

Biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja ohjaus

Jarno Mäkinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

Tekijä(t) Mäkinen, Jarno	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 22.05.2017
	Sivumäärä 69	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: kyllä
Työn nimi Biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja ohjaus		
Tutkinto-ohjelma sähkövoimatekniikka		
Työn ohjaaja(t) Pasi Puttonen		
Toimeksiantaja(t) PCS-Engineering Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>PCS-Engineering Oy tekee sähkö- ja automaatio suunnittelua BioGTS Oy:n valmistamiin biokaasulaitoksiin. Opinnäytetyö toteutettiin Jyväskylän jäteasemalle tulevaan biokaasulaitokseen. Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja ohjaus. Mitoitukseen kuului laitoksen keskuskeskukset, niitä syöttävät kaapelit sekä suojalaitteet. Laitoksen sähköverkkoon oli tarkoitus kytkeä omaa sähköntuotantoa, mikä lisäsi tarkasteluja verkkoa mitoittaessa. Lisäksi tavoitteena oli tutkia mitä tulee ottaa huomioon ja kuinka verkkoa ohjataan, kun omaa tuotantoa liitetään valtakunnan jakeluverkon syötön kanssa rinnan.</p> <p>Aluksi tutustuttiin pienjänniteverkon mitoituksen teoriaan ja sen jälkeen laskettiin sähköverkon komponenttien mitoituslaskelmat teoriaa soveltaen. Verkon mitoituksen avulla voitiin määrittää verkon komponenttien ja suojauksien ominaisuudet. Oman tuotannon kytkentään liittyvistä seikoista perehdyttiin pienjänniteasennusstandardin ja Energiaviraston sekä paikallisen siirtoverkon haltijan vaatimuksiin ja ohjeisiin.</p> <p>Tulokseksi saatiin selvitys, miten biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja määrittäminen toteutetaan, sekä mitoituslaskelmat biokaasulaitoksen sähköverkolle. Tuloksiin sisältyivät dokumentoidut laskentaesimerkit eri verkon osille. Lisäksi tulokseksi saatiin verkon katkaisijoiden ohjausten toimintakuvaukset. Työn tulokset toimivat tulevaisuudessa toimeksiantajan suunnittelijoiden apuna teollisuuden sähköverkojen mitoituksissa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) sähköverkko, mitoitus, ohjaus, sähköverkon mitoitus, sähköverkon ohjaus		
Muut tiedot		

Author(s) Mäkinen, Jarno	Type of publication Bachelor's thesis	Date 22.05.2017 Language of publication: finnish
	Number of pages 69	Permission for web publication: yes
	Title of publication Dimensioning and control of the biogas plant electric grid	
Degree programme Power electrical engineering		
Supervisor(s) Puttonen, Pasi		
Assigned by PCS-Engineering Oy		
Abstract <p>PCS-Engineering Oy carries out electrical and automation planning for BioGTS Oy's biogas plants. The thesis was implemented for the biogas plant in Jyväskylä waste station. The aim of the thesis was to accomplish design and control for the electricity grid of the biogas plant. The dimensioning included the switchboards, the cables and the protective devices. The electric grid of the plant was to connect with its own power generation, which would increase the analyses when designing the grid. In addition, the aim was to investigate what should be considered and how to control the network when connecting the own power generation with the supply of the nationwide distribution network in parallel.</p> <p>The grid was dimensioned by researching theory of the design for a low voltage network and calculating it with adapting the relevant theory. The network dimensioning was used to determine the network components and security features. The issues related to the connection of the own power generation were handled by reading up on the low voltage installation standards as well as the requirements of the Energy Agency and the local distribution system operator.</p> <p>The thesis resulted in an analysis of how to do dimension and determine the biogas plant's electricity grid. It also clarified the dimensioning of the calculations for the biogas plant's electricity grid. The results included example calculations for different parts of the network. In addition, the thesis resulted in the function descriptions for the circuit breakers controls. In the future, the results of this work assist the company's designers with the design of industrial electricity grids.</p>		
Keywords/tags (subjects) electric grid, dimensioning, control, electric grid dimensioning, electric grid control		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Opinnäytetyön lähtökohdat	4
2	BioGTS Biokaasulaitos	5
3	Teollisuuden pienjännite sähköjakelujärjestelmän suunnittelu ja mitoitus.....	6
3.1	Verkon rakenne	6
3.2	Sähköliittymän mitoitus	7
3.3	Keskusten nimellisvirtojen määrittäminen	8
3.4	Sähköverkon komponenttien sijaiskytkennät	9
3.4.1	Syöttöverkko	9
3.4.2	Virtakisko, kaapeli tai johto	10
3.4.3	Muuntaja	10
3.4.4	Moottori	11
3.4.5	Generaattori	12
3.4.6	Redusointi	12
3.5	Kaapelin mitoitus standardin SFS 6000 mukaan	13
3.5.1	Kuormitettavuus	13
3.5.2	Jännitteenalenema	14
3.6	Ylikuormitussuojaus	16
3.7	Oikosulkusuojaus.....	17
3.7.1	Vaatimukset	17
3.7.2	Oikosulkuvirtojen laskenta	19
3.8	Vikasuojaus.....	23
3.9	Selektiivisyys.....	24
4	Hajautetun sähköntuotannon liittäminen verkkoon	26
4.1	Tekniset vaatimukset.....	26
4.2	Sähkön tuotannon mittaus.....	30
4.3	Sähköntuotannon liittämisen vaikutus sähköverkon mitoitukseen	30

		2
5	Biokaasulaitoksen mitoitus ja ohjaukset	31
	5.1 Huipputehon laskenta	32
	5.2 Keskusten nimellisvirtojen laskenta	32
	5.3 Kaapelien mitoitus.....	33
	5.4 Oikosulkuvirtojen laskenta	36
	5.4.1 Verkon mallinnus	36
	5.4.2 Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskenta	38
	5.4.3 Sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskenta	41
	5.4.4 Minimoikosulkuvirran laskenta	44
	5.5 Suojalaitteiden valinta.....	45
	5.6 Oikosulkusuojauksen varmentaminen	45
	5.7 Vikasuojauksen varmennus.....	46
	5.8 Selektiivisyyden tarkastus	46
	Katkaisijoiden ohjaukset	48
6	Pohdinta	50
	Lähteet.....	52
	Liitteet	54
	Liite 1. Suojalaitteiden pienimmät toimintavirrat.....	54
	Liite 2. Biokaasulaitoksen huipputehon laskenta.....	56
	Liite 3. Keskusten nimellisvirtojen laskenta	57
	Liite 4. Kaapelien mitoitus kuormituksen mukaan.....	58
	Liite 5. Ylivirtasuojauksen tarkastelu.....	59
	Liite 6. Kaapelien jännitteenalennemien tarkastelu	60
	Liite 7. Komponenttien mallinnus	61
	Liite 8. Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskennan tulokset	64
	Liite 9. Sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskentatulokset.....	66
	Liite 10. Minioikosulkuvirtojen laskennan tulokset.....	67

Liite 11. Katkaisijoiden periaatekaavio	68
---	----

Kuviot

Kuvio 1. Esimerkki 1-vaiheisesta sijaiskytkennästä	9
Kuvio 2. Theveninin sijaiskytkentä	19
Kuvio 3. Tasavirtakomponentin m riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta	22
Kuvio 4. Vaihtovirtakomponentin n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja jatkuvuustilan arvon suhteesta I_k''/I_k	22
Kuvio 5. SFS-6000 standardin vaatimukset poiskytkentäajoille eri virtapiireille	24
Kuvio 6. 63A-sulakkeen ja 250A-ilmakatkaisijan toimintakäyrät	25
Kuvio 7. Pääkeskuksen maksimioikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.	39
Kuvio 8. Jatkuvuustilan oikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.	40
Kuvio 9. ABB:n gG-kahvasulakkeiden virranrajoitus	43
Kuvio 10. Pääkeskuksen minimioikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.	44
Kuvio 11. Sulakkeiden laukaisukäyrät ajan ja virran suhteen.	47

Taulukot

Taulukko 1. ABB:n S200-sarjan johdonsuojakatkaisijoiden laukaisukäyräarvoja	17
Taulukko 2. Verkostosuosituksen liittymän suojausten asetteluarvot	27

1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Teollisuuden sähköverkon suunnittelussa on tärkeää, että suunniteltava verkko toimii oikein ja on vikatilanteessa turvallinen. Tämä edellyttää oikeaa komponenttien mitoitus, suojalaitteiden valintaa sekä suojausheitojen tarkistusta. Huolellinen suunnittelu myös vähentää verkon rakennus- sekä käyttökustannuksia.

PCS-Engineering Oy tekee sähkö- ja automaatio suunnittelua BioGTS Oy:n valmistamiin biokaasulaitoksiin. Opinnäytetyö toteutettiin Jyväskylän Mustankorkean jäteasemalle tulevaan biokaasulaitokseen. Biokaasulaitoksen sähköverkkoon oli alun perin tarkoitus kytkeä omaa sähköntuotantoa CHP-laitteiston muodossa, eli yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantoa. Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja ohjaus, kun verkkoon on kytkettynä hajautettua tuotantoa. Mitoitustyö piti sisällään keskusten mitoituksen, niitä syöttävien kaapeleiden mitoituksen, suojalaitteiden määrityksen sekä niiden toimivuuden tarkastelun. Generaattorin oli tarkoitus syöttää laitoksen verkkoa jakeluverkon kanssa rinnan ja toimia jakeluverkon vikatilanteissa laitoksen varavoimana. Koska generaattoria ei tullut, tarkastellaan verkon mitoitus teoreettisesti. Biokaasulaitos yhdistyi Mustankorkean alueen pienjännite jakelumuuntamoon, joten opinnäytetyön tarkastelut rajoittuivat pienjännitepuolelle.

Opinnäytetyö toteutettiin toimintatutkimuksena, jossa tietoa tuotetaan sitä mukaa, kun prosessi etenee. Tutkimus siis eteni sen mukaan mitä havaintoja suunnittelutyön edetessä tuli esille. Työ aloitettiin tutkimalla sähköverkon mitoitukseen liittyvää materiaalia standardeista, opintomateriaalista sekä kirjoista. Lisäksi etsittiin tietoa pien- tuotannon lisäämisestä sähköverkkoon internetistä sekä kirjoista. Kun teoriapohja oli hankittu, alkoi itse verkon mitoitus. Aluksi tutkittiin biokaasulaitoksen lähtötietoja. Niiden avulla voitiin aloittaa biokaasulaitoksen sähkönjakelujärjestelmän suunnittelutyö. Mitoituksen laskennat toteutettiin Microsoft Excel -työkalulla. Oman tuotannon kytkentään liittyvistä seikoista perehdyttiin pienjänniteasennusstandardin, Energiaviraston sekä paikallisen siirtoverkon haltijan vaatimuksiin ja ohjeisiin.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli saada selvitys siitä, miten biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus ja määrittäminen toteutetaan oikeaoppisesti sekä toteuttaa biokaasulaitoksen sähköverkon mitoituslaskelmat. Laskelmia oli tarkoitus avata raporttiin esimerkein. Lisäksi tarkoitus oli saada ohjattua verkkoa turvallisesti eri kytkentähetkillä. Työn tuloksia oli tarkoitus käyttää apuna toimeksiantajan tulevissa teollisuuden sähköverkon mitoituksissa.

PCS-Engineering Oy on vuonna 2004 perustettu insinööritoimisto, jossa tehdään sähkö- ja automaatioalan projektointia, suunnittelua, asennusvalvontaa, automaatiojärjestelmien ja logiikkojen ohjelmointia sekä niiden käyttöönottoa. Yritys jakaantuu Oulun sekä Jyväskylän toimipisteisiin, joissa työntekijöitä on yhteensä 38. Tämä opinnäytetyö tehtiin Jyväskylän toimipisteelle.

2 BioGTS Biokaasulaitos

BioGTS-biokaasulaitoksen toiminta perustuu kuivamädätykseen, jossa jätteistä ja muista orgaanisista raaka-aineista mädätetään raakakaasua. Syntyvän kaasun lisäksi prosessista syntyy mädätettyä lietettä, jota voidaan käyttää lannoitteena. Reaktoreista tuleva raakakaasu on noin 50-70 % metaania, jota voidaan jatkojalostaa liikennepolttoaineeksi poistamalla kaasusta hiilidioksidia ja epäpuhtauksia laitoksen kaasunjalostusyksikössä. Jalostamatonta kaasua voidaan käyttää polttoaineena laitoksen kaasukattilassa sekä CHP-laitteistossa.

Mustankorkean biokaasulaitos rakennetaan Mustankorkean jätteenkäsittelyalueelle Jyväskylään. Se käyttää prosessiaineenaan pääasiallisesti biojätettä, puhdistamolietettä sekä lantaa. Biokaasulaitos koostuu isosta syöterakennuksesta, jossa on erikseen tilat jätteen vastaanotolle sekä esikäsittelylle ja syötelaitteille. Syöterakennukseen yhdistyy neljä mädätoreaktoria, joissa itse käymisprosessi tapahtuu. Mädätetty jae viedään putkea pitkin separointiyksikölle, jossa jae erotellaan neste- ja kuivajakeeksi. Laitoksessa on kaksi kaasuvälikamaria, jonne syntynyt kaasu varastoidaan. Varastosta kaasu siirretään laitoksen kaasunjalostus- sekä kattilayksikköön. Laitoksen tankkausyksikössä jalostettu kaasu kompressoitetaan tankattavaksi kaasukäyttöisiin autoihin ja työkoneisiin.

3 Teollisuuden pienjännite sähköjakelujärjestelmän suunnittelu ja mitoitus

3.1 Verkon rakenne

Teollisuuden sähköverkko koostuu yleiseen sähköverkkoon liittynästä, mahdollisesta keskijännitejakelusta ja käyttöjakelusta kulutuskohteille, joita teollisuudessa suurimpia ovat moottorikäytöt. Sähköverkon liittytapisteen jännitetaso on 110 kV, 20 kV, 10 kV tai 0,4 kV. Pienet teollisuuskohteet ja kevyet tuotantolaitokset liittyvät yleensä pienjänniteverkkoon. Tällaisissa tapauksissa itse teollisuuskohteen sähköverkko ei oleellisesti poikkea esimerkiksi liikerakennuksen tai julkisten rakennusten sähköverkosta. Suunnittelussa on kuitenkin huomioitava teollisuuden ympäristö, jossa on monenlaisia tiloja ja olosuhteita. Korkeat lämpötilat, aggressiiviset olosuhteet ja kosteudet, likaisuus ja pöly sekä värinä ja mekaaniset iskut asettavat vaatimuksia sähköjärjestelmille sekä komponenteille. (Hietalahti 2013, 123.)

Tehdasalueen pienjännitejakeluverkko rakennetaan yleensä säteittäiseksi, jotta oikosulkuvirtoja voidaan rajoittaa sekä suojaus saadaan helpommin järjestettyä. Jos verkon toiminta halutaan varmentaa, käytetään silmukoituja rakenteita sekä kaksoiskustollisia jakelukeskuksia. Teollisuuden jakeluverkko voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: keskitetty, porrastettu ja hajautettu jakelu. Verkko voi sisältää osia useammasta tai kaikista päätyypeistä. (Hietalahti 2013, 123-126.)

Keskitetyssä jakelussa on vain yksi pääkeskus, joka syöttää kaikkia moottorilähtöjä. Näin ollen keskuksella on oltava erittäin hyvä oikosulkukestoisuus. Etuna on helposti tehtävä rakenne sekä se, että kaikki kojeistot sijaitsevat samassa sähkötilassa. Haittana suurien oikosulkujen lisäksi on pääkeskuksen häiriöt, jotka vaikuttavat kaikkiin lähtöihin. (Hietalahti 2013, 125.)

Porrastettu jakelu tarkoittaa, että käytetään pääkeskus-alakeskusjakelujärjestelmää. Etuina ovat alakeskuksien oikosulkuvirran rajoittaminen ja alakeskuksien eritehoinen

mitoitus, jolloin mahdollistuu erilaisten kuormalähtöjen ryhmitys. Etuna on myös alakeskusten sijoittuminen lähemmäs kulutuskohteita, jolloin kaapelimatkat lyhenevät. (Hietalahti 2013, 125.)

Hajautetussa jakelussa sähkönjakelu toteutetaan standardirakenteisilla tehdasmuuntamoilla. Niistä sähkö jaetaan sähkökäyttöjen ohjaislaitteille, jotka sijoitetaan moottoreiden välittömään läheisyyteen. Jakelujärjestelmä on edullinen, koska siinä käytetään standardiratkaisuja ja kenttäväyläohjausta. (Hietalahti 2013, 126.)

3.2 Sähköliittymän mitoitus

Pienjänniteverkon suunnittelu lähtee liikkeelle tehon tarpeen selvittämisellä. Sen avulla voidaan laskea tarvittavan sähköliittymän koko. Tarvittavan tehon laskelmat ovat aina arvioita rakennuksen todellisesta tai oletetusta huipputehon tarpeesta. Tehoon vaikuttaa rakennuksen käyttötarkoitus sekä sen laajuus. Tehon mitoituksessa ennakoidaan tulevaisuuden sähkötehon tarpeet sekä mahdolliset muutostarpeet. Teholaskelmia on syytä tarkentaa suunnittelun edetessä ja laitevalintojen tarkentuessa. Rakennuksen peruskulutuskohteita ovat mm. valaistus, lämmitys-, jäähdytys- sekä ilmanvaihtolaitteistot. (ST 13.31 2015.)

Teollisuudessa tarvittavan sähkötehon tarve arvioidaan yleensä suoraan kohteen laiteluettelosta eli luettelosta, jossa on listattu sähköä kuluttavat laitteet ja niiden nimellisarvot. Sähkölaitteet kuitenkin harvoin kuluttavat todellisuudessa nimellisarvonsa mukaisesti sähköä eivätkä kaikki sähkölaitteet eivät ole yhtä aikaa päällä, joten täytyy arvioida laiteryhmiä sisäiset sekä laiteryhmiä väliset samanaikaisuuskertoimet, jotka pienentävät tarvittavaa huipputehoa. (ST 13.31 2015.)

Huipputeho P_h lasketaan yleensä vain pätötehosta. Jotta liittymän kuormitusvirtaan otetaan huomioon loistehon aiheuttama virta, täytyy huipputeho jakaa yhteisellä tehokertoimella. Laitteiden tehokertoimia ei yleensä ole tiedossa liittymän mitoitusvaiheessa, jolloin Harsian (2008) mukaan voidaan käyttää seuraavia arvoja:

- Asuminen $\cos(\varphi) = 0,95$
- Liiketila $\cos(\varphi) = 0,87$
- Pienteollisuus $\cos(\varphi) = 0,75$

Kokonaisnäennäisteho S_{tot} saadaan siis kaavasta 1.

$$S_{\text{tot}} = \frac{P_h}{\cos(\varphi)} \quad (1)$$

jossa

$\cos(\varphi)$ = yhteinen tehokerroin

Liittymän kuormitusvirta I_B lasketaan kokonaisnäennäistehosta S_{tot} kaavalla 2.

$$I_B = \frac{S_{\text{tot}}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (2)$$

jossa

U = pääjännite

Liittymän kooksi valitaan seuraava liittymänluokka, joka on suurempi kuin liittymän kuormitusvirta.

3.3 Keskusten nimellisvirtojen määrittäminen

Keskusten nimellisvirrat täytyy määrittää, jotta tiedetään, kuinka hyvä virrankestoisuus keskukselle rakennetaan. Keskusten nimellisvirtojen määrittämiseksi täytyy laskea keskuskohtaiset huipputehot. Huipputeho lasketaan keskukselta syötettävien laitteiden yhteisestä näennäistehosta. Näennäisteho lasketaan laitteiden päto- ja loistehosta.

Useimmiten kuormituksille ei ole suoraan annettu loistehoa, mutta se voidaan laskea kaavoilla 3 ja 4.

$$\sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (4)$$

Keskuksen kokonaisnäennäisteho S_{tot1} saadaan sijoittamalla keskuksen päto- ja loistehot kaavaan 5.

$$S_{\text{tot1}} = \sqrt{P_{\text{tot1}}^2 + Q_{\text{tot1}}^2} \quad (5)$$

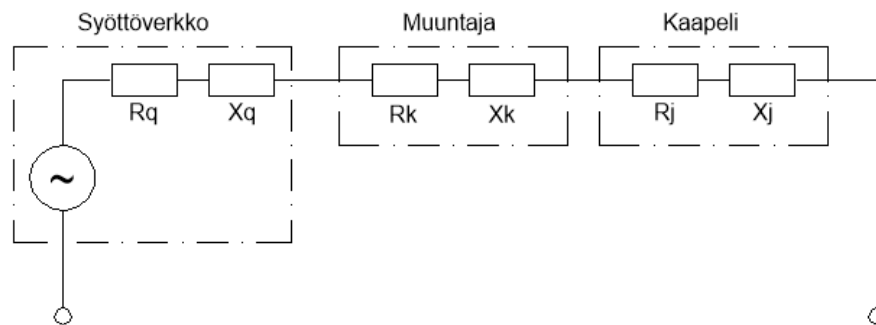
Keskuksen kuormitusvirta saadaan laskettua kaavalla 6.

$$I_{B1} = \frac{S_{tot1}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (6)$$

Keskuksen nimellisvirraksi annetaan seuraava standardin mukainen nimellisarvo, joka on suurempi kuin keskuksen kuormitusvirta.

3.4 Sähköverkon komponenttien sijaiskytkennät

Sähköverkon komponenttien sijaiskytkennöissä eri verkon osia kuvataan sellaisessa muodossa, jotta niitä voidaan käyttää apuna jakelujärjestelmän mitoituksessa. Komponenttien kuvaaminen tapahtuu 1-vaiheisella sijaiskytkennällä (ks. kuvio 1). (Korpinen n.d.)



Kuvio 1. Esimerkki 1-vaiheisesta sijaiskytkennästä

3.4.1 Syöttöverkko

Syöttöverkko mallinnetaan vaihejännitelähteeksi U_v sekä sen kanssa sarjassa oleviksi resistanssiksi R_Q ja reaktanssiksi X_Q , jotka kuvaavat koko liityntäpistettä edeltävän verkon fyysisten komponenttien yhteenlaskettuja resistansseja ja reaktansseja. Resistanssien ja reaktanssien määrittämiseen vaaditaan jakeluverkkoyhtiöltä joko liityntäpisteen oikosulkuvirta- I_{KQ} tai oikosulkutehotietoja S_{KQ} . Jakeluverkkoyhtiöltä saatujen tietojen avulla saadaan laskettua syöttöverkon impedanssi Z_Q kaavalla 7. (Puttonen 2014.)

$$Z_Q = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{KQ}} = \frac{U_N^2}{S_{KQ}} \quad (7)$$

jossa

U_N = Verkon pääjännite (V)

Verkon impedanssi saadaan jaettua resistanssiin ja reaktanssiin kaavoilla 8 ja 9.

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad (8)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad (9)$$

3.4.2 Virtakisko, kaapeli tai johto

Virran kuljetustie eli virtakisko, kaapeli tai johto mallinnetaan resistanssiksi R_j ja reaktanssiksi X_j . Resistanssin laskentaan tarvitaan johtimen ominaisresistanssi r_j sekä reaktanssin laskentaan johtimen ominaisreaktanssi x_j tai ominaisinduktanssi l_j , jotka saadaan yleensä johtimen valmistajan antamista tuotetiedoista. Johtimen resistanssi ja reaktanssi lasketaan kaavoista 10 ja 11. (Puttonen 2014)

$$R_j = \frac{r_j \cdot s}{n} \quad (10)$$

$$X_j = \frac{x_j \cdot s}{n} = \frac{2\pi \cdot f \cdot l_j \cdot s}{n} \quad (11)$$

jossa

s = johdon pituus

n = rinnakkaisten johtimien lukumäärä

f = taajuus

3.4.3 Muuntaja

Muuntaja mallinnetaan sen käämitysten resistanssiksi R_K ja reaktanssiksi X_K .

Laskennassa käytetään muuntajan suhteellista oikosulkuimpedanssia z_k sekä muuntajan nimellistä kuormitushäviötehoa P_{KN} , jotka muuntajan valmistaja antaa yleensä tuotetiedoissa. Muuntajan impedanssi Z_K , resistanssi ja reaktanssi saadaan laskettua kaavoista 12, 13 ja 14. (Puttonen 2014.)

$$Z_K = \frac{z_K}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (12)$$

$$R_K = P_{KN} \cdot \frac{U_N^2}{S_N^2} \quad (13)$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad (14)$$

jossa

S_N = muuntajan nimellisteho

U_N = verkon pääjännite

Muuntaja voidaan mallintaa sen ensiö- tai toisiopuolelle riippuen siitä, kumman puolen jännitetasoa käytetään.

3.4.4 Moottori

Pienjännitemoottorien ryhmä voidaan kuvata yhdellä ns. ekvivalenttimoottorilla, jonka teho on moottorien summateho ja käynnistysvirtasuhde I_S/I_N on 5,0. Käynnistysvirta suhde tarkoittaa kuinka monta kertaa suuremman virran moottori ottaa käynnistyessään verrattuna normaaliin käyntivirtaan. Jos moottoriryhmä mallinnetaan tällä tavalla ei niitä syöttäviä kaapeleita tarvitse ottaa huomioon mallinnuksessa. Moottori mallinnetaan sen staattorin käämitysten resistanssiksi R_M ja reaktanssiksi X_M . Nämä saadaan laskettua moottorin staattorin käämityksen impedanssista Z_M , joka lasketaan kaavasta 15. (Puttonen 2014.)

$$Z_M = \frac{1}{I_S/I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_{SUM}} \quad (15)$$

S_{SUM} = Moottorien nimellisten näennäistehojen summa, joka saadaan laskettua kaavasta 16.

$$S_{SUM} = \frac{P_{SUM}}{\eta \cdot \cos(\varphi)} \quad (16)$$

jossa

P_{SUM} = Moottorien nimellisten pätötehojen summa

η = moottorien hyötysuhde

$\cos(\varphi)$ = moottorien yhteinen tehokerroin

Impedanssi jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi kaavoista 17 ja 18.

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M \quad (17)$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M \quad (18)$$

3.4.5 Generaattori

Generaattori mallinnetaan sen käämityksen resistanssiksi R_G ja tahtireaktanssiksi X_D , joka on vikatilanteessa suurin tekijä, mikä vaikuttaa generaattorissa syntyvään jatkuvan vikavirran sekä minimi vikavirran suuruuteen. Maksimioikosulkuvirtaa ja syysoikosulkuvirtaa laskettaessa täytyy generaattori mallintaa alkutilan reaktanssiksi X_D'' .

Generaattorin käämityksen resistanssi on annettu yleensä valmistajan toimesta, kuten myös suhteellinen tahtireaktanssi x_D sekä suhteellinen alkutilan reaktanssi x_D'' , joiden avulla saadaan laskettua tahtireaktanssi sekä alkutilan reaktanssi. Reaktanssit lasketaan kaavalla 19. (Puttonen 2014.)

$$X_D = \frac{x_D}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (19)$$

jossa

S_N = generaattorin nimellisteho

U_N = verkon pääjännite

3.4.6 Redusointi

Muuntajia sisältävissä sähköverkoissa törmää varmasti eri jännitetasoihin. Jotta komponentteja voidaan tarkastella samassa jännitetasossa, on komponenttien suuret redusoitava valittuun jännitetasoon. Laskentojen suorittamisen jälkeen voidaan redusoitu suure palauttaa alkuperäiseen jännitetasoon. Redusoitua suuretta merkitään heittomerkillä. (Korpinen n.d.)

Redusointi jännitetasosta U_2 jännitetasoon U_1 lasketaan kaavalla 20.

$$R'_2 = \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}}\right)^2 \cdot R_2 \quad (20)$$

jossa

R_2 = laskettava suure

R'_2 = Redusoitu suure

Jännitetason palautus U_1 tasosta tasoon U_2 lasketaan kaavalla 21.

$$R'_2 = \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 \cdot R_2 \quad (21)$$

3.5 Kaapelin mitoitus standardin SFS 6000 mukaan

Kaapeleiden mitoitus tarkoittaa kaapelin johtimien poikkipinnan määrittämistä. Sähköasennuksien turvallisuuden näkökulmasta poikkipintaan vaikuttavat seuraavat asiat:

- kaapelin suurin sallittu lämpötila
- sallittu jännitteenalenema
- oikosulku- ja maasulkuvirtojen todennäköisesti aiheuttamat mekaaniset rasitukset
- johtimiin kohdistuvat muut mekaaniset rasitukset
- vikavirtojen suojauksen toiminnan kannalta suurin sallittu impedanssi
- asennustapa

(SFS 600-1 2012, 33.)

3.5.1 Kuormitettavuus

Kaapelin lämpötilaan vaikuttaa sen kuormitettavuus. Mitä suuremmalla virralla kaapelia kuormitetaan, sitä enemmän se lämpenee. Johtimen jatkuvasti sallitun lämpötilan ylitys kiihdyttää kaapelin eristeiden vanhenemista ja näin lyhentää kaapelin käyttöikää. Pahimmassa tapauksessa sallitun lämpötilan ylitys voi aiheuttaa tulipalon kaapelin syttyessä palamaan. (D1-2012, 2013, 216.)

Kaapelin asennustapa vaikuttaa kaapelin peruskuormitettavuuteen ja todellisen kuormitettavuuden laskentaan. Standardin SFS 600-1 mukaiset asennustavat ovat seuraavat:

- Asennustapa A = eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän sisällä putkessa)

- Asennustapa B = eristetyt johtimet tai monijohdinkaapeli seinän pinnalla putkessa
- Asennustapa C = yksi- tai monijohdinkaapelit puuseinän pinnalla (ei putkessa)
- Asennustapa D = monijohdinkaapelit maassa
- Asennustapa E = monijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, esim. hyllyllä
- Asennustapa F = yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, koskettavat toisiaan
- Asennustapa G = yksijohdinkaapelit vapaasti ilmassa, erillään toisistaan (SFS 600-1 2012, 242-243.).

Kaapelin kuormitusvirran I_B täytyy olla pienempi tai yhtä suuri kuin kaapelin todellinen kuormitettavuus I_Z eli kaapelin kuormitettavuus sen asennuspaikan olosuhteissa. Kaapelin todellinen kuormitettavuus I_{ZP} lasketaan standardin SFS 600-1 taulukoista saadusta kaapelin peruskuormitettavuudesta ja asennustavasta ja sen olosuhteista johtuvista korjauskertoimista.

Kaapelin kuormitettavuus määritetään siis kaavoilla 22 ja 23.

$$I_B \leq I_Z \quad (22)$$

$$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \dots \quad (23)$$

joissa

k_1, k_2 jne. ovat korjauskertoimia, jotka saadaan standardin SFS 600-1 taulukoista.

Kaapelin poikkipinnaksi valitaan se, jonka peruskuormitettavuus on riittävä yllä mainittujen kaavojen mukaan (SFS 600-1 2012, 257-258.).

3.5.2 Jännitteenalenema

Kaapelin jännitteenalenemalla tarkoitetaan johtimen impedanssin aiheuttamaa jännitehäviötä kaapelissa kuormitusvirran kulkiessa johtimen lävitse, minkä seurauksena johtimen alku- ja loppupää ovat eri jännitetasossa. Jännitehäviön suuruus riippuu siis kuormitusvirrasta sekä kaapelin resistanssista ja reaktanssista. Yleisesti voidaan ajatella, että mitä paksumpi johtimen poikkipinta on, sitä pienempi impedanssi on ja vastaavasti pienempi jännitteenalenema kaapelissa syntyy. Jännitteenalenema lasketaan yleensä ensin jännitearvona, mutta ilmoitetaan prosentteina nimellisjännitteestä. (Puttonen 2014.)

Jännitteenalenema määrää monesti kaapelin poikkipinnan suuremmaksi kuin kuormitettavuuslaskenta sen määräisi, koska jännitteenalenema pyritään pitämään tiettyjen määrättyjen rajojen alapuolella. Tämä takaa hyvän sähkön laadun ja varmistaa jännitetason pysymisen syötettävien laitteiden sallimien rajojen sisällä.

(Puttonen 2014.)

Jännitteenaleneman prosentuaalinen suositus normaalista pienjänniteverkosta syötetylle laitteelle saisi olla enintään 5 %. Valaistuskörmän suositus samassa tilanteessa on 3 %. (D1-2012, 2013, 233.)

3-vaihe piirissä jännitteenalenema lasketaan kaavalla 24.

$$U_H^{(V)} = I \cdot (R_j \cdot \cos(\varphi) + X_j \cdot \sin(\varphi)) = I \cdot (r_j \cdot s \cdot \cos(\varphi) + x_j \cdot s \cdot \sin(\varphi)) \quad (24)$$

jossa

U_H' (V) = jännitteenaleneman jännitearvo

I = kaapelin kuormitusvirta

R_j = johtimen vaihtovirtaresistanssi, $R_j = r_j \cdot s$

r_j = johtimen ominaisresistanssi

s = johtimen pituus

X_j = johtimen reaktanssi, $X_j = x_j \cdot s$

x_j = johtimen ominaisreaktanssi

φ = vaihejännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma

Jännitteenaleneman jännitearvo saadaan prosentuaaliseksi arvoksi kaavalla 25.

$$U_H'(\%) = \frac{U_H'(V)}{U_V(V)} \cdot 100 \quad (25)$$

jossa

U_H' (%) = jännitteenaleneman prosentuaalinen arvo

U_V' (V) = vaihejännite

3.6 Ylikuormitussuojaus

Kaapeleiden ylikuormitusta suojataan ylivirtasuojalla. Standardin SFS 6000 mukaan ylikuormitussuoja täytyy asentaa sellaiseen kohtaan, jossa johtimen poikkipinta, johdinlaji, asennustapa tai muu rakenne muuttaa johtimen kuormitettavuutta. Käytännössä ylikuormitussuoja asennetaan johtimen alkupäähän. (SFS 600-1 2012, 30.)

Ylivirtasuojan mitoituksessa on noudatettava kaavoja 26 ja 27.

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (26)$$

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \quad (27)$$

jossa

I_B = Kuormitusvirta

I_N = Ylivirtasuojan nimellisvirta

I_Z = Kaapelin todellinen kuormitettavuus

I_2 = Laukaisurajavirta eli virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen suojalaitteelle määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa (SFS 600-1 2012, 30.).

Ylivirtasuojan on kestettävä kuormitus, mutta toisaalta myös kaapelin on kestettävä kuormitus sekä virta, jonka ylivirtasuoja vaatii toimiakseen tarpeeksi nopeasti. Tämä virta-arvo saadaan laitestandardista tai laitevalmistajalta. (SFS 600-1 2012, 30.)

Esimerkkinä taulukossa 1 nähdään ABB:n S200-sarjan C-tyyppin katkaisijan laukaisurajavirraksi $1,45 \cdot I_N$.

Taulukko 1. ABB:n S200-sarjan johdonsuojakatkaisijoiden laukaisukäyräarvoja (ABB Pienjännitekojeet)

Laukaisukäyrät

Standardi	Laukaisukäyrä ja nimellisvirta		Terminen laukaisu ²⁾			Magneettinen laukaisu ¹⁾		
			koestusvirrat: pitorajavirta	laukaisu- rajavirta	laukaisu- aika	koestusvirrat: pitorajavirta	laukaisu- rajavirta	laukaisu- aika
DIN VDE 0641/T 11	B	6 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	> 1 h < 1 h	$3 \cdot I_n$	$5 \cdot I_n$	> 0.1 s < 0.1 s
	C	0.5 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	> 1 h < 1 h	$5 \cdot I_n$	$10 \cdot I_n$	> 0.1 s < 0.1 s
	D	0.5 ... 63 A	$1.13 \cdot I_n$	$1.45 \cdot I_n$	> 1 h < 1 h	$10 \cdot I_n$	$20 \cdot I_n$	> 0.1 s < 0.1 s
DIN VDE 0660/9.82	K	0.5 ... 63 A	$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$	> 1 h < 1 h	-	-	-
DIN VDE 0660 8/69 Osa 1 ⁴⁾			$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$ $1.5 \cdot I_n$ $6.0 \cdot I_n$	> 2 h < 2 h ³⁾ < 2 min. ³⁾ > 2 s (T1)	$8 \cdot I_n$	$12 \cdot I_n$	> 0.2 s < 0.2 s
DIN VDE 0660/9.82	Z	0.5 ... 63 A	$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$	> 1 h < 1 h	-	-	-
DIN VDE 0660 8/69 Osa 1 ⁴⁾			$1.05 \cdot I_n$	$1.2 \cdot I_n$ $1.5 \cdot I_n$ $6.0 \cdot I_n$	> 2 h < 2 h ³⁾ < 2 min. ³⁾ > 2 s (T1)	$2 \cdot I_n$	$3 \cdot I_n$	> 0.2 s < 0.2 s

Koska varsinkin teollisuudessa kaapeleiden kuormitusvirrat ovat suuria, joudutaan usein käyttämään useaa saman kokoista kaapelia rinnakkain, jotta päästään rahallisesti tai asennustavaltaan järkevään ratkaisuun. Rinnankytkettyjen johtimien ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa yhdellä ylikuormitussuojalla, jos johtimia ei ole haaroitettu tai niissä ei ole erotus- tai kytkinlaitteita sekä johtimien virrat eivät poikkea toisistaan yli 10 %. Jos rinnankytkettyjen johtimien virrat eroavat toisistaan yli sallitun, on johtimien kuormitettavuus sekä ylivirtasuojaus käsiteltävä erikseen. (D1-2012 2013, 135.)

3.7 Oikosulkusuojaus

3.7.1 Vaatimukset

Sähkönjakelujärjestelmän osat on mitoitettava kestämiään niiden vikatilanteessa niiden läpikulkeva oikosulkuvirta, joka syntyy kahden tai useamman virtajohtimen välisestä pienestä impedanssisesta eristysviasta. Verkon komponenttien on kestettävä oikosulkuvirrasta aiheutuvat dynaamiset sekä termiset rasitukset. Dynaaminen rasitus tarkoittaa oikosulun syntymishetken virtasysäyksestä aiheutuvaa repäisevää voimaa. Tätä virtaa kutsutaan sysäisoikosulkuvirraksi i_p . Terminen rasitus tarkoittaa oikosulkuvirran aiheuttamaa lämpenemää komponentissa. Termisen rasituksen aiheuttavaa

oikosulkuvirtaa kutsutaan termiseksi oikosulkuvirraksi I_{TH} . Dynaaminen sekä termi- nen oikosulkuvirta määritetään alku- eli maksimioikosulkuvirrasta sekä jatkuvasta oi- kosulkuvirrasta. Komponenttien oikosulkukestoisuudet määritellään suuremmaksi kuin laskemalla saadut oikosulkuvirta-arvot. (Puttonen 2014.)

Verkon komponenttien oikosulkukestoisuuden lisäksi täytyy verkossa olla toimiva oi- kosulkusuojaus, joka katkaisee oikosulkuvirran reitin vikapaikkaan. Katkaisun täytyy toimia tarpeeksi nopeasti, jottei oikosulkuvirta aiheuta komponenteissa liiallista läm- penemää. Oikosulkusuojauksen nopeuteen vaikuttaa oikosulkuvirran suuruus. Suo- jauksen toimivuuden tarkastelu tapahtuu laskemalla suojattavan verkon minimioiko- sulkuvirta. (D1-2012 2013, 138.)

Oikosulkusuojan sijoitteluun pätee samat standardin 6000 mukaiset vaatimukset kuin ylikuormitussuojalla. Käytännössä oikosulkusuoja kuitenkin asennetaan kaapelin al- kupäähän, kuten ylivirtasuoja. Tästä johtuen ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus toteu- tetaankin usein yhdellä suojalaitteella. Tässä tilanteessa on suojalaitteen suojattava johdinta lämpenemistä ylivirralla sekä kaiken suuruisilta oikosulkuvirroilta. Jos suo- jaukset toteutetaan erillisillä suojalaitteilla, täytyy varmistua siitä, ettei oikosulkusuo- jan lävitse kulkeva energia (I^2t) ei ylitä ylikuormitussuojan energian kestoisuusarvoa. (D1-2012 2013, 145.)

Rinnankytkettyjen johtimien tilanteessa on huomioitava rinnankytketyssä osuudessa tapahtuva oikosulku. Virta pääsee kiertämään johtimien liitoksen kautta oikosulku- kohtaan johtimen kummastakin päästä. Tästä johtuen, jos rinnankytketyt kaapelit suojataan vain yhdellä oikosulkusuojalla, on varmistettava sen toiminta myös jakaan- tuneella oikosulkuvirralla. Jos rinnakkaisten johtimien suojaus ei toimi oikein yhdellä suojalla tulee toteuttaa suojaus jollakin seuraavista menetelmistä.

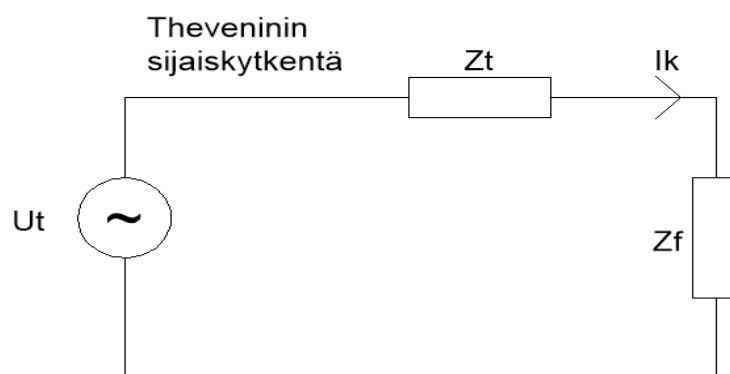
- Jos oikosulun vaara saadaan mahdollisimman pieneksi esimerkiksi mekaani- sella suojalla, voidaan käyttää vain yhtä oikosulkusuojalaitetta.
- Kahdella rinnankytketyllä johtimella riittää oikosulkusuojaus kunkin rinnan- kytketyn johtimen alkuun.
- Kolmella tai useammalla rinnankytketyllä johtimella oikosulkusuojaus täytyy sijoittaa kunkin johtimen alku- ja loppupäähän.

(D1-2012 2013, 143-144.)

Käytettävien suojalaitteiden hinnat nousevat mitä suuremmaksi oikosulkuvirran kestoisuus kasvaa. Tästä johtuen on oikosulkuvirtaa usein rajoitettava esim. sulakkeella, jotta keskuksen komponenttien kestoisuus saadaan mielekkäälle tasolle. Sulakkeilla on hyvä oikosulkuvirran rajoitus varsinkin pienillä nimellisvirran arvoilla. Sulakkeen oikosulun rajoitus saadaan selvitettyä sulakkeen valmistajan antamasta graafisesta kuvaajasta. (Oikosulkusuojaus 2000, 10.)

3.7.2 Oikosulkuvirtojen laskenta

Oikosulkuvirtojen laskennassa käytetään Theveninin menetelmää, jossa syöttävä sähköverkko korvataan 1-vaiheisella sijaiskytkennällä. Kytkentä muodostuu jännitelähteestä U_T , joka kuvaa vikapaikan jännitettä, impedanssista Z_T , joka kuvaa verkon komponenttien kokonaisimpedanssia sekä mahdollisesta vikaimpedanssista Z_F eli oikosulupaikan impedanssia. (Puttonen 2014.) Kuvio 2 havainnollistaa kytkentää.



Kuvio 2. Theveninin sijaiskytkentä

Maksimioikosulkuvirran laskenta

Maksimioikosulkuvirta laskennassa otetaan huomioon kaikki verkon komponentit, jotka voivat aiheuttaa oikosulkuvirtaa, kuten esimerkiksi moottorit ja generaattorit. Laskenta täytyy suorittaa sille verkon kytkentähetkelle, jolloin siihen kohdistuu suurin oikosulkuvirta. Tämä tarkoittaa myös sitä, että vikaimpedanssin Z_F oletetaan olevan nolla sekä kaapelien lämpötilan oletetaan olevan $+20\text{ °C}$, jolloin niiden resistanssit ja reaktanssit ovat pienempiä. Suurin oikosulkuvirta syntyy 3-vaiheisessa oikosulussa. (Oikosulkusuojaus 2000.)

Maksimi 3~ oikosulkuvirta I_K'' lasketaan kaavasta 28.

$$I_K'' = \frac{c_{MAX} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MAX} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (28)$$

jossa

C_{MAX} = standardin antama varmuuskerroin, joka kattaa pienet jännitteen nousut.

Pienjänniteverkoissa kertoimeksi annetaan 1,05.

R_T = 3-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisresistanssi.

X_T = 3-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisreaktanssi.

Jatkuvan oikosulkuvirran laskenta

Jatkuva oikosulkuvirta lasketaan tilanteessa, jossa moottorit eivät enää aiheuta oikosulkuvirtaa piiriin (Puttonen 2014.).

Jatkuva oikosulkuvirta I_K lasketaan kaavasta 29.

$$I_K = \frac{c_{JATK} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{JATK} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (29)$$

jossa

C_{JATK} = standardin antama varmuuskerroin, joka kattaa pienet jännitteen nousut.

Pienjänniteverkoissa kertoimeksi annetaan 1,05.

R_T = 3-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisresistanssi.

X_T = 3-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisreaktanssi.

Minimi oikosulkuvirran laskenta

Pienjänniteverkossa pienin oikosulkuvirta syntyy 1-vaiheisessa oikosulussa, jossa oikosulkuvirta kulkee suojajohdinta pitkin takaisin muuntajan tähtipisteeseen. Tästä johtuen laskentaan pitää huomioida myös suojajohtimen resistanssi sekä reaktanssi. Minimioikosulussa johtimen lämpötilaksi oletetaan olevan +70°C, jolloin sen impedanssi on suurimmillaan. Minimi 1-vaiheinen oikosulkuvirta I_{KMIN} lasketaan kaavasta 30. (Puttonen 2014.)

$$I_{KMIN} = \frac{c_{MIN} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MIN} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (30)$$

jossa

c_{MIN} = standardin antama varmuuskerroin, joka kattaa pienet jännitteen laskut. Pienjänniteverkoissa kertoimeksi annetaan 0,95.

R_T = 1-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisresistanssi.

X_T = 1-vaiheisen vikavirtapiirin komponenttien kokonaisreaktanssi.

Sysäysoikosulkuvirran laskenta

Sysäysoikosulkuvirta i_p lasketaan säteittäisissä verkoissa kaavoista 31 ja 32.

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_K'' \quad (31)$$

$$\kappa = 1,022 + 0,969 \cdot e^{\frac{-3,03 \cdot R_T}{X_T}} \quad (32)$$

Termisen oikosulkuvirran laskenta

Terminen oikosulkuvirta I_{TH} määritetään usein 1 s:n ajalle, koska komponenttien valmistajat antavat termisiä kestoisuuksia juuri sille ajalle. Terminen oikosulkuvirta lasketaan kaavasta 33.

$$I_{TH} = I_K'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (33)$$

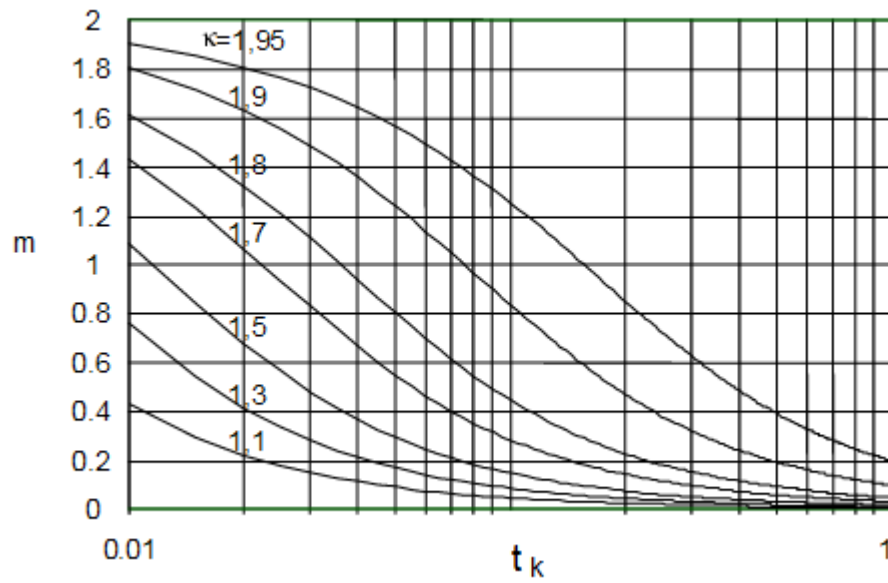
jossa

m = vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutus.

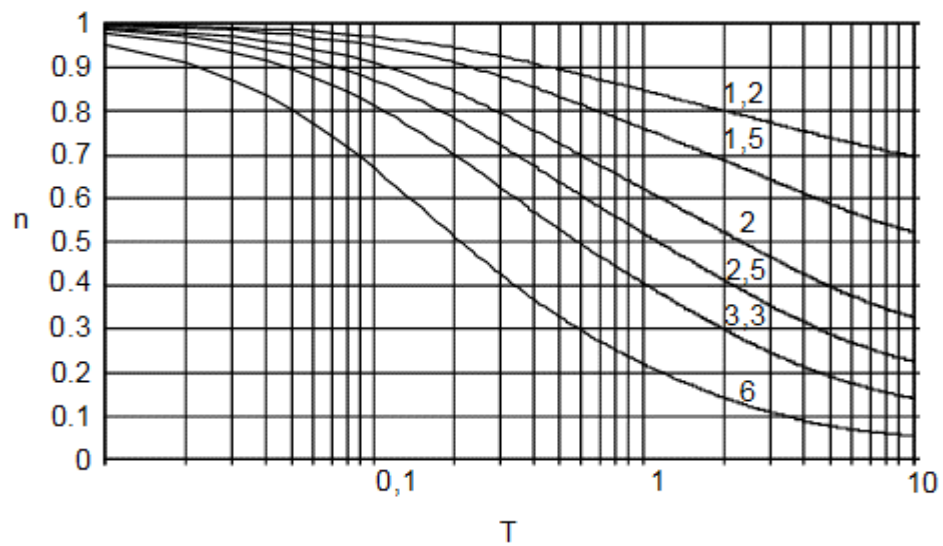
n = vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutus.

m ja n arvot saadaan määritettyä kuvioista 3 ja 4.

Vaimenevan vaihto- ja tasavirtakomponenttien vaikutuksen arvot saadaan kuvioista 3 ja 4. m -arvon määrittämiseen käytetään sysäysoikosulkuvirran laskennassakin käytettyä oikosulkuvirran sysäyskerrointa κ . n -arvon määrittämiseen käytetään alkuarvon ja jatkuvuustilan arvon suhdetta I_K''/I_K . (Oikosulkusuojaus 2000.)



Kuvio 3. Tasavirtakomponentin m riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta (Oikosulkusuojaus 2000.)



Kuvio 4. Vaihtovirtakomponentin n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja jatkuvuustilan arvon suhteesta I_k''/I_k (Oikosulkusuojaus 2000.)

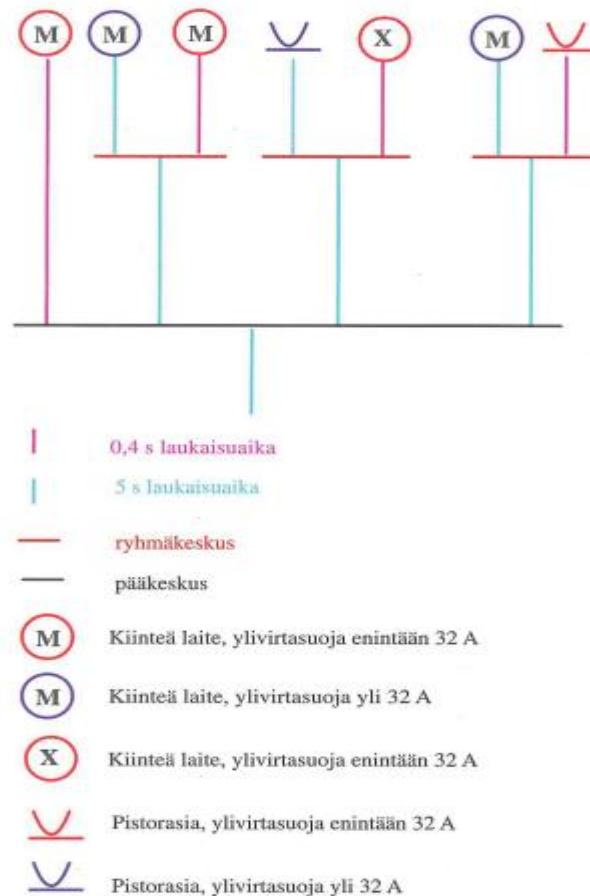
3.8 Vikasuojaus

Vikasuojauksella estetään vaaratilanteet, joissa eristevian tms. seurauksena jännitteiseksi tulleet johtavat osat kosketuksen seurauksena aiheuttavat oikosulkupiirin ihmisen tai kotieläimen lävitse. Vikasuojaus voidaan standardin SFS 6000 mukaan toteuttaa

- estämällä virran kulku ihmisen tai kotieläimen kautta
- rajoittamalla ihmisen tai kotieläimen kautta kulkeva vikavirta vaarattomaan arvoon
- rajoittamalla viasta johtuvan kehon kautta mahdollisesti kulkevan virran kesto aika vaarattoman lyhyeksi.

Yleensä vikasuojaus tehdään kolmannen kohdan mukaisesti automaattisen poiskytkennän avulla. (SFS 600-1 2012, 30; D1-2012 2013, 84.)

Vikasuojauksen suunnittelussa suojauksen toteutumisen tarkastamiseksi on selvitettävä pienin sallittu oikosulkuvirran arvo, jolla valittu suojalaite toimii vaaditussa ajassa. Liitteen 1 taulukoissa on esitetty pienin sallittu oikosulkuvirta eri suojalaitteilla eri toiminta-aikoina. Lasketun minioikosulkuvirran täytyy siis olla suurempi kuin taulukoista saatu suojalaitteen pienin sallittu oikosulkuvirta-arvo, jotta suojalaite toimii vaaditussa ajassa. Jos suojaus ei toimi tarpeeksi nopeasti, voidaan sitä korjata suuremmalla kaapelin poikkipinnalla, jolloin virtaa rajoittava impedanssi pienenee kaapelissa tai muuttaa suojausta (esim. sulaketta) nopeampaan tyyppiin. (D1-2012, 2013, 92.) Poiskytkentäajat ovat kuvion 5 mukaiset eri virtapiireille.



Kuvio 5. SFS-6000 standardin vaatimukset poiskytkentäajoille eri virtapiireille (D1-2012, 2013, 92.)

3.9 Selektiivisyys

Suojalaitteiden suunnittelussa on tärkeää, että ylikuormitus- tai oikosulkuilanteissa suunniteltavat laitteet toimivat selektiivisesti. Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että suojalaite toimii ainoastaan sen varsinaisella suojausalueella. Eli jos esimerkiksi ryhmäjohtolähdössä tapahtuva oikosulku laukaisee ryhmää syöttävän keskuksen etusuo-
jat, ei suojausta ole suunniteltu selektiivisesti. (D1-2012, 2013, 265.)

Selektiivisyyttä voidaan tarkastella suojalaitteiden ominaiskäyriä vertailemalla. Jos jälkimmäisen suojalaitteen ominaiskäyrä on edellisen suojalaitteen ominaiskäyrän alapuolella eivätkä käyrät leikkaa toisiaan suunnitellulla ylivirran arvolla, saadaan suojaus selektiiviseksi. Vertailussa on tärkeää vertailla jälkimmäisen laitteen ylintä toimintakäyrää ja edellisen suojalaitteen alinta toimintakäyrää. Suojalaitteiden toimintakäyrät saadaan laitteiden valmistajilta. Selektiivisyys on kannattavaa järjestel-

mällisyyden kannalta, mutta se ei ole pakollista turvallisuuden kannalta. Joskus selektiivisyyden toteutus voi johtaa liialliseen ylimitoitukseen. Selektiivisyydellä voidaan estää vian aiheuttaman sähkökatkon leviämistä laajemmalle verkkoon, mutta joskus siitä joudutaan tinkimään henkilöturvallisuuden vuoksi, joka on aina suojausten suunnittelussa tärkein tavoite. (D1-2012, 2013, 265.)

Kuviossa 6 nähdään toteutunut suojalaitteiden selektiivisyys, jota on tutkittu ABB DOC -mitoitushjelmalla. Kuvassa vasemmanpuoleinen käyrä on edellisen suojan käyrä, ja nähdään, että se laukeaa nopeammin kaikilla ylivirran arvoilla verrattuna sulakkeen toimintakäyrään.



Kuvio 6. 63A-sulakkeen ja 250A-ilmakatkaisijan toimintakäyrät

4 Hajautetun sähköntuotannon liittäminen verkkoon

Hajautetulla sähköntuotannon avulla saadaan kytkeytyvän verkon häviöitä pienennettyä, jännitteen laatua parannettua sekä lisättyä verkon kapasiteettia tai toiselta kantilta katsottuna pienennettyä kuluttajan sähkön siirto- ja energiamaksuja. Jotta verkkoon liittäminen tapahtuu oikein, on huomioitava sähköverkon käyttäytyminen eri tilanteissa. Normaalisissa tilanteissa teho kulkeutuu vain yhteen suuntaan, jakeluverkosta kulutuskohteisiin. Kun verkkoon liitetään hajautettua tuotantoa voi sen tuottama teho siirtyä myös jakeluverkkoon. Sähköntuotannon liittämisessä sähköverkkoon on noudatettava tiettyjä määräyksiä sekä ohjeita, jotta saavutetaan turvallinen ja häiriötön toiminta.

Ennen tuotantolaitoksen hankintaa täytyy asianomaisen ottaa yhteyttä paikalliseen sähköverkonhaltijaan, koska tuotantolaitosta ei saa kytkeä verkkoon ilman heidän lupansa. Sähköverkonhaltija voi myös varmistaa järjestelmästäan soveltuuko laitos liittämispaikkaan. Tällä ennakoivalla toiminnalla estetään tilanne, jossa jo hankittu laitteisto ei täytä vaatimuksia ja sen liittäminen sähköverkkoon evätään. Myös ennakoivalla toiminnalla mahdollistetaan jakeluverkonhaltijan valmistautuminen mahdollisiin verkon muutostöihin, joita liitettävä tuotantolaitos vaatii. (Lehto 2016.)

4.1 Tekniset vaatimukset

Kaikkien sähköä verkkoon syöttävien laitteiden täytyy täyttää niille asetetut tekniset vaatimukset, jotta varmistutaan siitä, ettei tuotettu sähkö aiheuta häiriöitä verkkoon kytketyissä laitteissa. Vaatimusten täytyminen myös varmistaa käyttäjien ja sähköverkon parissa työskentelevien turvallisuuden. (Lehto 2016.)

Standardin SFS-6001 mukaan tuotantolaitoksen liittämisessä yleisen jakeluverkon rinnalle täytyy huolehtia siitä, että jakeluverkkoon ei aiheudu kytkemisestä häiriöitä, kuten esimerkiksi tehokertoimen muutos, jännitteen muutokset, verkkojännitteen vääristymät, vaiheiden epäsymmetria tai käynnistyksen ja tahdistuksen aiheuttamat häiriöt. Häiriöiden lisäksi on huolehdittava, että tuotantolaitoksen generaattorin kytkeytyminen yleiseen jakeluverkkoon on estetty, jos verkkosyöttö katkeaa tai sen jännite tai taajuus poikkeaa normaaleista arvoista. Tätä edellä mainittua suojausta kutsutaan

Loss of Mains-suojaukseksi, johon käytetään tiettyjä havaitsemistekniikoita. Yleisimpiä havaitsemistekniikoita ovat yli- ja alijännite sekä -taajuusreleet. Nämä kuitenkin voivat toimia epätarkasti ja hitaasti suuren katvealueensa takia. Relesuojauksen lisäksi voidaan lisäsuojauksena käyttää tehokkaampia havaitsemistekniikoita. Näistä yleisempinä ovat ROCOF-rele eli taajuuden muutosnopeuteen perustuva rele tai jännitteen vaihesiirtymää tai vektorihyppyä mittaava rele. (D1-2012, 2013, 317-318; Voima 2009.) Taulukosta 2 nähdään verkostosuosituksen YA9:09 mukaiset suojauksen asetteluarvot ja toiminta-ajat.

Taulukko 2. Verkostosuosituksen liittymän suojauksen asetteluarvot (Verkostosuositus YA9:09, n.d.)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,15 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	1,5 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0,5 s	48 Hz
Loss of Mains*	0,15 s	

Generaattorilaitteisto on varustettava laitteilla, joilla se saadaan erotettua yleisestä jakeluverkosta. Tämän erotuskohdan laitteisiin on jakeluverkon haltijalla oltava jatkuva pääsy ja laitteet on oltava heidän käytettävissään. (SFS 600-1 2012, 331.)

Generaattorilaitteiston tulee toimia siten, että standardin mukaiset suojaukset lämmön vaikutuksilta sekä ylivirralla toimivat kaikissa tilanteissa. Laitteisto tulee asentaa kaikkien ryhmäjohtojen suojalaitteiden syötön puolelle tai yhden ryhmäjohtoon kaikkien suojalaitteiden kuormitusten puolelle, jolloin asennuksen tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- Generaattoria ei saa kytkeä pistokytkimellä ryhmäjohtoon.
- Ryhmäjohtoon johtimien täytyy toteuttaa alla olevan kaavan vaatimukset

$$I_Z \geq I_N + I_G$$
jossa
 I_Z = ryhmäjohtoon johtimien todellinen kuormitettavuus
 I_N = ryhmäjohtoon suojalaitteen mitoitusvirta

I_G = generaattorilaitteiston mitoitusulostulovirta.

- Ryhmäjohtoja suojaavan vikavirtasuojan pitää suojata kaikki jännitteiset johtimet mukaan luettuna nollajohdin.
- Generaattorilaitteiston ääri- ja nollajohtimia ei saa kytkeä maahan ryhmäjohtojen suojalaitteiden jälkeen.

(SFS 600-1 2012, 329-330.)

JE-Siirto Oy:n pienjänniteverkon rinnalle liityttäessä tuotantolaitoksen tekniset vaatimukset on jaettu yli 100 kVA sekä enintään 100 kVA tuottaviin laitoksiin.

Enintään 100 kVA:n tuotantolaitos

Enintään 100 kVA tuottavien laitosten yksivaiheinen ylivirtasuojaus voidaan toteuttaa sulakkeella tai johdonsuoja-automaatilla. Kolmivaiheinen toteutus vaatii aina suojarleen, joka ohjaa kytkinlaitetta. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Tuotantolaitos on toteutettava yli- alijännite sekä -taajuus suojauksilla. Laitoksen tuottama jännite saa ylittää 10 %:lla ja alittaa 15 %:lla jakeluverkon nimellisjännitteen. Yli- ja alijännitesuojauksen on toimittava 2s:n kuluttua jännitteen muutoksesta. Yli- ja alitaajuuden suojauksen on irti kytkettävä tuotantolaitos jakeluverkosta, jos taajuus ei pysy 48 ja 51 Hz:n välissä. Toiminta-aika taajuudensuojaukselle on annettu myös 2 sekuntia. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Tuotantolaitoksen generaattori on tahdistettava jakeluverkkoon ennen kytkentää. Jakeluverkon tippuessa kokonaan on kytkinlaitteen toimittava 5 sekunnin kuluttua jännitteen katoamisesta. Tuotantolaitos saa kytkeytyä verkkoon, kun jännite on ollut palautuneena vähintään 10 minuutin ajan sekä jännite on laadullisesti normaaleissa arvoissa. Kytkentälaitteena on käytettävä katkaisijaa tai kontaktoria, jossa on oltava mekaanisesti lukittava kytkin tai erotin. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Yli 100 kVA:n tuotantolaitos

Yli 100 kVA tuotantolaitoksissa ylivirtasuojaus on toteutettava ylivirtareleellä, joko vakio- tai käänteisaikaisella toiminta-ajalla. Ylivirtareleen mittausta on toteutettava virtamuuntajilla, joiden tarkkuusluokka oltava 10P. Oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa myös ylivirtareleellä, jos siinä on kaksi erillistä ja toiminta-aikojen mukaisesti aseteltavaa virtarelettä. Oikosulkusuojauksen on toimittava vähintään 0,1 sekunnissa mukaan lukien kytkinlaitteen toiminta-aika. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Tuotantolaitos yli- ja alijännitesuojauksella on toteutettava jännitereleellä, jossa on säädettävä toiminta-arvo sekä -aika. Yli- ja alitaajuussuojauksella on toteutettava erillisellä releellä. Asetteluraja sekä toiminta-aika vaatimukset releillä on kuten enintään 100kVA:n tuotantolaitoksien suojausluokilla. Suojauksien mahdollisissa jännitemuuntajissa on käytettävä suojausluokkaa 3P ja niiden on oltava yksivaiheisia. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Tuotantolaitoksessa täytyy olla loistehon mittausta sekä säätölaitteisto, jonka täytyy pitää laitoksen tehokerroin yli 0,95. Tuotantolaitos ei saa tuottaa jakeluverkkoon yliaaltoja. Ennen kuin tuotantolaitos liitetään verkkoon käy JE-Siirto Oy suorittamassa yliaaltomittauksen. Tuotantolaitokset on varustettava yliaaltojen suodatuksella. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Jakeluverkkoon kytkentälaitteena on oltava katkaisija tai kontaktori, minkä on toimittava suojauslaitteiden laukaisukäskystä. JE-Siirto Oy:llä täytyy olla kytkentäpiste ohjauslaitteelle kytkentälaitteen auki ohjauksen virtapiirissä, jotta he saavat tarvittaessa erotettua tuotantolaitos verkosta. Kytkentälaitteessa on oltava myös mekaanisesti lukittava kytkin tai erotin. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

Tuotantolaitoksen generaattori on tahdistettava jakeluverkkoon ennen kytkentää. Jakeluverkon tippuessa kokonaan on kytkinlaitteen toimittava 2 sekunnin kuluttua jän-

nitteen katoamisesta. Tuotantolaitos saa kytkeytyä verkkoon, kun jännite on ollut palautuneena vähintään 10 minuutin ajan sekä jännite on laadullisesti normaaleissa arvoissa. (Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon, 2016.)

4.2 Sähkön tuotannon mittaus

Verkonhaltija on vastuussa yleisestä jakeluverkosta ja verkkoon päin menevän sähkön mittauksesta. Mittari on verkonhaltijan omistuksessa ja vastaa sen luennasta. Oman tuotannon kulutuksesta mittausvastuu on taas sähkön tuottajalla. (Lehto 2016.)

Alle 100 kVA sähköntuotantolaitos ei vaadi omaa mittalaitetta, vaan mittaus voidaan toteuttaa kohteen etäluettavalla mittarilla, joka mittaa sähköverkosta otetun ja siihen syötetyn energian. (Lehto 2016.)

Yli 100 kVA tuotantolaitos täytyy varustaa erillisellä mittauksella, jolla saadaan lasketua oman tuotannon kulutus eli energiamäärää joka tuotetaan ja käytetään suoraan kohteessa. Oman tuotannon kulutuksesta joutuu tuottaja maksamaan sähkövero, jos tuotantolaitoksen vuosituotanto ylittää 800 000 kWh. (Lehto 2016)

4.3 Sähköntuotannon liittämisen vaikutus sähköverkon mitoitukseen

Hajautetun sähköntuotannon liittämisessä laitoksen sähköverkon rinnalle voidaan ajatella sen olevan negatiivista kuormitusta eli tuotannon generaattori tuottaa jännitettä laitokselle. Teoriassa sähköntuotanto vähentäisi sen liittymispisteen ja jakeluverkon välisien kaapeleiden kuormitusta, mutta johdon mitoitusta voidaan keventää vain silloin, kun tiedetään laitoksen tuottavan sähköä suurten kuormitusten aikana. (Lakervi, Partanen 2008, 211.)

Jos hajautettua tuotantoa on tarkoitus käyttää saarekekäyttönä, on generaattorin tuotto mitoittettava vastaamaan saarekkeeseen jäävää kuormitusta. Jos generaattorin koko on rajallinen, täytyy saarekekäytöllä toteuttaa kuormitusten tiputusta. Oikosulkukestoisuuksien mitoituksessa on otettava huomioon tuotantolaitoksen aiheut-

tama oikosulkuvirran kasvu. Lasketaan siis tuotantolaitoksen generaattorin aiheuttama maksimioikosulkuvirran arvo yhteen muun verkon maksimioikosulkuvirran arvon kanssa. Vikatilanteessa tahtigeneraattorin maksimioikosulkuvirta on noin 5.5-7.3 kertainen verrattuna nimellisvirtaan. Epätahtigeneraattorilla samainen kerroin on noin 3-8, joka vastaa suuruusluokaltaan generaattorin käynnistyksestä aiheutuvaa käynnistysvirtaa. (Repo 2003.)

Oikosulkusuojauksen kannalta täytyy tuotantolaitoksen liittäminen verkkoon huomioida suojauksen toimivuus kaikilla kytkentä hetkillä. Jos tuotantolaitoksella on mahdollisuus kytkeytyä syöttämään laitoksen verkkoa saarekkeena, täytyy suojauksien toimia myös tuotantolaitoksen tuottamalla oikosulkuvirralla vikatilanteessa. Suojauksien toiminta-ajat sekä arvot on siis aseteltava siten, että suojaus toimii myös tuotantolaitoksen aiheuttamalla oikosulkuvirta-arvolla. (Lakervi, Partanen 2008, 212.)

5 Biokaasulaitoksen mitoitustyö ja ohjaukset

Mustankorkean biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus alkoi lähtötietojen selvityksellä. Laitos liitettiin osaksi Mustankorkean alueen sähköverkkoa. Kytkentäpisteeksi muodostui jo alueella olemassa oleva pienjännitemuuntaja, josta oli myös lähtö viereiseen kompostointilaitokseen. Lähtötiedoiksi saatiin myös asiakkaalta prosessin eriosien sähköisiä kuormituksia, jotka olivat lähinnä moottorien tehoarvioita. Lisäksi asiakkaalta saatiin kuormitusten samanaikaisuuskertoimet sekä mahdolliset varaukset, jotka oli syytä ottaa mukaan teholaskentaan. Asiakkaan pyynnöstä täytyi ylimitoitusta ja varojen jättämistä välttää. Näiden tietojen perusteella toteutettiin laitoksen tehon tarpeen sekä kuormitusvirran laskenta. Kuormitusvirran avulla voitiin määrittää biokaasulaitoksen syöttösulakkeiden koko muuntamalla, joka vastaa liittymän kokoa.

Biokaasulaitokseen oli tarkoitus tulla CHP-laitteisto, joka tuottaa laitokselle lämpöä sekä sähköä prosessin tarpeisiin. Ylimääräinen sähkö oli tarkoitus syöttää verkkoon alueen muihin kulutuskohteisiin. Laitteiston pienjännitesähkögeneraattori oli tarkoi-

tus kytkeä laitoksen pääkeskukseen. Generaattori olisi siis kytketty laitoksen sähköverkon kanssa rinnan. Generaattorin oli tarkoitus toimia varavoimana biokaasulaitokselle.

5.1 Huipputehon laskenta

Huipputeho laskettiin liitteen 2 mukaisesti. Liitteessä on esitetty kuormitukset, joille on määritetty laiteryhmän sisäinen kerroin. Laiteryhmän kokonaisteho kerrottiin ryhmän sisäisellä tasaisuuskertoimella k_1 , josta saatiin laiteryhmän teho. Laitteille oli määritetty myös laiteryhmien välinen samanaikaisuuskerroin k_2 . Kerrottiin laiteryhmän teho samanaikaisuuskertoimella, mistä saatiin todellinen mitoitusteho. Nämä yhteen laskemalla saatiin huipputeho P_h , josta laskettiin kokonaisnäennäisteho kaavan 1 mukaisesti.

$$S_{\text{tot}} = \frac{P_h}{\cos(\varphi)} = \frac{351,4\text{kW}}{0,85} = 413,4\text{kVA}$$

Laskennassa otettiin huomioon loisteho käyttämällä tehokerrointa 0,85. Vaikka Harrian opetusmateriaalissa pienteollisuudelle tehokerroimeksi on annettu 0,75, oli soveliaista käyttää kerrointa 0,85, koska laitoksen moottorikäytöt oli tarkoitus toteuttaa pääosin taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajan verkosta ottama loisteho on huomattavasti pienempi mitä verkkoon suoraan kytketty oikosulkumoottori ottaisi.

Kokonaisnäennäistehosta laskettiin laitoksen kuormitusvirta I_B kaavan 2 mukaisesti:

$$I_B = \frac{S_{\text{tot}}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{413400\text{VA}}{\sqrt{3} \cdot 400\text{V}} = 597\text{A}$$

5.2 Keskusten nimellisvirtojen laskenta

Jakelujärjestelmän tyypiksi valikoitui porrastettu jakelu. Päätös oli helppo, koska laitos muodostui eri rakennuksista ja eri osista, jolloin niihin oli luonnollista laittaa oma keskus. Myös alueen muut laitokset oli rakennettu samalla tyyppillä. Pää- ja alakeskusten paikat määritettiin laitokseen, jonka jälkeen voitiin jakaa kuormitukset niitä syöt-

täviin keskuksiin. Kuormitusten laskennan avulla voitiin määrittää keskusten nimelliskoot. Koska asiakkaalta ei saatu tarkempia tietoja kulutuslaitteistoista, kuten esimerkiksi tehokerrointa, päätettiin käyttää samaa yhteistä tehokerrointa, kuin laitoksen kuormitusvirran selvityksessä. Liitteessä 3 nähdään keskuksien nimellisvirtojen määrittäminen sekä alla esimerkki laskenta.

Esimerkki keskuksen nimellisvirran laskennasta

Laskettiin pätötehot yhteen ja käytettiin yhteistä tehokerrointa, jolloin saadaan laskettua kokonaisnäennäisteho.

$$P_{\text{totAK7}} = 107,1\text{kW}$$

$$S_{\text{totAK7}} = \frac{P_{\text{totAK7}}}{\cos(\varphi)} = \frac{107,1\text{kW}}{0,85} = 126,0\text{kVA}$$

Lopuksi lasketaan keskuksen kuormitusvirta kaavalla 6.

$$I_{B\text{AK7}} = \frac{S_{\text{totAK7}}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{126000\text{VA}}{\sqrt{3} \cdot 400\text{V}} = 182\text{A}$$

Valitaan keskuksen nimellisvirraksi 200A.

5.3 Kaapelien mitoitus

Laitoksen syöttökaapelit mitoitettiin laitoksen kuormitusvirran mukaan ottaen huomioon myös laitosta syöttävien sulakkeiden koko. Kaapelit oli tarkoitus asentaa suoraan maahan muuntamolta pääkeskukselle. Kaapeleiksi määräytyi neljä kaapelia rinnakkain ja lisäksi samaan kaapeliojaan tuli myös muita kaapeleita, jolloin täytyi ottaa myös ne huomioon korjauskertoimissa.

Pääkeskus sijaitsi laitoksen syöterakennuksessa olevassa automaatiotilassa. Alakeskukset sijaitsivat joko syöterakennuksessa tai erillisessä konttirakennuksessa. Konttirakennuksiin kaapelireitti meni maan kautta, josta kaapelit nousivat hyllylle eli jouduttiin tarkastelemaan huonoimman kuormituksen omaava asennustapa ja tehdä kaapelin mitoitus kuormituksen mukaan siten. Syöterakennuksessa kaapelit kulkivat tikashyllyä pitkin, jolloin täytyi ottaa huomioon vain viereisten kaapelien vaikutus

korjauskerroin. Kaapelit mitoitettiin 35°C lämpötilan mukaan, koska kaapelit olivat joko ulkona tai sisällä tilassa, jossa ei ollut koneellista jäähdytystä lukuun ottamatta sähköpääkeskustilaa.

Kun kaapelien koot oli mitoitettu kuormituksen mukaan, tarkasteltiin myös ylikuormituksen vaikutus kaapelikokoon. Koska kaikissa lähdöissä käytettiin yli 13A:n gG-kahvasulakkeita, oli laukaisurajavirta kaikilla sulakkeilla $1,6 \cdot I_N$.

Kaapelien mitoituksessa otettiin myös huomioon kaapelien jännitteenalenemat. Tätä varten täytyi laskea kaapelointireiteille pituus sekä etsiä käytettävien kaapeleiden ominaisarvot.

Kaapelien mitoitukset kuormituksen mukaan nähdään liitteessä 4. Liitteessä 5 tarkastellaan kaapelin ylivirtasuojauksen toteutuminen ja liitteessä 6 tarkastellaan kaapelien jännitteenalenemia.

Esimerkki alakeskuksen syöttökaapelin mitoitus

Kaapelin kuormitusvirta oli $I_B = 14 \text{ A}$. Etukojena oli tarkoitus toimia 25 A kahvasulakkeet. Kaapelina oli tarkoitus käyttää MCMK:ta eli PVC-eristeistä kuparikaapelia. Kaapelin oli tarkoitus kulkea tikashyllyllä 9 muun kaapelin kanssa vierekkäin. Ympäristön lämpötila oli +35°C.

Asennustapana oli siis E. Valittiin PVC-eristetyn kuparikaapelin johtimen nimelliseksi poikkipinnaksi 6mm^2 ja sitä vastaava peruskuormitettavuus $I_{ZP} = 45\text{A}$, jotta peruskuormitettavuus olisi suurempi kuin etukojeen nimellisvirta.

Sitten määritettiin korjauskertoimet vierekkäisten kaapeleiden sekä ympäristön lämpötilan vaikutukselle.

Ympäristön lämpötilan vaikutuskerroin $k_1 = 0,88$

Vierekkäisten kaapeleiden vaikutuskerroin $k_2 = 0,78$

Laskettiin kaapelin todellinen kuormitettavuus kaavalla 23.

$$I_Z = I_{ZP} \cdot k_1 \cdot k_2 = 45\text{A} \cdot 0,88 \cdot 0,78 = 30,9\text{A}$$

Mitoituksessa toteutui $I_B \leq I_Z$, eli $14 \text{ A} \leq 30,9 \text{ A}$, joten voitiin todeta 6 neliön kupa-rikaapelin olevan riittävä kuormituksen osalta.

Sitten tarkasteltiin kaapelin kestävyys ylikuormitustilanteessa. 25 A gG-sulakkeen I_2 -arvo on $1,6 \cdot I_N$. Arvot sijoitettiin suojauksen tarkastelun kaavoihin 26 ja 27.

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \rightarrow 14\text{A} \leq 25\text{A} \leq 30,9\text{A}$$

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \rightarrow 1,6 \cdot 25\text{A} \leq 1,45 \cdot 30,9\text{A} \rightarrow 40\text{A} \leq 44,8\text{A}$$

Voitiin todeta ylivirtasuojauksen toimivan sekä kaapelin kestävän hetkellinen ylikuormitus.

Seuraavaksi tarkasteltiin kaapelin jännitteenalenema. Laskettiin jännitteenalenema sulakkeen nimellisvirralla, jolloin voitiin varmistaa jännitteenalenema maksimi kuormituksella. Kaapelin pituus $s = 80 \text{ m}$. Tehokerroin $\cos(\varphi) = 0,85$. Kaapelin ominaisresistanssi $r_j = 3,08 \Omega/\text{km}$ ja -reaktanssi $x_j = 0,094 \Omega/\text{km}$.

$$\sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,53$$

Arvot sijoitettiin kaavaan 24 ja laskettiin jännitteenaleneman jännitearvo.

$$\begin{aligned} U_H^{(V)} &= I \cdot (R_j \cdot \cos(\varphi) + X_j \cdot \sin(\varphi)) = I \cdot (r_j \cdot s \cdot \cos(\varphi) + x_j \cdot s \cdot \sin(\varphi)) \\ &= 25\text{A} \cdot \left(\frac{3,08\Omega}{\text{km}} \cdot 0,08\text{km} \cdot 0,85 + \frac{0,094\Omega}{\text{km}} \cdot 0,08\text{km} \cdot 0,53 \right) \\ &= 5,34\text{V} \end{aligned}$$

jännitearvosta laskettiin prosentuaalinen jännitteenalenema kaavalla 25.

$$U_H'(\%) = \frac{U_H'(V)}{U_V(V)} \cdot 100 = \frac{5,34\text{V}}{\left(\frac{400\text{V}}{\sqrt{3}}\right)} \cdot 100 = 2,3\%$$

5.4 Oikosulkuvirtojen laskenta

5.4.1 Verkon mallinnus

Oikosulkuvirtojen laskentaa varten täytyi paikalliselta jakeluverkkoyhtiöltä pyytää biokaasulaitosta edeltävän verkon oikosulkuvirta. Sen avulla voitiin mallintaa taustaverkon oikosulkuresistanssi sekä -reaktanssi. Lisäksi mallinnettiin biokaasulaitosta syöttävä muuntamo, pääkeskuksen, alakeskusten sekä CHP-generaattorin syöttökaapelit, suoralähtö moottorit sekä CHP-generaattorilaitteisto. Liitteessä 7 esitellään verkon eri komponenttien mallinnus.

Taustaverkon mallinnus:

Jakeluverkkoyhtiöltä saatu oikosulkuvirta $I_{KQ} = 3877$ A sijoitetaan kaavaan 7.

$$Z_Q = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{KQ}} = \frac{20000V}{\sqrt{3} \cdot 3877A} = 2,98\Omega$$

Koska edeltävän verkon oikosulkuvirta oli annettu 20 kV puolella, täytyi sen arvo redusoida 0,4 kV jännitetasoon kaavalla 20.

$$Z'_Q = \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 \cdot Z_Q = \left(\frac{400V}{20000V}\right)^2 \cdot 2,98\Omega = 0,001191\Omega$$

Impedanssi jaetaan reaktanssiksi ja resistanssiksi kaavoilla 8 ja 9.

$$X'_Q = 0,995 \cdot Z'_Q = 0,995 \cdot 0,001191\Omega = 0,001185\Omega$$

$$R'_Q = 0,1 \cdot X'_Q = 0,1 \cdot 0,001191\Omega = 0,0001191\Omega$$

Muuntajan mallinnus:

Muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi $z_K = 6$ %.

Häviöteho $P_{KN} = 1278$ W.

Sijoitetaan arvot kaavoihin 12 ja 13.

$$Z_K = \frac{z_K}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{6\%}{100\%} \cdot \frac{400V^2}{1000000VA} = 0,0096\Omega$$

$$R_K = P_{KN} \cdot \frac{U_N^2}{S_N^2} = 1278W \cdot \frac{400V^2}{1000000VA^2} = 0,0002\Omega$$

Lasketuilla impedanssi ja resistanssi arvoilla lasketaan reaktanssi sijoittamalla arvot kaavaan 14.

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{0,0096\Omega^2 - 0,0002\Omega^2} = 0,0096\Omega$$

Syöttökaapelin mallinnus:

Pääkeskuksen syöttökaapeliksi oli mitoitettu 4xAXMK 4x240S. Kaapelin ominaisresistanssi r_j 20 °C:ssa oli 0,125 Ω/km, ominaisreaktanssi x_j oli 0,079 Ω/km sekä pituutta kaapelilla oli 190 m. Lasketaan arvoilla kaapelien resistanssi ja reaktanssi kaavalla 10 ja 11.

$$R_j = \frac{r_j \cdot s}{n} = \frac{0,125\Omega/\text{km} \cdot 0,19\text{km}}{4} = 0,0059\Omega$$

$$X_j = \frac{x_j \cdot s}{n} = \frac{0,079\Omega/\text{km} \cdot 0,19\text{km}}{4} = 0,0037\Omega$$

Jos halutaan resistanssin arvo 70 °C:ssa voidaan arvo kertoa 1,2.

$$R_{j70^\circ\text{C}} = 0,0059\Omega \cdot 1,2 = 0,0071\Omega$$

Kaapelin suojajohtin täytyi mallintaa, koska sitä tarvittiin minimioikosulkuvirran laskennassa. Suojajohtimen mallinnus toteutetaan samalla tavalla kuin vaihejohtimen mallinnus, mutta on otettava huomioon johtimen ominaisarvojen ero vaihe- ja suojajohtimen välillä.

Muut kaapelit mallinnettiin samalla tekniikalla kuin pääkeskuksen kaapelit.

Suoralähtömoottoreiden mallinnus:

Arvioitu suoralähtömoottoreiden yhteenlaskettu pätöteho $P_{SUM} = 176$ kW, moottoreiden yhteinen hyötysuhde $\eta = 0,9$ sekä tehokerroin $\cos(\varphi) = 0,8$. Sijoitetaan arvot kaavoihin 15 ja 16.

$$S_{SUM} = \frac{P_{SUM}}{\eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{176\text{kW}}{0,9 \cdot 0,8} = 244,4\text{kVA}$$

$$Z_M = \frac{1}{I_S/I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_{SUM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{400V^2}{244000VA} = 0,1309\Omega$$

Jaetaan impedanssi resistanssiksi ja reaktanssiksi kaavoilla 17 ja 18.

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M = 0,922 \cdot 0,1309\Omega = 0,1207\Omega$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M = 0,42 \cdot 0,0550\Omega = 0,0507\Omega$$

CHP-generaattorin mallinnus:

Generaattorin nimellinen näennäisteho S_N oli 450 kVA. Generaattorista ei saatu sen valmistajalta käämityksen resistanssi arvoa R_G , mutta saatiin generaattorin suhteellinen alkutilan reaktanssi $x_D'' = 12,2\%$ ja suhteellinen reaktanssi $x_D = 24\%$. Näiden avulla voitiin laskea generaattorin tahtireaktanssi X_D sekä alkutilan reaktanssi X_D'' kaavalla 19.

$$X_D'' = \frac{x_D''}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{12,2\%}{100\%} \cdot \frac{400V^2}{450000VA} = 0,0434\Omega$$

$$X_D = \frac{x_D}{100\%} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{24\%}{100\%} \cdot \frac{400V^2}{450000VA} = 0,0853\Omega$$

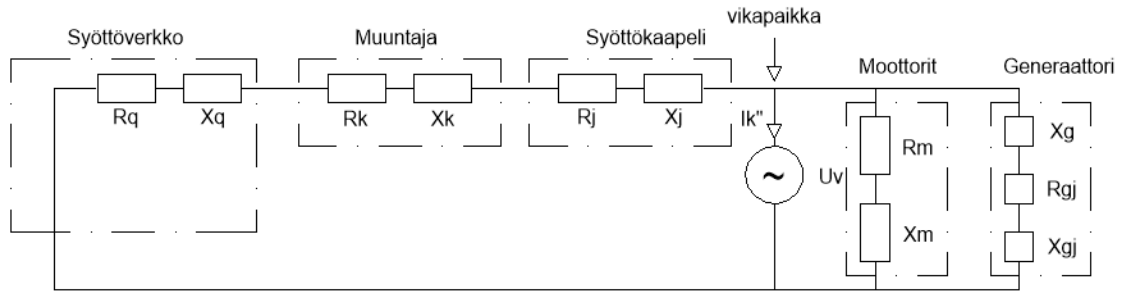
Resistanssi on suuritehoisissa generaattoreissa yleensä niin pieni, että se voidaan jättää laskelmissa huomioimatta.

5.4.2 Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskenta

Oikosulkuvirroista laskettiin aluksi maksimioikosulkuvirta ja jatkuvuustilan oikosulkuvirta pääkeskukselle generaattorin kanssa. Sen jälkeen määritettiin maksimi ja jatkuvuustilan oikosulkuvirrat alakeskuksille. Laskenta esimerkkinä alakeskuksesta on käytetty AK6 keskuksen laskentaa. Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskentaa ja tuloksia esitellään liitteessä 8.

Maksimioikosulkuvirran laskenta pääkeskukselle:

Maksimioikosulkuvirran laskenta tapahtui alla olevan kuvion 7 mukaisesta verkosta.



Kuvio 7. Pääkeskuksen maksimioikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.

Piirin yhteisen resistanssin ja reaktanssin laskennassa käytettiin vastuusten rinnankytkennän laskukaavaa.

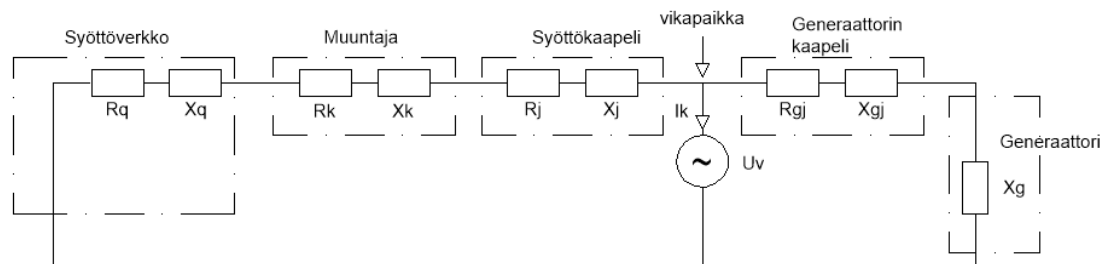
$$\begin{aligned}
 R_T &= \frac{1}{\frac{1}{R'_Q + R_K + R_j} + \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_{Gj}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{0,000119\Omega + 0,0002\Omega + 0,0059\Omega} + \frac{1}{0,0507\Omega} + \frac{1}{0,0022\Omega}} \\
 &= 0,0016\Omega \\
 X_T &= \frac{1}{\frac{1}{X'_Q + X_K + X_j} + \frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_D'' + X_{Gj}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{0,001185\Omega + 0,0095\Omega + 0,0037\Omega} + \frac{1}{0,1207\Omega} + \frac{1}{0,0434\Omega + 0,0011\Omega}} \\
 &= 0,0100\Omega
 \end{aligned}$$

Maksimioikosulkuvirta lasketaan kaavalla 28.

$$I_{K''} = \frac{c_{MAX} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MAX} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} = \frac{1,05 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0016\Omega^2 + 0,0100\Omega^2}} = 23,9kA$$

Jatkuvaosukuvirran laskenta pääkeskukselle generaattorin kanssa:

Jatkuvuustilan oikosulkuvirtojen laskennassa ei otettu huomioon enää moottorien aiheuttamaa oikosulkuvirtaa. Tilanne siis alla olevan kuvion 8 mukainen.



Kuvio 8. Jatkuvuustilan oikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.

Piirin yhteisen resistanssin ja reaktanssin laskennassa käytettiin kahden vastuksen rinnanlaskennan laskukaavaa.

$$R_T = \frac{(R'_Q + R_K + R_j) \cdot R_{Gj}}{R'_Q + R_K + R_j + R_{Gj}} = \frac{(0,000119\Omega + 0,0002\Omega + 0,0059\Omega) \cdot 0,0022\Omega}{0,000119\Omega + 0,0002\Omega + 0,0059\Omega + 0,0022\Omega}$$

$$= 0,0016\Omega$$

$$X_T = \frac{(X'_Q + X_K + X_j) \cdot (X_D + X_{Gj})}{X'_Q + X_K + X_j + X_D + X_{Gj}}$$

$$= \frac{(0,001185\Omega + 0,0095\Omega + 0,0037\Omega) \cdot (0,0853\Omega + 0,0011\Omega)}{0,001185\Omega + 0,0095\Omega + 0,0037\Omega + 0,0853\Omega + 0,0011\Omega}$$

$$= 0,0124\Omega$$

Jatkuvuustilan oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 29.

$$I_K = \frac{c_{MAX} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MAX} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} = \frac{1,05 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0016\Omega^2 + 0,0124\Omega^2}} = 19,3kA$$

Alakeskuksen AK6 maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskenta:

Alakeskuksen maksimi oikosulkuvirta laskettiin lisäämällä maksimioikosulussa olevan pääkeskuksen sijaiskytkennän kokonaisresistanssiin ja kokonaisreaktanssiin alakeskusta syöttävän kaapelin resistanssi ja reaktanssi. Yhteenlasketuista resistanssista ja reaktanssista saatiin keskuksen maksimioikosulkuvirta kaavalla 28.

$$R_{T_{AK6}} = R_{T_{PK}} + R_{j_{AK6}} = 0,0016\Omega + 0,0037\Omega = 0,0053\Omega$$

$$X_{T_{AK6}} = X_{T_{PK}} + X_{j_{AK6}} = 0,0100\Omega + 0,0005\Omega = 0,0106\Omega$$

$$I_K'' = \frac{c_{MAX} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MAX} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} = \frac{1,05 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0053\Omega^2 + 0,0106\Omega^2}} = 20,5kA$$

Jatkuvuustilan oikosulkuvirta laskettiin lisäämällä jatkuvuustilan pääkeskuksen sijaiskytkennän kokonaisresistanssiin ja kokonaisreaktanssiin alakeskusta syöttävän kaapelin resistanssi ja reaktanssi, koska AK6 keskukselta ei syötetty laskentaan vaikuttavia suorakäyttömooottoreita.

5.4.3 Sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskenta

Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskennan jälkeen voitiin niiden avulla määrittää keskuksille sysäys- ja terminen oikosulkuvirta. Niiden laskentaa varten keskuksille määritettiin κ -kertoimet sekä I_K''/I_K -suhde luvut, joiden avulla määritettiin m ja n kertoimet. Sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskennan tuloksia esitellään liitteessä 9. Esimerkkinä pääkeskuksen sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskenta sekä alakeskus AK6:n sysäysoikosulkuvirran laskenta, mihin vaikuttaa keskusta syöttävän sulakkeen huippuvirran rajoitus.

Pääkeskuksen sysäys oikosulkuvirran laskenta:

κ -kerroin laskettiin kaavalla 32, johon sijoitettiin pääkeskuksen maksimioikosulussa olevan sijaiskytkennän resistanssi ja reaktanssi.

$$\kappa = 1,022 + 0,969 \cdot e^{\frac{-3,03 \cdot R_T}{X_T}} = 1,022 + 0,969 \cdot e^{\frac{-3,03 \cdot 0,0016\Omega}{0,0100\Omega}} = 1,63$$

Lisättiin κ -kerroin sekä maksimioikosulkuvirta sysäysoikosulkuvirran laskentakaavaan 31.

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_K'' = 1,63 \cdot \sqrt{2} \cdot 23,9kA = 54,9kA$$

Pääkeskuksen terminen oikosulkuvirta laskenta:

Laskettiin maksimioikosulkuvirran sekä jatkuvan oikosulkuvirran suhde.

$$\frac{I_K''}{I_K} = \frac{23,9\text{kA}}{19,3\text{kA}} = 1,2$$

κ -kertoimen avulla määritettiin kuviosta 3 m -kerroin 1 sekunnin ajan hetkellä.

$$m = 0,05$$

I_K''/I_K -suhteen avulla määritettiin kuviosta 4 n -kerroin 1 sekunnin ajan hetkellä.

$$n = 0,85$$

Termisen oikosulkuvirran laskentakaavaan 33 lisätään maksimioikosulkuvirran arvo sekä m ja n kertoimet.

$$I_{TH} = I_K'' \cdot \sqrt{m + n} = 23,9\text{kA} \cdot \sqrt{0,05 + 0,85} = 22,7\text{kA}$$

Lasketusta sysäysoikosulkuvirrasta i_p voitiin määrittää keskukselle dynaaminen oikosulkukestoisuus arvo I_{PK} , lasketusta termisestä oikosulkuvirrasta I_{TH} saatiin keskuksen termisen kestoisuuden arvo I_{CW} . Esimerkiksi pääkeskuksen tapauksessa dynaamiseksi oikosulkukestoisuudeksi valittiin 63 kA, jolloin $I_{PK} > i_p$ ja termiseksi oikosulkukestoisuudeksi valittiin 25 kA, jolloin $I_{CW} > I_{TH}$.

Alakeskus AK6 sysäys oikosulkuvirran laskenta:

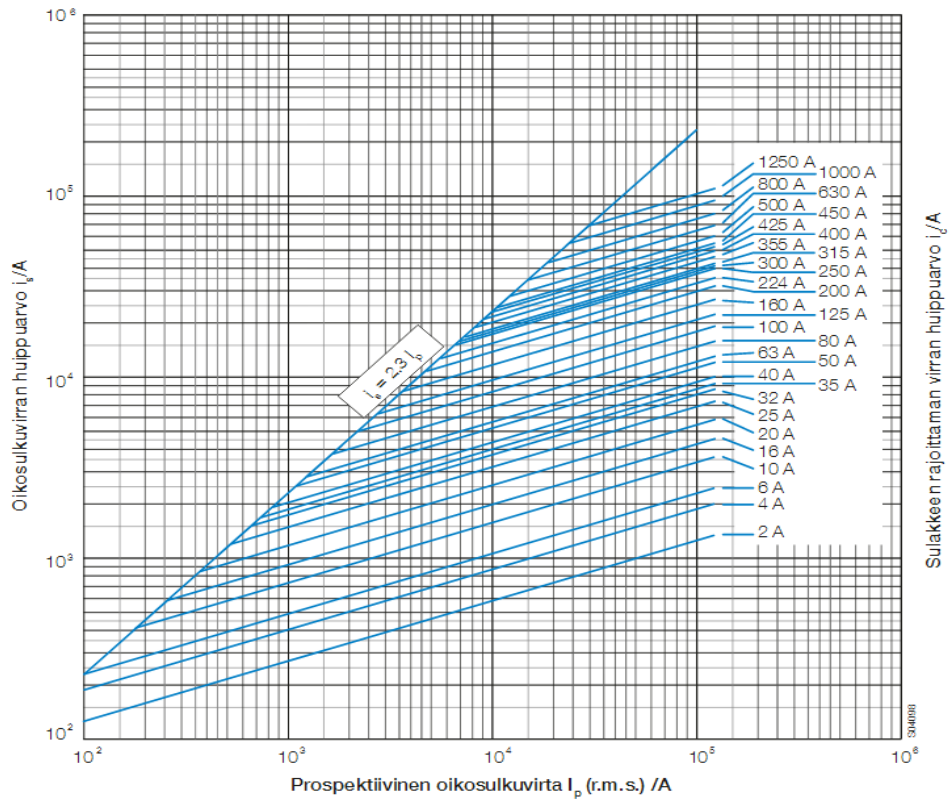
κ -kerroin laskettiin kaavalla 32, johon sijoitettiin alakeskuksen maksimioikosulussa olevan sijaiskytkennän resistanssi ja reaktanssi.

$$\kappa = 1,022 + 0,969 \cdot e^{\frac{-3,03 \cdot R_T}{X_T}} = 1,022 + 0,969 \cdot e^{\frac{-3,03 \cdot 0,0053\Omega}{0,0106\Omega}} = 1,23$$

Lisättiin κ -kerroin sekä maksimioikosulkuvirta sysäysoikosulkuvirran laskentakaavaan 31.

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_K'' = 1,23 \cdot \sqrt{2} \cdot 20,5\text{kA} = 35,9\text{kA}$$

Alakeskusten sysäys oikosulkuvirtaan vaikuttaa niitä syöttävät kahvasulakkeet. Sulakkeet rajoittavat oikosulkuvirran huippuarvoa, jonka seurauksena se alentaa sysäys oikosulkuvirtaa. ABB antaa gG-sulakkeille kuvion 9 mukaisen kuvaajan, josta voitiin tarkastella rajoittunut oikosulkuvirran arvo.



Kuvio 9. ABB:n gG-kahvasulakkeiden virranrajoitus (Kahvasulakkeet n.d.)

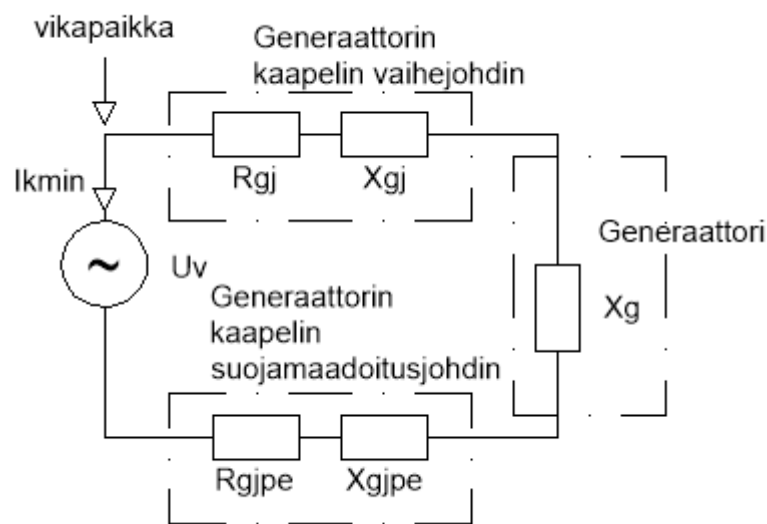
Alakeskusta syöttävän kahvasulakkeen koko oli 80 A. Alakeskuksen sysäys oikosulkuvirta ennen sulaketta oli 35,9 kA. Tarkasteltiin kuvion 9 mukaisesta kuvaajasta sysäys oikosulkuvirranrajoitus. Virta rajoittui noin 11 kiloampeeriin.

5.4.4 Minimioikosulkuvirran laskenta

Minioikosulkuvirran avulla voitiin tarkastaa vikasuojauksen toimivuus. Minioikosulkuvirtaa varten oli huomioitava keskusta syöttävän kaapelin suojajohdin sekä johtimen resistanssin mallinnus +70 °C:ssa. Minimioikosulkuvirtojen laskennan tuloksia esitellään liitteessä 10.

Minimioikosulkuvirran laskenta pääkeskukselle:

Pääkeskuksen minimioikosulkuvirta syntyi tilanteessa, jossa generaattori syöttää yksin pääkeskusta saarekkeessa valtakunnan verkon ollessa jännitteetön. Minimioikosulkuvirta laskettiin siis kuvion 10 mukaisesta verkosta.



Kuvio 10. Pääkeskuksen minimioikosulkuvirtaan vaikuttavat komponentit.

Komponentit ovat piirissä sarjassa keskenään, joten lasketaan resistanssit sekä reaktanssit yhteenlaskulla.

$$R_T = R_{Gj} + R_{GjPE} = 0,0026\Omega + 0,0051\Omega = 0,0077\Omega$$

$$X_T = X_D + X_{Gj} + X_{GjPE} = 0,0853\Omega + 0,0011\Omega + 0,0011\Omega = 0,0875\Omega$$

Minimioikosulkuvirta laskettiin kaavalla 30.

$$I_{KMIN} = \frac{c_{MIN} \cdot U_V}{Z_T} = \frac{c_{MIN} \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_T^2}} = \frac{0,95 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0077\Omega^2 + 0,0875\Omega^2}} = 2497A$$

5.5 Suojalaitteiden valinta

Koska laitoksen syöttökaapeleina toimi neljä eri kaapelia, täytyi tässä tapauksessa sijoittaa oikosulku- ja ylikuormitussuojat kunkin kaapelin alku- sekä loppupäähän.

Tästä johtuen oli suojaus kannattavin toteuttaa sulakkeilla. Pääkeskuksen nimellisvirran mukaisesti sulakkeiksi asetettiin siis 4x3x200A gG-sulakkeet jonovarokelähdöille. Mutta koska laitoksen omaa sähköntuotantoa aiottiin käyttää saarekekäyttönä, oli tätä varten saatava laitos erotettua automaattisesti verkosta valtakunnan verkon ollessa jännitteetön. Automaattista erotusta varten keskukseen tulisi siis laitoksen automaatiojärjestelmällä ohjattava katkaisija. Katkaisijaa valittaessa oli huolehdittava, että katkaisijan nimellisvirta sekä oikosulun katkaisukyky on riittävä. Alakeskusten ylikuormitus- ja oikosulkusuojaksi valikoitui gG-sulakkeet niiden toimivuuden ja edullisuuden takia.

CHP-laitteistossa oli oma generaattorin ohjaus- ja erotuslaitteisto, joka toteuttaisi verkon erotuksen vikatilanteissa. Ohjainyksikkö vastasi myös generaattorin verkkoon tahdistuksesta, ylikuormitus- ja oikovirtasuojauksesta sekä generaattorin tuottaman sähkön laadusta. Ohjainyksikkö käytti ROCOF-tekniikkaa, joka havaitsee, jos siihen kytkeytyvässä verkossa on häiriöitä. Koska CHP-laitteistoa ei saanut kytettyä saarekekäytölle katkottomasti ei tarvinnut huolehtia, että saarekekäytöstä vastaava katkaisija pääkeskuksessa pystyy havaitsemaan verkon tippumisen tarpeeksi nopeasti. Riitti vain, että se tunnistaa palanneen verkon, jolloin voidaan antaa käsky CHP-laitteistolle, että vaihtaa saarekekäytön pois päältä. CHP-laitteiston ohjauslaitteisto oli tarkoitus kytkeä laitoksen automaatiojärjestelmään. CHP-laitteiston syöttökaapelin toisen pään ylikuormitus- ja oikosulkuvirtasuojaus määräytyi laitetoimittajan puolesta, joka toteutettiin gG-sulakkeilla.

5.6 Oikosulkusuojauksen varmentaminen

Sulakkeilla hoidetun suojauksen varmentaminen tapahtui sulakepesän oikosulkukestoisuuden varmistamisella. Pääkeskuksen tapauksessa varmistettiin, että valittujen

jonovarokkeen oikosulkukestoisuus on riittävä sekä alakeskuksilla valittujen kytkinvarokkeiden olevan tarpeeksi kestäviä ko. oikosulkuvirralla.

Lisäksi täytyi varmistua siitä, että keskusta syöttävä kaapeli kestää sitä lämmittävän termisen oikosulkuvirran. Jos kaapelille laskettu 1 sekunnin termisen oikosulkuvirta I_{TH} ylittää kaapelille annetun suurimman sallitun 1s:n termisen oikosulkuvirta arvon I_{1s} täytyy tarkastella sulakkeen laukaisuaika ko. oikosulkuvirralla. Varmennus oli nopea ja helppo tehdä, koska sulakkeiden laukaisuaika oli kaikilla sulakkeilla enintään 0,1 sekuntia, jolloin myös termisen oikosulkuvirta laskee reilusti kaapelille annetun suurimman sallitun arvon alle.

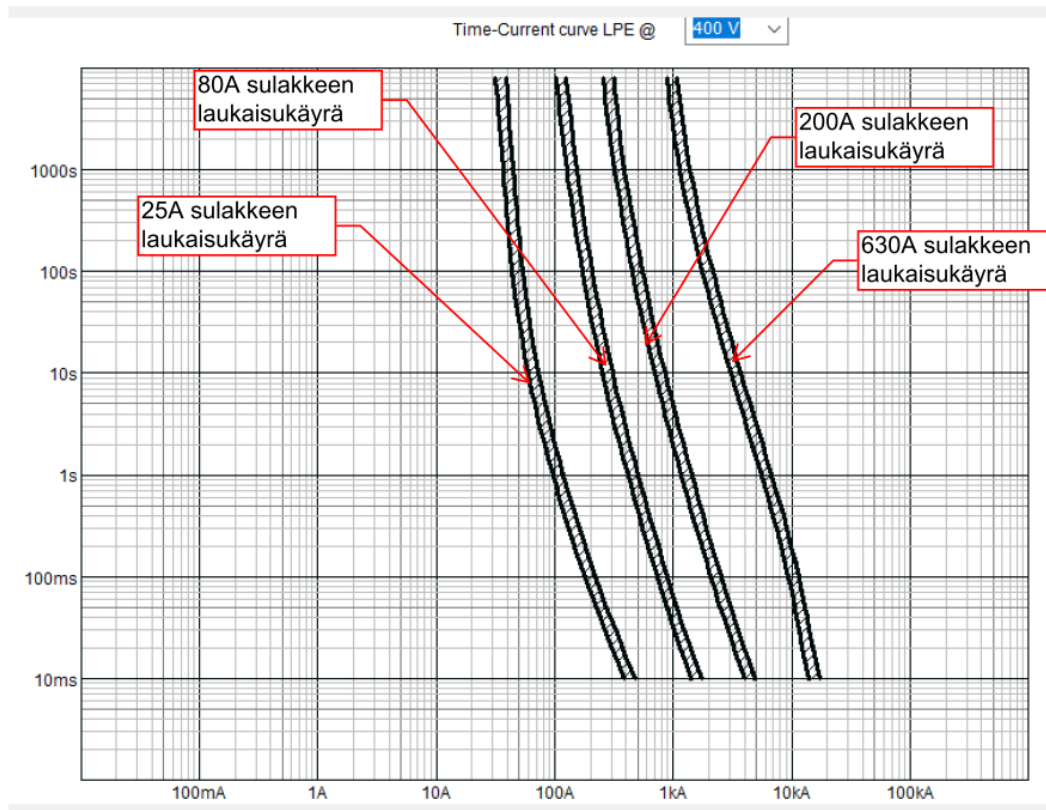
5.7 Vikasuojauksen varmennus

Vikasuojauksen varmennus tehtiin tarkastelemalla suojalaitteiden poiskytkentäajat sekä pienimmät sallitut oikosulkuvirrat. Pääkeskuksen ja kaikkien alakeskuksien sulakkeiden poiskytkentäaika on sama 5 sekuntia. Pienimmät sallitut gG-sulakkeiden oikosulkuvirran arvot saatiin liitteen 1 taulukosta. Näitä arvoja verrattiin laskettuihin keskuksien minimoikosulkuvirtoihin (liite 10). Laskettu minioikosulkuvirta täytyi siis olla suurempi kuin sulakkeen antama arvo 5 sekunnin laukaisuajalle, jotta vikasuojaus toteutuu. Keskuksien vikasuojauksessa ei tarvittu ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin.

5.8 Selektiivisyyden tarkastus

Selektiivisyyden eli vikapaikkaa lähimmän suojalaitteen laukeamisen vikatilanteessa tarkastaminen tehtiin ABB DOC -ohjelmalla. Ohjelmaan mallinnettiin suunniteltu verkko komponentteineen. Ohjelman curves-työkalulla voidaan tarkastella valittujen sulakkeiden laukaisukäyriä virran ja ajan suhteen ja verrata niitä toisiinsa. Alla nähdään kuviossa 11 keskuksissa käytettyjen sulakkeiden laukaisukäyrät verrattuna generaattorilähdön 630A sulakkeeseen. Laukaisukäyrät eivät risti toisiaan jolloin ne toimivat selektiivisesti. Pääkeskuksen pääsulakkeiden selektiivisyyden tarkastelu on vaikeata, koska suoja on 4 kappaletta. Oletetaan syöttökaapeleiden impedanssien olevan samankokoisia, jolloin kuormitusvirta jakaantuu kaapeleiden suojiin tasaisesti.

Täten voidaan olettaa neljän 200A sulakkeen olevan hitaampi kuin esimerkiksi niiden jälkeen alakeskusta syöttävä 200A sulake.



Kuvio 11. Sulakkeiden laukaisukäyrät ajan ja virran suhteen.

Katkaisijoiden ohjaukset

Biokaasulaitoksen pääkeskukseen suunniteltiin siis katkaisija, jolla ohjattiin biokaasulaitoksen verkko saarekkeeseen valtakunnan verkon ollessa jännitteetön. Oman tuotannon generaattorilaitteistossa oli oma katkaisija, jota ohjattiin laitteiston omalla ohjaimella. Tilannetta kuvaa liitteenä 11 oleva katkaisijoiden periaatekaavio. Katkaisijoiden täytyi toimia oikein eri tilanteissa, jotta jakeluverkon haltijan vaatimukset sekä standardin mukaiset suojaus vaatimukset täyttyvät. Ohjauksista laadittiin toimintakuvaukset, jotka käytiin lävitse generaattorilaitteiston toimittajan kanssa. Katkaisijoiden toimintaa selostetaan viidessä eri skenaariossa.

Generaattorin liittäminen valtakunnan verkon rinnalle

1. Biokaasulaitoksen verkkoa syötetään valtakunnan verkolla.
2. Valtakunnan verkko on ollut jännitteinen vähintään 10 minuuttia.
3. Generaattorilaitteiston tahdistin mittaa verkkojännitteen generaattorikatkaisijan verkon puolelta, tahdistaa generaattorin syöttöverkolle sopivaksi ja antaa käskyn generaattorin katkaisijalle 01Q1 mennä kiinni.
4. Nyt valtakunnan verkko sekä generaattori syöttävät biokaasulaitoksen sähköverkkoa.

Saarekekäytölle muuttaminen valtakunnan verkon sammussa

1. Generaattorin ohjauslaitteisto havaitsee valtakunnan verkon jännitteen tippumisen.
2. Generaattorilaitteisto antaa katkaisu käskyn pääkeskuksessa olevalle katkaisijalle 00Q1 ja avaa myös samalla generaattorilaitteiston katkaisijan 01Q1.
3. Pääkeskuksen katkaisija 00Q1 aukeaa vähintään 2 sekunnissa, jolloin biokaasulaitoksen verkko jää saarekkeeseen.
4. Generaattori pysähtyy ja käynnistyy uudelleen saareketilassa.
5. Uudelleen käynnistyksen jälkeen generaattorilaitteiston katkaisija 01Q1 sulkeutuu ja generaattori syöttää biokaasulaitosta saarekkeena.

Valtakunnan verkon liittäminen generaattorin rinnalle

1. Generaattori syöttää biokaasulaitosta itsenäisesti.
2. Pääkeskuksen katkaisija 00Q1 tunnistaa valtakunnan verkon palanneen normaaliksi
3. 10 minuutin kuluttua katkaisija 00Q1 antaa generaattorin ohjauslaitteistolle tiedon palanneesta verkosta.
4. Generaattorilaitteiston katkaisija 01Q1 avautuu ja pääkeskuksen katkaisija 00Q1 menee kiinni.
5. Generaattori pysähtyy, käynnistyy uudelleen, synkronisoituu verkkojännitteeseen ja generaattorilaitteiston katkaisija 01Q1 sulkeutuu.
6. Nyt valtakunnan verkko sekä generaattori syöttävät biokaasulaitoksen verkkoa.

Generaattorilaitteistossa oikosulku

1. Generaattorilaitteistossa syntyy oikosulku.
2. Laitteiston katkaisija 01Q1 havaitsee oikosulun ja avaa koskettimensa.

Pääkeskuksen oikosulku

1. Pääkeskukseen syntyy oikosulku.
2. Pääkeskuksen syöttösulakkeet 00F1 palavat.
3. Pääkeskuksessa oleva generaattorilähdön sulakkeet 01F1 palavat.
4. Generaattorin ohjauslaitteisto havaitsee kuorman tippuneen pois, avaa katkaisijansa 01F1 ja sammuttaa generaattorin.

6 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa omaa sähköntuotantoa sisältävän biokaasulaitoksen sähköverkon mitoitus laitoksen sähkökeskuksiin, syöttökaapeleihin sekä niitä syöttäviin suojalaitteisiin. Työn tarkoituksena oli saada selvitys biokaasulaitoksen sähköverkon laskelmista, käytetyistä menetelmistä ja menetelmien toimivuudesta.

Työn tuloksena saatiin teollisuuden sähköverkon mitoitusmateriaali, joka on koottu pienjännitesähköstandardista, sähkösuunnittelu-opintojakson opintomateriaalista sekä aiheen kirjallisuudesta saadusta tiedoista. Teoriapohja sisältää kaiken oleellisen, mitä täytyy ottaa huomioon pienjänniteverkon mitoituksessa ja määrittelyssä. Lisäksi teoriapohja sisältää seikkoja, jotka tulee ottaa huomioon verkon suunnittelussa, kun siihen lisätään omaa tuotantoa.

Sähköverkon mitoitusta tehtäessä huomattiin lähtötietojen tärkeys suunnittelussa. Mitä vähemmän tietoja suunniteltavasta verkosta saadaan asiakkaalta, sitä enemmän joutuu mitoittaja tekemään arvioita. Esimerkiksi kaapeleiden mitoituksessa on tärkeää tietää kaapelin korjauskertoimiin vaikuttavat tekijät mahdollisimman tarkasti, jotta mitoitus saataisiin kerralla oikein. Tai esimerkiksi keskusten kuormitusmitoituksessa on tärkeää tietää kaikki laitteet, joita keskus syöttää, varsinkin paljon kuormaa lisäävät laitteet, jotta keskuksen nimellisvirta kestäisi syöttää virtaa kaikille kuormille.

Kun liitetään omaa tuotantoa valtakunnanverkon rinnalle, kannattaa heti ottaa yhteyttä paikalliseen jakeluverkkoyhtiöön ja selvittää sieltä laitteiston vaatimukset. Näin voidaan varmistua siitä, että tuleva laitteisto soveltuu liitettäväksi verkkoon ja voidaan verkon suunnittelussa ottaa huomioon jakeluverkkoyhtiön vaatimat laitteistot.

Koska sähköverkon suunnittelu perustuu pääosin laskelmiin ja niiden kautta tehtyihin määrittelyihin ja tyyppityksiin, on tärkeää, että käytettävät laskentamenetelmät on todettu päteviksi ja laskelmien kaavat oikein tehdyiksi. Oikein mitoitetut komponentit

luovat turvallisen sähköverkon vikatilanteessa, lisäksi rakennusvaiheessa säästytään vaihdoista aiheutuvilta kuluilta.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan käyttää apuna tulevaisuudessa teollisuuden sähköverkon mitoituksissa. Laskentataulukot soveltuvat pohjiksi seuraaviin projekteihin, mutta eivät sellaisenaan toimi laskentaohjelmana. Tästä johtuen tätä työtä voisi jatkaa luomalla sähköverkon mitoituksista Exceliin laskentaohjelmat, jotka laskevat verkon automaattisesti syöttämällä niihin verkon lähtötiedot.

Lähteet

ABB Pienjännitekojeet. N.d. Pdf-dokumentti. ABB Oy. Viitattu 4.2.2017. https://library.e.abb.com/public/26b7051f45e4e9ccc125707300247ed9/s200_1fi05_01.pdf

D1-2012. 2013. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 19.p. Espoo: Sähköinfo Oy.

Harsia, P. 2008. Tehomitoitus. Virtuaaliammattikorkeakoulun opetusmateriaali. Viitattu 8.2.2017.

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1113391235042/1113391621636/1150111126448/1150111210984.html>

Kahvasulakkeet. N.d. ABB:n esite OF1F1. Pdf-dokumentti. ABB Oy. Viitattu 6.2.2017.

<https://library.e.abb.com/public/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/1SCC317002C1801.pdf>

Korpinen, L. N.d. Sähköverkkojen laskentaa. Oppimateriaali Leena Korpisen sivuilla. Viitattu 28.1.2017.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/4sahkoverkkojen_laskenta.pdf

Lakervi, E. & Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. 3. p. Espoo: Otatieto.

Lehto, I. 2016. Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Pdf-dokumentti. Energiateollisuus. Viitattu 8.2.2017. http://energia.fi/files/1248/Ohje_tuotannon_liittamisesta_jakeluverkkoon_PAIVITETTY_20160427.pdf

Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. N.d. Verkostosuositus YA9:09. Energiateollisuus. Viitattu 8.2.2017.

https://www.oulunenergia.fi/sites/default/files/attachments/et_verkostosuositus_mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon.pdf

Oikosulkusuojaus. 2000. TT-käsikirja 2000-07. Pdf-dokumentti. ABB Oy.

Puttonen, P. 2014. Sähkösuunnittelu-opintojakson opiskelumateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 15.1.2017. Optima-oppimisympäristö.

Repo, S., Mäki, K. & Järventausta, P. 2003. Tuulivoimaan perustuvan hajautetun sähköntuotannon vaikutus keskijänniteverkon suojaukseen Tutkintaraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. <http://docplayer.fi/11842549-Sahkovoimatekniikka-tampereen-teknillinen-yliopisto-tuulivoimaan-perustuvan-hajautetun-sahkontuotannon-vaikutus-keskijanniteverkon-suojaukseen.html>

SFS 600-1. 2012. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 Pienjänniteasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

ST 13.31. 2015. Rakennuksen sähköverkon ja pienjänniteliittymän mitoittaminen. Espoo: Sähköinfo Oy.

Tuotannon liittäminen Jyväskylän Energian sähköverkkoon. 2016. Pdf-dokumentti. JE-Siirto Oy. Viitattu 8.2.2017. [http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/2357-Tuotannon liittäminen Jyvaskylan Energian sahkoverkkoon.pdf](http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/2357-Tuotannon_liittaminen_Jyvaskylan_Energian_sahkoverkkoon.pdf)

Voima, S. 2009. Hajautetun tuotannon suojarleistyksen toiminnalliset vaatimukset. Diplomityö, Vaasan yliopisto, teknillinen tiedekunta, sähkötekniikka. Viitattu 8.2.2017. <https://www.tritonia.fi/fi/e-opinnaytteet/tiivistelma/3704/Hajautetun+tuotannon+suojarleistyksen+toiminnalliset+vaatimukset>

Liitteet

Liite 1. Suojalaitteiden pienimmät toimintavirrat

Taulukko 1. B- ja C-tyypin johdonsuojakatkaisijoiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat (D1-2012, 2013, 93.)

Pienimmät toimintavirrat johdonsuojakatkaisijoille ja vaaditut mitatut arvot				
Nimellisvirta	B-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo	C-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo
A	A	A	A	A
6	30	37,5	60	75
10	50	62,5	100	125
13	65	81,3	130	162,5
16	80	100	160	200
20	100	125	200	250
25	125	156,3	250	312,5
32	160	200	320	400
50	250	312,5	500	625
63	315	393,8	630	787,5
80	400	500	800	1 000
125	625	781,3	1 250	1 562,5

Taulukko 2. gG-sulakkeiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat (D1-2012, 2013, 94.)

Pienimmät toimintavirrat gG-sulakkeille ja vaaditut mitatut arvot				
Nimellisvirta	gG-sulake 0,4 s	Vaadittu mitattu arvo	gG-sulake 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo
A	A	A	A	A
2	16	20	9	11,3
4	32	40	18	22,5
6	46,5	58,2	28	35
10	82	102,5	46,5	58,2
16	110	137,5	65	81,3
20	145	181,3	85	106,3
25	180	225	110	137,5
32	270	337,5	150	187,5
35			165	206,3
40			190	237,5
50			250	312,5
63			320	400
80			425	531,3
100			580	725
125			715	893,8
160			950	1187,5
200			1250	1562,5
250			1650	2062,5
315			2200	2750
400			2840	3550
500			3800	4750
630			5100	6375

Liite 2. Biokaasulaitoksen huipputehon laskenta

Laiteryhmä	Keskus	Laiteryhmän sisäinen			Huipputehon aikainen		
		Laiteryhmän kokonaisteho (kW)	tasaisuuskerroin k1	Laiteryhmän teho (kW)	samanaikaisuuskerroin k2	Mitoitettava teho (kW)	
Pääkeskus	PK	172,2	0,8	137,7	1	137,7	
Reaktori 1	AK1	8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Reaktori 2	AK2	8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Reaktori 3	AK3	8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Reaktori 4	AK4	8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Reaktori 5 varaus		8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Reaktori 6 varaus		8,2	1	8,2	0,8	6,6	
Kattilarakennus	AK5	11,38	0,8	9,1	1	9,1	
Kiinteistö	AK6	42,2	0,6	25,3	1	25,3	
Kaasunjalostus	AK7	107,1	0,8	85,7	1	85,7	
Kaasuvarastot	AK8	5,3	1	5,3	1	5,3	
Tankkaus	AK9	26,08	1	26,1	1	26,1	
LVI+Kiinteistö	AK-IV	37,9	0,6	22,7	1	22,7	
Yhteensä		451,4				351,4	
Kuormitusvirran laskenta							
Huipputeho (kW)	cos(phi)	Kokonaisnäennäisteho (kVA)	Kuormitusvirta (A)				
351,4	0,85	413,4	597				

Liite 3. Keskusten nimellisvirtojen laskenta

Keskus	Pätöteho (kW)	Cos (phi)	Näennäisteho (kVA)	Kuormitusvirta (A)	Keskuksen nimelliskoko In (A)
PK	451,4	0,85	531,0	767	800
AK1	8,2	0,85	9,6	14	25
AK2	8,2	0,85	9,6	14	25
AK3	8,2	0,85	9,6	14	25
AK4	8,2	0,85	9,6	14	25
AK5	11,4	0,85	13,4	19	25
AK6	42,2	0,85	49,6	72	80
AK7	107,1	0,85	126,0	182	200
AK8	5,3	0,85	6,3	9	25
AK-IV	37,9	0,85	44,6	64	80
AK9	26,1	0,85	30,7	44	63

Liite 4. Kaapelien mitoitus kuormituksen mukaan

Lähtö	Kohde	Kaapeli	Kuormitusvirta Ib (A) (Etukojeen mukaan)	Tyyppi	Kaapelin peruskorotus s Izp (A)	Asennus tapa n	Lämpötila korjauskertoimen	Maan lämpöresistiivisyys korjauskertoimen	Asennustavan korjauskertoimen	Kaapelin todellinen kuormitettavuus Iz (A)
PK	Syöttökaapeli	PK-W1	800	4xAl 240	1500	D	1	1	0,6	900,0
PK	Reaktori 1	AK1-W1	25	Cu 6	45	E	0,88		0,78	30,9
PK	Reaktori 2	AK2-W1	25	Cu 6	45	E	0,88		0,78	30,9
PK	Reaktori 3	AK3-W1	25	Cu 6	45	E	0,88		0,78	30,9
PK	Reaktori 4	AK4-W1	25	Cu 6	45	E	0,88		0,78	30,9
PK	Kattilarakennus	AK5-W1	25	Cu 6	45	E	0,88	1	0,82	32,5
PK	Kiinteistö	AK6-W1	80	Al 70	159	E	1		0,78	124,0
PK	Kaasunjalostus	AK7-W1	200	Al 185	330	D	1	1	0,79	260,7
PK	Kaasuvarasto	AK8-W1	25	Cu 6	45	E	0,88	1	0,87	34,5
PK	IV-Keskus	AK-IV-W1	80	Al 50	124	E	0,88		0,82	89,5
PK	Tankkaus	AK9-W1	63	Al 50	124	D	1	1	0,75	93,0
PK	Syöttökaapeli CHP	CHP-W1	600	3xAl 185	990	D	1	1	0,69	683,1

Liite 5. Ylivirtasuojauksen tarkastelu

Keskus	Näennäisteho (kVA)	Virta (A)		Ylivirtasuoja In (A)		Suurin sallittu kuormitusvirta I _{zp} (A)		I ₂ (A)		Suurin sallittu kuormitusvirta I _{zp} (A) *1,45
PK	531,0	767	<	800	<	900		1280	<	1305
AK1	9,6	14	<	25	<	31		40	<	45
AK2	9,6	14	<	25	<	31		40	<	45
AK3	9,6	14	<	25	<	31		40	<	45
AK4	9,6	14	<	25	<	31		40	<	44,8
AK5	13,4	19	<	25	<	32		40	<	47
AK6	49,6	72	<	80	<	124		128	<	180
AK7	126,0	182	<	200	<	261		320	<	378
AK8	6,3	9	<	25	<	34		40	<	50
AK-IV	44,6	64	<	80	<	89		128	<	130
AK9	30,7	44	<	63	<	93		100,8	<	135

Liite 6. Kaapelien jännitteenalennemien tarkastelu

Keskus	Keskus/Laite	Kaapeli	Tyyppi	COS PHI	Pituus (km)	SIN PHI	Kaapelin	Kaapelin	Kaapelin	Kaapelin	Jännitteen- Virta (A)	Jännitteen- alennema (V)	Jännitteen- alennema (%)
							Ominaisresistanssi rj (ohm/km)	Ominaisreaktanssi xj (ohm/km)	resistanssi Rj (ohm)	reaktanssi Xj (ohm)			
PK	Syöttökaapeli	PK-W1	4xAXMK 4x240	0,85	0,190	0,53	0,125	0,079	0,006	0,004	800	5,61	2,4 %
PK	Reaktori 1	AK1-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,080	0,53	3,080	0,094	0,246	0,008	25	5,34	2,3 %
PK	Reaktori 2	AK2-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,087	0,53	3,080	0,094	0,268	0,008	25	5,80	2,5 %
PK	Reaktori 3	AK3-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,097	0,53	3,080	0,094	0,299	0,009	25	6,47	2,8 %
PK	Reaktori 4	AK4-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,107	0,53	3,080	0,094	0,330	0,010	25	7,14	3,1 %
PK	Kattilarakennus	AK5-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,040	0,53	3,080	0,094	0,123	0,004	25	2,67	1,2 %
PK	Kiinteistö	AK6-W1	AMCMK 4x70/21	0,85	0,007	0,53	0,530	0,075	0,004	0,001	80	0,27	0,1 %
PK	Kaasunjalostus	AK7-W1	AMCMK 4x185/57	0,85	0,065	0,53	0,164	0,082	0,011	0,005	200	2,37	1,0 %
PK	Kaasuvarasto	AK8-W1	MCMK 4x6+6	0,85	0,050	0,53	3,080	0,094	0,154	0,005	25	3,33	1,4 %
PK	IV-Keskus	AK-IV-W1	AMCMK 4x50/16	0,85	0,081	0,53	0,641	0,085	0,052	0,007	80	3,82	1,7 %
PK	Tankkaus	AK9-W1	2xAMCMK 4x70/21	0,85	0,100	0,53	0,443	0,082	0,022	0,004	200	4,20	1,8 %
PK	Syöttökaapeli CHP	CHP-W1	3xAMCMK 4x185/57	0,85	0,040	0,53	0,164	0,082	0,002	0,001	600	1,46	0,6 %

Liite 7. Komponenttien mallinnus

Taulukko 1. Syöttöverkon mallinnus

Syöttöverkko				
Oikosulkuvirta I_{kq} 20kV (A)	Oikosulkuimpedanssi $Z_{q 20kV}$ (ohm)	Oikosulkuimpedanssi Z_q 0,4kV (ohm)	Oikosulkuresistanssi R_q (ohm)	Oikosulkureaktanssi X_q (ohm)
3877	2,98	0,001191	0,000119	0,001185

Taulukko 2. Muuntajan mallinnus

Muuntaja					
Näennäisteho (VA)	Oikosulkujännite (%)	Häviöteho P_{kn} (W)	Oikosulkuimpedanssi Z_k (ohm)	Oikosulkuresistanssi R_k (ohm)	Oikosulkureaktanssi X_k (ohm)
1000000	6	1278	0,0096	0,0002	0,0096

Taulukko 3. Kaapeleiden mallinnus

Kaapelit	Tyyppi	20°C Ominaisresistanssi rj (ohm/km)	Ominaisreaktanssi xj (ohm/km)	Pituus (km)	20°C Resistanssi Rj (ohm)	Reaktanssi Xj (ohm)	70°C Resistanssi Rj (ohm)	Ominaisresistanssi rjpe (ohm/km)	Ominaisreaktanssi xjpe (ohm/km)	70°C Resistanssi Rjpe (ohm)	Reaktanssi Xjpe (ohm)
PK-W1	4xAXMK 4x240	0,13	0,079	0,19	0,0059	0,0037	0,0071	0,125	0,079	0,0071	0,0037
AK1-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,08	0,2464	0,0075	0,296	3,08	0,094	0,2957	0,0075
AK2-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,087	0,2680	0,0082	0,322	3,08	0,094	0,3216	0,0082
AK3-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,097	0,2988	0,0091	0,359	3,08	0,094	0,3585	0,0091
AK4-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,107	0,3296	0,0101	0,395	3,08	0,094	0,3955	0,0101
AK5-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,04	0,1232	0,0038	0,148	3,08	0,094	0,1478	0,0038
AK6-W1	AMCMK 4x70/21	0,53	0,075	0,007	0,0037	0,0005	0,004	0,868	0,075	0,0073	0,0005
AK7-W1	AMCMK 4x185/57	0,16	0,082	0,065	0,0107	0,0053	0,013	0,443	0,082	0,0346	0,0053
AK8-W1	MCMK 4x6+6	3,08	0,094	0,05	0,1540	0,0047	0,185	3,08	0,094	0,1848	0,0047
AK-IV-W1	AMCMK 4x50/16	0,64	0,085	0,081	0,0519	0,0069	0,062	1,150	0,085	0,1118	0,0069
AK9-W1	2xAMCMK 4x70/21	0,44	0,082	0,1	0,0222	0,0041	0,027	0,868	0,082	0,1042	0,0082
CHP-W1	3xAMCMK 4x185/57	0,16	0,082	0,04	0,0022	0,0011	0,0026	0,320	0,082	0,0051	0,0011

Taulukko 4. Generaattorin mallinnus

Generaattori				
Näennäisteho (VA)	Suhteellinen alkutilan reaktanssi xD" (%)	Suhteellinen reaktanssi xD (%)	Alkutilan reaktanssi Xd" (ohm)	Tahtireaktanssi Xd(ohm)
450000	12,2	24	0,0434	0,0853

Taulukko 5. Moottoreiden mallinnus

Moottorit (Suorat lähdöt)			
Näennäistehojen summa Ssum (kVA)	Impedanssi Zm (ohm)	Resistanssi Rm (ohm)	Reaktanssi Xm (ohm)
244,4	0,1309	0,0507	0,1207

Liite 8. Maksimi- ja jatkuvan oikosulkuvirran laskennan tulokset

Taulukko 1. Keskusten maksimioikosulkuvirran laskentatulokset

Keskus	Resistanssi R_t (ohm)	Reaktanssi X_t (ohm)	Maksimi oikosulkuvirta I_k'' (kA)
PK	0,0016	0,0100	23,9
AK1	0,2480	0,0176	1,0
AK2	0,2695	0,0182	0,9
AK3	0,3003	0,0192	0,8
AK4	0,3311	0,0201	0,7
AK5	0,1248	0,0138	1,9
AK6	0,0053	0,0106	20,5
AK7	0,0122	0,0153	12,4
AK8	0,1556	0,0147	1,6
AK-IV	0,0535	0,0169	4,3
AK9	0,0237	0,0141	8,8

Taulukko 2. Keskusten jatkuvan oikosulkuvirran laskentatulokset

Keskus	Resistanssi R_t (ohm)	Reaktanssi X_t (ohm)	Jatkuvuustilan oikosulkuvirta I_k (kA)
PK	0,0016	0,0124	19,3
AK1	0,2480	0,0200	1,0
AK2	0,2696	0,0206	0,9
AK3	0,3004	0,0216	0,8
AK4	0,3312	0,0225	0,7
AK5	0,1248	0,0162	1,9
AK6	0,0053	0,0130	17,3
AK7	0,0123	0,0177	11,2
AK8	0,1556	0,0171	1,5
AK-IV	0,0535	0,0193	4,3
AK9	0,0238	0,0165	8,4

Liite 9. Sysäys- ja termisen oikosulkuvirran laskentatulokset

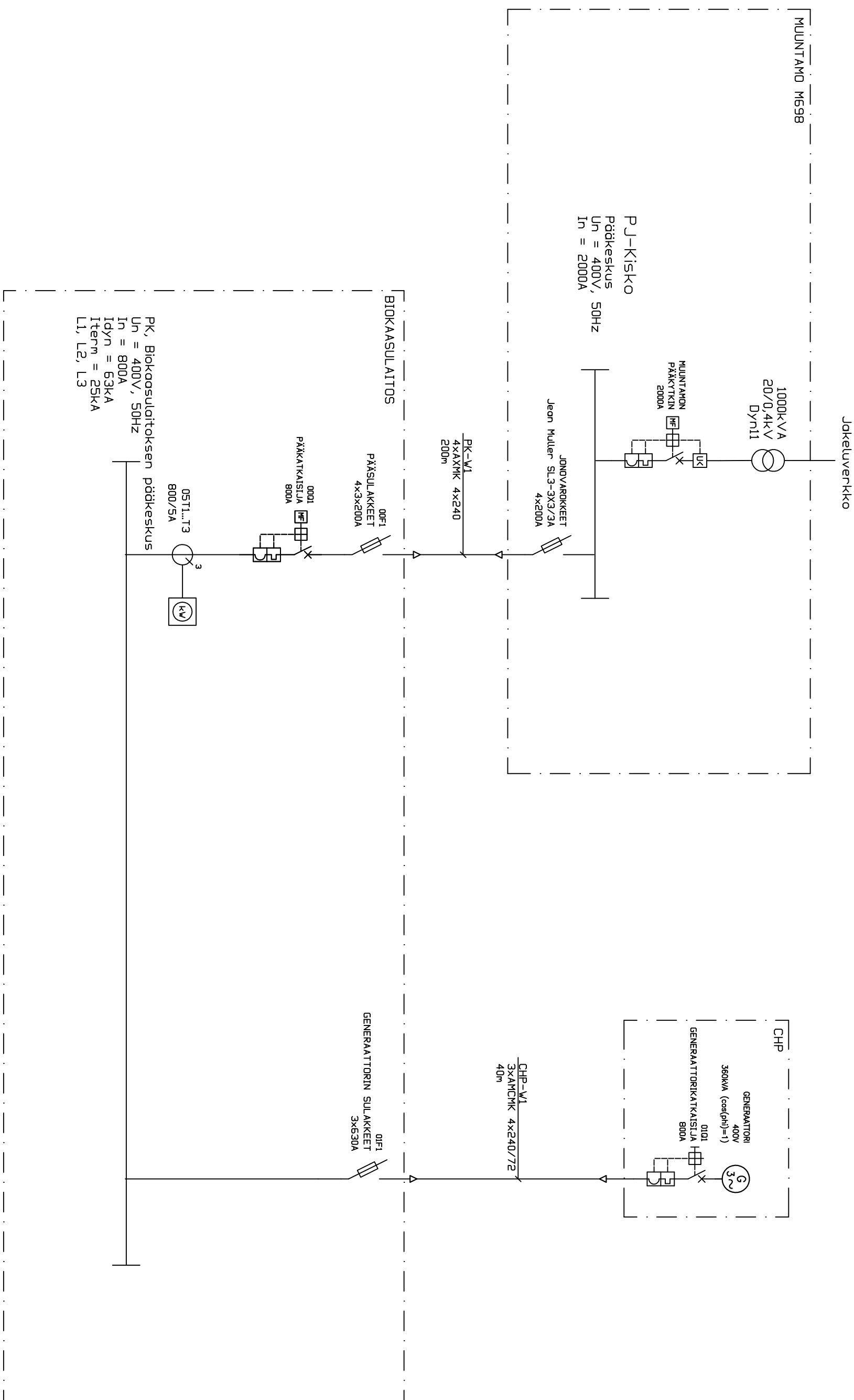
Keskus	Sysäyskerroin k	Sysäysoikosulkuvirta ip	Ik"/Ik suhde	Vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutus m	Vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutus n	Terminen oikosulkuvirta Ith (kA) 1s	Alakeskuksen sulakkeen rajoittama ip (kA)	Valittu dynaaminen oikosulku kestoisuus IPK (kA)	Valittu terminien oikosulku kestoisuus Icw (kA)	
PK	1,63	54,9		1,2	0,05	0,85	22,7	54,9	63	25
AK1	1,02	1,4		1,0	0,02	0,95	1,0	1,4	12,5	5
AK2	1,02	1,3		1,0	0,02	0,95	0,9	1,3	12,5	5
AK3	1,02	1,2		1,0	0,02	0,95	0,8	1,2	12,5	5
AK4	1,02	1,1		1,0	0,02	0,95	0,7	1,1	12,5	5
AK5	1,02	2,8		1,0	0,02	0,95	1,9	2,2	12,5	5
AK6	1,23	35,9		1,2	0,03	0,85	19,3	11,0	50	20
AK7	1,11	19,4		1,1	0,02	0,9	11,9	17,5	31,5	12,5
AK8	1,02	2,2		1,0	0,02	0,95	1,5	2,2	12,5	5
AK-IV	1,02	6,2		1,0	0,02	0,95	4,3	6,2	12,5	5
AK9	1,03	12,8		1,0	0,02	0,95	8,7	12,8	25	10

Liite 10. Minioikosulkuvirtojen laskennan tulokset

Keskus	Resistanssi R_t (ohm)	Reaktanssi X_t (ohm)	Minimi oikosulkuvirta I_{k1min} (A)
PK	0,0077	0,0875	2497
AK1	0,5991	0,1026	361
AK2	0,6508	0,1039	333
AK3	0,7248	0,1058	300
AK4	0,7987	0,1077	272
AK5	0,3034	0,0951	690
AK6	0,0195	0,0886	2419
AK7	0,0551	0,0981	1950
AK8	0,3773	0,0969	563
AK-IV	0,1818	0,1013	1054
AK9	0,1385	0,0998	1285

Liite 11. Katkaisijoiden periaatekaavio

LIITE 11.



Revision		Revision	
----------	--	----------	--

Katkaisija periaatekaavio		PERIAATEKAAVIO		BIOGTS - MUSTANKORKEA		Design/Date 18.10.2016 JM		Drawing Title KATKAISIJAT PERIAATEKAAVIO		Customer Drw. No.		Switchgear/Cabinet		Feeder		Sheet 1 / 1		Rev. -	
Katkaisija periaatekaavio		PERIAATEKAAVIO		BIOGTS - MUSTANKORKEA		Design/Date 18.10.2016 JM		Drawing Title KATKAISIJAT PERIAATEKAAVIO		Customer Drw. No.		Switchgear/Cabinet		Feeder		Sheet 1 / 1		Rev. -	
Katkaisija periaatekaavio		PERIAATEKAAVIO		BIOGTS - MUSTANKORKEA		Design/Date 18.10.2016 JM		Drawing Title KATKAISIJAT PERIAATEKAAVIO		Customer Drw. No.		Switchgear/Cabinet		Feeder		Sheet 1 / 1		Rev. -	
Katkaisija periaatekaavio		PERIAATEKAAVIO		BIOGTS - MUSTANKORKEA		Design/Date 18.10.2016 JM		Drawing Title KATKAISIJAT PERIAATEKAAVIO		Customer Drw. No.		Switchgear/Cabinet		Feeder		Sheet 1 / 1		Rev. -	

