

TAIVALKOSKEN VESIVOIMALAITOKSEN
KONEJÄNNITEKYTKINLAITOKSEN VAIHTOEHTOJEN
TARKASTELU

Konejännitekytkinlaitos

Pulju Pasi

Opinnäytetyö

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2023

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

| | | | |
|-----------------------|---|--------------|--------------------|
| Tekijä | Pasi Pulju | Vuosi | 2023 |
| Ohjaaja(t) | Ins. (YAMK) Aila Petäjäjärvi | | |
| Toimeksiantaja | Kemijoki Oy | | |
| Työn nimi | Taivalkosken konejännitekytkinlaitoksen vaihtoehtojen tarkastelu | | vesivoimalaitoksen |
| Sivumäärä | 60 + 0 | | |

Kemijoki Oy tarjosi opinnäytetyön mahdollisuutta Keminmaassa sijaitsevan Taivalkosken vesivoimalaitoksen saneerausprojektiin liittyen. Saneerausprojekti on ajankohtainen, koska voimalaitoksen kytkinkojeiston laitteet ja päämuuntajat ovat suunnitellun käyttöikänsä lopussa. Voimalaitoksen syöttämään kantaverkkoon on tulossa myös iso muutos, joka vaikuttaa voimalaitoksen uusien kojeistojen mitoitusarvoihin. Opinnäytetyön aiheena oli selvittää laskemalla 4 erilaisen saneerausvaihtoehdon oikosulkuvirtojen arvot ja uusien metallikoteloitujen kytkinkojeistojen saatavuus markkinoilta. Laittevalmistajan valinta rajattiin pois tehtävästä. Lähtötilanteen tiedot käytiin selvittämässä voimalaitoksella ja samalla tehtiin selvitystä tulevasta saneerausprojektista.

Oikosulkuvirtoja laskettiin käyttämällä standardissa IEC 60909-0: 2001 määritettyä laskentatapaa generaattorin läheisyydessä tapahtuvassa oikosulussa. Laskennassa hyödynnettiin yhtiöllä käytössä olevaa valmista laskentatietoa, lisäksi laadittiin taulukkolaskentaohjelmaan tiedosto laitteiston mitoituslaskentaa varten. Laskentatulosten perusteella mitoitettiin uusien kytkentäkojeistojen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimukset. Kojeistojen saatavuutta markkinoilta selvitettiin hyödyntämällä laitevalmistajien valintatyökaluohjelmistoja.

Laskentatuloksia analysoidessa havaittiin oikosulkuvirtojen pysyvän edelleen korkealla tasolla, johtuen osittain varautumisesta kantaverkon vahvistumiseen. Kytkinlaitteiston mitoitusarvot eivät pienentyneet halutulle tasolle suunnitelluista muutoksista huolimatta. Oikosulkuvirtojen pienentämistä päämuuntajien hyötysuhteen kustannuksella jouduttiin pohtimaan. Metallikoteloituja kytkinkojeistoja on markkinoilta saatavilla kaikkiin saneerausvaihtoehtoihin sopivilla mitoitusarvoilla. Laitteistovaatimusten perusteella voidaan aloittaa kytkinkojeistojen kustannusarvioiden laatiminen saneerausvaihtoehdoille.

Avainsanat

oikosulku, generaattori, metallikoteloitu

| | | | |
|------------------------|---|-------------|------|
| Author | Pasi Pulju | Year | 2023 |
| Supervisor(s) | Aila Petäjäjärvi, MEng. | | |
| Commissioned by | Kemijoki Ltd | | |
| Title | Review of alternatives for machine voltages switchgear at Taivalkoski hydroelectric power-plant | | |
| Number of pages | 60 + 0 | | |

The thesis opportunity was offered by Kemijoki LTD in connection with the renovation project of the Taivalkoski hydropower plant located in Keminmaa. The renovation project is timely because the power plant's switchgear equipment and main transformers are at the end of their lifecycle. There is also a big change coming to the main grid fed by the powerplant, which will affect the dimensioning values of the power plant's new switchgear. The topic of the thesis was to find out the values of the short-circuit currents of 4 different renovation options and the availability of new metal-clad switchgear from the market. The selection of the equipment manufacturer was excluded from the task. The information about the power plant, and at the same time an investigation was made about the future renovation project.

Short-circuit currents were calculated using method defined in standards IEC 60909-0:2001 in a short-circuit near the generator. In the calculation, ready-made calculation used by the company was used, and in addition, a file was prepared in a spreadsheet program for the equipment dimensioning calculation. Based on the calculation results, the durability requirements of the new switching equipment were dimensioned. The availability of switchgear on the market was determined by utilizing the equipment manufacturers' selection tool software.

When analyzing calculation results, it was found that the short-circuit currents still remain at a high level, partly due to preparation for the strengthening of the main grid. The dimensioning values of the switch equipment did not decrease to the desired level despite the planned changes. Reducing the short-circuit currents had to be considered at the expense of the efficiency of the main transformers. Metal-clad switchgear are available on the market with dimensioning values suitable for all renovation options. Based on the requirements for the equipment, it is possible to start preparing switchboard cost estimates for renovation options.

Keywords

short-circuit, generator, metal-clad

SISÄLLYS

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 8 |
| 2 | KEMIJOKI OY | 10 |
| 3 | TAIVALKOSKEN VESIVOIMALAITOS | 11 |
| 3.1 | Tekninen nykytilanne lyhyesti kuvattuna | 11 |
| 3.2 | Generaattorien nimellisarvot | 12 |
| 3.3 | Generaattorien ja sähköverkon oikosulkuvirta-arvot | 13 |
| 3.4 | Kytkinlaitos | 13 |
| 3.5 | Konejännitekiskosto | 16 |
| 3.6 | Päämuuntajat ja siirtolinjat ulkokytinkentälle | 18 |
| 4 | SANEERAUSVAHTOEHDOT | 22 |
| 4.1 | Vaihtoehto 1 | 22 |
| 4.2 | Vaihtoehto 2 | 23 |
| 4.3 | Vaihtoehto 3 | 23 |
| 4.4 | Vaihtoehto 4 | 24 |
| 5 | OIKOSULKUVIRRAN LASKENTA | 25 |
| 5.1 | Oikosulkuvirta laskennan teoria | 25 |
| 5.2 | Vaihtoehto 1 mitoitus | 31 |
| 5.3 | Vaihtoehto 2 mitoitus | 36 |
| 5.4 | Vaihtoehto 3 mitoitus | 39 |
| 5.5 | Vaihtoehto 4 mitoitus | 43 |
| 6 | UUSI KONEJÄNNITEKYTKINLAITOS | 44 |
| 6.1 | Mitoituksen teoria | 44 |
| 6.2 | Kotelorakenne | 45 |
| 6.3 | SF ₆ -eristeinen kojeisto (GIS) | 47 |
| 6.4 | Ilmaeristeinen kojeisto (AIS) | 47 |
| 6.5 | Katkaisijan mitoitus | 48 |
| 6.6 | Mittamuuntajat | 50 |
| 6.7 | Valitut nimellisarvot kytkinlaitteistolle | 50 |
| 7 | VAIHTOEHTOJEN VERTAILU | 53 |
| 8 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 55 |

| | |
|-----------------|----|
| 9 POHDINTA..... | 56 |
| LÄHTEET..... | 58 |
| LIITTEET | 60 |

ALKUSANAT

Haluan kiittää Jarkko Virtasta Kemijoki Oy:stä mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta sekä Juho Tuominiemeä hyvästä ohjauksesta. Kiitokset haluan esittää myös Aila Petäjäjärvelle saamastani opetuksesta ja hyvästä ohjauksesta opinnäytetyön aikana.

Sodankylässä 28.4.2023

Pasi Pulju

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| c | jännitekerroin |
| $\cos \varphi$ | tehokerroin |
| I | virta |
| I_{dyn} | dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus |
| I_k | jatkuvuustilan oikosulkuvirta |
| I_k' | muutostilan oikosulkuvirta |
| I_k'' | alkuoikosulkuvirta |
| I_n | nimellisvirta |
| I_s | sysäysoikosulkuvirta |
| I_{th} | terminen oikosulkuvirta |
| I_{thr} | terminen virtakestoisuus |
| I_{kv} | verkon oikosulkuvirta |
| kA | kiloampeeri |
| kV | kilovoltti |
| MVA | megavoltiampeeri |
| OKM | omakäyttömuuntaja |
| P_n | nimellispätöteho |
| R | resistanssi |
| S | näennäisteho |
| SF_6 | rikkiheksafluoridi |
| S_k | ominaisoikosulkuteho |
| S_{kv} | verkon oikosulkuteho |
| S_n | nimellinäennäisteho |
| TVM | tehovälimuuntaja |
| U | jännite |
| U_n | nimellisjännite |
| X | reaktanssi |
| X_d | suhteellinen reaktanssi |
| X_d | jatkuvuustilan reaktanssi |
| X_d' | muutostilan reaktanssi |
| X_d'' | alkutilan reaktanssi |
| Z | impedanssi |

1 JOHDANTO

Sähkö on yhteiskuntamme toiminnan kannalta välttämätön hyödyke, siksi sähköntuotanto ja siihen kuuluvat toiminnot on luokiteltu työ- ja elinkeinoministeriön hallinnonalan alaisuuteen kuuluvaksi kriittiseksi alaksi. Henkilökunta on luokiteltu yhteiskunnan kannalta kriittisellä alalla toimivaksi henkilöstöksi. (Valtioneuvosto 2020)

Sähkön saatavuuden turvaamiseksi sähköntuotantolaitteistot kannattaa uusida ennen oletetun käyttöajan täyttymistä, tällä toimenpiteellä saadaan sähköjakelun keskeytykset kuluttajille minimoitua. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi Taivalkosken vesivoimalaitoksen päämuuntajien ja kytkinkojeiston saneeraus on tullut ajankohtaiseksi ja tarpeelliseksi, koska laitteistot ovat otettu käyttöön vuonna 1976.

Saneerauksen pitää olla tekniseltä ja taloudelliselta kannalta järkevä yritykselle, siksi tässä työssä selvitetään 4:n erilaisen saneerausvaihtoehdon oikosulkuvirtoja, jotka vaikuttavat uuden kojeiston valintaan ja siten myös hintaan. Uuden kojeistomallin halutaan parantavan henkilökunnan työturvallisuutta ja laitoksen käytettävyyttä. Työturvallisuutta ja käytettävyyttä verrataan nykytilanteeseen ja selvityksen perusteella tehdyn päätöksen pitää olla toimiva ratkaisu seuraavat 40 vuotta.

Lähtötilanteen tiedot käydään selvittämässä vesivoimalaitoksella ja samalla tehdään lisäselvitystä ja tarkennusta opinnäytetyön tehtäviin. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää kytkinkojeistoon kohdistuvat kuormitus- ja oikosulkuvirrat, mitoittaa uudet kojeistot kestävästi ne kaikissa tilanteissa sekä vertailla erilaisia sähkön siirtoratkaisuja päämuuntajilta kantaverkkoon. Työturvallisuus laitteiston käyttäjän kannalta ja taloudellinen näkökanta yrityksen kannalta ovat myös selvityksen kohteena. Saneerauksen yhteydessä kantaverkosta poistuu 220 kV linja ja 110 kV linja jää käyttöön. Tietopohjana käytetään oikosulkuvirtalaskennan ja laitteiston mitoituksen teorioiden periaatteita sekä laitoksen omaa dokumentointia.

Opinnäytetyön ulkopuolelle rajattiin laitoksen saneerauksen yhteydessä tehtävät rakennustyöt, laitevalmistajan valinta ja kannattavuuslaskelmat. Laitevalmistajien

hinta-arvioita silti hyödynnetään kustannusarvion laatimisessa ja kannattavuuslaskelmissa. Kemijoki tekee ne myöhemmin projektin valmistelujen edetessä.

2 KEMIJOKI OY

Kemijoki Oy on Suomen merkittävin vesi- ja säätövoiman tuottaja ja tuottaa noin kolmanneksen Suomen vesisähköstä. Vesivoima on myös tärkein uusiutuva sähköntuotantomuoto Suomessa. Yhtiö on perustettu vuonna 1954 ja on valtion pääomistama yritys 50,1 %:n osuudella ja sen päätoimipaikka sijaitsee Rovaniemellä. Henkilökuntaa oli 42 henkilöä vuoden 2022 lopussa. (Kemijoki 2022d, 4.)

Vuonna 2022 yhtiö tuotti sähköenergiaa vesivoimalla 4750 GWh, mikä vastasi reilua kolmasosaa kotimaisesta vesivoimalla tuotetusta sähköstä. Investointien kokonaismäärä vuonna 2022 oli 21,6 miljoonaa euroa, kiinteistöveroä yhtiö maksoi noin 19 miljoonaa euroa. (Kemijoki 2022d, 8.)

Kemijoki omistaa 20 vesivoimalaitosta, joiden kokonaisteho on yli 1 100 MW. Laitoksista 16 sijaitsee Kemijoen vesistöalueella, kaksi Lieksanjoessa ja kaksi Kymijoenjoessa. Lisäksi säännöstelee Lokan ja Porttipahdan tekojärviä sekä Kemijärveä ja Olkkajärveä. Toiminta-alueen kolmella jokivarrella on mittaa yhteensä yli 1 000 kilometriä. (Kemijoki 2022c.)

Kuviossa 1 esitetään Kemijoki Oy:n virallinen sininen logo, jossa vesi kohtaa pyörivän turbiinin ja muuttaa veden voiman sähköksi, salama kuvastaa tätä tapahtumaa logossa (Kemijoki 2022a).



Kuvio 1. Kemijoen virallinen logo (Kemijoki Oy 2022a)

3 TAIVALKOSKEN VESIVOIMALAITOS

Taivalkosken vesivoimalaitos sijaitsee Keminmaassa ja on rakennettu vuosina 1972-1976. Voimalaitoksella on kolme yhtä suurta generaattoria 44,7 MW tehoiltaan, kokonaistehon ollessa 134,1 MW ja se tuottaa vuosittain energiaa keskimäärin 540,7 GWh. Laitokselle on tehty peruskorjaus vuosina 2015-2017, jolloin uusittiin turbiinit ja juoksupyörien napojen voitelutapa vaihdettiin öljystä veteen, mahdollisen ympäristövahingon minimoimiseksi ja samalla parannettiin turbiinin hyötysuhdetta. Kuviossa 2 esitetään voimalaitos alavirran puolelta kuvattuna, molempien päämuuntajien yläpuolelta lähtee kaksi siirtolinjaa etualalla sijaitsevalle ulkokytkinkentälle. (Kemijoki Oy 2022b.)



Kuvio 2. Taivalkosken vesivoimalaitos (Kemijoki Oy 2022b)

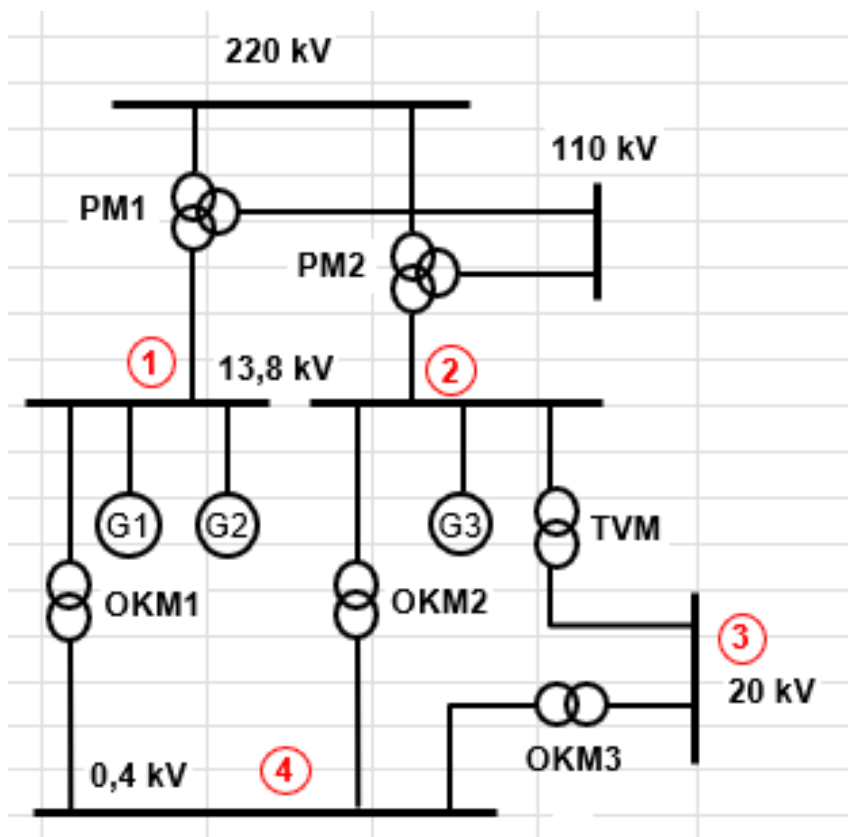
3.1 Tekninen nykytilanne lyhyesti kuvattuna

Voimalaitoksella on käytössä kolme generaattoria, jotka syöttävät sähköä generaattorikatkaisijan ja erottimien kautta 13,8 kV kytkinlaitoksen kiskostoon, kiskostoon on myös liitetty omakäyttömuuntajat sekä tehovälimuuntaja. Käytössä

on kaksoiskiskojärjestelmä ja erottimilla voidaan valita, kumpaan kiskoon sähkö syötetään.

Kiskot on numeroitu punaisilla numeroilla pääkaavioon ja niiden jännitetasot on merkitty viereen, samaa numerointia käytetään myöhemmin tekstissä viitteenä kiskoon ja taulukoissa laskentatuloksia esittäessä.

Kisko 1 syöttää päämuuntajaa 1 ja kisko 2 päämuuntajaa 2. Päämuuntajilta sähkö siirretään 110 kV ja 220 kV linjoja pitkin ulkoyhteyksien kautta kantaverkkoon. Kuviossa 3 esitetään yksinkertaistettu pääkaavio.



Kuvio 3. Pääkaavio (Kemijoki Oy 2023)

3.2 Generaattorien nimellisarvot

Generaattorien nimellisarvot saatiin luettua pääkaaviosta. Generaattorit ovat identtiset keskenään ja generaattorin nimellinäennäisteho on 48 MVA, nimellisvirta 2,008 kA, nimellijännite 13,8 kV ja $\cos \varphi$ 0,93.

3.3 Generaattorien ja sähköverkon oikosulkuvirta-arvot

Generaattorien ja verkon oikosulkuvirta-arvot on valmiiksi laskettu Kemijoen toimesta. Yhden generaattorin alkuoikosulkuvirta on 13,1 kA, 110 kV verkon alkuoikosulkuvirta liityntäpisteessä on 20 kA, 220 kV alkuoikosulkuvirta liityntäpisteessä on 7 kA. Suurin alkuoikosulkuvirta, joka on suuruudeltaan noin 60 kA, kohdistuu 13,8 kV konejännitekiskoon 1, konejännitekiskoon 2 kohdistuu noin 44 kA alkuoikosulkuvirta.

3.4 Kytkinlaitos

Laitoksen kaikki generaattorikatkaisijat, omakäyttömuuntajakatkaisijat ja tehovälimuuntajakatkaisija sekä näiden erottimet sijaitsevat generaattorien yläpuolella olevassa kytkinlaitoshuoneessa. Liitynnät generaattoreilta katkaisijoille tulevat lattian läpi kukin omaan avokennoon. Avokennot ovat erotettu väliseinillä toisistaan ja numeroitu asianmukaisesti. Väliseinillä on suojattu viereisissä kennoissa olevat kojeet ja asentajat mahdollisen häiriön aiheuttamilta vahingoilta. Avokennoissa on BBC:n valmistamat paineilmakatkaisijat, jotka toimivat noin 30 bar:n paineella, katkaisijat on mitoitettu 24 kV jännitteelle ja 2500 A nimellisvirralle. Paineilmaa käytetään valokaaren sammuttamisen ja katkaisijan ohjaamiseen. Paineilman takia katkaisijat ovat äänekkäitä toimiessaan ja vaativat korkeapaineilmalaitteiston voimalaitokselle. (Elovaara & Haarla 2011b, 119, 177.) Paineilmalaitteisto on altis vuodoille, se aiheuttaa katkaisijalle toimintaepävarmuutta sekä siitä syntyy nopeasti energiahukkaa kompressorin yrittäessä pitää painetta yllä verkostossa. Tekniikka on vanhentunutta ja korvautunut tyhjiö- tai SF₆ eristeisillä katkaisijoilla saneerauksissa, Taivalkoskella vaihtuminen tapahtuu myös saneerauksen yhteydessä (Aura & Tonteri 1993, 279).

Erottimet ovat Strömbergin valmistamat ilmaeristeiset sisätilaan tarkoitetut OJON-tyyppiset 3-24 A 2500 -malliset. Mallityyppi kertoo niiden olevan 3-vaiheiset, suurin sallittu käyttöjännite (rated voltage) 24 kV ja mitoitettu nimellisvirralle (rated normal current) 2500 A. Taulukossa 1 esitetään valmistajan ilmoittamat mitoitusarvot.

Taulukko 1. Erottimien mitoitusarvot (ABB 2022, 5)

Technical data

Table 2

| Type | Rated voltage | Rated normal current | Rated short-time current | Rated peak withstand current | Distance of nearest post insulator from disconnect post insulator | Control torque | Isolating distance | Weight | Commercial code |
|-----------|-----------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|---|----------------|--------------------|--------|-----------------|
| OJON | kV | A | r.m.s. kA 1s | kA | | Nm | mm | kg | |
| 3-1A1000 | 1 | 1000/1250 ²⁾ | 50 | 100 | 360 mm | 40 ± 20 | 60 | 17 | |
| 3-1/1600 | 1 | 1600/2000 ²⁾ | 80 | 120 | 400 mm | 50 ± 20 | 70 | 43 | |
| 3-1A2500 | 1 ¹⁾ | 2500/2900 ²⁾ | 90 | 150 | 350 mm | 70 ± 30 | 70 | 49 | |
| 3-1A4000 | 1 ¹⁾ | 4000/4600 ²⁾ | 90 | 150 | 350 mm | 130 ± 40 | 65 | 65 | |
| 3-10/630 | 12 | 630 | 31,5 | 80 | 3 x a | 40 ± 10 | 145 | 20 | |
| 3-10/1000 | 12 | 1000 | 40 | 100 | 3 x a | 45 ± 15 | 165 | 35 | |
| 3-10/1600 | 12 | 1600 | 50 | 100 | 3 x a | 60 + 20 | 160 | 52 | |
| 3-12A2500 | 12 | 2500 | 60 | 150 | 3 x a | 150 ± 30 | 140 | 71 | |
| 3-12A4000 | 12 | 4000 | 60 | 150 | 3 x a | 160 ± 30 | 155 | 90 | |
| 3-24A630 | 24 | 630 | 20 | 50 | 3 x a | 45 ± 15 | 265 | 25 | |
| 3-20/1000 | 24 | 1000 | 30 | 75 | 3 x a | 60 ± 20 | 270 | 48 | |
| 3-20/1600 | 24 | 1600 | 40 | 100 | 3 x a | 100 + 20 | 265 | 65 | |
| 3-24A2500 | 24 | 2500 | 60 | 150 | 3 x a | 180 ± 30 | 240 | 87 | |
| 3-24A4000 | 24 | 4000 | 60 | 150 | 3 x a | 200 ± 40 | 260 | 109 | |

Lisäksi taulukosta 1 selviää, että suurin terminen oikosulkuvirtakestoisuus (rated short-time current) 1 sekunnin ajan on 60 kA ja suurin sallittu dynaaminen oikosulkuvirta (rated peak withstand current) arvo on 150 kA.

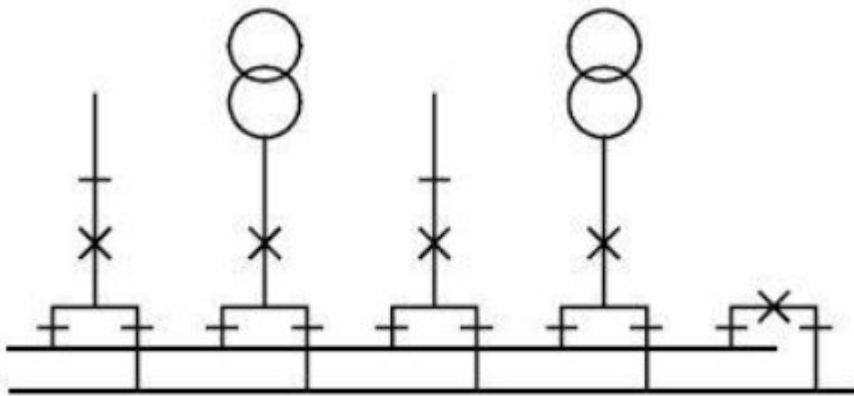
Erottimia on 2 jokaisessa kennossa, ensimmäisellä syötetään kiskoa 1 ja toisella kiskoa 2. Kuviossa 4 näkyy generaattorikatkaisija ovien takana alhaalla ja erottimet oven yläpuolella.



Kuvio 4. Generaattorikatkaisija ja erotin

3.5 Konejännitekiskosto

Kiskosto sijaitsee erottimien yläpuolella lähellä kattoa ja on avonainen kaksoiskiskojärjestelmä. Järjestelmässä on generaattorikatkaisijan jälkeen omat erottimet molemmille kiskoille, tämä lisää laitteiston käytettävyyttä mahdollistamalla useita erilaisia kytkentävaihtoehtoja. Kaksoiskiskojärjestelmä on hyvin toimiva ratkaisu tähän laitokseen, kuviossa 5 esitetään periaate kaksoiskiskojärjestelmästä, jossa on lisäksi kiskokatkaisija kiskojen välissä.



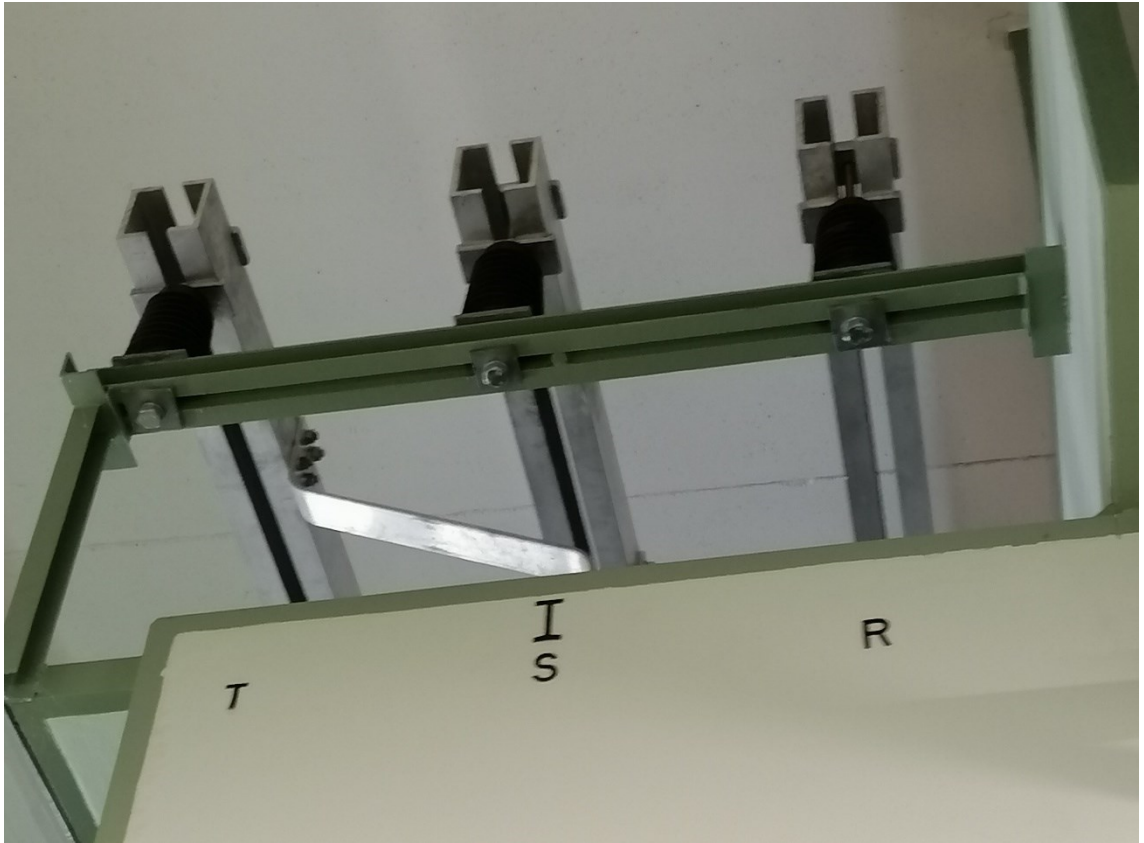
Kuvio 5. Kaksoiskiskojärjestelmä (ABB 2000b, 2)

Kiskoprofiilina on käytetty 2*U-kiskoa, tällä ratkaisulla on varauduttu suurien oikosulkuvirtojen aiheuttamiin mekaanisiin voimarasituksiin (Aura & Tonteri 1993, 338).

Kiskoston mitoitusarvot luettiin pääkaaviosta ja ne ovat seuraavat:

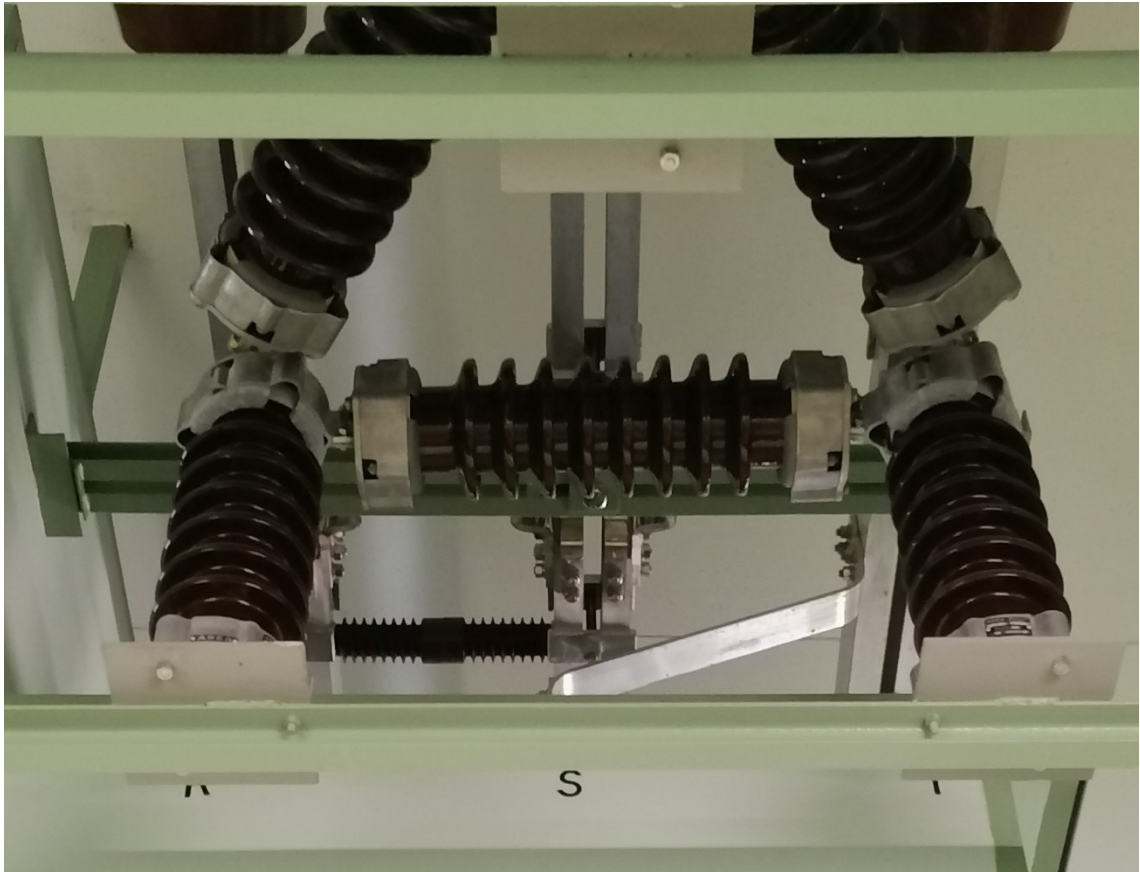
- nimellisvirta 4300 A
- nimellijännite 13,8 kV
- terminen oikosulkuvirtakestoisuus 63 kA (1s)
- dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus 140 kA.

Kuviossa 6 esitetään kiskoston 1 sijainti ja rakenne kytkinlaitoksella erottimien yläpuolella lähellä kattoa, virtamuuntajat ja ylijännitesuojat sijaitsevat kiskoston toisessa päädyssä.



Kuvio 6. Kiskoston 1 sijainti ja rakenne

Kiskosto 2 syöttää päämuuntajaa 2, kuviossa 7 näkyy kiskoston päätyrakenne ja sen päädyssä olevat ylijännitesuojat. Virtamuuntajat sijaitsevat kiskoston toisessa päädyssä.

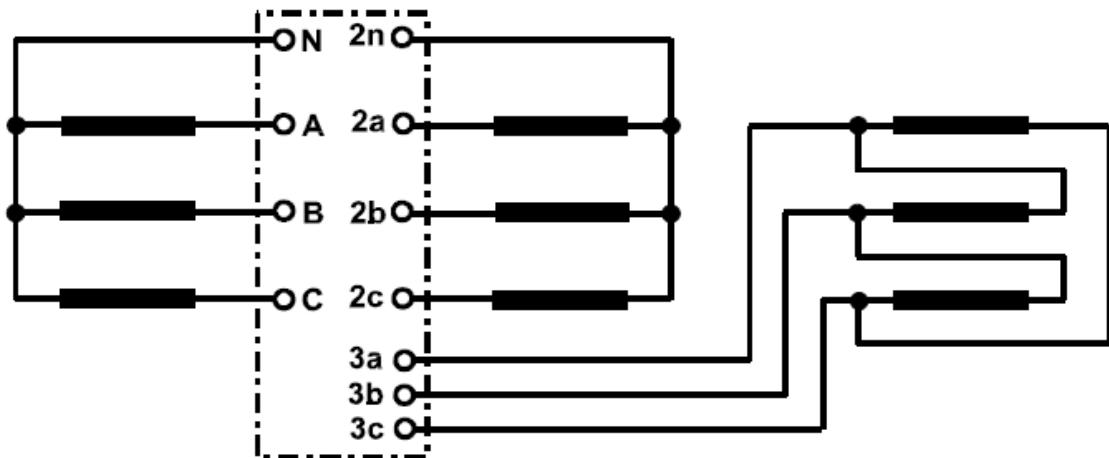


Kuvio 7. Kiskoston 2 päätyrakenne ja ylijännitesuojat

3.6 Päämuuntajat ja siirtolinjat ulkokytkinkentälle

Voimalaitoksella on käytössä 2 kolmikäämimuuntajaa eli tertiäärimuuntajaa, muuntajissa on yläjännitetaso 220 kV / 125 MVA, alajännitetaso 116 kV / 160 MVA ja toinen alajännitetaso 13,8 kV / 100 MVA. Generaattoreilta jännite syötetään 13,8 kV jännitetasolla muuntajan 3a-3b-3c napoihin, 2a-2b-2c-2n navoista sähkö syötetään 116 kV jännitetasolla ja navoista A-B-C-N 242 kV jännitetasolla ulkokytkinkentälle 4:ää avolinjaa pitkin.

Kuviossa 8 esitetään kolmikäämimuuntajan periaate.



Kuvio 8. Kolmikäämimuuntaja (ABB 2000b, 2)

Muuntajien kytkentätapa on YNyn0d11 eli yläjännitepuoli on tähtikytketty ja tähtipiste muuntajan kannella, 116 kV alajännitepuoli tähtikytketty ja tähtipiste muuntajan kannella, 13,8 kV alajännitepuoli kolmiokytketty. YN tarkoittaa suurinta jännitettä (242 kV), yn0 tarkoittaa keskimmäistä jännitettä (116 kV) ja sen vaihesiirtokulma on 0 astetta verrattuna suurimpaan jännitteeseen, d11 tarkoittaa pienintä jännitettä (13,8 kV), jonka vaihesiirtokulma on 30 astetta edellä verrattuna suurimpaan jännitteeseen. (ABB 2000b, 2.)

Muuntajat ovat hengittävää rakennetta, öljyn lämmitessä sen tilavuus kasvaa ja silloin öljyä siirtyy erilliseen paisuntasäiliöön ja vastaavasti jäähtyessään öljy valuu takaisin muuntajaan. Jäähdytys tapa muuntajissa on ONAN/ONAF eli öljyn ja ilman virtaus on vapaa (ONAN) ja ilman virtaus vielä tehostettu öljynlämpömittarin ohjaamalla tuulettimilla (ONAF), tällä jäähdytystavalla voidaan kuormittaa muuntajaa enemmän sen lämpiämättä liikaa. (ABB 2000b, 6.)

Kuviossa 9 esitetään päämuuntaja 2 kuvattuna laitoksen alavirran puolella sijaitsevassa muuntajabunkkerissa. Oikeassa yläaidassa näkyy kytkinlaitoshuoneesta seinän läpi tuleva kiskosto 2.



Kuvio 9. Päämuuntaja 2

Valmistaja ilmoittaa päämuuntajalle tekniset arvot arvokilvessä, joka on kiinnitetty päämuuntajaan. Taulukossa 2 esitetään päämuuntajan kilpiarvot.

Taulukko 2. Päämuuntajan kilpiarvot (Kemijoki Oy. Arkisto)

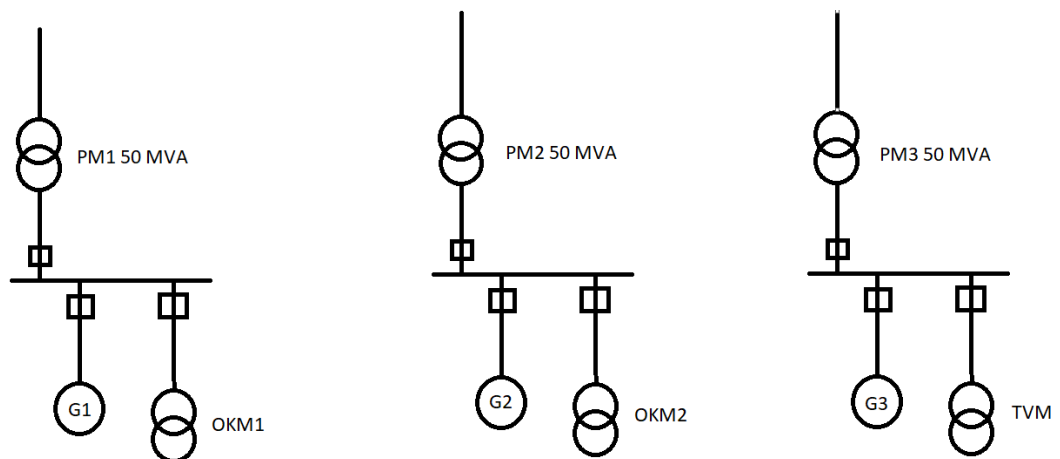
| Strömberg | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|----------------|-----------------|----------|----------------------|---------------|----------------------|------|---|-----|
| 3-v. muuntaja | Laji | KTRF 245 X 193 | | No | 549238 | | Valmistusvuosi | 1974 | | |
| Standardit | IEC 76/1967 | | Kytkenä | YNyn0d11 | | Jäähdytystapa | DNAP(OHAN 70%) 50 Hz | | | |
| A - B - C | 125000 | kVA | 242000 | V | 298 | | A | | | |
| 2a - 2b - 2c | 160000 | kVA | 115000 ± 8x1,5% | V | 717 - 803 - 913 | | A | | | |
| 3a - 3b - 3c | 100000 | kVA | 13800 | V | 4180 | | A | | | |
| Eristystaso | | | | | Symm. oikosulkukest. | | | | | |
| A - B - C - N | 900 - 395 N | 550 - 230 | kV | 3,7 | kA | 3 | a | | | |
| 2a - 2b - 2c-2n | 550 - 230 n | 380 - 230 | kV | 7,0 | kA | 3 | a | | | |
| 3a - 3b - 3c | 95 - 38 | | kV | 43,5 | kA | 3 | a | | | |
| Suunta | ABC/2a2b2c | | ABCN/3a3b3c | | 2a2b2c2n/3a3b3c | | | | | |
| Tehoperusta | 160000 | | 160000 | | 160000 | | | | | kVA |
| SÄätösänto | 1/1 | 1/10 | 1/19 | | | 1 | 10 | 19 | | |
| Z _k | 16,1 | 15,6 | 15,0 | | 14,2 | 32,3 | 31,8 | 31,8 | % | |
| R _k | 0,41 | 0,40 | 0,41 | | 0,43 | 0,55 | 0,55 | 0,56 | % | |
| Z _o | | | | | 11,8 | 20,3 | 20,4 | 21,0 | % | |
| P _o | 101 | kW | Kokonais- | 220000 | kg | Nostettavan | 119000 | kg | | |
| S _o | 350 | kVA | öljyn | 58100 | kg | Kuljetuspaino | 184000 | kg | | |
| P _j | 10,3 | kW | paino | | | öljyineen | 139000 | kg | | |
| SÄ1118 | on | tyhjön- | kestävä | | | öljytie | | | | |
| YKLP 1295 | | | | | | | | | | |

4 SANEERAUSVAHTOEHDOT

Voimalaitoksen saneerauksen esisuunnittelussa Kemijoki on valinnut tarkasteltavaksi 4 erilaista vaihtoehtoa, jotka esitellään tässä luvussa.

4.1 Vaihtoehto 1

Vaihtoehdossa 1 päämuuntajat korvataan 3 nimellistehoiltaan 50 MVA muuntajilla, avokytkinlaitteisto ja kaksoiskiskojärjestelmä korvataan metallikoteloiduilla kytkinkojeistoilla. Kytkinkojeistot varustetaan generaattorikatkaisijalla, erottimilla ja mittamuuntajilla sekä yksikiskojärjestelmällä, johon liitetään omakäyttömuuntajat ja tehovälimuuntaja. Kaikille 3 generaattorille tulee oma päämuuntaja, kytkinkojeisto ja avosiirtolinja 110 kV ulkokytkinkentälle. Kuviossa 10 esitetään uusi pääkaavio.

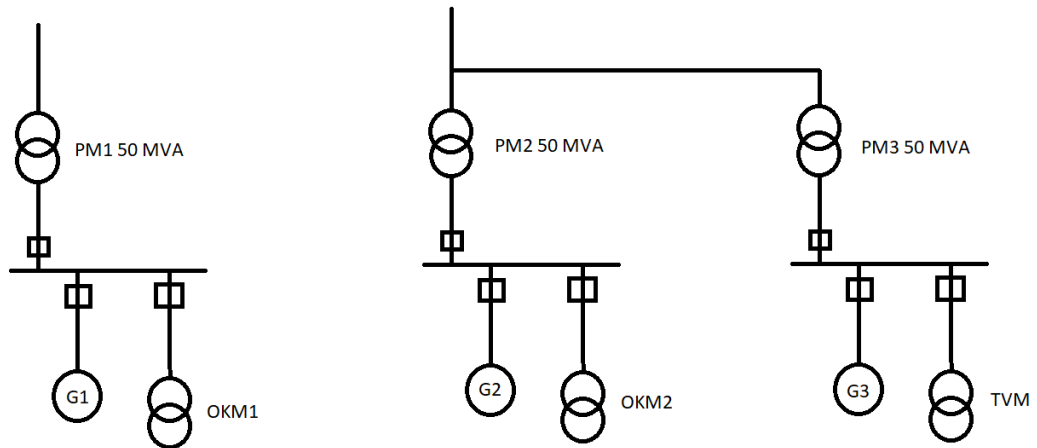


Kuvio 10. Vaihtoehto 1 pääkaavio (Kemijoki 2023)

Tehtävänä on järjestelmän oikosulkumitoitus sekä 13,8 kV konejännitekytkinkojeiston pääkomponenttien mitoitus, kojeiston kuormitus- ja oikosulkukestoisuudet, katkaisijoiden ja mittamuuntajien pääarvot. Tavoitteena on saada suurin kojeistoon vaikuttava oikosulkuvirta alle 50 kA, koska silloin voidaan käyttää hankintahinnaltaan edullisia alle 50 kA virtakestoisia kytkinkojeistoja.

4.2 Vaihtoehto 2

Vaihtoehto 2 on muuten samanlainen kuin vaihtoehto 1, mutta päämuuntajien 2 ja 3 sähköenergia siirretään vain 1:llä avosiirtolinjalla 110 kV ulkokytkinkentälle. Kuviossa 11 esitetään pääkaavio.



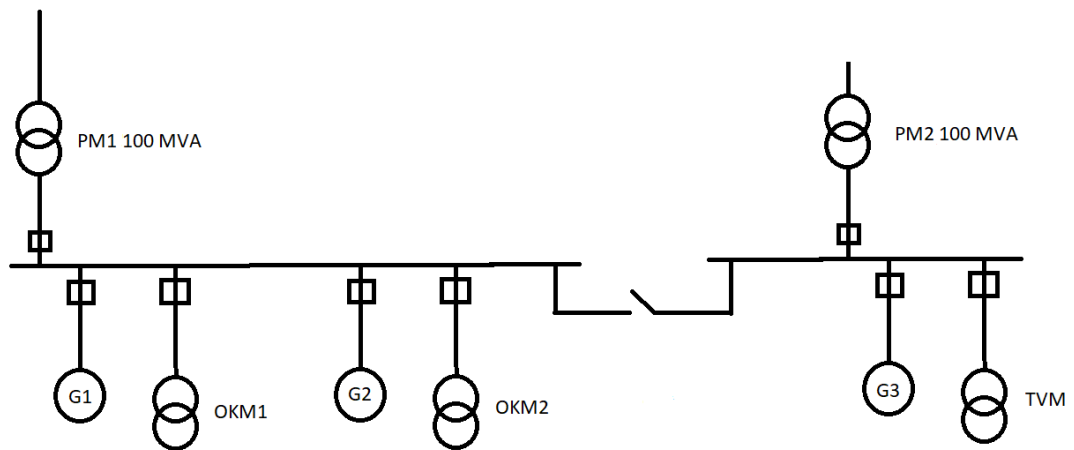
Kuvio 11. Vaihtoehto 2 pääkaavio (Kemijoki 2023)

Tehtävänä on järjestelmän oikosulkumitoitus sekä 13,8 kV konejännitekytkinkojeiston pääkomponenttien mitoitus, kojeiston kuormitus- ja oikosulkukestoisuudet, katkaisijoiden ja mittamuuntajien pääarvot sekä uuden PM3 muuntajan 110 kV liittymän toteutusmahdollisuutta hyödyntäen nykyistä olemassa olevaa PM2 liittytäjohtoa. Tavoitteena on selvittää, voidaanko Finchjohtimia ja vanhaa avosiirtolinjaa hyödyntää saneerauksen jälkeen. Jos voidaan, uuden siirtolinjan rakentamiskustannukset jäisivät pois.

4.3 Vaihtoehto 3

Vaihtoehdossa 3 nykyinen 2:n päämuuntajan liityntä jää käyttöön ja nykyinen 13,8 kV avokytkinlaitos korvattaisiin 2 uudella metallikoteloidulla kytkinkojeistolla.

Kytinkojeistot varustetaan yksi- tai kaksikiskojärjestelmillä, joihin liitetään omakäyttömuuntajat ja 15 MVA tehovälimuuntaja, kiskojen välissä on poikittaiserotin lisäämässä laitoksen käytettävyyttä. Päämuuntajat korvataan nykyaikaisilla kaksikäämimuuntajilla, tehoiltaan 100 MVA. Kuviossa 12 esitetään pääkaavio.



Kuvio 12. Vaihtoehto 3 pääkaavio (Kemijoki 2023)

Tehtävänä on järjestelmän kuormitus- ja oikosulkumitoitus. Tavoitteena on selvittää, löytyisikö soveltuvaa ratkaisua markkinoilla olevista metallikoteloituista kytinkojeistoista, joilla voitaisiin korvata nykyinen avokytkinlaitos, joko 1-kisko tai 2-kisko ratkaisuna metallikoteloituna kytinkojeistona.

4.4 Vaihtoehto 4

Vaihtoehdossa 4 nykyinen 2:n päämuuntajan liityntä jää käyttöön, päämuuntajat korvataan nykyaikaisilla kaksikäämimuuntajilla, tehoiltaan 100 MVA. Katkaisijat ja erottimet vaihdetaan suurempi tehoisiin, nykyisen 13,8 kV avokytkinlaitoksen kiskosto jää käyttöön ja tarvittaessa vahvistetaan kestämiin tulevat oikosulkuvirrat. Pääkaavio säilyisi alkuperäisessä muodossa, lukuun ottamatta päämuuntajia. Tavoitteena on selvittää suurin kojeistoon vaikuttava oikosulkuvirta, jotta voidaan valita oikean virtakestoiset katkaisijat ja osataan vahvistaa kiskostoa riittävästi.

5 OIKOSULKUVIRRRAN LASKENTA

5.1 Oikosulkuvirta laskennan teoria

Sähkötekniikassa käytetään standardien mukaisia laskentakäytäntöjä määriteltäessä oikosulkuvirtoja (short-circuit current) vikatilanteissa. IEC-standardissa 60909-0: 2001 on määritelty kaksi erilaista tapaa arvioida laskemalla vikatapauksessa ilmenevät oikosulkuvirrat: Thevenin-menetelmä ja alkuoikosulkutehoon eli lähdejännitteeseenperustuva tapa. Thevenin menetelmä on tarkempi ja työläämpi tapa. Tässä opinnäytetyössä käytetään alkuoikosulkutehoon perustuvaa laskentatapaa, koska sitä on harjoiteltu enemmän koulussa ja silläkin saadaan tarpeeksi tarkat arvot laskettua. Standardissa on ohjeistettu myös laskentatapa generaattorin läheisyydessä tapahtuvalle oikosululle, joka on tämän opinnäytetyön tarkastelun kohteena. (Aura & Tonteri 1993, 161.)

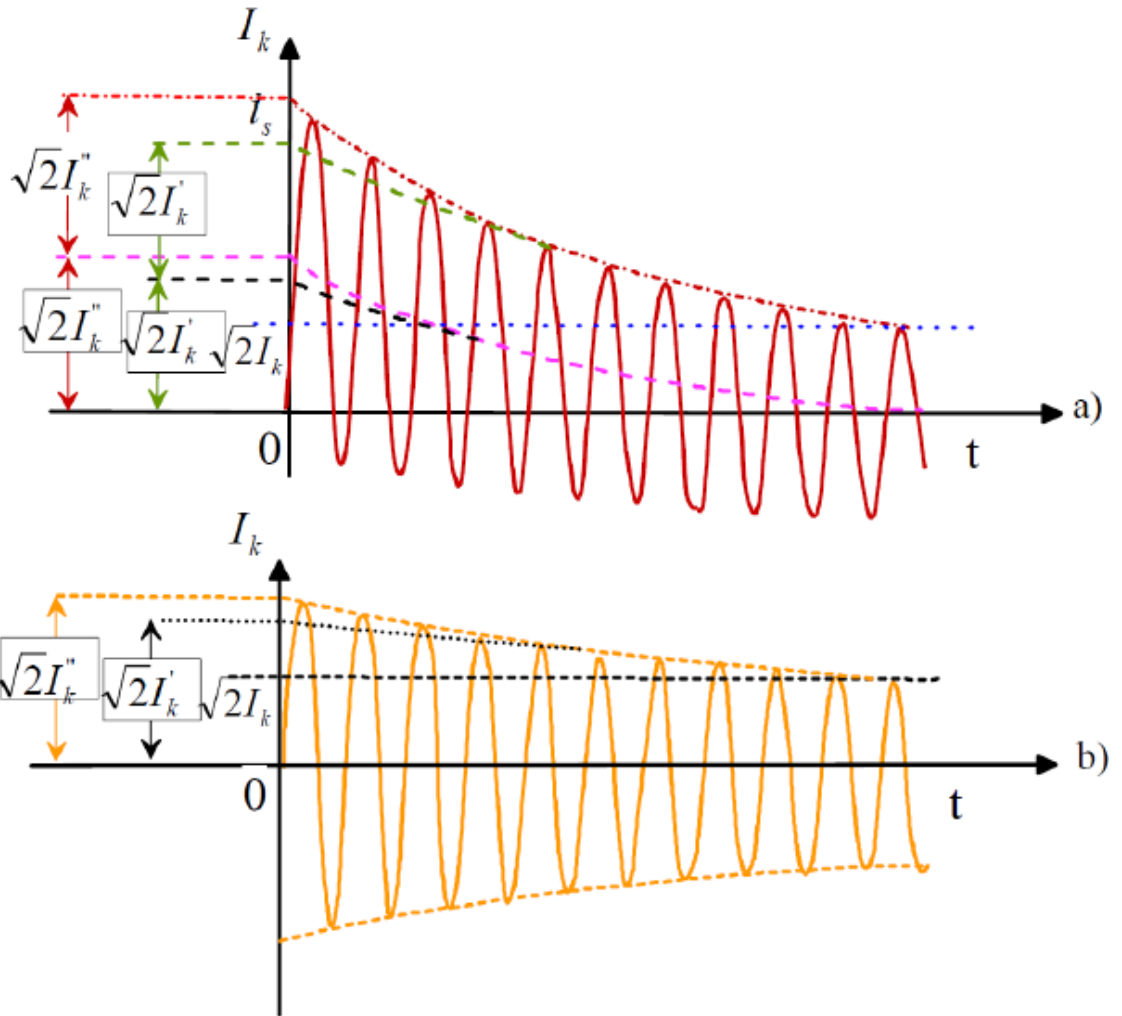
Laitoksella tapahtuvia vikatilanteita vastaan pitää suojautua ennakkoon laskemalla erilaisten vikatapausten yhteydessä esiintyviä oikosulkuvirtoja laitteiston mitoituksen, relesuojauksen asettelun ja siten myös henkilökunnan turvallisuuden takia. Maksimioikosulkuvirtaa käytetään mitoittaessa komponentteja ja minimioikosulkuvirtaa käytetään suojausasetteluissa. Minimioikosulkuvirralla asetellaan relesuojaus kohdalleen, jolloin vikakohta saadaan nopeasti erotettua verkosta ja samalla minimoidaan lämpenemisen ja oikosulkuvoimien aiheuttamat laitteistovahingot. (Lakervi & Partanen 2008, 176.)

Kantaverkkoyhtiö vaatii, että voimakoneistot on suunniteltava kestämään verkonpuolella tapahtuvat yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisten maa- tai oikosulkujen aiheuttamat mekaaniset rasitukset, irtoamatta verkosta ja pysymään tahtikäytössä, kun vian kesto on enintään 0,25 sekuntia (Fingrid 2018, 37).

Tavallisimpia vikoja ovat vaiheiden väliset oikosulut ja vaiheen ja maanvälinen maasulku. Oikosulun alkuhetken mukaan vikavirta esiintyy symmetrisenä tai epäsymmetrisenä. Suurimman vikavirran aiheuttaa 3-vaiheinen oikosulku, joka voi olla 30-40 kertainen normaalitilanteessa esiintyvään nimellisvirtaan verrattuna. Epäsymmetrisessä oikosulkuvirrassa on mukana

tasavirtakomponentti, mutta laskennassa se jätetään usein huomioimatta ja ratkaistaan käyttäen symmetristen komponenttien menetelmää.

Kuviossa 13 kuvaaja a esittää epäsymmetrisen vikavirran muodon, kuvaaja b esittää symmetrisen vikavirran muodon. (Aura & Tonteri 1993, 159-162.)

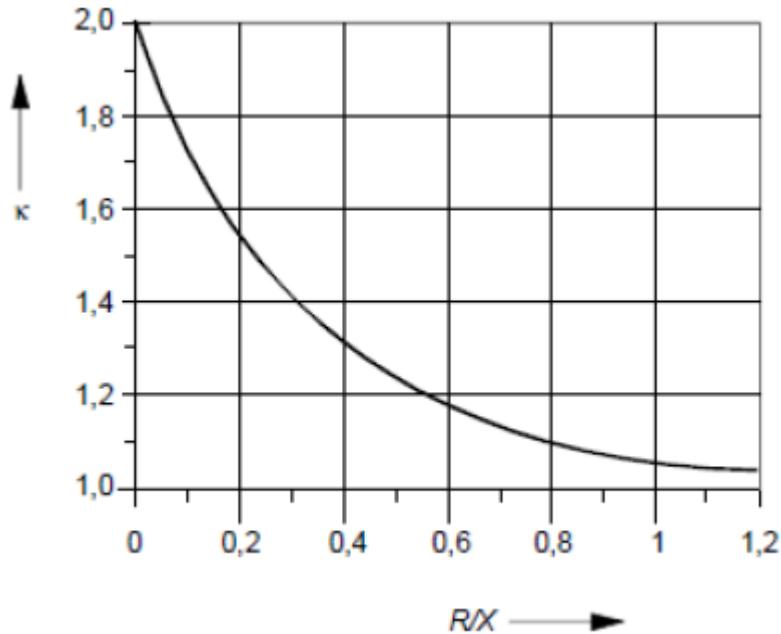


Kuvio 13. Vikavirtojen vaimeneminen (Aura & Tonteri 1993, 159)

Epäsymmetrisen oikosulun alkuhetken jälkeistä suurinta virran huippuarvoa sanotaan sysäysoikosulkuvirraksi (I_s) eli dynaamiseksi oikosulkuvirraksi (I_{dyn}) (dynamic short-circuit current) ja tätä arvoa käytetään kojeiden ja laitteiden mitoitusarvona. Mitoitusarvolla tarkoitetaan, että laitteiston pitää kestää rikkoutumatta tämän virran aiheuttamat mekaaniset rasitukset. Dynaamisen oikosulkuvirran hetkellisen huippuarvon laskennassa käytetään sysäyskerrointa, sysäyskerroimen tarkka-arvo voidaan laskea piirin reaktanssin ja resistanssi

suhteella tai lukea suoraan taulukosta 3, joka on esitetty standardissa IEC 60909-0: 2001. (Aura & Tonteri 1993, 160-162.)

Taulukko 3. Sysäyskerroin (IEC 2001, 101)



Taulukosta 3 havaitaan sysäyskerroimen olevan aina alle 2 ja keskijännitteellä käytetään yleensä arvoa 1,8. Kaavalla 1 lasketaan dynaamisen oikosulkuvirran suurin hetkellinen huippuarvo.

$$I_{dyn} = k \times \sqrt{2} \times I_k \quad (1)$$

missä

I_{dyn} on dynaaminen oikosulkuvirta

k on sysäyskerroin

I_k on oikosulkuvirran jatkuvuustilan tehollinen arvo

Tehtävänä on määrittää generaattorin jälkeen olevaan kytkinlaitokseen kohdistuvat vikavirrat ja silloin sovelletaan standardissa IEC 60909-0: 2001 esitettyä tahtikoneen läheisyydessä tai kantaverkossa tapahtuvan oikosulun laskentatapaa, jolloin laskennassa käytetään vain tahtireaktansseja ja jätetään resistanssit huomioimatta, koska niiden merkitys on olemattoman pieni. Tahtireaktanssin sijasta käytetään monesti pitkittäistä tahtireaktanssia (X_d'')

kaavoissa. Generaattorin rakenteen takia reaktanssi kasvaa oikosulun kestoaikana, koska magnetoimiskäämiin ja vaimennuskäämityksiin indusoituu virtoja, jotka estävät magneettipäävuota kulkemasta normaalia reittiä. Tästä syystä on määritetty 3 eri ajankohtaa, joihin lasketaan oikosulkuvirran arvo ja valmistaja ilmoittaa generaattorille alkutilan reaktanssiarvon (X_d''), muutostilan reaktanssiarvon (X_d') ja jatkuvuustilan reaktanssiarvon (X_d) suhteellisina arvoina generaattorin nimellisimpedanssista. (Aura & Tonteri 1993, 80-81, 160-162; Elovaara & Haarla 2011a, 138.)

Suhteelliset arvot muutetaan ensimmäisenä reaktanssiarvoiksi kaavalla 2, esimerkkinä käytetään alkutilan reaktanssin kaavaa, muutostilan- ja jatkuvuustilan reaktanssit lasketaan samalla kaavalla käyttämällä niiden suhteellista arvoa, jonka jälkeen voidaan laskea generaattorin oikosulkuteho ja oikosulkuvirrat

$$X_d'' = x_d'' \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2)$$

missä

X_d'' on oikosulkureaktanssi

x_d'' on suhteellinen oikosulkureaktanssi

U_n on nimellisjännite

S_n on nimellisteho

Generaattorin oikosulkuteho lasketaan kaavalla 3.

$$S_k = \frac{U_n^2}{X_d''} \quad (3)$$

missä

S_k on oikosulkuteho

U_n on nimellisjännite

X_d'' on oikosulkureaktanssi

Generaattorin alkutilan oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4, se on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo ja sen perusteella määritetään dynaaminen oikosulkuvirta ja terminen oikosulkuvirta.

$$I_k'' = \frac{U_n}{X_d'' \times \sqrt{3}} \quad (4)$$

missä

I_k'' on alkutilan oikosulkuvirta

U_n on nimellisjännite

X_d'' on oikosulkureaktanssi

Generaattorin syöttämän dynaamisen oikosulkuvirran hetkellinen huippuarvo lasketaan käyttäen alkutilan tehollista oikosulkuvirta-arvoa, joka kerrotaan $\sqrt{2}$ ja saadaan huippuarvo, jonka jälkeen kerrotaan vielä sysäyskertoimella. Kemijoki on käyttänyt sysäyskertoimena arvoa 1,9 omissa laskelmissaan. Kaavassa 5 esitetään laskenta ja vielä yksinkertaistettu tapa helpottamaan laskentaa.

$$I_{dyn} = 1,9 \times \sqrt{2} \times I_k'' = 2,7 \times I_k'' \quad (5)$$

missä

I_{dyn} on dynaamisen oikosulkuvirran huippuarvo

I_k'' on oikosulkuvirran alkutilan tehollisarvo

Terminen oikosulkuvirta (I_{th}) (thermal equivalent short-time current) lasketaan oikosulkuvirran muuttumisen takia, arvo tarkoittaa sitä 1 sekunnin pituista oikosulkua vastaavaa keskimääräistä virta-arvoa, joka kehittää johtimessa saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta. Yleensä terminen oikosulkuvirta lasketaan vain 1 sekunnin kohdalle, mutta myös 3 sekunnin

kohdalle on hyvä laskea, koska laitevalmistajat käyttävät molempia aikoja ilmoittaessaan termisiä oikosulkuvirtakestoisuuksia laitteilleen. Kaavassa 6 esitetään laskentatapa. (Alatalo 1975, 104.)

$$I_{th} = I_k'' \times \sqrt{(m + n)} \times t \quad (6)$$

missä

I_{th} on termisen oikosulkuvirran kestoisuusarvo

I_k'' on oikosulkuvirran alkutilan tehollisarvo

m on tasavirtakomponentin arvo

n on vaihtovirtakomponentin arvo

t on aika sekunteina

Standardi IEC 60909 suosittelee käyttämään oikosulkuvirtojen laskennassa jännitekerrointa (c), koska vikavirtapiirin impedanssien arvioinnissa on epätarkkuutta aina mukana. Sähköverkon vikavirtojen laskennassa jännitekerrointa käytetään kompensoimaan päämuuntajan käämikytkimen asennosta johtuvaa jännitevaihtelua. Taulukossa 4 esitetään standardin suosittelemat kertoimet kaikille jännitetasoille. (Elovaara & Haarla 2011a,175.)

Taulukko 4. Jännitekertoimet (IEC 60909-0 2001, 41)

| Nimellisjännite U_n | Jännitekerroin c laskettaessa | |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | maksimi oikosulkuvirta C_{max} | minimi oikosulkuvirta C_{min} |
| Pienjännite 100V-1000V | | |
| a) 230 V / 400 V | 1.00 | 0.95 |
| b) muut jännitteet | 1.05 | 1.00 |
| keskijännite 1 kV - 35 kV | 1.10 | 1.00 |
| suurjännite > 35 kV | 1.10 | 1.00 |

Jännitekerrointa c käytettäessä se lisätään kaavaan 4, jännitekertoimen käyttö suurentaa lopputulosta ja siten lisää varmuutta kojeiston mitoituksen riittävyteen, kaavassa 7 esitetään uusi muoto.

$$I_k'' = \frac{c \times U_n}{X_d'' \times \sqrt{3}} \quad (7)$$

5.2 Vaihtoehto 1 mitoitus

Mitoitus aloitettiin piirtämällä laskentapohjaan pääkaavion piirros ja uusien päämuuntajien kilpiarvot syötettiin taulukoihin ja näin saatiin laskentapohja vastaamaan uutta tilannetta. Mitoitusta jatkettiin tarkistamalla generaattorille pääkaaviossa ilmoitetut nimellisarvot. Kaavat haettiin oppikirjoista ja syötettiin ne ja lähtötietoina olevat lukuarvot taulukoihin, kaavalla 8 laskettiin generaattorin nimellinäennäisteho.

$$S_n = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \quad (8)$$

missä

S_n on nimellinäennäisteho

U_n on nimellisjännite

I_n on nimellisvirta

Generaattorin nimellispätöteho laskettiin kaavalla 9, lisäämällä tehokerroin $\cos \varphi$ kaavaan 8.

$$P_n = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \times \cos \varphi \quad (9)$$

missä

P_n on nimellispätöteho

U_n on nimellisjännite

I_n on nimellisvirta

$\cos \varphi$ on tehokerroin

Generaattorin nimellisvirta laskettiin kaavalla 10, johtamalla se kaavasta 8.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_n} \quad (10)$$

missä

I_n on nimellisvirta

S_n on nimellinäennäisteho

U_n on nimellisjännite

Päämuuntajan 1 toisiovirta generaattorin syöttämällä nimellisteholla laskettiin kaavalla 11.

$$I_{2PM1} = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_{n2}} \quad (11)$$

missä

I_{2PM1} on päämuuntajan 1 toisiovirta

S on generaattorin nimellinäennäisteho

U_{n2} on päämuuntajan toision nimellisjännite

Tarkistuslaskenta taulukkolaskentaohjelmalla vahvisti ilmoitetut arvot oikeiksi ja samalla todettiin 50 MVA muuntaja valinnan olevan riittävän suuri siirtämään generaattorin nimellistehon kantaverkkoon. Taulukossa 5 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 5. Nimellisarvot

| | | | |
|------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| G1 nimellisvirta | Kisko 1 nimellisvirta | PM1:lle syötettävä teho | PM1 toisiovirta |
| $I_n =$ 2,008 kA | $I_n =$ 2,008 kA | $S =$ 48 MVA | $I =$ 0,235 kA |

Generaattorin oikosulkuvirrat oli laskettu valmiiksi Kemijoen toimesta, arvot siirrettiin laskentapohjaan, tarkistettiin kaavat ja todettiin niiden olevan oikein kaavan 7 mukaisesti sekä valmistajan ilmoittamat arvot olivat oikein syötetty taulukoihin. Muutostilan ja jatkuvuustilan arvoja käytetään relesuojauksen asettelussa, eivätkä ne varsinaisesti liity mitoitukseen. Arvot haluttiin kuitenkin esittää, koska ne liittyvät generaattorin ominaisuuksiin ja niitä käsiteltiin myös teoriaosuudessa. Taulukosta 6 havaitaan, että suhteelliset oikosulkuimpedanssiarvot ovat laskettu reaktanssiarvoiksi, oikosulkutehot ja dynaamiset oikosulkuvirta-arvot ovat laskettu myös ja näitä arvoja käytetään hyväksi myöhemmissä laskuissa. Taulukosta 6 havaitaan myös teorian mukainen oikosulkuvirtojen pieneneminen generaattorin reaktanssien kasvaessa oikosulkuajan pidentyessä sekä dynaamisten oikosulkuvirtojen laskennassa Kemijoen käyttämä kerroin 2,7.

Taulukko 6. Generaattorin oikosulkuvirta-arvot (Kemijoki 2013)

| | | Sk | Idyn (2,7 x) | | | | |
|------------|--------------|---------|--------------|------|----|------|----|
| TA G1 Xdg" | 0,607 ohm | 314 MVA | TA G1 Ik" | 13,1 | kA | 35,4 | kA |
| TA G1 Xdg' | 0,861 ohm | 221 MVA | TA G1 Ik' | 9,3 | kA | 25,0 | kA |
| TA G1 Xdg | 3,372 ohm | 56 MVA | TA G1 Ik | 2,4 | kA | 6,4 | kA |
| | 0,304 | | | | | | |
| TA G2 Xdg" | 0,607 ohm | 314 MVA | TA G2 Ik" | 13,1 | kA | 35,4 | kA |
| TA G2 Xdg' | 0,861 ohm | 221 MVA | TA G2 Ik' | 9,3 | kA | 25,0 | kA |
| TA G2 Xdg | 3,372 ohm | 56 MVA | TA G2 Ik | 2,4 | kA | 6,4 | kA |
| TA G3 Xdg" | 0,607 ohm | 314 MVA | TA G3 Ik" | 13,1 | kA | 35,4 | kA |
| TA G3 Xdg' | 0,861 ohm | 221 MVA | TA G3 Ik' | 9,3 | kA | 25,0 | kA |
| TA G3 Xdg | 3,372 ohm | 56 MVA | TA G3 Ik | 2,4 | kA | 6,4 | kA |

Generaattorin syöttämään kiskoon vaikuttaa myös syöttävän verkon oikosulkuvirta, joka tulee päämuuntajan ja katkaisijan läpi kiskostoon. Syöttävänä taustaverkkona on nimellisjännitteeltään 110 kV suurjännite kantaverkko. Kantaverkkoon liittynnän suunnittelun lähtökohtana käytetään 118 kV käyttöjännitettä ja siksi sitä jännitearvoa käytetään laskennassa. Syöttävän taustaverkon oikosulkuvirraksi Fingrid on arvioinut 40 kA verkon vahvistamisen jälkeen. Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 12. (Fingrid 2018, 33.)

$$Z_{kv} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times I_{kv}} \quad (12)$$

missä

Z_{kv} on syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi

| | | |
|----------|----|---------------------------------|
| c | on | jännitekerroin |
| U_n | on | syöttävän verkon nimellijännite |
| I_{kv} | on | syöttävän verkon oikosulkuvirta |

Kaavalla 13 redusoidaan syöttävän verkon impedanssi 13,8 kV jännitetasolle laskettaessa oikosulkuvirta-arvoja konejännitekiskostoille.

$$Z_{k13,8} = Z_{kv} \times \frac{U_{n13,8}^2}{U_{n118}^2} \quad (13)$$

missä

| | | |
|-------------|----|---|
| $Z_{k13,8}$ | on | reduoitu syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi |
| Z_{kv} | on | syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi |
| $U_{n13,8}$ | on | päämuuntajan ensiön nimellijännite |
| U_{n118} | on | päämuuntajan toision nimellijännite |

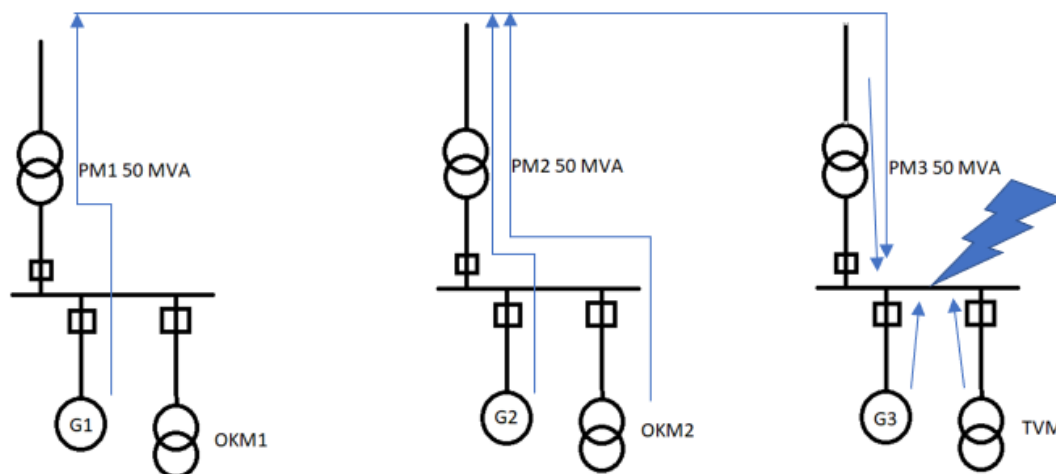
Taulukossa 7 esitetään oikosulkuimpedanssien laskentatulokset syöttävälle verkolle ja redusoituna 13,8 kV jännitetasolle.

Taulukko 7. Syöttävän verkon impedanssiarvot

| FG:n arvot | Ik'' | |
|---------------|--------------|------------|
| 110 kV | 40,00 | kA |
| Z 110 | 1,874 | Ohm |
| Z 13,8 | 0,026 | Ohm |

Lähtötilanteessa kiskostoille suurimmat vaikuttavat oikosulkuvirta-arvot oli laskettu Kemijoen toimesta valmiiksi, mutta uudessa tilanteessa vikavirtojen kulkureitti on erilainen ja siksi reitit piti muokata myös vastaamaan uutta tilannetta. Tehtiin jokaiselle kiskostolle kuvion 14 mukainen havainnekuva helpottamaan oikosulkuvirtareittien ymmärtämistä. Kuviossa 14 esitetään pahin

mahdollinen kohta kiskostolla 3, jossa oikosulkutapauksessa vikavirtojen summa on suurin tehovälimuuntajan takia.



Kuvio 14. Vikavirtojen reitit

Kaikki vaikuttavat vikavirrat saatiin määritettyä havainnekuvan avulla ja sitä käytettiin kaavojen muokkauksessa apuna, kaavalla 6 laskettiin taulukossa 8 esitetyt oikosulkuvirrat jokaiselle kiskostolle.

Taulukko 8. Kiskostojen oikosulkuvirta-arvot

| kisko | I_k'' (alkutila) | | kisko | I_k' (muutostila) | | kisko | I_k (jatkuvuustila) | |
|-------|--------------------|----|-------|---------------------|----|-------|-----------------------|----|
| 1. | 52,32 | kA | 1. | 33,50 | kA | 1. | 25,46 | kA |
| 2. | 52,32 | kA | 2. | 33,50 | kA | 2. | 25,46 | kA |
| 3. | 52,34 | kA | 3. | 33,50 | kA | 3. | 25,46 | kA |
| 4. | 2,59 | kA | 4. | 3,56 | kA | 4. | 2,14 | kA |
| 5. | 28,41 | kA | 5. | 28,16 | kA | 5. | 28,49 | kA |

Taulukosta 8 havaitaan kiskostolla 3 olevan hieman suurempi oikosulkuvirta-arvo kuin kiskostoilla 1 ja 2, tämä johtuu 15 MVA tehovälimuuntajan vaikutuksesta. Kokonaisuudessa vaikutus on pieni ja siksi 1 MVA omakäyttömuuntajia ei ole huomioitu laskennassa ollenkaan. Muutostilassa ja jatkuvuustilassa eroja ei enää näy, koska oletetaan relesuojauksen jo toimineen niiden aikana ja arvot on poistettu kaavoista.

Kaavalla 5 laskettiin dynaamiset oikosulkuvirrat jokaiselle kiskostolle ja taulukossa 9 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 9. Dynaamiset oikosulkuvirta-arvot

| kisko | Idyn (2,7 x) | |
|-------|--------------|----|
| 1. | 141,25 | kA |
| 2. | 141,25 | kA |
| 3. | 141,31 | kA |
| 4. | 7,00 | kA |
| 5. | 76,72 | kA |

Kaavalla 6 laskettiin termiset oikosulkuvirrat jokaiselle kiskostolle 1 ja 3 sekunnin ajalle, taulukossa 10 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 10. Termiset oikosulkuvirta-arvot

| | terminen virta ik term. (1s) | terminen virta ik term. (3s) | |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|----|
| kisko 1: 13,8kV | 47,01 | 66,18 | kA |
| kisko 2: 13,8kV | 47,01 | 66,18 | kA |
| kisko 3: 13,8kV | 47,01 | 66,18 | kA |
| kisko 4: 20kV | 2,69 | 4,45 | kA |
| kisko 5: 0,4kV | 29,66 | 49,41 | kA |

Näillä mitoitusarvoilla voidaan aloittaa etsimään sopivia kytkinkojeistoja.

5.3 Vaihtoehto 2 mitoitus

Vaihtoehdossa 2 generaattorien nimellisarvot ja kytkinkojeiston mitoitusarvot ovat samat kuin vaihtoehdossa 1, virran syöttö mahdollisuus olemassa olevalla yhdellä Finch-suurjännitejohtimella vaihetta kohden päämuuntajilta 2 ja 3 kantaverkkoon oli tässä tapauksessa mitoituksen kohteena.

Finch-johdinta on käytetty voimalaitoksen rakennusaikana ilmajohtimena sähköenergian siirrossa päämuuntajilta 110 kV kantaverkon ulkokytkinlaitokselle. Johtimen suurin sallittu kuormitettavuus on 1,25 kA ja termisen oikosulkuvirtakestoisuus on 60,1 kA 1 sekunnin ajan. Laskettiin Finch-johtimen läpikulkeva kuormitusvirta ja taulukossa 11 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 11. Finch-johtimen virta-arvot

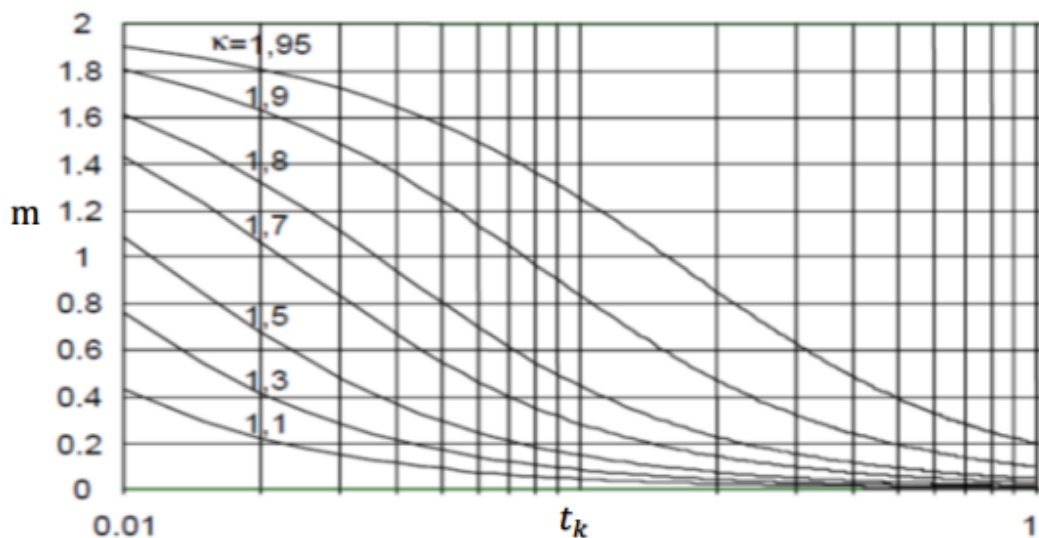
| Finch johtimen virta | | |
|----------------------|-------|----|
| PM1 virta | 0,235 | kA |
| PM2 virta | 0,235 | kA |
| Virta yhteensä | 0,47 | kA |

Todettiin johtimen kuormitettavuuden olevan riittävä.

Syöttävän verkon asettama vaatimus termisestä oikosulkuvirtakestoisuudesta Finch-johtimelle varmistettiin laskemalla kaavalla 6. Oikosulkuvirran muuttumisen takia piti laskea 1 sekunnin pituista oikosulkua vastaava keskimääräinen virta-arvo, joka kehittää johtimessa saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta (Alatalo 1975, 104).

Ensimmäisenä selvitettiin katkaisuaajan ja sysäyskertoimen funktion kuvaajasta tasavirtakomponentin (m) arvo. Verkkotietojen perusteella laskettiin syöttävän verkon reaktanssin ja resistanssin suhde, tulokseksi saatiin 0,12. Taulukosta 3 luettiin suhdelukua vastaava sysäyskerroin, tulokseksi saatiin 1,7. Taulukosta 12 luettiin 1,7 käyrän 1 sekunnin kohdalta m -arvo, tulokseksi saatiin 0,05.

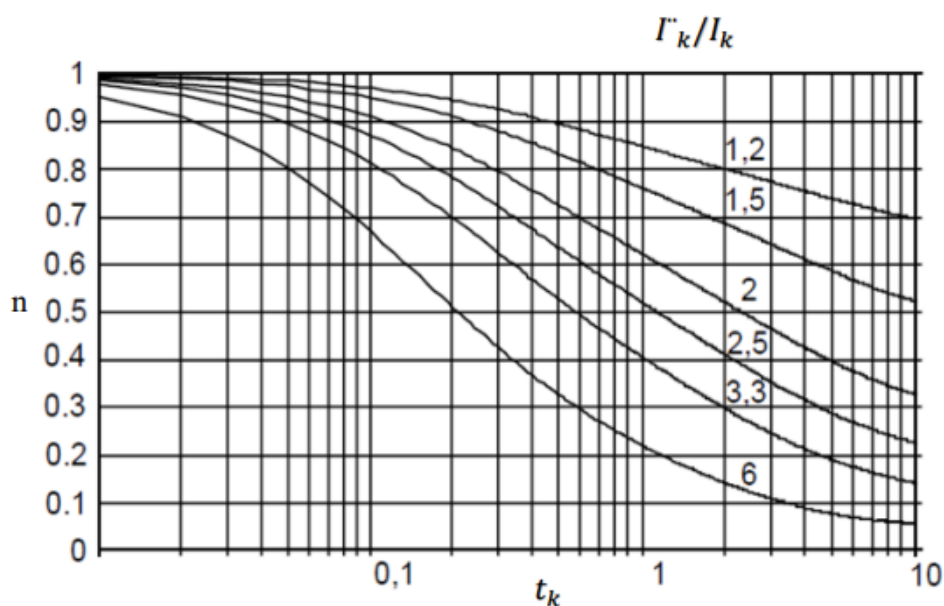
Taulukko 12. Tasavirtakomponentin arvot (IEC 2001, 131)



Taulukon 12 kuvaajista havaitaan tasavirtakomponentin vaimenevan pois kokonaan 1 sekunnin aikana.

Vaihtovirtakomponentin (n) arvo on alkuoikosulkuvirran ja jatkuvuustilan oikosulkuvirran suhteen ja katkaisuaajan funktio. Kantaverkon oikosulkuvirtojen suhde ei ollut tiedossa, mutta laskentaohjeessa kehoitettiin tällaisessa tapauksessa käyttämään arvoa 1. Käytännössä kantaverkko on niin vahva, ettei vaihtovirtakomponentin vaimenemista tapahdu, vaikka oikosulun kesto aika olisi useita sekunteja, silloin puhutaan ”jäykästä verkosta” ja suhde on 1. Taulukosta 13 luettiin n -arvoksi 1, joka on sama katkaisuajasta riippumatta. (Alatalo 1975, 104.)

Taulukko 13. Vaihtovirtakomponentin arvot (IEC 2001, 133)



Taulukoiden kuvaajilta luettiin m ja n arvot eri katkaisuajoille ja syötettiin laskentataulukon, tulokseksi saatiin taulukon 14 mukaiset termiset oikosulkuvirta vaatimukset Finch-johtimelle.

Taulukko 14. Kantaverkon termiset oikosulkuvirta-arvot

| TA 110 kV kantaverkko | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|---------|-----|-------|-------------|-------------------|-------------------------------|
| | | | | | | Vian kestoaika | Sekunnin terminen virta |
| Ik 1s: | Ik'' [kA] | Ik''/Ik | K | m (K) | n (Ik''/Ik) | tk | Ik 1s [kA] |
| | 40,00 | 1,00 | 1,7 | 1,42 | 1,00 | 0,01 | 6,23 |
| | | | | 1,08 | 1,00 | 0,02 | 8,16 |
| | | | | 0,58 | 1,00 | 0,05 | 11,23 |
| | | | | 0,33 | 1,00 | 0,1 | 14,61 |
| | | | | 0,17 | 1,00 | 0,2 | 19,33 |
| | | | | 0,09 | 1,00 | 0,5 | 29,53 |
| | | | | 0,04 | 1,00 | 1,0 | 40,89 |
| | | | | 0,04 | 1,00 | 2,0 | 57,70 |
| | | | | 0,02 | 1,00 | 3,0 | 69,94 |
| | | | | 0,01 | 1,00 | 10,0 | 127,09 |

Tuloksista havaittiin Finch-johtimen täyttävän verkon termisen oikosulkuvirtakestoisuus vaatimuksen 1 sekunnin kohdalla reilusti, varaa jäi lähes 20 kA.

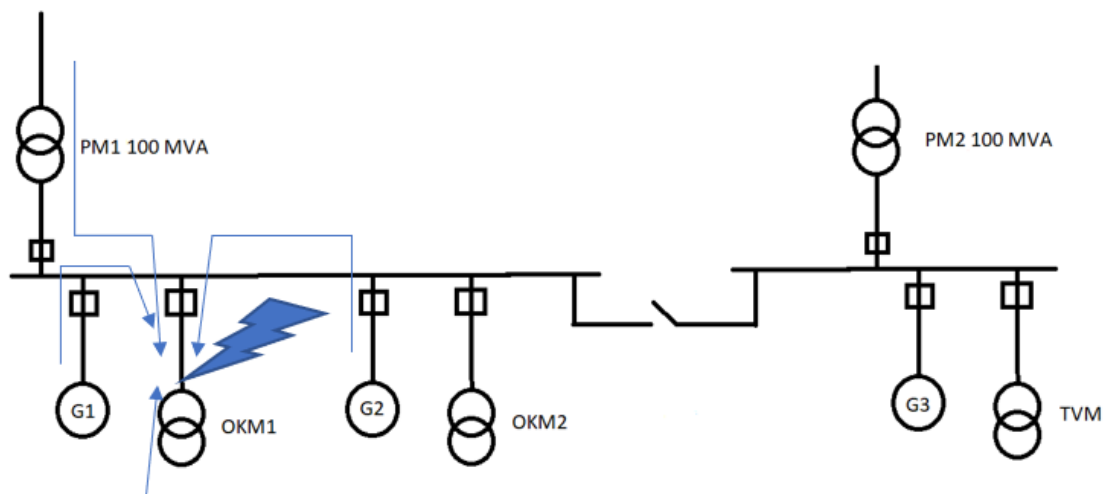
5.4 Vaihtoehto 3 mitoitus

Vaihtoehdossa 3 generaattorien nimellisarvot ovat samat kuin vaihtoehdossa 1. Laskettiin kiskostoissa ja päämuuntajissa kulkevat virrat normaalikäyttötilanteessa. Taulukossa 15 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 15. Nimellisvirta-arvot

| | | |
|--------------------------------|--------------|------------|
| Kisko 1 virta | | |
| $I_n =$ | 4,016 | kA |
| PM1:lle syötettävä teho | | |
| $S =$ | 96 | MVA |
| PM1 toisiovirta | | |
| $I =$ | 0,470 | kA |
| Kisko 2 virta | | |
| $I_n =$ | 2,008 | kA |
| PM2:lle syötettävä teho | | |
| $S =$ | 48 | MVA |
| PM2 toisiovirta | | |
| $I =$ | 0,235 | kA |

Tässä tapauksessa haluttiin laskemalla varmistaa 2:n erilaisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat kiskostoille ja siten varmistua kumpi kytkentätilanne on pahempi. Kuviossa 15 esitetään normaalissa käyttötilanteessa tapahtuva oikosulkupaikka pahimmassa kohdassa.

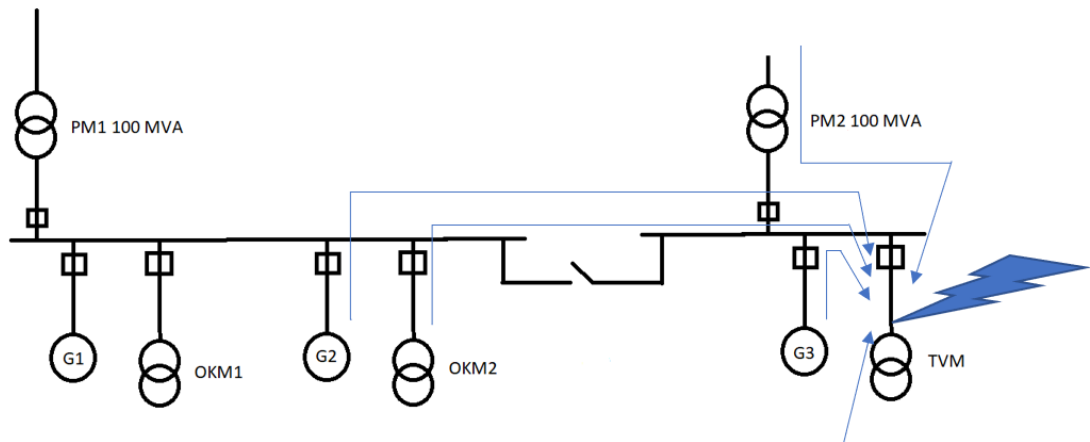


Kuvio 15. Normaali käyttötilanne

Vaihtoehdoisessa käyttötilanteessa kiskostojen välissä oleva pitkittäiserotin on kiinni asennossa ja silloin generaattori 1 tai 2 on pois käytöstä ja erotettu verkosta.

Kuviossa 16 esitetään vaihtoehtoisessa käyttötilanteessa tapahtuva oikosulkupaikka pahimmassa kohdassa.

Pitkittäiserotin kiinni (silloin vain toinen siirtoreitti verkkoon on käytössä) ja G1 erotettu.



Kuvio 16. Vaihtoehtoinen käyttötilanne

Normaalissa käyttötilanteessa kiskolla 1 tapahtuva oikosulku on laskentatulosten mukaan pahin mahdollinen paikka, siinä tulee kohdistumaan suurimmat oikosulkuvirrat kojeistolle. Vaihtoehtoisessa käyttötilanteessa kiskolla 2 oikosulkuvirta on pienempi, tässä tapauksessa kiskojen välinen poikittäiserotin on kiinni ja silloin G1 ja PM1 ovat erotettuna verkosta ohjauksen lukitusasetuksilla. Tilannetta, jossa kaikki 3 generaattoria syöttävät yhtä kiskostoa ei voida sallia, silloin tulee varmasti kojeistolle aivan liian suuret oikosulkuvirrat vikatilanteessa ja päämuuntajalle syötettävä suurin sallittu tehokin ylittyisi. Taulukossa 16 esitetään laskentatulokset kiskostolle 1 normaalissa käyttötilanteessa ja kiskostolle 2 vaihtoehtoisessa käyttötilanteessa. Kiskostoihin 1 ja 2 vaikuttavat alkuoikosulkuvirrat laskettiin samoilla kaavoilla kuin vaihtoehdossa 1.

Taulukko 16. Alkuoikosulkuvirta-arvot kiskostoilla 1 ja 2

| OIKOSULKU KISKOLLA 1 | | | | OIKOSULKU KISKOLLA 2 | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------|------|-----------------------------|--------------|-----------|------|
| 1. PM1 kisko 13,8 kV | | | | 2. PM2 kisko 13,8 kV | | | |
| G1+G2 Ik" | 28,88 | kA | | G3 Ik" | 14,44 | kA | |
| PM1 läpituleva(verkko) Ik" | 33,24 | kA | Zk | PM2 läpituleva(verkko) Ik" | 33,24 | kA | Zk |
| G3 PM2 + PM1 läpituleva Ik" | 8,09 | kA | | G2 Ik" | 14,44 | kA | |
| TVM Ik" | 0,55 | kA | 0,12 | TVM Ik" | 0,55 | kA | 0,14 |
| yht. Ik" | 70,76 | kA | | yht. Ik" | 62,67 | kA | |

Taulukon vieressä on laskettuna kiskostojen oikosulkuimpedanssit (Zk), niitä arvoja on hyödynnetty joissakin laskujen kaavoissa. Oikosulkupaikan ollessa kiskostolla 3 tai 4, niihin vaikuttavat alkuoikosulkuvirrat normaalissa käyttötilanteessa esitetään taulukossa 17.

Taulukko 17. Alkuoikosulkuvirta-arvot kiskostoilla 3 ja 4

| 3. 20 kV kisko | | | | 4. 0,4 kV kisko | | |
|-----------------------|--------------|-----------|------------------------------|------------------------|-----------|--|
| TVM läpituleva Ik" | 51,58 | kA | OKM 1 tai 2 tai 3 läpituleva | 28,53 | kA | |
| 20 kV verkon Ik" | 0,44 | kA | yht. Ik" | 28,53 | kA | |
| yht. Ik" | 52,06 | kA | | | | |

Dynaamiset oikosulkuvirrat kiskostoille laskettiin normaalissa käyttötilanteessa ja taulukossa 18 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 18. Dynaamiset oikosulkuvirta-arvot

| kisko | Idyn (2,7x) | |
|--------------|--------------------|-----------|
| 1. | 191,0 | kA |
| 2. | 169,2 | kA |
| 3. | 140,6 | kA |
| 4. | 77,0 | kA |

Termiset oikosulkuvirrat kiskostoille laskettiin normaalissa käyttötilanteessa ja taulukossa 19 esitetään laskentatulokset.

Taulukko 19. Termiset oikosulkuvirta-arvot

| TA 13,8 kV kisko | | | | | | | |
|------------------|-----------|---------|-----|-------|-------------|-------------------|-------------------------------|
| | | | | | | Vian kestoaika | Sekunnin terminen virta |
| Ik 1s: | Ik'' [kA] | Ik''/Ik | K | m (K) | n (Ik''/Ik) | tk | Ik 1s [kA] |
| | 70,76 | 1,90 | 1,9 | 1,80 | 0,99 | 0,01 | 11,83 |
| | | | | 1,63 | 0,99 | 0,02 | 16,19 |
| | | Ik'/Ik | | 1,24 | 0,97 | 0,05 | 23,48 |
| | | 1,41 | | 0,83 | 0,94 | 0,1 | 29,76 |
| | | | | 0,47 | 0,89 | 0,2 | 36,83 |
| | | | | 0,19 | 0,79 | 0,5 | 49,62 |
| | | | | 0,09 | 0,71 | 1,0 | 63,58 |
| | | | | 0,05 | 0,63 | 3,0 | 100,73 |
| | | | | 0,02 | 0,51 | 5,0 | 115,57 |
| | | | | 0,01 | 0,45 | 10,0 | 151,24 |

5.5 Vaihtoehto 4 mitoitus

Tässä vaihtoehdossa on samat mitoitusarvot kuin vaihtoehdossa 3 lasketut.

6 UUSI KONEJÄNNITEKYTKINLAITOS

Tässä luvussa keskitytään käsittelemään sisälle asennettavia ilma-, ja kaasueristeisiä tehdasvalmisteisia metallikoteloituja keskijännitekojeistoja, jollaiset ovat tarkoituksena asentaa voimalaitokselle.

6.1 Mitoituksen teoria

Suomen sähkölaki ja sähköturvallisuusmääräykset velvoittavat huomioimaan niiden määräykset mitoitettaessa laitteistoja ja niiden kojeita. Suomessa käytetään IEC-standardeja ja niiden pohjalta laadittuja kansallisia SFS-standardeja, tärkeimmät turvallisuusvaatimukset täyttyvät automaattisesti, kun laitteistot täyttävät IEC-standardin vaatimukset. Yli 1 kV nimellisjännitteisten laitteistojen suunnittelua, rakentamista, korjaus-, muutos-, ja laajennustöitä ohjaa SFS-standardi 6001, standardin vaatimus on, että laitteiston rakenne ja toiminta on sellainen, että sitä voidaan käyttää turvallisesti. Standardi ei kuitenkaan koske tehdasvalmisteisia kojeistoja, joilla on oma erillinen kansainvälinen IEC- tai eurooppalainen CENELEC-standardi, Suomessa on kansallisena lisävaatimuksena, että kojeiston ulkoisen koteloinnin pitää noudattaa SFS-standardin 6001 vaatimuksia. (Elovaara & Haarla 2011b, 76-78; SFS-standardi 6001, 9.)

Kojeiston tärkeimmät tekniset tiedot muodostuvat mitoitus- ja testausarvoista, laitevalmistajat käyttävät standardeissa määrättyjä jännitteiden ja virtojen arvoja suunnitellessaan ja testatessaan kojeistoja sekä ilmoittavat ne tuotemanuaaleissa ja näin ollen täyttävät automaattisesti asetetut vaatimukset. Kojeistoille on jännite- ja virtakestoisuuksien lisäksi asetettu myös muita yleisiä vaatimuksia seuraavasti:

-hyötysuhde

-mittaustarkkuus

-toimintakestoisuus

-osittaispurkausvapaus

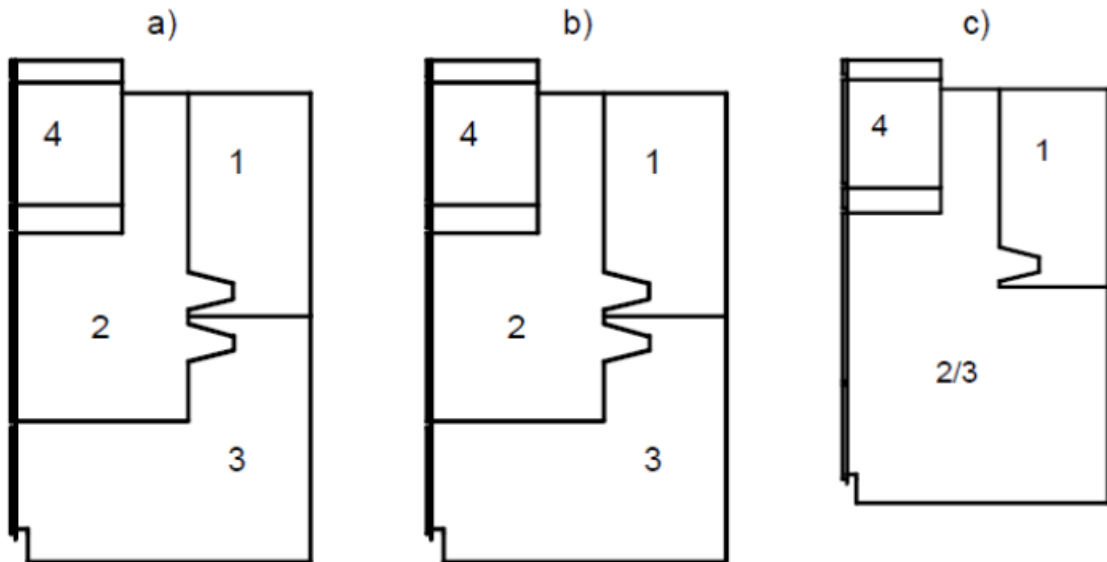
- eristeiden suojaus kostumiselta
- ympäristöolot
- kojeiden apujännitteiden määrittely
- ohjaustavan valinta
- kojeen yleinen korroosiosuojaus
- turvallisuusnäkökohdat. (Elovaara & Haarla 2011b, 85)

6.2 Kotelorakenne

Kojeisto (switchgear) muodostaa rakennekokonaisuuden, johon sisältyy kytkentä- ohjaus-, suojaus-, ja valvontalaitteet. Kojeistoja rakennetaan pien-, keski-, ja suurjännite alueelle, vaihtojännitekojeistoja keskijännitealueella 1-52 kV koskevat IEC-standardit 60298, 60466 ja 60694. (Elovaara & Haarla 2011b, 120.)

Ulkokuoren perusteella kojeistot jaetaan metallikuorisiin (metal-enclosed) ja eristysainekuorisiin (insulation enclosed), joista metallikuoriset ovat yleisemmin käytetyt. Metallikuoriset jaetaan sisäisen rakenteen mukaisesti vielä metallikoteloituihin (metal-clad), tilakoteloituihin (compartmented) ja kennokoteloituihin (cubicle). Metallikoteloituidussa kojeet ovat omissa tiloissa ja tilojen välinen osastointi on toteutettu maadoitetuilla metallisilla väliseinillä. Tilakoteloitu on muuten metallikoteloituidun mallinen, mutta väliseinät ovat kokonaan tai osittain eristysainetta. Kennokoteloituidussa on kennojen väliseinät mutta ei kennon sisäisiä väliseiniä, kennojen läpiviennit ovat eristettyjä ja kiskostoissa on tukieristimet. Kotelorakenteisiin on yhdistetty valokaaripaineen purkauskanavat, joita voidaan jatkaa tarvittaessa ulos saakka.

Kuviossa 17 esitetään kojeistotyyppit ja metallikuoristen rakenteiden erot ja samalla havaitaan kennorakenteen olevan yksinkertaisin ja siksi myös käyttäjän turvallisuuden kannalta huonoin vaihtoehto. (Elovaara & Haarla 2011b, 121-122, 125.)



Kuvio 17. kojeistotyyppit a) metallikoteloitu b) tilakoteloitu c) kennokoteloitu; 1 kokoojatila, 2 katkaisijatila, 3 lähtötila, 4 toisiokojetila (ABB 2000)

Kojeistot ovat modulaarisia ja niitä voidaan laajentaa sekä kalustaa erilaisilla kokoonpanoilla tapauskohtaisesti. Voimalaitoksella kojeisto kalustetaan katkaisijalla, jolloin siitä käytetään nimitystä katkaisijakojeisto. Kalustusvaihtoehtoina on kiinteäkalustus tai ulosvedettävä (withdrawable) vaunukatkaisija. Vaunukatkaisija tyyppinen kojeisto ei enää tarvitse erillisiä erottimia vaan tarvittava ilmaväli syntyy, kun vaunu vedetään ulos kojeistosta. Katkaisija osa on yleensä tyhjiö- tai SF₆ eristetty. Kytkinlaitoskokonaisuus muodostuu tehtaalla valmiiksi kasatuista moduuleista, jotka yhdistetään kohteessa laippaliitoksilla toisiinsa. Moduulitekniikan ansiosta rakentaminen on nopeaa kohteessa ja mahdollistaa kojeiden ryhmittelyn monipuolisesti. (Elovaara & Haarla 2011b, 122-125, 129.)

6.3 SF₆-eristeinen kojeisto (GIS)

Koteloidut kojeistot voidaan rakentaa ilmaeristeisenä tai SF₆ kaasueristeisenä ja katkaisijana voi olla SF₆ kaasueristeinen tai tyhjiökatkaisija. Kaasueristeisen etuna on riippumattomuus ympäristöstä, kaapeloinnin helppous ja pieni tilantarve. SF₆ kaasun jännitelujuus on 2,5-kertainen ilmaan verrattuna ja siksi sen kiskoston kuormitettavuus on suurempi kuin ilmaeristeisessä ja voidaan rakentaa pienikokoisemmaksi. Haittapuolena on ympäristövaikutukset kaasuvuodon tapahtuessa, koska SF₆-kaasu on luokiteltu ympäristölle vaaralliseksi ja siksi laitteistot on varustettu kaasun määrän seuranta-tekniikalla. Vuodon sattuessa kaasun määrät ovat niin pieniä, ettei lisäilmastointia ole tarve rakentaa kytkinlaitokseen. SF₆-kaasu ei ole varsinaisesti myrkyllistä, mutta katkaisijassa joutuessaan valokaaren kanssa tekemisiin siitä muodostuu ihmiselle vaarallisia myrkyllisiä yhdisteitä. Vuodon sattuessa se syrjäyttää hapen ja aiheuttaa tukehtumisvaaran lisäksi kaasu on ilmaa painavampaa ja siksi kerääntyy mataliin paikkoihin. Katkaisijakytkinlaitoksessa laitteet ovat hermeettisesti suojattuja ja jännitteiset osat sijaitsevat omissa kaasutiloissa, joissa on 1,2-1,5 bar:n ylipaine. Nimellisvirta-alue keskijännitteellä on 630-2500 A ja oikosulkukestoisuus 12,5-40 kA. GIS-laitteistoon liitytään kiskolla tai kaapelipääteellä kojeiston alta tai takaa. GIS-laitosten huoltotarve on vähäinen, isompi huolto, jossa kaasutila avataan, tehdään 10-20 vuoden välein. Koteloidun rakenteen ansiosta vikatiheyskin on pieni ja siksi niissä voidaan käyttää yksinkertaisempia kiskostorakenteita. (Aura & Tonteri 1993, 208, 356-357; Elovaara & Haarla 2011b, 135-138; Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 112-114.)

6.4 Ilmaeristeinen kojeisto (AIS)

Ilmaeristeisessä koteloidussa kojeistossa pääasiallinen eriste on normaalipaineinen ilma ja katkaisija on usein tyhjiökatkaisija tai SF₆-kaasu eristeinen. Ilmaeristeisen kojeiston rakentamisessa ja käytössä ei tarvitse huolehtia kaasuvuodoista ja niiden haitoista ihmisille ja ympäristölle. Ilmaeristeiset eivät ole hermeettisesti suojattuja ja ovat siten alttiimpia ympäristön

olosuhteiden vaikutuksille, kuten likaantumiselle ja hapettumiselle. (Elovaara & Haarla 2011b, 122.)

6.5 Katkaisijan mitoitus

Katkaisija käsittelee kytkinkojeiston suurimmat virrat ja jännitteet, siksi sen mitoitus pitää tehdä huolellisesti. Katkaisijan pitää pystyä avaamaan ja sulkemaan virtapiiri kaikissa tilanteissa rikkoutumatta, myös oikosulkutilanteessa. Vaikka katkaisijat täyttävät IEC-standardien vaatimukset on käyttäjän osattava valita itselleen parhaiten sopiva laite standardiarvojen joukosta. Tärkeimmät katkaisijan ominaisuudet, jotka pitää huomioida valinnassa ovat nimellisjännite, nimellisvirta katkaisukyky, sulkemiskyky, vaihtosähkön taajuus, eristystasot, palaavan jännitteen mitoitusarvot, nimellinen toimintasykli sekä apu- ja ohjauslaitteiden mitoitusjännitteet ja taajuudet. (Elovaara & Haarla 2011b, 186-189.)

Laitteiden ja kojeistojen jännitekestoisuus todetaan standardien mukaisesti tehdyillä jännitekoestuksilla. Laitteistolle aiheutuvat jänniterasitukset luokitellaan kahteen ryhmään, normaaliin käyttöjännitteeseen ja hetkelliseen ylijännitteeseen. Ylijännitteet luokitellaan vielä kahteen ryhmään, lyhytkestoisiin ja nopeasti vaimeneviin transienttiylijännitteisiin sekä pitkäkestoisiin ja hitaasti vaimeneviin pienitaajuisiin ylijännitteisiin. (Elovaara & Haarla 2011b, 78.)

Taulukossa 20 esitetään IEC-standardin 60851-1 mukaiset suurimmat käyttöjännitteet eli mitoitusjännitteet kojeistoille (U_m), johon eristys ja toiminnallinen suunnittelu perustuu sekä näitä vastaavat sähköverkon nimellisjännitteet (U_R).

IEC-standardissa käytetään nykyisin vain nimitystä rated voltage (U_R), joka tarkoittaa kojeistojen yhteydessä mitoitusjännitettä. (Elovaara & Haarla 2011b, 79.)

Taulukko 20. Mitoitusjännitteet (Elovaara & Haarla 2011b, 79)

| | | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| U_m / kV | 3,6 | 7,2 | 12 | 24 | 36 | 52 | 123 | 245 | 420 |
| U_N / kV | 3 | 6 | 10 | 20 | 30 | 45 | 110 | 220 | 380 |

Virtarasitukset jaetaan jatkuvaan rasitukseen eli kuormitusvirran aiheuttamaan ja lyhytaikaisiin rasituksiin eli oikosulkuvirtojen aiheuttamiin. Taulukossa 21 esitetään IEC-standardin 60851-1 mukaiset mitoitusvirrat katkaisijoille.

Taulukko 21. Katkaisijan nimellisvirrat (Elovaara & Haarla 2011b, 83)

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I_n/A (Tehollisarvo) | 400 | 630 | 800 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 | 6300 |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|

Lyhytaikainen terminen virtakestoisuus I_{thr} (rated short-time withstand current) tarkoittaa sitä suurinta oikosulkuvirran tehollisarvoa, jonka katkaisija kestää 1 sekunnin ajan lämpiämättä liikaa. Aika voi olla myös 3 sekuntia, jolle virtakestoisuus on ilmoitettu. Terminen virtakestoisuus todennetaan termisessä oikosulkukokeessa, taulukossa 22 esitetään standardin mukaiset testivirrat. Dynaamisella oikosulkukokeella todennetaan että, kojeiston virtakiskot ja kojeet kestävät sysäysoikosulkuvirran rasitukset ilman muodonmuutoksia ja eristinvaurioita. Taulukossa 22 esitetään myös standardin IEC 60851-1 mukaiset dynaamiset oikosulkukokeen virtojen huippuarvot. (Elovaara & Haarla 2011b, 81, 188.)

Taulukko 22. Katkaisijan oikosulkuvirtakestoisuus (Elovaara & Haarla 2011b, 83)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|-----|----|----|------|----|----|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I_{term}/kA (Tehollisarvo) | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 |
| I_{dyn}/kA (Huippuarvo) | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 |

Katkaisukyky tarkoittaa suurinta katkaisuvirtaa I_b (symmetrical short-circuit breaking current), jonka katkaisija pystyy katkaisemaan. Katkaisukyky ilmoitetaan generaattorikatkaisijoiden yhteydessä, kun oikosulkuvirran vaimeneminen alkuarvosta pitää huomioida. Sulkemiskyky tarkoittaa kuinka suuri oikosulkuvirta katkaisijassa voi kulkea silloin, kun katkaisija kytkee piirin oikosulkuun ilma, että koskettimet hitsautuvat. Nimellistaajuus tarkoittaa kojeiston testaus taajuutta ja samalla verkon taajuutta mihin kojeisto voidaan asentaa. Palaava jännite (transient and steady state recovery voltage) tarkoittaa katkaisijan koskettimien välistä jännitettä valokaaren sammumisen jälkeen. Nimellinen toimintasykli (rated duty-cycle) tarkoittaa toiminta tiheyttä, mistä katkaisijan pitää selvitä. (Elovaara & Haarla 2011b, 81, 189.)

6.6 Mittamuuntajat

Jännite- ja virtamuuntajat valitaan standardiarvojen mukaisesti, vanhasta pääkaaviosta saatiin luettua alkuperäisten mittamuuntajien arvot. Kytkinkojeiston mittamuuntajien arvoja ei ole mitään syytä alkaa muuttamaan, koska ne ovat toimineet hyvin lähes 50 vuotta, eivätkä generaattorien mitoitusarvot muutu saneerauksen yhteydessä. Päämuuntajien virtamuuntajat voidaan vaihtoehdoissa 1 ja 2 vaihtaa pienemmiksi nimellisvirraltaan 2500 A, vaihtoehdoissa 3 ja 4 ne jäävät alkuperäisen kokoisiksi nimellisvirraltaan 5000 A.

6.7 Valitut nimellisarvot kytkinlaitteistolle

Vaihtoehto 1: Nimellisvirta on 2,008 kA, nimellisjännite on 13,8 kV, oikosulkuvirta on 51,79 kA, terminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 47 kA (1s), 66 kA (3s), dynaaminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 139,8 kA. Jännitemuuntajat $\frac{14000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} V$, virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 60/25/25 VA, 0,5M5/10P50/10P50. Päämuuntajan virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 30/30/30 VA, 1M10/10P50/10P50

Vaihtoehto 2: Nimellisvirta on 2,008 kA, nimellisjännite on 13,8 kV, oikosulkuvirta on 51,79 kA, terminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 47 kA (1s), 66 kA

(3s), dynaaminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 139,8 kA. Jännitemuuntajat $\frac{14000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} V$, virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 60/25/25 VA, 0,5M5/10P50/10P50. Päämuuntajan virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 30/30/30 VA, 1M10/10P50/10P50.

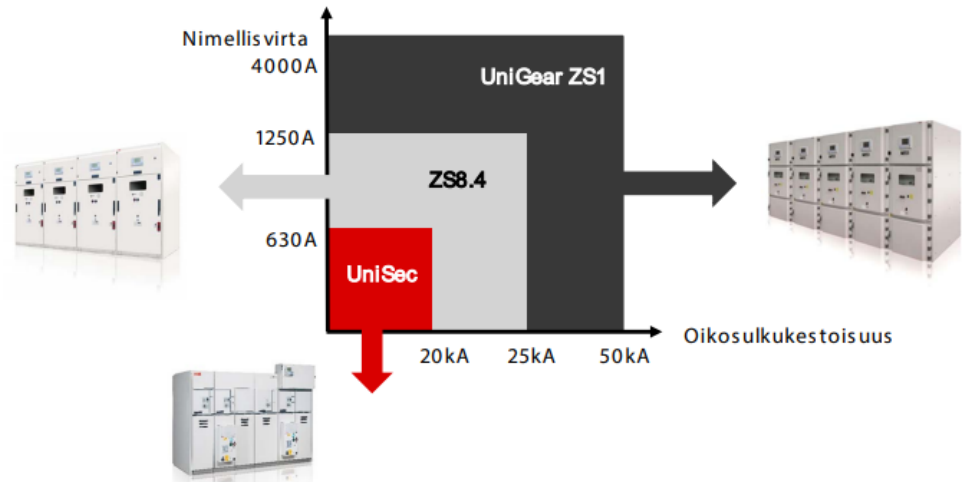
Vaihtoehto 3: Nimellisvirta on 4,016 kA, nimellisjännite on 13,8 kV, oikosulkuvirta on 70,76 kA, terminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 63,58 kA (1s), 100,73 kA (3s), dynaaminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 191,0 kA. Jännitemuuntajat $\frac{14000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} V$, virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 60/25/25 VA, 0,5M5/10P50/10P50. Päämuuntajan virtamuuntajat 5000/5/5/5 A, 30/30/30 VA, 1M10/10P50/10P50

Vaihtoehto 4: Nimellisvirta on 4,016 kA, nimellisjännite on 13,8 kV, oikosulkuvirta on 70,76 kA, terminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 63,58 kA (1s), 100,73 kA (3s), dynaaminen oikosulkuvirta kestoisuusvaatimus on 191,0 kA. Jännitemuuntajat $\frac{14000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} V$, virtamuuntajat 2500/5/5/5 A, 60/25/25 VA, 0,5M5/10P50/10P50. Päämuuntajan virtamuuntajat 5000/5/5/5 A, 30/30/30 VA, 1M10/10P50/10P50

Kaikki tarvittavat mitoitusarvot kytkinkojeistoille ovat nyt tiedossa, aloitettiin hakemaan markkinoilta sopivia kytkinkojeistoja vaihtoehdoille. Laittevalmistajan valinta ei kuulunut tehtävään, mutta hyödynnettiin silti laittevalmistajien valintatyökaluja, koska ne soveltuvat parhaiten tähän tehtävään.

Esimerkkinä esitetään ABB:n versio valintatyökalusta kuviossa 18.

Ilmaeristeiset keskijännitekojeistot



Kuvio 18. ABB:n ilmaeristeinen kojeisto (ABB 2018, 5)

Kuviosta 18 havaitaan värin perusteella, kuinka eri tuoteperheet ovat valmistettu erilaisille tehovaatimuksille. Laskettuja mitoitusarvoja verrataan valintatyökalun tarjoamiin vaihtoehtoihin. Väreillä toisistaan erotetut nelikulmiot helpottavat heti rajaamaan pois epäsopivat kojeistot ja keskittymään oikean tuoteperheen kojeistoihin.

7 VAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Taulukossa 23 esitetään yhteenveto laskentatuloksista, taulukkoon on kerätty suurimmat vaikuttavat oikosulkuvirta-arvot kaikille kiskostoille.

Taulukko 23. Yhteenveto oikosulkuvirta-arvoista

| Vaihtoehto 1 ja 2 | | | | | |
|--------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|----|
| kisko | Ik'' (alkutila) | Idyn (2,7 x) | Ik'' term. (1s) | Ik'' term. (3s) | |
| 1. 13,8 kV | 52,32 | 141,25 | 47,01 | 66,18 | kA |
| 2. 13,8 kV | 52,32 | 141,25 | 47,01 | 66,18 | kA |
| 3. 13,8 kV | 52,34 | 141,31 | 47,01 | 66,18 | kA |
| 4. 20 kV | 2,59 | 7,00 | 2,69 | 4,45 | kA |
| 5. 0,4 kV | 28,41 | 76,72 | 29,66 | 49,41 | kA |
| Vaihtoehto 3 ja 4 | | | | | |
| kisko | Ik'' (alkutila) | Idyn (2,7 x) | Ik'' term. (1s) | Ik'' term. (3s) | |
| 1. 13,8 kV | 70,76 | 191 | 63,58 | 100,73 | kA |
| 2. 13,8 kV | 62,67 | 169,2 | 56,31 | 89,21 | kA |
| 3. 20 kV | 52,06 | 140,6 | 54,01 | 91,13 | kA |
| 4. 0,4 kV | 28,53 | 77 | 29,78 | 50,4 | kA |

Vaihtoehdossa 1 oikosulkuvirrat on pienet ja sen ansiosta metallikoteloituja kytkinkojeistoja on parhaiten saatavilla. Yksikiskojärjestelmä kytkinkojeistossa tarkoittaa aina keskeytystä häiriötilanteessa, joka kestää koko korjauksen ajan. 3:nnen päämuuntajan sijoittaminen voimalaitokselle vaatii paljon suunnittelua ja rakennustyötä.

Vaihtoehdossa 2 oikosulkuvirrat on samat kuin vaihtoehdossa 1 ja kytkinkojeistojen saatavuus myös yhtä hyvä. Yksikiskojärjestelmä ja 3 päämuuntaja aiheuttavat samat huonot puolet, kuin vaihtoehdossa 1. Uuden siirtolinjan rakentaminen voimalaitokselta ulkokytkinkentälle jää pois, koska Finch- johtimen mitoitusarvot ovat riittävät ja sitä voidaan hyödyntää edelleen.

Vaihtoehdossa 3 oikosulkuvirrat on suuret ja sen takia metallikoteloituja kytkinkojeistoja on saatavana rajoitetusti. Kojeistoja on saatavana myös kaksoiskiskojärjestelmänä ja käytettävyys on monipuolinen häiriötilanteissa. Päämuuntajille ei tarvitse tehdä uusia rakennustöitä, vanhat betonibunkkerit voidaan hyödyntää edelleen vähällä muutostyöllä.

Vaihtoehdossa 4 oikosulkuvirrat on samansuuruiset, kuin vaihtoehdossa 3 ja käyttäjälle vaarallinen avokytkinlaitos jäisi käyttöön vielä seuraavaksi 40

vuodeksi. Vanhan kiskoston vahvistaminen ja muokkaaminen uudelle katkaisijalle ja erottimille vaatii paljon työtä. Käytettävyys säilyisi ennallaan eli yhtä hyvänä, kuin lähtötilanteessakin. Päämuuntajien vanhat betonibunkkerit voidaan hyödyntää edelleen vähällä muutostyöllä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaihtoehdossa 1 havaittiin voimalaitoksen suurimman vaikuttavan oikosulkuvirran olevan kiskostoilla hieman yli tavoitteeksi asetetun 50 kA:n. Päämuuntajien suhteellista oikosulkuimpedanssia suurentamalla 1 %:lla suunnitelluista arvoista päästään asetettuun tavoitteeseen.

Vaihtoehdossa 2 pitää myös tehdä samat toimenpiteet kuin vaihtoehdossa 1, koska lasketut mitoitusarvot ovat samat. Finch-johdinten kuormitettavuuden ja oikosulkukestoisuuden mitoitusarvot on riittävät ja johdinta voidaan hyödyntää.

Vaihtoehdossa 3 laitoksen suurin vaikuttava oikosulkuvirta on ihan ylärajalla metallikoteloiduille kytkinkojeistoille. Vain yhdeltä laitevalmistajalta on saatavilla tarpeeksi suurilla mitoitusarvoilla oleva kojeisto. Kojesta on saatavilla myös kaksoiskiskojärjestelmällä.

Vaihtoehdossa 4 joudutaan vaihtamaan katkaisijat ja erottimet mitoitusarvoiltaan suurempiin oikosulkuvirtojen takia. Kiskostoa joudutaan vahvistamaan, koska vanha on mitoitettu 140 kA dynaamisille oikosulkuvirtaräsituksille ja uudessa tilanteessa kiskostoon kohdistuu 191 kA dynaamiset oikosulkuvirtaräsitukset.

Yhteistä kaikille vaihtoehdoille on, että rakennustyötä tulee olemaan paljon. Vaihtoehdoissa 1 ja 2 rakennustyö on enemmän rakennusalan ammattilaisten hommaa. Vaihtoehdossa 3 rakennustyötä vaikuttaisi olevan vähiten. Vaihtoehdossa 4 rakennustyötä muodostuu enemmän sähköalan ammattilaisille kiskoston vahvistamisessa, työn suunnittelussa ja keskeytys ajan minimoimisessa.

Ilmaeristeinen kytkinkojeisto tyhjiökatkaisijalla on sopivin tähän kohteeseen, koska kytkinlaitoshuoneessa on tilaa riittävästi, eikä sen takia tarvitse fyysisiltä mitoiltaan pienempää SF₆-kaasueristeistä harkita. Ilmaeristeinen kojeisto tyhjiökatkaisijalla on myös helpompi käytännössä, kun ei tarvitse kaasuvuodon ja ilmastoinnin takia tehdä uusia järjestelmiä kuten SF₆ eristeisen kanssa joutuisi tekemään. Kaksoiskiskojärjestelmä kytkinkojeistossa olisi parempi kuin yksikiskojärjestelmä, koska silloin häiriötilanteessa laitoksen käytettävyys olisi laajemmin valittavissa, eikä keskeytyksiä olisi niin paljon.

9 POHDINTA

Oikosulkuvirtojen laskeminen osoittautui tärkeimmäksi asiaksi heti tehtävän aloituspalaverissa ja siksi siihen aiheeseen käytettiin eniten aikaa. Kuormitus- ja oikosulkuvirrat saatiin laskettua jokaiselle saneerausvaihtoehdolle ja laskentatulosten perusteella saatiin tehtyä yhteenvetotaulukko kytkinkojeistojen mitoitusarvoista. Laskettuja mitoitusarvoja vertailtiin laitevalmistajien ilmoittamiin kojeistojen mitoitusarvoihin. Vertailun perusteella saatiin selvitettyä, että metallikoteloituja kytkinkojeistoja on saatavilla markkinoilta lasketun suuruusilla mitoitusarvoilla. Voimalaitoksen hyvän käytettävyyden varmistamisen takia selvitettiin myös, että kytkinkojeistoja on saatavilla kaksoiskiskojärjestelmillä.

Työturvallisuuden parantaminen henkilökunnalle saneerauksessa oli yksi tavoite. Metallikoteloidut kytkinkojeistot ovat suunniteltu turvallisiksi käyttäjille vikatilanteissa ja niiden inhimillinen väärinkäyttäminen on estetty sähköisillä ja mekaanisilla lukituksilla. Työturvallisuus paranee paljon vikatilanteessa verrattuna avokytkinlaitokseen, koska valokaaripaine voidaan ohjata kojeisto- ja kanavarakenteilla ulos saakka.

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää vaihtoehtojen tekniset mitoitusarvot ja miettiä millä toimenpiteillä asetettuihin tavoitteisiin päästään. Tulosten perusteella projektin edetessä tehdään laitevalintoja, kannattavuuslaskelmia ja kustannusarvioita kaikille vaihtoehdoille Kemijoen henkilökunnan toimesta. Laskelmia tehdään päämuuntajien häviöiden, sähkön hintaennusteen, kojeiston käyttöiän ja kytkinkojeistojen hintaerojen vaihtelujen funktiona. Laskelmien tulosten perusteella tehdään investointipäätös teknistaloudellisesti parhaan vaihtoehdon puolesta.

Oppimisen kannalta kehitystä tapahtui eniten oikosulkuvirtojen laskennan ymmärtämisessä. Varautuminen verkon vahvistumiseen palautti mieleen, että saneerauksen lopputuloksen pitää olla toimiva ratkaisu vuosikymmeniksi eteenpäin ja muiden tahojen toimet vaikuttavat myös voimalaitoksen kojeiston mitoitukseen. Sähkötekniikkaan liittyvä englannin kielen sanasto laajeni, kun laitevalmistajien manuaalit olivat usein englanninkielisiä. Opinnäytetyön tehtävä oli aika laaja ja vaati paljon aikaa asioiden selvittämiseen. Onneksi

oppimateriaalia oli riittävästi tarjolla ja ohjausta oli saatavilla Kemijoelta ja koululta nopeasti tarpeen tullen. Opinnäytetyö eteni suunnitellun aikataulun mukaisesti ja tehtävänannossa asetetut tavoitteet saavutettiin.

LÄHTEET

ABB 2000a. Teknisiä tietoja ja taulukoita, 10. painos

ABB 2000b. TTT-käsikirja.

ABB 2018. Webinaarisarja älykäs sähköverkko kiinteistöissä.

Keskijännitekojeistot. Viitattu 11.4.2023

https://new.abb.com/docs/librariesprovider113/fi_buildingspace_webinars/keskij%C3%A4nnitekojeistot.pdf?sfvrsn=ca064d14_2

ABB 2022.OJON Indoor type disconnectors. Viitattu 22.2.2023

<https://library.e.abb.com/public/d0bc095f887b5bc0c2256b48003cad63/OJON4GB.pdf>

Alatalo, P.1975. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Espoo: Oy Nokia Ab

Aro, M. Elovaara, J. Karttunen, M. Nousiainen, K & Palva, V. 2015.

Suurjännitetekniikka. Espoo: Otatieto

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

Elovaara, J & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I. Helsinki: Otatieto

Elovaara, J & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto

Fingrid 2018. Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset. Helsinki, Suomi: Fingrid Oy.

IEC 2001. International Standard 60909-0 Calculation of currents. Short-circuitcurrents in three-phase a.c. systems, 0.

IEC 60909-0 2001. Short-circuit current in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. Switzerland: International Electrotechnical Commission IEC.

Kemijoki Oy. Arkisto.

Kemijoki Oy 2022a. Media. Viitattu 1.3.2023

<https://www.kemijoki.fi/media/kuvat/kuvapankki/logot-kemijoki-rgb/kemijoki-logo-horizontal-blue-rgb.jpg>

Kemijoki Oy 2022b. Taivalkoski. Viitattu 21.2.2023

<https://www.kemijoki.fi/toimintamme/voimalaitokset-ja-tuotanto/taivalkoski.html>

Kemijoki Oy 2022c. Voimalaitokset ja tuotanto. Viitattu 21.2.2023

<https://www.kemijoki.fi/kemijoki-oy.html>

Kemijoki Oy 2022d. Vuosiraportti 2022. Viitattu 21.2.2023

<https://www.kemijoki.fi/media/vuosiraportti-2021/kemijoki-vuosiraportti-2021-print-002.pdf>

Kemijoki Oy 2023. Taivalkosken saneerausprojekti.

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

Valtioneuvosto 2020. Yhteiskunnan kannalta kriittisten alojen henkilöstö. Viitattu 19.2.2023 <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/yhteiskunnan-toiminnan-kannalta-kriittisten-alojen-henkilosto>

LIITTEET