4. 2000 kVA tehoisen muuntamon piirikaavio.

Komponenttien arvot ovat erilaiset riippuen siitä, minkä kokoinen muuntamo on kyseessä. Yksinkertaisuuden vuoksi muuntamoiden tähtipiste päätettiin jättää kytkemättä. Jokaisen muuntamon maadoitusimpedanssia estimoitiin 10 Ω vastuksilla. Kuviossa esitetyt arvot ovat laskennallisia, joten todelliset piirilevyn arvot poikkeavat hieman laskennallisista arvoista. Todellisissa arvoissa pysyttiin kuitenkin noin 5 % tarkkuusluokassa.

Mallin sisäinen suurin kuormitusvirta on noin 270 mA. Suurin kuormitusvirta saavutetaan silloin, kun jokainen johtolähtö on käytössä ja jokaiselle jakelu-

muuntajalle on kytketty kuorma päälle. Tällöin 270 mA virta kulkee johtolähdöllä J04, päämuuntajan alajännitepuolella. Kuormitusvirta jakaantuu kiskoston kautta sähköverkon muille johtolähdöille. Jakeluverkkomallin tehokertoimeksi päätettiin 0,95, ja laskut on laskettu sen mukaan.

Jakelumuuntajia on kolmea eri tehokokoja: 500 kVA, 800 kVA sekä 2 MVA. Annetut arvot ovat simulaatiotasossa, eli todelliset arvot ovat 0,5 VA, 0,8 VA sekä 2 VA. Muuntajien nimelliset arvot on ilmoitettu taulukossa 1.

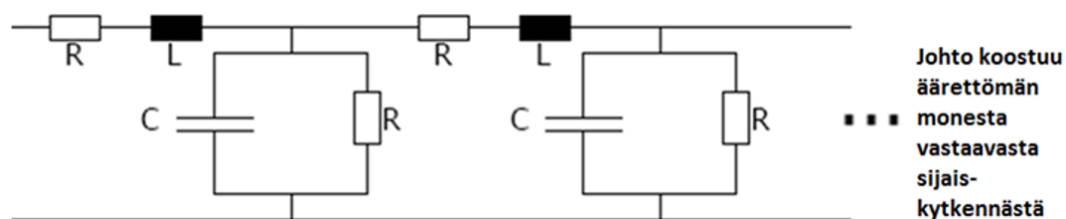
Taulukko 1. Jakelumuuntajien nimellisarvot.

	Nimellisvirta [A]	Nimellisjännite [kV]	Nimellinen näennäisteho [kVA]
JM1	50	20	2000
JM2	50	20	2000
JM3	50	20	2000
JM4	10	20	500
JM5	10	20	500
JM6	10	20	500
JM7	20	20	800
JM8	20	20	800
JM9	10	20	500
JM10	20	20	800
JM11	10	20	500
JM12	10	20	500

Kolmivaiheinen kisko-oikosulku rajoitettiin noin kahden ampeerin suuruuteen, jotta mallin komponentit eivät mene rikki. Jotta kisko-oikosulku saatiin rajoitettua kahteen ampeeriin, jakeluverkkomallin päämuuntajan ensiöpuolelle mitoitettiin sopivan kokoinen kela. Jotta induktanssin arvo pystyttiin laskemaan, keskijännitemallin kaapelin syöttöpisteistä mitattiin impedanssi sekä oikosulkuvirta. Mitattujen arvojen avulla saatiin kela mitoitettua. Mitoitustyön toteutti Trafomic Oy, joka myös toimitti kelan.

3 JOHTOLÄHTÖJEN MALLINTAMINEN

Johtolähtöjen mallintamisen yksinkertaistamiseksi voidaan käyttää sijaiskytkentöjä. Keskipitkille siirtojohdoille voidaan käyttää pii- tai T-sijaiskytkentöjä. Tässä työssä käytettiin pii-sijaiskytkentöjä. Kuviosta 5 selviää johdon 1-vaiheinen yksinkertaistamaton sijaiskytkentä.



Kuvio 5. Johdon yksinkertaistamaton sijaiskytkentä⁵.

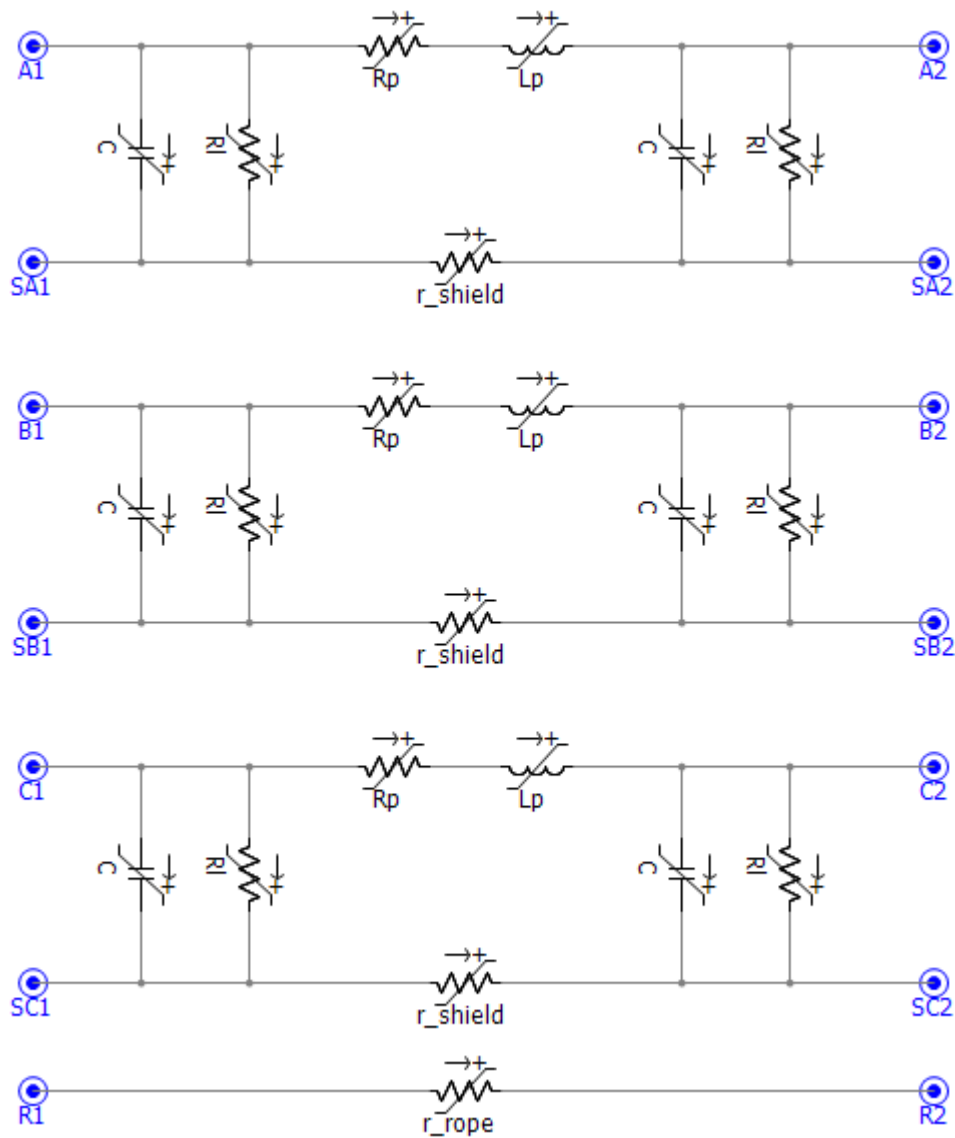
Johtojen mallintaminen on kuitenkin vaikeaa yksinkertaistamattomalla sijaiskytkennällä. Laskentaa varten verkon komponentit kuvataan likimääräisellä sijaiskytkennällä. Sijaiskytkennät poikkeavat kuitenkin maakaapelin ja avojohdon välillä. Maakaapeleiden sijaiskytkentöihin on perehdytty kappaleessa 3.1 ja avojohdojen sijaiskytkentöihin on perehdytty kappaleessa 3.2. Muodostetut sijaiskytkennät toteutettiin piirilevyille, jotta johtolähdöt pystyttiin liittämään verkkomalliin.

3.1 Maakaapeleiden sijaiskytkennät

Maakaapeleiden sijaiskytkennöissä on huomioitu johtimien vaiheresistanssi (R_p), vaiheen induktanssi (L_p), kapasitanssi vaiheesta maahan (C), vuotoresistanssi (R_I), johtimen alumiinilaminaatin resistanssi (r_{shield}) ja kaapelin keskusköyden resistanssi (r_{rope}). Kun tästä tilanteesta muodostetaan

⁵ Koski, J. 2021. Sähköverkot-opintojakson kurssimateriaali.

sijaiskytkentä, se saa kuvion 6 mukaisen muodon. Työssä käytetty sijaiskytkentä ei ota huomioon vaihejohtimen ja alumiinilaminaatin keskinäisinduktanssia.



Kuvio 6. Maakaapelin sijaiskytkentä.

Pii-sijaiskytkennässä täytyy huomioida se, että poikittaiskomponentit hajautuvat puoliksi. Tällöin vuotoresistanssit täytyy kertoa kahdella ja kapasitanssit jakaa kahdella. Komponenttien ominaisarvot eri johtolähdöille on laskettu

taulukkoon 3. Komponentteja laskiessa maakaapeleiden tekniset ominaisarvot ovat poimittu kaapelivalmistaja Prysmianin datalehdeltä (Liite 1). Kaapelivalmistaja ei ole ilmoittanut alumiinilaminaatin (r_{shield}) ominaisarvoja samaan liitteeseen. Alumiinilaminaatin resistanssiarvot saatiin kuitenkin selville ottamalla yhteyttä Prysmian Groupin edustajaan (**Taulukko 2**).

Taulukko 2. Maakaapeleiden alumiinilaminaattien resistanssiarvot⁶.

Kaapelin tyyppi	Resistanssi/km
AHXAMK-W 3x50+35 20kV	2.1
AHXAMK-W 3x95+35 20kV	1.9
AHXAMK-W 3x120+35 20kV	1.8
AHXAMK-W 3x150+35 20kV	1.7
AHXAMK-W 3x185+35 20kV	1.6
AHXAMK-W 3x240+35 20kV	1.0
AHXAMK-W 3x300+35 20kV	0.9

Maakaapeleiden komponenttiarvoja selvittäessä täytyy selvittää kaapeleiden induktiivinen reaktanssi ja kapasitiivinen reaktanssi. Induktiivinen reaktanssi perustuu kaavaan 3. Kapasitiivinen reaktanssi puolestaan lasketaan kaavan 4 avulla.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3)$$

missä X_L = induktiivinen reaktanssi,

f = taajuus,

L = induktanssi.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

missä X_C = kapasitiivinen reaktanssi,

⁶ Suomela 2022. Sähköpostiviesti.

f = taajuus,

C = kapasitanssi.

Tan(δ) tarkoittaa kaapelin häviökerrointa. IEC-kaapelistandardien mukaan eristysten häviökerroin keskijännitekaapeleille saa olla korkeintaan 0,001, joten laskennassa on käytetty tätä arvoa. Häviökertoimen avulla voidaan selvittää kaapelin vuotoresistanssin arvot. Vuotoresistanssi on laskettu kaavan 5 mukaisesti.⁷

$$R_{leak} = \frac{X_C}{\tan(\delta)} \quad (5)$$

missä R_{leak} = vuotoresistanssi,

X_C = kapasitiivinen reaktanssi,

tan(δ) = häviökerroin.

Muut taulukkoon 3 lasketut arvot ovat suoraan kaapelivalmistajan ilmoittamia kaapelin ominaisarvoja. Kaapelivalmistaja on ilmoittanut ominaisarvot yksikköinä kilometriä kohden. Lopullinen arvo saadaan, kun kerrotaan kaapelivalmistajan ilmoittama arvo johto-osuuden pituudella. Taulukossa 3 I_{va-} raus tarkoittaa johto-osuuden tuottamaa varausvirtaa.

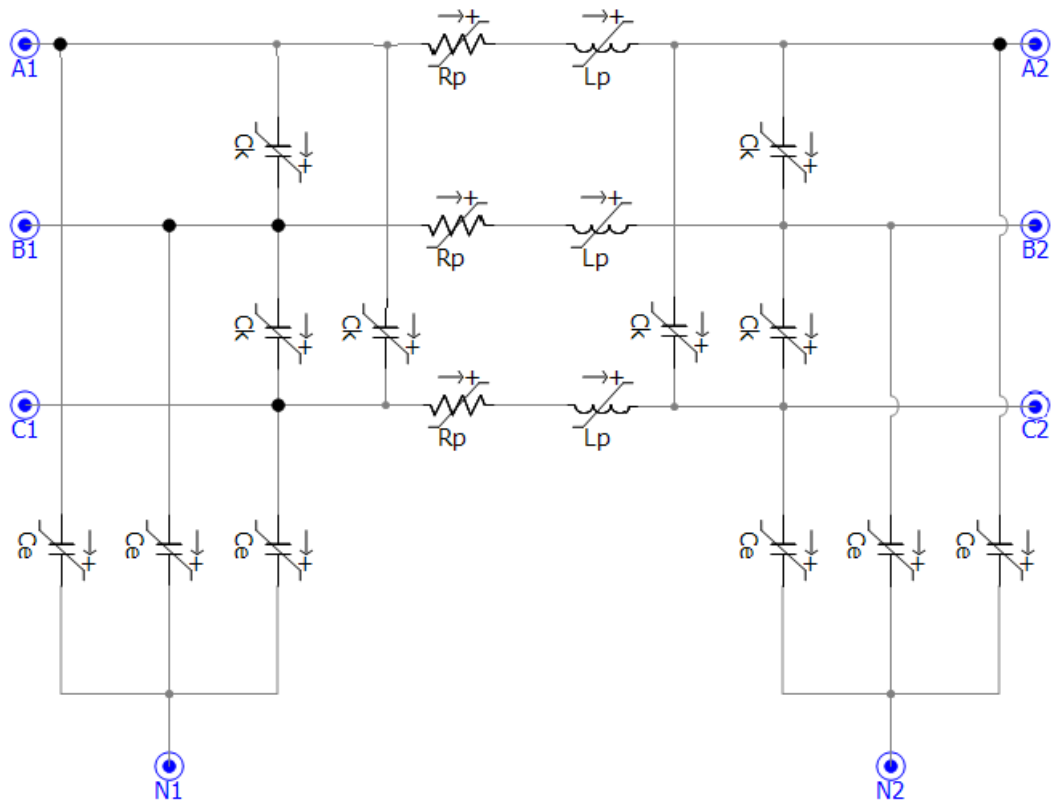
⁷ Västi 2022. Simulointiharjoitus 2 – Jakeluverkon tutkimuksia.

Taulukko 3. Maakaapeleiden komponenttiarvot.

MAAKAAPELEIDEN KOMPONENTTIARVOT				
J02	Osa 1	Osa 2	Osa 3	Yksikkö
Osan pituus	10	0,5	10	km
Kaapelin tyyppi	W 3x120	W 3x120	W 3x120	
R _p	3	0,15	3	Ω
L _p	0,0039	0,000195	0,0039	H
C	0,0000024	1,2E-07	0,0000024	F
R _{shield}	18	0,9	18	Ω
R _{rope}	5,24	0,262	5,24	Ω
I _{varaus}	9	0,45	9	A
X _L	1,2252211	0,0612611	1,2252211	Ω
X _C	1326,2912	26525,824	1326,2912	Ω
tan(δ)	0,001	0,001	0,001	
R _{leak}	1326291,2	26525824	1326291,2	Ω
J05	Osa 1	Osa 2	Osa 3	Yksikkö
Osan pituus	3	3	3	km
Kaapelin tyyppi	W 3x240	W 3x240	W 3x240	
R _p	0,45	0,45	0,45	Ω
L _p	0,00105	0,00105	0,00105	H
C _k	9,3E-07	9,3E-07	9,3E-07	F
R _{shield}	3	3	3	Ω
R _{rope}	0,804	0,804	0,804	Ω
I _{varaus}	3,3	3,3	3,3	A
X _L	0,3298672	0,3298672	0,3298672	Ω
X _C	3422,6869	3422,6869	3422,6869	Ω
tan(δ)	0,001	0,001	0,001	
R _{leak}	3422686,9	3422686,9	3422686,9	Ω

3.2 Avojohtojen sijaiskytkennät

Avolinjan mallinnus on hieman yksinkertaisempaa kuin maakaapelin, koska avojohdoilla ei ole suojavaippoja tai keskusköysiä. Avolinjan maan pitkittäis-komponentit olisivat mahdollista ottaa huomioon sijaiskytkennässä, mutta tässä työssä sitä ei nähty tarpeelliseksi. Sijaiskytkennässä on mallinnettu vaiheidenväliset kapasitanssit sekä vaiheiden ja maan väliset kapasitanssit.



Kuvio 7. Avojohtdon sijaiskytkentä.

Sijaiskytkennässä C_e vastaa kapasitanssia vaiheesta maahan, ja C_k on vaiheiden välinen kapasitanssi. R_p on vaiheresistanssi ja L_p on vaiheinduktanssi.

Avojohtdon sijaiskytkennässä on myös huomioitava, että kapasitanssit hajautuvat puoliksi. Tämän takia molempien, sekä maa- että käyttökapasitanssien arvot on puolitettava. Avojohtojen sijaiskytkentöjen komponentteja laskiessa johtimien ominaisarvot ovat poimittu verkostosuosituksen SA 5:94 ”Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen” liitteestä 1.1 (Liite 2).

Avolinjoja laskettaessa on otettu huomioon linjan simuloitu rakenne. Päätettiin, että mallinnetaan linjaa oletuksilla, että linjan korkeus on 10,5 metriä riippuma huomioiden. Linjan vaiheiden väliksi päätettiin 1,1 metriä. Linjassa käytetään taso-orsirakennetta, eikä linjassa ole tehty vaihevuorotteluja.

Vuorottelun puuttumisen takia linjaan muodostuu kapasitanssiepäsymmetria. Avolinjan parametrit määräytyivät näiden ominaisuuksien mukaan. Opinnäytetyön ohjaaja toimitti työssä käytetyt avolinjan parametrit. Parametrit ovat esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Avolinjan parametrit.

AVOLINJAN PARAMETRIIT													
Raven						Pigeon							
Maakapasitanssit			Pitkittäiskomponentit			Maakapasitanssit			Pitkittäiskomponentit				
C1E	C2E	C3E		R	X	L	C1E	C2E	C3E		R	X	L
5,76307	5,9595	5,76307	nF/km	0,535	0,368	0,00117	5,91975	6,13159	5,91975	nF/km	0,337	0,354	0,00113
Xc1E	Xc2E	Xc3E		Ohm/km	Ohm/km	H/km	Xc1E	Xc2E	Xc3E		Ohm/km	Ohm/km	H/km
552327	534122	552327	Ohm				537708	519131	537708	Ohm			
R1E	R2E	R3E					R1E	R2E	R3E				
3,7E+07	3,6E+07	3,7E+07	Mohm				3,6E+07	3,5E+07	3,6E+07	Mohm			
IvarausL1	IvarausL2	IvarausL3					IvarausL1	IvarausL2	IvarausL3				
0,02122	0,02194	0,02122	A/km				0,0218	0,02258	0,0218	A/km			
Keskinäiskapaistanssit							Keskinäiskapaistanssit						
Ck12	Ck13	Ck23					Ck12	Ck13	Ck23				
1,35868	0,84495	1,35868	nF/km				1,42398	0,87959	1,42398	nF/km			
AL132													
Maakapasitanssit			Pitkittäiskomponentit										
C1E	C2E	C3E		R	X	L							
6,03895	6,26299	6,03895	nF/km	0,251	0,344	0,00109							
Xc1E	Xc2E	Xc3E		Ohm/km	Ohm/km	H/km							
527095	508239	527095	Ohm										
R1E	R2E	R3E											
3,5E+07	3,4E+07	3,5E+07	Mohm										
IvarausL1	IvarausL2	IvarausL3											
0,02224	0,02306	0,02224	A/km										
Keskinäiskapaistanssit							Laskettu oletuksilla						
Ck12	Ck13	Ck23					Linjan korkeus riippuma huomioiden				10,5	m	
1,47441	0,90605	1,47441	nF/km				Vaiheiden väli				1,1	m	
							Taso-orsirakenne						
							Ei vuorottelua						

Avolinjojen lopulliset komponenttiarvot on laskettu taulukkoon 5. Laskuissa on käytetty samoja kaavoja kuin maakaapeleiden laskennassa. Erona avolinjan komponentteja laskettaessa on se, että jokaisen vaiheen komponentit joudutaan laskemaan erikseen. Tämä johtuu linjaan muodostuneesta kapasitanssiepäsymmetriasta.

Taulukko 5. Avolinjojen komponenttiarvot.

AVOLINJIAN KOMPONENTTIARVOT																			
Raven 20 km										Pigeon 25 km									
Maakapasitanssit					Pitkittäiskomponentit					Maakapasitanssit					Pitkittäiskomponentit				
C1E	C2E	C3E			R	X	L			C1E	C2E	C3E			R	X	L		
115,2613	119,19	115,2613	nF		10,7	7,36	0,023428			147,9938	153,2897	147,9938	nF		8,425	8,85	0,02817		
Xc1E	Xc2E	Xc3E			Ohm	Ohm	H			Xc1E	Xc2E	Xc3E			Ohm	Ohm	H		
27616,37	26706,09	27616,37	Ohm		Maakapasitanssit puolitettuna					Maakapasitanssit puolitettuna									
R1E	R2E	R3E			C1E	C2E	C3E			R1E	R2E	R3E			C1E	C2E	C3E		
1841183	1780495	1841183	Ohm		57,63065	59,59501	57,63065	nF		1433960	1384419	1433960	Ohm		73,99689	76,64486	73,99689	nF	
Ivoraus1	Ivoraus2	Ivoraus3	@20V		Vuotovastukset					Vuotovastukset									
8,487865	8,777177	8,487865	mA		3,682367	3,560989	3,682367	Mohm		13,62286	14,11036	13,62286	mA		1,43396	1,384419	1,43396	Mohm	
Vuotovastukset					Vuotovastukset kaksinkertaistettuna					Vuotovastukset					Vuotovastukset kaksinkertaistettuna				
1,841183	1,780495	1,841183	Mohm		3,682367	3,560989	3,682367	Mohm		1,43396	1,384419	1,43396	Mohm		2,867921	2,768838	2,867921	Mohm	
Keskinäiskapasitanssit					Keskinäiskapasitanssit puolitettuna					Keskinäiskapasitanssit					Keskinäiskapasitanssit puolitettuna				
Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23		
27,17356	16,8989	27,17356	nF		13,58678	8,449451	13,58678	nF		35,59945	21,98983	35,59945	nF		17,79973	10,99492	17,79973	nF	
AL132 25 km										AL132 3 km									
Maakapasitanssit					Pitkittäiskomponentit					Maakapasitanssit					Pitkittäiskomponentit				
C1E	C2E	C3E			R	X	L			C1E	C2E	C3E			R	X	L		
150,9738	156,5748	150,9738	nF		6,275	8,6	0,027375			18,11685	18,78897	18,11685	nF		0,753	1,032	0,003285		
Xc1E	Xc2E	Xc3E			Ohm	Ohm	H			Xc1E	Xc2E	Xc3E			Ohm	Ohm	H		
21083,79	20329,58	21083,79	Ohm		Maakapasitanssit puolitettuna					Maakapasitanssit puolitettuna									
R1E	R2E	R3E			C1E	C2E	C3E			R1E	R2E	R3E			C1E	C2E	C3E		
1405656	1355373	1405656	Ohm		75,48689	78,28738	75,48689	nF		11713800	11294776	11713800	Ohm		9,058427	9,394485	9,058427	nF	
Ivoraus1	Ivoraus2	Ivoraus3	@20V		Vuotovastukset					Vuotovastukset									
13,89717	14,41274	13,89717	mA		2,811312	2,710746	2,811312	Mohm		0,200119	0,207544	0,200119	mA		11,7138	11,29478	11,7138	Mohm	
Vuotovastukset					Vuotovastukset kaksinkertaistettuna					Vuotovastukset					Vuotovastukset kaksinkertaistettuna				
1,405656	1,355373	1,405656	Mohm		2,811312	2,710746	2,811312	Mohm		11,7138	11,29478	11,7138	Mohm		23,4276	22,58955	23,4276	Mohm	
Keskinäiskapasitanssit					Keskinäiskapasitanssit puolitettuna					Keskinäiskapasitanssit					Keskinäiskapasitanssit puolitettuna				
Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23			Ck12	Ck13	Ck23		
36,86018	22,65113	36,86018	nF		18,43009	11,32556	18,43009	nF		4,423221	2,718135	4,423221	nF		2,211611	1,359068	2,211611	nF	

4 KOJEISTON ESITTELY

Tässä luvussa esitellään jakeluverkkomalliin kuuluvat kojeistot. Kojeistoihin kuuluvat VEOn Vector-keskijännitekojeisto ja kolme ohjaustaulua. Ohjaustaulut ovat VEOn Vecos-mallistoa. Vector esitellään kappaleessa 4.1 ja ohjaustaulut kappaleessa 4.2.

4.1 Vector

VEOn Vector -keskijännitekojeisto lanseerattiin syksyllä 2018. Vector on ilmaeristeinen sisätilojen keskijännitejärjestelmiin tarkoitettu kytkin- ja ohjauslaitteisto. Vector on läpäissyt uusimpien IEC-standardien tyyppitestit 40 kA tasolle asti. Sovellettu standardi on IEC 62271-200. Kaikki Vector-yksiköt valmistetaan VEOn tehtaalla Vaasassa. Kojeiston nimellisjännitteet ovat 12 sekä 24 kV. Kattavat sähköisten ja mekaanisten lukitusten yhdistelmät takaavat turvallisuuden ja huollon sekä estävät pääsyn mahdollisesti vaarallisiin osiin. Kojeisto on varustettu Hyundain tyhjiökatkaisijalla, joten kojeistossa ei käytetä SF₆-kaasua.⁸

Vector-yksiköt varustetaan kapasitiivisella jännitteenilmaisimella. Tavallisesti kojeistoissa on myös oveen asennettu suojarele, mutta tässä projektissa Vector-kentän suojarele on asennettu ohjaustauluun OT3. Vector-yksikön oveen piirrettiin kuitenkin mimiikkana suojarele, joka havainnollistaa opiskelijoille todellista tilannetta. Ovessa on myös hätä-seis-painike.

⁸ VEO Oy. Medium-voltage switchgear Vector.



Kuvio 8. Vector-keskijännitekojeisto.

Vectorin osalta piirikaaviot olivat jo valmiiksi suunniteltuja, joten se ei kuulunut opinnäytetyöhön. Opinnäytetyössä suunniteltiin kuitenkin Vectorin ja ohjaustaulujen väliset liitynnät. Tähän työhön suunniteltu Vector poikkeaa tavallisesta siten, että sen toinen ulkoseinä on valmistettu läpinäkyvästä polyykarbonaattilevystä. Tätä kautta opiskelijat pääsevät tutustumaan keskijännitekojeiston mekaaniseen rakenteeseen.

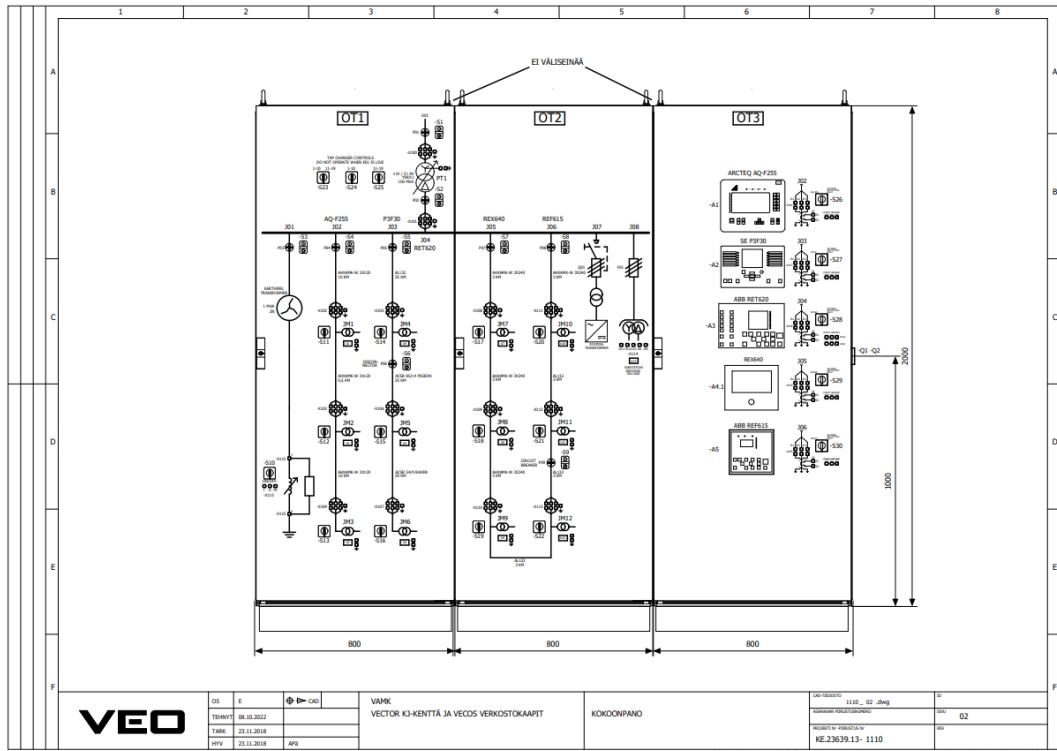
Jakeluverkkomalliin Vector liitettiin johtolähdön J05 katkaisijaksi. Päätettiin, että johtolähtöä ei kuitenkaan johdoteta Vectorin katkaisijan läpi, koska on helpompaa toteuttaa katkaisu vain kontaktorilla ohjaustaulun sisäisesti. Vectorin katkaisijaa kuitenkin ohjataan tilatiedon kautta: Vectorin katkaisija toimii aina, kun johtolähdön J05 kontaktori toimii.

4.2 Vecos-ohjaustaulut

Jakeluverkkomalliin suunniteltiin kolme kappaletta ohjaustauluja. Uudet kaapit ovat VEOn Vecos-mallistoa. Vecos-kojekaappien varsinainen kuvaileminen on haastavaa, koska jokainen kaappi räätälöidään projektille sopivaksi.

Vanhaan verkkomalliin verrattuna uusi kojeisto on selkeämpi, koska miikka on esitetty 1-viivaesityksenä. Vanhassa mallissa käytettiin 3-viivaesitystä, jota oli vaikeampi seurata. Näin ollen uudet ohjaustaulut ovat opiskelijoille havainnollisempia. Uusi malli on myös sähköturvallisuuden kannalta parempi, koska uudessa mallissa sähköverkkoa simuloidaan 20 voltin jännitteellä. Vanhassa mallissa käytettiin 200 volttia.

Uudet ohjaustaulut merkittiin tunnuksilla OT1, OT2 ja OT3 vasemmalta oikealle. Ohjaustaulun OT3 oveen sijoitettiin suojareleet, ja oveen johdotettiin myös turvaliittimet, joiden avulla verkkomalliin voidaan kytkeä ulkopuolinen suojarele. Ohjaustaulujen OT1 ja OT2 oviin piirrettiin jakeluverkkomallin miikka. Kuviossa 9 on esitelty jakeluverkkomallin kokoonpanosuunnitelma.



Kuvio 9. Ohjaustaulujen kokoonpanosuunnitelma.

5 KOJEISTON SUUNNITTELU

Tässä osiossa käydään tarkemmin läpi projektiin liittyvät suunnittelun vaiheet. Tässä luvussa tutustutaan paremmin myös kojeiston piirikaavioihin. Piirikaavioita tuli yhteensä noin 100 sivua, joten tässä luvussa on esitelty piirikaavioista vain mielenkiintoisimmat. Suunnittelutyö toteutettiin pääosin EPLAN-ohjelmistolla.

5.1 EPLAN

EPLAN tarjoaa ohjelmistoratkaisuja sähkösuunnittelun, automaatio-suunnittelun ja mekatronisen suunnittelun osa-alueilla. EPLANin ohjelmistoversioista tässä työssä käytettiin Electric P8 -ohjelmistoa. Electric P8 tarjoaa piirikaavioihin perustuvan automaattisen raporttien generoinnin osana suunnittelujärjestelmää. Projektin myöhemmissä vaiheissa järjestelmä tarjoaa tarvittavat tiedot esimerkiksi hankinta-, kokoonpano-, käyttöönotto- ja huoltodokumentointiin. Raportit, kuten riviliitin- ja johdinluettelot ja osaluettelot luodaan automaattisesti, jotta niitä voidaan käyttää projektin seuraavissa vaiheissa. Ohjelmisto tarjoaa myös muun muassa automaattikytkennän, jonka avulla piirisymbolit voidaan kytkeä loogisesti toisiinsa välittömästi, mikä nopeuttaa kaavioiden suunnittelua.⁹

5.2 Vikatilanteen simulointi

Jakeluverkkomallilla tullaan aiheuttamaan vikatilanteita tarkoituksenmukaisesti opiskelutarkoitukseen. Jakeluverkkomallissa vikatapaukset kytketään päälle ulkoisten laatikoiden avulla. Laatikkoja suunniteltiin kolmea eri tyy-

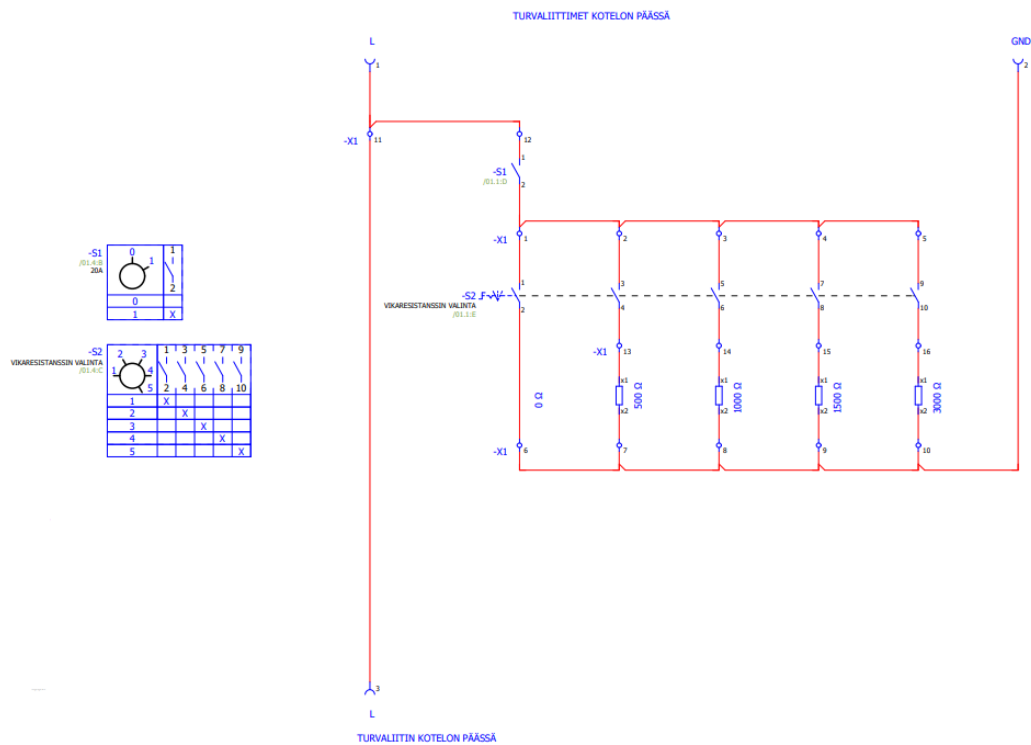
⁹ EPLAN Software & Service AB. EPLAN Electric P8.

piä, joilla simuloitiin oikosulkua, maasulkua sekä vaihekatkostilannetta. Vikalaatikot rakennettiin ohjauskoteloihin, joihin asennettiin nokkakytkimet, joilla vika voidaan helposti kytkeä päälle ja pois.

Ohjaustaulujen oviin suunniteltiin turvaliittimiä useisiin sähköverkon eri pisteisiin. Näihin pisteisiin voidaan kytkeä vika aiemmin esitellyillä vikalaatikoilla. Turvaliittimien paikat on suunniteltu siten, että vika tapahtuu pääsääntöisesti 20/0,4 kV muuntamoilla. Vian pystyy aiheuttamaan myös päämuuntajan ylä- tai alajännitepuolella. Päämuuntajan alajännitepuolelle kytketty vika vastaa vikatilannetta sähköaseman 20 kV kiskostossa.

5.2.1 Maasulku

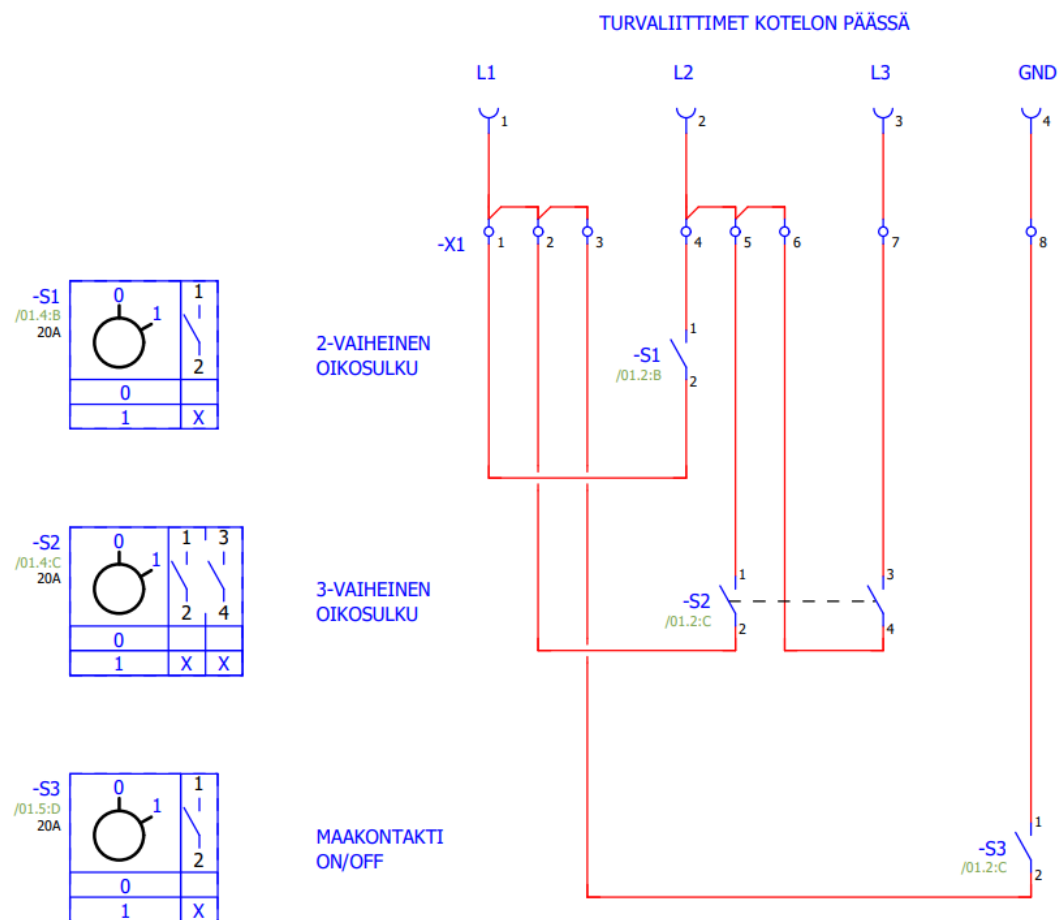
Maasulkulaatikkoon suunniteltiin 0–1-kytkimen lisäksi vikaresistanssin valintakytkin, jolla voidaan valita, onko maasulun vikaresistanssi 0, 500, 1000, 1500 vai 3000 Ω . Maasulkulaatikon piirikaaviosta muodostui kuvion 10 mukainen.



Kuvio 10. Maasulkulaatikon piirikaavio.

5.2.2 Oikosulku

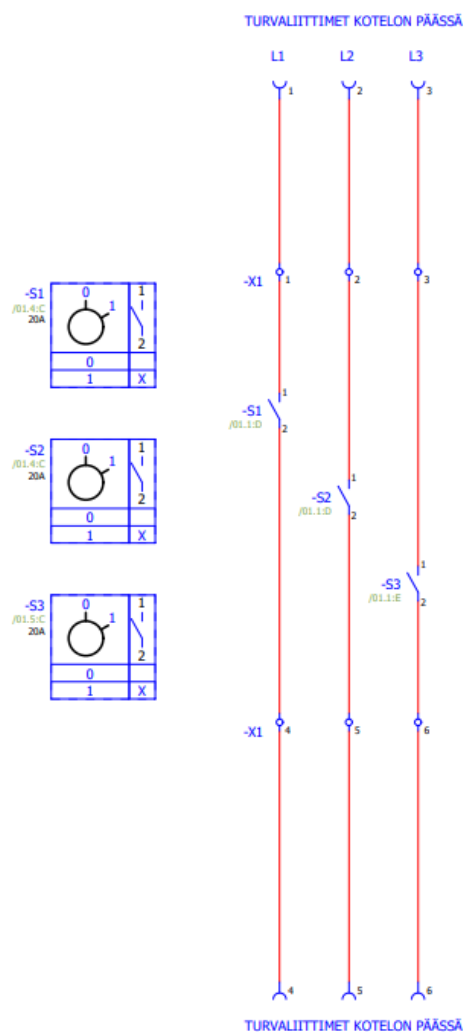
Oikosulkulaatikolla voidaan simuloida kaksi- ja kolmivaiheisia oikosulkuja maakontaktilla tai ilman maakontaktia. Kaksi- ja kolmevaiheisille oikosuluille on omat valintakytkimensä. Lisäksi laatikossa on myös oma valintakytkin maakontaktille. Oikosulkulaatikon piirikaavio on esitetty kuviossa 11.



Kuvio 11. Oikosulkulaatikon piirikaavio.

5.2.3 Vaihekatkos

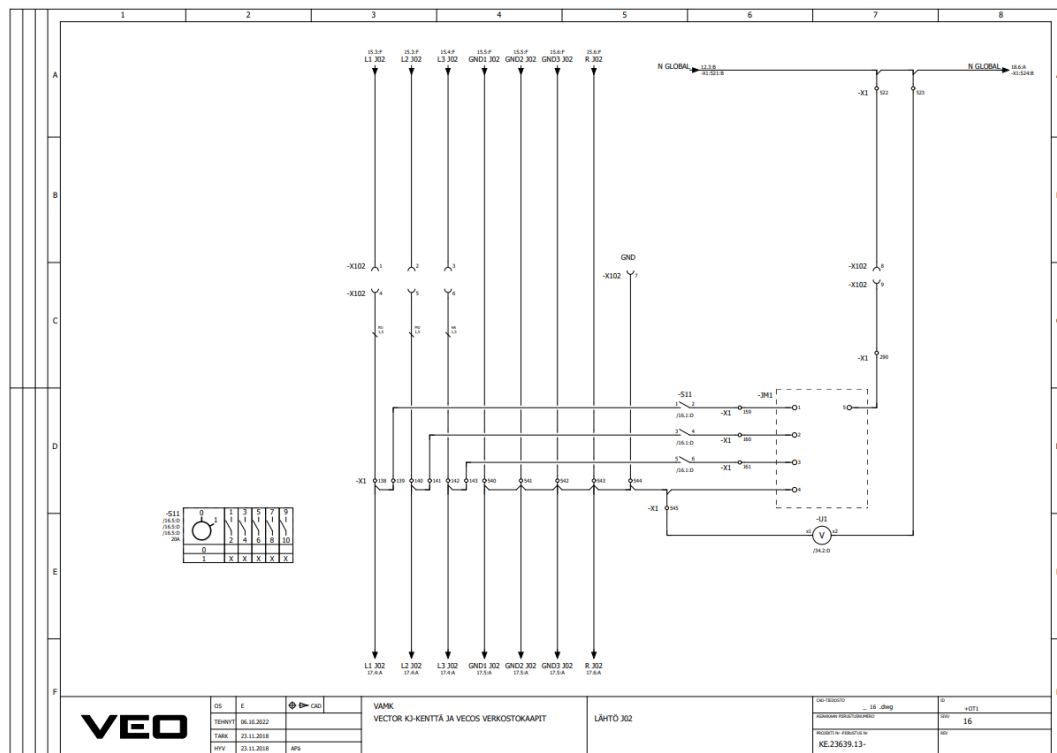
Vaihekatkostilanne on helppo simuloida sijoittamalla jokaiselle vaiheelle nokkakytkin, jolla vaihe voidaan katkaista. Vaihekatkoslaatikon piirikaavio on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12. Vaihekatkoslaatikon piirikaavio.

5.3 Muuntamoiden kytkentä

Muuntamoiden toteutuksesta ja piirilevyvuotoon muuttamisesta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 2.4. Piirilevyt sijoitettiin ohjaustaulujen sisälle DIN-kiskoliitynnällä. Kuvio 13 kertoo, kuinka muuntamo liitettiin mallin johtolähtöön. Muuntamon kytkentä haaroitettiin riviliittimiltä. Kuviossa on esitetty jakelumuntajan JM1 kytkentä johtolähtöön J02.



Kuvio 13. Muuntamon JM1 kytkentä johtolähtöön J02.

5.4 Katkaisijoiden ohjaus

Jakeluverkkomallissa katkaisijoiden tilalla käytettiin kontaktoreita. Kontaktoreilla saadaan 20 voltin piiri luotettavasti katkaistua. Ohjausjännitteeseen päätettiin käyttää 110 VDC. Ohjaus toteutettiin 0–1-painonapeilla. Ohjauksessa käytettiin myös kippirelettä, jotta johtolähtöjen katkaisijoita pystytään ohjaamaan suojarleiden kautta. Kompensointikentässä J01, jota ei ohjata suojarleiden kautta, käytettiin kippireleen sijasta edullisempaa apurelettä. Kuviossa 14 on esitelty esimerkkinä johtolähdön J02 katkaisijan ohjauspiiri.

laaja valikoima suojarkeitä, jotta opiskelijat pääsevät opettelemaan useiden eri suojarkevalmistajien tuotteiden käyttöä.

Suojareiden kytkentöjä määritettäessä apuna käytettiin suojarkevalmistajien manuaaleja. Manuaalien avulla selvitettiin, kuinka suojarkeiden I/O-kytkennät sekä virta- ja jännitemittaukset johdotettiin. Seuraavissa kappaleissa on esitelty suojarkelemallit tarkemmin.

5.5.1 ABB REF615

REF615 on suojarke, joka on suunniteltu voimalaitosten, sähköasemien ja teollisuuden sähkövoimajärjestelmien ohjaukseen, suojarukseen, mittaukseen ja valvontaan. Suojarke tukee IEC 61850 -tietoliikenneyhteysprotokollaa GOOSE-viestinnällä.¹⁰ Suojarke on esitelty kuviossa 15.

¹⁰ ABB Oy 2017. REF615 Ostajan opas.



Kuvio 15. REF615-suojarele¹¹.

Jakeluverkkomallissa REF615-suojarelettä käytettiin johtolähdön J06 suojaamiseen. Suojarele tilattiin ABB:ltä. Releen tilauskoodiksi muodostui HBFNAFAGNFA1BAB11G. Releeseen valittiin muun muassa I/O-kortti, jossa on neljä analogiatuloa ja viisi analogialähtöä sekä binäärikortti, jossa on 16 tuloa ja kymmenen lähtöä. Releen kommunikaatioliitynnöiksi valittiin vaihtoehto, jossa on kaksi RJ45-porttia sekä yksi portti valokuitua varten. Kommunikaatioprotokollaksi valittiin IEC 61850. Rele tukee myös jälleenytkentätoimintoa. Suojareleen käyttöjännitealueeksi valittiin 48–250 V.¹²

¹¹ ABB Oy 2022. Feeder protection and control REF615 IEC.

¹² ABB Oy. Relays-Online. REF615.

5.5.1 ABB RET620

ABB:n RET620-suojarele on suunniteltu suojaamaan erityisesti tehomuuntajia. RET620 kykenee myös jännitteen säätämiseen. Relettä voidaan käyttää useisiin yhden tai kahden kiskoston järjestelmiin, joko yhdellä tai kahdella katkaisijalla ja usealla kytkinlaitteella. RET620 tarjoaa myös kolmivaihemuuntajan differentiaalisuojauksen.¹³ Jakeluverkkomallissa RET620:tä käytettiin syöttökentän J04 suojaamiseen. Suojarele on esitelty kuviossa 16.



Kuvio 16. RET620-suojarele¹⁴.

RET620 tilattiin myös ABB:ltä. Suojareleen tilauskoodiksi muodostui NBT-NAAAANFA1BNA11G. Suojareleessä tulee vakiovarusteena kahdeksan analogiatuloa ja kuusi -lähtöä sekä kahdeksan binäärituloa ja 13 -lähtöä.

¹³ ABB Oy. 620-sarjan tuote-esite.

¹⁴ ABB Oy. Relays-Online. RET620.

Suojareleeseen valittiin myös optiona kortti, jossa on kahdeksan binäärituloa ja neljä -lähtöä. Suojareleen kommunikaatioliitännät valittiin kaksi RJ45 -porttia sekä yksi valokuituportti. Kommunikaatioprotokollaksi valittiin IEC 61850. Releeseen valittiin optiona jännitteensäätäjä.¹⁵

5.5.2 ABB REX640

ABB:n REX640 sopii kaikkiin sähköntuotannon ja sähkönjakelun sovelluksiin. REX640-suojaterminaalista tekee erikoisen se, että se on varustettu kosketusnäytöllä. **(Kuvio 17.)** REX640 tukee useita eri tietoliikenneprotokollia. Relettä voi konfiguroida vapaasti sovelluskohtaisten vaatimusten mukaan.¹⁶ Tässä työssä REX640:llä päätettiin suojata johtolähtö J05.

¹⁵ ABB Oy. Relays-Online. RET620.

¹⁶ ABB Oy. Protection and control REX640.



Kuvio 17. REX640-suojaterminaali¹⁷.

REX640 tilattiin myös ABB:ltä. Suojareleen tilauskoodiksi muodostui REX640B10NN+AIM2+AIM2+ADD1+ADD2+APP1+APP10+APP11+APP12+APP13+APP2+APP3+APP4+APP5+APP6+APP7+APP8+APP9+BIO1+CMP1+COM1+LNG1+MCT1+PCL3+PSM2+RTD1+SCT1. Kommunikaatiomoduliksi valittiin COM1, eli siinä on valokuituliityntä sekä kolme RJ45-porttia. Suojareleeseen valittiin myös yksi binäärikortti, jossa on 14 tuloa ja kahdeksan lähtöä. Releeseen otettiin myös RTD-moduuli, johon voidaan kytkeä lämpötilamittauksia. Suojareleeseen otettiin myös kaksi AIM2 korttia, joissa on kuusi virranmittauskanavaa sekä neljä jännitemittauskanavaa. Suojareleeseen valittiin myös kaikki mahdolliset ohjelmistupuolen varusteet. Kommunikaatioprotokollaksi valittiin IEC 61850.¹⁸

¹⁷ ABB Oy. Protection and control REX640.

¹⁸ ABB Oy. Relays-Online. REX640.

5.5.3 Arc-teq AQ-F255

Arc-teq on vaasalainen suojar-evalmista-ja. Jakeluverkkomalliin valikoitui Arc-teqin valikoimasta AQ-F255-mallinen suojar-ele. T-ata suojar-elett-ä k-ay-tettiin mallissa johtol-ahd-ön J02 suojaamiseen. Suojar-ele on esitetty kuvissa 18.



Kuvio 18. Arc-teq AQ-F255-suojar-ele¹⁹.

K-aytetyn suojar-eleen tilauskoodi on AQ-F255-PH0AABA-BDAAAAAAAAA. Valmistajan k-ayttoohjekirjasta selvi-aa, ett-ä suojar-ele on varustettu 80–265 V k-aytt-öj-annitealueella, viidell-ä virtamittauskanavalla ja nelj-ällä j-annitemit-

¹⁹ Arc-teq Relays Ltd 2018, 1. AQ-F255 Instruction manual.

tauskanavalla sekä yhdellä binääritulokortilla, jossa on kahdeksan tuloa. Lisäksi suojarleessä on myös valokaarisuojauskortti, mutta sitä ei käytetty tässä työssä.²⁰

5.5.4 Schneider Electric P3F30

Schneider Electricin P3F30 on kennotermiinaalityyppinen suojarle. Se sopii parhaiten johtolähdön suojaamiseen. Keskijännitemallissa sitä käytettiin johtolähdön J03 suojaamiseen. Suojarle on esitelty kuviossa 19.



Kuvio 19. Schneider Electric P3F30-suojarle²¹.

Suojarleen tarkka tilauskoodi on P3F30-CGGAA-DAENA-BA. Valmistajan käyttöohjekirjasta koodin purkamalla selviää, että suojarleeseen on valittu

²⁰ Arcteq Relays Ltd 2018, 410. AQ-F255 Instruction manual.

²¹ Schneider Electric 2020, 1. Easergy P3F30 User Manual.

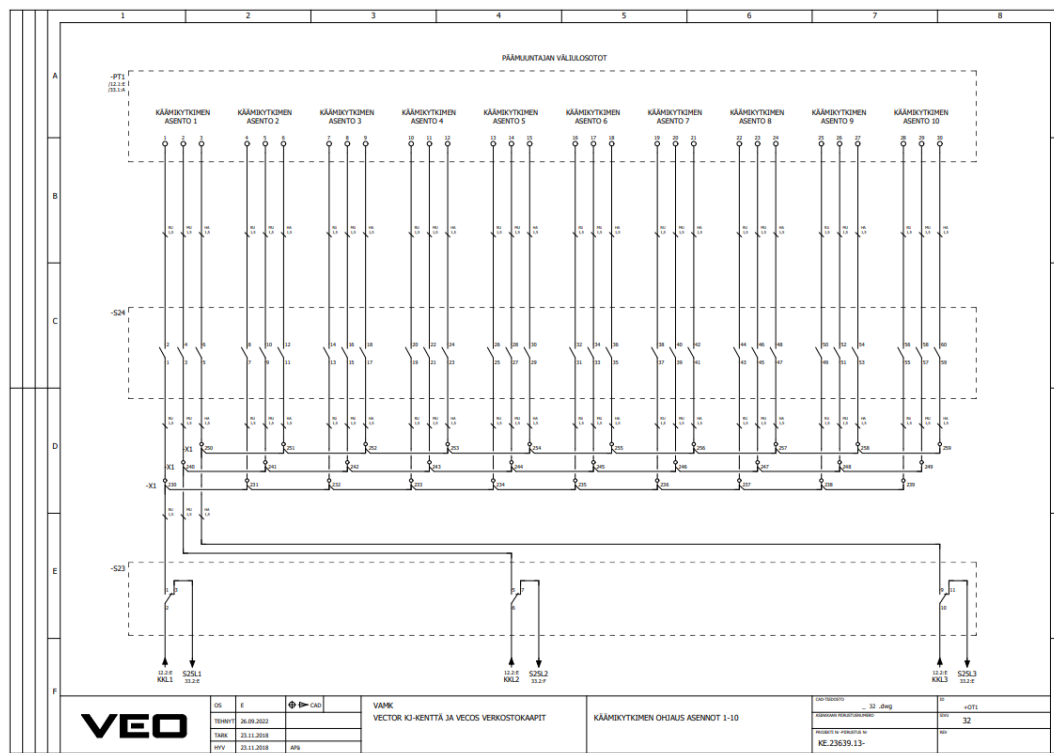
käyttöjännitealueeksi 110–230 V. Suojareleeseen on valittu myös kaksi samanlaista I/O-korttia. Niissä molemmissa on kuusi sisääntuloa ja neljä ulostuloa. Suojareleeseen on valittu myös valokaarisuojauskortti, johon voidaan kytkeä valokaarisuojausanturit. Valokaarisuojausta ei kuitenkaan otettu käyttöön tässä työssä. Suojareleen kommunikaatioliitännäksi on valittu kaksi kappaletta RJ45-portteja.²²

5.6 Käämikytkimen ohjaus

Mallin päämuuntajaan toteutettiin 19-asentoinen käämikytkin, joka vastaa todellista 110/20 kV muuntajan käämikytkintä. Se eroaa kuitenkin todellisesta käämikytkimestä ohjaustavaltaan. Todellista käämikytkintä ohjattaisiin askelmoottorin kautta. Jakeluverkkomallissa moottoriohjattu käämikytkin olisi turha ja kallis toteuttaa, koska jännite- ja virtatasot ovat mallissa niin matalat. Päämuuntajan käämien väliulosotot olivat johdotettu liittimille.

Käämikytkimen ohjausta varten täytyi teettää kaksi erikoiskytkintä. Käämikytkimen ohjaukseen tarvittiin kolme kytkintä. Yhdellä kytkimellä valitaan, käytetäänkö asentoja 1–10 vai 11–19. Tämä kytkin on varustettu kolmella vaihtokoskettimella, jokaiselle vaiheelle yksi kosketin. Teetetyistä kytkimistä toisella ohjataan asentoja 1–10 ja toisella asentoja 11–19. Teetetyt kytkimet ovat askelkytkimiä, joissa jokaisessa asennossa toimii kolme kosketinta, eli jokaiselle vaiheelle yksi. Käämikytkintä olisi voitu ohjata vain yhdellä 19-asentoisella kiertokytkimellä, jossa olisi ollut tarpeeksi koskettimia, mutta tällaista kytkintä oli vaikea toteuttaa. Toteutetun ohjauspiirin piirikaavio on esitelty kuviossa 20. Kuviossa on esitelty asentojen 1–10 ohjaus.

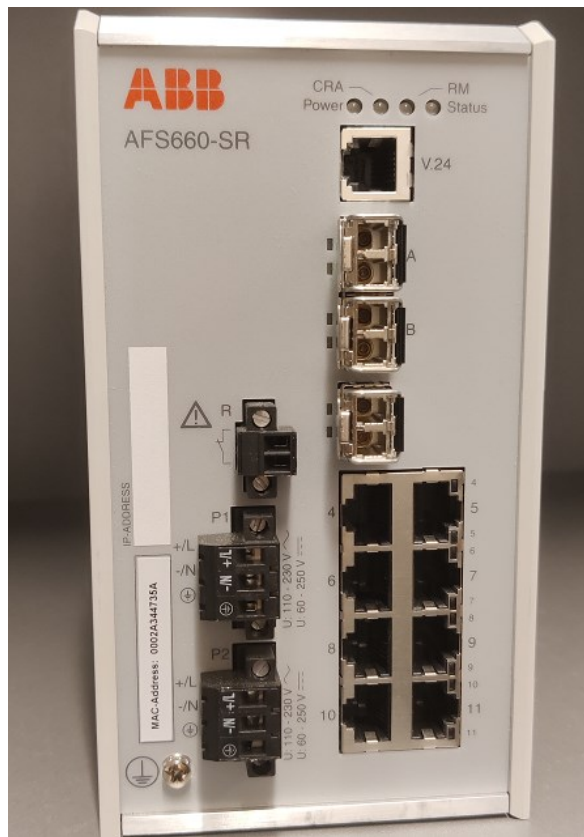
²² Schneider Electric 2020, 389. Easergy P3F30 User Manual.



Kuvio 20. Käämikytkimen ohjaus, asennot 1–10.

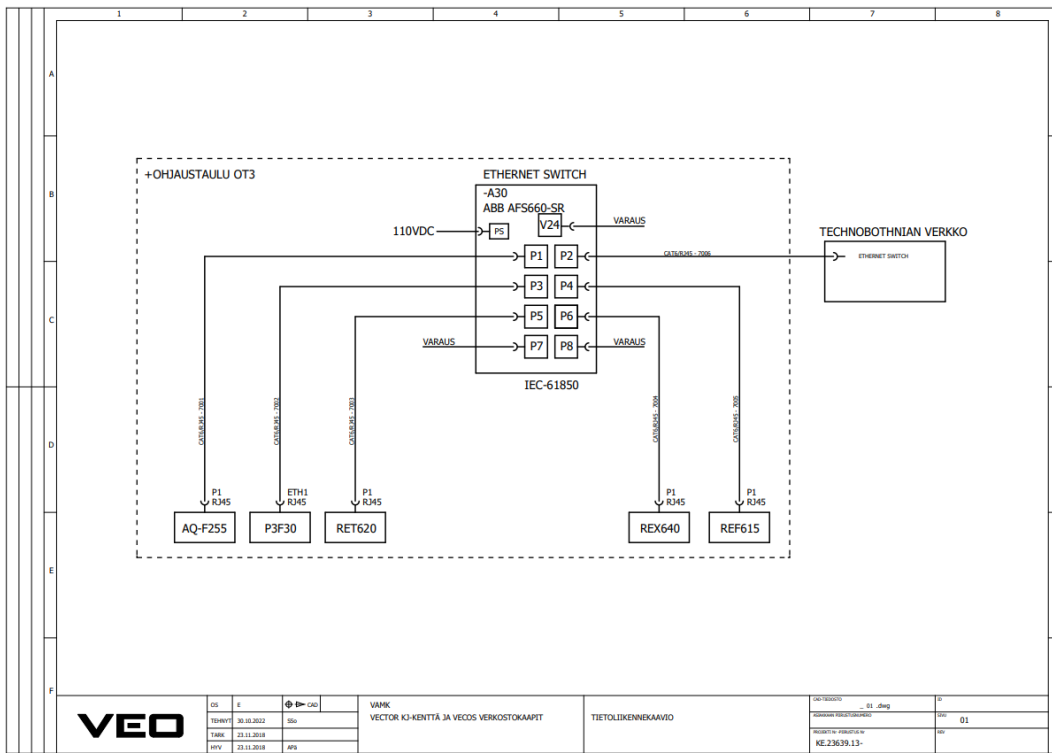
5.7 Tietoliikenne

Uusi sähköjako- ja verkko-omallisuus liitetään Technobothnian tietoliikenneverkkoon. Verkkomallissa tietoliikenneverkkoon liittyviä laitteita ovat suojarahitit. Suojarahitit johdotettiin ohjaustaulun OT3 sisäisesti samaan Ethernet-kytkimeen. Käytetyn kytkimen tyyppi on ABB AFS660-SR (**Kuvio 21.**) Kytkimessä on kahdeksan RJ45 –porttia sekä kolme porttia valokuituliittymöille. Kytkin tukee IEC 61850 –standardin mukaista kommunikaatioprotokollaa.



Kuvio 21. Mallissa käytetty Ethernet-kytkin.

Ohjaustauluissa käytetyt suojarieleet liitetään Technobothnian verkkoon. Technobothnian työpöydälle sijoitetaan myös yksi Ethernet-kytkin, jonka avulla opiskelijat voivat liittää ohjelmointi-PC:n helpommin suojarielesiin. Työssä suunniteltu tietoliikennekaavio on esitetty kuviossa 22.



Kuvio 22. Tietoliikennekaavio.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn lopputuloksena saatiin valmiit suunnitelmat varsin innovatiiviseen keskiännitemalliin. Mallin avulla voidaan opetella laajasti sähkötekniikan eri osa-alueita. Erityisesti malli soveltuu suojareleiden käytön opetteluun ja viikatilanteiden simuloimiseen. Omasta mielestäni työ oli erittäin mielenkiintoinen, opettavainen ja sopivan haastava. Työ tarjosi laajan katsauksen sähköverkon lähes jokaiseen osa-alueeseen.

Työssä eniten työtunteja kului piirikaavioiden suunnitteluun ja puhtaaksi piirtämiseen. Osien mitoitus ja valinta oli myös melko työlästä. Haasteita opinäytetyössä toivat muun muassa komponenttien valitseminen ja teettäminen. Jakeluverkkomalliin tarvittiin paljon tavaraa, joita saatiin vain erikoistilauksena. Piirikaaviosuunnittelussa alkuun pääseminen oli myös haastavaa, koska en ollut aikaisemmin käyttänyt EPLAN-suunnitteluohjelmistoa. Työssä oli vaikeaa ottaa mallia vanhoista projekteista, koska jakeluverkkomalli on melko uniikki kokonaisuus. Vanhoista projekteista saatiin kuitenkin mallia joihinkin asioihin, kuten osavalintoihin.

Työssä päästiin haluttuun tavoitteeseen, eli saatiin valmiit suunnitelmat jakeluverkkomalliin Technobothnialle. Opinäytetyön päättöhetkellä Vectoryksikkö oli valmis ja ohjaustaulujen osat olivat tilauksessa ja menossa VEOn tehtaalle valmistukseen. Jakeluverkkomalli tullaan ottamaan käyttöön Technobothnialla kevään 2023 aikana.

LÄHTEET

ABB Oy. 2017. REF615 Ostajan opas. Viitattu 14.9.2022. https://library.e.abb.com/public/f5dcf411ba594a388a7b8cc315ac01d3/REF615_pg_758316_Fla.pdf?x-sign=Bw6E64UfUQvQYid7CzRJte2/DUIXYkAvv2xnD-cQauKCKmP3D7sOloO8NtFFdDBU2.

ABB Oy. 2019. 620-sarjan tuote-esite. Viitattu 14.9.2022. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2NGA000062&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

ABB Oy. 2022. Feeder protection and control REF615 IEC. Viitattu 14.9.2022. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec>.

ABB Oy. Protection and control REX640. Viitattu 14.9.2022. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/multiapplication/protection-and-control-rex640>.

ABB Oy. Relays-Online. REF615. Viitattu 14.9.2022. https://relays.protection-control.abb.com/configurator/product/REF615E_1G/configure.

ABB Oy. Relays-Online. RET620. Viitattu 14.9.2022. https://relays.protection-control.abb.com/configurator/product/RET620E_1G/configure.

ABB Oy. Relays-Online. REX640. Viitattu 14.9.2022. https://relays.protection-control.abb.com/configurator/product/REX640E_A/rex640configure.

Arcteq Relays Ltd. 2018. AQ-F255 Instruction manual. Viitattu 14.9.2022. <https://arcteq.fi/wp-content/uploads/2019/11/AQ-F255-Instruction-manual-v2.01EN.pdf>.

EPLAN Software & Service AB. EPLAN Electric P8. Viitattu 14.9.2022. <https://www.eplan.fi/ratkaisut/eplan-electric-p8/>.

Koski, J. 2021. Sähköverkot-opintojakson kurssimateriaali. Vaasan ammattikorkeakoulu.

Multirel Oy. Maadoitusmuuntaja. Viitattu 1.9.2022. <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maadoitusmuuntaja/>.

Multirel Oy. Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus. Viitattu 15.9.2022. <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>.

Mäkinen, O. 2008. Sähköverkot. Sähköverkot-opintojakson luentomateriaali. Vaasan ammattikorkeakoulu.

Schneider Electric. 2020. Easergy P3F30 User Manual. Viitattu 14.9.2022. https://www.se.com/ww/en/download/document/P3F30_en_M_F005_ANSI_web/.

Suomela, T. AHXAMK-W kaapelien suojavaippojen resistanssit. Sähköpostiviesti 14.2.2022. Viestin saaja: Mikko Västi.

VEO Oy. Company. Viitattu 1.9.2022. <https://veo.fi/about-us/company/>.

VEO Oy. Medium-voltage switchgear Vector. Viitattu 11.5.2022. <https://www.veo.fi/solution/medium-voltage-switchgear/>.

Västi, M. 2022. Simulointiharjoitus 2 – Jakeluverkon tutkimuksia. Vaasan ammattikorkeakoulu.

LIITTEET

LIITE 1. Prysmian Groupin AHXAMK-W kaapelien tekniset tiedot.

Voimakaapelit 10 kV ja 20 kV AHXAMK-W 20 kV 3-johtiminen

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI		AHXAMK-W 3xS(DAI)+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3xS(SAI)+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3xT(DAI)+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3xT(SAI)+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3xT(SAI)+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x240(AI)+78Cu 20 kV (R)	AHXAMK-W 3x300(AI)+70Cu 20 kV (R)	
Sähkönumero		0624250	0624252	0624253	0624254	0624255	0624256	0624257	
RAKENNETIETOJA (1)									
Johtimen halkaisija	mm	8,0	11,3	12,7	14,1	15,7	18,1	20,3	
Vaiheväjän halkaisija	mm	28	32	33	35	36	40	42	
Kaapelin ulkohalkaisija (ympäri järsitetyn ympyrän halkaisija)	mm	63	70	73	76	79	88	93	
Massa	alumiini kupari kaapeli	kg/km kg/km kg/km	510 305 2380	910 305 3050	1100 305 3350	1350 305 3700	1650 305 4150	2200 600 6100	2700 600 6100
TOIMITUSTIETOJA									
Vakiotoimitus pituus	m	500	500	500	500	500	500	500	
Toimituskela		K24	K24	K24	K26	K26	K28	K28	
Massa (t)	kaapeli+kela	kg	1600	1980	2130	2750	2980	3860	4230
MEKAANISIA ARVOJA (3)									
Pienin sallittu taivutus säde asennusvedossa	vaihe kaapeli	m	0,42 0,50	0,48 0,56	0,50 0,58	0,53 0,61	0,54 0,63	0,60 0,70	0,63 0,74
Pienin sallittu taivutus säde lopullisessa asennuksessa (4)	vaihe kaapeli	m	0,29 0,35	0,34 0,39	0,35 0,41	0,37 0,43	0,38 0,44	0,42 0,49	0,44 0,52
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	johdin 20°C	Ω/km	0,641	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1) (2)	johdin 65°C johdin 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	johdin 20°C	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,268	0,268
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,45	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,17	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,34
Varausvirta (1)		A/km	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2
Maasulkuvirta (1)		A/km	1,9	2,4	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7
KUORMITETTAVUUS (3)									
Maassa (2)	johdin 65°C	A	155	235	265	300	330	385	435
Ilmassa (2)	johdin 65°C johdin 90°C	A A	160 195	230 280	265 325	300 370	345 425	400 490	460 565
TERMINEN OIKOSULKUKESTIVUUS (3)									
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (5) kosketussuojaja (6) keskusköysi (7)	kA kA kA	4,7 2,4 5,0	8,9 2,7 5,0	11,3 2,9 5,0	14,1 3,0 5,0	17,4 3,2 5,0	22,6 4,4 9,7	28,3 4,8 9,7

(1) Lihavoitu

(2) Kosketussuojat ja keskusköysi kytketty yhteen yhtöyden molemmissa päässä.

(3) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Vileistä tuotetietoa.

(4) Taivutus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(5) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(6) Kosketussuojan lämpötila on ennen oikosulkua 85°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(7) Keskusköyden lämpötila on ennen oikosulkua 55 °C ja oikosulun päättyessä 200 °C.

(8) Kaapeli on saatavana myös 35 mm² keskusköydellä.

17.04.2018 © Prysmian Group. Kaikki oikeudet pidätetään.

Tämän asiakirjan sisältämää tietoa ei saa kopioida tai käyttää missään muodossa osaksi tai kokonaan ilman Prysmian Groupin kirjallista lupaa. Informaation uskotaan olevan ajan tasalla julkaisuajankohtana. Prysmian Group pidättää itselleen oikeuden korjata asiakirjan sisältämää tietoa ilman erillistä ilmoitusta. Spesifikaatio ei ole juridisesti pätevä ilman Prysmian Groupin erillistä sitoumusta.

Prysmian
Group

LIITE 2. Ilmajohdojen tekniset tiedot SA 5:94-verkostosuosituksesta.

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi	Maakapa-sitanssi	Käyttöka-pasitanssi	Suurin sallittu kuor-mitusvirta	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähty-misaika-vakio τ min
	Rv Ω /km	Xv Ω /km					Cm μ F/km	Ck μ F/km	
	+20 °C 1)	+40 °C 2)	3)	4)	3)	5)	T1-liittimet	T2-liittimet	
Cu 16	1,14	1,23	0,412	0,0061	0,0088	145	2,2	2,3	3
Cu 25	0,718	0,774	0,398	0,0061	0,0092	195	3,5	3,7	4
Cu 35	0,526	0,567	0,387	0,0061	0,0094	240	4,8	5,1	5
Cu 50	0,365	0,394	0,377	0,0061	0,0097	305	6,9	7,3	7
Cu 70	0,266	0,287	0,365	0,0061	0,010	370	9,5	10,1	9
Cu 95	0,195	0,210	0,355	0,0061	0,010	465	13,1	13,8	11
Cu 120	0,150	0,162	0,348	0,0061	0,011	535	17,1	18	13
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0092	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0095	230	3,5	-	4
Al 62	0,459	0,496	0,368	0,0061	0,0099	305	5,6	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15
AlMgSi 25	1,37	1,48	0,397	0,0061	0,0092	155	2,5	-	3
AlMgSi 40	0,834	0,901	0,382	0,0061	0,0095	210	3,5	3,7	4
AlMgSi 62	0,527	0,569	0,368	0,0061	0,0099	285	5,5	5,8	6
AlMgSi 99	0,332	0,359	0,354	0,0061	0,010	390	8,8	9,3	8
AlMgSi 132	0,251	0,271	0,344	0,0061	0,011	460	11,7	12,4	10
AlMgSi 178	0,188	0,203	0,335	0,0061	0,011	560	15,8	16,7	13
AlMgSi/Fe 21/4 Fersmetal	1,56	1,68	0,398	0,0061	0,0092	145	1,9	2	3
AlMgSi/Fe 106/25	0,317	0,343	0,344	0,0061	0,011	400	9,4	9,9	10
Al/Fe 7/9 Bantam	4,31	4,66	0,413	0,0061	0,0088	80	0,6	0,7	2
Al 11/14 Mappic	2,71	2,93	0,397	0,0061	0,0092	110	1,1	1,2	3
Al/Fe 21/4 Swan	1,35	1,46	0,398	0,0061	0,0092	155	2	2,1	3
Al/Fe 34/6 Sparrow	0,847	0,915	0,383	0,0061	0,0095	210	3,2	3,3	4
Al/Fe 42/25 Sevo	0,682	0,737	0,365	0,0061	0,010	250	4	4,2	7
Al/Fe 54/9 Raven	0,535	0,578	0,368	0,0061	0,010	280	5,1	5,3	6
Al/Fe 75/14 Lovisa	0,380	0,411	0,357	0,0061	0,010	335	7,1	7,5	9
Al/Fe 85/14 Pigeon	0,337	0,364	0,354	0,0061	0,010	360	8	8,4	9
Al/Fe 89/52 Dotteral	0,323	0,349	0,342	0,0061	0,011	400	8,4	8,8	13
Al/Fe 93/39 Imatra	0,310	0,335	0,344	0,0061	0,011	405	8,7	9,2	12
Al/Fe 106/25 Suursavo	0,279	0,301	0,344	0,0061	0,011	430	10	10,5	10
Al/Fe 108/23 Vaasa	0,266	0,287	0,344	0,0061	0,011	420	10	10,5	10
Al/Fe 148/68 Kuopio	0,196	0,212	0,328	0,0061	0,011	550	13,9	14,6	16
Al/Fe 152/25 Ostrich	0,190	0,205	0,335	0,0061	0,011	550	14,3	15	15
Al/Fe 305/39 Duck	0,095	0,103	0,314	0,0061	0,012	845	28,7	30,2	22