

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Jarkko Tyni

Teollisuuden sähkönjakeluverkon suunnittelu

Työn tarkastajat:

Prof. Jukka Lassila

TkT Jouni Haapaniemi

Työn ohjaaja:

Section Manager, Electrification Juha Vejjola

9.6.2025

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jarkko Tyni

Teollisuuden sähköjakeluverkon suunnittelu

Diplomityö

2025

97 sivua, 22 kuvaa, 19 taulukkoa ja 8 liitettä

Työn tarkastajat: Prof. Jukka Lassila

TkT Jouni Haapaniemi

Työn ohjaaja: Section Manager, Electrification Juha Veijola

Hakusanat: teollisuus, sähköjakelu, suunnittelu, oikosulkuvirta

Teollisuuden sähköjakeluverkko on tärkeässä asemassa, sillä se mahdollistaa tuotannon toiminnan. Yhtenä tärkeimmistä vaatimuksista on, että sen toiminta on luotettavaa ja häiriötöntä. Teollisuuden sähköjakeluverkon ominaisuuksia ovat lyhyillä etäisyyksillä siirrettävät suuret sähkötehot sekä suuret oikosulkuvirrat. Tässä diplomityössä tutustutaan teollisuuden sähköjakeluverkon suunnitteluun. Tapaustutkimuksessa suunnitellaan teollisuusympäristössä sijaitsevan kohteen sähköjakeluverkko.

Työn kirjallisuusselvityksessä tutustutaan teollisuuden sähköjakeluverkon yleisiin toteutusperiaatteisiin, käydään läpi suunnittelun teoriaa ja perehdytään suunnitteluun vaikuttaviin ohjeistuksiin ja standardeihin. Kirjallisuusselvitykseen pohjautuen tehdään tapaustutkimuksen kohteen sähköjakeluverkon suunnittelu.

Tapaustutkimuksessa suunnitellaan lähtötietojen perusteella teollisuusympäristöön sijoittuvan kohteen sähköjakeluverkko. Sähköjakeluverkon suunnittelu käydään läpi vaiheittain; tehdään valinnat ja mitoitukset sähköverkon rakenteelle, komponenteille ja suojauksille. Lisäksi työssä tarkastellaan elinkaarikustannusten muodostumista eri sähköjakeluverkon komponenteille.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Jarkko Tyni

Industrial electrical distribution network desing

Master's Thesis

2025

97 pages, 22 figures, 19 tables and 8 appendixes

Examiners: Prof. Jukka Lassila
D.Sc. (Tech.) Jouni Haapaniemi
Supervisor: Section Manager, Electrical Juha Veijola

Keywords: industry, electrical distribution, desing, short-circuit current

The industrial electrical distribution network plays an important role, as it enables production operations. One of the most important requirements is that its operation is reliable and uninterrupted. The feature of the industrial electrical distribution network are high electrical power transmitted over short distances, as well as high short-circuit currents. This master's thesis introduces the design of an industrial electrical distribution network. In the case study, the electrical distribution network of a site located in an industrial environment is designed.

The literature review of the thesis introduces the general implementation principles of an industrial electrical distribution network, reviews the theory of design, and familiarizes itself with the guidelines and standards that influence the design. Based on the literature review, the design of the electrical distribution network of the site of the case study is carried out.

In the case study, the electrical distribution network of a site located in an industrial environment is designed based on the initial data. The design of the electrical distribution network is reviewed in stages; choices and dimensions are made for the structure, components, and protection of the electrical network. In addition, the work examines the formation of life cycle costs for various components of the electrical distribution network.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty AFRY Finland Oy:lle. Kiitokset AFRY Finland Oy:lle mahdollisuudesta suorittaa opinnot työn ohessa sekä kiitokset Juha Veijolalle työn ohjauksesta. Kiitokset työn tarkastajille Jukka Lassilalle ja Jouni Haapaniemelle työn tarkastamisesta ja neuvoista työn aikana.

Erityiskiitokset haluan osoittaa aviopuolisolleni ja lapsille kärsivällisyydestä ja tuesta mitä olen saanut opintojeni aikana.

Taivalkoskella 9.6.2025

Jarkko Tyni

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	8
1 JOHDANTO.....	11
1.1 Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät.....	11
1.2 Työn rajaukset.....	12
2 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELU.....	13
2.1 Pääjakeluverkko	15
2.1.1 Säteittäinen verkko.....	15
2.1.2 Rengasverkko	16
2.1.3 Silmukoitu verkko.....	16
2.2 Pienjänniteverkko teollisuudessa	17
2.2.1 Jakelujärjestelmät.....	19
2.3 Jakelujärjestelmien maadoitustavat.....	20
3 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON VIKAVIRRAT	21
3.1 Oikosulkuvirrat	21
3.1.1 Sysäysoikosulkuvirta	22
3.1.2 Pysyvän tilan oikosulkuvirta	23
3.1.3 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta	23
3.1.4 Oikosulkuvirtojen laskeminen Theveninin menetelmällä.....	25
3.2 Oikosulkupiirin impedanssit.....	26
3.2.1 Syöttävä verkko	26
3.2.2 Muuntajat ja kuristimet	27
3.2.3 Tahtikoneet.....	28
3.2.4 Epätahtimoottorit	28
3.2.5 Kaapelit ja kiskostot.....	29
3.2.6 Vikaimpedanssi.....	30
4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON SUOJAUS	31
4.1 Suojauksien vaatimukset	31
4.1.1 Aika- ja virtaselektiivinen suojaus.....	31
4.1.2 Lukitussuojaus	33
4.2 Relesuojaus.....	34
4.2.1 Ylivirtarele.....	34

4.2.2	Differentiaalirele.....	36
4.3	Pienjännitesuojalaitteet.....	37
4.3.1	Katkaisijat.....	37
4.3.2	Sulakkeet.....	38
5	TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON SUUNNITTELU JA	
	MITOITUS.....	41
5.1	Verkon mitoitus.....	41
5.2	Keskusten mitoitus.....	41
5.2.1	Keskuksen nimellisvirran määrittäminen.....	42
5.3	Muuntajan mitoitus.....	42
5.3.1	Taajuusmuuttajakäytön syöttömuuntajan mitoitus.....	43
5.4	Kaapelin mitoittaminen.....	44
5.4.1	Kaapelin kuormitettavuus.....	44
5.4.2	Kaapelin jännitteenalenema.....	45
5.4.3	Terminen oikosulkukestoisuus.....	45
5.5	Pienjännitepuolen suurten virtojen sähkönjakelu.....	45
6	TALOUDELLISUUSLASKELMAT.....	47
6.1	Elinkaarikustannukset.....	47
6.2	Investointilaskentamenetelmät.....	47
6.2.1	Nykyarvomenetelmä.....	48
6.2.2	Annuiteettimenetelmä.....	49
6.2.3	Sisäisen korkokannan menetelmä.....	50
6.2.4	Takaisinmaksuajan menetelmä.....	50
6.3	Herkkyysanalyysi.....	51
6.4	Teho- ja energiahäviöt.....	51
7	TAPAUSTUTKIMUS.....	53
7.1	Pumppaamon tehontarpeet.....	54
7.2	Pumppaamon sähkönjakeluverkko.....	54
7.3	Muuntajien mitoitus.....	56
7.4	Keskusten nimellisvirrat.....	57
7.5	Kaapelointi.....	57
7.5.1	Pienjänniteverkon kaapelointi.....	57
7.5.2	Keskijänniteverkon kaapelointi.....	59

7.6	Verkostolaskentaohjelman tehonjakolaskenta	60
7.7	Oikosulkuvirtojen laskenta	61
7.7.1	Keskusten ja kaapeleiden oikosulkukestoisuudet	62
7.8	Suojausasettelut	66
7.9	Selektiivisyystarkastelu	69
7.10	Elinkaarikustannukset	72
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOKSET	75
9	YHTEENVETO	79
	LÄHDELUETTELO	80

LIITTEET

LIITE 1:	Prosessilaitteiden sähkötekniiset tiedot
LIITE 2:	Rakennussähkö ja LVIA-laitteiden sähkötekniiset tiedot
LIITE 3:	Taulukko 1. Kaapeleiden ja kiskosiltojen tekniiset tiedot Taulukko 2. Muuntajien tekniiset tiedot
LIITE 4:	Laskentaesimerkki 1. Oikosulkuvirtojen laskenta
LIITE 5:	Laskentaesimerkki 2. Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
LIITE 6:	Verkostolaskentaohjelma: Pumppaamon sähkönjakeluverkon tehonjakolaskenta
LIITE 7:	Verkostolaskentaohjelma: Oikosulkuvirtojen laskenta
LIITE 8:	Laskentaesimerkki 3: Häviökustannusten laskenta

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

muuttujat

a	annuiteettitekijä
A	kerroin
c	jännitekerroin
I	virta
I_{cw}	lyhytaikainen oikosulun mitoitusarvo
I_k	pysyvän tilan oikosulkuvirta
I_k'	muutosoikosulkuvirta
I_k''	alkuoikosulkuvirta
I_{kv}''	syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta
I_n	nimellisvirta
I_{th}	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
i_p	sysäysoikosulkuvirta
I_{pk}	oikosulun mitoituskestovirran huippuarvo
I_s	moottorin käynnistysvirta
I_{1s}	1 sekunnin suurin sallittu oikosulkuvirta
$K_{häv1}$	ensimmäisen vuoden häviökustannus
K_{inv}	investoinnin kustannukset
m	tasavirtakomponentti
n	vaihtovirtakomponentti, kerroin
p	moottorin napapariluku, kerroin, korkoprosentti
P_h	kaapelin kuormitushäviöteho
P_k	kuormitushäviöteho
P_{kn}	muuntajan nimelliskuormitushäviö
P_n	moottorin nimellispätöteho
P_0	tyhjäkäyntihäviöteho
r	kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohti, tehon kasvu vuodessa prosentteina
R	resistanssi
R_{kv}	syöttävän verkon resistanssi
R_M	muuntajan oikosulkuresistanssi
R_S	verkon oikosulkuresistanssi

S	muuntajasta otettu teho
S_{kv}''	syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho
S_n	nimellinäennäisteho
t	aika
T	lämpötila, tarkasteltava ajanjakso
t_h	häviöiden huipunkäyttöaika
t_{TRIP}	laukaisuaika
u_h	kuristimen nimellinen jännitteenalenema
u_k	muuntajan oikosulkujännite prosentteina
u_r	muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina
U_n	nimellisjännite
U_{nv}	nimellisvaihejännite
W_h	häviöenergia
x	alku-, muutos- tai tahtireaktanssi prosentteina, kaapelin reaktanssi
X	reaktanssi
X_{kv}	syöttävän verkon reaktanssi
X_M	muuntajan oikosulkureaktanssi
X_S	verkon oikosulkureaktanssi
Z_j	kaapelin impedanssi
Z_k	muuntajan oikosulkuimpedanssi
Z_{kv}	syöttävän verkon impedanssi
Z_m	epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi
Z_T	theveninin impedanssi

symbolit

φ	vaiheensiirtokulma
κ	sysäyskerroin, kapitalisointikerroin
ψ	apukerroin, joka ottaa huomioon tehonkasvun ja korkoprosentin
ε	annuiteetti

lyhenteet

AHXAMK	alumiinijohtiminen PEX-eristeinen vesitiivis maakaapeli
AHXCMK	alumiinijohtiminen palosuojattu teollisuuskaapeli

I	pikalaukaisu
I>	ylivirtasuojaus, alempi porras
I>>	ylivirtasuojaus, ylempi porras
I>>>	ylivirtasuojaus, pikalaukaisuporras
IEC	International Electrotechnical Commission
L	ylikuormitussuojaus
PEX	ristisilloitettu polyeteeni
PSK	PSK Standardisointi
PVC	polyvinyylikloridi
S	hidastettu oikosulkusuojaus
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry

1 JOHDANTO

Teollisuudessa sähköjakeluverkko on yksi tärkeimmistä kokonaisuuksista mikä mahdollistaa muiden tuotannon osa-alueiden toiminnan. Sähkökatkoja aiheuttava sähköjakeluverkko lamauttaa tuotannon ja voi aiheuttaa merkittäviä tuotannonmenetyksiä. Tämä asettaa sähköjakeluverkon toiminnalle vaatimukset ja sen on kyettävä toimimaan luotettavasti. Tuotantoa häiritsevät sähköjakelun keskeytykset ja niiden kesto on pyrittävä minimoimaan. Sähköjakeluverkon toimintaan ja luotettavuuteen voidaan vaikuttaa jo sen suunnitteluvaiheessa. Suunnitteluvaiheessa on pyrittävä valitsemaan oikeat sähkötekniset ratkaisut sähköjakeluverkon toteutukseen mitkä ovat myös kustannustehokkaita.

1.1 Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät

Tämän diplomityön tavoitteena on perehtyä teollisuuden sähköjakeluverkon suunnitteluun, ja tutkia teollisuuden sähköjakeluverkon rakennetta ja ominaisuuksia, sekä selvittää kuinka nämä asiat vaikuttavat suunnittelun läpiviemiseen. Diplomityössä käydään läpi teollisuuden sähköjakeluverkon eri osa-alueiden suunnitteluvaiheet ja tehdään sähkötekniset vaatimukset täyttävät valinnat mitoituksien ja suojauksien suhteen, sekä vertaillaan eri valintojen vaikutuksia elinkaarikustannuksiin. Työn tavoite on myös, että valmis työ toimii ohjeistuksena muille suunnittelijoille.

Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Miten suunnittelussa valitaan sähkötekniset vaatimukset täyttävät mitoitus teollisuuden sähköjakeluverkon ominaisuudet ja erityispiirteet huomioon ottaen?
- Kuinka suunnittelussa toteutetaan suojauksien toiminta niin, että ne vastaavat toiminnaltaan vaadittuja vaatimuksia?
- Kuinka eri komponentti valinnat suunnittelussa vaikuttavat teollisuuden sähköjakeluverkon elinkaarikustannuksiin?
- Kuinka käyttää verkostolaskentaohjelmistoa teollisuuden sähköjakeluverkon mallinnukseen?

Tutkimuskysymyksiin ja työntavoiteasetteluun haetaan vastauksia kirjallisuusselvityksen avulla, jossa perehdytään teollisuuden sähköjakeluverkon toteutustapoihin ja erityispiirteisiin. Työssä perehdytään siihen, kuinka elinkaarikustannukset muodostuvat

teollisuuden sähköjakeluverkossa. Näiden perusteella esitetään mitoituksien ja suojauksien vaatimukset, joita hyödynnetään tapaustutkimuksessa.

Tapaustutkimuksessa suunniteltavan teollisuuden sähköjakeluverkon osuudelle tehdään sähkötekniset vaatimukset täyttävä suunnitelma sekä vertaillaan eri valintojen vaikutuksia elinkaarikustannuksiin. Tapaustutkimuksessa selvitetään, kuinka verkostolaskentaohjelmistolla mallinnetaan teollisuuden sähköjakeluverkon tyypillinen muuntamoratkaistu kokonaisuus, sekä lasketaan suojaustoimintojen asetteluarvoja Afry Finland Oy:n käytössä olevilla ohjelmistoilla.

1.2 Työn rajaukset

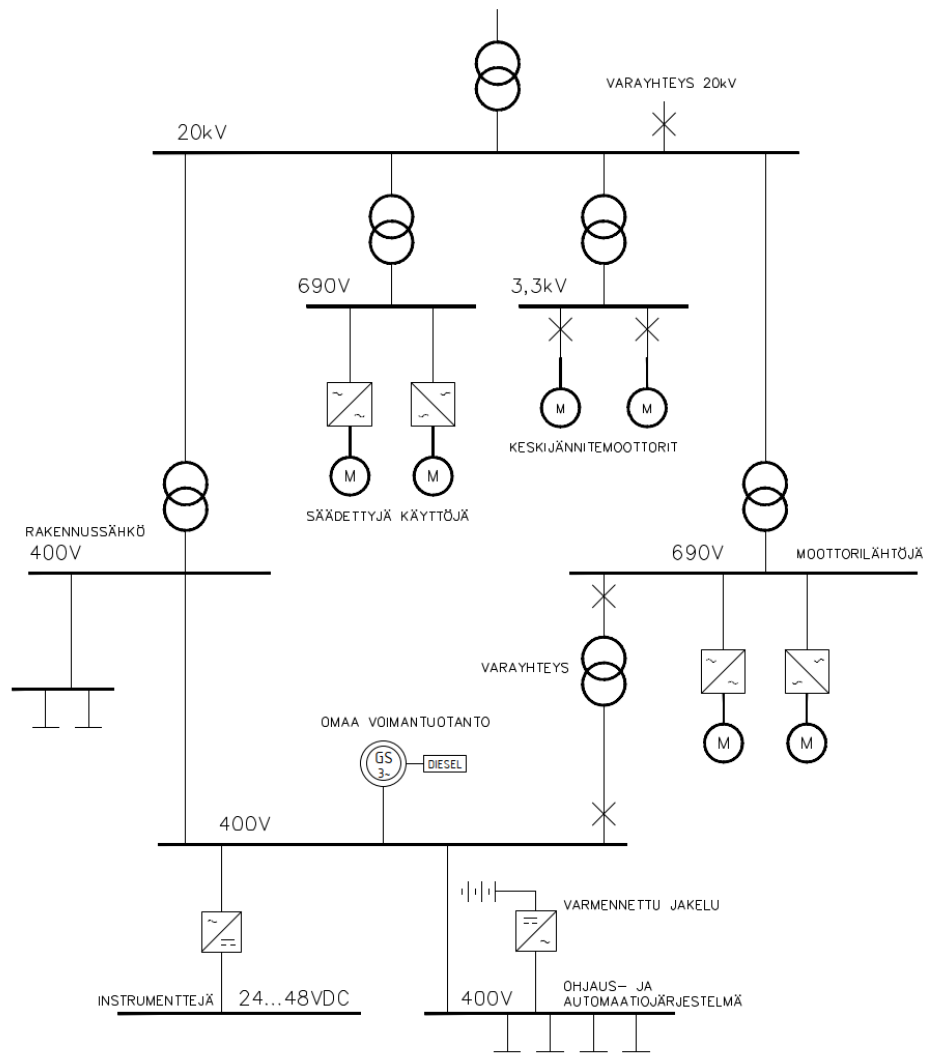
Työssä keskitytään tyypillisen muuntamoratkaistuksen mitoituksien ja suojauksien yleisiin periaatteisiin sekä ratkaisumalleihin, kuten mitoituksien oikeanlaisiin valintoihin ja suojauksien selektiivisyyden toteamiseen.

Teollisuuden sähköjakeluverkosta keskitytään keskijännitekojeistosta syöttämien muuntajien ja pääkeskuksien, sekä niiden isoimpien sulake ja moottorilähtöjen suunnitteluun normaalissa kytkentätilanteessa. Varavoimakoneiden ja UPS-järjestelmien muodostamat varmennetut jakelujärjestelmät on rajattu tutkimuksesta pois.

2 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELU

Teollisuuden sähköjakeluverkko on keskittynyt yleisesti pienelle alueelle, mutta kuitenkin verkossa siirrettävä sähköteho on suuri, jolloin verkon rakenne poikkeaa yleisistä sähköjakeluverkoista. Teollisuuslaitoksien liityntä yleiseen sähköverkkoon on toteutettu 110 kV:n, 20 kV:n, 10 kV:n tai 400 V:n jännitetasossa. Teollisuuden sisäinen sähköjakelu tapahtuu laitoksen koosta ja iästä riippuen 33 kV:n, 20 kV:n 10 kV:n 6 kV:n tai 3 kV:n jännitteellä. Pienemmissä teollisuuslaitoksissa liityntä yleiseen sähköverkkoon tehdään 400 V:n jännitetasoa käyttäen. (Hietalahti, 2013)

Teollisuuden sähköjakeluverkon rakenne sisältää liitynnän yleiseen sähköjakeluverkkoon, pääjakelun ja käyttökohteiden sähköjakelun. Teollisuuden sähköjakeluverkko voi sisältää yhden jakelumuuntajan tai suuremmissa sähköjakeluverkoissa voi olla useita jakelumuuntajia eri jännitetasoille. Teollisuudessa on myös yleistä, että sähköjakeluverkkoon on kytketty varavoima ja varayhteydet. Nykypäivänä yleistä on myös omat sähköntuotantojärjestelmät. Kuvassa 2.1 on esimerkki teollisuuden sähköjakeluverkon rakenteesta.



Kuva 2.1 Esimerkki teollisuuden sähköjakeluverkon rakenteesta. (Hietalahti, 2013a)

Kuvan 2.1 ylläladassa on päämuuntaja, jonka kautta sähköjakeluverkko on liitetty yleiseen suurjänniteverkkoon. Päämuuntaja syöttää pääjakelua, mihin käyttökohteiden jakelu on liitetty jakelumuuntajilla. Käyttökohteiden jakelua on prosessijakelu, rakennussähkö ja apusähköjärjestelmät. (Hietalahti, 2013a) Näiden erona on muun muassa liitetyt laitteet ja toiminnalliset tehtävät. Prosessijakeluun on liitetty tuotannon laitteet, mitkä ovat suurimmalta osin moottoreita. Rakennussähköön on liitetty valaistus, huoltolaitteet sekä työmaakeskukset. Apusähköjärjestelmään on liitetty laitteet, jotka toimivat säätö- ja ohjausjärjestelminä eikä näiden sähköjakelu saa keskeytyä, vaikka normaali jakelu katkeaisi. (Etto, 1998)

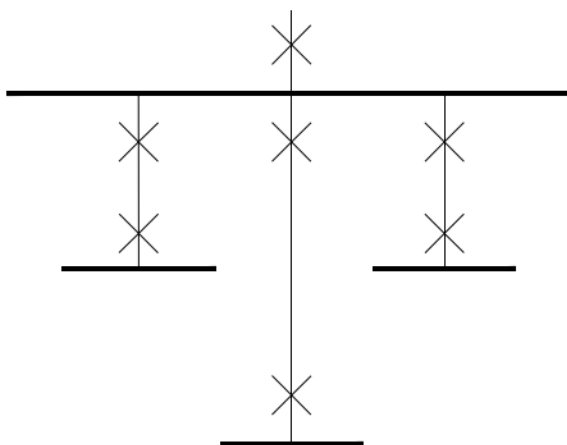
2.1 Pääjakeluverkko

Teollisuuden sähköjakeluverkon pääjakeluverkon jännitteeksi valitaan yleensä yksi keskijännitetaso, millä jakelu toteutetaan. Pääjakeluverkkoon on liitetty pääosin jakelumuuntajia. Pääjakeluverkon jännite on yleensä 6, 10, 20 tai 33 kV:n teollisuuslaitoksen koosta ja iästä riippuen. (Korpinen, 1998). Nykyään uusien teollisuuslaitoksien pääjakeluverkon jännitteeksi valitaan 20 kV tai 33 kV, suuremmissa laitoksissa voidaan käyttää 110 kV jännitetasoa. Käytettäessä 20 kV:n jännitetasoa sen etuna on sopivuus yleiseen sähköjakeluverkkoon.

Pääjakeluverkon rakenteena käytetään säteittäistä, rengas- tai silmukoitua verkkoa. Erilaisilla verkon rakenteilla on omat etunsa ja haittansa, ja näitä vertailtaessa on otettava huomioon eri rakenteiden käyttöön liittyvät teknistaloudelliset asiat. (ABB, 2000)

2.1.1 Säteittäinen verkko

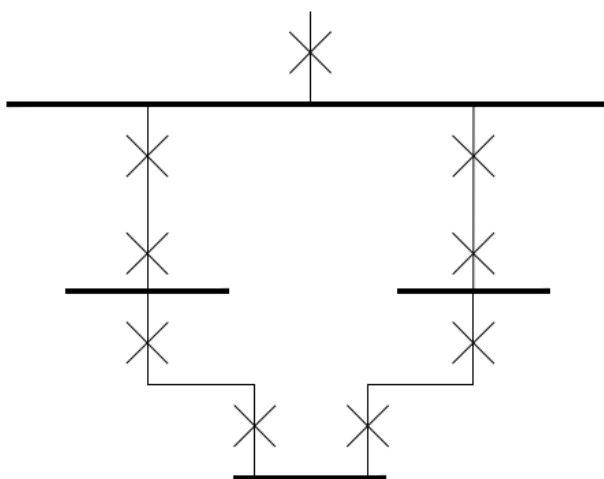
Säteittäinen verkko on yksinkertainen rakenteeltaan ja sitä käytetään yleisesti teollisuuden sähköjakelussa. Säteittäisen rakenteen etuna on yksinkertainen käyttö ja suojauksien toteuttamisen helppous. Sen huonona ominaisuutena on sen vikaherkkyys, jotka johtuvat varayhteyksien puutteesta ja huoltojen aikana vaatimista keskeytyksistä. Kuvassa 2.2 esitetty säteittäisen verkon rakenne. (ABB, 2000)



Kuva 2.2 Säteittäisen verkon rakenne. (ABB, 2000)

2.1.2 Rengasverkko

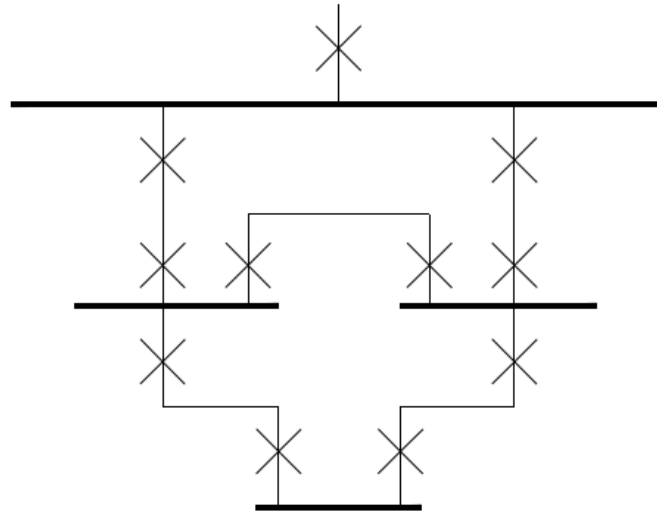
Rengasverkon rakenne muodostuu renkaan muotoon, kun verkon ylemmän ja alemman jakeluportaan väli on yhdistetty. Rengasverkon etuna on pienemmät tehohäviöt, parempi jännitevakaus ja syöttöjen varmistus verrattuna säteittäiseen verkkoon. Rengasverkon haittoina on käytön vaikeutuminen ja suojauksien monimutkaistuminen. Kuvassa 2.3 esitetty rengasverkon rakenne. (ABB, 2000)



Kuva 2.3 Rengasverkon rakenne. (ABB, 2000)

2.1.3 Silmukoitu verkko

Silmukoitu verkko on rakenteeltaan samantapainen kuin rengasverkko, mutta siinä on renkaan sisäisiä väliyhteyksiä. Väliyhteyksien avulla parannetaan syöttöjen varmistuksia, jännitevakaus paranee ja tehohäviöt pienenevät. Haittoina ovat käytön vaikeutuminen ja suojauksien monimutkaistuminen. Silmukoituja verkkoja käytetään 220 kV:n ja 400 kV:n kantaverkossa. Kuvassa 2.4 esitetty silmukoitu verkko. (ABB, 2000)

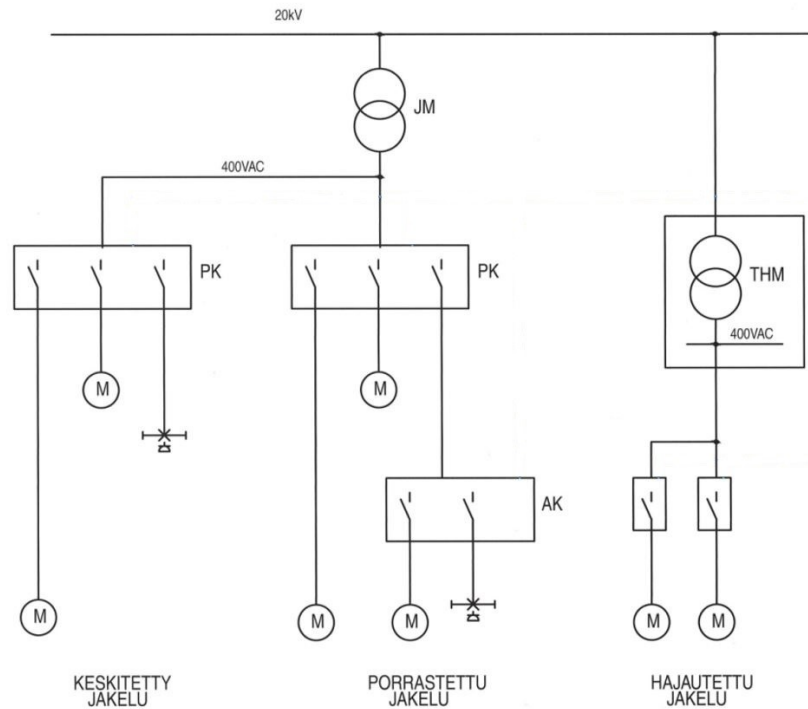


Kuva 2.4 Silmukoidun verkon rakenne. (ABB, 2000)

2.2 Pienjänniteverkko teollisuudessa

Pienjänniteverkolla tarkoitetaan alle 1000 VAC jännitetason jakeluverkkoa. Jakeluverkko alkaa muuntajan pienjännitepuolen liitännästä ja päättyy verkon lopun viimeiseen kulutuskojeeseen. (Mäkinen, 2009). Teollisuudessa käytetään nykyään yleisesti 400 V ja 690 V jännitetasoja. Moottorilähdöissä jännitetason valintaan vaikuttaa moottorin teho. Suurempitehoiset moottorit valitaan toimimaan 690 V jännitetasolla, jolloin etuina ovat pienemmät virrat, pienemmät kaapelipoikkipinnat sekä alhaisemmat virtalämpöhäviöt. Teollisuudessa 400 V jännitetasoa käytetään rakennussähköistyksessä ja LVIA-laitteistojen syötöissä, sekä teholtaan pienemmissä moottorilähdöissä.

Pienjänniteverkon jakelun toteutus voidaan jakaa kolmeen erilaiseen jakelutyyppiin keskitettyyn, porrastettuun ja hajautettuun. (Mäkinen, 2009). Pienjänniteverkko voi koostua myös näiden kolmen sekamuotoina, jolloin verkko koostuu näiden yhdistelmistä. Kuvassa 2.5 esitetty teollisuuden pienjänniteverkon eri jakelutyyppit.



Kuva 2.5. Teollisuuden pienjänniteverkon eri jakelutyypit. (Muokattu lähteestä: Mäkinen, 2009)

Keskitetyssä jakelussa moottorilähdöt on keskitetty pääkeskuksiin. Keskitetty jakelu on yksinkertainen toteuttaa samassa sähkötilassa. Keskitetyssä jakelussa lähtöjen komponenteilta vaaditaan erittäin hyvää oikosulkukestävyyttä koska ne sijaitsevat lähellä syöttävää muuntajaa. Keskitetyssä jakelussa tapahtuvat häiriöt vaikuttavat tuotannon koko prosessiin ja häiritsevät laitoksen käytettävyyttä. Pitkät etäisyydet sähkötilaan sijoitettuihin kojeistoihin vaikuttavat kaapelipituuksiin, jolloin suojausten toimivuus heikkenee. (Hietalahti, 2013b. Mäkinen, 2009).

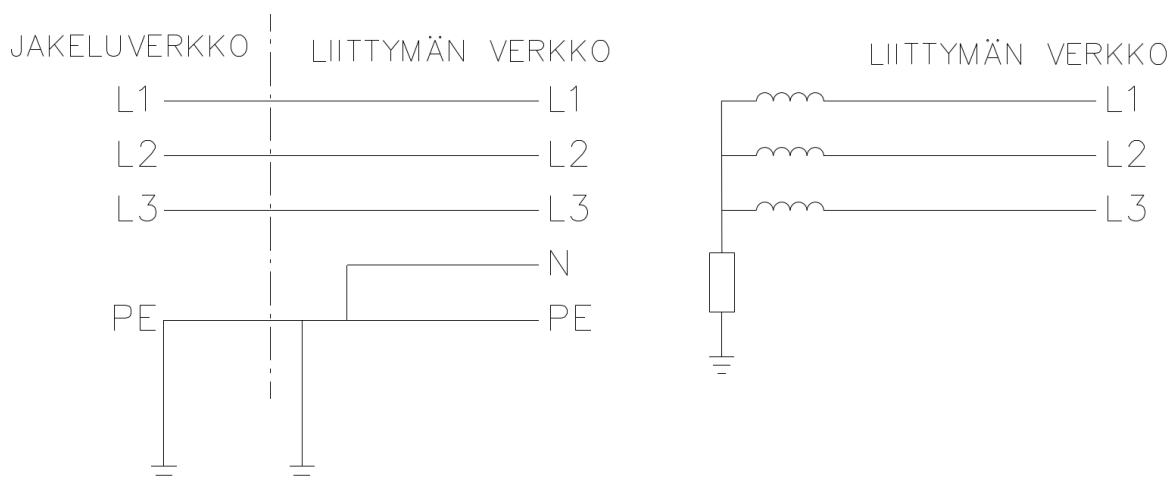
Porrastetussa jakelussa sähkölähdöt on jaettu pääkeskuksiin ja alakeskuksiin. Alakeskukset saavat syöttönsä pääkeskuksesta. Pääkeskuksen ja alakeskuksen käyttö mahdollistaa pienempien käyttöjen sijoituksen alakeskukseen, jolloin alakeskuksilla voi olla pienemmät oikosulkukestoisuusvaatimukset. Alakeskuksien nimellisvirran valinnalla voidaan vaikuttaa kustannuksiin. Jos nimellisvirta on alle 1000 A voidaan oikosulkusuojina käyttää sulakkeita. Alakeskusten sijoittaminen lähelle kulutuskohteita auttaa lyhentämään kaapelipituuksia. (Hietalahti, 2013b)

Hajautetussa jakelussa kulutuskohteiden ohjauslaitteet on sijoitettu moottoreiden lähelle. Ohjauslaitteet on kytketty kenttäväylään mitä kautta moottoreita ohjataan. Moottoreiden

ohjauslaitteet saavat syöttönsä tehdashallimuuntamoista missä sijaitsevat myös kaapeleiden suojalaitteet. (Hietalahti, 2013b)

2.2.1 Jakelujärjestelmät

Teollisuudessa käytetään pienjänniteverkkojen jakelujärjestelminä yleensä jäykästi käyttömaadoitettua TN-S -järjestelmää tai IT- järjestelmää mikä on vastuksen kautta yhdistetty maahan. IT-järjestelmän etuna on, että yksivaiheinen maasulku ei aiheuta heti käyttökeskeytystä. TN-S -järjestelmän jännitetaso on yleensä 400 V ja IT-järjestelmässä jännitetaso on 500 V tai 690 V. Kuvassa 2.6 on esitetty TN-S ja IT-järjestelmien rakenne. (Hietalahti, 2013b)



Kuva 2.6 Vasemmalla TN-S-järjestelmä ja oikealla IT-järjestelmä. (Hietalahti, 2013b)

TN-S-järjestelmässä on vaihejohtimien lisäksi erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet. Erillisillä nolla- ja suojamaadoitusjohtimilla mahdollistetaan yksivaiheisen kuormavirran pysyminen nollajohtimessa. Tästä johtuen häiriövirrat- ja kentät pysyvät mahdollisimman pieninä. TN-S -järjestelmässä vikavirran valvonta on tärkeää, jotta nolla- ja suojamaadoitusjohtimet pysyvät erillään eli verkon vikavirrat. Vikavirran valvonta voidaan tehdä järjestelmän alkupäässä suojamaadoitusjohtimessa palaavan virran mittaukseen. (Hietalahti, 2013a)

IT-järjestelmä on maasta erotettu järjestelmä, missä muuntajan tähtipiste on maadoitettu vastuksen kautta. IT-järjestelmän käyttö vaatii maasulun valvonta- ja etsintälaitteet. IT-

järjestelmän käyttö on mahdollista, jos jakelu tapahtuu saman haltijan kulutuskohteisiin. (Hietalahti, 2013a)

2.3 Jakelujärjestelmien maadoitustavat

Teollisuudessa maadoituksilla parannetaan sähköturvallisuutta, häiriö- sekä ukkossuojausta. Vikatapauksissa maadoituksilla estetään vaarallisten jännitteiden ja vikavirtojen muodostuminen jakelujärjestelmissä. Teollisuuslaitoksen jakelujärjestelmän maadoitustapa ilmoitetaan kahden kirjaimen yhdistelmällä ja tarvittaessa lisäkirjaimella. Ensimmäisellä kirjaimella ilmoitetaan jakelujärjestelmän tehonlähteen, eli yleensä jakelumuntajan toisiopuolen maadoitustapa:

- T = Yksi piste yhdistetty suoraan maahan.
- I = Kaikki jännitteiset osat on eristetty maasta tai yksi piste yhdistetty maahan impedanssin kautta.

Toinen kirjain ilmoittaa sähkölaitteiston jännitteelle alttiiden osien maadoitustavan:

- T = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty galvaanisesti suoraan maahan riippumatta jakelujärjestelmän maadoitustavasta.
- N = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty jakelujärjestelmän maadoitettuun pisteeseen, yleensä maadoitettuun tähtipisteeseen.

Lisäkirjaimella ilmoitetaan nolla- ja suojamaadoitusjohtimen järjestely:

- S = Järjestelmässä erilliset nolla- ja suojamaajohtimet.
- C = Nolla- ja suojamaajohtimet on yhdistetty yhdeksi PEN-johtimeksi. (Mäkinen, 2009)

Käytettyjä maadoitustapoja ovat TN-, IT- ja TT-järjestelmät. Suomessa käytetään yleisimmin teollisuuden pienjänniteverkon jakelussa TN-järjestelmää ja sen erilaisia variaatioita nolla- ja suojamaadoitusjohtimien järjestelyillä tai IT-järjestelmää vastuksen kautta maahan yhdistettynä. TT-järjestelmää ei käytetä Suomessa, mutta on käytössä Keski- ja Etelä-Euroopassa. (Hietalahti, 2013a)

3 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON VIKAVIRRAT

Teollisuuden sähköjakeluverkon ominaisuuksiin kuuluu siinä esiintyvät suuret oikosulkuvirrat. Suuret oikosulkuvirrat johtuvat lyhyistä etäisyyksistä, suurista jakelumuuntajista sekä jakeluverkkoon liitetyistä generaattoreista ja pyörivistä sähkömoottoreista mitkä kasvattavat entisestään oikosulkuvirtoja.

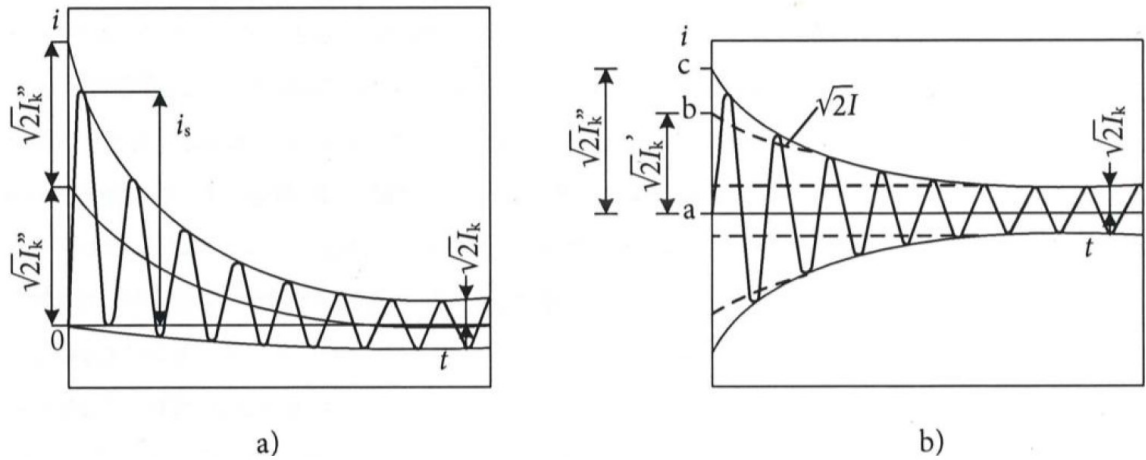
Oikosulkuvirrat aiheuttavat sähköjakeluverkkoon termisiä- ja dynaamisia rasituksia. Sähköjakeluverkon osien ja laitteiden on kestävä nämä rasitukset. Oikosulkuja voi aiheuttaa vanhentuneet, haurastuneet ja mekaanisesti rikkiinäiset eristykset sekä vääränlaiset käyttö-, korjaus- tai huoltotoimenpiteet.

Sähköjakeluverkon suunnittelussa on tiedettävä oikosulkuvirtojen suuruus verkon eri osissa, jotta voidaan määrittää komponenttien oikosulkukestoisuus mitoitus ja tehdä oikosulkusuojaus suunnittelut. Suojauksien suunnittelussa olisi hyvä ottaa huomioon sähköjakeluverkon tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset sekä tietää oikosulkuvirtojen suuruus nykyhetkellä eri syöttötilanteissa.

3.1 Oikosulkuvirrat

Teollisuusverkoissa haastavin vikatapaus on vastukseton 3-vaiheinen oikosulku, joka aiheuttaa suurimman vikavirran. 3-vaiheisen oikosulun vikavirta on 10–40 kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Tämä vaatii suojauslaitteilta tarvittavan nopeaa vikavirran katkaisukykyä, jotta verkon laitteille ei aiheudu vaurioita. Suojalaitteiden nopean laukaisun takia oikosulkuvirta ei saavuta staattisen tilan arvoa. (Elovaara & Haarla, 2011)

Oikosulkuvirta sisältää vaihtovirtakomponentin ja tasavirtaosan. Tasavirtaosan suuruus riippuu oikosulun syntymishetken jännitteen alkuarvosta. Oikosulkuvirran luonne voi olla joko epäsymmetrinen (kuva 3.1a) tai symmetrinen (kuva 3.1b). Kolmivaihejärjestelmän tasavirtaosan vaikutuksesta oikosulkuvirta on luonteeltaan epäsymmetrinen ainakin kahdessa vaiheessa. Tasavirtaosan suuruuden ollessa nolla on oikosulkuvirta luonteeltaan symmetrinen. (Elovaara & Haarla, 2011)



Kuva 3.1 Epäsymmetrinen (a) ja symmetrinen (b) oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen, 1998)

Kuvassa 3.1 on vaihtovirtakomponentin amplitudin alkuoikosulkuvirta I_k'' ja muutosoikosulkuvirta I_k' . Alkuoikosulkuvirta I_k'' on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuvaiheessa. Alkuoikosulkuvirran avulla voidaan määrittää muita oikosulkusuureita, joita tarvitaan suojauksien ja mitoitusien suunnittelussa. Alku- ja muutosoikosulkuvirta vaimenevat omien aikavakioiden T'' ja T' mukaisesti. Kun tasavirtaosa sekä alku- ja muutosoikosulkuvirta ovat vaimenneet pois, jää oikosulkuvirralla jatkuvan tilan arvo eli pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k . (Elovaara & Haarla, 2011)

3.1.1 Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirta i_p on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo mikä voidaan nähdä kuvasta 3.1a. Sysäysoikosulkuvirta esiintyy oikosulun alkamisesta noin yhden puolijakson kuluessa. Oikosulun oletettuna syntyhetkenä pidetään, kun tasavirtaosa saa suurimman arvonsa. Sysäysoikosulkuvirran voidaan arvioida kuvan 3.1 mukaisesti noudattavan yhtälöä

$$i_p < \sqrt{2} I_k'' \quad (3.1)$$

missä i_p on sysäysoikosulkuvirta ja I_k'' on alkuoikosulkuvirta. (Elovaara & Haarla, 2011)

Sysäysoikosulkuvirran suuruus voidaan arvioida oikosulkupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta yhtälöllä

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (3.2)$$

missä κ on sysäyskerroin resistanssin ja reaktanssin suhteesta, joka voidaan laskea yhtälöllä (Elovaara & Haarla, 2011)

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} \quad (3.3)$$

Sysäysoikosulkuvirta määrittää laitteiden mekaanisten rakenteiden mitoituksen.

Sysäysoikosulkuvirtaa kutsutaan myös nimityksellä dynaaminen oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen, 1998)

3.1.2 Pysyvän tilan oikosulkuvirta

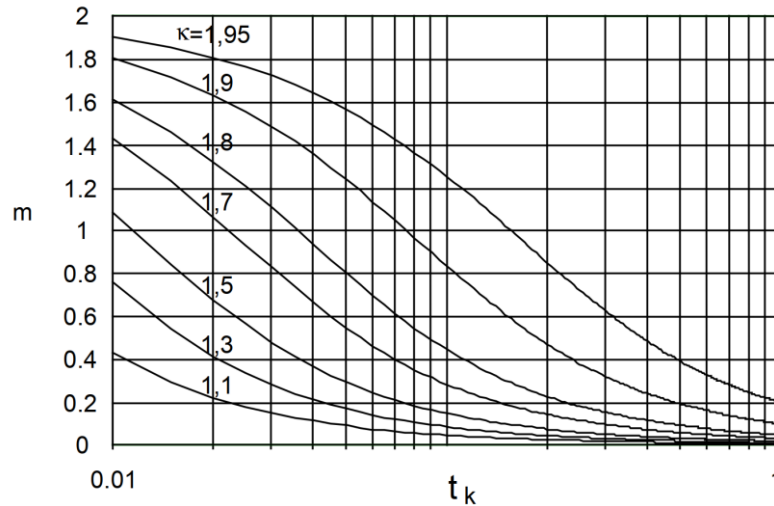
Pysyvän tilan oikosulkuvirta tarkoittaa oikosulkuvirtaa, jossa kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet. Pysyvän tilan oikosulkuvirralla ei voida laskea tarkkaa arvoa, koska siihen vaikuttaa muun muassa generaattoreiden ja muuntajien automaattiset säädöt, tahtikoneiden magnetointitavat ja -säädöt sekä verkon kytkentätilanteet oikosulun aikana. Yleensä oikosulkukestoisuuden tarkasteluun riittää suurimman mahdollisen pysyvän tilan oikosulkuvirran tunteminen. Pienintä mahdollista pysyvän tilan oikosulkuvirtaa ei tarvitse tietää, koska yleensä verkon oikosulkusuojat toimivat ennen kuin pysyvän tilan oikosulkuvirta saavutetaan. (Huotari & Partanen, 1998)

3.1.3 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta

Sähköverkon laitteiden ja kojeistojen virtakestoisuudelle määritellään IEC:n standardin mukaisesti terminen kestovirta I_{th} . Terminen kestovirta on suurin oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka koje kestää määritetyn ajan ilman, että sallitulle lämpenemiselle määritetyt raja-arvot ylittyvät. Yleensä määritettynä aikana käytetään yhtä sekuntia tai joissakin tapauksissa aika on pidempikin kuten kolme sekuntia. Todellisuudessa oikosulkuvirta rasittaa laitteita ja kojeistoja harvoin määritellyn ajan, koska suojaukset toimivat tätä nopeammin. Tiettyä aikaa vastaava terminen ekvivalenttinen oikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä

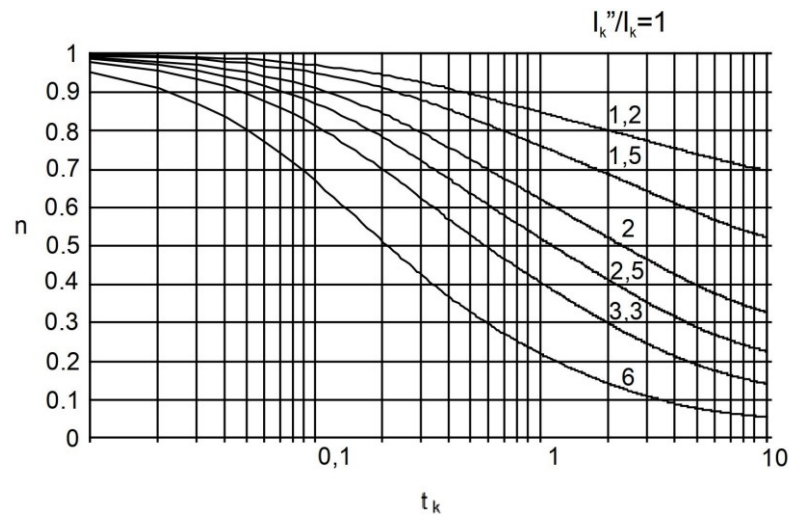
$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (3.4)$$

Muuttuja m kuvaa yhtälössä vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutusta ja sen arvo saadaan kuvan 3.2 käyrästä. Tasavirtakomponentin m riippuvuus tulee oikosulkuvirran sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k .



Kuva 3.2 Tasavirtakomponentin m käyrästä. (ABB, 2000)

Muuttuja n vaimenevan vaihtovirtakomponentin arvo saadaan kuvan 3.3 mukaisesti alkuoikosulkuvirran I_k'' ja pysyvän tilan oikosulkuvirran I_k suhteesta ja oikosulun kestoajasta t_k .



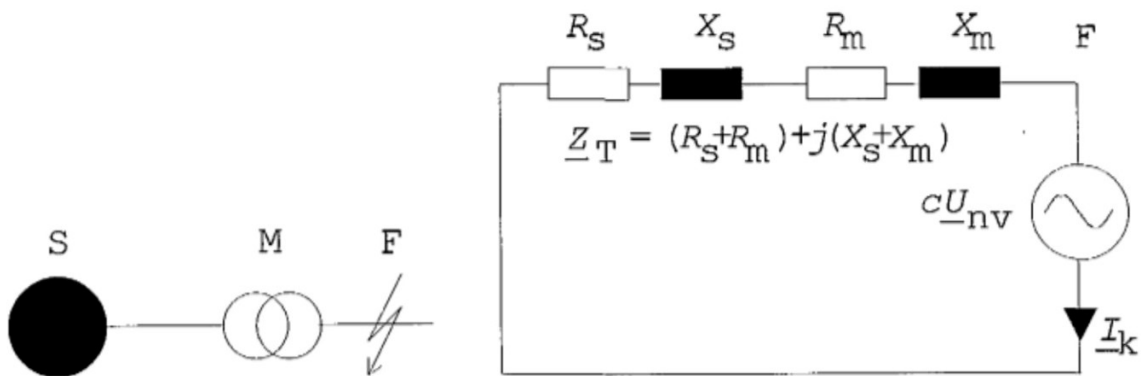
Kuva 3.3 Vaihtovirtakomponentin n käyrästä. (Muokattu lähteestä ABB, 2000)

IEC 60909-0 standardin mukaisesti jakeluverkossa kaukana generaattorista tapahtuvassa oikosulussa muuttuja n vaimenevan vaihtovirtakomponentin arvona voidaan käyttää 1. Kun

oikosulun kestoaika on 0,5 s tai enemmän kaukana generaattorista tapahtuvassa oikosulussa voidaan käyttää arvoa $m + n = 1$. (IEC 60909-0, 2016)

3.1.4 Oikosulkuvirtojen laskeminen Theveninin menetelmällä

Theveninin menetelmällä voidaan määrittää teollisuussähköverkkojen oikosulkutapauksissa muodostuvat oikosulkuvirrat. Vikapaikassa kulkeva virta muodostuu useiden eri oikosulkulähteiden syöttämien oikosulkuvirtojen summasta. Theveninin menetelmässä kaikki oikosulkulähteiden sähkömotoriset voimat voidaan korvata yhdellä sähkömotorisella voimalla sijoitettuna vikapaikkaan. Kuvassa 3.4 Theveninin menetelmänä yksivaiheinen sijaiskytkentä.



Kuva 3.4 Thevenini menetelmä (Huotari & Partanen, 1998)

Kuvassa 3.4 on muodostettu vasemmanpuoleisesta verkon vikapaikasta F tapahtuva vastukseton kolmivaiheinen oikosulku yksivaiheisena sijaiskytkentänä. Theveninin impedanssi Z_T muodostuu syöttävän verkon ja muuntajan oikosulkuresistansseista ja oikosulkureaktansseista R_S , R_M , X_S ja X_M . Oikosulkuvirta I_k voidaan laskea yhtälöllä

$$I_k = \frac{cU_{nv}}{Z_T} \quad (3.4)$$

jossa U_{nv} on nimellisvaihejännite, Z_T vikapaikan jännitetasoon redusoitu Theveninin impedanssi ja c jännitekerroin (Taulukko 3.1).

Taulukko 3.1 Jännitekerroin (IEC 60909, 2016).

Nimellispääjännite U_n	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{max}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
100 V - 1000 V	1,05	0,95
> 1 - 230 kV	1,1	1,0
> 230 kV	1,1	1,0

3.2 Oikosulkupiirin impedanssit

Oikosulkuvirtoja laskettaessa Theveninin menetelmällä täytyy oikosulkupiirin komponenteista muodostaa matemaattiset mallit. Oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja on syöttävä verkko, tahtikoneet ja epätahtimoottorit. Suurimman osan oikosulkuvirrasta syöttää verkko ja generaattorit sekä tahti- ja epätahtimoottorit. Oikosulkupiirissä on myös oikosulkuvirtaa rajoittavia komponentteja, joista täytyy muodostaa matemaattiset mallit. Komponentteja ovat muuntajat, kuristimet, kaapelit ja kiskot, joiden impedanssit rajoittavat oikosulkuvirtaa. (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.1 Syöttävä verkko

Syöttävän verkon impedanssi voidaan laskea, kun tiedetään verkon alkuoikosulkuvirta tai näennäinen alkuoikosulkuteho. Syöttävän verkon impedanssi lasketaan yhtälön 3.5 avulla.

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} \quad (3.5)$$

jossa

U_n on syöttävän verkon nimellispääjännite

S_{kv}'' on syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho

I_{kv}'' on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

c on taulukon 3.1 mukainen jännitekerroin

Syöttävän verkon rakenne vaikuttaa verkon impedanssin jakamista resistanssiksi ja reaktanssiksi. Kun nimellispääjännite on yli 35 kV avojohto voidaan ajatella impedanssin koostuvan pelkästään reaktanssiosasta, jolloin $Z_{kv} = jX_{kv}$. Jos resistanssia ei tiedät, voidaan impedanssi olettaa olevan

$$R_{kv} = 0,1X_{kv} \text{ ja } X_{kv} = 0,995Z_{kv} \quad (3.6)$$

jossa

R_{kv} on syöttävän verkon resistanssi

X_{kv} on syöttävän verkon reaktanssi (Huotari & Partanen, 1998)

Pienjänniteverkon oikosulkuvirtoja laskettaessa syöttävä verkko voidaan jättää huomiotta, jos oikosulku tapahtuu muuntajan lähellä ja syöttävän verkon näennäisen alkuoikosulkutehon S_{kv} ja muuntajan nimellistehon S_n välinen ehto $S_{kv} > 400S_n$ täyttyy. (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.2 Muuntajat ja kuristimet

Muuntajan kilpiarvojen perusteella voidaan määrittää oikosulkusuureet alla olevilla yhtälöillä.

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.7)$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \quad (3.8)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.9)$$

jossa

Z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi

I_n on muuntajan nimellisvirta

S_n on muuntajan nimellinäennäisteho

P_{kn} on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

u_k on muuntajan oikosulkujännite prosentteina

u_r ($100 \cdot P_{kn}/S_n$) on muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina

Suuremmilla muuntajilla oikosulkuresistanssin osuus oikosulkuimpedanssissa on pieni, jolloin oikosulkuimpedanssi voidaan korvata oikosulkureaktanssilla. Oikosulkuresistanssi on otettava huomioon, jos lasketaan sysäysoikosulkuvirtaa tai oikosulkuvirran tasavirtakomponenttia. (Huotari & Partanen, 1998)

Kuristimen oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä

$$Z_k = \frac{u_h}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{u_h}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.10)$$

missä u_h on kuristimen nimellinen jännitteenalenema. (ABB, 2000)

3.2.3 Tahtikoneet

Tahtikoneita käytetään teollisuudessa yleensä generaattoreina. Tahtikoneiden reaktanssit, resistanssit ja aikavakiot saadaan valmistajalta.

$$X = \frac{x}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.11)$$

jossa

x on alku-, muutos- tai tahtireaktanssi prosentteina (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.4 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottori eli oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty sähkökone. Moottorikoot eivät ole mahdollisesti suuria, mutta niitä voi olla suuria lukumääriä, jonka takia ne otetaan huomioon oikosulkuvirtojen laskennassa. Epätahtimoottorit vaikuttavat oikosulkuvirtaan suurentavasti. Symmetrisissä oikosuluissa vaikutus näkyy alkuoikosulku-, sysäysoikosulku- ja katkaisuvirtaan, sekä epäsymmetrisissä oikosuluissa myös pysyvän tilan oikosulkuvirtaan. Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.12)$$

jossa

I_s on moottorin käynnistysvirta

S_n on moottorin nimellinäennäisteho

Oikosulkuiimpedanssi voidaan jakaa resistanssiksi ja reaktanssiksi taulukon 3.2 avulla.

Taulukko 3.2 Epätahtimoottoreiden jakosuhteita. P_n on moottorin nimellispäteho ja p on moottorin napapariiluku. (Huotari & Partanen, 1998)

U_n (kV)	P_n/p (MW)	R_m/X_m	X_m/Z_m
≥ 1	≥ 1	0,10	0,995
≥ 1	< 1	0,15	0,989
< 1	kaikki	0,42	0,922

Pienjännitemoottoreita ei kannata mallintaa jokaista erikseen vaan suuren moottorilukumäärän takia kannattaa niistä muodostaa muuntajakohtaiset ekvivalenttimoottorit. Suurjännitemoottorit otetaan yleensä laskelmissa huomioon ja mallinnetaan jokainen erikseen. (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.5 Kaapelit ja kiskostot

Teollisuuden keskijänniteverkkojen kaapelipituudet ovat yleensä lyhyitä ja niiden vaikutus oikosulkupiirin impedanssiin on vähäistä. Kaapeleiden impedanssit voidaan laskea kaapelivalmistajien tiedoista saatavilla resistanssi- ja reaktanssiarvoilla yhtälön 3.12 avulla.

$$Z_j = (r + jx)l \quad (3.12)$$

jossa

r on kaapelin tasavirtaresistanssi (+20 °C) pituusyksikköä kohti

x on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l on kaapelin pituus

Lämpötilan ja virran ahdon vaikutus resistanssiin lasketaan yhtälön 3.13 mukaisesti.

$$R = [1 + \alpha_{20} (T - 20 \text{ °C})] (R_{20} + \Delta R) \quad (3.13)$$

jossa

α_{20} on resistanssin lämpötilakerroin

T on lämpötila, jossa resistanssi halutaan laskea

R_{20} on tasavirtaresistanssi +20 °C:ssa

ΔR on lisäresistanssi, joka ottaa huomioon virran ahdon aiheuttamat lisähäviöt

Kiskostojen rakenne ja kiskoston materiaali vaihtelevat useasti kohteen mukaan. Yleisesti kiskostot ovat lyhyitä pituudeltaan ja niiden impedanssit ovat pieniä verrattuna muihin oikosulkupiirin impedansseihin, joten ne voidaan jättää huomioimatta laskennassa. (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.6 Vikaimpedanssi

Sähköverkon pienintä esiintyvää oikosulkuvirtaa laskettaessa joudutaan huomioimaan myös oikosulkukohdassa esiintyvät vikaimpedanssit. Pienjännitteellä oikosulkukohtaan jää useasti palamaan valokaari, joka rajoittaa oikosulkuvirtaa. Oikosulkupiirin impedanssi kasvaa, jos oikosulkupiiri sulkeutuu metallisten materiaalien kuten kaapelihyllyjen tai putkistojen kautta. Vikaimpedanssi otetaan oikosulkulaskelmissa huomioon erilaisilla kertoimilla, jolloin pienjännitteellä kerroin on 0,6 ja keskijännitteellä 0,8. (Huotari & Partanen, 1998)

4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON SUOJAUS

Teollisuuden sähköjakeluverkon suojauksesta huolehtii laitteiden kokonaisuus mikä koostuu suojareleistä, mittamuuntajista, katkaisijoista ja sulakkeista. Nämä laitteet mahdollistavat suojauksien toiminnan ja verkon viallisten osien irtikytkennän muusta verkosta. Suojauksien tarkoitus on havaita viat ja epänormaalit olosuhteet verkossa, jotta viat voidaan selvittää ja ne saadaan loppumaan. Vikaantunut osa verkossa on erotettava, jotta siitä ei aiheudu vaaraa tai aiheuta vaurioita laitteille.

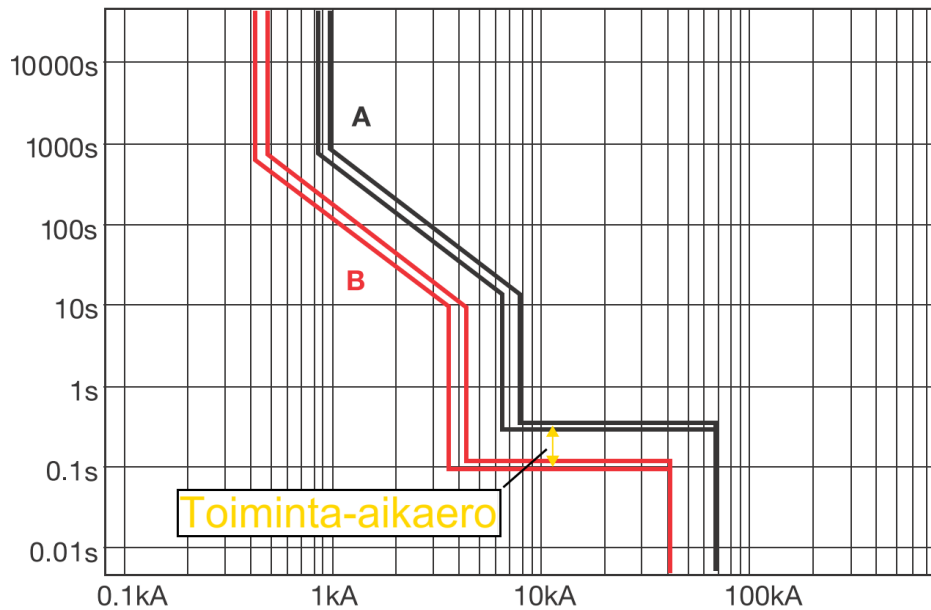
4.1 Suojauksien vaatimukset

Teollisuuden sähköjakeluverkon suojausjärjestelmän tärkeimmät ominaisuudet ovat nopeus, herkkyys, luetettavuus ja selektiivisyys. Suojauksien nopeus on tärkeä, jotta viat saadaan poistettua nopeammin ja vikavirran aiheuttamat vahingot ovat pienemmät laitteille ja ihmisille. Suojauksien pitää olla riittävän herkkiä, jotta sähköjakeluverkon erilaiset käyttötilanteet eivät vaikuta suojauksien toimintaan. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Suojauksien luetettavuudella tarkoitetaan kahta asiaa, jotka ovat toimintavarmuus ja käyttövarmuus. Toimintavarmuudella tarkoitetaan, että suojaus ei lähetä laukaisukäskyä, jos suojausalueella ei ole vikaa. Käyttövarmuudella tarkoitetaan, että suojaus toimii, kun sen suojausalueella on vika. Selektiivisyys tarkoittaa, että vikaantunut komponentti erotetaan muusta verkosta ja minimoidaan vian aiheuttama alue mahdollisimman pieneksi. Selektiivisyys tarkoittaa myös, että kaikki verkon osat on suojattu jollakin suojalaitteella. (Elovaara & Haarla, 2011b)

4.1.1 Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

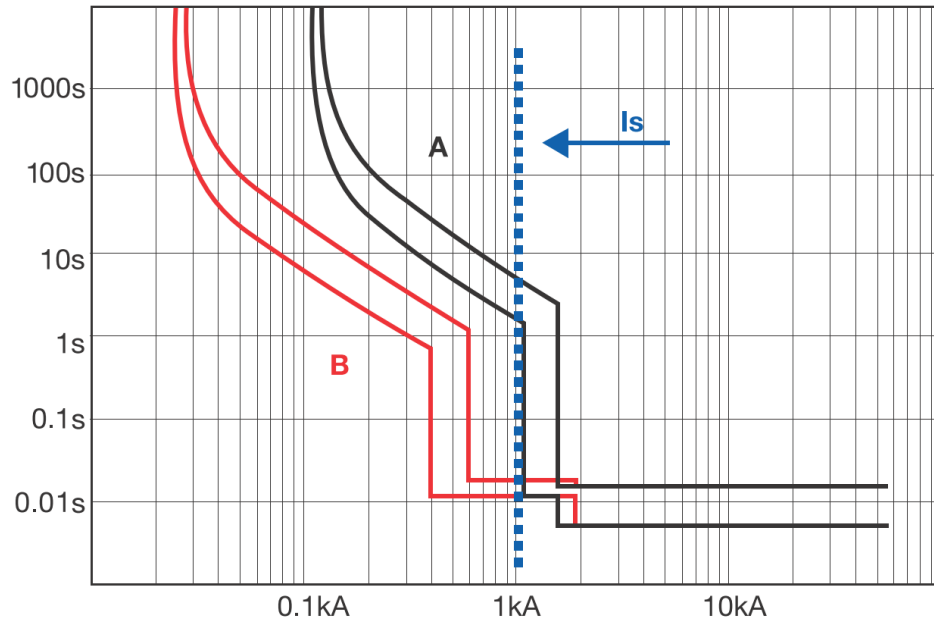
Aikaselektiivinen suojaus on yksinkertaisin tapa toteuttaa selektiivinen suojaus. Aikaselektiivisessä suojauksessa periaatteena on suojien toiminta-aikojen porrastaminen niin, että lähempänä vikakohtaa oleva suoja toimii nopeimmin. Aikaselektiivisen suojauksen toiminta on vakioaikainen tai käänteisaikainen. Aikaselektiivinen suojaus soveltuu käytettäväksi parhaiten säteittäisiin verkkoihin. Kuvassa 4.1 nähtävissä aikaselektiivisen suojauksen periaate. (ABB, 2000)



Kuva 4.1 Aikaselektiivinen suojaus. (Muokattu lähteestä: ABB, 2008)

Kuvassa 4.1 syötönpuoleisen suojan A ja kuormanpuoleisen suojan B välillä aikaselektiivisyys on saavutettu toiminta-aikaerolla. Toiminta-aikaero saadaan hidastamalla suojan B toiminta-aikaa, jolloin lähempänä vikaa oleva suoja A toimii ensin.

Virtaselektiivisessä suojauksessa asetteluarvot määritellään suojattavalla alueella esiintyvien vikavirtojen suuruuden mukaisesti. Suojaus perustuu havaintoon, että vikavirta on suurempi sähköjaketuverkon syötön lähellä ja kaukana syötöstä vikavirta on pienempi. Virtaselektiivisen suojauksen toiminta selektiivisenä ei ole mahdollista, jos sähköjaketuverkon vikavirroissa ei ole suurta vaihtelua. Kuvassa 4.2 esitetty virtaselektiivisen suojauksen periaate. (ABB, 2008)



Kuva 4.2 Virtaselektiivinen suojaus. (Muokattu lähteestä: ABB, 2008)

Kuvassa 4.2 suojien A ja B välinen virtaselektiivinen suojaus saavutetaan asettelemalla syötönpuoleisen suojan A asettelu niin, että se ei toimi niistä vioista, jotka tapahtuvat suojan B kuormapuolella.

Aika- ja virtaselektiivisellä suojauksella pystytään parantamaan suojauksien toimivuutta, jos vikavirran suuruus vaihtelee vikapaikan eri sijaintien takia. Vika voi näkyä samansuuruisena useammalle suojaukselle ja aikaselektiivisyydellä saadaan aikaiseksi erilaiset suojauksien toiminta-ajat sekä täytettyä vaaditua toimintanopeusvaatimukset. (ABB, 2000)

4.1.2 Lukitussuojaus

Lukitussuojausta käytetään aikaselektiivisen suojauksen apuna nopeuttamaan suojauksien toimintaa. Lukitukset toteutetaan suojausketjussa olevien suojauksien välillä. Lukituksilla suojauksien toiminta saadaan selektiiviseksi, jos asetteluarvojen määrittely ei ole mahdollista suojauksien toiminta-aikarajojen puolesta. Lukitussuojaus soveltuu parhaiten käytettäväksi säteittäisverkoissa missä yleensä oikosulkuvirrat ovat suuremmat kuin kuormitusvirrat. Lukitussuojaus tarvitsee toimiakseen lukitussuojaustoimintoa tukevat suojalaitteet sekä näiden välisen tietoliikenneyhteyden.

4.2 Relesuojaus

Relesuojauksessa käytetään laitteita, jotka havaitsevat sähköverkon vikatilanteita ja tekevät laukaisut tai hälytykset sähköverkon turvaamiseksi. Suojarele mittaa tiettyä suuretta, kuten virtaa, jännitettä tai taajuutta. Rele havahtuu, jos mitattava suure poikkeaa releelle asetellusta toiminta-arvosta, jonka jälkeen rele antaa laukaisukäskyn, hälytyksen tai molemmat. Releen toiminta-ajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu vian havaitsemisesta laukaisuun tai hälytykseen. Toiminta-aikaa voidaan pidentää asettelemalla releelle hidastus. (Elovaara & Haarla, 2011b).

4.2.1 Ylivirtarele

Ylivirtarele toimii, kun virta ylittää releen asetteluarvon. Ylivirtarele ei kykene tunnistamaan virran suuntaa, joten se soveltuukin käytettäväksi ennemmin säteittäisessä verkossa. Ylivirtarelettä voidaan käyttää säteisverkon johdon suojauksessa, kun vikavirta on suurinta kuormitusvirtaa suurempi. Ylivirtareleissä on kaksi porrasta, joista yksi on aina vakioaikahidasteinen ja toinen voidaan valita vakio- tai käänteisaikahidasteiseksi.

Vakioaikaylivirtarelettä voidaan käyttää suojaamaan muuntajaa, reaktoria, kondensaattoria, generaattoria ja säteisjohtoa. Rele havahtuu, kun virta ylittää asetteluarvon ja toimii kun se on ollut havahtuneena asetteluajan. Rele palautuu, jos virta alittaa asetteluarvon riittävästi.

Käänteisaikaylivirtareleen toiminta-aika on virtaan nähden käänteinen, joten rele toimii suurivirtaisilla vioilla nopeammin kuin pienivirtaisilla vioilla. Releen käänteisvaikutuksen jyrkkyys voidaan asetella valmiilta standardikäyryiltä. IEC-standardin 60255-3 mukaisten käyrien käänteisaikahidasteinen laukaisuaika t_{TRIP} lasketaan yhtälöllä 4.1. (Elovaara & Haarla, 2011b. ABB, 2000)

$$t_{TRIP} = \frac{A \cdot k}{\left(\frac{I}{I>}\right)^p} \quad (4.1)$$

jossa

I on vikavirta

$I>$ on releen asetteluarvo

A ja p on kertoimet,

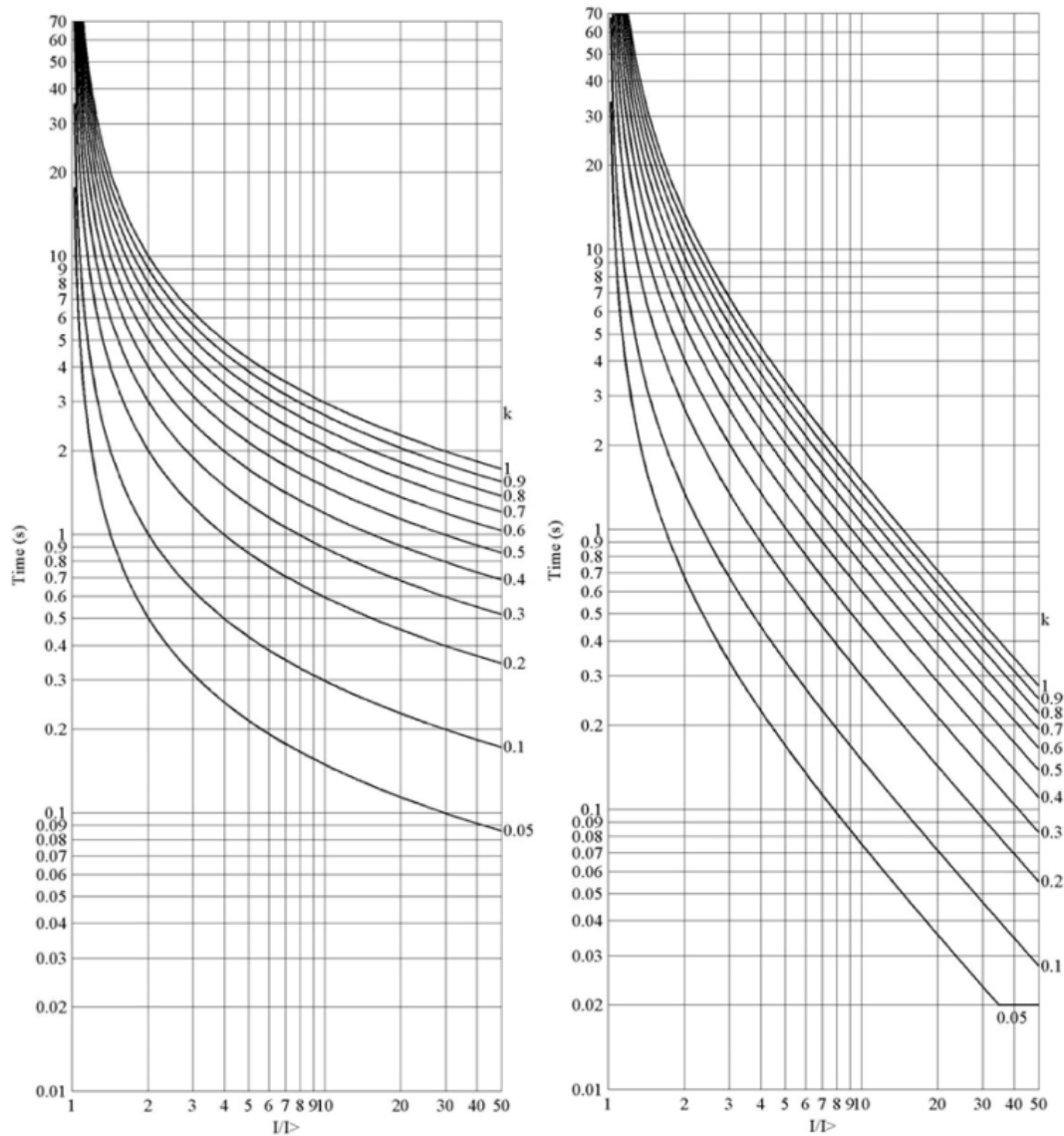
k on käyrän laukaisuaika

Kertoimet A ja p vaikuttavat kuinka jyrkkä laukaisukäyrä halutaan. Kertoimet ovat taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Standardin IEC 60255 mukaiset laukaisukäyrien kertoimet. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Käyrän jyrkkyys	A	p
Normal	0,14	0,02
Very inverse	13,5	1
Extremely inverse	80	2
Longtime inverse	120	1

Kuvassa 4.3 on esitetty kertoimien A ja p kertoimien vaikutus laukaisukäyrän jyrkkyyteen sekä parametri k vaikutus laukaisuaikaan.



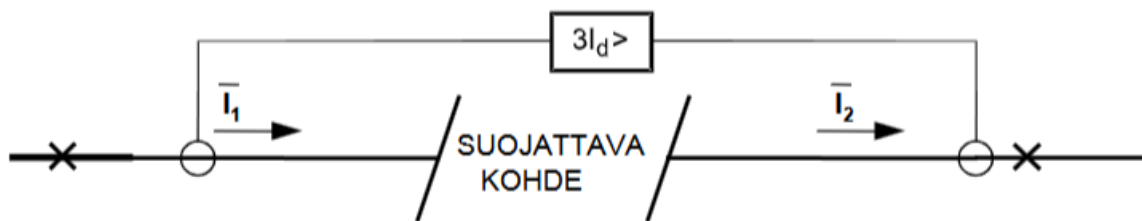
Kuva 4.3 Käänteisaikareleen laukaisukäyrät. Vasemmalla normal inverse -käyrä ja oikealla very inverse -käyrä. (ABB 2024)

4.2.2 Differentiaalirele

Differentiaalirele vertaa suojattavan kohteen tulevia ja lähteviä vaihevirtoja. Kuvassa 4.4 on differentiaalireleen mittauseriaate. Rele toimii, jos vaihevirroista laskettu erovirta on suurempi kuin asetellut raja-arvot. Erovirta voi syntyä virtojen amplitudi- tai vaihekulmaerosta. Differentiaalireleellä toteutettu suojaus toimii ainoastaan suojausalueen vioissa, jolloin voidaan saavuttaa absoluuttisesti selektiivinen suojaus ja suojauksen toimintanopeus on erittäin hyvä. Suojausalue on virranmittauspaikkojen välinen alue ja tämän takia differentiaalirele ei pysty toimimaan muiden alueiden varasuojana.

Differentiaalirelettä voidaan käyttää muuntajien, koneiden, johtojen ja kiskostojen suojaukseen. (Elovaara & Haarla, 2011b. ABB, 2000)

Differentiaalirele vaatii toimiakseen sitä suuremman erovirran mitä suurempi suojausalueen läpi menevä virta on. Isoilla kuormitusvirroilla virtamuuntajien mittausrvirhe ja muuntajan käämikytkimen asennosta johtuvat mittausrvirheet ovat suurempia kuin pienillä kuormitusvirroilla. Releeseen aseteltu erovirran kasvaminen kuormitusvirran mukaisesti saadaan tehtyä releen vakavointiominaisuudella. Vakavoinnilla estetään, että suojausalueen lähellä tapahtuvat viat eivät aiheuta virhelaukaisuja. (Elovaara & Haarla, 2011b. ABB, 2000)



Kuva 4.4 Differentiaalireleen mittausperiaate. (ABB, 2000)

Rele mittaa suojattavan kohteen molemmin puolin vaihevirratt I_1 ja I_2 ja muodostaa niistä erovirran I_d .

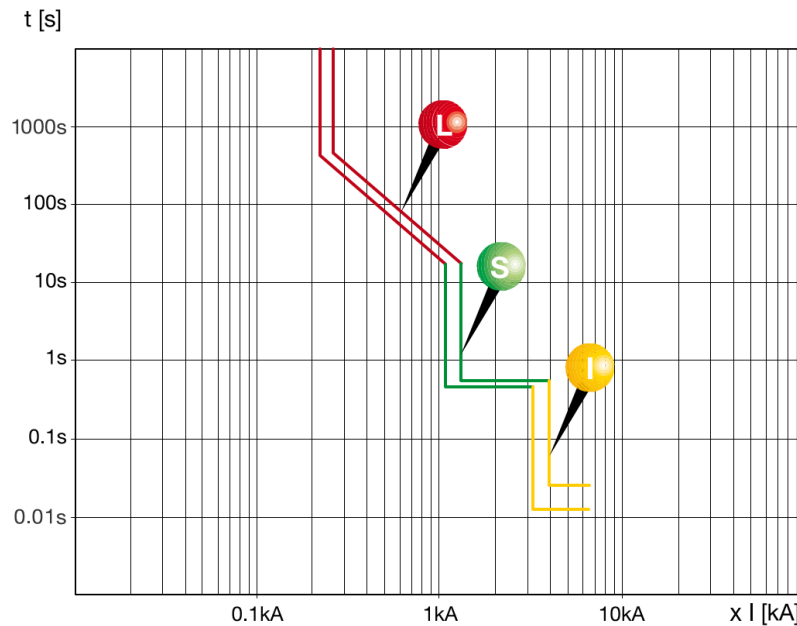
4.3 Pienjännitesuojalaitteet

4.3.1 Katkaisijat

Katkaisijoiden käyttökohteita on pää- ja alakeskusten sekä moottorilähtöjen suojaaminen. Katkaisijat pystyvät sulkemaan ja avaamaan virtapiirin eri vikatilanteissa nimellisvirran moninkertaisilla virroilla. Pienjännitekatkaisijat ovat ilma- tai kompaktikatkaisijoita. Katkaisijavalmistajasta riippuen, ilmakatkaisijoita valmistetaan 630 A - 6300 A virroille jännitteelle 400 V - 1000 V ja kompaktikatkaisijoita valmistetaan 16 A - 3200 A virroille jännitteelle 230 V - 690 V. Kompaktikatkaisijoilla voi olla oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus. (Hietalahti, 2013b)

Nykyaikaiset kompakti- ja ilmakatkaisijat on varustettu elektronisilla tai termomagneettisilla suojareleillä. Elektronisten suojareleiden etuna on laajat ja monipuoliset asettelualueet, erilaiset mittaukset ja hälytykset. Suojareleissä voi olla myös muita suojaustoimintoja kuten

yli- alijännitesuojaus tai maasulkusuojaus. (Tiainen, 2020) Kuvassa 4.5 on esimerkki elektronisen suojareleen toimintakäyrästä, missä suojareleen toimintakäyrän suojaustoiminto L on ylikuormitussuojaus, S on hidastettu oikosulkusuojaus ja I on oikosulun pikalaukaisu.



Kuva. 4.5. Elektronisen suojareleen toimintakäyrä. (Muokattu lähteestä: ABB, 2010)

4.3.2 Sulakkeet

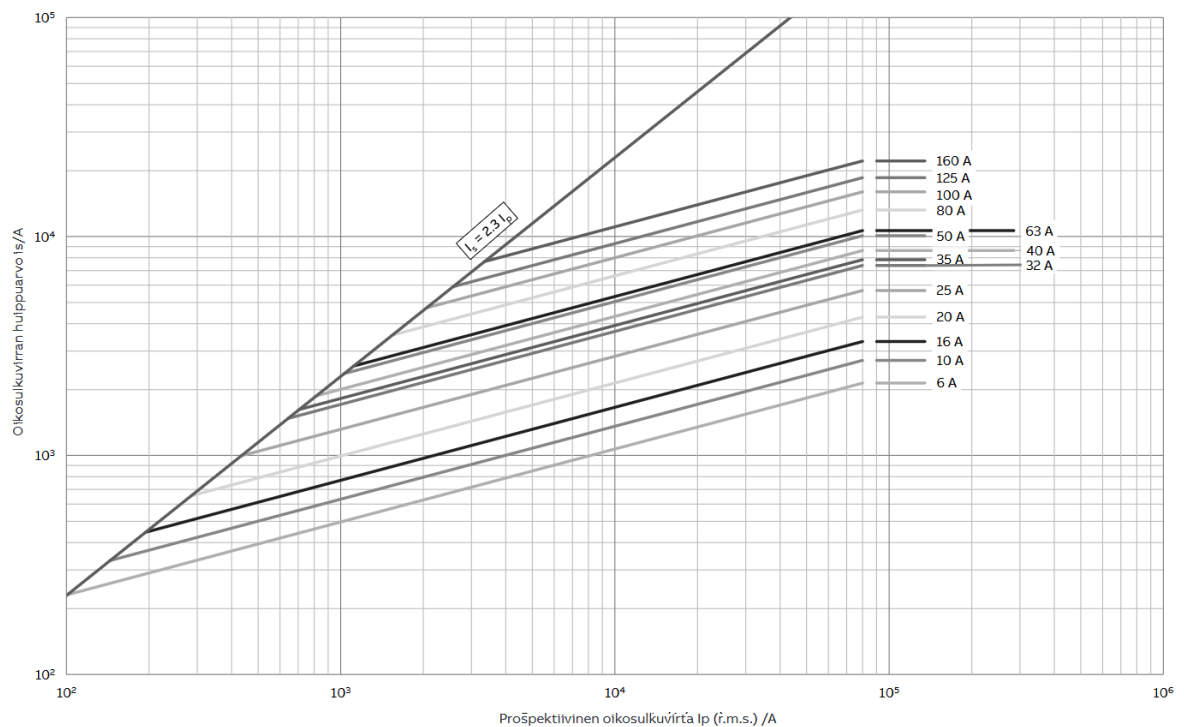
Sulakkeita käytetään teollisuuden pienjänniteverkkojen oikosulku- ja ylikuormitussuojina niiden edullisuuden, turvallisuuden, selektiivisyyden ja hyvän virranrajoituskyvyn vuoksi. Sulakkeen sisällä on sulakeliуска tai lanka, joka oikosulku- tai ylikuormitustilanteessa katkeaa tai sulaa. Sulakeliuskan tai langan rakenteen ja mitoituksen avulla vaikutetaan sulakkeen toimintaominaisuuksiin. Sulakkeita valmistetaan eri käyttökohteisiin ja katkaisualueille. Taulukossa 4.2 esitetty sulakkeiden kirjaintunnusten merkitys. (ABB, 2000)

Taulukko 4.2 Sulakkeiden kirjaintunnusten merkitys. (ABB, 2000)

Ensimmäinen kirjain ilmaisee katkaisualan	
g	koko alueen kattava katkaisukyky, sekä oikosulku- että ylikuormitussuojaksi soveltuva sulake
a	osa-alueen kattava katkaisukyky, vain oikosulkusuojaksi soveltuva sulake
Toinen kirjain ilmaisee käyttökohteen	
G	johdon suojaukseen tarkoitettu sulake
M	moottorin suojaukseen tarkoitettu sulake
Kirjainyhdistelmät	
gG	yleiskäyttöön tarkoitettu sulake, johdon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukseen
aM	moottoripiirin suojasulake, jonka katkaisukyky käsittää virran tietyn osa-alueen
gM	moottoripiirin suojasulake, jonka katkaisukyky käsittää koko virta-alueen

Sulakkeiden virranrajoituskyky

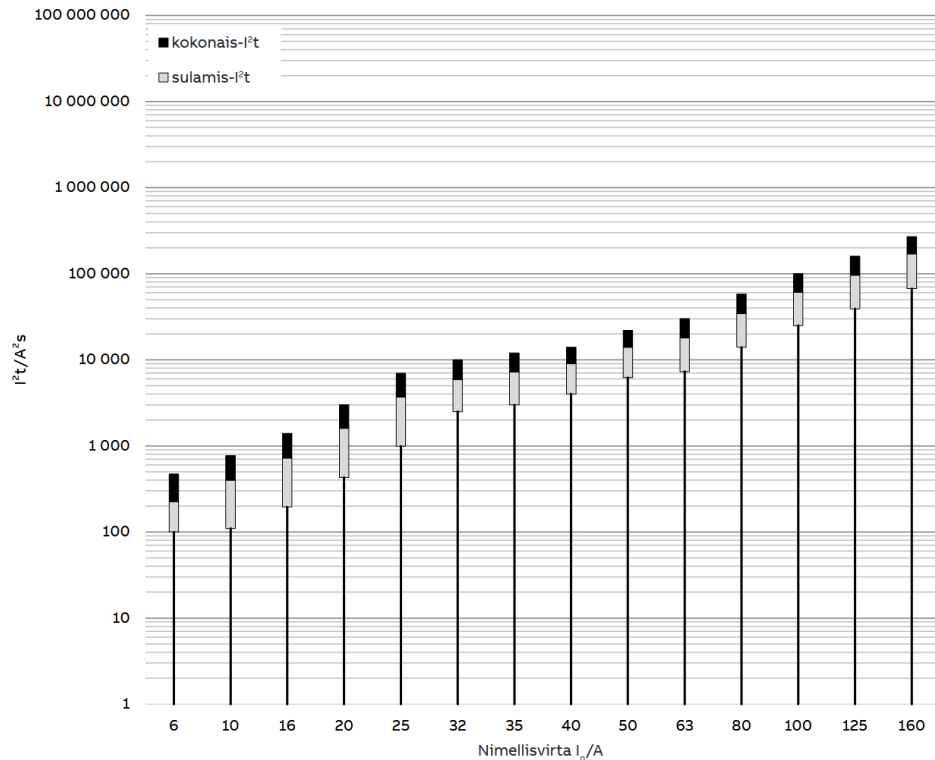
Sulakkeiden virranrajoituskyky tarkoittaa sulakkeiden kykyä rajoittaa oikosulkuvirran kasvua. Virranrajoituskyky pohjautuu sulakkeen sisällä syntyvän valokaariresistanssin nopeaan kasvuun. Sulakkeiden virranrajoituskäyrästä voidaan katsoa oikosulkuvirrat, jonka sulake päästää läpi tietyllä prospektiivisella oikosulkuvirralla. (ABB, 2000). Kuvassa 4.6 esimerkki virranrajoituskäyrästä.



Kuva 4.6 Sulakkeiden virranrajoituskäyrät. ABB:n gG -sulakkeet OFAA_GG_, 0-koko, 690 V. (ABB, 2025c)

Sulakkeiden selektiivisyys

Sulakkeiden välillä saavutetaan yleensä hyvä selektiivisyys, kun sulakekoot on valittu toisiinsa nähden oikein. Sulakkeet ovat selektiivisiä useimmissa tapauksissa, kun sulakkeiden nimellisvirtojen suhde on 1:1,6. Sulakkeiden välinen selektiivisyys voidaan tarkastaa I^2t -taulukoista. (ABB, 2025c) Kuvassa 4.7 on esitetty sulakkeiden I^2t -taulukko.



Kuva 4.7 Sulakkeiden I^2t -taulukko. ABB:n gG -sulakkeet OFAA_GG_, 0-koko, 690 V. (ABB, 2025c)

I^2t -taulukosta nähdään sulakkeen valokaari- ja sulamis- I^2t -arvo, joiden summa ilmoittaa kokonais- I^2t -arvon. Sulakkeiden selektiivinen toiminta toteutuu, kun pienemmän sulakkeen kokonais- I^2t -arvo on pienempi kuin suuremman sulakkeen sulamis- I^2t -arvo. (ABB, 2000)

5 TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKON SUUNNITTELU JA MITOITUS

Teollisuuden sähköjakeluverkon suunnittelu ja mitoitukset tulee tehdä niin, että suunnittelun lopputuloksena verkko on turvallinen, se vastaa tuotannon tarpeita ja siinä on otettu huomioon kokonaiskustannukset. Mitoitukseen vaikuttaa vaadittu tehonsiirtokyky, suojausien vaatimukset, liittymiskohdan oikosulkuvirrat sekä ympäristöolosuhteet.

5.1 Verkon mitoitus

Teollisuuden sähköjakeluverkon suunnittelu aloitetaan tehon tarpeen arvioinnilla. Tämän avulla pystytään tekemään tarvittavat mitoitukset sähköjakeluverkon toteutukseen. Teollisuuslaitoksen tehon arvioinnissa täytyy ottaa huomioon rakennussähköistyksen, LVIA-laitteiston sekä tuotantolaitteiden tehot. Rakennussähköistyksen teholaskenta perustuu monesti arvioihin, mihin vaikuttaa teollisuuslaitoksen rakennuksen käyttötarkoitus sekä koko. LVIA-laitteiston tehon tarve pystytään laskemaan laiteluetteloiden avulla. Tapauskohtaisesti tehon mitoituksessa otetaan myös huomioon tulevaisuuden tehon tarve. Tarkempaa ohjeistusta rakennuksen sähköverkon mitoittamiseen löytyy ST-kortiston kortista 13.31.

Teollisuudessa tuotantolaitteiden sähköteho saadaan arvioitua laiteluettelosta. Laiteluettelossa on listattuna sähköä kuluttavat laitteet, niiden nimellisarvot sekä käyttötyyppi. Tuotantolaitteiden sähkön kulutus ei aina ole nimellisarvojen mukainen, vaan laitteiden käynnissä olo vaihtelee, eikä laitteet ole samanaikaisesti käynnissä. Tuotantolaitteille täytyy arvioida laiteryhmiä ja laiteryhmiä väliset samanaikaisuuskeroimet, sekä laitekohtaiset kuormituskertoimet, mitkä vaikuttavat pienentävästi tarvittavaan huipputehohon. Tuotantolaitteiden huipputehön arviointia auttaa, jos käytettävissä on tuotantolaitteiden prosessi- ja toiminnankuvaukset.

5.2 Keskusten mitoitus

Teollisuuden keskusten mitoituksessa käytetään Suomessa standardia SFS-EN 61439-: ”Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset”, sekä ”Pienjännitekeskukset. Osa 2: Ammattikäyttöön tarkoitettut kojeistot”. Keskusten oikosulkuvirtojen laskenta tehdään standardin IEC 60909-0: ”Short circuit currents in three phase a.c. systems – Part 0:

Calculation of currents” mukaisesti. Keskuksat mitoitetaan muun muassa sähköteknisten tietojen, rakenteen, jakelujärjestelmän, käyttöympäristön ja suojauksen mukaan.

5.2.1 Keskuksen nimellisvirran määrittäminen

Keskuksen nimellisarvot perustuvat sitä syöttävän muuntajan nimellistehoon ja toisiojännitteeseen. Keskuksen nimellisvirta valitaan isommaksi kuin syöttävän muuntajan arvo. Alakeskusten nimellisvirta määritellään syöttävän etukojeen perusteella. (PSK 1801, 2000) Yhtälöllä 5.1 voidaan laskea muuntajan toisiokäämityksen nimellisvirta I_n .

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (5.1)$$

jossa S_n = muuntajan kokonaisnäennäisteho (VA)
 U_n = muuntajan toisiopuolen nimellinen jännite (V)
 I_N = nimellisvirta (A)

Keskuksen nimellisvirraksi valitaan seuraava standardin mukainen nimellisvirta mikä on suurempi kuin muuntajan toisiokäämityksen nimellisvirta. Taulukossa 5.1 on standardin mukaiset mitoitusvirrat sähkölaitteille.

Taulukko 5.1. IEC 60059 standardimitoitusvirrat, joiden kanssa voidaan käyttää kertoimia 1,10, 100... (IEC 60059, 2000)

Standardimitoitusvirrat (A)									
1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8

5.3 Muuntajan mitoitus

Muuntajan mitoitus perustuu tarvittavaan tehontarpeeseen ja valintaan vaikuttaa myös muuntajan tyhjäkäynti- ja tehohäviöt, joista muodostuu muuntajan häviökustannukset. Muuntajan mitoitukseen vaikuttaa myös mahdolliset tulevaisuuden tehontarpeen lisäykset ja tämän vaikutus on arvioitava muuntajan tehoa valittaessa.

IEC-standardin mukaan muuntajat mitoitetaan niin, että mitoituskuormituksella ajo +20°C:n ympäristölämpötilassa on normaalia käyttöä. Suomen viileästä ilmastosta johtuen

muuntajissa on luontaista ylikuormitettavuutta. Muuntajan lämpeneminen asettaa rajat muuntajan ylikuormitettavuudelle. Lämpeneminen aiheuttaa muuntajan eristysrakenteeseen vanhenemista, mikä lyhentää muuntajan käyttöikä. Liian korkeasta lämpötilasta voi aiheutua muuntajan rikkoontuminen. (Elovaara & Haarla, 2011b, Lakervi & Partanen 2008) Teollisuudessa käytetään muuntajan eristysrakenteen mukaan öljyeristeisiä- ja kuivamuuntajia. Molemmille muuntajatyypille on IEC 60076 standardissa määritetty suurimmat sallitut kuormitusvirrat. Kuivamuuntajalle sallittu maksimi kuormitusvirta on 1,5 x nimellisvirta. Kuormitettavuuden ehtona on, että muuntajan kuumimman pisteen lämpötila ei saa ylittää suurinta sallittua lämpötilaa. (IEC 60076-12, 2008)

Öljyeristeisen muuntajan suurin sallittu kuormitettavuus määräytyy muuntajan kokoluokituksen ja erilaisten kuormitustyyppien mukaisesti. Esimerkiksi pienimmän kokoluokan muuntajan sallittu kuormitettavuus normaalisyklisellä kuormituksella on 1,5 x nimellisvirta, kun suurimpia sallittuja lämpötiloja ei ylitetä. (IEC 60076-7, 2005)

5.3.1 Taajuusmuuttajakäytön syöttömuuntajan mitoitus

Taajuusmuuttajakäyttöä syötetään tarvittaessa niitä varten mitoitetuista muuntajista. Muuntajilta vaadittu näennäisteho S_{muuntaja} voidaan laskea karkeasti yhtälöllä

$$S_{\text{muuntaja}} = P_{\text{kuorma}} \cdot \frac{1.05}{k} \cdot \frac{1}{\eta_r} \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot \frac{1}{\eta_i} \cdot \frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (5.2)$$

jossa

P_{kuorma} on moottoreiden kokonaisteho

k on muuntajan kuormitettavuus

1.05 ottaa huomioon muuntajan oikosulkuimpedanssissa tapahtuvan jännitteen aleneman

$\cos \alpha$ ottaa huomioon tasasuuntaajan ohjauskulman, diodi tasasuuntaajalla arvo on 1

η_r on tasasuuntaajan hyötysuhde

η_i on invertterin hyötysuhde

η_c on AC suodattimen hyötysuhde

η_m on moottoreiden hyötysuhde

Yleensä yhtälöllä laskettu kuormamoottoreiden tehon kerroin on 1.2–1.35. Muuntajan tarkemmat mitoitusyhtälöt voidaan johtaa standardeista. (Hietalahti, 2012)

Taajuusmuuttajavalmistajien ohjeistuksesta löytyy myös perussäännöt syöttömuuntajan näennäistehon mitoitukseen:

- jos taajuusmuuttajassa on diodisyöttöyksikkö, voidaan käyttää yhtälöä

$$S_{\text{muuntaja}} = 1,32 \cdot P_{\text{kuorma}} \quad (\text{ABB, 2025a})$$

- jos taajuusmuuttajassa on IGBT-syöttöyksikkö (low harmonic taajuusmuuttaja), voidaan käyttää yhtälöä

$$S_{\text{muuntaja}} = 1,16 \cdot P_{\text{kuorma}} \quad (\text{ABB, 2025b})$$

5.4 Kaapelin mitoittaminen

Kaapelin valintaan vaikuttavat useat asiat, mutta pääpaino valinnassa on taloudellisuus ja kuormitettavuus. Kaapelin valintaan vaikuttavia teknisiä asioita, jotka on muistettava ovat kulutus ja sen kasvu, oikosulkuvirrat, oikosulkukestoisuus, jännitteenalenema ja mekaaninen kestävyys. Kaapelin valinnan taloudellisia asioita ovat hankinta-, asennus-, kunnossapito- ja häviökustannukset. (Elovaara & Haarla, 2011b. ABB, 2001)

5.4.1 Kaapelin kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuus määrittää sen, että kuinka suuri virta kaapelissa voidaan siirtää, jotta lämpötila pysyy annettujen rajalämpötilojen alapuolella. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat kaapelin rakenne, ympäröivä lämpötila, muiden lähellä olevien kaapeleiden ja laitteiden lämmittävä vaikutus, asennustapa, maan lämpöresistiivisyys ja asennussyvyys. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Kaapelivalmistajien kuormitustaulukoista tai SFS 6000 standardista on nähtävissä, kuinka suurella virralla kaapeleita voi kuormittaa tietyissä olosuhteissa. Kaapelin kuormitettavuus täytyy tarkistaa, jos asennusolosuhteet poikkeavat taulukoiden arvoista, jolloin todellinen kuormitettavuus täytyy laskea korjauskertoimien avulla. Kaapelin kuormitettavuus voidaan laskea yhtälöllä 5.2.

$$I' = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n \cdot I_0 \quad (5.2)$$

missä	I_0	kaapelin nimellinen kuormitettavuus
	I'	kaapelin korjattu kuormitettavuus
	k_n	korjauskerroin

5.4.2 Kaapelin jännitteenalenema

Teollisuuslaitoksissa kaapelit voivat olla pitkiä, jolloin pitää ottaa huomiota kaapeleiden jännitteenalenema. Teollisuudessa alhainen jännite voi aiheuttaa ongelmia taajuusmuuttajissa ja muissa elektroniikkalaitteissa. Kaapelin sallitulle jännitteenalenemalle on SFS 6000 standardissa suosituksia. Jännitteenalenema pääjännitetasolla U_h voidaan laskea yhtälöllä 5.3.

$$U_h = \sqrt{3} \cdot I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \quad (5.3)$$

missä	I = kuormitusvirta
	φ = vaihejännitteen ja -virran välinen vaihesiirtokulma (ABB, 2000)

5.4.3 Terminen oikosulkukestoisuus

Terminen oikosulkukestoisuus ilmoitetaan yleensä suurimpana sallittuna yhden sekunnin virta-arvona alkaen suurimmasta sallitusta käyttölämpötilan arvosta. Tarkasteltaessa termistä oikosulkukestoisuutta on aina huomioitava suojarleiden ja katkaisijoiden toiminta-ajat ja niiden vaikutus oikosulkuvirran vaikutusaikaan. Oikosulkuvirran vaikutusaikaa vastaava oikosulkuvirta saadaan kertomalla yhden sekunnin oikosulkuvirta I_{ts} kertoimella $1/\sqrt{t}$ missä t on oikosulkuvirran vaikutusaika. (ABB, 2000)

5.5 Pienjännitepuolen suurten virtojen sähköjakelu

Suurten virtojen sähköjakelu edellyttää poikkeavia ratkaisuja tavanomaisiin kaapelointeihin verrattuna. Vaatimukset voidaan toteuttaa alla mainituilla vaihtoehdoilla riippuen nimellisvirran tai oikosulkuvirran suuruudesta johtuen

- kaapeleiden rinnankytkennällä
- suurvirtakaapeleilla
- avoimilla tai koteloituilla kiskostoilla
- vaihe-erotetuilla kiskostoilla

Kaapeleiden rinnankytkentää voidaan käyttää nimellisvirralla 1000–1600 A, kun oikosulkuvirta ei ylitä kyseisen kaapelin sallittua oikosulkuvirta. Suurvirtakaapeleita voidaan käyttää usean tuhannen ampeerin virroilla ja hyvin tuettuina myös suurilla oikosulkuvirroilla. Suurvirtakaapeleiden käyttö on perusteltua taloudellisesti, kun kyseessä on pidempien etäisyyksien päässä olevien laitosten osien yhdistäminen toisiinsa. (ABB, 2000)

Avoimia tai koteloituja kiskostoja voidaan käyttää aina 8000 A nimellisvirroille asti ja oikosulkukestoisuus voi olla 300 kA asti. Tästä suuremmilla virroilla on käytettävä vaiheerotettuja kiskostoja. (ABB, 2000)

Kiskostoja käytetään suurvirtaiseen tehonsiirtoon pienjännitekeskuksen ja muuntajan välillä tai keskuksien välillä. Kiskosilta on kiinteä rakennelma ja se rakennetaan tapauskohtaisesti keskuksen ja muuntajan välille. Kiskosilta koostuu metallisista yleensä alumiini tai alumiiniseosvirtakiskoista. Virtakiskot on koteloitu kosketussuojausvaatimusten mukaisesti. Kiskosiltojen mitoitus tehdään nimellisvirran sekä termisen ja dynaamisen oikosulkuvirran mukaisesti.

6 TALOUDELLISUUSLASKELMAT

6.1 Elinkaarikustannukset

Sähkönjakeluverkkojen suunnittelussa keskeinen tavoite on löytää ratkaisut, jotka ovat kokonaiskustannuksiltaan edullisimmat, täyttävät tekniset vaatimukset ja tarjoavat luotettavan sähkönjakelun. Suunnittelua tehdessä tavoitteena on määrittää koko jakelujärjestelmän ja verkkokomponenttien kokonaiskustannukset koko elinkaaren ajalta. Verkon ja komponenttien kustannukset muodostuvat investointi-, häviö-, keskeytys-, ja ylläpitokustannuksista. Taulukossa 3.1 jakeluverkon kustannuslajit. (Lakervi & Partanen 2008)

Taulukko 3.1. Kustannukset ja niiden luonne. (Lakervi & Partanen 2008)

Kustannus	kiinteä	muuttuva	kerta	jaksollinen
Investointi	o		o	
Kuormitushäviöt		o		o
Tyhjäkäyntihäviöt	o			o
Keskeytyskustannukset		o		o
Ylläpito	o			o

Investointikustannukset ovat luonteeltaan kertakustannuksia ja muut kustannukset ajoittuvat koko käyttöjaksolle yleensä vuosittaisina kustannuksina. Osassa komponenteissa syntyvät jaksolliset kustannukset pysyvät koko eliniän ajan vakiona, kuten muuntajan tyhjäkäyntihäviöt. Osa jaksollisista kustannuksista muuttuu käyttöjakson aikana, kuten kuormitushäviöt ja keskeytyskustannukset. (Lakervi & Partanen 2008)

6.2 Investointilaskentamenetelmät

Sähkönjakeluverkon suunnittelussa tekniset vaatimukset täyttäviä vaihtoehtoja voi olla useita. Vaihtoehtojen taloudellisuuden vertailu tehdään kannattavuuslaskelmien avulla. Eri vaihtoehtojen kustannuslajit on pystyttävä tekemään toistensa suhteen vertailukelpoiksi. Esimerkiksi häviökustannuksia ei voida verrata yhteismitallisesti investointikustannuksiin. Vertailu voidaan tehdä kahdella pääperiaatteella; laskemalla jaksollisten kustannusten koko käyttöjakson nykyarvo (diskonttaus, kapitalisointi) tai muuttamalla investointikustannukset koko käyttöjaksolle jaksotetuiksi vuotuisiksi kustannuksiksi (annuiteetti). Taloudelliseen

vertailuun liittyy kuitenkin aina epävarmuutta, koska laskentakoron muutoksia tulevaisuudessa ei tiedetä. (Elovaara & Haarla, 2011. Lakervi & Partanen 2008)

Yleisimmin käytettyjä investointien laskentamenetelmiä on:

- nykyarvomenetelmä
- annuiteettimenetelmä
- sisäisenkorkokannan menetelmä
- takaisinmaksuajan menetelmä (Elovaara & Haarla, 2011)

6.2.1 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvon laskeminen perustuu yhden vuoden aikana syntyvään kustannukseen, kuten häviö- tai investointikustannukseen. Nykyarvo voidaan laskea yhtälöllä 6.1.

$$\text{Nykyarvo} = \frac{1}{\alpha^t} = \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^t} \quad (6.1)$$

missä: t = vuosi t tulevaisuudessa

p = korkoprosentti

Nykyarvon laskenta kertoo rahamäärän, joka korkoa korolle laskien antaa tulokseksi vuonna t sellaisen rahamäärän, jotta kyseinen kustannus voidaan maksaa pois. Kustannuksen nykyarvoon pienentävästi vaikuttaa pidempi ajanjakso ja suurempi korko. (Lakervi & Partanen 2008)

Usein kiinnostuksen kohteena on kaikkien suunnittelujakson vuosina syntyvien vuotuis-kustannusten nykyarvo. Vuotuis-kustannusten nykyarvo lasketaan diskonttaamalla jokaisena vuotena syntyvät kustannukset nykyhetkeen. Vuotuis-kustannusten muuttuessa ja kuormitusten vaihdellessa sekä suunnittelujakson pituuden takia, olisi jokaisen vuotuiserän laskenta aikaa vievää. Laskenta tehdään oletuksella, että kuormitusten kasvu pysyy tarkastelujakson ajan vakiona. Nykyarvon laskenta voidaan tehdä kapitalisointikertoimien avulla. Kapitalisointikertoimella κ kertomalla ensimmäisen vuoden kustannuserä K_1 saadaan tulokseksi koko tarkastelujakson vuotuisten kustannuserien nykyarvo K . (Lakervi & Partanen 2008).

Investoinnin kokonaiskustannusten nykyarvo lasketaan yhtälöllä 6.2 yhdistämällä investoinnin kustannukset sekä häviökustannusten nykyarvo diskonttaamalla ensimmäisen vuoden häviökustannus.

$$K = K_{\text{inv}} + \kappa K_{\text{hävl}} \quad (6.2)$$

missä K = kokonaiskustannusten nykyarvo
 K_{inv} = investoinnin kustannukset
 $K_{\text{hävl}}$ = ensimmäisen vuoden häviökustannus

Kapitalisointikerroin κ lasketaan yhtälöllä 6.3.

$$\kappa = \psi \frac{\psi^{T-1}}{\psi-1} \quad (6.3)$$

missä T = tarkasteltava ajanjakso
 ψ = apukerroin, joka ottaa huomioon tehonkasvun ja korkoprosentin

Tehonkasvun ja korkoprosentin huomioon ottava apukerroin lasketaan yhtälöllä 6.4.

$$\psi = \frac{(1 + \frac{r}{100})^2}{1 + \frac{p}{100}} \quad (6.4)$$

missä r = tehon kasvu vuodessa prosentteina

Kun lasketaan tyhjäkäyntihäviöiden nykyarvoja, on muistettava, että tyhjäkäyntihäviöt pysyvät vakiona koko vuoden ja tällöin kapitalisointikertoimien laskennassa käytetään tehonkasvuna 0 %/a. (Lakervi & Partanen 2008).

6.2.2 Annuiteettimenetelmä

Pitkällä ajanjaksolla vaikuttava, mutta kertaluonteinen kustannus, kuten investointikustannus, voidaan muuttaa vuosikustannuksiksi laskemalla annuiteetti ε yhtälön 6.5 avulla.

$$\varepsilon = \frac{p/100}{1 - \frac{1}{(1 + \frac{p}{100})^t}} \quad (6.5)$$

missä p = korko

t = investoinnin tarkastelu-aika vuosina (Lakervi & Partanen 2008)

Annuiteetit tarkoittavat vuosikustannuksia, johon sisältyy kustannusmenon kuoletus ja laskentakoron suuruinen korko. Tätä vuosikustannusarvoa verrataan vuosittain tuottoihin. Annuiteettia voi käyttää arviointikriteerinä vertailtaessa eri investointivaihtoehtoja keskenään, esimerkiksi vertailtaessa valintaa eri muuntajien välillä tai verrataan uuden investoinnin annuiteettia häviöiden vähentämisestä saatuun hyötyyn. Tilanteissa, joissa on pitkät pitoajat, korkoprosentti määrää pääosin annuiteetin suuruuden ja vastaavasti lyhyillä pitoajoilla vuotuinen pääoman lyhennys on määräävä. (Elovaara & Haarla, 2011)

6.2.3 Sisäisen korkokannan menetelmä

Sisäinen korkokanta kertoo sen korkokannan, jolla investoinnin nykyarvon on nolla. Investoinnista kertyvien nettotuottojen nykyarvo on yhtä suuri kuin investoinnin kustannukset. Kun sisäinen korkokanta on vähintään tavoitellun pääoman tuotto-prosentin suuruinen, voidaan investointia pitää edullisena. Edullisin investointivaihtoehto on se missä sisäinen korkokanta on suurin. (Haverila et al., 2009)

6.2.4 Takaisinmaksuajan menetelmä

Takaisinmaksuajan menetelmää käytetään yleisesti sen yksinkertaisuuden takia. Menetelmällä selvitetään, minkä ajan kuluessa investoinnin tuotot ylittävät hankintakustannukset. Takaisinmaksuajan menetelmää sopii käytettäväksi, kun tuottojen kertymisen arvioiminen pitkällä ajanjaksolla on hankalaa. Takaisinmaksuajan laskenta voidaan esittää yhtälöllä 6.6, kun laskentakorkoa ei oteta huomioon.

$$Takaisinmaksuaika = \frac{\text{hankintakustannukset}}{\text{nettotuotto vuodessa}} \quad (6.6)$$

Takaisinmaksuajan menetelmän mukaan investoinnit, joista pääoma kertyy nopeasti takaisin kannattaa suorittaa. Menetelmä ei kerro investoinnin kannattavuutta, vaan se on käyttökelpoinen arvioitaessa investoinnin rahoitusvaikutuksia. (Haverila et al., 2009).

Takaisinmaksuaika saadaan laskettua tarkemmin, kun laskennassa otetaan huomioon myös korkokanta.

6.3 Herkkyysanalyysi

Investoinnin kannattavuuden laskenta perustuu monesti epätarkkoihin laskentatietoihin. Investointihankkeisiin kohdistuu aina riskejä, eikä voi tarkalleen tietää mitä tulevaisuudessa tapahtuu. Nämä lisäävät epävarmuutta investointien suunnitteluun. Investoinneilla voi olla suuri taloudellinen merkitys ja on tärkeää, että epävarmuus saadaan mahdollisimman tarkasti määritettyä ennen investointipäätöstä. Herkkyysanalyysissä investoinnin laskentaparametrejä muuttamalla voidaan selvittää, miten investoinnin kannattavuus muuttuu, kun sitä verrataan suunnitteluarvoon. (Haverila et al., 2009) Laskentaparametrejä ovat muun muassa. pitoaika, laskentakorko sekä juoksevat kulut ja tuotot. Näitä laskentaparametrejä muuttamalla esimerkiksi -10 % ... +10 % voidaan tarkastella miten ne vaikuttavat kannattavuuteen.

6.4 Teho- ja energiahäviöt

Sähkönjakeluverkon taloudellisuuteen vaikuttaa merkittävästi muun muassa. kaapeleissa, muuntajissa ja generaattoreissa syntyvät häviöt. Teho- ja energiahäviöistä syntyy huomattavia vuotuisia kustannuksia ja ne pitää ottaa suunnittelussa huomioon.

Häviökustannusten laskenta on lähtökohtaisesti yksinkertaista, mutta sisältää useita epävarmuustekijöitä. Laskennassa määritetään ensin kaapelissa tai muuntajassa syntyvät häviötehot ja vuotuiset energiahäviöt. Häviökustannukset lasketaan käyttämällä häviöenergialle keskimääräistä hintaa, joka on riippuvainen pitkän aikavälin pörssisähköhinnasta. (Lakervi & Partanen 2008)

Muuntajan häviöt muodostuvat tyhjäkäyntihäviöstä ja kuormitushäviöstä. Tyhjäkäyntihäviö P_0 pysyy lähes vakiona kuormituksesta riippumatta ja se saadaan selvitettyä yleensä valmistajan tiedoista. Kuormitushäviöteho P_k muuttuu suhteessa muuntajan kuormitukseen ja käyttäytyy yhtälön 6.7 mukaisesti. (Lakervi & Partanen 2008)

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot P_{kn} \quad (6.7)$$

jossa S = muuntajasta otettu teho
 P_{kn} = muuntajan nimelliskuormitushäviöt

Kaapeleiden kuormitushäviöteho P_h lasketaan yhtälön 6.8 avulla.

$$P_h = 3I^2R \quad (6.8)$$

Vuodessa syntyvä häviöenergia voidaan laskea, vaikka häviötehon ajallinen vaihtelu tekee tarkasta laskemisesta työlästä. Tarpeeksi lähelle likiarvoja päästään, kun laskentaan käytetään huipunkäyttöaika apuna. Muuntajassa ja kaapelissa vuodessa syntyvät häviöenergiat lasketaan yhtälön 6.9 mukaisesti.

$$W_h \approx P_{hmax} t_h \quad (6.9)$$

jossa W_h = häviöenergia
 P_{hmax} = huippuhäviöteho
 t_h = häviöiden huipunkäyttöaika

Esimerkiksi muuntajan tyhjäkäyntihäviön häviöenergian laskennassa käytetään huipunkäyttöaikana 8760 h/a. (Lakervi & Partanen 2008)

7 TAPAUSTUTKIMUS

Teollisuusympäristöön ollaan lisäämässä uusi pumppaamo sekä erillinen muuntamorakennus. Pumppaamosta pumpataan prosessiliuotusvesiä kahden eri kiviainekasan kastelua varten sekä jatkokäsittelyyn. Pumppaamosta on lähtötietona laiteluettelot prosessi-, rakennus- ja LVIA-laitteista, sekä pumppausprosessiin liittyvät ajotapa- ja toimintakuvaukset.

Pumppaamosta saatujen lähtötietojen perusteella suunnitellaan sähköjakoalueen rakenne sekä tehdään mitoitus huomioiden sähkötekniset reunaehdot. Pumppaamon sähköjakoalueen mitoitus suunnitellaan nykytehon tarpeen mukaisesti, eikä mitoituksissa oteta huomioon tulevaisuuden tehon tarvetta. Pumppaamon sähköjakoalueen suunnittelu noudattaa kuvan 7.1 suunnitteluvaiheita.



Kuva 7.1. Sähköjakoalueen suunnitteluvaiheet.

Kuvassa 7.1 kuvataan pumppaamon sähköjakeluverkon suunnittelun eri vaiheet ja vaiheiden järjestys suunnittelun edetessä. Suunnittelu alkaa lähtötietojen käsittelyllä ja niiden perusteella suunnitellaan sähköjakeluverkon rakenne, jonka jälkeen tehdään mitoitusmuutokset muuntajille, keskuksille ja kaapeleille. Mitoitusten jälkeen tehdään oikosulkulaskennat, jolla saadaan selville verkon eri osissa vaikuttavat minimi- ja maksimioikosulkuvirratt. Laskettujen oikosulkuvirtojen avulla määritetään keskusten oikosulkuvirtakestoisuudet ja tarkistetaan kaapeleiden oikosulkukestoisuudet. Osalle sähköjakeluverkkoa määritetään suojausasettelut, tarkistetaan suojausvälinen selektiivisyys sekä tehdään elinkaarikustannuslaskennat.

Pumppaamon sähköjakeluverkko mallinnetaan Neplan-verkostolaskentaohjelmistolla, jolla suoritetaan tehonjako- ja oikosulkuvirtalaskennat. Verkstolaskentaohjelmistolla saatuja oikosulkuvirtalaskennan tuloksia verrataan yhtälöiden avulla suoritettuihin käsin laskentoihin. Vertailemalla voidaan varmistaa laskentojen oikeellisuus, jos tulokset kahdella eri laskentamenetelmällä ovat samankaltaisia.

Suunnittelun taloudellinen tarkastelu tehdään laskemalla kahden erikokoisen muuntajan häviökustannusten muodostuminen pitoajalta. Häviökustannusten kokonaisarvo pitoajalta lasketaan nykyarvomenetelmällä. Vertailemalla kahta erikokoista muuntajaa, voidaan havainnollistaa, kuinka muuntajan koko ja sen myötä tekniset ominaisuudet vaikuttavat häviökustannusten muodostumiseen.

7.1 Pumppaamon tehontarpeet

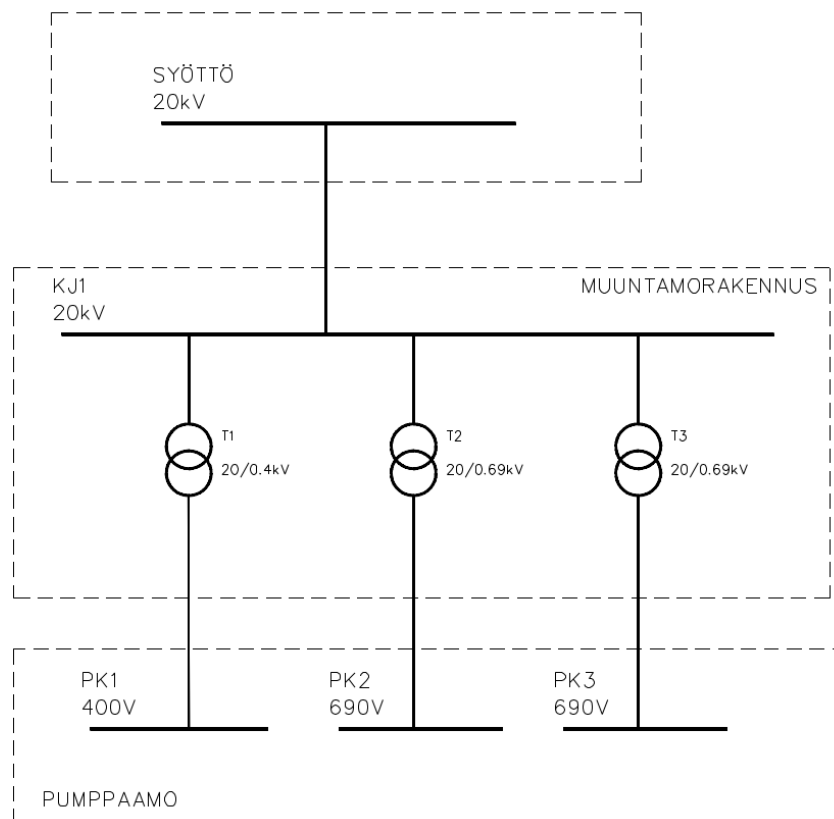
Pumppaamon sähköjakeluverkon mitoituksia varten lasketaan pumppaamon tehontarpeet. Tehontarpeet lasketaan prosessilaitteille ja rakennus- ja LVIA-laitteille. Pumppaamon lähtötietona on laiteluettelot prosessi-, rakennus- ja LVIA-laitteista (Liite 1 ja 2). Taulukoihin on laskettu tehot käyttö- ja kuormituskertoimilla kerrottuna. Prosessilaitteiden tehontarve on n. 6560 kVA ja rakennus- ja LVIA-laitteiden n. 340 kVA.

7.2 Pumppaamon sähköjakeluverkko

Pumppaamon sähköjakeluverkon suunnittelussa otetaan huomioon pumppaamon prosessin vaatimukset, jotka saadaan selville lähtötiedoista. Prosessilaitteet on suunniteltu kahden eri kiviaineskasan kasteluun ja ne toimivat itsenäisesti. Prosessilaitteiden sähkönsyöttöjen

suunnittelussa otetaan huomioon prosessin toimintavarmuuden varmistaminen. Sähkönsyöttöjen ottaminen samasta keskuksesta ei ole paras ratkaisu, jos ilmenee vikatapauksia tai tehdään huoltotoimenpiteitä. Prosessin toimintavarmuutta parannetaan suunnittelemalla prosessilaitteiden sähkönsyötöt kiviaineskasakohtaisesti kahteen eri keskukseen, joita syötetään omilla keskuskohtaisilla muuntajilla. Rakennus- ja LVIA-laitteiden sähkönsyötöt suunnitellaan omasta keskuksesta, mitä syötetään omalla muuntajalla.

Pumppaamon sähköjakeluverkko rakentuu pumppaamon ja erillisen muuntamorakennuksen välille. Muuntajat sijoitetaan muuntamorakennukseen ja keskukset pumppaamon sähkötilaan. Sähköjakeluverkon rakenteena käytetään säteittäistä verkon rakennetta. Sillä saadaan sähköjakeluverkon rakenteesta yksinkertainen, johon mitoitusmääritys ja suojauksien toteutus on helppoa. Kuvassa 7.2 on pumppaamon sähköjakeluverkon rakenne.



Kuva 7.2 Pumppaamon sähköjakeluverkon rakenne.

Sähkönjakeluverkon keskijännitejakelu tehdään muuntamorakennuksessa sijaitsevasta 20 kV kojeistosta KJ1, mistä on lähdöt muuntajille T1, T2 ja T3. Kojeisto KJ1 liitetään 20 kV pääjakeluverkkoon lähimmästä kojeistosta. Pienjänniteverkon jakelu tehdään keskitetysti pumppaamon sähkötilasta ja sähkölähdöt keskitetään pääkeskuksiin PK1, PK2 ja PK3. Pääkeskuksen PK1 jännitetaso on 400 V ja siitä otetaan sähkösyötöt rakennus- ja LVIA-laitteille. Pääkeskusten PK2 ja PK3 jännitetaso on 690 V ja niistä otetaan sähkösyötöt prosessilaitteille.

7.3 Muuntajien mitoitus

Pumppaamon sähköjakeluverkkoon mitoitetaan kolme eri muuntajaa. Muuntajien mitoitus tehdään nykytehontarpeen mukaisesti, eikä mitoituksissa oteta huomioon tulevaisuuden tehontarvetta. Muuntajien lopullinen näennäisteho valitaan standardimitoituksen mukaisesti, mikä noudattelee taulukon 5.1 mukaista standardimitoitusvirta jaottelua.

Rakennus- ja LVIA-laitteet saavat sähkönsyötön pääkeskuksesta PK1 ja sitä syöttää muuntaja T1. Muuntajan T1 kuormitus nykytehontarpeella on n. 340 kVA ja standardimitoitukseltaan sopiva muuntaja kattamaan nykytehontarpeen on näennäisteholtaan 400 kVA.

Prosessilaitteet saavat sähkönsyötön pääkeskuksista PK2 ja PK3 ja niitä syöttää muuntajat T2 ja T3. Muuntajien mitoitukseen ei käytetä luvussa 7.1 laskettua prosessilaitteiden tehontarvetta. Prosessilaitteet ovat taajuusmuuttajakäyttöjä ja muuntajien T2 ja T3 mitoituksessa muuntajien näennäisteho mitoitetaan käyttämällä luvun 5.3.1 taajuusmuuttajavalmistajan ohjeistusta. Muuntajan mitoitusta varten lasketaan yhden pääkeskuksen prosessilaitteiden moottoreiden kokonaisteho. Liitteen 1 taulukosta saadaan laskettua moottoreiden kokonaistehoksi 2710 kW. Laskennassa ei oteta huomioon M1 starttipumppua. Muuntajalta vaadittu näennäisteho lasketaan luvun 5.3.1 yhtälöllä

$$S_{\text{muuntaja}} = 1,32 \cdot P_{\text{kuorma}} = 1,32 \cdot 2710 \text{ kW} = 3577 \text{ kVA}$$

Muuntajalta vaadittu näennäisteho on 3577 kVA ja standardimitoitukseltaan sopiva muuntaja on näennäisteholtaan 4000 kVA.

7.4 Keskusten nimellisvirrat

Pumppaamon pääkeskusten PK1, PK2 ja PK3 nimellisvirrat valitaan laskemalla mitoitettujen muuntajien toisiokäämityksen nimellisvirrat yhtälöllä 5.1. Muuntajan toisiokäämityksen nimellistavirta arvo löytyy yleensä myös muuntajavalmistajan toimittamista tiedosta. Lasketaan muuntajien T2 ja T3 toisiokäämityksen nimellistavirta I_n :

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{4000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V}} = 3347 \text{ A}$$

Muuntajan T2 ja T3 toisiokäämityksen nimellisvirraksi saadaan 3347 A ja pääkeskusten PK2 ja PK3 nimellisvirraksi valitaan tätä suurempi arvo. Standardimitoitusvirtojen mukaisesti sopiva nimellistavirta pääkeskuskille on 4000 A. Pääkeskusta PK1 syöttävän muuntajan T1 toisiokäämityksen nimellisvirraksi saadaan 577 A. Standardimitoitusvirtojen mukaisesti sopiva nimellistavirta pääkeskuskelle PK1 on 630 A.

7.5 Kaapelointi

Pumppaamon kaapeloinnin suunnittelu jakautuu kahteen osaan, joka käsittää keskijännitekaapeloinnin ennen muuntajia ja muuntajien jälkeisen pienjänniteverkon kaapeloinnin. Pienjännitekaapelit mitoitetaan vaaditun kuormitettavuuden mukaisesti ja mitoituksessa noudatetaan standardin SFS 6000-5-52 mukaisia korjauskertoimia. Keskijännitekaapeleiden mitoituksessa käytetään standardin SFS 5636 mukaisia korjauskertoimia. Mitoitettujen kaapeleiden oikosulkukestoisuus varmistetaan tapaustutkimuksen myöhemmässä vaiheessa. Kaapeleiden jännitteenalennuksia ei lasketa lyhyiden kaapelipituuksien takia.

7.5.1 Pienjänniteverkon kaapelointi

Pienjänniteverkon kaapeloinnin mitoitus tehdään alumiinikaapeleilla. Pääkeskusten ylikuormitussuojaukset toteutetaan suojareleillä varustetuilla katkaisijoilla. Katkaisijoita käyttämällä suojauksien asettelut voidaan tehdä lähelle todellista kuormitusvirtaa, jolloin kaapeleiden mitoituksissa voidaan valita pienemmät poikkipinta-alat.

PK1 pääkeskuksen syöttökaapelointi

Pääkeskuksen PK1 syöttökaapelointi mitoitetaan syöttävän muuntajan T1 toisiokäämityksen nimellisvirran 577 A mukaisesti. Standardin mukaiset kuormitettavuuteen vaikuttavat

asennustavan ja ympäristön aiheuttamat korjauskertoimet katsotaan SFS 6000-5-52:2022 standardista. Arvioitu kaapelointipituus on 60 m ja kaapelointi tehdään kaapelitikkaalle (asennustapa E) ja kaapelitikkaita on yksi. Kaapelit ovat kaapelitikkaalla yhdessä kerroksessa ja koskettavat toisiaan. Kaapeleiden lukumäärä kaapelitikkaalla on 9 tai enemmän. Näistä saadaan asennusasennustavan korjauskertoimeksi 0,73.

Syöttökaapeliksi tarkastellaan poikkipinta-alaltaan 185 mm²:n PVC-eristeisen alumiinikaapelin kuormitettavuutta, jonka kuormitettavuus asennustavalla E ja ympäristönlämpötilassa 30 °C on 280 A. Kaapelin kuormitettavuus kerrotaan korjauskertoimella 0,73, jolloin saadaan kaapelin kuormitettavuudeksi 204 A. Kolmella rinnankytketyllä kaapelilla saadaan kuormitettavuudeksi 612 A, mikä on suurempi kuin muuntajan toisiokäämityksen nimellisvirta 577 A. Tästä päätellään, että kuormitettavuusehdot täyttyvät ja kaapeli ei lämpene yli sallitun 70 °C, mikä on suurin sallittu jatkuva lämpötila PVC-eristeelle.

Taajuusmuuttajakäytön kaapelointi

Pumpun M3 verkko- ja moottorikaapelointi mitoitetaan niin, että kaapelit pystyvät johtamaan taajuusmuuttajan suurimman kuormitusvirran. Pumpun M3 taajuusmuuttajan suurin kuormitusvirta on 1160 A. Syöttökaapeliksi tarkastellaan poikkipinta-alaltaan 240 mm²:n PEX-eristeisen alumiinikaapelin kuormitettavuutta, jonka kuormitettavuus asennustavalla E ja ympäristönlämpötilassa 30 °C on 409 A. Neljällä rinnankytketyllä kaapelilla saadaan kuormitettavuudeksi 1636 A. Kaapelointi tehdään kaapelitikkaalle (asennustapa E) ja kaapelitikkaita on kolme päällekkäin, joiden pystyettäisyys on 300 mm. Kaapelit ovat kaapelitikkaalla yhdessä kerroksessa ja koskettavat toisiaan. Kaapeleiden lukumäärä kaapelitikkaalla on neljä. Ympäristön lämpötila on 25 °C. Asennusasennustavan korjauskertoimeksi saadaan 0,79. Kaapelien kuormitettavuus kerrotaan korjauskertoimella 0,79 jolloin saadaan kaapelien kuormitettavuudeksi 1292 A, mikä riittää johtamaan suurimman kuormitusvirran.

PK2 ja PK3 liitäntä muuntajaan

Pääkeskukset PK2 ja PK3 liitetään syöttäviin muuntajiin käyttämällä kiskosilloja. Kiskosillat soveltuvat suurten virtojen jakeluun ja soveltuvat asennettavaksi pumppaamon

ja muuntamorakennuksen välille. Kiskosiltojen nimellisvirta mitoitetaan pääkeskuksen nimellisvirran mukaisesti.

7.5.2 Keskijänniteverkon kaapelointi

Kaapeloinnin mitoitukset tehdään PEX-eristeisillä alumiinikaapeleilla. Muuntajien ylivirtasuojaus syöttävästä kojeistosta KJ1 toteutetaan suojareleillä.

Muuntajan T2 syöttökaapelointi

Muuntajien 20 kV syöttökaapelit mitoitetaan muuntajien ensiökäämityksen nimellisvirran mukaisesti. Muuntajan T2 ensiökäämityksen nimellisvirta lasketaan soveltaen yhtälöä 5.1.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{4000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} = 115 \text{ A}$$

Muuntajan T2 syöttökaapelilta vaaditaan vähintään 115 A kuormitettavuutta. Kaapelointi tehdään kaapelitikkaalle (asennustapa F). Kaapelitikkaalle asennetaan kaikkien kolmen muuntajan syöttökaapelit ja kaapelit ovat kaapelitikkaalla yhdessä kerroksessa erillään. Kaapelitikkaita on kolme päällekkäin, joiden pystyettäisyys on 300 mm. Ympäristön lämpötila 25 °C. Korjauskertoimeksi saadaan 0,92. (SFS 5636:2024). Tästä lasketaan, että kaapelilta vaadittu kuormitettavuus pitää olla vähintään 125 A. Sisäasennukseen soveltuva 20 kV keskijännitekaapeli on tyypiltään AHXCMK-HF, jonka pienin saatavilla oleva kaapelin poikki pinta-ala on 50 mm². Syöttökaapelina käytetään AHXCMK-HF 3x50/16 20 kV, jonka kuormitettavuus on 160 A ja se riittää johtamaan vaaditun kuormitusvirran.

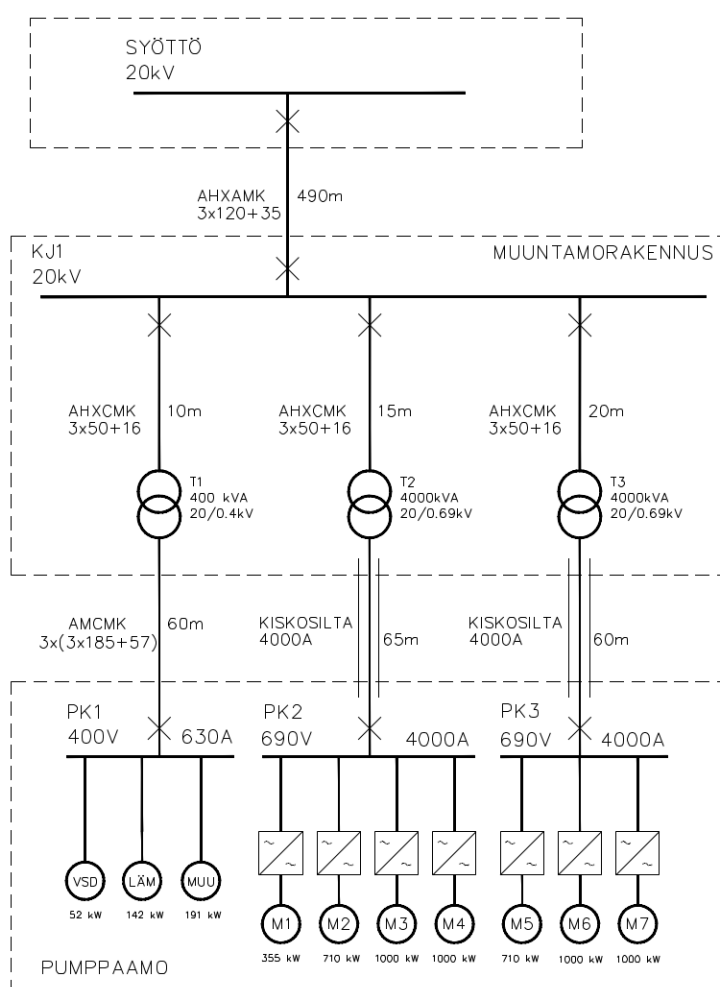
Kojeiston KJ1 syöttökaapeli

Kojeiston KJ1 syöttökaapelin kuormitettavuus saadaan selville laskemalla yhteen muuntajien ensiökäämityksen nimellisvirrat. Syöttökaapelilta vaaditaan vähintään 242 A kuormitettavuutta. Syöttökaapeli asennetaan maahan asennussyvyyteen 0,7 m. Maa-asennukseen soveltuva 20 kV keskijännitekaapeli on tyypiltään AHXAMK. Syöttökaapelina käytetään AHXAMK 3x120+35, jonka kuormitettavuus on 265 A maahan asennettuna ja se riittää johtamaan suurimman kuormitusvirran.

7.6 Verkostolaskentaohjelman tehonjakolaskenta

Pumppaamon sähköjakoverkko mallinnetaan verkostolaskentaohjelmalla. Verkostolaskentaohjelmalla voidaan tarkastella sähköjakoverkkojen toimivuutta ja mahdollisiin ongelma-kohtiin voidaan puuttua jo suunnitteluvaiheessa. Tehonjakolaskennalla sähköjakoverkosta saadaan selville jännitetasot, tehohäviöt, tehovirtaamat ja komponenttien kuormitusaste.

Pumppaamon sähköjakoverkko rakentuu kuvan 7.3 mukaisesti. Sähköjakoverkosta rakennetaan kuvan 7.3 mukainen verkkomalli verkostolaskentaohjelmaan. Tehonjakolaskentaa varten tarvitaan tiedot kaapeleista, muuntajista ja verkkoon kytkettävistä kuormista. Liitteessä 6 on tehonjakolaskenta pumppaamon sähköjakoverkosta.



Kuva 7.3. Pumppaamon sähköjakoverkko.

7.7 Oikosulkuvirtojen laskenta

Pumppaamon sähköjakeluverkolle tehdään oikosulkuvirtalaskennat, jotta tiedetään verkon minimi- ja maksimioikosulkuvirtojen arvot. Verkon minimioikosulkuvirta-arvoja käytetään suojauksien asettelussa ja maksimioikosulkuvirta-arvoja käytetään laitteiden oikosulkuvirtakestoisuuksien määrittämisessä.

Oikosulkuvirtojen laskentaan tarvitaan sähkötekniset tiedot eri verkon komponenteista, kuten muuntajista, kaapeleista ja kiskosilloista. Sähkötekniset tiedot saadaan valmistajien tiedoista. Oikosulkuvirrat lasketaan Thevenin menetelmällä ja laskentaa varten täytyy ensin selvittää komponenttien impedanssit. Liitteen 3 taulukkoon 1 on laskettu kaapeleiden ja kiskosiltojen pituuksien mukaiset resistanssi-, reaktanssi- ja impedanssiarvot. Liitteen 3 taulukossa 2 on muuntajien tekniset tiedot.

Oikosulkuvirtojen laskennassa käytetään IEC 60909 mukaisia jännitekertoimia laskettaessa minimi- ja maksimioikosulkuvirtoja. Oikosulkuvirrat lasketaan kolmi- ja kaksivaiheisen oikosulun vikatapauksissa. Minimioikosulkuvirran laskennassa huomioidaan vikaimpedanssin vaikutus oikosulkuvirtaan luvun 3.2.6 mukaisesti. Moottoreiden vaikutusta ei oteta huomioon oikosulkuvirtoihin. Liitteessä 4 on laskentaesimerkki 1 oikosulkuvirtojen laskennasta, kun oikosulku tapahtuu kojeistossa KJ1 ja pääkeskuksessa PK3. Taulukossa 7.1 pumppaamon oikosulkuvirrat.

Taulukko 7.1. Pumppaamon oikosulkuvirrat.

Kohde	I_{kmax} (kA)		κ	i_p	I_{kmin} (kA)	
	3v	2v			3v	2v
KJ1	4,6 \angle -65,8°	4,0 \angle -65,8	1,3	8,3 \angle -65,8	3,7 \angle -65,5	3,2 \angle -65,8
PK1	11,4 \angle -68,4°	10,0 \angle -68,4°	1,3	21,3 \angle -68,4°	6,2 \angle -68,4°	5,4 \angle -68,4°
PK2	31,3 \angle -77,2°	27,1 \angle -77,2°	1,5	67,2 \angle -77,2°	17,4 \angle -77,4°	15,1 \angle -77,4°
PK3	31,5 \angle -77,4°	27,2 \angle -77,4°	1,5	67,7 \angle -77,4°	17,5 \angle -77,8°	15,1 \angle -77,8°

Verkostolaskentaohjelmalla oikosulkuvirtalaskenta tehdään IEC 60909 -standardin mukaisesti. Maksimioikosulkuvirran laskennassa ohjelma määrittää jännitekertoimen c automaattisesti. Vikaimpedanssi otetaan huomioon minimioikosulkuvirran laskennassa

käyttämällä jännitekertoimenä keskijännitepuolella 0,8 ja pienjännitepuolella 0,7. Taulukossa 7.2 verkostolaskentaohjelmalla lasketut minimi- ja maksimioikosulkuvirrat sekä sysäysoikosulkuvirta.

Taulukko 7.2. Pumppaamon oikosulkuvirrat laskettuna verkostolaskentaohjelmalla.

	I_{kmax} (kA)		I_{kmin} (kA)
Kohde	3v	i_p	2v
KJ1	4,6	8,4	3,1
PK1	11,8	21,9	6,4
PK2	32,9	70,5	18,2
PK3	33,0	71,1	18,3

Vertailtaessa taulukoiden 7.1 ja 7.2 oikosulkuvirtojen arvoja keskenään, nähdään tuloksista, että suurin ero tulosten välillä syntyy pienjännitepuolen minimioikosulkuvirta arvoissa. Eroa tuloksissa on n. 13 % ja ero syntyy laskennassa käytetyn vikaimpedanssin kertoimesta.

7.7.1 Keskusten ja kaapeleiden oikosulkukestoisuudet

Kojeistolle ja pääkeskuksille määritellään oikosulkuvirtakestoisuudet I_{cw} ja I_{pk} . Nämä määrittävät keskuksen termisen ja dynaamisen oikosulkukestoisuuden. Keskuksien oikosulun mitoituskestovirran huippuarvo I_{pk} määritetään taulukon 7.1 keskusten sysäysoikosulkuvirtoja i_p suuremmaksi tai yhtä suureksi.

Suurin sallittu lyhytaikainen oikosulun mitoitusarvo I_{cw} määritetään laskemalla 1 sekunnin ekvivalenttinen termien oikosulkuvirta I_{th} yhtälöllä 3.4. Koska pumppaamon sähköjakeluverkko sijaitsee kaukana generaattorista, käytetään kohdassa 3.1.3 mainittua arvoa $m + n = 1$, jolloin esimerkiksi pääkeskuksen PK3 ekvivalenttinen termien oikosulkuvirta I_{th} on

$$I_{th} = I_{kmax} \sqrt{m+n} = 31,5 \text{ kA} \cdot \sqrt{1} = 31,5 \text{ kA}$$

Keskuksen lyhytaikaisen oikosulun mitoitusarvon I_{cw} valinnassa täytyy seuraavan ehdon toteutua

$$I_{th} \leq I_{cw} \tag{7.1}$$

Taulukkoon 7.3 on määritelty kojeiston pääkeskuksien oikosulkuvirtakestoisuudet I_{cw} ja I_{pk} .

Taulukko 7.3. Keskuksien oikosulkuvirtakestoisuudet.

Kohde	I_{th} (kA)	i_p (kA)	I_{cw} (kA)	I_{pk} (kA)
KJ1	4,6	8,3	4,7	8,5
PK1	11,4	21,3	11,5	21,5
PK2	31,3	67,2	31,5	67,5
PK3	31,5	67,7	31,7	68,0

Keskuksen terminen oikosulkukestoisuus voidaan myös määrittellä riittävällä tarkkuudella taulukon 7.4 mukaisesti, kun tiedetään muuntajan nimellisteho S_n ja muuntajan toisiojännite.

Taulukko 7.4. Terminen oikosulkuvirta eri jännitteellä ja muuntajan teholla. (Muokattu lähteestä: PSK 1801, 2000)

S_n (kVA)	Z_k (%)	I_{cw} (kA)		
		400 V	500 V	690 V
100	3,8	4	3	2
200	4	7	6	4
315	4,5	10	8	6
500	5	14	11	8
800	5,5	21	16	12
1000	5,5	26	20	15
1250	5,5	32	25	19
1600	5,5	41	32	24
2000	6	47	37	27
2500	6	59	46	34
3150	7	63	50	37
4000	7			47

Keskusten dynaaminen oikosulkukestoisuus voidaan määrittää terminen oikosulkuvirran perusteella taulukon 7.5 mukaisesti. Keskuksen ollessa lähellä syöttävää generaattoria voi dynaaminen oikosulkuvirta olla suurempi kuin taulukon 7.5 arvot ja tässä tapauksessa täytyy erikseen varmistaa oikosulkuvirran kestoisuusarvot.

Taulukko 7.5. Dynaamisen oikosulkuvirtakestoisuuden määrittäminen oikosulkuvirran perusteella. (PSK 1801, 2000)

I_{cw} (kA)	$\cos \varphi$	n	I_{pk} (kA)
$I_{cw} \leq 5$	0,7	1,5	$I_{pk} \leq 7,5$
$5 < I_{cw} \leq 10$	0,5	1,7	$8,5 < I_{pk} \leq 17$
$10 < I_{cw} \leq 20$	0,3	2	$20 < I_{pk} \leq 40$
$20 < I_{cw} \leq 50$	0,25	2,1	$42 < I_{pk} \leq 105$
$50 < I_{cw}$	0,2	2,2	$110 < I_{pk}$

Kiskosillan oikosulkukestoisuus

Kiskosillan täytyy olla oikosulkukestoinen muuntajan pienjännitepuolen liitännästä eteenpäin. Kiskosillalle määritellään oikosulkuvirtakestoisuudet I_{cw} ja I_{pk} . Kiskosillan oikosulkukestoisuus määritetään laskemalla oikosulkuvirta muuntajan pienjännitepuolen liitännässä.

Lasketaan oikosulkuvirta muuntajan T3 pienjännitepuolen liitännässä poistamalla kiskosillan impedanssi Z_{ks} kokonaisimpedanssista Z_{max} millä lasketaan pääkeskuksen PK3 maksimioikosulkuvirta laskentaesimerkissä 1. Muuntajan T3 pienjännitepuolen kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.5 ja jännitekertoimena c käytetään 1,05.

$$Z_k = Z_{kmax} + Z_m + Z_{skT3} = (1,3+j3,0) \text{ m}\Omega + (0,8+j9,5) \text{ m}\Omega + (0,02+j0,003) = (2,1+j12,5) \text{ m}\Omega = 12,7 \angle 80,4^\circ \text{ m}\Omega$$

$$I_{kmax}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{pk}} = \frac{1,05 \cdot 690 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 12,7 \angle 80,4^\circ \text{ m}\Omega} = (5,5 - j32,5) \text{ kA} = 33,0 \angle -80,4^\circ \text{ kA}$$

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} on

$$I_{th} = I_{kmax}'' \sqrt{m+n} = 33,0 \text{ kA} \cdot \sqrt{1} = 33,0 \text{ kA}$$

Lasketaan ensin sysäyskerroin κ resistanssin ja reaktanssin suhteesta yhtälöllä 3.3.

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{5,5}{32,5}} = 1,6$$

Muuntajan T3 pienjännitepuolen sysäysoikosulkuvirta i_p lasketaan yhtälöllä 3.2.

$$i_p = \kappa\sqrt{2} I_{kmax} = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 33,0 \text{ kA} = 74,7 \text{ kA}$$

Kiskosillan oikosulkukestoisuudet määritetään niin, että suurin sallittu lyhytaikainen oikosulun mitoitusarvo I_{cw} on 33,5 kA ja mitoituskestovirran huippuarvo I_{pk} on 75,0 kA.

Kaapeleiden oikosulkukestoisuus

Kaapeleiden terminen oikosulkukestoisuus tarkistetaan vertaamalla kaapelivalmistajien ilmoittamia yhden sekunnin suurinta sallittua oikosulkuvirtaa I_{1s} laskettuihin ekvivalenttisiin termisiin oikosulkuvirtoihin I_{th} (taulukko 7.6).

Taulukko 7.6. Kaapeleiden terminen oikosulkukestoisuus ja ekvivalenttiset oikosulkuvirrat.

Kohde	Kaapeli	I_{1s} (kA)	I_{th} (kA)
KJ1			
Syöttö	AHXAMK 3x120+35	11,3	4,8
Lähtö T1	AHXCMK 3x50+16	4,7	4,6
Lähtö T2	AHXCMK 3x50+16	4,7	4,6
Lähtö T3	AHXCMK 3x50+16	4,7	4,6
PK1			
Syöttö	AMCMK 3x(4x185+57)	14	13,0
PK2			
M1	AXCCMK 2x(3x120+41)	11,4	31,2
M2	AXCCMK 3x(3x185+57)	17,5	31,2
M3	AXCCMK 4x(3x240+72)	22,6	31,2
M4	AXCCMK 4x(3x240+72)	22,6	31,2
PK3			
M5	AXCCMK 3x(3x185+57)	17,5	31,5
M6	AXCCMK 4x(3x240+72)	22,6	31,5
M7	AXCCMK 4x(3x240+72)	22,6	31,5

Kaapeleiden terminen oikosulkukestoisuus tulee tarkastaa oikosulkusuojauksien suunnittelussa ja suojausasettelussa. Taulukossa 7.6 esitetyt kaapeleiden termiset oikosulkukestoisuudet voivat olla riittäviä, vaikka eräissä lähdöistä kaapelin terminen oikosulkukestoisuus on pienempi kuin keskuksissa ilmenevät ekvivalenttiset termiset oikosulkuvirrat. Kaapeliin kohdistuvat oikosulkuvirrat voivat olla pienempiä valittujen

oikosulkusuojien oikosulkuvirtaa rajoittavien ominaisuuksien ja suojausien laukaisuaikojen vaikutuksesta.

7.8 Suojasasettelut

Suojasasettelut määritetään pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijalle ja kojeiston KJ1 muuntajalähdön T1 ylivirtareleelle. Suojasasettelujen määrittämisessä pyritään noudattamaan seuraavia periaatteita:

- suojausten välinen toiminta on selektiivistä
- komponenttien kuormitettavuutta ja oikosulkukestoisuutta ei ylitetä
- suojaus toimii mahdollisimman nopeasti
- pääsuojalla vähintään yksi varasuoja (Huotari & Partanen, 1998)

Suojasasettelujen määrittämistä varten lähtötietona on seuraavat tiedot:

- Muuntaja T1 $S_n = 400 \text{ kVA}$, $I_{1n} / I_{2n} = 11,6 / 577 \text{ A}$
- Pääkeskuksen PK1 nimellisvirta $I_n = 630 \text{ A}$
- Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisija on kompaktikatkaisija T5N 630 PR222DS/P, asettelualueet:
 - L $0,4 - 1,0 \cdot I_n$, $t_1 = 3-6-9-18 \text{ s}$
 - S $1,0 - 9,5 \cdot I_n$, $t_2 = 0,05-0,1-0,25-0,5 \text{ s}$
 - I $1,5 - 9,5 \cdot I_n$, $t_3 = \text{pikalaukaisu}$
- Kojeston KJ1 muuntajalähdön T1 ylivirtarele, REF615 asettelualue:
 - $I > 0,05 - 5,00 \cdot I_n$, $t > = 0,04 - 200 \text{ s}$
 - $I >> 0,1 - 40,00 \cdot I_n$, $t >> = 0,04 - 200 \text{ s}$
 - $I >>> 1,00 - 40,00 \cdot I_n$, $t >>> = 0,02 - 200 \text{ s}$
- KJ1 virtamuuntajan muuntosuhde on 50/1 A

Pienjännitepuolen oikosulkuvirratt redusoidaan 20 kV jännitetasolle, jotta niitä voidaan käyttää suojausien asettelussa. Kun virta redusoidaan 20 kV jännitetasolle, otetaan huomioon epäsymmetrisen oikosulkuvirran muuntuminen Dyn-kytketyssä muuntajassa kertomalla pienjännitepuolen virta luvulla $1/\sqrt{3}$. Epäsymmetrisiä oikosulkujavirtoja on 1-vaiheisessa ja kaksivaiheisessa oikosulussa. (Huotari & Partanen, 1998). Taulukossa 7.7 minimi- ja maksimioikosulkuvirratt redusoituna 20 kV jännitetasolle.

Taulukko 7.7. Minimi- ja maksimioikosulkuvirrat.

Kohde	I_{kmax}'' (kA)	I_{kmin}'' (kA)	Redusoitu 20 kV	
			I_{kmax}''	I_{kmin}''
	3v	2v	3v	2v
KJ1	4,6	3,2	4,6 kA	3,2 kA
PK1	11,4	5,4	230 A	62 A
PK2	31,3	15,1	1080 A	300 A
PK3	31,5	15,1	1085 A	301 A

Kojeiston KJ1 muuntajälähdön T1 ylivirtareleen asettelut

Kojeiston KJ1 muuntajälähdön T1 ylivirtareleen tehtävä on suojata muuntajan ensiöpuolta ja toimia pääkeskuksen PK1 varasuojana. Ylivirtarele ei saa havahtua suurimmalla pääkeskuksen PK1 oikosulkuvirralla $I_{kmax}'' = 11,4$ kA joka redusoituna 20 kV jännitetasolle on $I_{kmax}'' = 230$ A. Ylivirtareleen tulee suojata kojeiston KJ1 minimioikosulkuvirralla $I_{kmin}'' = 3,2$ kA. Ylivirtasuojauksen ylemmän portaan virta-asettelussa otetaan huomioon virtamuuntajan muuntosuhde.

$$230 \text{ A} \cdot \frac{1}{50} = 4,6$$

Releiden oikea toiminta varmistetaan, kun asettelut tehdään seuraavien periaatteiden mukaan. Kun releen halutaan lähettävän laukaisukäskyn, asetteluarvo määritetään kertomalla se luvulla 0,8 ja kun releen ei haluta lähettävän laukaisukäskyä käytetään kertoimena lukua 1,2. Näin huomioidaan verkon tilan ja vikavirtojen vaihtelut sekä mittausvirheet. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Ylemmän portaan asetteluarvoksi saadaan

$$I_{>>} = 4,6 \cdot 1,2 \approx 5,5$$

Ylemmän portaan aikahidastuksen asettelussa tarkastetaan muuntajan T1 syöttökaapelin AHXCMK 3x50+16 terminen oikosulkukestoisuus. Kojeiston KJ1 1 sekunnin

ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta $I_{th} = 4,6$ kA. Syöttökaapelin suurin sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta $I_{1s} = 4,7$ kA. Syöttökaapelin oikosulkukestoisuuden mukainen maksimi aikahidastus lasketaan soveltaen yhtälöä

$$I = \frac{I_{1s}}{\sqrt{t}} \Rightarrow t_{\max} = \left(\frac{I_{1s}}{I_{th}}\right)^2 = \left(\frac{4,7}{4,6}\right)^2 = 1,04 \text{ s}$$

Syöttökaapeli on termisesti oikosulkukestoinen aikahidastuksella 0–1,04 s. Valitaan ylemmän portaan aikahidastukseksi $t \gg 0,3$ s.

Ylivirtareleen alemman portaan tulee havahtua muuntajan T1 toisiopuolen vioissa, muuntajan ylikuormitukseen ja toimia pääkeskuksen PK1 varasuojana. Alemmaan portaaseen sallitaan muuntajan ylikuormitus 1,5 kertaisena. Alemman portaan asetteluarvoksi saadaan

$$I > = 11,6 \text{ A} \cdot 1,5 \cdot \frac{1}{50} = 0,34$$

Asetellaan ylivirtareleen alemman portaan toimintakäyrä käänteisaikaiseksi ja valitaan laukaisukäyräksi very inverse ja kertoimeksi $k = 1$.

Ylivirtareleen pikalaukaisupuortaan tulee havahtua kojeiston KJ1 minimoikosulkuvirtaan 3,2 kA. Pikalaukaisupuortaalla suojataan muuntajan ensiöpuolta. Pikalaukaisupuortaan asetteluarvoksi valitaan

$$I \gg \gg = 30$$

Ylivirtareleen suojausasettelut nähtävissä taulukossa 7.8.

Taulukko 7.8. Ylivirtareleen suojausasettelut.

Suojausporras	Asetteluarvo	Virta-asettelu	Laukaisukäyrä/aikahidastus
$I >$	$0,34 \times I_n$	17 A	very inverse $k = 1$
$I \gg$	$5,5 \times I_n$	275 A	$t \gg = 0,3$ s
$I \gg \gg$	$30 \times I_n$	1500 A	$t \gg \gg = 0,05$ s

Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan asettelut

Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan tulee havahtua pienimpään oikosulkuvirtaan $I_{kmin}'' = 5,4$ kA. Hidastetun oikosulkusuojan asetteluarvoksi valitaan

$$S = \frac{5400 A}{630 A} = 8,6 \cdot 0,8 \approx 7$$

ja aikahidastukseksi $t_2 = 0,1$ s.

Ylikuormitussuojauksen asetteluarvon valintaan vaikuttaa pääkeskuksen PK1 syöttökaapeloinnin sallittu kuormitettavuus 612 A. Ylikuormitussuojauksen asetteluarvoksi valitaan

$$L = \frac{612 A}{630 A} = 0,97 \Rightarrow 0,96$$

ja aikahidastukseksi $t_1 = 3$ s. Pääkatkaisijan oikosulun pikalaukaisua I ei oteta käyttöön. Taulukossa 7.9 pääkatkaisijan suojausasettelut.

Taulukko 7.9. Pääkatkaisijan suojausasettelut.

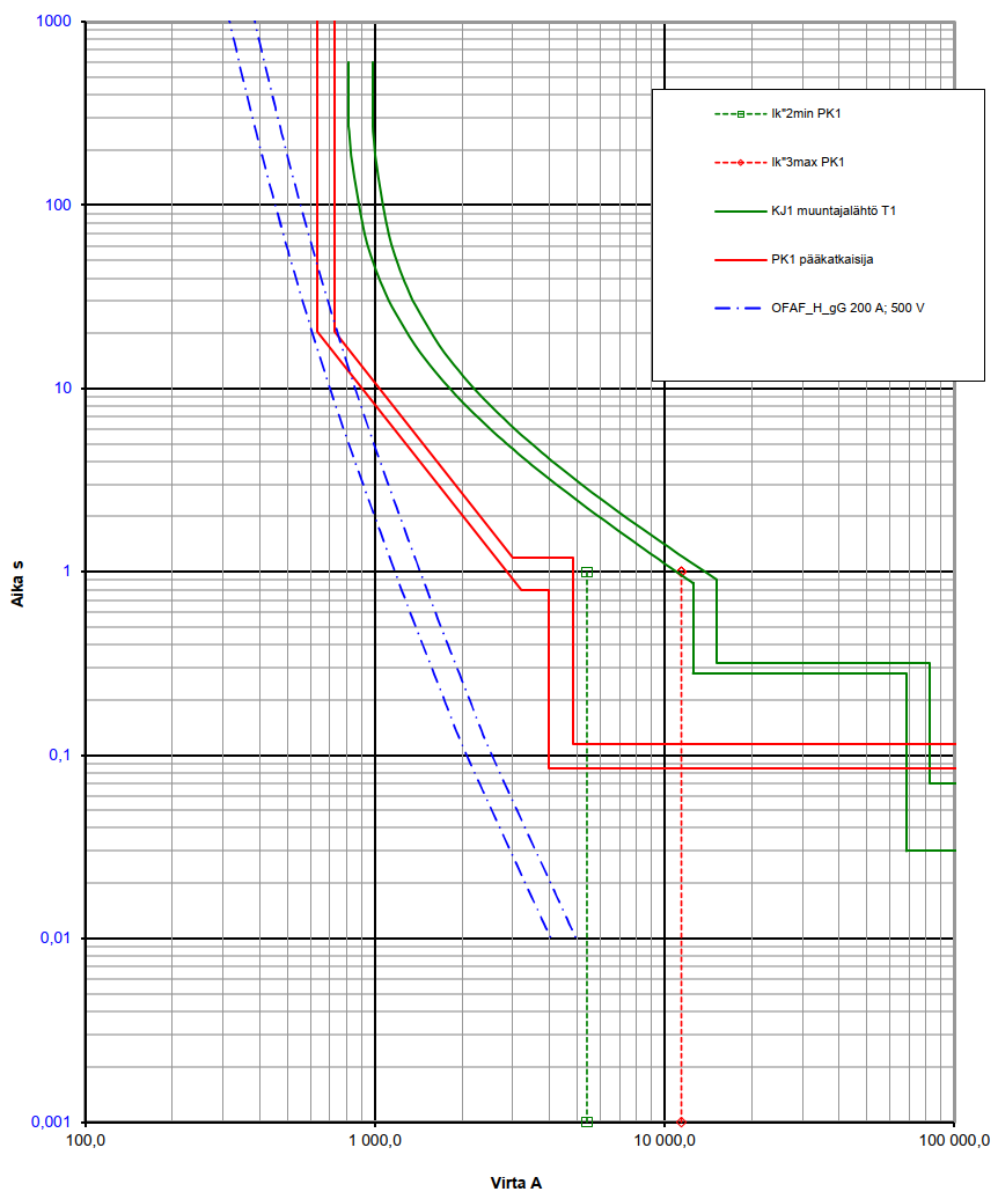
Suojaus	Asetteluarvo	Virta-asettelu	Aikahidastus
L I>	0,96 x I_n	604 A	$t_1 = 3$ s
S I>>	7 x I_n	4410 A	$t_2 = 0,1$ s
I I>>>	OFF	OFF	OFF

7.9 Selektiivisyystarkastelu

Sähkönjakeluverkon suojausten välinen selektiivisyys saadaan selvitettyä selektiivisyystarkastelulla. Selektiivisyystarkastelulla saadaan havainnollistettua suojausten toimintakäyrät samaan koordinaatistoon. Tunnetuimmilla suojalaitevalmistajilla on omat ohjelmat selektiivisyystarkastelua varten sekä verkostolaskentaohjelmat voivat myös sisältää ominaisuuden selektiivisyystarkasteluun. (ST 53.13)

Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan ja kojeiston KJ1 muuntajalähdön T1 ylivirtareleen välinen selektiivisyystarkastelu on kuvassa 7.4. Suojausten toimintakäyrät on piirretty

taulukoissa 7.8 ja 7.9 määriteltyjen suojausasettelujen mukaisesti sekä lisätty tarkasteluun suurin pääkeskuksessa PK1 käytettävän sulakkeen toimintakäyrä.

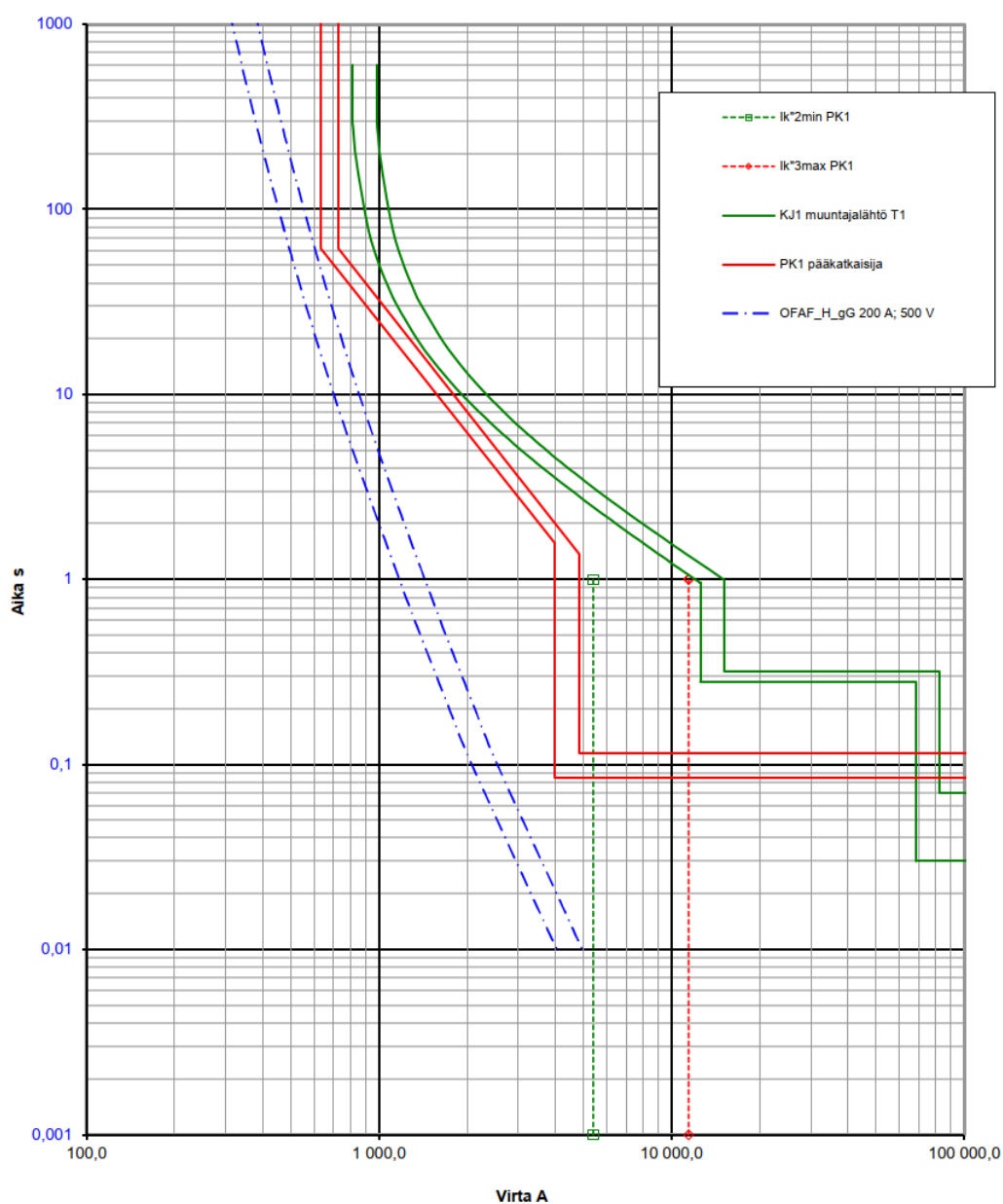


Kuva 7.4. Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan ja kojeiston KJ1 muuntajalähdön T1 ylivirtareleen välinen selektiivisyystarkastelu.

Kuvasta 7.4 voidaan todeta, että pääkatkaisijan (punainen viiva) ja ylivirtareleen (vihreä viiva) välinen toiminta on selektiivistä oikosulku- ja ylikuormitussuojauksen osalta, koska selektiivisyyskäyrissä ei ole havaittavissa päällekkäisyyksiä. Pääkatkaisijan hidastettu oikosulkusuojaus havahtuu alle pääkeskuksen PK1 minimoikosulkuvirralla (vihreä

katkoviiva). Muuntajalähdön T1 ylivirtareleen hetkellislaukaisu ei havahdu pääkeskuksen PK1 maksimioikosulkuvirralla (punainen katkoviiva).

Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan ylikuormitussuojaus ei toimi selektiivisesti 200 A gG sulakkeen (sininen katkoviiva) kanssa. Pääkatkaisijan ylikuormitussuojauksen asetteluarvoja on muutettava, jotta saavutetaan selektiivisyys sulakkeen kanssa. Kuvassa 7.5 suojauksien välinen selektiivisyystarkastelu muutetuilla asetteluarvoilla.



Kuva 7.5. Pääkeskuksen PK1 pääkatkaisijan ja kojeiston KJ1 muuntajalähdön T1 ylivirtareleen välinen selektiivisyystarkastelu muutetuilla asetteluarvoilla.

Pääkatkaisijan ja sulakkeen välinen selektiivisyys saavutetaan asettelemalla pääkatkaisijan ylikuormitussuojauksen aikahidastus $t_1 = 9$ s. Aikahidastusta muuttamalla pääkatkaisijan ja ylivirtareleen välinen selektiivisyys ei toteudu ylikuormitussuojauksen osalta.

Selektiivisyys saavutetaan muuttamalla ylivirtareleen alemman portaan laukaisukäyrän kertoimeksi 1,1.

7.10 Elinkaarikustannukset

Sähkönjakeluverkon suunnitteluratkaisut vaikuttavat kokonaiskustannusten muodostumiseen jakelujärjestelmän elinkaaren ajalla. Kokonaiskustannuksiltaan edullisin ratkaisu saadaan määritettyä, kun suunnittelun aikana lasketaan eri kustannuslajien vaikutus kokonaiskustannuksiin.

Muuntajan elinkaarikustannukset muodostuvat hankinta- huolto- ja häviökustannuksista. Muuntajan häviökustannusten osuus elinkaaren kokonaiskustannuksesta voi olla merkittävä. Verrataan kahden eri tehoisen muuntajan häviökustannusten vaikutusta kokonaiskustannukseen. Valitaan vertailuun muuntajat nimellistehoiltaan 3150 kVA ja 4000 kVA. Taulukossa 7.10 on muuntajien ilmoitetut tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt nimellisteholla. Liitteessä 8 on laskentaesimerkki 3 häviökustannusten laskennasta.

Taulukko 7.10. Muuntajien tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt nimellisteholla.

Muuntajan nimellisteho	3150 kVA	4000 kVA
Tyhjäkäyntihäviöt (kW)	3,8	4,95
Kuormitushäviöt (kW)	22	26,2
Kokonaishäviöt (kW)	25,8	31,15

Yhden vuoden aikana syntyvät häviökustannukset lasketaan kertomalla häviöt huipunkäyttöajoilla. Tyhjäkäyntihäviöiden huipunkäyttöaikana käytetään 8760 h/a ja kuormitushäviöiden huipunkäyttöaikana 7000 h/a. Kuormitushäviöiden laskennassa otetaan huomioon muuntajan kuormitus ja laskennassa käytetään 3150 kVA:n muuntajalla kuormitusta 100 % ja 4000 kVA:n 89,5 %. Häviökustannusten laskennassa käytetään vuoden 2024 sähkön keskihintaa 45,6 €/MWh. Taulukossa 7.11 on muuntajien häviökustannukset vuoden ajalta.

Taulukko 7.11. Muuntajien häviökustannukset.

Muuntajan nimellisteho	3150 kVA	4000 kVA
Tyhjäkäyntihäviökustannus (€/a)	1518	1979
Kuormitushäviökustannus (€/a)	7022	6690
Kokonaishäviökustannus (€/a)	8540	8669

Taulukon 7.11 tuloksista voidaan todeta, että 3150 kVA muuntajan kokonaishäviökustannus vuoden ajalta on pienempi kuin 4000 kVA muuntajan. Ratkaiseva ero muuntajien välisessä kokonaishäviökustannuksessa tulee pienemmän muuntajan tyhjäkäyntihäviökustannuksista. Kokonaishäviökustannusten eroa pienentää suuremman muuntajan kuormituksen vaikutus kuormitushäviöön.

Muuntajien elinkaaren häviökustannusten nykyarvon laskentaan käytetään kapitalisointikerrointa, millä vuotuiset häviökustannukset diskontataan. Kapitalisointikertoimen laskentaan käytetään pitoaikana 20 vuotta, korkoprosenttina 6 % ja kuormitus ei kasva muuntajan pitoaikana. Taulukossa 7.12 on muuntajien häviökustannusten nykyarvot.

Taulukko 7.12. Muuntajien häviökustannusten nykyarvot.

Muuntajan nimellisteho	3150 kVA	4000 kVA
Häviökustannuksen nykyarvo (€)	94969	96399

Muuntajien häviökustannusten nykyarvojen ero on 1430 € eli noin 1,5 %. Muuntajien välillä ei häviökustannusten osalta ole suurta eroa.

Suurvirtakaapeloinnin ja kiskosillan kustannusten nykyarvo

Muuntajan toisiopuolen liitäntä pääkeskukseen voidaan tehdä suurvirtakaapeloinnilla tai kiskosillalla. Verrataan suurvirtakaapeloinnin ja kiskosillan kustannusten muodostumista, kun laskennassa otetaan huomioon kuormitushäviökustannukset ja materiaalikustannukset. Liitteessä 8 on laskentaesimerkki 3 missä esitetty on suurvirtakaapeloinnin ja kiskoillan häviökustannusten laskenta. Häviökustannusten nykyarvon laskentaan käytetään samaa kapitalisointikerrointa kuin muuntajilla. Kiskosillan hinta on 1417 €/m. Kiskosilta on 60 metriä pitkä, jolloin koko kiskosillan materiaalikustannus on 85020 €. Suurvirtakaapelin AXMK 1x800 hinta on 55 €/m ja suurvirtakaapelia tarvitaan 540 m. Suurvirtakaapeloinnin

materiaalikustannus on 29700 €. Taulukossa 7.13 on suurvirtakaapeloinnin ja kiskosillan kustannusten nykyarvo.

Taulukko 7.13. Suurvirtakaapeloinnin ja kiskosillan kustannusten nykyarvo.

	Suurvirtakaapeli AXMK	Kiskosilta 4000 A
Kuormitushäviökustannuksen nykyarvo (€)	69923	72769
Materiaalikustannus (€)	27900	85020
Kustannusten nykyarvo (€)	97823	157789

Suurvirtakaapeloinnin ja kiskosillan kuormitushäviökustannusten nykyarvojen ero on 2846 €, eli noin 3,9 %. Suurin ero kustannuksissa syntyy materiaalikustannuksesta, missä suurvirtakaapelointi on 57120 € edullisempi kuin kiskosilta. Vertailun perusteella ei voida vielä todeta, kumpi vaihtoehdoista on kokonaiskustannukseltaan edullisin, vaan laskennassa pitäisi vielä ottaa huomioon muun muassa asennuskustannukset ja kaapelitiejärjestelmänkustannukset.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOKSET

Tässä diplomityössä käytiin läpi teollisuuden sähköjakeluverkon suunnittelun eri vaiheita. Kirjallisuusselvitykseen pohjautuen tapaustutkimuksessa suunniteltiin pumppaamon sähköjakeluverkko lähtötietojen perusteella. Tapaustutkimuksen kohteen suunnittelu tehtiin suunnitteluvaiheiden mukaisesti ja eri suunnitteluvaiheiden merkitys ja laskennat käytiin läpi tapaustutkimuksessa. Sähköjakeluverkossa syntyvien häviökustannusten muodostumista käytiin läpi vertailemalla, mikä vaikutus eri komponentti valinnoilla on kustannuksiin.

Tapaustutkimuksen lähtötietojen avulla saatiin selville suunniteltavan pumppaamon pumppausprosessin toiminta, ajotapa sekä laitteiden tehotiedot, joiden pohjalta sähköjakeluverkon rakennetta ja mitoituksia tehtiin. Laitteiden tehontarpeiden arvioinnissa määriteltiin laitekohtaiset käyttö- ja kuormituskertoimet. Kertoimien määrittelyllä voidaan vaikuttaa pienentävästi huipputehoon millä on vaikutusta sähköjakeluverkon mitoituksiin. Pumppaamon prosessilaitteiden lähtötiedoista ei tarkalleen selvinnyt mikä laitteiden ajotapa on, joten prosessilaitteiden tehontarpeiden kohdalla mitoitukset tehtiin niin, että ne ovat käytössä samanaikaisesti täydellä teholla. Lähtötiedot vaihtelevat suunniteltavan kohteen mukaisesti, missä prosessin toiminta, laitteiden tehot ja muut vaatimukset vaihtelevat. Lähtötietojen perusteella voidaan tehdä suunniteltavan kohteen mukaiset määrittelyt tehontarpeiden arviointiin ja sähköjakeluverkon rakenteen sekä mitoituksien suunnitteluun.

Pumppaamon sähköjakeluverkon rakenteeksi valittiin säteittäinen verkonrakenne. Säteittäistä verkon rakennetta käytetään yleisesti teollisuudessa sen yksinkertaisuuden vuoksi. Säteittäisen verkon suunnittelu on yksinkertaisempaa mitoituksien ja suojausien määrittelyjen osalta. Pumppaamon sähköjakeluverkon rakenteen suunnittelua ohjasivat pumppausprosessin vaatimukset sekä rakennusten sijoittelu. Pumppausprosessi oli suunniteltu selkeästi kahden eri kiviaineskasan kasteluun ja prosessilaitteet jaoteltu sen mukaisesti. Prosessilaitteet oli suunniteltu sijoitettavan pumppaamorakennukseen, kuten myös tarvittavat keskukset. Erilliseen muuntamorakennukseen sijoitetaan keskijännitekojeisto ja tarvittavat muuntajat. Lähtötietojen perusteella rakennusten etäisyys toisistaan oli noin 60 m. Edellä mainitut asiat otettiin huomioon ja suunnittelun tässä vaiheessa ei ollut enää mahdollista vaikuttaa sähköjakeluverkon laitteiston sijoitteluun. Sijoittamalla muuntamorakennuksen laitteisto pumppaamorakennuksen yhteyteen, olisi

pienjänniteverkon jakeluyhteys lyhentynyt muuntajilta keskuksille. Tällä sijoittelulla olisi saavutettu kustannussäästöjä materiaali- ja häviökustannuksissa. Sähkönjakeluverkon laitteistojen sijoittelu tehdään usein jo esisuunnitteluvaiheessa. Esisuunnitteluvaiheessa olisi mahdollista vaikuttaa sijoitteluun ja olisi perusteltavissa miksi siirtoyhteydet pidettäisiin mahdollisimman lyhyinä.

Tapaustutkimuksen sähkönjakeluverkon suunnittelussa mitoitettiin ensin muuntajien nimellistehot. Mitoitukset tehtiin valitsemalla tehontarpeita suuremmat muuntajat standardimitoituksien mukaisesti. Tästä johtuen muuntajat ovat hieman ylimitoitettu, vaikka siihen ei tarkoituksen mukaisesti pyritty. Koska muuntajat ovat ylimitoitettuja tehontarpeeseen nähden, muuntajien lämpötilat voivat pysyä alhaisempina, eikä lämpeneminen aiheuta vanhenemista muuntajan eristysrakenteisiin. Muuntajien näennäistehoa käyttäen määritettiin muuntajien ensiö- ja toisiokäämityksen nimellisvirrat, joiden mukaisesti mitoitettiin keskuksset ja kaapelit. Keskusten nimellisvirrat valittiin suuremmiksi kuin muuntajien toisiokäämityksen nimellisvirta. Kaapeleiden mitoituksissa huomioitiin vaadittu kuormitettavuus ja asennustavan mukaiset korjauskertoimet.

Työssä käytettiin verkostolaskentaohjelmistoa tehojako- ja oikosulkuvirtojen laskentaan. Mitoitettu pumppaamon sähkönjakeluverkko mallinnettiin verkostolaskentaohjelmistoon. Mallinnettua sähkönjakeluverkkoa voidaan tarkastella eri kytkentätilanteissa ja testata muutoksien vaikutuksia verkon toimintaan. Tehonjakolaskennalla tarkasteltiin sähkönjakeluverkon toimivuutta, kun pumppaamoon kaikki suunniteltu kuormitus on käytössä. Tehonjakolaskennalla voidaan todeta pumppaamon mitoitusten olevan oikeanlaiset.

Oikosulkuvirtalaskennoilla selvitettiin sähkönjakeluverkon minimi- ja maksimioikosulkuvirtojen arvot. Oikosulkuvirta-arvoja tarvittiin oikosulkukestoisuuksien ja suojausasettelujen määrittämiseen. Oikosulkuvirrat laskettiin ensin yhtälöillä Thevenin menetelmää käyttäen. Laskennat suoritettiin myös verkostolaskentaohjelmistolla, jolloin saatuja tuloksia voitiin vertailla keskenään ja todeta niiden oikeellisuus. Saadut tulokset olivat lähellä toisiaan maksimioikosulkuvirta-arvoiltaan, mutta minimioikosulkuvirta-arvot poikkesivat toisistaan laskennassa käytetyn vikaimpedanssin kertoimen takia.

Kojeistoille ja pääkeskuksille määriteltiin terminen ja dynaaminen oikosulkukestoisuus käyttäen aikaisemmin laskettuja maksimioikosulkuvirtoja. Pumppaamon kojeiston ja pääkeskusten terminen ja dynaaminen oikosulkukestoisuus määriteltiin suuremmaksi kuin laskettu ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta ja sysäyoikosulkuvirta. Keskuksen terminen oikosulkukestoisuus voidaan määritellä riittävällä tarkkuudella myös muuntajan nimellistehon ja toisiojännitteen perusteella. Termistä oikosulkuvirtaa vastaavaa kerrointa käyttäen voidaan määritellä myös dynaaminen oikosulkuvirta. Joissakin tapauksissa on tarpeen varmistaa, että keskuksen oikosulkukestoisuudet ovat varmasti riittävät, esimerkiksi jos samassa sähkönjakeluverkossa keskuksen lähellä on generaattori.

Työssä käytiin läpi suojausasettelujen määrittely tietylle osalle pumppaamon sähkönjakeluverkkoa. Suojausasettelujen määrittelyssä käytettiin oikosulkuvirtalaskennoista saatuja minimi- ja maksimioikosulkuvirta-arvoja, sekä otettiin huomioon selektiivisyys, kuormitettavuus, oikosulkukestoisuus, nopeus ja varasuojaus. Suojauksien välinen selektiivisyys varmistettiin selektiivisyystarkastelulla. Tarkastelu osoittikin, että ylikuormitussuojaus ei toimi selektiivisesti sulakkeen kanssa, jonka takia suojausasetteluja jouduttiin muuttamaan.

Osana pumppaamon sähkönjakeluverkon suunnittelua laskettiin kahden eri kokoisen muuntajan elinkaaren häviökustannusten nykyarvo. Näin saadaan vertailtua häviökustannusten osalta kumpi muuntajista olisi edullisempi pitoaikana. Laskennoista pystytään havainnoimaan, kuinka muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt vaikuttavat kustannusten muodostumiseen. Muuntajan tyhjäkäyntihäviö pysyy vakiona koko pitoajan, mutta kuormitushäviö muuttuu muuntajan kuormituksen mukaisesti. Toisena vertailun kohteena on kuormitushäviökustannusten muodostuminen ja materiaalikustannukset, kun muuntajan toisiopuolen liitännä pääkeskukseen tehtäisiin käyttäen kiskosiltaa tai suurivirtakaapelointia. Kustannus laskennoilla voidaan hyvin havainnollistaa, kuinka sähkönjakeluverkon eri komponenttien kustannukset syntyvät koko pitoajalta ja kustannuslaskennat kannattaa sisällyttää osaksi suunnittelukokonaisuutta.

Tämän diplomityön tapaustutkimuksen suunnitteluvaiheet ovat sovellettavissa muihinkin suunnittelukohteisiin, kun otetaan huomioon erilaiset muuttujat suunniteltavan kohteen mukaisesti. Suunniteltavat kohteet poikkeavat useasti toisistaan, joissa lähtötiedot ja

tulevaisuuden vaatimukset sähköjakoverkkoa kohtaan vaikuttavat suunnittelun lopputulokseen.

9 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä perehdyttiin teollisuuden sähköjakeluverkon suunnitteluun ja tutkittiin teollisuuden sähköjakeluverkon rakennetta ja ominaisuuksia. Työn kirjallisuusselvityksessä käytiin läpi suunnitteluun liittyvää teoriaa teollisuuden sähköjakeluverkon rakenteista ja jakelutyypeistä, oikosulkuvirtojen laskennasta, suojausjärjestelmien toteutuksesta, komponenttien mitoituksista sekä elinkaarikustannuslaskennasta. Kirjallisuusselvitykseen pohjautuen tapaustutkimuksessa suunniteltiin pumppaamon sähköjakeluverkko. Tapaustutkimuksessa käytiin läpi sähköjakeluverkon suunnittelua vaiheittain. Lähtötietoihin perustuen määritettiin sähköjakeluverkon rakenne ja suoritettiin mitoitus komponenteille. Laskettujen oikosulkuvirta-arvojen perusteella määritettiin oikosulkukestoisuudet ja suojausasettelut. Selektiivisyystarkastelulla selvitettiin suojausjärjestelmien välinen toiminta. Sähköjakeluverkon komponenttien häviökustannukset laskemalla, saatiin käsitys niiden muodostumisesta ja vaikutuksesta elinkaarikustannuksiin.

Tapaustutkimuksessa suunniteltu pumppaamon sähköjakeluverkko havainnollistaa niitä ominaisuuksia, joita teollisuuden sähköjakeluverkoissa on, eli siirrettävät tehot ja oikosulkuvirrat ovat suuria. Pumppaamon tehontarve on prosessilaitteiden osalta suuri, ja sen takia myös muuntajat ovat nimellistehoiltaan isoja. Siirrettävät tehot vaativat isoja poikkipinta-aloja kaapeleilta ja kiskostoilta. Pumppaamon sähköjakeluverkossa etäisyydet ovat lyhyitä ja mitoitettujen muuntajien nimellistehoiltaan isoja, jolloin myös oikosulkuvirrat kasvavat suuriksi. Suurten oikosulkuvirtojen takia komponenttien oikosulkukestoisuudet on määritettävä riittäviksi.

Kirjallisuusselvityksen ja tapaustutkimuksessa tehdyn pumppaamon sähköjakeluverkon suunnittelun myötä saatiin vastattua tämän työn tutkimuskysymyksiin. Yhteenvetona voidaan todeta, että teollisuuden sähköjakeluverkkoa suunniteltaessa, sillä on merkitystä minkälaisia sähköteknisiä ratkaisuja ja taloudellisuuslaskelmia suunnitteluvaiheessa tehdään. Diplomityö tarjoaa tietoa teollisuuden sähköjakeluverkon suunnittelusta muille suunnittelijoille.

LÄHDELUETTELO

- (ABB, 2000) TTT, Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja, Vaasa, 2000
- (ABB, 2008) Technical Application Papers, Low voltage selectivity with ABB circuit-brakers. 2008. PDF. Saatavilla: <https://library.e.abb.com/public/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/1SDC007100G0204.pdf>
- (ABB, 2010) Electrical installation handbook. Protection, control and electrical devices. 2010. PDF. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC010002D0206&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- (ABB, 2024) REJ601, REF601, REM601 Application Manual. 2024. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MDU07230-YN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- (ABB, 2025a) ACS880-07 drives, Hardware manual. 2025. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000143261&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- (ABB, 2025b) ACS880-37 drives, Hardware manual. 2025. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AXD50000020437&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- (ABB, 2025c) Kahvasulakkeet 2...1250 A, gG ja aM -tyypit. 2025. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SCC317002C1801&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>

- (Elovaara & Haarla, 2011a) Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot. I, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 2. painos. Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.
- (Elovaara & Haarla, 2011b) Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot. II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.
- (Etto, 1998) Prosessisähköistyksen kunnossapito, osa 2. Kunnossapito-lehden Erikoisliite 7(48)
- (Haverila et al., 2009) Haverila, M. 2009. Teollisuustalous. 6. painos. Tampere: Hämeen Kirjapaino.
- (Hietalahti, 2012) Hietalahti, L. 2012. Säädetty sähkömoottorikäyttö. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- (Hietalahti, 2013a) Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- (Hietalahti, 2013b) Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäyttö. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- (Huotari & Partanen, 1998) Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- (IEC 60909-0, 2016) International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 0: Calculation of Currents, IEC, 2016.
- (Korpinen, 1998) Korpinen, L. 1998. Sähkön siirto- ja jakeluverkot. Saatavilla: http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- (Lakervi & Partanen, 2008) Lakervi, E & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto Oy.

- (Mäkinen, 2009) Mäkinen, M.J.J. Kallio, R. Tantarimäki, R. 2009. Prosessiteollisuuden sähkö- ja automaatioasennukset. 1. painos. Helsinki. Otava.
- (PSK 1801, 2000) PSK 1801 Prosessiteollisuuden jakokeskus standardi. 2000. 3.painos
- (SFS 6000-5-52, 2022) Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS 6000-5-52. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät.
- (SFS 5636, 2024) Suomen Standardisoimisliitto SFS, SFS 5636. 2022. PEX-eristeiset 10, 20 ja 30 kV Al- ja Cu-voimakaapelit. Rakenne ja testaus.
- (ST 53.13, 2017) ST 53.13. Kiinteistön sähköverkon suojauksen selektiivisyys. ST-kortisto. 2017. Sähkötieto ry, Espoo.
- (Tiainen, 2020) Tiainen, E. 2020. Pienjännitesähkölaitteiston mitoitus. Espoo: Sähköinfo Oy.

Liite 3. Taulukko 1. Kaapeleiden ja kiskosiltojen tekniset tiedot

Kohde	Kaapeli	l (m)	R (mΩ)	X (mΩ)	Z (mΩ)
KJ1					
Syöttö	AHXAMK 3x120+35	490	124,0	60,0	138,0∠25,9°
Lähtö T1	AHXCMK 3x50+16	10	6,41	1,16	6,51∠10,3°
Lähtö T2	AHXCMK 3x50+16	15	9,62	1,74	9,78∠10,3°
Lähtö T3	AHXCMK 3x50+16	20	12,82	2,32	13,03∠10,3°
PK1					
Syöttö	AMCMK 3x(4x185+57)	60	3,247	1,62	3,63∠26,5°
PK2					
Syöttö	Kiskosilta Al 4000 A	65	0,826	0,546	0,990∠33,5°
M1	AXCCMK 2x(3x120+41)	40	5,06	1,508	5,279∠16,6°
M2	AXCCMK 3x(3x185+57)	30	1,624	0,746	1,787∠24,6°
M3	AXCCMK 4x(3x240+72)	30	0,94	0,546	1,087∠30,2°
M4	AXCCMK 4x(3x240+72)	35	1,094	0,632	1,263∠30,0°
PK3					
Syöttö	Kiskosilta Al 4000 A	60	0,762	0,504	0,914∠33,5°
M5	AXCCMK 3x(3x185+57)	35	1,894	0,871	2,085∠24,7°
M6	AXCCMK 4x(3x240+72)	35	1,094	0,632	1,263∠30,0°
M7	AXCCMK 4x(3x240+72)	40	1,25	0,723	1,444∠30,0°

Taulukko 2. Muuntajien tekniset tiedot.

Muuntaja	S_n (kVA)	U_{n1} (kV)	U_{n2} (kV)	z_k (%)	P_{kn} (kW)
T1	400	20	0,4	4,4	4,1
T2 ja T3	4000	20	0,69	8	26,2

Liite 4. Laskentaesimerkki 1: Oikosulkuvirtojen laskenta

Laskentaesimerkissä lasketaan pumppaamon sähköjakeluverkon minimi- ja maksimioikosulkuvirta sekä sysäysoikosulkuvirta, kun oikosulku tapahtuu kojeistossa KJ1 ja pääkeskuksen PK3 kiskostossa.

Syöttävä verkko

Syöttävän 20 kV kojeiston kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{kv} on $4,817\angle-67,6^\circ$ kA. Syöttävän kojeiston impedanssi lasketaan yhtälöllä 3.5. Maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään jännitekertoimelle c_{max} arvoa 1,1.

$$Z_{svmax} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}} = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 4,817\angle-67,6^\circ \text{ kA}} = (1,005 + j2,448) \Omega = 2,637\angle 67,6^\circ \Omega$$

Minimioikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään jännitekertoimelle c_{min} arvoa 1,0.

$$Z_{svmin} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}} = \frac{1,0 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 4,817\angle-67,6^\circ \text{ kA}} = (0,913 + j2,216) \Omega = 2,397\angle 67,6^\circ \Omega$$

Syöttävän 20 kV kojeiston näennäisalkuoikosulkuteho S_{kv} .

$$S_{kv} = \sqrt{3}U_n \cdot I_{kv} = \sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV} \cdot 4,817 \text{ kA} = 166,9 \text{ MVA}$$

Kojeisto KJ1

Lasketaan kojeiston KJ1 syöttökaapelin impedanssi. Kaapelin AHXAMK 3x120+35 valmistajan ilmoittamat tekniset arvot ovat:

$$R = 0,253 \Omega/\text{km}$$

$$L = 0,39 \text{ mH}/\text{km}$$

Kaapelin induktanssi L muutetaan reaktanssiksi X yhtälöllä

$$X = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,00039 \text{ H}/\text{km} = 0,123 \Omega/\text{km}$$

Syöttökaapelin pituus on 490 m ja kaapelin impedanssiksi saadaan käyttäen yhtälöä 3.12

$$Z_{sk} = (R + jX)l = (0,253+j0,123)\Omega/\text{km} \cdot 0,49 \text{ km} = (0,124+j0,060) \Omega = 0,138\angle 25,9^\circ \Omega$$

KJ1 maksimioikosulkuvirta

Kojeiston KJ1 kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta I_{k3} lasketaan lisäämällä ensin syöttävän kojeiston impedanssiin Z_{svmax} syöttökaapelin impedanssi Z_{sk} .

$$Z_{kmax} = Z_{sk} + Z_{svmax} = (0,124+j0,060) \Omega + (1,005+j2,448) \Omega = (1,129+j2,508) \Omega = 2,750\angle 65,8^\circ \Omega$$

Lasketaan kojeiston KJ1 kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta yhtälöllä 3.5.

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 2,750\angle 65,8^\circ \Omega} = 4,618\angle -65,8^\circ \text{ kA}$$

Kojeiston KJ1 kaksivaiheinen maksimioikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4,618 \text{ kA} = 3,999 \text{ kA}$$

Kojeiston KJ1 sysäysoikosulkuvirta i_p lasketaan yhtälöllä 3.2. Lasketaan ensin sysäyskerroin κ resistanssin ja reaktanssin suhteesta yhtälöllä 3.3.

$$\kappa = 1,02+0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} = 1,02+0,98 \cdot e^{-3\frac{1,129}{2,508}} = 1,274$$

$$i_p = \kappa\sqrt{2} I_{k3}'' = 1,274 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,618 \text{ kA} = 8,320 \text{ kA}$$

KJ1 minimoikosulkuvirta

Kojeiston minioikosulkuvirta lasketaan käyttäen syöttävän kojeiston impedanssia Z_{svmin} .

$$Z_{kmin} = Z_{sk} + Z_{svmin} = (0,124+j0,060) \Omega + (0,913+j2,216) \Omega = (1,037+j2,276) \Omega = 2,501\angle 65,5^\circ \Omega$$

Kojeiston KJ1 kolmivaiheinen minimoikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.5. Jännitekertoimena c_{\min} käytetään 1. Minimoikosulkuvirran määrittämiseen käytetään kerrointa 0,8 luvun 3.2.6 mukaisesti.

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 2,501 \angle 65,5^\circ \Omega} \cdot 0,8 = (1,531 - j3,361) \text{ kA} = 3,694 \angle -65,5^\circ \text{ kA}$$

Kojeiston KJ1 kaksivaiheinen minimoikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3,694 \text{ kA} = 3,199 \text{ kA}$$

Muuntaja T3

Muuntajan T3 oikosulkusuureet lasketaan yhtälöillä 3.7, 3.8 ja 3.9. Muuntajan tekniset tiedot saadaan muuntajan valmistajan tiedoista.

Muuntaja T3: $S_n = 4000 \text{ kVA}$, $U_{1n}/U_{2n} = 20/0,69 \text{ kV}$, Dyn11, $z_k = 8\%$ ($=u_k$), $P_{kn} = 26,2 \text{ kW}$

$$u_r = 100 \cdot P_{kn} / S_n = 100 \cdot 26,2 \text{ kW} / 4000 \text{ kVA} = 0,65 \%$$

$$R_m = \frac{u_r}{100} \frac{U_{2n}^2}{S_n} = \frac{0,65}{100} \cdot \frac{690 \text{ V}^2}{4000 \text{ kVA}} = 0,774 \text{ m}\Omega$$

$$Z_m = \frac{u_k}{100} \frac{U_{2n}^2}{S_n} = \frac{8,0}{100} \frac{690 \text{ V}^2}{4000 \text{ kVA}} = 9,522 \text{ m}\Omega$$

$$X_m = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{9,522^2 - 0,774^2} = 9,491 \text{ m}\Omega$$

PK3 maksimioikosulkuvirta

Pääkeskuksen PK3 oikosulkuvirtoja laskettaessa otetaan huomioon syöttävän verkon ja muuntajan impedanssi. Pääkeskuksesta syötettyjä taajuusmuuttajakäyttöjä ei huomioida laskettaessa oikosulkuvirtoja IEC 60909 standardin mukaisesti. Muuntajan pienjännitepuolen liitäntä pääkeskukseen on toteutettu kiskosillalla. Yleensä kiskosillan

impedanssit oletetaan hyvin pieneksi eikä niitä oteta laskennassa huomioon, mutta tässä tapauksessa kiskoston pituus on 60 m ja se otetaan huomioon laskennassa.

Kojeiston KJ1 impedanssi Z_{kmax} redusoidaan pienjännitepuolelle muuntajan muuntosuhteella

$$Z_{kmax} \cdot \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}}\right)^2 = (1,129+j2,508) \Omega \cdot \left(\frac{0,69 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 = (1,344+j2,985) \text{ m}\Omega = 3,274 \angle 65,8^\circ \text{ m}\Omega$$

Muuntajan T3 syöttökaapelin impedanssi saadaan liitteen 3 taulukosta 1 ja se redusoidaan pienjännitepuolelle.

$$Z_{skT3} = (12,82+j2,32) \text{ m}\Omega = 13,03 \angle 10,3^\circ \text{ m}\Omega \cdot \left(\frac{0,69 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 = (0,0153+j0,0028) \text{ m}\Omega = 0,016 \angle 10,3^\circ \text{ m}\Omega.$$

Kiskosillan impedanssi lasketaan valmistajan ilmoittamista arvoista. Kiskosillan nimellisvirta on 4000A ja valmistajan ilmoittamat arvot ovat resistanssille 0,0127 mΩ/m, reaktanssille 0,0084 mΩ/m.

$$Z_{ks} = (0,0127+j0,0084) \text{ m}\Omega/\text{m} \cdot 60 \text{ m} = (0,762+j0,504) \text{ m}\Omega = 0,914 \angle 33,5^\circ \text{ m}\Omega$$

Kiskosillan kanssa kokonaisimpedanssi

$$Z_{max} = Z_{kmax} + Z_m + Z_{skT3} + Z_{ks} = (1,344+j2,985) \text{ m}\Omega + (0,774+j9,491) \text{ m}\Omega + (0,0153+j0,002761) + (0,762+j0,504) = (2,895+j12,983) \text{ m}\Omega = 13,3 \angle 77,4^\circ \text{ m}\Omega$$

Pääkeskuksen PK3 kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.5. Jännitekertoimena c käytetään 1,05.

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{max}} = \frac{1,05 \cdot 690 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 13,3 \angle 77,4^\circ \text{ m}\Omega} = (6,861 - j30,693) \text{ kA} = 31,450 \angle -77,4^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskuksen PK3 kaksivaiheinen maksimioikosulkuvirta on

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 31,450 \angle -77,4^\circ \text{ kA} = 27,236 \angle -77,4^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskuksen PK3 sysäysaikosulkuvirta i_p lasketaan yhtälöllä 3.2. Lasketaan ensin sysäyskerroin κ resistanssin ja reaktanssin suhteesta yhtälöllä 3.3.

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{6,861}{30,693}} = 1,521$$

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_{k3}'' = 1,521 \cdot \sqrt{2} \cdot 31,450 \text{ kA} = 67,649 \text{ kA}$$

Pääkeskus PK3 minimoikosulkuvirta

Pääkeskuksen PK3 minimoikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään kojeiston KJ1 impedanssia Z_{kmin} .

Redusoidaan impedanssi Z_{kmin} ensin pienjännitepuolelle.

$$Z_{kmin} = (1,037 + j2,276) \Omega \cdot \left(\frac{0,69 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = (1,234 + j2,709) \text{ m}\Omega = 2,977 \angle 65,5^\circ \text{ m}\Omega$$

Kokonaisimpedanssiksi minimoikosulkuvirtaa laskettaessa saadaan

$$Z_{min} = Z_{kmin} + Z_m + Z_{skT3} + Z_{ks} = (1,234 + j2,709) \text{ m}\Omega + (0,774 + j9,491) \text{ m}\Omega + (0,0153 + j0,002761) \text{ m}\Omega + (0,762 + j0,504) \text{ m}\Omega = (2,749 + j12,707) \text{ m}\Omega = 13,0 \angle 77,8^\circ \text{ m}\Omega$$

Pääkeskuksen PK3 kolmivaiheinen minimoikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.5. Jännitekertoimena c_{min} käytetään 0,95. Pienimmän oikosulkuvirran määrittämiseen käytetään kerrointa 0,6 luvun 3.2.6 mukaisesti.

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{min}} = \frac{0,95 \cdot 690 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 13,0 \angle 77,8^\circ \text{ m}\Omega} \cdot 0,6 = (3,691 - j17,073) \text{ kA} = 17,467 \angle -77,8^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskuksen PK3 kaksivaiheinen minimoikosulkuvirta on

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 17,467 \angle -77,8^\circ \text{ kA} = 15,127 \angle -77,6^\circ \text{ kA}$$

Liite 5. Laskentaesimerkki 2: Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta muuntajan T1 pienjännitepuolen liitännässä.

Lasketaan oikosulkuvirta muuntajan T1 pienjännitepuolen liitännässä. Laskenta suoritetaan käyttämällä muuntajan T1 impedanssia Z_m sekä kojeistoin KJ1 impedanssia Z_{kmax} ja muuntajan T1 syöttökaapelin impedanssia Z_{skT1} mitkä on redusoitu pienjännitepuolelle. Muuntajan T1 pienjännitepuolen kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.5 ja jännitekertoimena c käytetään 1,05.

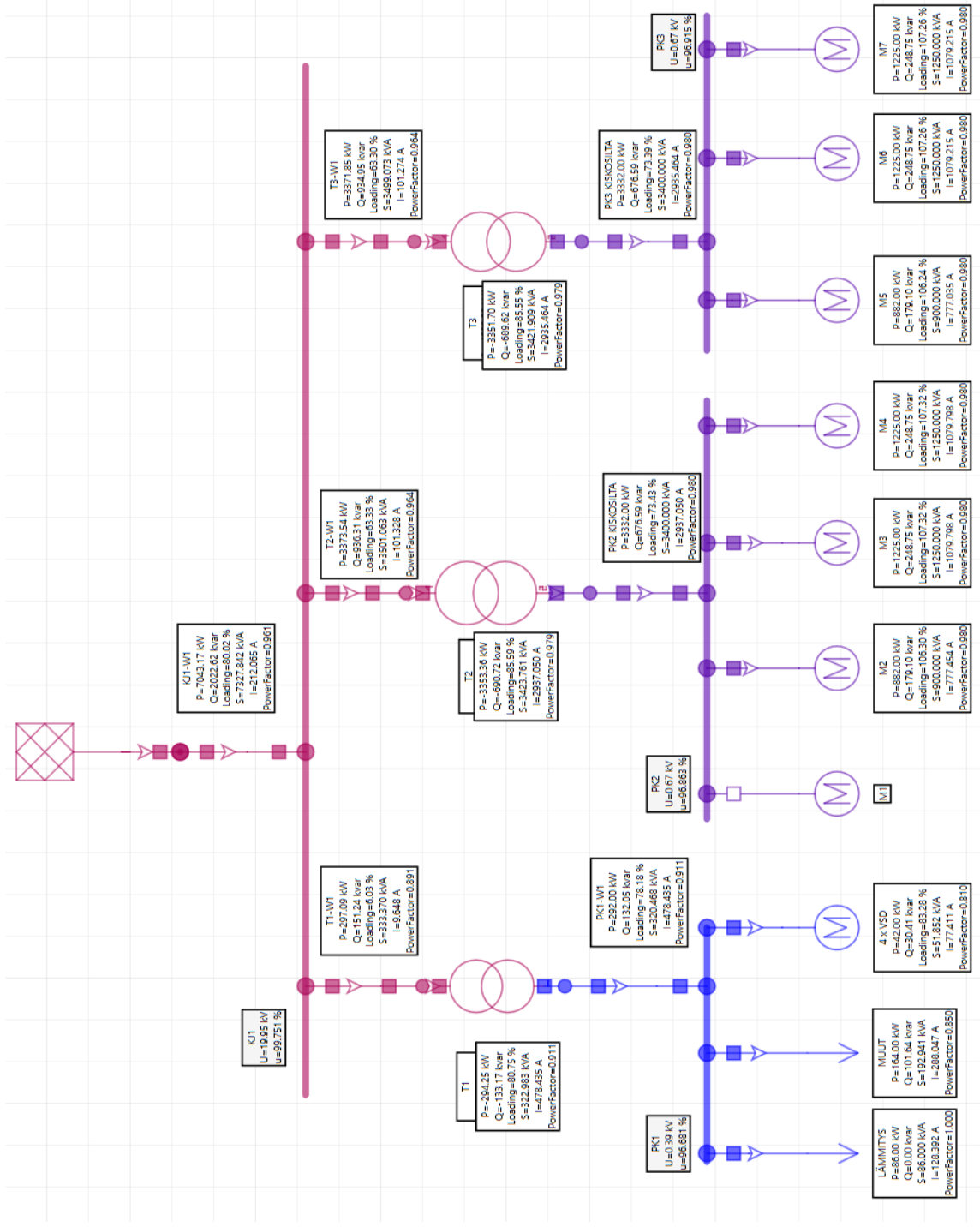
$$Z_{max} = Z_{kmax} + Z_m + Z_{skT1} = (0,452+j1,003) \text{ m}\Omega + (4,1+j17,12) \text{ m}\Omega + (0,00256+j0,00046) \text{ m}\Omega = (4,554+j18,123) \text{ m}\Omega = 18,686\angle 75,9^\circ \text{ m}\Omega$$

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{pk}} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 18,686\angle 75,9^\circ \text{ m}\Omega} = (3,161 - j12,586) \text{ kA} = 12,977\angle -75,9^\circ \text{ kA}$$

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} on

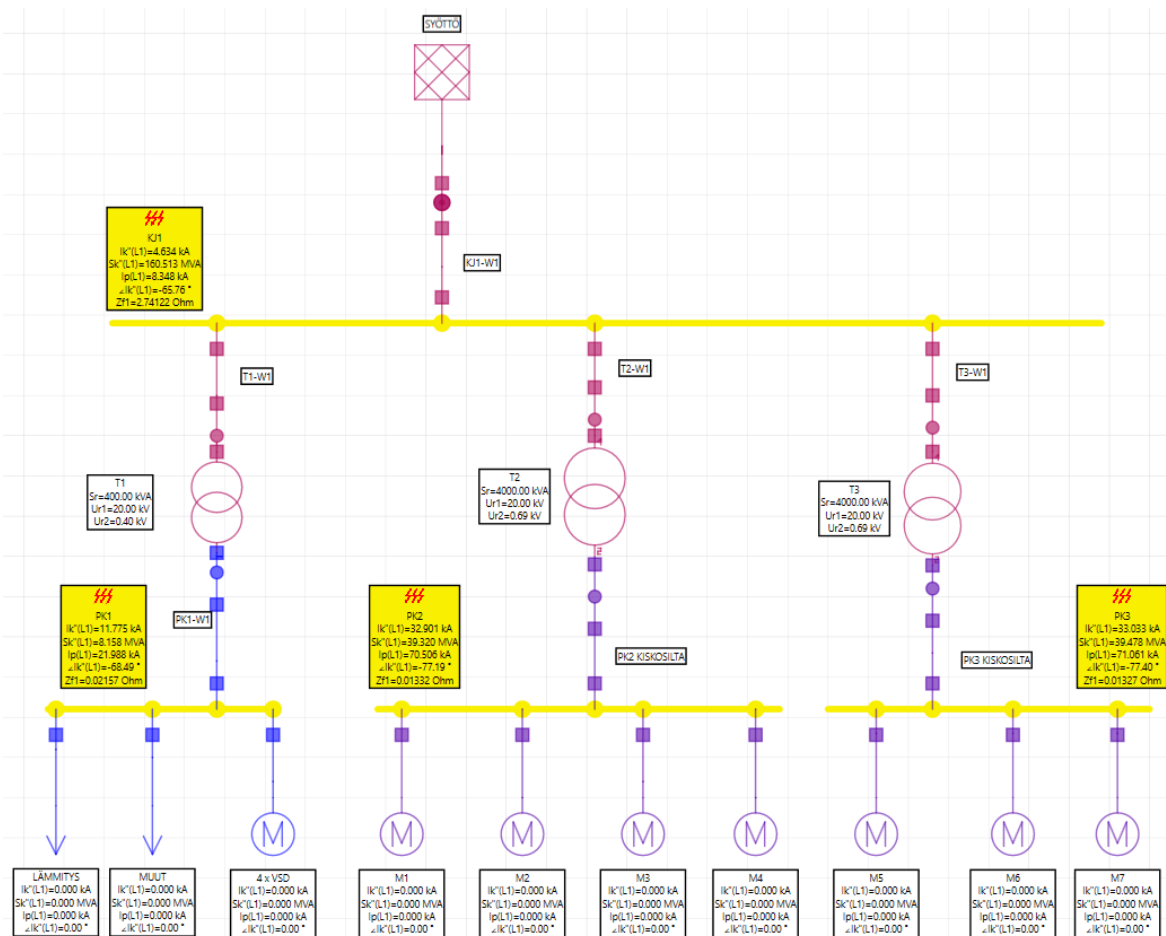
$$I_{th} = I_{k3}'' \sqrt{m+n} = 12,977 \text{ kA} \cdot \sqrt{1} = 12,977 \text{ kA}$$

Liite 6. Pumppaamon sähkönjakeluverkon tehonjakolaskenta



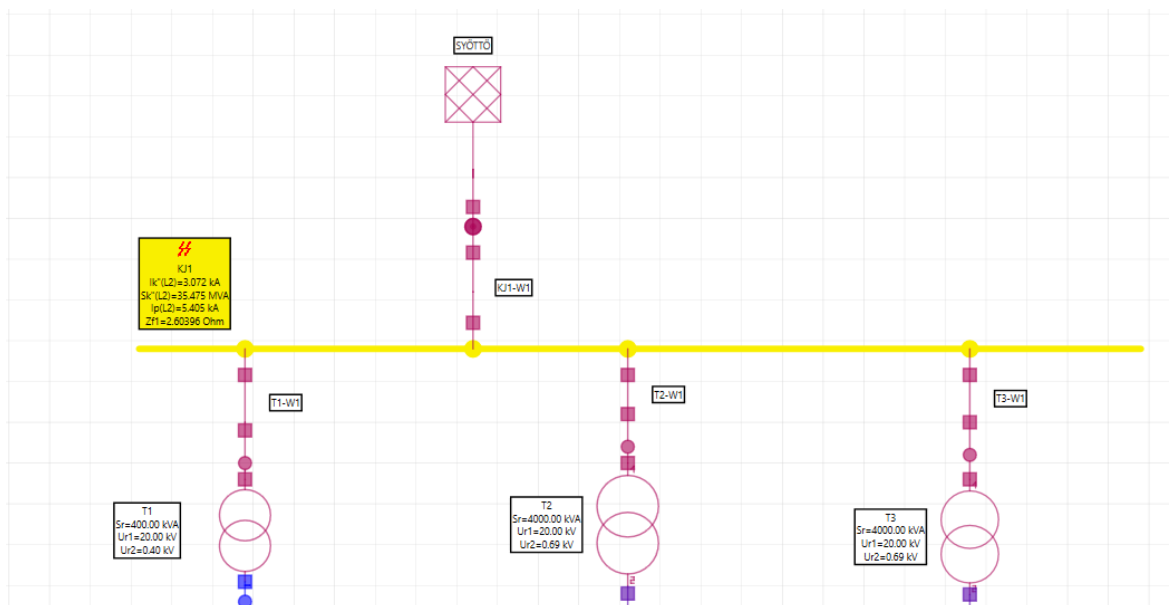
Liite 7. Verkostolaskentaohjelma: Oikosulkuvirtojen laskenta

3-vaiheinen maksimioikosulkuvirta kojeistossa KJ1 ja pääkeskuksissa.

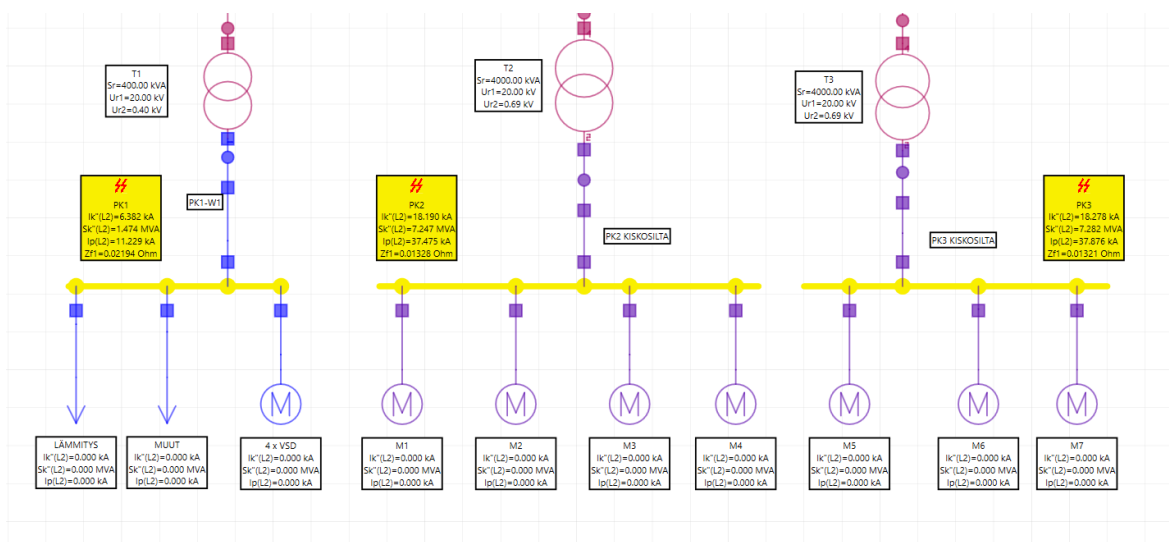


(jatkuu)

Kojeiston KJ1 2-vaiheinen minimoioikosulkuvirta laskettuna jännitekertoimella 0,8.



2-vaiheinen minimoioikosulkuvirta pienjännitepuolella laskettuna jännitekertoimella 0,7.



Liite 8. Laskentaesimerkki 3: Häviökustannusten laskenta

Muuntajan häviökustannukset

Lasketaan muuntajan häviökustannukset vuoden ajalta. Muuntajan nimellisteho S_n on 4000 kVA, tyhjäkäyntihäviö $P_0 = 4,95$ kW ja kuormitushäviöt nimelliskuormalla $P_{kn} = 26,2$ kW.

Muuntajan kuormitushäviöteho muuttuu suhteessa muuntajan kuormitukseen ja lasketaan yhtälöllä 6.4. Muuntajasta otettu teho S on 3577 kVA.

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot P_{kn} = \left(\frac{3577 \text{ kVA}}{4000 \text{ kVA}}\right)^2 \cdot 26,2 \text{ kW} = 20,95 \text{ kW}$$

Muuntajan kokonaishäviötehoksi saadaan

$$P_{\text{kok}} = P_0 + P_k = 4,95 \text{ kW} + 20,95 \text{ kW} = 25,9 \text{ kW}$$

Vuodessa syntyvä häviöenergia lasketaan yhtälöllä 6.7. Kuormitushäviöiden häviöenergian laskennassa huipunkäyttöajaksi arvioidaan 7000 h/a ja tyhjäkäyntihäviön häviöenergian laskennassa huipunkäyttöaika on 8760 h/a.

Kuormitushäviöiden häviöenergiaksi saadaan

$$W_{hk} \approx P_k t_h \approx 20,95 \text{ kW} \cdot 7000 \text{ h/a} \approx 146,7 \text{ MWh/a}$$

Tyhjäkäyntihäviöiden häviöenergiaksi saadaan

$$W_{hpo} \approx P_0 t_h \approx 4,95 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/a} \approx 43,4 \text{ MWh/a}$$

Muuntajan häviöenergiaksi saadaan

$$W_h \approx W_{hk} + W_{hpo} \approx 146,7 \text{ MWh/a} + 43,4 \text{ MWh/a} \approx 190,1 \text{ MWh/a}$$

Muuntajan häviökustannuksen laskentaan käytetään vuoden 2024 sähkön keskihintaa 45,6 €/MWh. Muuntajan häviökustannukset vuoden ajalta K_{HMI} on $190,1 \text{ MWh/a} \cdot 45,6 \text{ €/MWh} = 8669 \text{ €}$

Kiskosillan häviökustannukset

Lasketaan kiskosillan häviökustannukset vuoden ajalta. 4000 A kiskosillan resistanssi $R = 12,7 \mu\Omega/\text{m} \cdot 60 \text{ m} = 0,762 \text{ m}\Omega$. Kuormitusvirta $I = 2993 \text{ A}$. Kiskosillan kuormitushäviöteho P_h lasketaan yhtälöllä 6.8.

$$P_h = 3I^2R = 3 \cdot 2993^2 \text{ A} \cdot 0,762 \text{ m}\Omega = 20,5 \text{ kW}$$

Käytetään kiskosillan kuormitushäviöiden häviöenergian laskennassa samaa huipunkäyttöaikaa kuin muuntajalla.

$$W_{hk} \approx P_h t_h \approx 20,5 \text{ kW} \cdot 7000 \text{ h/a} \approx 143,5 \text{ MWh/a}$$

Kiskosillan häviökustannukset vuoden ajalta K_{HK1} on $143,5 \text{ MWh/a} \cdot 45,6 \text{ €/MWh} = 6544 \text{ €}$

Suurvirtakaapeloinnin häviökustannukset

Lasketaan suurvirtakaapeloinnin häviökustannukset vuoden ajalta. Kuormitusvirta I on 2993 A. AXMK 1x800 kuormitettavuus on valmistajan tiedoissa kaapelitikkaalle asennettuna 1080 A. Kolmella kaapelilla kuormitettavuudeksi saadaan $3 \cdot 1080 \text{ A} = 3240 \text{ A}$. Suurvirtakaapeleita tarvitaan AXMK 3x3x1x800. Asennustavan korjauskerroin on 0,96. Kuormituskerroin huomioon ottaen kuormitettavuus on $3240 \text{ A} \cdot 0,96 = 3110 \text{ A}$. Suurvirtakaapeleiden resistanssi $R = 12,2 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,06 \text{ km} = 0,732 \text{ m}\Omega$. Kuormitusvirta $I = 2993 \text{ A}$. Suurvirtakaapeleiden kuormitushäviöteho P_h lasketaan yhtälöllä 6.8.

$$P_h = 3I^2R = 3 \cdot 2993^2 \text{ A} \cdot 0,732 \text{ m}\Omega = 19,7 \text{ kW}$$

Käytetään suurvirtakaapeloinnin kuormitushäviöiden häviöenergian laskennassa samaa huipunkäyttöaikaa kuin muuntajalla.

$$W_{\text{hk}} \approx P_{\text{h}} t_{\text{h}} \approx 19,7 \text{ kW} \cdot 7000 \text{ h/a} \approx 137,9 \text{ MWh/a}$$

Suurvirtakaapeloinnin häviökustannukset vuoden ajalta K_{HSV1} on $137,9 \text{ MWh/a} \cdot 45,6 \text{ €/MWh} = 6288 \text{ €}$

Häviökustannusten nykyarvo

Häviökustannukset saadaan laskettua koko tarkasteluajalle käyttämällä yhtälöitä 6.2–6.4. Pitoaika on 20 vuotta. Kuormitus ei kasva pitoaikana ja korkona käytetään 6 %. Koska tehon kasvua ei ole, voidaan kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviön nykyarvo laskea käyttäen samaa kapitalisointikerrointa. Lasketaan ensin apukerros ψ yhtälöllä 6.4.

$$\psi = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}} = \frac{\left(1 + \frac{0}{100}\right)^2}{1 + \frac{6}{100}} = 0,94$$

Kapitalisointikerros lasketaan yhtälöllä 6.3 seuraavasti

$$\kappa = \psi \frac{\psi^T - 1}{\psi - 1} = 0,94 \cdot \frac{0,94^{20} - 1}{0,94 - 1} = 11,12$$

Häviökustannusten nykyarvo lasketaan yhtälöllä 6.2 kertomalla ensimmäisen vuoden häviökustannus kapitalisointikerroimella. Muuntajan häviökustannusten nykyarvo lasketaan seuraavasti

$$K_{\text{M20}} = \kappa \cdot K_{\text{HM1}} = 11,12 \cdot 8669 \text{ €} = 96399 \text{ €}$$

Kiskosillan häviökustannuksen nykyarvo lasketaan seuraavasti

$$K_{\text{K20}} = \kappa \cdot K_{\text{HK1}} = 11,12 \cdot 6544 \text{ €} = 72769 \text{ €}$$

Suurvirtakaapeloinnin häviökustannuksen nykyarvo lasketaan seuraavasti

$$K_{\text{SV20}} = \kappa \cdot K_{\text{HSV1}} = 11,12 \cdot 6288 \text{ €} = 69923 \text{ €}$$