

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Jani Postila

VESIVOIMALAITOKSEN SÄHKÖTEKNINEN ESISUUNNITTELU

Sierilän voimalaitos

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 4.9.2013

Työn valvoja

Professori Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

DI Heikki Savolainen

Työn tarkastaja

Professori Timo Vekara

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Kemijoki Oy:lle Rovaniemelle osana Vaasan yliopiston sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa.

Kiitän Kemijoki Oy:n teknistä päällikköä Heikki Kusminia mielenkiintoisesta aiheesta ja ohjauksesta työn aikana. Kiitokset kuuluvat myös työn varsinaiselle ohjaajalle eli voimajärjestelmäinsinööri Heikki Savolaiselle, suunnitteluinsinöörit Sami Soudunsaa-
relle ja Tero Kelloniemelle sekä kaikille muillekin Kemijoki-yhtiön henkilöille, jotka antoivat hyviä käytännön ohjeita ja tukea työn tekemiseen.

Kiitokset myös Vaasan yliopiston teknillisen tiedekunnan sähkötekniikan professoreille Kimmo Kauhaniemelle ja Timo Vekaralle hyvistä ja rakentavista palautteista työn eri vaiheissa.

Rovaniemellä 20.8.2013

Jani Postila

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	1
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	9
ABSTRACT	10
1 JOHDANTO	11
2 VESIVOIMALAITOKSISSA KÄYTETTY TEKNIikka	13
2.1 Koneistovaihtoehtoja	13
2.1.1 Kaplan-turbiini	13
2.1.2 Putkiturbiinit	14
2.2 Relesuojauksen periaatteita	16
2.2.1 110 kilovoltin voimajohdot	17
2.2.2 Generaattorit	18
2.3 Taajuusmuuttaja vesivoimageneraattorissa	21
3 SÄHKÖVERKKOON LIITTYMINEN	27
3.1 Kantaverkko	27
3.1.1 Kantaverkkoon liittymisen periaatteita	28
3.1.2 Yleiset liittymisehdot	34
3.1.3 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset	37
3.2 Alue- ja keskijänniteverkko	40
3.3 Relesuojauksen pääperiaatteet liityttäessä Fingridin verkkoon	41
3.4 Keskeiset asiat Fingridin ohjeista	42
4 VESIVOIMALAITOKSEN ESISUUNNITTELU JA MITOITTAMINEN	44
4.1 Esisuunnittelu	44
4.1.1 Jännitetasot	45
4.1.2 Pääkaavio	45
4.1.3 Voimajohdot	46
4.1.4 Muuntajat ja keskijännitekojeistot	56

4.1.5	Luvat ja ilmoitukset	59
4.2	Mitoittaminen	60
4.2.1	Oikosulkukestoisuus	61
4.2.2	Oikosulkusuureet	61
4.2.3	Maadoitukset	65
4.2.4	Varayhteys sähköverkkoon	70
4.3	Kustannuslaskenta ja häviöteho	71
5	SIERILÄN VOIMALAITOS	73
5.1	Sijainti ja perustiedot	73
5.2	Sähköverkkoon liittyminen	74
5.3	Sähkötekniset ratkaisut	79
5.3.1	Liittymisjohto, kytkinlaitos ja päämuuntaja	81
5.3.2	Keskijännitekojeistot	84
5.3.3	Generaattorit	85
5.3.4	Pienet muuntajat, pääkeskukset ja päämaadoituselektrodi	86
5.4	Lasketut vikavirrat	90
5.5	Pohdintaa pääkaavioista	96
5.6	Suositus toteutettavaksi ratkaisuksi	101
5.7	Muita esisuunnitteluvaiheen asioita	102
6	YHTEENVETO	105
	LÄHDELUETTELO	107
	LIITTEET	
Liite 1	Maadoituksiin liittyvät taulukot	112
Liite 2	Pääkaavio 1A	114
Liite 3	Pääkaavio 1B	115
Liite 4	Pääkaavio 2	116
Liite 5	Pääkaavio 3A	117
Liite 6	Pääkaavio 3B	118

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

A	Maadoitusjohtimien ja -elektrodien nimellispoikkipinta (mm^2)
c	Jännitekerroin oikosulkulaskelmissa
I	Virtajohtimen kuormitusvirta (A)
i_{dyn}	Dynaaminen oikosulkuvirta (A)
I_E	Maavirta (A)
I_F	Maasulkuvirta (A)
I_k	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta (A)
I_k''	Alkuoikosulkuvirta (A)
I_{k3}	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta (A)
I_{k3}''	Kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran tehollisarvo (A)
I_{th}	Terminen oikosulkuvirta (A)
K	Virrallisen osan materiaalista riippuva vakio maadoituksissa
K	Investointikustannus kustannuslaskennassa
K_1	Tasaeriin jaettu investointikustannus halutulle tarkasteluajanjaksolle
m	Oikosulkuvirran tasakomponentti
n	Oikosulkuvirran vaihtokomponentti
p	Korkoprosentti kustannuslaskennassa (%)
P	Häviöteho sähköjohdolle (W)
r	Reduktiokerroin maadoituslaskelmissa

R_E	Maadoitusresistanssi (Ω)
R_k	Oikosulkupiirin resistanssi (Ω)
S_k	Oikosulkuteho (MVA)
S_k''	Alkuoikosulkuteho (MVA)
S_{kpG}''	Generaattorin ominaisoikosulkuteho (MVA)
S_{kpM}''	Muuntajan ominaisoikosulkuteho (MVA)
S_n	Generaattorin tai muuntajan nimellisteho (MVA)
t	Vikavirran kesto aika maadoituslaskelmissa (s)
t_k	Oikosulun kesto aika termisissä oikosulkuvirtalaskelmissa (s)
U_E	Maadoitusjännite (V)
U_N	Verkon pääjännite tai generaattorin nimellisjännite (V)
U_{TP}	Kosketusjännite (V)
X_d	Generaattorin pitkittäinen reaktanssi (Ω)
x_d	Generaattorin pitkittäinen reaktanssi suhteellisarvona
x_d''	Generaattorin pitkittäinen alkureaktanssi suhteellisarvona
X_k	Oikosulkupiirin reaktanssi (Ω)
Z_E	Maadoitusimpedanssi (Ω)
z_k	Muuntajan oikosulkuimpedanssi suhteellisarvona
Z_k''	Alkuoikosulkuvirrasta laskettu impedanssi (Ω)

β	Virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo maadoituslaskelmissa (°C)
ε	Kerroin kustannuslaskennassa
θ_f	Loppulämpötila maadoituslaskelmissa (°C)
θ_i	Alkulämpötila maadoituslaskelmissa (°C)
κ	Sysäyserroin oikosulkuvirtalaskelmissa
§	Pykälä lakiasioissa

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri
AC	Alternating Current, vaihtovirta
ACS 6000	ABB:n keskijännitetaajuusmuuttajamalli
AHXAMK-W	Keskijännitekaapeli maa-asennukseen
AHXCMK-WTC	Keskijännitekaapeli hyllyasennukseen
AHXLMK-W	Suurjännitekaapeli maa-asennukseen
ARU	Active Rectifier Unit, ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan verkkosilta
AXMK	Pienjännitekaapeli maa-asennukseen
CBU	Capacitor Bank Unit, ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan välipiirin kondensaattoriparisto
CENELEC	European Standards Organisation, eurooppalainen sähköalan standardisoi- soimisjärjestö

ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMV	Energiamarkkinavirasto
EN	European Standard
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity, eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö
EXU	Excitation Unit, ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan ulkoinen magnetointiyksikkö
G1	Generaattori 1
G2	Generaattori 2
HAWK	110 kV:n ilmajohdon johdintyyppi
HD	Harmonization Document, harmonisointiasiakirja
IEC	International Electrotechnical Commission, sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor, ohjattava tyristorimalli
INU	Inverter Unit, ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan generaattorisilta
JM	Jännitteen mittaus
JS	Jännitesäätäjä
L	Vaihejohdin
LVI	Lämpö, vesi ja ilmastointi
MF	Motor Function, moottorikäyttöinen katkaisija
OKM	Omakäyttömuuntaja
ONAN	Tehomuuntajan luonnollinen jäähdytys

ONAF	Tehomuuntajan tehostettu jäähdytys
PE	Suojajohdin
PEN	Yhdistetty nolla- ja suojajohdin
PER	Permantokoski (Kemijoki Oy:n vesivoimalaitos)
PM	Päämuuntaja
REG630	ABB:n suojareletyyppi
SFS	Suomen standardisoimisliitto
SRI	Sierilä (Kemijoki Oy:n tuleva vesivoimalaitos)
STUL	Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto
TAMU	Taajuusmuuttaja
TS	Turbiinisäätäjä
UPS	Uninterruptible Power Supply, katkeamaton tehon syöttö
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (Fingrid)
VL	Valajaskoski (Kemijoki Oy:n vesivoimalaitos)
VPE	Verkkopalveluehdot
YLE	Yleiset liittymisehdot (Fingrid)
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jani Postila
Diplomityön nimi:	Vesivoimalaitoksen sähkötekkninen esisuunnittelu – Sierilän voimalaitos
Valvoja:	Professori Kimmo Kauhaniemi
Ohjaaja:	Diplomi-insinööri Heikki Savolainen
Tarkastaja:	Professori Timo Vekara
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2010
Diplomityön valmistumisvuosi:	2013

Sivumäärä: 118

TIIVISTELMÄ

Uusiutuvan energian tarve on jatkuvasti lisääntynyt sekä kiristyvien päästövaatimusten että myös yleisen mielipiteen muuttuessa. Vesivoima on mitä parhaita säästövoimaa esimerkiksi alati lisääntyvän tuulivoiman rinnalle. Suomen tavoitteena on päästä eroon tuontisähköstä ja tämänkin tavoitteen edistämiseksi tarvitaan lisää uutta puhdasta energiantuotantoa. Kemijoki Oy on jo vuosia investoinut tuotannon kasvattamiseen. Vanhojen vesivoimalaitosten peruskorjaukset ja tehonnostot sekä mahdollisuudet rakentaa uutta vesivoimaa ovat nyt ajankohtaisia asioita.

Tässä diplomityössä on tarkasteltu asioita, joita täytyy huomioida uuden vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaiheessa. Esisuunnittelu koostuu sähköverkkoon liittymisen sekä laitoksen eri komponenttien kartoittamisesta. Oleellinen osa esisuunnittelua on sähköpääkaavioiden laatiminen sekä niihin liittyvät laskelmat ja selvitykset. Työssä on käsitelty esimerkkitapauksena Kemijoki Oy:n Sierilän vesivoimalaitosta, joka on teholtaan 44 MW.

Työn tuloksena saatiin käsitys asioista, joita pitää huomioida uuden vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaiheessa. Sähköverkkoon liittymisessä on otettava huomioon tiettyjä kantaverkkoyhtiön ehtoja sekä muita teknis-taloudellisia asioita. Sähköjärjestelmän mitoitus on helpointa tehdä laadittujen pääkaavioiden avulla. Oleellinen osa esisuunnittelua on myös uuden teknologian huomioon ottaminen. Taajuusmuuttajakäytöt ovat 2000-luvulla yleistyneet vesivoimasovelluksissa. Työssä on annettu suositus teknisestä ratkaisusta, jolla Sierilän voimalaitos kannattaisi toteuttaa.

AVAINSANAT: vesivoimalaitos, esisuunnittelu, sähkösuunnittelu, pääkaavio

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of Technology**

Author:	Jani Postila
Topic of the Thesis:	Electrical predesign for hydroelectric power plant – Power plant of Sierilä
Supervisor:	Professor Kimmo Kauhaniemi
Instructor:	M.Sc. (Tech.) Heikki Savolainen
Evaluator:	Professor Timo Vekara
Degree:	Master of Science in Technology
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2010
Year of Completing the Thesis:	2013

Pages: 118

ABSTRACT

Need for renewable energy is constantly increasing. Reasons for this are the constantly tightening emission limits and changes in common opinion. Hydroelectric power is very good and flexible power source for example parallel to a wind power. The aim of Finland is to get rid of importing electricity. If Finland wants to reach the aim it needs more pure production of energy. Kemijoki Oy has already invested to increasing of production over years. Full renovation of old hydroelectric power plants and possibilities to build a new hydro power are daily issue for now.

This thesis has examined issues that need to be taken into account in the new hydro-power plant preliminary design stage. Predesign consists of an electrical connection to the grid, as well as the mapping of the various components of the plant. An essential part of predesign is to create a main diagram for the power plant. The main diagram includes many accounts and calculations. The work is treated as a case of hydroelectric power plant of Sierilä (44 MW). The owner for power plant of Sierilä will be Kemijoki Oy.

The results include the perception of the issues that need to be taken into account in the new hydro power plant preliminary design stage. In the electrical connection to the grid it must be taken into account some rules of Fingrid and also other technical and economic issues. Electrical system design is the easiest way to do prepare to the main diagrams. Very important part of predesign is also to take the new technology into account. Controlled by frequency converters have become more common in hydropower applications for nowadays. The work includes a recommendation of the technical solution, which Sierilä power plant could be envisaged.

KEYWORDS: hydroelectric power plant, predesign, electrical engineering, main diagram

1 JOHDANTO

Vesivoimalla on Suomessa pitkät perinteet. Vedellä tuotettu sähkö on uusiutuvaa eikä aiheuta merkittäviä käytönaikaisia päästöjä ilmaan, veteen tai maaperään. Suomessa on yli 220 vesivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu teho on yli 3000 MW. Vesivoima onkin merkittävin uusiutuva energiantuotantomuoto Suomessa.

Vesivoimalla on ollut Suomen sähköntuotannossa suuri merkitys. Suurimmillaan sen osuus oli 1950- ja 1960-luvuilla, jopa 90 %. Nykyisin vesivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta vaihtelee 10–20 % välillä vesitilanteesta riippuen. Vesivoimalla on se huomattava etu, että vettä voidaan varastoida altaisiin ja käyttää varastoja silloin kun sähköntarve on huipussaan.

Lähes kaikki hyvät vesivoimalaitosten paikat Suomessa on jo valmiiksi rakennettu. Jäljellä olevilla voimalapaikoilla on vain pieni merkitys Suomen energiahuollolle. Maailmanlaajuisesti vesivoiman osuus sähköntuotannosta on vain noin seitsemän prosenttia. Vesivoimaa rakennetaan kuitenkin ympäri maailmaa edelleen runsaasti. Sen osuuden maailman sähköntuotannosta odotetaan nousevan arviolta noin kymmeneen prosenttiin.

Vesivoiman tulevaisuuteen liittyy paljon epävarmuutta. Yksi suurimmista on EU:n vesipolitiikan puitedirektiivi, jonka tavoitteet ovat vaativat. Toisaalta kiristyvät ilmastotavoitteet tukevat vesivoiman käyttöä, koska siitä ei muodostu mainittavasti hiilidioksidipäästöjä sen kummemmin kuin muitakaan päästöjä ilmaan. Suomessa vesivoiman lisäämismahdollisuus rakennetuissa vesistöissä on vajaa 400 MW ja suojelemattomissa vesistöissä noin 270 MW. Se on taloudellisesti merkittävin hyödynnettävissä oleva uusiutuvan energian lähde, jota voidaan rakentaa ilman yhteiskunnan tukea.

Vesistöjä säännöstelemällä sähköntuotantoa voidaan siirtää suurta kulutusta vastaaviin aikoihin. Tämä yhdessä vesivoiman nopean ja helpon säädettävyyden kanssa tekee siitä ylivertaista säätövoimaa. Sähköä kun on kutakuinkin hyvä tuottaa joka hetki saman ver-

ran kuin sitä kulutetaan. Sähköntuotannon nopeat muutokset hoidetaan pääosin vesivoimalla. Vesivoima on kallista rakentaa, mutta edullista käyttää. Sen käytössä ei kulu polttoaineita eikä vesivoimalaitosten tuotanto vaadi runsaasti käyttöhenkilökuntaa. Uusi vesivoimalaitos kannattaa rakentaa, jos voimalaitoksen investointikustannukset ovat sen tuotantoon ja tuotto-odotuksiin nähden järkeviä.

Taajuusmuuttajasovellukset ovat yleistyneet vesivoimakäytöissä 2000-luvulla. Pienissä voimalaitoksissa taajuusmuuttajan avulla saadaan aikaan kustannustehokas laitteisto, jolloin laitoksen rakentaminen on taloudellisesti kannattavaa. Isommissa voimalaitoksissa, joissa turbiinin pyörimisnopeus on pieni, saattaa vääntömomentti nousta niin suureksi, että vaihdelaatikon toteuttaminen on erittäin kallista. Taajuusmuuttajan avulla generaattori voidaan liittää suoraan verkkoon eikä kallista ja vikaherkkää vaihdelaatikkoa tarvita. Taajuusmuuttaja voidaan asentaa aina 27 MW:n tehoiseen generaattoriin asti (Esko 2010: 10).

Työn tavoitteena on tarkastella sähkötekniisiä asioita, joita pitää huomioida uuden vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaiheessa. Työ rajataan siten, että työssä käsitellään vain pääkaavioista löytyvät asiat sekä vesivoimalaitoksen yleistä tekniikkaa, 110 kV:n voimajohdon suunnittelu ja pylväsmadoitukset, päämaadoituselektrodi sekä muuta pienempää tekniikkaa siltä osin, kun se on esisuunnitteluvaiheessa järkevää. Lisäksi esitetään pohdintaa ja vaihtoehtoja pääkaavioissa esiin tulleille asioille. Myös taajuusmuuttajaan liittyvää tekniikkaa käsitellään lyhyesti.

Työ on jaettu kuuteen lukuun. Johdannon jälkeen luvussa 2 esitellään vesivoimalaitoksissa käytettyä tekniikkaa. Luku 3 käsittelee sähköverkkoon liittymiseen kohdistuvia asioita. Painopiste on Fingridin kantaverkkoon liittymisessä. Luvussa 4 on vesivoimalaitoksen esisuunnitteluun ja mitoittamiseen liittyvät asiat. Luku 5 on omistettu työn käytännölliseen osuuteen eli Sierilän voimalaitoksen tarkasteluun. Yhteenveto on luvussa 6. Lisäksi työn lopussa, liitteessä 1, on työn maadoitusasioihin liittyviä taulukoita. Liitteissä 2–6 on nähtävissä kaikki työssä tehdyt Sierilän voimalaitoksen viisi pääkaaviovaihtoehtoa.

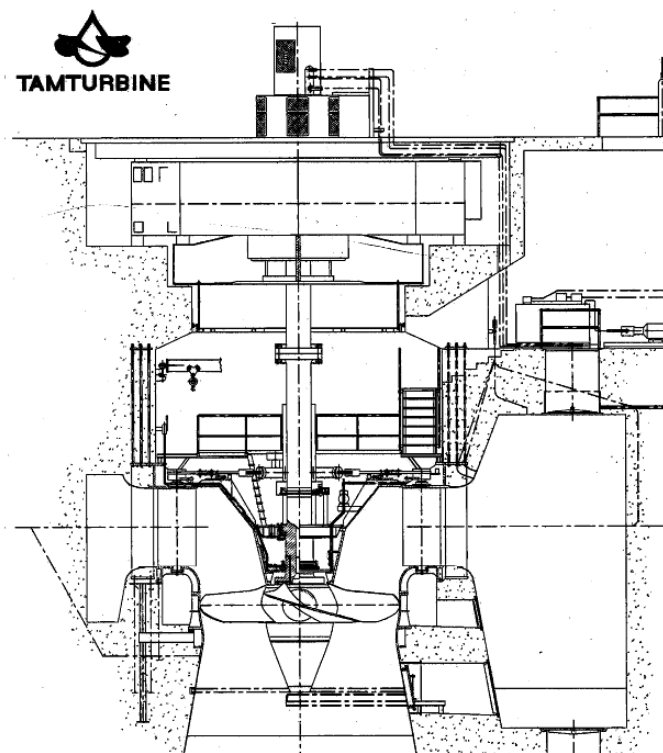
2 VESIVOIMALAITOKSISSA KÄYTETTY TEKNIikka

2.1 Koneistovaihtoehtoja

2.1.1 Kaplan-turbiini

Kaplan-turbiinin kehittäjä on itävaltalainen TKT Viktor Kaplan. Hän teki 1910-luvulla tutkimuksia ja kokeita uuteen juoksupyörätyyppiin, missä juoksupyörä oli potkurityyppiä. (Haapakoski 2011: 22.)

Kaplan-turbiinit sopivat Suomen olosuhteisiin erinomaisesti. Suosio perustuu Kaplanin laajaan putouskorkeusalueeseen. Se vaihtelee 2 metrin ja 70 metrin välillä. Kaplan-turbiinin juoksupyörässä on 4 tai 5 siipeä, joiden asentoa voidaan säätää. (Haapakoski 2011: 22.) Kuvassa 1 on Kaplan-turbiinilla toteutetun vesivoimalaitoksen rakennekuva.

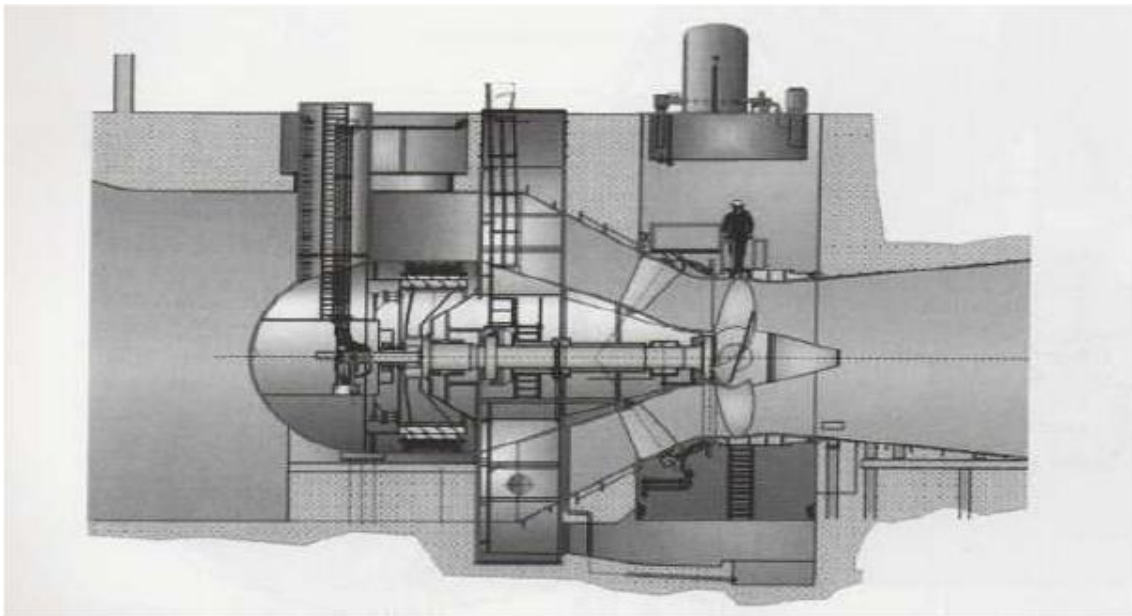


Kuva 1. Kaplan-turbiinilla toteutetun vesivoimalaitoksen rakennekuva (Esko 2010: 15).

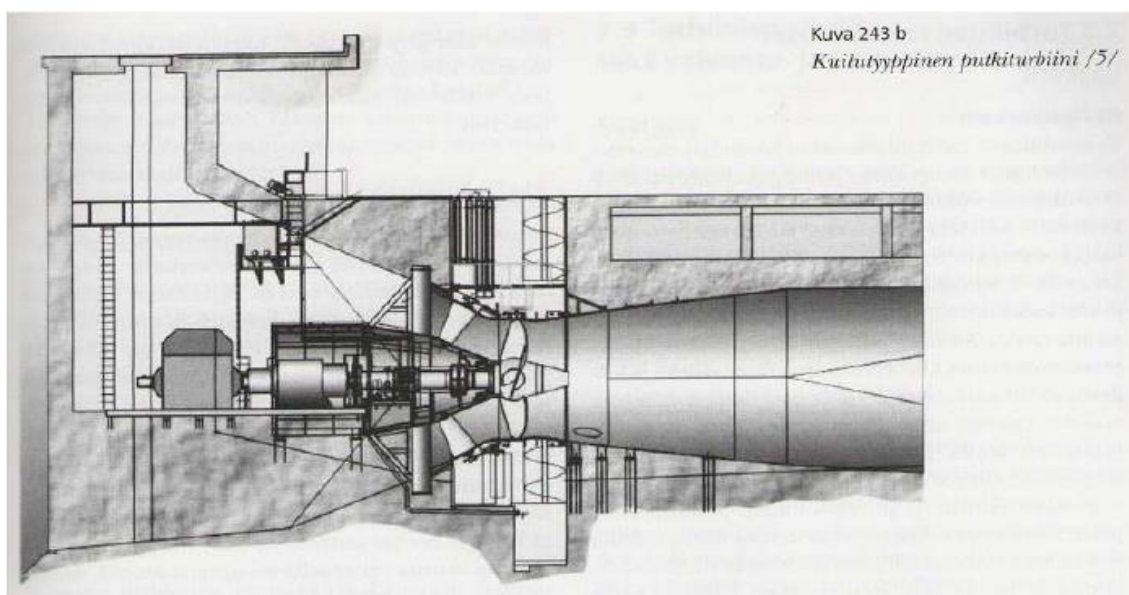
2.1.2 Putkiturbiinit

Putkiturbiinit voidaan jaotella kotelo-, kuilu- ja putkityyppiseen putkiturbiiniin. Putkiturbiineissa juoksupyörätkaisuna käytetään Kaplan-tyyppistä juoksupyörää tai potkuria. Turbiini sijoittuu suoraan tai lähes vaakasuoraan putkeen. Putkiturbiinit sopivat erityin hyvin matalille putouskorkeuksille ja pienille virtaamille. (Haapakoski 2011: 25.)

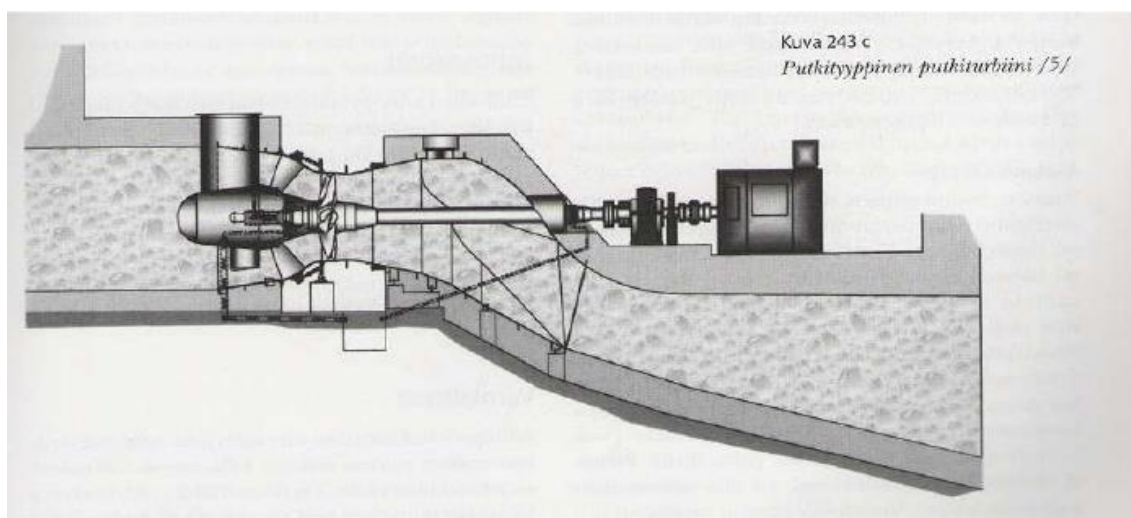
Kuvista 2–4 on nähtävissä kaikki kolme putkiturbiinityyppiä.



Kuva 2. Kotelotyypinen (bulb) putkiturbiini (Haapakoski 2011: 25).



Kuva 3. Kuilutyypinen (pit) putkiturbiini (Haapakoski 2011: 26).



Kuva 4. Putkityypinen (tube) putkiturbiini (Haapakoski 2011: 26).

2.2 Relesuojauksen periaatteita

Standardin SFS-IEC 60050-448 mukaan suojauksen tarkoituksena on havaita viat tai epänormaalit olosuhteet voimajärjestelmässä, jotta viat voidaan laukaista pois ja saada olosuhteet normaaliksi. Suojarele on mittaava rele, joka on suojareleistyksen ja samalla koko suojausjärjestelmän osa. Oiko- tai maasulun tapahduttua vikaantunut verkon osa on erotettava muusta järjestelmästä, jotta se ei aiheuta vaaraa eikä oikosulkuvirta tuhoa laitteita. Sähköturvallisuuslain 2 luvun 5 § mukaan sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava, ja niitä on myös huollettava ja käytettävä siten, että

- niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
- niistä ei aiheudu sähköisesti tai sähkömagneettisesti kohtuutonta häiriötä
- niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. (Elovaara & Haarla 2011: 335–336.)

On syytä, miksi viallinen osa on erotettava muusta verkosta. Voidaan nähdä seuraavat tekijät:

- Vikavirran lämpövaikutus voi olla vaaraksi ihmisille ja eläimille tai tuhota laitteita ja aiheuttaa tulipaloja. Erityisesti sisäkytkinlaitoksessa valokaaren paine- ja lämpövaikutus voi olla hengenvaarallinen.
- Maasulunaikainen maassa kulkeva virta voi aiheuttaa vaaraa ihmisille ja muille eläville olennoille. Suomessa ominainen suuri maan ominaisvastus voi aiheuttaa paikoittain suuren askel- ja kosketusjännitteen.
- Maasulun aikana sähköaseman (tai voimalaitoksen) potentiaali voi nousta vaarallisen suureksi.
- 400 kilovoltin verkossa pitkään jatkuvat oiko- ja maasulut voivat aiheuttaa voimajärjestelmän stabiiliuden menetyksen.

- Oiko- ja maasulkujen aiheuttamat jännitekuopat leviävät laajalle alueelle. Monien tehtaiden prosessit eivät kestä pitkää jännitekuoppaa vaan irtoavat verkosta, mistä aiheutuu kustannuksia.
- Maasulkuvirran vuoksi muihin virtapiireihin, kuten viestiverkkoihin, voi indusoitua häiriöjännitteitä. (Elovaara & Haarla 2011: 336–337.)

Hyvin toteutettu relesuojajärjestelmä on selektiivinen, nopea, luotettava, herkkä ja se toimii myös poikkeuksellisissa käyttötilanteissa. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että vain vikaantunut osa verkosta erotetaan muusta verkosta. Toinen merkitys selektiivisyydelle on se, että kaikki verkon osat on suojattu jollain suojareleellä. (Elovaara & Haarla 2011: 342.)

2.2.1 110 kilovoltin voimajohdot

110 kV johdoilla pääsuojareleenä toimii yleensä distanssirele ja sen varasuojana käänteisaikahidasteinen ylivirtarele. Maasulkujen varalta mukana on suunnattu maasulkurele. Jännitemittaustieto tulee distanssireleelle jännitemuuntajan mittauskäämistä ja suunnatulle maasulkureleelle jännitemuuntajan avokolmiokäämistä. Käänteisaikahidasteinen ylivirtarele toimii sitä nopeammin, mitä suurempi on releen mittaama vikavirta. Releen hidastus pyritään asettelemaan siten, että laukaisu tapahtuu johdon alkupään vioissa distanssireleen toisen vyöhykkeen ajalla ja johdon loppupään vioissa johdon kolmannen vyöhykkeen ajalla tai sitä hitaammin. 110 kilovoltin verkossa vain osa muuntajien tähtipisteistä on maadoitettu, joten kahden maadoituspaikan välillä voi olla useitakin kytkinasemia. Selektiivisyyden vuoksi näillä välilytkinasemilla maasulkureleen tulee olla suunnattu. Suomessa siis käytetään 110 kV:n johdoilla suunnattuja maasulkureleitä. Rele mittaa virtaa ja jännitettä ja päättelee vian suunnan näiden välisen kulmaeron avulla. Suunnattujen maasulkureleiden laukaisuajat on porrastettu maadoituspaikkojen välillä tietyllä tavalla. Käytetty aikaporrastus ja releen kyky havaita vian suunta, edessä vai takana, mahdollistavat johtojen selektiivisen maasulkusuojauksen. Sellaisilla 110 kilovoltin säteisjohdoilla, joilla ei ole välilytkinasemaa eikä suuria voimalaitoksia, voidaan jättää distanssirele pois ja käyttää pelkästään ylivirtarelettä. Maasulkusuojaukseen käytetään

suunnattua maasulkurelettä. 110 kilovoltin lyhyiden rengasjohtojen oiko- ja maasulkusuojaus voidaan toteuttaa johdon molempiin päihin sijoitetuilla johtodifferentiaalireleillä tai sallivaa yliulottuvaa toimintoa käyttävillä distanssireleillä. Differentiaalireleen varasuojana käytetään distanssirelettä. Lyhyellä rengasjohdolla tarkoitetaan tässä yhteydessä alle 10 kilometrin pituista silmukoidun verkon johtoa. (Elovaara & Haarla 2011: 367–369.)

2.2.2 Generaattorit

Tahtigeneraattoreita on erikokoisia eikä kaikkia ole suojattu samalla tavalla. Nykyisin generaattorin suojaustoimintoja ei useinkaan ole toteutettu erillisillä releillä, vaan ne ovat yhdessä suojausyksikössä eli generaattorin suojareleessä.

Staattori

Lähes kaikilla generaattoreilla on staattorin oiko- ja maasulkusuojaus. Staattorin käämien eriste voi pettää ylijännitteen, mekaanisen vaurion tai kuumentumisen vuoksi. Paras staattorin suojarele oikosuluille on differentiaalirele. Pienillä generaattoreilla ylivirtarele voi olla pääsuoja, mutta suurilla generaattoreilla pääsuojana toimii differentiaalirele ja varasuojana käytetään ylivirtarelettä. Jos generaattori on maadoitettu tähtipisteestään niin isolla impedanssilla, että differentiaalirele ei toimi maasulussa, niin silloin maasulkusuojana toimii nollajänniterele. Generaattori voi kuumentua liikaa esimerkiksi ylikuorman tai jäähdytysjärjestelmän vian vuoksi. Ylikuormitussuoja voidaan tarvita sellaisia tilanteita varten, joissa generaattori tuottaa ison pätö- ja loistehon. Kaukana muusta verkosta sijaitsevat generaattorit saattavat tarvita ylijännitesuojauksen käyttötöajuisia ylijännitteitä vastaan jos ne vaikka menettäisivät yhteyden verkkoon, minkä seurauksena niiden jännite ja kierrosnopeus kasvaisivat. Suojana tällaisissa tapauksissa voisivat toimia ylijännite- tai ylitaajuusrele. Generaattorin kuorma voi myös muuttua epäsymmetriseksi. Tällaisen vinokuorman varalta voidaan käyttää vastakomponenttirelettä. Tätä relettä voidaan käyttää myös varasuojana staattorivioille. Vastakomponenttireleen asettelu on usein käänteisaikahidasteinen. (Elovaara & Haarla 2011: 374–375.)

Roottori

Edellä mainittu vinokuormarele toimii myös roottorin suojuareleenä, koska se suojaa roottoria kuumenemiselta. Tahtigeneraattorin roottorissa sijaitseva magnetointikäänitys on maasta erotettu tasavirtajärjestelmä. Yksi maasulku lisää toisen maasulun todennäköisyyttä. Jos roottoriin syntyy kaksoismaasulku, osa roottorin magnetointivirrasta oikosulkeutuu vikakohtien kautta, minkä vuoksi ilmavälivuohon syntyy epäsymmetriaa ja roottori kuumentuu. Roottorin maasulkusuojaus on mahdollista toteuttaa esimerkiksi syöttämällä matalataajuista (1–3 Hz) pulssiaaltoa roottorikäämiin. (Elovaara & Haarla 2011: 375.)

Alimagnetointisuojaus

Normaalitilanteessa tahtigeneraattorin roottorin magneettikenttä ja staattorikäänin luoma magneettikenttä pyörivät tahtinopeudella. Jos roottorikäämi menettää magnetointinsa, kentät eivät enää pyöri samalla nopeudella ja roottori menettää tahtikäyntinsä. Voimakone pyörittää roottoria, mutta verkko ei enää vastusta sen pyörimistä joten seurauksena on generaattorin pyörimisnopeuden kiihtyminen. Roottoriin verrattuna eri nopeudella pyörivä staattorivuo indusoi roottorikäämiin virtoja, ja kone alkaa toimia epätahtigeneraattorina. Roottori mahdollisesti kuumentuu siihen indusoituneiden virtojen vuoksi. Koska magnetointia ei enää ole, generaattori ottaa loistehoa verkosta. Jos sähköverkko on heikko ja generaattori iso, verkon jännite voi romahtaa. Tahtigeneraattorin toimintaan magnetoinnin kadottua vaikuttaa generaattorin rakenne ja koko. Vesivoimakoneilla on aina vaimennuskäänit, joihin indusoituu virtoja, joten vesivoimageneraattorit eivät välttämättä kuumene. Tästä johtuen vesivoimageneraattorit voivat yleensä toimia epätahtigeneraattoreina ilman vaurioitumista. Generaattorin suojana magnetoinnin menetyksen varalta voidaan käyttää esimerkiksi ympyräkuvioista distanssirelettä ja epätahvikäytön varalta impedanssia mittaavaa epätahvikäyntisuojausta. (Elovaara & Haarla 2011: 376.)

Muita tahtigeneraattorin suojauksia

Roottorin ylinopeussuojaus on yleensä osa turbiinin suojausta. Turbiinin ylinopeussuojana on ryntäyssuoja, ja generaattorin ylinopeussuojana toimii ylitaajuusrele. Koska ylinopeus aiheuttaa ylijännitteitä, suojana voidaan käyttää myös ylijännitereleitä. Suojausta moottorikäyttöä vastaan eli takatehorelettä ei tarvita generaattorin vuoksi, vaan turbiinin. Takatehoreleistys on tavallisesti osa generaattorisuojausta, koska generaattorikäyttö voidaan erottaa moottorikäytöstä sähköisten suureiden perusteella. Tärinä- tai värinäsuojaus on myös osa koneikon suojausta. Laakerisuojaus voidaan toteuttaa mittaamalla laakereiden lämpötilaa. (Elovaara & Haarla 2011: 376–377.)

Johdonvarsigeneraattorit

110 kilovoltin johtojen varsille voi olla kytketty generaattoreita. Jos liittymisjohdolle tai runkojohdolle tulee maa- tai oikosulku, johtokatkaisijat aukeavat ja voimalaitos voi jäädä saarekekäytölle edellyttäen, että kuormitus on suurin piirtein tuotantoa vastaava. Johdoilla, joilla on generaattoreita, on pikajälleenkytkennän onnistumistodennäköisyys pienempi kuin muilla johdoilla. (Elovaara & Haarla 2011: 377–378.)

Maasulkusuojaus

Staattorin maasulkusuojaus on tärkeää, koska jatkuva (yli 10 s) suuri (yli 20 A) maasulkuvirta vaurioittaa staattoria. Staattorin 95 prosenttinen maasulkusuojaus toteutetaan joko generaattorin tähtipisteen ja maan välistä jännitettä mittaavalla ylijännitereleellä, staattorin napoihin kytketyistä jännitemuuntajista muodostettua avokolmiojännitettä mittaavalla ylijännitereleellä tai suurella impedanssilla maadoitetun tähtipisteen maasulkuvirtaa mittaavalla ylivirtareleellä. (Pohto 2000.)

Maasulkusuojauksen toteutuksessa on myös ongelmia. Tähtipisteen ja maan väliin muodostuva maasulkujännite muodostuu näistä komponenteista: vikapaikasta riippuva maasulkujännite, suurjänniteverkon maasulusta aiheutuva jännite, harmonisten yliaalto-

virtojen aiheuttama jännite sekä epäsymmetristen vaihejännitteiden ja kapasitanssien aiheuttama jännite. Näistä neljästä kolme viimeksi mainittua aiheuttaa sen, että suojausasettelua ei voida tehdä kovin herkäksi. Tästä syystä onnistuu vain 95 prosenttinen suojaus. (Pohto 2000.)

On olemassa mahdollisuus tehdä staattorin maasulkusuojauksesta sataprosenttinen, mutta se on varsin hintava ratkaisu. Sataprosenttinen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa syöttämällä generaattorin tähtipisteen ja maan väliin 12,5 Hz:n taajuudella 100 voltin jännite. Maasulussa virtapiiri sulkeutuu ja maasulkuvirta alkaa kulkea. Tätä virtaa voidaan tarkkailla ylivirtareleellä. Mikäli generaattorin tähtipiste on maadoitettu impedanssilla, voidaan generaattorin synnyttämää 3. harmonista yliaaltojännitettä tarkkailla generaattorin tähtipisteessä alijännitereleellä. Mikäli generaattorin tähtipiste on irti maasta, voidaan käyttää avokolmioon kytkettyä 3. harmonista yliaaltojännitettä tarkkailevaa ylijänniterelettä. (Pohto 2000.)

Uusinta suojausteknologiaa

ABB on lanseerannut uuden REG630-suojareleen. Se on tarkoitettu pienille ja keskisuurille generaattoreille. Uusi rele soveltuu erinomaisesti vesivoimalaitoksiin. Se noudattaa IEC 61850 -standardia ja on skaalattava ja joustava. Suojausfunktioiden lisäksi tuote sisältää kattavat ohjaus-, mittaus- ja valvontatoiminnot. Iso graafinen näyttö on saatavissa myös erillisenä moduulina. Releen toiminnallisuuksia voi muokata käyttötarpeen mukaan. Asiakas voi määritellä tilauksessa halutun kokoonpanon, joten se auttaa minimoimaan kustannuksia. (ABB 2013: 6.)

2.3 Taajuusmuuttaja vesivoimageneraattorissa

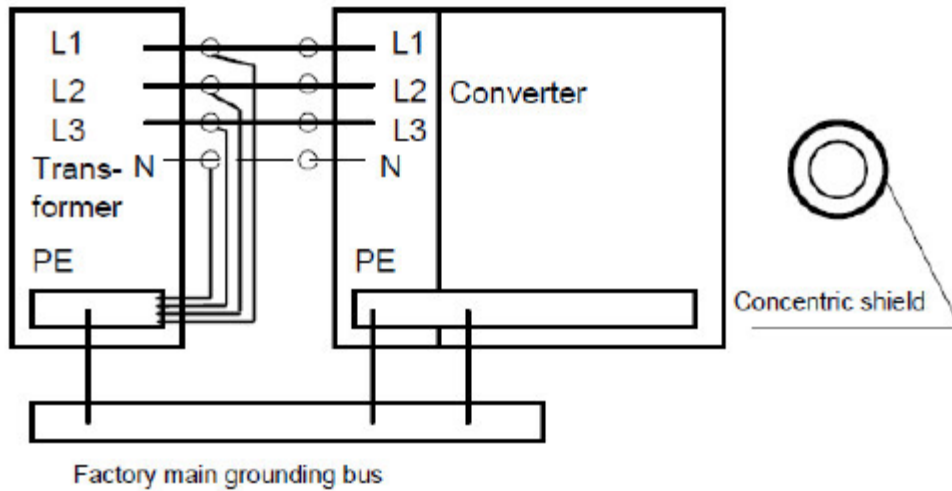
Taajuusmuuttajia on käytetty moottorikäytöissä jo pitkään, mutta vasta nyt 2000-luvulla on kehitetty ratkaisuja taajuusmuuttajakäytölle vesivoimasovelluksiin. Tällä hetkellä taajuusmuuttajia voidaan asentaa 100 kilowatin vesivoimageneraattorista aina 27 me-

gawatin tehoon asti. Taajuusmuuttajan edut vesivoimalaitokselle ovat ilmeiset. Kallista ja vikaherkkää vaihdelaatikkoa ei välttämättä tarvita, laitteisto ja käyttö yksinkertaistuvat, verkkoon tahdistusta ei tarvita, loistehon säätöön tulee lisää mahdollisuuksia ja huolto nopeutuu. Eduiksi voidaan laskea myös hyötysuhteen parantuminen sekä turbii- nin ja generaattorin kulumisen vähentyminen. (Esko 2010: 86.)

Taajuusmuuttajakäyttöisellä vesivoimageneraattorilla on myös haittapuolia. Taajuusmuuttaja aiheuttaa jännite- ja virtapiikkejä. Jännite- ja virtapiikit aiheuttavat yliaaltoja ja laakerivirtoja, jotka saattavat aiheuttaa lukuisia ongelmia ellei niitä ole huomioitu riittävästi asennuksissa. Taajuusmuuttajan käyttöön liittyvät ongelmat ovat kuitenkin ratkais- tavissa oikealla kaapeloinnilla, maadoituksilla ja suodattimilla. Taajuusmuuttajan käyt- täminen vesivoimalaitoksissa antaa paljon mahdollisuuksia, mutta vaatii myös huolellis- ta perehtymistä ongelmien välttämiseksi. (Esko 2010: 88.)

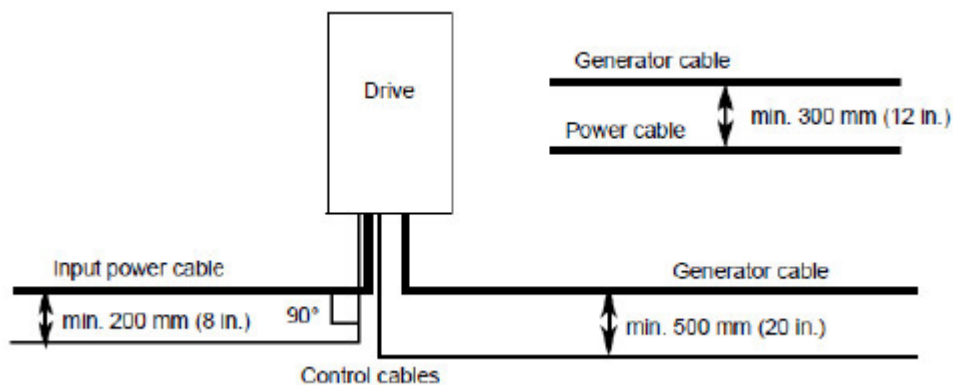
Kaapeloinnit

Muuntajan ja taajuusmuuttajan välinen kaapelointi toteutetaan usein yksivaihekaapeleil- la. Kaapelit, joissa on johtava suojavaippa tai armeeraus, kytketään siten, että suojavai- pan taajuusmuuttajan puoleiset päät eristetään eli niitä ei kytketä mihinkään ja verkon puoleinen pää kytketään PE-kiskoon. Kaapeleissa kulkeva virta indusoi jännitteen suo- javaippaan ja mikäli suojavaippa on maadoitettu kummastakin päästä, aiheutuu siihen kiertävä virta. PE-kiskossa kiertävä sähkövirta voi aiheuttaa laitteiden runkoon vaaralli- sia potentiaalieroja. (Esko 2010: 56.) Suositeltava kaapeloinnin kytkentä on esitetty ku- vassa 5.



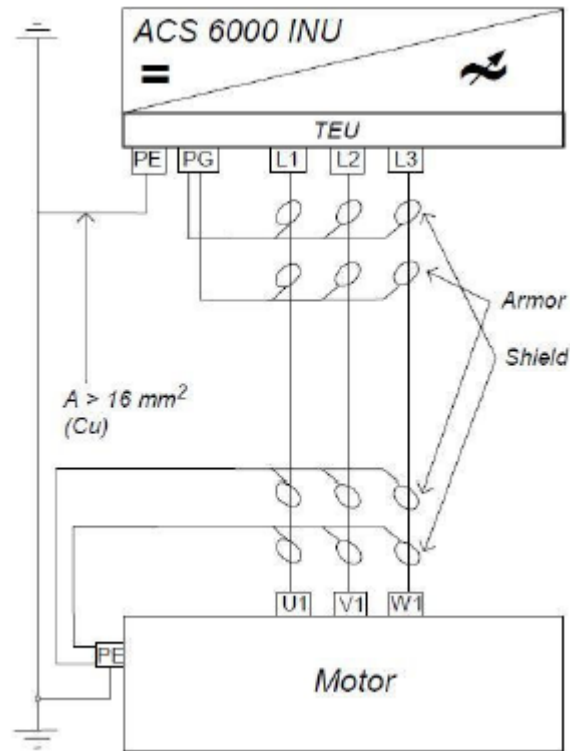
Kuva 5. Muuntajan ja taajuusmuuttajan välinen kaapelointi suojavaipallisella kaapelilla (Esko 2010: 57).

Taajuusmuuttajan ja generaattorin välisellä kaapeloinnilla voidaan vaikuttaa laakerivirtoihin, jännitteiden heijastumisiin ja sähkömagneettisiin eli EMC-häiriöihin. Kaapeli, jossa on yhtenäinen, johtava ja poimutettu alumiininen vaippa, on suositeltavin. ABB suosittelee generaattorikaapeleiksi symmetrisiä, suojavaipallisia kaapeleita. Suojavaippa voidaan kuitenkin jättää pois, jos kaapeli asennetaan yhtenäiseen metalliputkeen. (Esko 2010: 57, 63.) Kuvassa 6 on havainnollistettu etäisyyksiä eri kaapeleille.



Kuva 6. Taajuusmuuttajaan liittyvien kaapeleiden väliset etäisyydet (Esko 2010: 65).

ABB:n ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajan kaapelointi moottoriin tai generaattoriin on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. ACS 6000 -taajuusmuuttaja yksijohtimisella kaapeloinnilla (Esko 2010: 66).

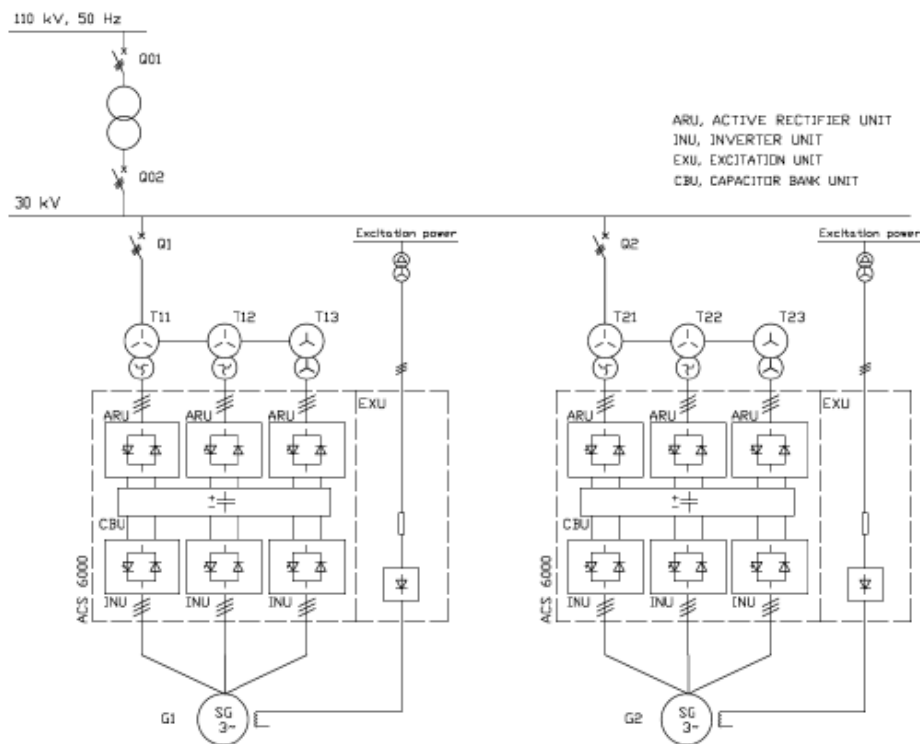
Järjestelmä

Keskijännitetaajuusmuuttaja tarvitsee ulkoisen syötön tai liitännän magnetoinnille (AC), jäähdytykselle (varmennettu AC) ja ohjausyksikölle (varmennettu AC tai vaihtoehtoisesti 110/220 tasajännitteinen akusto). Erillistä tasasähkösyöttöä ei siis välttämättä tarvita, vaan varmennettu vaihtosähkösyöttö (UPS) riittää. Turbiinisäätäjät tarvitaan kuten perinteisessäkin voimalaitoksessa. Jännitesäätäjien tarpeen määrää käytettävä generaattorityyppi. Tahtigeneraattoreiden yhteydessä se tarvitaan. Taajuusmuuttajan kanssa voidaan toki käyttää myös epätahti- ja kestopagneettigeneraattoreita. Huomattava etu taajuusmuuttajan käytöstä on, että generaattorin tekniset arvot voidaan määrittää taajuudes-

ta välittämättä. Näin generaattori voi olla edullisempi ja fyysisesti pienempi kuin normaalitapauksessa.

ABB:n ACS 6000

ABB:n ACS 6000 -keskijännitetaajuusmuuttajaa myydään 6-, 12- ja 18-pulssisena. 18-pulssisen laitteiston teho on suurin, 27 MVA. ACS 6000 käyttää kolmitasoista pulssinleveysmodulointitekniikkaa sekä 18-pulssista muuntajalaitteistoa. Taajuusmuuttaja koostuu kolmesta 9 MVA:n tehoisesta verkkosillasta (ARU, Active Rectifier Unit), välipiiriin kondensaattoriparistosta (CBU, Capacitor Bank Unit) ja kolmesta 9 MVA:n tehoisesta generaattorisillasta (INU, Inverter Unit). Kaikki ARU- ja INU -yksiköt kytetään samaan tasajännitevälipiiriin CBU:ssa. Jos käytössä on tahtigeneraattorit, taajuusmuuttajaan täytyy lisätä ulkoinen magnetointiyksikkö (EXU, Excitation Unit). (Risku 2012: 88.) Kuvassa 8 on esitetty ACS 6000 -taajuusmuuttajan kytkentä (vesi)voimalaitokseen.



Kuva 8. ACS 6000 -taajuusmuuttajan kytkentä kahden turbiinin (vesi)voimalaitokseen (Risku 2012: 89).

Taajuusmuuttaja liitetään sähköverkkoon vaihesiirron sisältävän muuntajakokonaisuuden avulla. Muuntajia on kolme erillistä. Taajuusmuuttajatekniikasta hyödytään eniten voimalaitoksissa, joissa turbiinin pyörimisnopeus on pieni, esimerkiksi matalan putouskorkeuden vesivoimalaitoksissa. Jos veden virtaama on suuri, turbiinin tuottama teho on suuri. (Risku 2012: 88–89.)

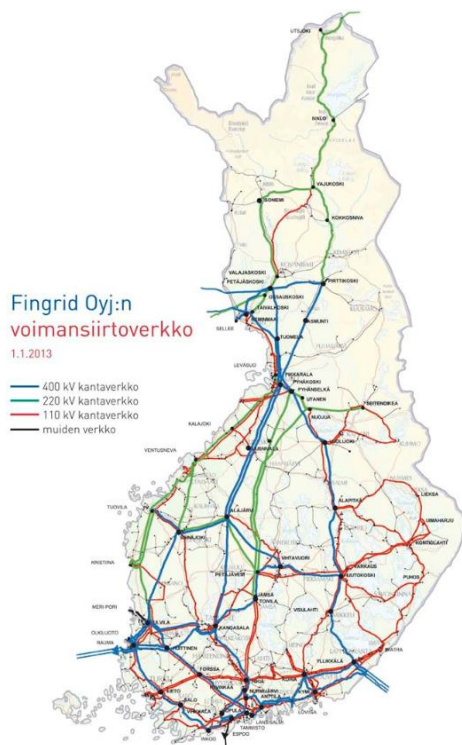
Mainittu vaihesiirtävä muuntajakokonaisuus on käytössä Sierilän voimalaitoksen taajuusmuuttajavaihtoehdossa. Asiasta lisää myöhemmin tässä työssä.

3 SÄHKÖVERKKOON LIITTYMINEN

3.1 Kantaverkko

Suomen sähköjärjestelmä koostuu sähköntuotantolaitoksista, kantaverkosta, jakeluverkoista ja sähkön kuluttajista. Kuvassa 9 on esitetty Suomen kantaverkko, jonka hallinnasta vastaa Fingrid Oyj. Kantaverkkoon liittyessä laaditaan liittymissopimus asiakkaan ja Fingridin kesken. Sopimuksessa määritetään muun muassa omistus- ja vastuuraajat, käytön ja kunnossapidon vastuut sekä käyttöoikeudet korvauksineen.

Liittymissopimukseen kuuluvia liittämisehtoja ovat yleiset liittämisehdot (YLE) sekä voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV). Molemmat ovat vuodelta 2013. Uutta VJV-asiakirjaa ei tosin ole vielä tätä kirjoitettaessa vahvistettu Energiamarkkinaviraston toimesta. Liittämisehdoilla varmistetaan liitettävien verkkojen tekninen yhteensopivuus ja selvennetään liityntää koskevat oikeudet, vastuut ja velvollisuudet.



Kuva 9. Fingridin kantaverkko (Fingrid 2013b).

3.1.1 Kantaverkkoon liittymisen periaatteita

Fingrid on laatinut kantaverkkoon liittymiselle tiettyjä sääntöjä. Seuraavat ohjeistukset koskevat liittymistä sekä 110, 220 että 400 kilovoltin jännitetasoille.

Yleistä liittymisestä

Fingrid määrittelee liittymistavan ja -paikan kantaverkkoon ottamalla huomioon

- liittyvän kulutuksen tai tuotannon tehon, liittynnän tarpeet ja sijainnin
- vaikutukset kantaverkon käyttövarmuuteen ja ympäristöön
- aiheutuvat haitat alueen tuotannolle ja kulutukselle johtuen lisääntyvistä keskeytyksistä ja häiriöistä
- tekniset toteutusvaihtoehdot ja kustannukset (Sederlund & Parviainen 2013: 4).

Sovittavia asioita liittymistä suunniteltaessa ovat jännitetaso, valinta kytkinlaitos- vai voimajohtoliittynnän välillä, sähkölaitteistojen suojaus ja yhteensopivuus sekä energianmittaus- ja tietoliikenneyhteydet. Liittynnän on noudatettava voimassaolevia teknisiä ehtoja, tärkeimpänä yleiset liittymisehdot (YLE) ja voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV). Fingrid haluaa, että ennen rakentamista liittyvän verkon rakenne- ja sijoituspiirustukset on lähetettävä heille. Myös muuta tiedonvaihtoa vaaditaan. Fingrid vastaa suojauskoordinaatiosta ja asiakas vastaa liittyvän verkon suojausasetteluista. (Sederlund & Parviainen 2013: 4–5.)

Liityntähanke

Liityntähanke etenee asiakkaan puolelta seuraavasti:

1. yhteydenotto Fingridiin
2. suunnitelmien laatiminen

3. liittymisajankohdasta sopiminen
4. teknisten dokumenttien laatiminen (Sederlund & Parviainen 2013: 6).

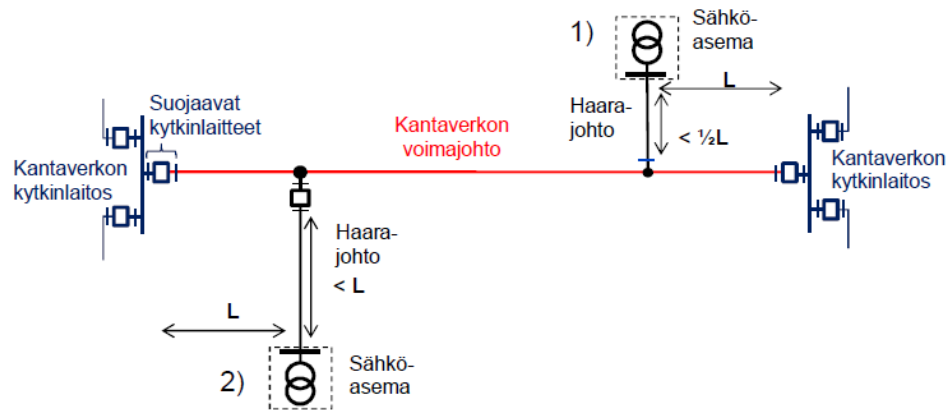
Vaiheessa 1. Fingrid haluaa liittymisestä alustavia tietoja, kuten teho, tyyppi, kohteen sijainti ja aikataulu. Vaiheen 2. suunnitelmat Fingrid haluaa itselleen tarkastettavaksi. Vaiheessa 3. tehdään sähkölaitteiston käyttöönottotarkastus ja toimitetaan pöytäkirja Fingridille. Viimeisessä vaiheessa toimitetaan loppudokumentit Fingridille. Niiden on oltava perillä viimeistään kaksi kuukautta käyttöönoton jälkeen. (Sederlund & Parviainen 2013: 6.)

Liittymistapa

Kantaverkkoon voidaan liittyä joko kytkinlaitoksen kautta tai voimajohtoliitynnällä. Kytkinlaitosliitynnällä tarkoitetaan liittymistä kantaverkon 400, 220 tai 110 kilovoltin kytkinlaitokseen. Liittymisjohdon rakentaminen on asiakkaan kontolla. Fingrid hoitaa tarvittavat järjestelyt kytkinlaitoksellaan tai rakennuttaa tarvittaessa uuden sellaisen. (Sederlund & Parviainen 2013: 7.)

Voimajohtoliitynnällä tarkoitetaan kantaverkon voimajohtoon joko kiinteästi tai kytkinlaitteen avulla liittyvää haarajohtoa tai sähköasemaa. Haarajohdon kytkinlaitteet tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle liittymispistettä. Aivan kytkinlaitoksen lähelle ei kuitenkaan saa liittyä johtuen suojausien toimivuudesta. Suurin sallittu johdolle liitettävän muuntajan koko on 25 MVA. Tätä suuremmat muuntajat tulee liittää katkaisijalla kytkinlaitokseen. Samaan liityntään voidaan kytkeä enintään kaksi 25 MVA:n muuntajaa niin, että näiden syöttämät keskijänniteverkot ei ole rinnankytketty. (Sederlund & Parviainen 2013: 8.)

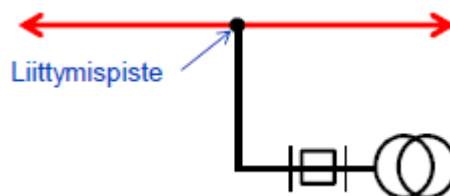
Runkojohtoon liittyvien haarajohtojen sallituista pituuksista on myös annettu ohjeita. Kuvassa 10 on esitetty rajauksia mainittuihin tilanteisiin.



Kuva 10. Voimajohtoon liittyvän haarajohdon pituuden rajoitukset (Sederlund & Parviainen 2013: 9).

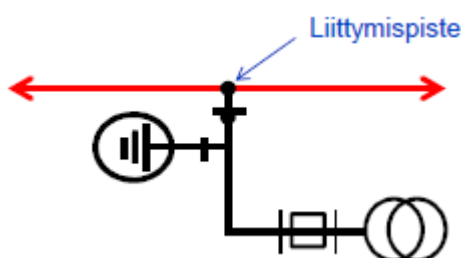
Kuvassa tärkeintä on, että haarajohdon pituus ei saa ylittää puolta (50 %) liittynnän ja lähimmän suojaavan katkaisijan välisestä etäisyydestä. Lisäksi erikseen suojatun haarajohdon pituus voi olla enintään liittynnän ja lähimmän suojaavan katkaisijan välinen johdotpituus (100 %). Rajoitusten tarkoituksena on varmistaa runkojohdon suojauksen selektiivinen toiminta. (Sederlund & Parviainen 2013: 9.)

Sääntöjen mukaan yli kaksi kilometriä pitkä haarajohto pitää voida erottaa käyttötoimenpiteenä kytkinlaitteella jännitteisenä. Jos haarajohdon pituus on alle kaksi kilometriä, on sallittu tehtävän liityntä ilman kytkinlaitetta. (Sederlund & Parviainen 2013: 1.) Kiinteä liityntä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kiinteä liityntä kantaverkon voimajohtoon (Sederlund & Parviainen 2013: 10).

Kun haarajohdon pituus on 2–7 kilometriä, käytetään erotinta ja maadoituskytkintä kuvan 12 tapaan. Jos haarajohdon pituus on yli 7 km, käytetään erottimen sijaan tehoerotinta ja maadoituskytkintä. Huomioitavaa on, että liityttäessä kaksoisjohtoon täytyy liityntäerottimessa olla maadoituskytkin myös runkojohdon puolella työturvallisuussyistä. (Sederlund & Parviainen 2013: 10.)

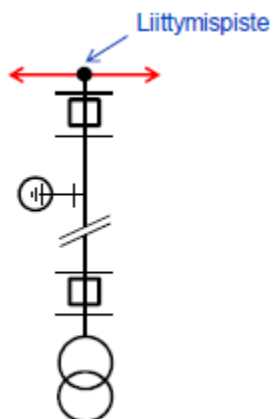


Kuva 12. Liityntä kytkinlaitteilla kantaverkon voimajohtoon (Sederlund & Parviainen 2013: 10).

Liittyminen voimajohtoon pitkällä haarajohdolla

Kantaverkon johtosuojaukseen ei ole teknisesti mahdollista käyttää pitkän haarajohdon suojana, joten pitkiä haarajohtoja tulisi näin ollen välttää. Jos liitettävän haarajohdon liittymässä on suojarlein varustettu katkaisija, liitettävän voimajohdon pituus voi olla yhtä suuri kuin liittymän etäisyys lähimpään kantaverkon voimajohdon suojaavaan katkaisijaan, kuten kuvassa 13. Haarajohto tulee varustaa viiveettömällä oiko- ja maasulkusuojauksella. (Sederlund & Parviainen 2013: 11.)

Haarajohdon suojauksessa ei voi käyttää pikajälleenkytkentää. Haarajohdon varasuojana toimii runkojohdon distanssisuojan II-suojausvyöhyke. Johdon pituus ei saa ulottua tämän suojausalueen yli. (Sederlund & Parviainen 2013: 11.)



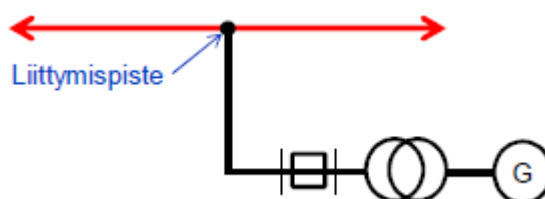
Kuva 13. Pitkän haarajohdon liityntä kantaverkon voimajohtoon (Sederlund & Parviainen 2013: 11).

Voimalaitoksen liittäminen

Suomen voimajärjestelmään kytkeytyvien nimellisteholtaan yli 0,5 MVA:n voimalaitosten tulee täyttää voimassaolevat voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV). Yli 250 MVA:n voimalaitos liitetään ensisijaisesti 400 kilovoltin kytkinlaitokseen. Alle 250 MVA:n voidaan liittää myös 110 kilovoltin kytkinlaitokseen. Pääsääntö on, että kantaverkon voimajohtoon ei liitetä voimalaitoksia suoraan, mutta poikkeuksena voidaan sallia pieni, alle 5 MVA:n laitos, tai enintään 25 MVA:n laitos, jonka kantaverkoon syöttämä oikosulkuvirta on korkeintaan 1,2-kertainen voimalaitoksen nimellisvirtaan verrattuna. (Sederlund & Parviainen 2013: 12.) Tällaisia ovat esimerkiksi taajuusmuuttajakäyttöinen tuuli- tai vesivoimalaitos.

110 kV:n voimajohtoliityntään on annettu seuraavia ohjeita. Generaattorin koon ollessa 1–5 MVA asiakas vastaa laitoksensa eroonkytkentäreleistyksestä. Tämän releistyksen pitää laukaista voimalaitos irti kantaverkon voimajohdosta kantaverkon pikajälleenkytkennän aikana. Lisäksi eroonkytkentäreleistyksen pitää sisältää taajuusrele, 3-vaiheinen alijänniterele ja 110 kV:n nollajänniterele. (Sederlund & Parviainen 2013: 13.)

Generaattorin koolla 5–25 MVA, kun oikosulkuvirran syöttö on rajoitettu 1,2-kertaiseksi laitoksen nimellisvirrasta, asiakkaan täytyy varustaa voimalaitoksensa eroonkytkennän viestiyhteydellä. Eroonkytkentäreleistyksen täytyy myös nyt sisältää 3-vaiheinen alijänniterele sekä nollajänniterele (110 kV). (Sederlund & Parviainen 2013: 13.) Kuvassa 14 on esitetty voimalaitoksen liittäminen kantaverkkoon.



Kuva 14. Voimalaitoksen liittäminen kantaverkon voimajohtoon (Sederlund & Parviainen 2013: 13).

Käyttö ja kunnossapito

Fingridin ohjeiden mukaan asiakas vastaa itse oman liityntänsä varasyöttömahdollisuuksista. Kantaverkkoon liittyvän haarajohdon tulee olla puuvarma, ukkosköysin varustettu ja oikosulkukestoisuudeltaan riittävä. Asiakkaan tulee vastata hallinnassaan olevien sähkölaitteistojen kunnosta, käytöstä ja toimivuudesta siten, että niiden tekninen taso ei olennaisesti poikkea kantaverkon yleisestä tasosta. Jos jommallakummalla osapuolella on tarvetta irrottaa sähkölaitteisto verkosta ja se vaikuttaa toisen osapuolen toimintaan, on siirtokeskeytyksestä neuvoteltava etukäteen. Siirtokeskeytysten lukumäärä ja kesto pyritään minimoimaan ennakoimalla työtarpeet vähintään vuoden päähän. Keskeytysten ajankohta ja toteutustapa suunnitellaan yhteistyössä siten, että työt voidaan hoitaa turvallisesti ja kustannustehokkaasti. Kumpikin osapuoli vastaa oman verkkonsa kytkentöjen johtamisesta, paikalliskytkennöistä sekä siirtokeskeytysten kustannuksista, ellei erikseen jotain muuta sovita. (Sederlund & Parviainen 2013: 14.)

Häiriöt, lait ja standardit

Liittyjän tulee luonnollisesti varautua mahdollisiin häiriöihin kantaverkossa. Sähköverkon vioista aiheutuvat lyhytaikaiset jännitekuopat, jännitteettömyys sekä pika- ja aikajälleenkytkentöjen vaikutukset tulee ottaa huomioon sähkölaitteiston suunnittelussa ja käytössä. Jos tarvitaan keskeytyksetöntä sähköä tai normaalia parempaa sähkön laatua, sellaiset tulee varmistaa asiakkaan omilla järjestelmillä tai sopia erityisjärjestelyistä Fingridin kanssa. Liityntöjen teknisten ratkaisuiden on noudatettava Suomen sähkölain säädäntöä, joista tärkeimmät ovat Sähköturvallisuuslaki 410/1996 ja Sähkömarkkinalaki 386/1995. Lisäksi kytkinlaitosten ja kaikkien laitteiden nimellisarvojen, ominaisuuksien ja koestusten on noudatettava SFS-EN-, EN-, HD- ja IEC-standardeja. (Sederlund & Parviainen 2013: 15–16.)

3.1.2 Yleiset liittymisehdot

Fingridin laatimilla yleisillä liittymisehdoilla (YLE2013) on tarkoitus varmistaa yhteen liitettävien verkkojen tekninen yhteensopivuus sekä selventää kummankin osapuolen oikeudet, vastuut ja velvollisuudet. Yleisten liittymisehtojen pohjana on pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden sääntökokoelma Nordic Grid Code.

Vanhan Nordel yhteistyön tilalle on tullut ENTSO-E. Se on vuonna 2009 perustettu Euroopan kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö. Siihen kuuluu 41 kantaverkkoyhtiötä 34 Euroopan maasta, kuten myös Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. ENTSO-E:n kautta koordinoidaan tulevaisuudessa koko Euroopan kattavaa verkkosuunnittelua ja sen sääntöjä. (Laaksonen 2011: 61, 64, 86.)

Edellisessä kappaleessa 3.1.1 selvitettiin jo oleellisia asioita, mutta seuraavassa käydään läpi vielä muutamia mainintoja yleisistä ehdoista voimalaitosrakentajan näkökulmasta.

Uutena asiana uusimpaan YLE2013-asiakirjaan on tullut vaatimus, että kantaverkkoon liittyjä on velvollinen huolehtimaan sähköverkkoonsa suoraan tai välillisesti liittyvien

kanssa siitä, että myös niiden sähköverkot ja niihin liittyvät sähkölaitteistot täyttävät Fingridin yleiset liittymisehdot ja muut liittymän toteuttamiseen liittyvät ohjeet ja vaatimukset (Fingrid 2012a: 2). Tämä tarkoittaa, että myös alue- ja jakeluverkkoihin liittyvän tuotannon tai kulutuksen tulee täyttää Fingridin uudet YLE- ja VJV-vaatimukset.

Sähköverkkoon liittymisessä pääperiaate on, että pienitehoiset sähkölaitteistot tulee liittää jakelu- ja alueverkkoon, mikäli liityntä ei ole teknisesti tai taloudellisesti kohtuutonta toteuttaa. Näin parannetaan kantaverkon toimintavarmuutta ja tehokkuutta. Kuten aiemmin jo mainittiin, liittymisjohdon tulee olla puuvarma ja ukkosköysin varustettu. Lisäksi pitkissä liittymisjohdoissa vaihejohtimet tulee vuorotella Fingridin antaman erillisen ohjeistuksen mukaisesti. (Fingrid 2012a: 2.)

Asiakas ja Fingrid sopivat liittymän suunnitteluvaiheessa energian mittausjärjestelyistä. Tarvittavia mittareita varten tulee varata riittävät tilat, apusähkösyötöt, mittamuuntajat johtoineen sekä viestiyhteyden liittymät. Kun liitytään Fingridin verkkoon, asiakas luonnollisesti vastaa sähkölaitteistonsa liittymän turvallisesta toteuttamisesta asiaa koskevien lakien ja asetusten mukaisesti. Lisäksi asiakkaalle kuuluu tarvittavat vaara- ja kosketusjänniteselvitykset ja niiden perusteella aiheutuvat toimenpiteet. (Fingrid 2012a: 3.)

Kantaverkkoon liitettävän uuden voimalaitoksen edellytetään täyttävän kulloinkin voimassa olevat Fingridin voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset. Utta asiaa on, että Suomen voimajärjestelmän suurin sallittu askelmainen tehonmuutos voimalaitoksen liittymässä on 900 MW vuonna 2013. Tämä siis koskee vain suurimpia voimalaitoksia Suomessa, lähinnä ydinvoimaa. Yleisissä liittymisehdoissa edellytetään voimalaitoksen varustettavan eroonkytkentäreleistyksellä. Lisäksi voimajohtoliityntään kytketty yli viiden MVA:n voimalaitos on varustettava tietoliikenneyhteydellä, jotta kantaverkon pikajälleenkytkentä olisi mahdollista. (Fingrid 2012a: 4.)

Tietojen vaihdosta on yleisissä liittymisehdoissa mainittu varsin yksityiskohtaisesti, mutta sen voi tiivistää niin, että liittyjän on annettava Fingridille kaikki tarpeelliset tie-

dot liitettävästä sähkölaitteistosta ja siihen liittyvistä laitteista ja järjestelmistä. Myös laitteistojen suunnittelusta, käytöstä ja kunnossapidosta on annettu ohje, joka edellyttää sekä liittyjän että Fingridin vastaamaan kumpikin hallinnassaan olevien sähkölaitteistojen sähköturvallisuudesta, toimivuudesta, kunnosta ja käytöstä. Uuden liittynnän tekninen taso ei saa olennaisesti poiketa kantaverkon yleisestä teknisestä tasosta. (Fingrid 2012a: 5–6.)

Sähköverkon taajuuden ohjearvo pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä on 49,9–50,1 Hz. Häiriöttömässä käyttötilanteessa taajuus voi vaihdella välillä 49,5–50,5 Hz ja poikkeuksellisesti alueella 47,5–53 Hz. Suomen kantaverkon nimellisjännitetasot ovat 110, 220 ja 400 kV. Liityntää suunniteltaessa käytetään lähtökohtaisesti arvoja 118, 233 ja 410 kV. Luonnollisesti liittyjän sähkölaitteiston ja siihen liittyvien muiden laitteistojen on toimittava edellä esitetyillä jännite- ja taajuusalueilla vaatimusten mukaisesti. (Fingrid 2012a: 7.)

Saarekekäyttötilanteessa yksi tai useampi voimalaitos jää osaksi kantaverkosta erillään olevaa sähköverkkoa. YLE-asiakirjan mukaan liittyjä ja Fingrid sopivat etukäteen saarekekäyttöön liittyvistä järjestelyistä. Maadoituksissa olennaista on, että muuntajan 110 kV:n tähtipiste maadoitetaan vain valituilla asemilla maadoituskuristimen kautta, jotta maasulkusuojaus toimii ja maasulkuvirtataso säilyy kohtuullisena. Maadoittamaton tähtipiste suositellaan varustettavan ylijännitesuojalla muuntajan suojaamiseksi ylijännitteiltä. (Fingrid 2012a: 7–8.)

Sähkölaitteistojen suojaamisessa huomioitavaa on, että liittyjän on sovittava Fingridin kanssa 110 tai 220 kV:n suojauksen toiminnan yhteensovittamisesta, jos liittyjän sähköverkon suojauksen toiminta-aika liittymispisteessä ylittää 0,1 s. Toisaalta, jos sähköverkkoon liitetään kaapeliosuuksia tai liitytään sammutettuun 110 kV:n sähköverkkoon, sovitaan laitteiston suojauksesta erikseen. Liittyjä myös huolehtii siitä, ettei poikkeuksellinen jännite tai taajuus eikä jännitteen häviäminen aiheuta vahinkoa yhdenkään osapuolen sähkölaitteistoille. (Fingrid 2012a: 9–10.)

3.1.3 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Fingrid Oyj:llä on järjestelmävastuu Suomen voimajärjestelmästä. Suomen sähköjärjestelmään liittyviä voimalaitoksia varten Fingrid on asettanut kaikille voimalaitoksille yhteiset järjestelmätekniset vaatimukset (VJV2007). Vaatimusten tavoitteena on taata voimalaitoksille sellaiset ominaisuudet, että ne toimivat yhdessä siirtoverkon kanssa luotettavasti sekä normaalissa käyttötilanteessa että häiriötilanteissa.

Järjestelmäteknisten vaatimusten asettamisella on tavoitteena säilyttää voimajärjestelmän ja siihen liittyneiden voimalaitosten käyttövarmuus siten, että voimalaitos kestää järjestelmän sille aiheuttamat jännite- ja taajuusvaihtelut ja että voimalaitos ei verkkoon kytkeytyneenä aiheuta muille verkossa oleville laitoksille haittaa. Voimajärjestelmän käyttövarmuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että voimalaitokset pysyvät verkossa ja toimivat luotettavasti verkkohäiriön sattuessa. Muussa tapauksessa häiriö voi laajeta suurihäiriöksi, jonka jälkeen voimajärjestelmän palauttaminen normaaliin toimintaan on vaikeampaa ja aikaa vievää. Järjestelmäteknisten vaatimusten lisäksi voimalaitosten on noudatettava sähköverkkoon liittymisen hetkellä voimassa olevia Fingridin yleisiä liittymisehtoja ja myös 110 kV:n verkon sähkönlaatu- sekä tiedonvaihtoperiaatteita. (Fingrid 2007: 1.) Seuraavassa on esitelty muutamia VJV:n määrittämiä teknisiä ehtoja vesivoimalaitoksen näkökulmasta.

Voimalaitoksen pitää sietää lähellä laitosta tapahtuvien verkkovikojen aiheuttamat suuret jännitemuutokset. Koneiston pitää kestää myös verkkovikojen aiheuttamat mekaaniset rasitukset ilman vaurioita. Voimalaitoksen päämuuntajan yläjännitepuolella tapahtuvat oiko- tai maasulkujen mekaaniset rasitukset eivät saa aiheuttaa vaurioita laitokselle olettaen, että vian kestoaika on enintään 0,25 sekuntia. Suurissa jännitehäiriöissä voimalaitoksen tulee tukea verkkoa mahdollisimman pitkään. Laitos ei tietenkään saa vaurioitua ja omakäytölle siirtymistä ei vaaranneta. (Fingrid 2007: 2–3.)

Vesivoimalaitoksille on VJV-asiakirjassa annettu omia vaatimuksia pätötehon muutosnopeudelle sekä tehoalueelle.

VJV2013-asiakirja

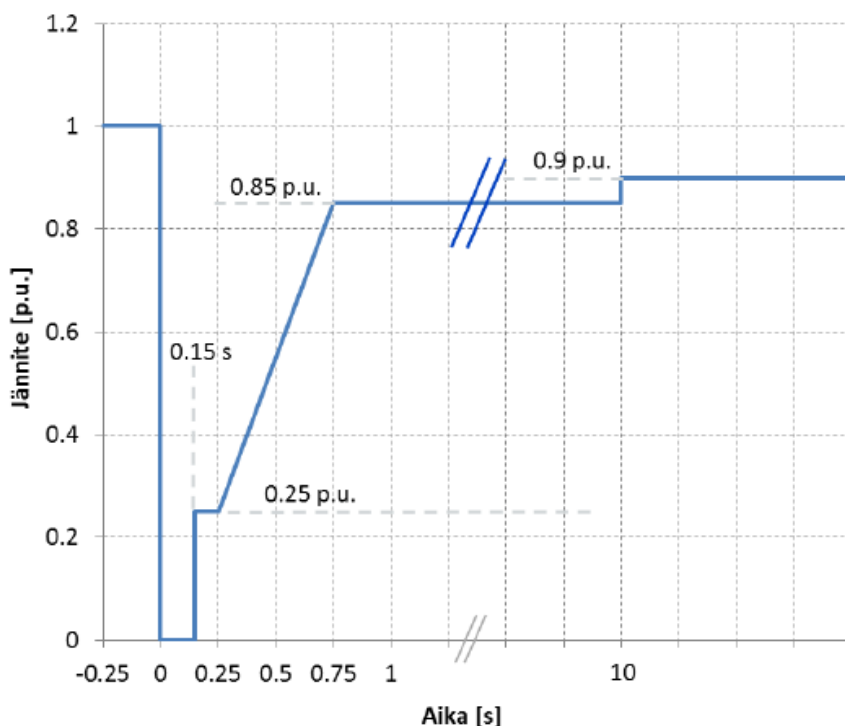
Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset uudistuvat. VJV2013-asiakirja on ollut toiseen kertaan lausuntokierroksella alkukesästä 2013. Uusittu VJV vahvistetaan ja julkaistaan heti kun lausuntoihin ja kommentteihin liittyvä työ on saatu tehdyksi. Seuraavassa on poimintoja uudistetusta asiakirjasta.

Uudet VJV-vaatimukset tulevat koskemaan kaikkia Suomen voimajärjestelmään kytkettyjä, maksimiteholtaan 0,5 MW:n tai sitä suurempia voimalaitoksia. Voimalaitoksen tulee täyttää nämä vaatimukset niin sanotussa referenssipisteessä. Pisteiden määrittäminen kuvataan myöhemmin. Voimalaitokset on kokoluokiteltu neljään luokkaan ja vaatimukset on porrastettu luokittain. Luokkaan 1 kuuluu 0,5–10 MW:n laitokset, luokassa 2 ovat koot 10–25 MW, luokassa 3 25–100 MW ja viimeisessä luokassa 4 yli 100 MW:n laitokset. (Fingrid 2013a: 10.)

Uusia vaatimuksia on täsmennetty ja paranneltu monilta osin. Muun muassa voimalaitoksen sijainti ja liityntätapa sähköverkkoon voivat edellyttää erityistarkasteluja, jotta kaikki mahdolliset liityntään ja liittyvään laitteistoon vaikuttavat tekniset asiat saadaan kartoitettua mahdollisemman aikaisessa vaiheessa projektia. (Fingrid 2013a: 11.) Esi-merkki erityistarkasteluja vaativasta kohteesta on suuntaajakytketty voimalaitos. Taa-juusmuuttajakäytön käyttäytyminen sähköverkon vikatilanteissa on erityistä huomiota vaativa asia.

VJV-referenssipiste määritetään VJV2013-asiakirjassa annetun ohjeistuksen avulla. Määritelmän mukaan referenssipiste on se voimalaitoksen päämuuntajan yläjännitepuolella oleva kohta, joka on sähköisesti lähimpänä voimalaitoksen liittymispistettä. Referenssipisteen määrittää liittymispisteen verkonhaltija. Ei siis välttämättä Fingrid. Tässä pisteessä voimalaitoksen tulee täyttää VJV-vaatimukset. (Fingrid 2013a: 27.)

Tahtikonevoimalaitokset omakäyttöineen on suunniteltava ja rakennettava siten, että ne kestävät kuvassa 15 esitetyn jännitehäiriön esiintymisen referenssipisteessä. Voimalaitos ei saa irrota verkosta tai menettää tahtikäyttöään tämän lyhytaikaisen jännitteen vaihtelun aikana. Vaatimus koskee myös suuntaajajytkettyjä voimalaitoksia. (Fingrid 2013a: 29–30.)



Kuva 15. VJV-referenssipisteen jännite jonka aikana ja jälkeen teholuokkien 1, 2 ja 3 voimalaitosten tulee jatkaa toimintaansa normaalisti (Fingrid 2013a: 30).

Voimalaitoksen minimiteho tarkoittaa laitoksen generaattorin tai generaattoreiden yhteenlaskettua pienintä mahdollista referenssipisteeseen syötettyä pätötehoa, jota voimalaitos pystyy tuottamaan yhtäjaksoisesti ilman aikarajaa. Sen pitää olla mahdollisimman pieni. Vesivoimakoneilla ohjearvoinen minimiteho on 10 % mitoitustehosta. Vesivoimalaitosten käynnistyminen täyteen tehoon saa kestää maksimissaan 15 minuuttia. (Fingrid 2013a: 35–36.) Vielä voimassaolevassa VJV2007-asiakirjassa vesivoimalaitoksen käynnistyminen saa ottaa aikaa 10 minuuttia (Fingrid 2007: 4). Tämä on lähes ainoa muuttuva asia vesivoimalaitoksille siirryttäessä vanhasta asiakirjasta uuteen.

Pätötehon säädön toteutuksesta on annettu uudessa VJV:ssä varsin tarkat ohjeet. Pätötehon muutosnopeudeksi on säädetty vesivoimalaitokselle normaalissa käyttötilassa ± 40 % minuutissa suhteutettuna maksimitehoon. Häiriöiden aikana vastaava muutosnopeus tulee olla vähintään ± 10 %. Omakäytöllä toimivaa voimalaitosta kuormittavat vain sen omat apujärjestelmät. Vesivoimalaitoksen tulee toimia omakäytöllä vähintään kahdeksan tunnin ajan. (Fingrid 2013a: 37–38.)

Voimalaitoksen generaattorien ja päämuuntajan reaktanssien tulee olla niin pieniä kuin teknisesti ja taloudellisesti on mahdollista. Näin voimalaitos tukee mahdollisimman tehokkaasti voimajärjestelmän toimintaa ja stabiilisuutta. (Fingrid 2013a: 40.)

Tulevaisuus

Eurooppalaiset verkkosäännöt tekevät tuloaan. ENTSO-E Requirements for generators eli yleiseurooppalaisen VJV:n tavoitteina ovat parhaiden käytäntöjen soveltaminen Euroopan laajuisesti, investointikustannusten pienentäminen sekä kansallisten käytäntöjen rakenteen ja teknisen sisällön harmonisointi. Jos verrataan tulevia vaatimuksia voimasaoleviin vaatimukseen (VJV2007), niin eroista voi mainita muutaman asian. Vaatimukset tulevat kohdistumaan kaikkeen tuotantoon alkaen 400 watista. Vastuu prosessista on liittymispisteen verkonhaltijalla. Tuuli- ja aurinkovoimaan liittyvät vaatimukset vastaavat pitkälti teknologian nykytasoa. Taajuussäätöihin tulee liittymään uusia toiminnallisuuksia. Vaatimusten täyttämistä muodostuu neliportainen muodollinen prosessi ja poikkeamat vaatimuksista ovat julkisia. Eurooppalaiset verkkosäännöt tulevat olemaan aikanaan sitovaa lainsäädäntöä. Ne koskevat sekä valmistajia ja tuottajia että verkkoyhtiöitä. Julkaisu sijoittuu vuodelle 2014 tai 2015. (Fingrid 2011b: 16–20.)

3.2 Alue- ja keskijänniteverkko

Suomen kantaverkko koostuu 400, 220 ja tärkeimmistä 110 kilovoltin voimajohdoista sekä sähköasemista. Alueverkkoa puolestaan ovat kaikki muut 110 kilovoltin johdot,

jotka ovat pääasiassa muiden kuin Fingridin omistuksessa. Uusi YLE2013-asiakirja edellyttää Fingridin verkkoon liittyneen asiakkaan huolehtimaan, että myös sen verkkoon (alue- tai keskijänniteverkkoon) liittyneet sähkölaitteistot täyttävät Fingridin liittymisehdot.

Pienitehoiset sähkölaitteistot tulisi ensisijaisesti liittää joko alue- tai keskijänniteverkkoon kuten aiemmin on jo mainittu. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset on asiakirja, jota täytyy aina noudattaa voimalaitosta liitettäessä. Voimalaitoksien liittymisessä tärkeitä huomioitavia asioita ovat miten voimalaitos ja johto saadaan kytkettyä tarvittaessa eroon toisistaan, liittymisjohdon pituus, mahdolliset suojausasiat sekä tahdissaolovalvonta. Alue- tai keskijänniteverkkoon liityttäessä asiasta täytyy sopia asianomaisen verkon omistajan kanssa. Usein tällainen omistaja on Suomessa jokin sähkön- tuotanto- tai sähköverkkoyhtiö. Liittyminen edellyttää voimassa olevaa liittymissopimusta.

3.3 Relesuojauksen pääperiaatteet liityttäessä Fingridin verkkoon

Fingridin sähköverkon 110 ja 220 kV:n voimajohtojen suojaus koostuu yhdestä pääsuojasta (distanssirele) ja varasuojista (ylivirta- ja maasulkurele). Pääsuojauksen avulla erotetaan kaikki useampivaiheiset oikosulut enintään 0,5 sekunnissa. Varasuojaus toimii 0,1–1,0 s hidastuksella riippuen sähköaseman koosta ja vikapaikasta. Päämuuntajien oikosulkusuoja on differentiaalirele. Varasuojana on vakioaikaylivirtarele. Suurimmilla muuntoasemilla käytetään myös distanssirelettä. (Fingrid 2012b: 1.)

Voimansiirtoverkon toimivuuden kannalta Fingridin verkkoon liittyviltä edellytetään irtikytkentäaikoja niin, että alueverkon suojaus toimii koko Fingridin sähköverkon suojausten kannalta yhteensopivasti ja koordinoitusti. 110 kV:n sähköverkon suojausta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon Fingridin laatimat asiakasliityntöjen suojausvaatimukset. Kaikki 110 kV:n voimajohdot tulee varustaa hidastamattomalla pääsuojauksella, niin rengas-, säteis- kuin haarajohdoilla. (Fingrid 2012b: 1–2.)

Kantaverkon voimajohtodolle tarvitaan tahdissaolonvalvonta, jos johtoon liittyy tuotantoa yli yhden megavoltiampeerin verran. 5–25 MVA:n voimalaitoksen voimajohtoliitynnälle sallitaan korkeintaan 1,2-kertaa nimellisvirran suuruinen oikosulkuvirta 300 ms ajan vian alkamisesta. Jos tämä ei toteudu, on liityntä tehtävä kytkinlaitoksen kautta. Ainakin runkojohdon toisen pääteaseman johtosuojauksesta täytyy rakentaa eroonkytkennän viestiyhteyden avulla voimalaitokselle etälaukaisu. (Fingrid 2012b: 4.)

3.4 Keskeiset asiat Fingridin ohjeista

Seuraavaksi poimin mielestäni tärkeimmät vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaihetta koskevat kohdat Fingridin YLE2013, VJV2013 ja Relesuojauksen pääperiaatteet asiakirjoista.

YLE2013-asiakirjassa kohdassa 2.5 sanotaan, että uusi voimalaitos liitetään kantaverkkoon kytkinlaitoksessa katkaisijakentän välityksellä luukuun ottamatta pieniä, alle viiden megavoltiampeerin laitoksia ja enintään 25 MVA:n laitoksia, joiden kantaverkkoon syöttämä oikosulkuvirta on enintään 1,2-kertaa laitoksen nimellisvirta. Asiakirjan samaisessa kohdassa sanotaan myös, että voimajohtoon liitettävä uusi voimalaitos täytyy varustaa eroonkytkentäreleistyksellä. (Fingrid 2012a: 4.)

Yleisissä liittymisehdoissa mainitaan edelleen, että voimajohtoliitynnällä kytkettävä yli viiden megavoltiampeerin uusi voimalaitos on varustettava tietoliikenneyhteydellä kantaverkon voimajohtoon pikajälleenkytkennän mahdollistamiseksi. Lisäksi kohdassa 4.6 ohjeistetaan, että voimalaitoksen päämuuntajan suojaamiseksi ylijännitteiltä, maadoittamaton muuntajan tähtipiste suositellaan varustettavan ylijännitesuojalla. (Fingrid 2012a: 4, 8.)

VJV2013-asiakirjan kohdassa 4 kehoitetaan uutta voimalaitosta suunnittelevan tahon pyytämään Fingridiltä erityistarkastelutarpeen arviointia voimalaitoksen esisuunnittelu-

vaiheessa, mikäli voimalaitos kuuluu johonkin teholuokista 2, 3 tai 4. Edelleen kohdassa 5.1.1 määrätään liittymispisteen verkonhaltija määrittämään VJV-referenssipiste VJV2013-asiakirjassa esitettyjen ohjeiden mukaisesti. (Fingrid 2013a: 11–12.)

Voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten kohdassa 9.2.2 sanotaan, että jos tuleva voimalaitos on varustettavissa pimeäkäynnistysominaisuudella, on siitä ilmoitettava Fingridille voimalaitoksen esisuunnitteluvaiheessa. Ja edelleen kohdassa 10.2.2 otetaan kantaa 2000-luvulla yleistyneisiin taajuusmuuttajakäyttöisiin voimalaitoksiin, suuntaajakytkettyjen voimalaitosten syöttämä virta ja sen riippuvuus VJV-referenssipisteen jännitteen tasosta jännitehäiriöiden aikana tulee erikseen sopia Fingridin kanssa. Asianomaisen voimalaitoksen kuvaus toiminnallisuudesta on toimitettava osana voimalaitostietoja. (Fingrid 2013a: 27, 30.) Relesuojauksen pääperiaatteiden kohdassa 2.1 mainitaan, että kaikki voimajohdot, myös haarajohdot, tulee varustaa hidastamattomalla pääsuojalla (Fingrid 2012b: 2).

4 VESIVOIMALAITOKSEN ESISUUNNITTELU JA MITOITTAMINEN

4.1 Esisuunnittelu

Uuden vesivoimalaitoksen sähkötekkinen esisuunnittelu koostuu monista asioista. Suunnittelun kriteerinä on toimiva tekninen kokonaisuus järkevillä kustannuksilla. Yhden tai useamman pääkaavion laatiminen on tärkeää, jotta voimalaitoksen sähköjärjestelmä saadaan hahmotettua. Pääkaavioiden laadinta sisältää niiden käytännön piirtämisen lisäksi vikavirtalaskelmia ja muun muassa kaapelien, muuntajien ja muiden komponenttien sähköisten arvojen mitoittamista ja määrittelyä sekä toiminnallisuuksien miettimistä. Pääkaavioversioita voisi helposti kehittää kymmenenkin erilaista, mutta koska ei ole järkevää eikä mahdollistakaan piirtää kaikkia mahdollisia vaihtoehtoja paperille, täytyy usein valita 2–3 todennäköisimmin toteutuvaa teknistä vaihtoehtoa.

Esisuunnitteluvaiheessa täytyy myös huomioida, miten uusi voimalaitos tullaan liittämään sähköverkkoon. Liittyminen kantaverkkoon, kuin myös muiden tahojen omistamiin verkkoihin, edellyttää uusien Fingridin liittymisehtojen noudattamista. Laitoksen teho ratkaisee, liitytäänkö keski- vai suurjänniteverkkoon. Liittyminen toteutetaan liittymisehtojen mukaisesti oletusarvoisesti lähimpään kytkinlaitokseen katkaisijakentän välityksellä.

Taajuusmuuttajan käyttö on tullut mahdolliseksi myös keskisuurissa vesivoimalaitoksissa. Taajuusmuuttaja tuo selkeitä etuja vanhaan ja perinteiseen tekniikkaa nähden. Toisaalta sen käyttö edellyttää hyvää suunnittelua ja perehtymistä ongelmien välttämiseksi. On myös muistettava, että taajuusmuuttajakäyttöisen vesivoimalaitoksen käyttäytymisen sähköverkon eri tilanteissa on erilaista kuin perinteisen tekniikan voimalaitoksen. Tämä asia tulee ajankohtaiseksi suunniteltaessa liityntää Fingridin kantaverkkoon joko suoraan tai välillisesti.

4.1.1 Jännitetasot

Kolmivaiheisissa vaihtosähköjärjestelmissä käytetään standardin IEC 60038 mukaisia käyttöjännitteitä. Pienjännitetasot ovat pääjännitteinä ilmaistuna 400, 690 tai 1000 V, keskijännitetasoja ovat 3, 6, 10, 20 tai 35 kV ja suurjännitetasoja 66, 110, 132 tai 220 kV. (IEC 60038: 11, 15, 17.)

Edellä esitetyistä arvoista luonnollisesti 400 voltia on pienjännitteenä yleisin. 690 voltia on käytössä lähinnä teollisuudessa ja 1000 voltia jossain haja-asutusalueen tai saariston sähkönjakeluverkossa. Keskijännitteistä 20 kilovoltia on Suomessa yleisin, myös 10 kilovoltia on käytössä muutamien vanhojen kaupunkien keskustoissa. Suurjännitteistä Suomessa on käytössä 110, 220 ja 400 kilovoltia.

Vesivoimalaitosten perinteisten ratkaisuiden generaattorijännite vaihtelee generaattorin tehon ja toteutettavan ratkaisun mukaan. Pienissä voimalaitoksissa jännite on useimmiten 400 V, keskikokoisissa laitoksissa valittavissa on 6,3, 10,5 tai 12 kV. Nämä jännitetasot eivät noudata edellä esitetyn standardin mukaisia arvoja, vaan ne ovat periytyneet ja pysyneet samana vuosikymmenien takaisista päätöksistä johtuen. Kustannussyistä, pienitehoista generaattoria ei kannata rakentaa korkealle jännitteelle ja päinvastoin, suuritehoista ei ole järkevää rakentaa kovin pienelle jännitteelle. Generaattorin tehon ollessa luokassa 10–40 MVA, järkevin jännitetaso on 10,5 kV. Tällä jännitteellä mainitun teholuokan generaattori on kustannustehokkain valmistaa.

4.1.2 Pääkaavio

Uuden vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaiheessa laitoksen pääkaavio tai pääkaaviot ovat tärkeässä asemassa. Pääkaavio ilmaisee voimalaitoksen sähköjärjestelmän tärkeimmät tekniset asiat. Tavoitteena on saada teknis-taloudellisesti optimoitu kokonaisuus.

Pääkaaviosta täytyy selvittää, miten voimalaitos liittyy sähköverkkoon, kuinka monta koneistoa (turbiinia) voimalaitoksessa on ja miten varayhteys paikalliseen keski- tai pienjänniteverkkoon on järjestetty. Kaaviosta näkyy myös päämuuntajien lukumäärä ja teho sekä kaikki pienemmät muuntajat, kuten omakäyttö- ja tehovälimuuntajat sähköisine arvoineen. Keski-jännitekojeistoja sisältyy vesivoimalaitoksen pääkaavioon 1–2 kpl ja pienjännitekojeistoja 2 kpl, laitoksen omakäyttöä ja padon sähköistystä varten. Pääkaaviossa näkyy luonnollisesti myös generaattorit ja kaapeloinnit sekä mahdollinen taajuusmuuttaja, jos laitos on moderni taajuusmuuttajakäyttöinen voimalaitos. Myöskään mittamuuntajia ja erilaisia pieniä merkintöjä ei pidä unohtaa. Ne ilmaisevat muun muassa tehon mittausta ja laitoksen eri komponenttien suojausta.

4.1.3 Voimajohdot

Johtojen suunnittelu on varsin monimutkainen ja vaativa tehtävä. Suunnitteluun sisältyy johtoreitin valinta, maastotutkimukset lupamenettelyineen, pylväiden sijoitussuunnittelu sekä yksityiskohtaiset pylväs-, perustus- ja johdinlaskut. Pylväiden paikat, pituudet ja vahvuudet valitaan maastotutkimustulosten perusteella mahdollisimman taloudellisesti mutta tietysti siten, että pylväiden ja johtimien mekaanisia kestoarvoja ei ylitetä ja johdoille asetetut minimietäisyysvaatimukset täyttyvät. (Elovaara & Haarla 2011: 250.)

Suomessa noudatettiin aiemmin viimeksi vuonna 1993 päivitettyjä Vahvavirtailmajohdotmääräyksiä kaikkiin sähkönsiirtoon ja -jakeluun tarkoitetuissa johdoissa. 1990-luvulla eurooppalainen standardoimiselin CENELEC päätti laatia yleiseurooppalaisen sähköturvallisuusstandardin sähköasemia ja -johtoja sekä erilaisia sähköasennuksia varten. Tämän kehitystyön tuloksena julkaistiin vuonna 2001 yli 45 kV:n ilmajohtoja koskeva normi EN 50341. Suomen standardisoimisliitto SFS julkaisi vuonna 2002 suomeksi standardin SFS-EN 50341, jotta EN-standardit olisivat paremmin sovellettavissa käytäntöön. Uusi standardi on vanhaan verrattuna laajempi ja kattavampi. Erityisesti johtoihin kohdistuvia tuulikuormia on suurennettu. Uudet ilmajohdot on suunniteltava ja rakennettava standardien SFS-EN 50341 ja SFS-EN 50341-3-7 mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011: 251–252.)

Suunnitteluvaihe

Uusi vesivoimalaitos liittyy liittymisjohdolla sähköverkkoon. Liittyminen tapahtuu yleensä 110 kV:n jännitetasolle, joko alueverkkoon tai Fingridin omistamaan kanta-
verkkoon. Liittymisjohdon suunnittelu alkaa esisuunnitteluvaiheesta, jonka jälkeen tulee
itse suunnitteluvaihe. Esisuunnittelun lähtökohta on, että tarve uudelle johdolle on ole-
massa. Seuraavassa on käsitelty lyhyesti asioita uuden voimajohdon suunnitteluvaiheis-
ta.

Esisuunnitteluvaiheessa tarkentuu johdon käyttämä reitti maastossa ja on myös tarpeen
tehdä selvityksiä asioista liittyen maanomistuksiin ja viranomaisiin. Voimajohdon reit-
tivaihtoehto sovitellaan ympäristöön sopivaksi. Riippuen, onko kyseessä kaupunkialue
vai maaseutuympäristö, reittisuunnittelu sekä voimalinjan toteutustapa joko avojohtona
tai kaapelina on ratkaistava ottaen huomioon muun muassa esteettiset näkökohdat, joh-
toalueen hinta sekä rakennuskustannukset. Yleisesti ottaen avojohto harustetuilla puu-
pylväillä on edullisempi kuin kaapelointi. Näiden kahden hintaero korostuu rakennetta-
van voimajohdon pituuden kasvaessa. (Ojakaski & Puranen 2011: 10.)

Pylväsrakenteiden suunnittelu lähtee liikkeelle ottamalla selvää kuinka suuria tehoja
uuden liittymisjohdon tulee siirtää. Tämän tiedon perusteella pystytään päättämään
käytettävän johdon poikkipinta-ala ja täten myös massa, jonka pylväsrakenteet joutuvat
kannattelemaan. Tämän jälkeen ratkaisevinta on käytettävissä olevan johtokadun leveys.
Harustetut pylväsrakenteet vaativat enemmän tilaa kuin harustamattomat ratkaisut ja
ovat myös halvempia, koska harustamaton pylväs on yleensä teräsristikkorakenteinen ja
täten kalliimpi. Kaikki pylväsrakenteiden mitoitukset suoritetaan tänä päivänä Cenelec-
standardien mukaisesti. (Ojakaski & Puranen 2011: 12–13.)

Luonto- ja ympäristöselvitys on tarpeen tehdä, jotta saadaan tietoon luonnon- ja maise-
mansuojelun kannalta merkitykselliset tiedot sekä uhanalaisten lajien esiintymätiedot.
Varsinaisessa suunnitteluvaiheessa toimet painottuvat pylväiden paikkoihin liittyviin

asioihin sekä käytettävän maa-alan hankintatapaan. Pylväiden sijoituksista tehdään suunnitelma, joka toimitetaan maastotyöryhmälle. He tutkivat tarkemmin pylväiden paikat maastossa ja tilannetta korjataan tarvittaessa. Ennen rakentamisen aloittamista on hankittava oikeudet johtoalueeseen. On olemassa useita käytännöllisiä vaihtoehtoja johtoalueen hankkimiseen, mutta lunastusmenettely on nykyään yleisin. Muita tapoja ovat muun muassa omistusoikeus ja vuokraus. (Ojakaski & Puranen 2011: 14, 18, 20–21.)

Lupamenettely

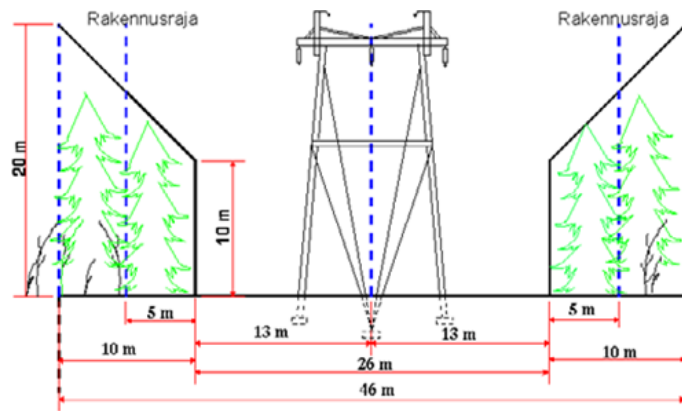
Rakennus- ja tutkimuslupiin liittyvistä neuvotteluista on hyvä ensin informoida Fingridiä. Sen on hyvä olla ajan tasalla tulevista projekteista, jotta vältetään mahdollisilta päällekkäisyyksiltä. Sen jälkeen ollaan yhteydessä Suomen sähkömarkkinaviranomaiseen eli Energiamarkkinavirastoon (EMV). Se myöntää rakennuslupia uusille voimajohdohankkeille. EMV:n tehtävänä on katsoa, että päällekkäisiä linjasuunnitelmia ei esiinny ja että voimalinjoja ei rakenneta tarpeettomasti. Kun esisuunnittelussa on saatu johdon sijainti selville, hankitaan Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselta (ELY) lupa johdtoa varten tarvittavan tutkimuksen suorittamiseen lunastettavilla maa- ja kiinteistöalueilla. Lupa tarvitaan, jotta voidaan karsia ja kaataa puita näkyvyyden saamiseksi suunnitelmulta pylväspaikalta toiselle. (Ojakaski & Puranen 2011: 17.)

Vuonna 1995 voimaan tulleen sähkömarkkinalain perusteella nimellisjännitteeltään vähintään 110 kilovoltin voimalinjan rakentamiseen on pyydettävä Energiamarkkinaviraston lupa. Lupahakemukseen on liitettävä selvitykset hankkeen ympäristövaikutuksista ja soveltuvuudesta alueen maankäyttöön. Haettava rakennuslupa on tarveperusteinen. Luvan myöntämisen edellytyksenä on, että voimalinjan rakentaminen on sähkönsiirron turvaamiseksi tarpeellista. Voimalaitoksen liittymisjohdolle tätä perustetta ei kuitenkaan tarvita. Ympäristöselvitystyön tavoitteena on selvittää, onko mitään erityisiä huomioita, jotka pitää ottaa huomioon hankkeen toteutuksessa. EMV ei ota rakennuslupapäätöksessään kantaa johtoreittiin, mutta laaditut ympäristöselvitykset huomioidaan. Lupa on voimassa 5 vuotta, jonka aikana hankkeen tulee valmistua. Hankkeen ympäristövaikutukset selvitetään joko YVA-menettelyn avulla tai pienemmällä ympäristöselvityksellä.

Hankkeen alkuvaiheessa on tarpeen olla yhteydessä muihinkin tahoihin, kuten ainakin ympäristökeskukseen, asian omaiseen kuntaan ja maakuntaliittoon. (Energiamarkkina-
virasto 2006: 1–5.)

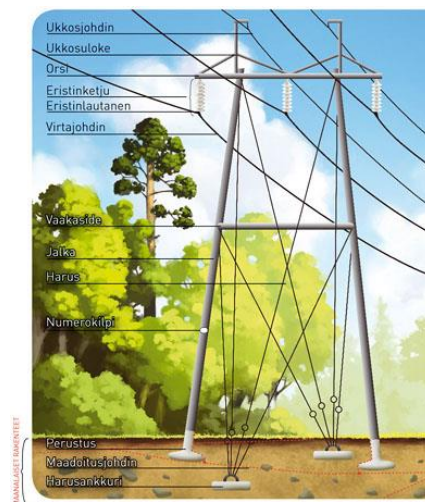
110 kilovoltin voimajohto

110 kilovoltin ilmajohto tarvitsee riittävät etäisyydet puustoon kuvan 16 mukaisilla mi-
toilla.



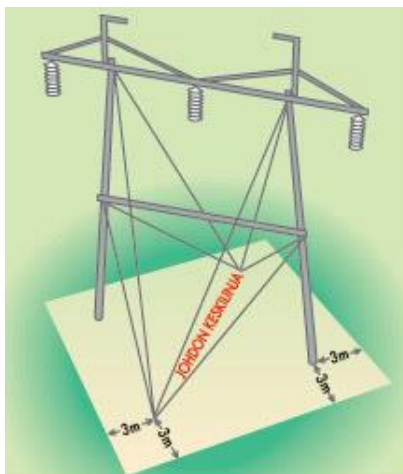
Kuva 16. Harustetun puisen portaaliypylvään johtoalue (Korpinen 2008: 5).

110 kV:n johdon pylväs koostuu kuvan 17 mukaisista osista.

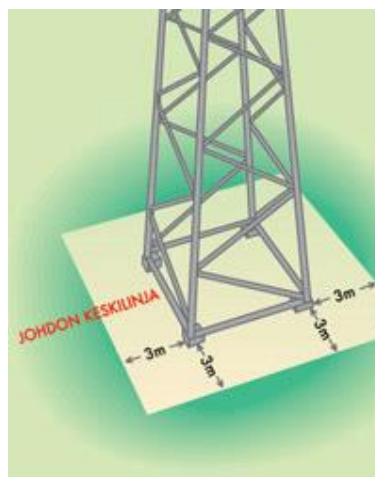


Kuva 17. Portaaliypylvään pääosat (Fingrid 2011a).

Voimajohdon pylvään pylväsala ulottuu 3 metrin etäisyydelle maanpäällisistä pylväsra-
kenteista. Pylväsraenteet nähdään kuvista 18 ja 19.



Kuva 18. Harustettu kaksijalkainen pylväs (Fingrid 2011a).



Kuva 19. Harustamaton yksijalkainen vapaasti seisova pylväs (Fingrid 2011a).

Johtimet

Suurjänniteverkoissa käytetään yleisesti teräsvahvisteisia alumiinijohtimia (feral). Johtimen keskiosassa sijaitsevan teräsvahviteen tehtävänä on parantaa johdon mekaanista lujuutta. Kovaa terästä käytetään lähinnä ukkosköysinä. Johdintyytit on standardoitu (SFS 2430, SFS 3819 ja SFS 4080). Teräsalumiinijohtimille on annettu johdon poikkipinnan määrittelevät nimet. Yleisesti käytettyjä 110 kV:n johtimia ovat Suursavo, Ostrich, Duck ja Condor. (Elovaara & Haarla 2011: 278.)

Johtimien valinnassa on huomioitava kuormitus- ja oikosulkuvirrat. Johtimet eivät saa näiden vaikutuksesta lämmentä liikaa. Myös johtimien mekaanisen lujuuden tulee olla riittävä. Oman painonsa lisäksi johtimien pitää kestää tuulen ja jääkuorman rasitus sekä oikosulkuvirtojen aiheuttamat mekaaniset voimat. (Paavola 1975: 36.) Taloudellisten näkökohtien lisäksi on suurilla käyttöjännitteillä tarkistettava, että johtimen halkaisija on koronan estämiseksi riittävän suuri. Sähkökentänvoimakkuutta johtimen pinnalla voidaan alentaa esimerkiksi käyttämällä nippujohtimia, jolloin koronan todennäköisyys on pienempi. Nippujohtimilla myös johdon jäähdyttävä pinta-ala kasvaa suuremmaksi kuin vastaavan poikkipinnan omaavalla yksittäisjohtimella. (Elovaara & Haarla 2011: 282.)

Sähköjohdon taloudellisuutta kuvastavat sen vuotuiset kustannukset. Hankintahinnaltaan halvin vaihtoehto ei välttämättä ole taloudellisesti paras. Paksujohtiminen kallis johto, jonka kiinteät vuotuiset kustannukset ovat suuret, saattaa pienempien häviökustannustensa vuoksi olla edullisempi kuin halvempi ohutjohtiminen johto. Poikkipintaa, jolla johdon vuotuiset kustannukset ovat minimissä, sanotaan johdon taloudellisimmaksi poikkipinnaksi. (Paavola 1975: 210.)

Voimalaitoksen liittymisjohtoon kannattaa käytännössä valita johtimeksi joko poikkipinnaltaan 106/25 mm² Suursavo, 152/25 mm² Ostrich tai 305/39 mm² Duck. Suursavon kuormitettavuus on 350 A, Ostrichin 430 A ja Duckin 640 A, kun rajoina ovat johtimen lämpötila +70 °C, ympäristön lämpötila +30 °C ja tuuli 0,6 m/s. Resistanssit ovat Suur-

savolla 0,27, Ostrichilla 0,19 ja Duckilla 0,09 Ω/km (Elovaara & Haarla 2011: 282). Suursavo -johtimen oikosulkuvirtakestoisuus on 8,0 kA. Ostrich -johtimella vastaava arvo on 11,1 kA ja Duckilla vielä isompi. (Paavola 1975: 307.) Terminen siirtokyky on Suursavolla (arviolta noin) 65 MVA ja Ostrich -johtimella 80 MVA, joten keskisuuren voimalaitoksen tehoon nähden ne ovat riittäviä (Elovaara & Haarla 2011: 269).

Ukkosjohtimien tarkoituksena on estää suoraan vaihejohtimiin osuvat suorat salamaniiskut. Tämän lisäksi ne ottavat maasulkutilanteessa osan maasulkuvirrasta, jolloin maan kautta palaava virta ja sen vaara- ja häiriöjännitteet pienenevät. Huonoissa maadoitusolosuhteissa ukkosjohtimet pienentävät lisäksi resultoivaa maadoitusvastusta kytkemällä eri pylväiden maadoitukset rinnakkain. Ukkosjohtimet myös parantavat maasulkusuojauksessa käytettävän suojareleistyksen toimintaa siten, että herkempi suojaus on mahdollinen. (Elovaara & Haarla 2011: 32.)

Maadoitukset 110 kilovoltin johdoille

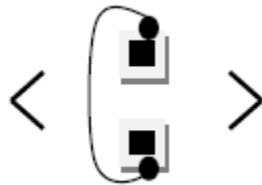
Pylväsmaadoitus koostuu pylvään perusmaadoituksesta ja mahdollisista lisämaadoituksista. Perusmaadoituksen muodostavat pylvään perustukset, niiden alle asennetut niin sanotut J-lenkit, harukset ankkureineen sekä pylvään jalat yhdistävä kupariköysi. Pylväsmaadoitusten tehtävänä on

- vähentää ukkoshäiriöitä pienentämällä pylvään potentiaalia siten, että pylväänseen tai ukkosjohtimeen osunut salama ei aiheuta takaiskua
- mahdollistaa ukkosjohtimettomalla johdolla maasulkusuojauksen toiminta ja parantaa sen toimintaherkkyyttä ukkosjohtimellisellakin johdolla
- pienentää pylvään maadoitus- ja kosketusjännitettä. (Elovaara & Haarla 2011: 435–436.)

Ukkosjohtimet menettävät paljon suojaustehostaan ilman asianmukaisia pylväsmaadoituksia. Saatujen kokemusten perusteella voidaan sanoa, että ukkosköysillä varustetun mutta ilman pylväsmaadoituksia olevan johdon ukkoshäiriömäärä on noin kaksinkertainen.

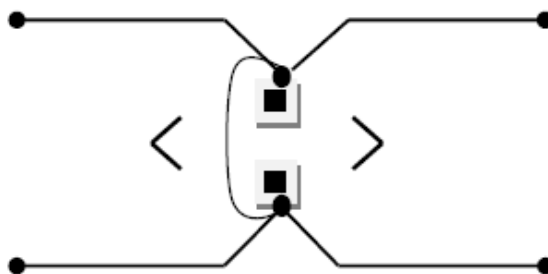
nen ukkosjohtimilla ja pylväsmadoituksilla varustettuun johtoon verrattuna. (Elovaara & Haarla 2011: 436.)

Pylväsympäristön maadoitusolosuhteista riippumatta on jokaiselle suurjännitelinjan pylvälle tehtävä vähintään perusmaadoitus. Yleisesti perusmaadoitus riittää pylvään ainoaksi maadoitukseksi, jos pylväsympäristössä esiintyvän maan ominaisresistanssin on mitattu olevan alle $100 \Omega\text{m}$. Perusmaadoituksessa yhdistetään perustusten asennusvaiheessa pilareiden alle viedyt J-lenkit vähintään 16 mm^2 kupariköydellä toisiinsa kuvan 20 mukaisesti. (Lapinkorpi 2011: 28.)



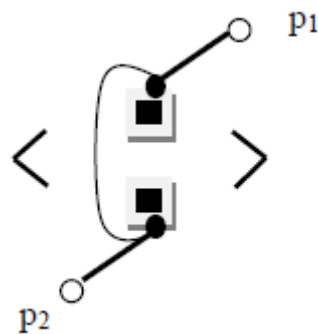
Kuva 20. Perusmaadoitus (Lapinkorpi 2011: 28).

Säteismaadoitusta käytetään lisämaadoituksena, jos perusmaadoituksella ei päästä haluttuun maadoitusresistanssin arvoon. Maan ominaisresistanssi on tässä tapauksessa luokassa $100\text{--}4000 \Omega\text{m}$. Säteiden pituus vaihtelee välillä $15\text{--}50$ metriä. Säteet kaivetaan maahan johtoauekan reunoille kuvan 21 mukaisesti. (Lapinkorpi 2011: 29.)



Kuva 21. Pylvään säteismaadoituksen toteutustapa (Lapinkorpi 2011: 30).

Pystymaadoitus on joskus ainoa vaihtoehto taajamissa tai peltoaukeilla, koska säteittäismaadoitusta on vaikea sovittaa erilaisten esteiden tai maadoituselektrodin suuren vaurioitumisriskin vuoksi. Pystymaadoitusta tulisi käyttää myös silloin, jos pylväsymäristössä pintamaa on huonosti johtavaa ja paremmin johtavaa maata on sen alapuolella. Pystymaadoitus sijoitetaan perustusten läheisyyteen ja sen mitoituksessa ei oteta huomioon perusmaadoitusta lainkaan. (Lapinkorpi 2011: 28–29.) Pystymaadoitus on näkyvissä kuvassa 22.



Kuva 22. Pylvään pystymaadoituksen toteutustapa (Lapinkorpi 2011: 29).

Näiden esiteltyjen maadoitustapojen lisäksi on olemassa myös läpimenevä- sekä ylipitkämaadoitus. Tässä työssä käsiteltävän uuden vesivoimalaitoksen liittymisjohdon maadoitukset kuuluvat linjan rakentavan tahon suunniteltaviksi. Paikallisia maadoitusolosuhteita en tunne, mutta todennäköistä on, että perusmaadoitusten lisäksi tarvitaan säteismaadoituksia, jotta maadoitusresistanssit saadaan vaaditulle tasolle.

Ukkosjohtimeton 110 kilovoltin voimajohto

Ukkosjohtimien tarkoituksena on estää salamaniskujen osuminen vaihejohtimiin. Niiden tehtävänä on myös kuljettaa osaa maasulkuvirrasta, jolloin maan kautta palaava virta ja sen aiheuttamat vaarajännitteet sekä induktiovaikutus pienenevät. Ukkosjohtimet myös kytkvät vikapylvään tai aseman rinnan toisten pylväiden tai läheisen aseman

kanssa, jolloin maasulkuvirran kohtaama impedanssi ja maadoitusjännite pienenevät. (Fingrid 2011d.)

Ukkosjohtimiin voi kertyä talvisin huurretta ja tykkylunta. Puhutaan usein myös jääkuormista. Nämä kaikki aiheuttavat usein toistuvia vikoja, joita voi olla vaikea paikallistaa. Osa vioista on myös pysyviä. Lumi- ja jääkuormien pudottaminen voi olla vaarallista. Voimalinjan rakenteisiin voi tulla vaurioita ennen mainituista tekijöistä tai niiden pudottamisesta. Pohjois-Suomessa pahimpia alueita jää- ja lumikuormien kannalta ovat Kainuun vaaramaisemat, Koillismaa sekä akselit Valajaskoski-Vajukoski, Meltaus-Kolari ja Vajukoski-Sirkka. (Fingrid 2011d.)

Aalto-yliopiston ja Energiateollisuus ry:n yhteistutkimuksessa selvitettiin, täyttääkö ukkosjohtimeton läpimenevällä maajohtimella varustettu voimajohtorakenne standardien mukaiset vaatimukset vaarajännitteiden osalta sekä tutkittiin mittaustulosten vastaavuutta teorian kanssa. (Fingrid 2011c.)

Janne Seppänen Aalto-yliopistosta on diplomityössään (2011) tutkinut tätä aihetta varsin perusteellisesti. Lähtökohta oli, kun Tornionlaakson Sähkö Oy rakennutti vuonna 2009 Kolarin ja Pellon välille Länsi-Lappiin noin 70 kilometriä pitkän ukkosjohtimettoman 110 kilovoltin johdon. Johto päätettiin rakentaa ilman ukkosjohtimia, koska niihin kertyvät jääkuormat aiheuttavat alueella talvisin pysyviä, toistuvia ja vaikeasti paikannettavia vikoja. Lisäksi alueen ukkostiheys on pienehkö. (Fingrid 2011c.)

Johtopäätöksenä voitiin todeta kyseisen rakenteen soveltuvan käytettäväksi ja turvallisiksi sähköverkoissa, joissa maasulkuvirta on pieni kuten sammutuskuristimella varustetuissa 110 kilovoltin verkoissa. Vaatimuksia ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun voimajohdon käytölle ovat (Seppänen 2011: 76):

- Johdon maasulkuvirran tulee olla pieni, käytännössä pienempi kuin 1 kA.
- Johdon tulee sijaita harvaan asutulla alueella.
- Alueen salamatiheyden tulee olla pieni.

- Johdon sijaintipaikassa esiintyy lumi- tai jääkuormia.
- Maaperä johdon sijaintipaikassa on sellaista, että maajohdin voidaan upottaa maahan.
- Johtoreitillä ei ole paljon risteäviä kaapeleita.

Lisäksi on suositeltavaa, että maajohtimien kuntoa tulee pystyä valvomaan jollain tavalla. Esimerkiksi voidaan laittaa valokaapeli samaan kaivantoon maajohtimen kanssa tai toinen vaihtoehto on upottaa kaksi maajohdinta maahan riittävälle etäisyydelle toisiinsa, jolloin toisen johtimen katkeaminen ei merkittävästi lisää vaarajännitteiden riskiä. Sähköasemien läheisyydessä suositellaan käytettävän ukkosjohtimia. (Fingrid 2011d.)

Loppuun todettakoon, että tällainen ukkosjohtimeton vaihtoehto on mahdollista Itä-Suomessa, Kainuussa ja parhaiten Lapissa. Etelä-Suomessa maasulkuvirrat ovat liian suuria ja ukkostiheyskin on paljon suurempi kuin Lapissa. Ukkosjohtimettoman johdon saa rakentaa vain Fingridin luvalla.

4.1.4 Muuntajat ja keskijännitekojeistot

Päämuuntaja

Tehomuuntajien yleisin kytkentätunnus on YNd11. Tähtikytkentä Y soveltuu erityisesti suurille jännitteille ja kohtuullisille virroille, koska käämijännite on vain $\sqrt{3}$:s osa pääjännitteestä. Tästä johtuen käämin eristäminen on helpompaa kuin kolmiokytkennässä. Tähtikytkennässä myös tähti- eli nolllapiste on käytettävissä. (Aura & Tonteri 1996: 59.)

Päämuuntaja valitaan tarvittavan tehon perusteella. Esimerkiksi 50 MVA on yleinen. Seuraava tehotaso on 63 MVA, mutta tehon kasvaessa myös tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt kasvavat, joten ylitehoista muuntajaa ei kannata sen vuoksi käyttää. Edellä mainittujen muuntajien tyhjäkäyntihäviöissä on eroa 5 kW ja kuormitushäviöissä peräti 45 kW (ABB 1990: 269).

Jos etäisyyttä asutuksen ja tehomuuntajan välillä on vähemmän kuin 100 metriä, on syytä ottaa huomioon muuntajan toimiessaan aiheuttama melu. Melua voidaan vaimentaa hyvällä suunnittelulla ja laadukkailla materiaaleilla, mikä luonnollisesti nostaa muuntajan valmistuskustannuksia. Suurmuuntajien valmistajista ainakin ABB valmistaa tilauksesta keskimääräistä hiljaisempia tehomuuntajia. Päämuuntaja voidaan tilata joko yksivaiheyksikköinä tai yhtenä kappaleena, jossa kaikki on yksien ja samojen kuorien sisässä. Käämikytin on yleinen tehomuuntajissa. Myös voimalaitoksen päämuuntajaan sellainen voidaan tilata, mutta sen hyöty on voimalaitoskäytössä kyseenalainen. Generaattorien jännitteensäätö hoituu automatiikan ohjaamana. Muuntajaan voi harkita tilattavan käsikäyttöisen kytkimen eli väliottokytkimen, jolla voidaan suorittaa muuntosuhteen hienosäätöä muuntajan ollessa jännitteetön.

Jäähdytystavaksi on valittavissa joko ONAN tai ONAF. ONAN tarkoittaa, että jäähdytys on pelkästään luonnollinen. ONAF-malleissa on öljylämpömittarin ohjaamat tuuletin, joiden avulla muuntajalla saavutetaan nimelliskuormitettavuus. Pelkällä ONAN-jäähdytyksellä päästään vain noin 60–70 prosentin kuormitettavuuteen. (ABB 1990: 269.) Päämuuntajan suojauksessa on periaatteena, että mitä isompi ja kalliimpi muuntaja, sitä paremmin se kannattaa suojata. Yleisimmät suojaustoiminnot isoilla muuntajilla ovat käämisulku, öljynlämpörele, kaasurele sekä differentiaali- ja ylijännitesuojaus.

Pienet muuntajat

Jakelumuuntajille tai voimalaitoksissa omakäyttömuuntajille on olemassa perinteisen öljyeristyksen lisäksi toinen vartenotettava vaihtoehto. Kuivamuuntajissa eristeenä ja jäähdytteenä toimii öljyn sijasta ilma. Suomessa ainakin Finn Electric Oy mainostaa kuivamuuntajia seuraavin hyödyin: Ne ovat itsestään sammuvia ja tulipaloa vastustavia sekä niillä on alhaiset huoltokustannukset, pienet ulkomitat ja hyvä dynaaminen oikosulkukestoisuus. Asia, johon kannattaa kiinnittää öljymuuntajaa enemmän huomiota, on jäähdytys. Hartsimuuntajissa kun ei jäähdytä öljy vaan ympärillä oleva ilma. Ilman kierto pitää järjestää siten, että muuntaja ei pääse ylikuumentamaan. Ilman virtaus tulee

olla luonnollinen eli tuloilma alhaalta ja lämmin poistoilma johdetaan muuntajan yläpuolelta ulos. (Finn Electric 2012: 4, 12.)

Keskijännitekojeistot

Keskijännitekojeistojen katkaisijakenttiin voidaan valita katkaisijan tyyppi joko kiinteä tai ulosvedettävä (vaunukatkaisija). Ulosvedettävä on kovassa voimalaitoskäytössä parempi ratkaisu kuin kiinteä katkaisija. Rikkoutumisen sattuessa se on helppo vaihtaa ja ulosvedettävä malli toimii samalla erottimena. Erillistä erotinta ei tarvita. Katkaisijoi- ta on olemassa sekä SF₆- että tyhjiömallia. Kumpikin ajaa tehtävänsä, mutta nykyisin tyhjiömallit ovat suositumpia. Kojeistojen käyttöikä riippuu olosuhteista ja muistakin tekijöistä, mutta 30 vuotta on yleinen, jopa 40 vuotta. Jos tai kun laitokseen tulee joskus peruskorjaus ja samalla tehonnosto, niin koneistojen teho kasvaa jonkin verran. Puhutaan tehon lisäyksestä luokassa 10–30 prosenttia. Toisaalta peruskorjausremontin ajan- kohtana myös kojeistot alkavat olla modernisoinnin tarpeessa.

Kojeistojen tulee olla valokaari- ja oikosulkukoestettu. Ne tulee suunnitella, valmistaa ja tarkastaa standardien IEC 60298, 60466 ja 60694 sekä IEC 62271-1 ja 62271-200 mukaisesti. Valokaarisuojaus on nykyisin hyvin yleinen keskijännitekojeistoissa ja kojeistojen tulisikin sisältää valokaarisuojarele ja valokaaren purkauskanavisto valokaaren paineen ja kaasujen ohjaamiseksi pois siitä tilasta, jossa kojeisto on. Vaihtoehto purkauskanavistolle on ainakin ABB:n Uniswitchin tapauksessa niin sanottu ”arc absorber system” eli kasettiratkaisu, jossa valokaaren tuotokset ohjataan kojeiston sisältä kasetti- en läpi siihen tilaan, jossa kojeisto on. Varsinainen purkauskanavisto on parempi ratkaisu, jos vaan on mahdollista saada purkauskanavan putki lähimmästä ulkoseinästä lävitse. Kasettimallia kannattaa harkita vain, jos ei ole mahdollisuutta järjestää purkaus- putkea pois kojeistotilasta. Valokaarisuojaus koostuu riittävän monesta valoanturista sekä valokaarireleestä.

Kojeistoja tilattaessa kannattaa pyytää kenttien väliset johtimet mukaan toimitukseen. Näillä johtimilla apusähköt on helppo saada kentästä toiseen esimerkiksi katkaisijoiden

ohjauspiireille ja viritysmoottoreille. Se, että onko mahdollista asentuttaa jo kojeistotehtaalla suojareleitä tai muita kojeita valmiiksi kojeiston etupaneeliin, riippuu kojeiston ominaisuuksista ja kojeistovalmistajasta. Kaikki kojeistomallit eivät ole tällä tavalla muokattavissa. On myös tapauksia, jossa kojeiston tilaaja ilmoittaa haluavansa tietylle releelle valmiuden kojeiston tiettyihin kenttiin eli silloin kojeiston etupaneeliin jätetään valmistajan toimesta aukko, johon asiakas kiinnittää itse releen. Usein myös johdotukset relettä varten laitetaan valmiiksi ja jätetään johtimien päät merkittyinä kytkentävalmiiksi. Toisinaan asiakas lähettää itse hankkimansa kojeet kojeistotehtaalte ja ne sitten sovitetaan kiinni kojeistoon jo tuotantovaiheessa. Tämä helpottaa aikanaan tapahtuvaa kojeiston käyttöönottoa.

4.1.5 Luvat ja ilmoitukset

Energiamarkkinavirasto ylläpitää rekisteriä kaikista Suomen voimalaitoksista. Vähintään yhden megavolttiampeerin suuruisten voimalaitosten haltijoiden tulee ilmoittaa EMV:lle uuden voimalaitoksen rakentamissuunnitelmasta ja käyttöönttamisesta sekä vanhan voimalaitoksen tehonkorotuspäätöksestä. Myös voimalaitoksien pitkäaikainen tai pysyvä käytöstä poistaminen kuuluu ilmoitusvelvollisuuteen. Energiamarkkinavirasto ei erikseen varmenna toimitettujen tietojen oikeellisuutta. (Energiamarkkinavirasto 2013.)

Paikallinen aluehallintovirasto on se viranomainen, joka myöntää luvat uusien voimalaitoshankkeiden toteuttamiseen. Luvan myöntämisperusteena voidaan käyttää intressiverailua tai jotain muuta menetelmää. Luvista ehkä tärkein on vesitalouslupa, jonka lisäksi tarvitaan lupa rakennustöiden aloittamiselle sekä tarvittaessa erilaisia poikkeuslupia. Lupamenettelyprosessi kestää yleensä vuosia ennen kuin kaikki on täysin selvää ja laitoksen rakennustyöt voidaan aloittaa.

4.2 Mitoittaminen

Vesivoimalaitoksen sähkötekniinen mitoittaminen lähtee liikkeelle lähtöarvoista. Lähtöarvoista tärkeimmät ovat tulevan voimalaitoksen teho megawatteina sekä koneistojen lukumäärä. Teho määrää päämuuntajien suuruuden ja lukumäärän. Teho vaikuttaa myös liittymisjohdon jännitetasoon ja tietysti itse johdon mitoitukseen. Turbiinien tehosta muodostuu sopiva jännitetaso generaattoreille. Generaattorijännitteistä oli asiaa jo aiemmin tässä työssä. Konejännite määrää edelleen keskijännitekojeiston käyttöjännitteen perinteisessä generaattoriratkaisussa. Jos voimalaitokseen on suunnitteilla taajuusmuuttajakäyttöiset generaattorit, silloin keskijännite kannattaa olla yleinen 20 kV jonkin alemman jännitteen sijasta. Korkeampi jännite vähentää tarvittavien kaapelien lukumäärää.

Seuraavaksi on vuorossa toisiokomponenttien mitoittaminen. Virta- ja jännitemuuntajille lasketaan tarvittava taakka ja määritetään tarkkuusluokka. Taakka määräytyy kytkeytyvän kojeen mukaan ja huomioituna johdotuksen pituus muuntajalta kojeelle. Koneaseman omakäytön sekä padon tarvitsema teho kannattaa arvioida käyttäen hyväksi olemassa olevien voimalaitosten tietoja. Kun tehot on arvioitu, tiedetään omakäyttömuuntajien koko. Vesivoimalaitos tarvitsee myös toisen, pienemmän yhteyden sähköverkkoon. Sellainen järjestetään joko paikallisesta 20 kV:n keskijänniteverkosta tai vaihtoehtoisesti 0,4 kV:n pienjänniteverkosta.

Suojaukset ovat tärkeä osa sähköjärjestelmää. Suojauksien pääkaaviotasoisessa suunnittelussa on tärkeää määrittää suojauksien kattavuus; jokainen paikka pitää olla suojattu jollain tavalla. Valokaarisuojaus on kannattava investointi tärkeisiin voimalaitoskomponentteihin. Kaikki keski- ja pienjännitekojeistot kannattaa suojata valokaarituhoja vastaan.

Pääkaavioihin sisältyy myös lukuisia mittauksia osoittavia symboleja. Tarvitaan virtaa ja jännitettä sekä pätö- ja loistehoa ilmaisevia mittareita. Myös generaattorien tuottama pätö- ja loisenergia täytyy mitata asianmukaisesti. Keskeinen osa pääkaavioita on

kuormitus- ja oikosulkuvirtojen laskenta. Kuormitusvirtojen avulla osataan sijoittaa oikea kaapelikapasiteetti jokaiseen paikkaan. Generaattorit ja myös taustaverkko syöttävät oikosulun hetkellä oikosulkuvirtaa vikapaikkaan. Kaikkien kaapelien tulee olla termisesti oikosulkukestoisia ja myös dynaaminen oikosulkuvirta huomioidaan kaapelien ja kaapelipäätteiden tuennoissa. Tietysti myös kojeistojen ja pääkeskusten pitää kestää esiintyvät oikosulkuvirrat.

4.2.1 Oikosulkukestoisuus

Sähköverkon kaikkien osien on kestettävä oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset eli mekaaniset vaikutukset. Oikosulkukestoisuuden varmistaminen on keskeisiä sähköjärjestelmän mitoituksen ja suunnittelun lähtökohtia sekä voimalaitoksissa että muissa sähköjärjestelmän paikoissa. Kyse on komponenttien kestävyydestä, suojauksesta ja turvallisuudesta.

Oikosulkuvirta aiheuttaa komponentin läpi kulkiessaan sen lämpenemistä. Terminen oikosulkukestoisuus ilmoitetaan yleensä 1 sekunnin pituiselle jaksolle. Muitakin arvoja on käytössä.

Yhtä kilovolttia suuremmilla jännitteillä on syytä kiinnittää huomiota oikosulkuvirran sähködynaamisiin voimavaikutuksiin (ABB 1990: 461). Voimalaitoksissa esiintyy generaattorien läheisyydessä suuria dynaamisia oikosulkuvirtoja. Niiden olemassaolo vaikuttaa erityisesti kaapelien tuentaan ja kaapelipäätteiden kestävyteen. Myös keskijännitekojeistojen dynaaminen oikosulkukestoisuus tulee varmistaa.

4.2.2 Oikosulkusuureet

Ominaisoikosulkuteholla tarkoitetaan sitä kolmivaiheista oikosulkutehoa, joka esiintyisi jossain virtapiirin osassa, elleivät muut virtapiirin osat lainkaan rajoittaisi oikosulkutehon kulkua. Ominaisoikosulkutehoon perustuva laskentatapa on helppokäyttöisin likiar-

voihin perustuva laskentatapa, kun lasketaan kolmivaiheista oikosulkuvirtaa kolmivaiheisessa verkossa. Generaattorin ominaisoikosulkuteho on

$$S''_{kpG} = \frac{S_n}{x_d}, \quad (1)$$

missä S_n on generaattorin nimellisteho (MVA) ja x_d on generaattorin pitkittäinen alku-reaktanssi suhteellisarvona. (ABB 1990: 182.)

Muuntajan ominaisoikosulkuteho on

$$S''_{kpM} = \frac{S_n}{z_k}, \quad (2)$$

missä S_n on muuntajan nimellisteho (MVA) ja z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi suhteellisarvona (ABB 1990: 182). Oikosulkutehoa käytetään ilmaisemaan sähköverkon oikosulkuominaisuuksia. Oikosulkuteho lasketaan

$$S_k = \sqrt{3}U_N I_k, \quad (3)$$

missä U_N on verkon pääjännite ja I_k oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo (Koskinen 2010: 14). Jos edellisessä yhtälössä käytetään jatkuvan tilan virran tilalla alkuoikosulkuvirta-arvoa, saadaan sitä vastaava oikosulkuteho S_k'' .

Generaattorin alku-, muutos- ja jatkuvan tilan pitkittäiset reaktanssit voidaan laskea

$$X_d = x_d \frac{U_N^2}{S_N}, \quad (4)$$

missä x_d on generaattorin suhteellinen alku-, muutos- tai jatkuvan tilan pitkittäinen reaktanssi, U_N on generaattorin nimellisjännite ja S_N generaattorin nimellisteho (Koskinen 2010: 11–12).

Oikosulkukohdan kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3} lasketaan

$$I_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}, \quad (5)$$

missä c on jännitekerroin, U_N on pääjännite ennen vikaa, R_k on oikosulkupiirin resistanssi ja X_k oikosulkupiirin reaktanssi. Jännitekerroin c on määritetty standardissa IEC 60909. Maksimioikosulkuvirtaa laskiessa kerroin on pienjännitteellä (400 V) 1,0 ja keski- ja suurjännitteillä 1,1. (Koskinen 2010: 7.)

Sysäysoikosulkuvirta on oikosulun ensimmäisen puolijakson aikana esiintyvä oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo. Sysäysoikosulkuvirran toinen nimi on dynaaminen oikosulkuvirta ja sitä käytetään kojeistojen ja muidenkin komponenttien mekaanisen mitoituksen perusteena. Dynaaminen oikosulkuvirta saadaan

$$i_{\text{dyn}} = 2,5I_{k3}''', \quad (6)$$

missä 2,5 on kerroin ja I_{k3}''' kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran tehollisarvo. (Koskinen 2010: 14.) Kerroin 2,5 on tarkoitettu keski- ja suurjännitteille. Pienjännitteelle voidaan käyttää kerrointa 2,0.

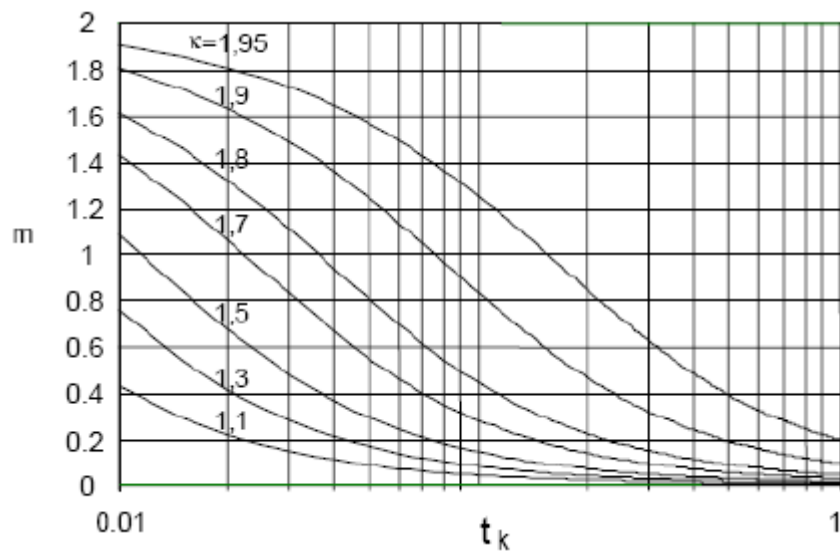
Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta tarkoittaa sähköverkon komponenttien termistä kykyä kestää tiettyä oikosulkuvirtaa 1 sekunnin ajan. Oikosulun kesto aika on tietysti

tapauskohtainen ja oikosulkuvirran suuruus saattaa myös muuttua oikosulun aikana. Yhtä sekuntia vastaava keskimääräinen terminen oikosulkuvirta I_{th} lasketaan

$$I_{th} = I_{k3}'' \sqrt{(m+n)t_k}, \quad (7)$$

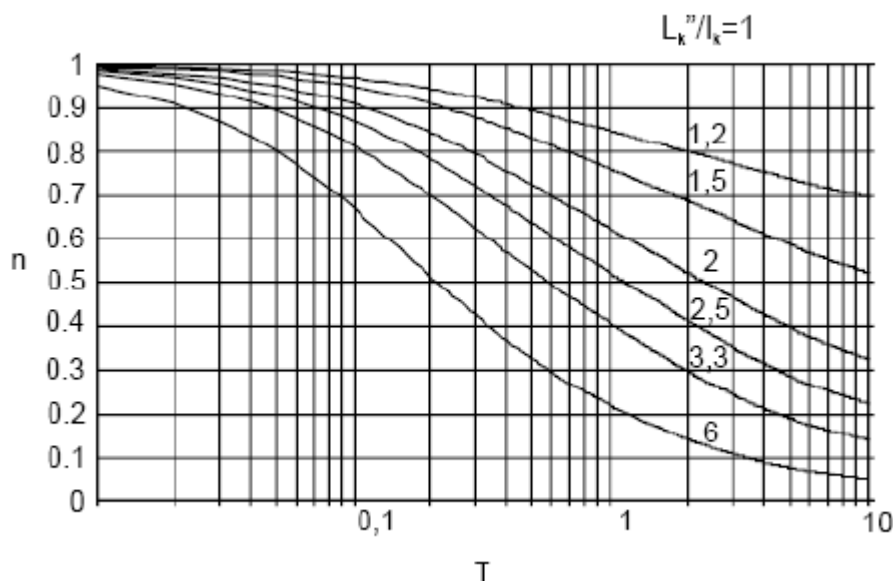
missä I_{k3}'' on kolmivaiheisen oikosulkuvirran alkuarvo, t_k on oikosulun kesto aika sekunneissa, m on oikosulkuvirran tasakomponentin kerroin ja n oikosulkuvirran vaihtokomponentin kerroin. (Koskinen 2010: 15.)

Oikosulkuvirran tasakomponentti m selviää kuvasta 23.



Kuva 23. Termisen oikosulkuvirran tasakomponentti, joka riippuu katkaisuaajasta ja sysäyskertoimesta κ (Koskinen 2010: 15).

Oikosulkuvirran vaihtokomponentti n löytyy kuvasta 24.



Kuva 24. Termisen oikosulkuvirran vaihtokomponentti, joka riippuu katkaisuaajasta ja I_k''/I_k -suhteesta (Koskinen 2010: 16).

4.2.3 Maadoitukset

Sähkölaitteiden tai -järjestelmän maadoittamisella tarkoitetaan virtapiiriin kuuluvan tai johtavan osan yhdistämistä maahan. Yhdistäminen tehdään maanalaiseen maadoituselektrodiin maadoitusjohtimien avulla. Maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoitukseen. Käyttömaadoitukselle on olemassa myös uudempi nimitys *järjestelmän maadoitus* (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2007: 76). Käyttömaadoittamisella tarkoitetaan virtapiirin osan, kuten muuntajan n-navan yhdistämistä maahan, joko suoraan tai pienen impedanssin välityksellä. Suojamaadoittaminen puolestaan tarkoittaa virtapiiriin kuulumattoman jännitteelle alttiin osan, kuten sähkölaitteen metallisen kuoren yhdistämistä maahan. Käyttömaadoituksella varmistetaan, että virtajohtimen jännite maan suhteen pysyy turvallisuuden ja laitevaurioiden kannalta sallituissa rajoissa. Lisäksi käyttö- eli järjestelmän maadoituksen tehtävänä on pitää jännite-epäsymmetria ja maavirta niin pienenä, ettei niistä aiheudu merkittäviä haittoja pienjännitejärjestelmille. Suojamaadoituksilla estetään vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen kosketeltavissa oleviin osiin. (Lehtonen 2009: 2).

Maadoituksen tarkoituksena on lisätä sähköjärjestelmän turvallisuutta. Vikatilanteissa esiintyy kosketus- ja askeljännitteitä, joita rajoittamalla turvallisuutta parannetaan. Tärkeää on, että vikatilanteet eivät aiheuta vaaraa ihmisille eivätkä omaisuudelle. Sähköturvallisuuden kannalta maadoitusten tarkoituksena on estää vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen sekä estää vaarallisten vuotovirtojen, kipinöiden, valokaarien syttyminen. Maadoitukset ovat myös edellytys maasulku- ja vikasuojaukselle, joiden avulla voidaan lyhentää vian kestoaikaa ja sitä myötä pienentää henkilö- ja laitevahinkojen riskiä. (Lehtonen 2009: 2–3).

Maadoitusjärjestelmien rakenteen on täytettävä seuraavat neljä vaatimusta:

- rakenteen riittävä mekaaninen lujuus ja korroosion kestävyys
- suurimman vikavirran kestävyys termisesti
- omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
- henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2007: 73).

Maadoitusjärjestelmän olennaiset mitoitukselliset tekijät ovat

- vikavirtojen suuruudet
- vian kesto aika
- maaperän ominaisuudet (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2007: 73).

Suurjännitelaitteistojen, kuten esimerkiksi sähköasemien ja voimalaitosten, maadoitukset käsitellään standardin SFS 6001 mukaisesti.

Maadoituselektrodin mitoitus

Mekaanisen lujuuden ja korroosion kestävyuden vuoksi vähimmäispoikkipinnat SFS 6001 -standardin mukaan ovat kuparille 16 mm², alumiinille 35 mm² ja teräkselle 50 mm² (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2007: 81).

Maadoitusjohtimien ja -elektrodien nimellispoikkipinta lasketaan SFS 6001 -standardiin perustuen

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}, \quad (8)$$

missä A on poikkipinta (mm²),

I on johtimen virran tehollisarvo (A),

t on vikavirran kesto aika (s),

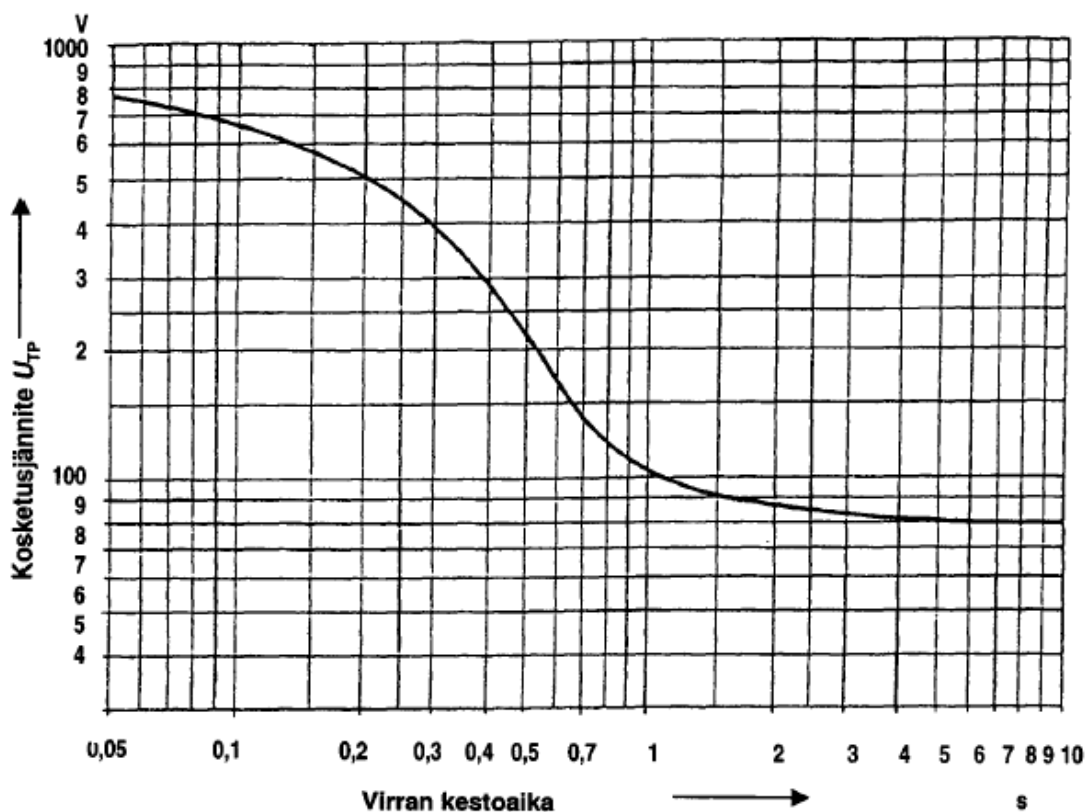
K on virrallisen osan materiaalista riippuva vakio (kupari 226, alumiini 148 ja teräs 78 A*√s/mm²),

β on virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C (kupari 234,5, alumiini 228 ja teräs 202 °C),

θ_i on alkulämpötila 20 °C ja

θ_f on loppulämpötila (°C) (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2007: 82–83).

Maadoituksia suunniteltaessa mitoitus perustuu sallittuihin kosketusjännitearvoihin, joita verrataan laskettuun maadoitusjännitteeseen. Kuvassa 25 on esitetty sallitut raja-arvot maasulusta aiheutuville kosketusjännitteille vikavirran kestoajan funktiona. (Lehtonen 2009: 11.)



Kuva 25. Sallitut raja-arvot maasuluista johtuville kosketusjännitteille (Sesko 2009: 86).

Mikäli virran kestoaika on pidempi kuin 10 sekuntia, voidaan kosketusjännitteelle käyttää arvoa 75 V. Kuvan 25 käyrä esittää jännitteen arvoa, joka voi esiintyä ihmiskehon yli virran kulkiessa paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin. Kuvan arvoja määriteltäessä ei ole huomioitu lisäresistansseja, kuten esimerkiksi kenkiä. (Lehtonen 2009: 12.)

Maadoitusjännite

Kosketus- ja askeljännitteiden laskeminen on hankalaa, mutta maadoitusjännite voidaan laskea Ohmin lain mukaan

$$U_E = R_E I_E, \quad (9)$$

missä U_E on maadoitusjännite, R_E on maadoitusresistanssi (-impedanssi) ja I_E on maavirta (Lehtonen 2009: 12).

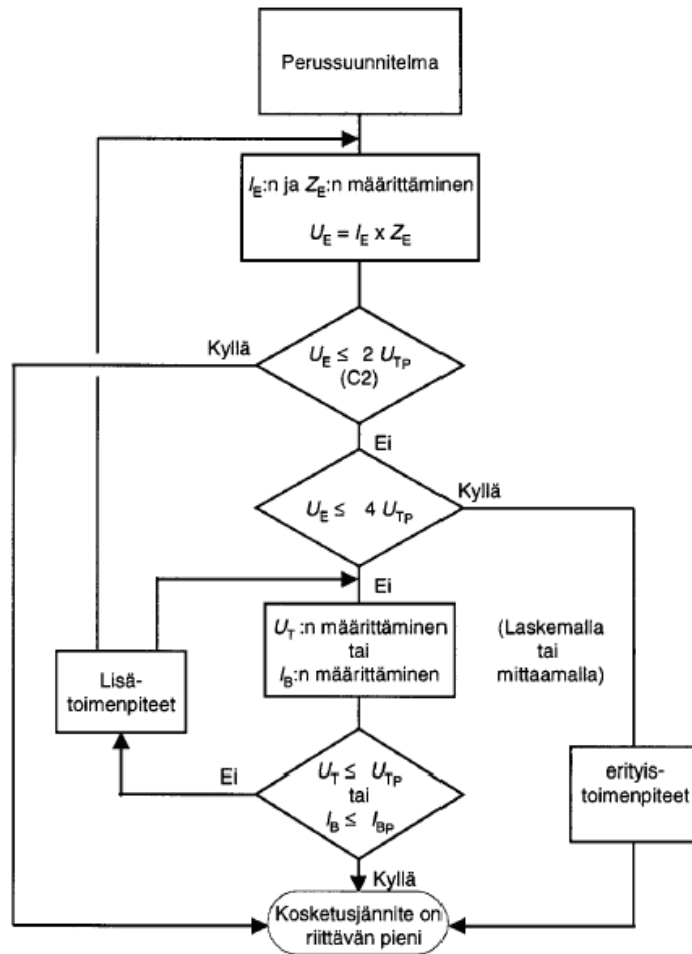
Virta aiheuttaa maadoitusresistanssissa jännitehäviön, jota kutsutaan maadoitusjännitteeksi. On kuitenkin huomioitava, että koko vikavirta ei välttämättä mene (pää)maadoituselektrodin kautta maahan, vaan osa siitä voi kulkea rinnakkaistietä muihin maadoituksiin. Esimerkiksi ilmajohtojen ukkosjohtimet ja maakaapeleiden metallivaipat osallistuvat maahan palaavien virtojen johtamiseen, joten osa vikavirrasta kulkee niiden kautta ja se pienentää maadoituselektrodin läpi menevää maasulkuvirtaa. Tällöin laskennassa käytettävää virtaa korjataan reduktiokertoimella r alla olevan yhtälön mukaisesti. Maavirta on

$$I_E = rI_F, \tag{10}$$

missä r on reduktiokerroin ja I_F on maasulkuvirta (Lehtonen 2009: 12.)

Reduktiokerroin r on esimerkiksi $2 \times 35 \text{ mm}^2$ Sustrong-ukkosjohtimille 0,951 ja 300 mm^2 PEX-eristeiselle kuparijohtimelliselle 110 kV:n voimakaapelille 0,32 (Lehtonen 2009: liite 6).

Maadoitusjärjestelmän suunnittelu noudattaa yleisesti kuvan 26 kaaviota.



Kuva 26. Maadoitusjärjestelmän suunnittelun kulun yleiskaavio (Sesko 2009: 87).

Liitteessä 1 on esitetty aiheeseen liittyvät taulukot. Taulukoista löytyy maadoituselektrodien vähimmäismitat sekä eri maa-aineksien ominaisresistanssiarvoja ja maadoitusresistanssien yhtälöitä.

4.2.4 Varayhteys sähköverkkoon

Sähköverkkoon liittyminen edellyttää voimassaolevaa liittymissopimusta. Rakennusajankohdat, liittymispiste ja kaikki käytännön asiat on sovittava sähköverkkoyhtiön edustajan kanssa. Asian yhteydessä on hyvä tietää myös alustava liittymisteho sekä paikka kartalla, johon keskijänniteliityntä tulee. Nämä tiedot helpottavat käytännön asi-

oita. Liittäminen voidaan käytännössä suorittaa, kun liittyjä vakuuttaa sähkölaitteistonsa olevan sellaisessa kunnossa, että yhteen kytkentä ei aiheuta vaaraa tai häiriötä. Jakeluverkkoyhtiöt noudattavat Energiateollisuus ry:n suosittamia Sähkönkäyttöpaikkojen liittymisen ehtoja sekä Verkkopalveluehtoja VPE 2010.

Vesivoimalaitos tarvitsee sekä omakäyttöjärjestelmää että padon tulvaluukkujen toiminnan varmistamista varten yhteyden paikallisen sähköverkkoyhtiön keskijänniteverkkoon. Keskijänniteverkon vaihtoehto on yhteys pienjänniteverkkoon. Valinta näiden kahden välillä tehdään käytännön asioiden perusteella, esimerkiksi tarvittavan tehon ja etäisyyden laitoksen ja verkkojen välillä. Sähköä tarvitaan ensi alkuun työmaasähköistyksen tarpeisiin. Yleensä vesivoimalaitosta rakennettaessa tarvitaan työmaatehoa noin 1 MVA tai hieman enemmän.

4.3 Kustannuslaskenta ja häviöteho

Kustannuslaskenta on tärkeää tehdä ennen kalliiden investointien toteuttamista. Rakennusvaiheessa edullisin vaihtoehto ei välttämättä ole enää edullisin, kun tarkastellaan asiaa useiden kymmenien vuosien aikajaksolla. Sähköjohtoihin liittyy käsite *johdon taloudellinen poikkipinta*. Se tarkoittaa sitä johdon poikkipintaa, jolla vuotuiset kustannukset ovat minimissään. Halvempi ohutjohtiminen johto voi tulla kalliimpaa paksujohtimista johtoa kalliimmaksi, kun otetaan huomioon häviökustannukset johdon koko käyttöiän aikana.

Kertaluonteinen kustannus, esimerkiksi investointikustannus, voidaan jakaa tasaeriksi halutulle tarkasteluajanjaksolle yhtälöllä

$$K_1 = \varepsilon K, \tag{11}$$

missä K on investointikustannus ja

$$\varepsilon = \frac{p/100}{1 - \frac{1}{(1 + p/100)}}, \quad (12)$$

missä p on korkoprosentti ja t on tarkasteltava ajanjakso vuosina. (Kauhaniemi 2011: 13–14.)

Johdon häviöteho voidaan laskea

$$P = 3RI^2, \quad (13)$$

missä 3 on vaiheiden lukumäärä, R on virtajohtimen resistanssi [Ω] ja I virtajohtimen kuormitusvirta [A].

5 SIERILÄN VOIMALAITOS

5.1 Sijainti ja perustiedot

Rovaniemen kaupungin itäpuolelle Oikaraisen kylän Sieriniemeen sijoittuva Sierilän vesivoimalaitos tulee olemaan viimeinen Kemijoen pääuomaan rakennettava voimalaitos. Sierilän sijoittuminen kartalle näkyy kuvassa 27. Voimalaitoksen paikka sijaitsee Rovaniemen kaupungin alueella.



Kuva 27. Sierilän voimalaitoksen sijoittuminen Kemijokeen (Kemijoki 2012b).

Tällä hetkellä tiedetään muutamia perustietoja uudesta voimalaitoksesta ja sen alueesta. Uutta vesialuetta muodostuu 3,6 km². Padotusaltan pituus tulee olemaan noin 30 km ja

padotusalueen pinta-ala noin 14 km². Vesi nousee Sieriniemen alueella 8 m ja Vanttauskosken alapuolella 2 m. Uuden voimalaitoksen pätötehoksi saadaan 44 MW ja voimalaitoksen vuosienergia on 155 GWh. Padotustaso on +N43 +82,00 m ja putouskorkeus 8 m. Rakennusvirtaama on puolestaan 650 m³/s. (Kemijoki 2012a.)

5.2 Sähköverkkoon liittyminen

Sierilän (SRI) voimalaitoksen omistaja ja rakentaja on Kemijoki Oy. Voimalaitos tulee liittymään niin ikään Kemijoki Oy:n omistamaan ja Lapin Sähköverkko Oy:lle vuokratuun 110 kV:n sähköverkkoon Rovaniemen itäpuolelle. Lapin Sähköverkko Oy on Kemijoki Oy:n tytäryhtiö. Sierilän laitoksen sijoittuminen on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Sierilän voimalaitoksen sijainti (Kemijoki 2013).

Sierilän laitos tarvitsee liittymän sekä 110 että 20 kilovoltin sähköverkkoon. Kuvassa 29 on ilmaistu, mistä suunnasta liittymät tulevat. Numero 1 merkitsee oletusarvoista liittymispaikkaa sähköverkkoon ja numero 2 toissijaista.



Kuva 29. Sierilän voimalaitoksen liittynät 110 ja 20 kilovoltin sähköverkkoihin (karttapohja: Rovakaira 2011).

Liittymisessä tärkeitä huomioitavia asioita ovat: miten voimalaitos ja johto saadaan kytettyä tarvittaessa eroon toisistaan, liittymisjohdon pituus, mahdolliset suojausasiat sekä tahdissaolovalvonta. Näillä tiedoin riittävä liittymisratkaisu Sierilän voimalaitokselle on yksikenttäinen avokytkinlaitos voimalaitoksen ja liittymisjohdon väliin lisättynä mahdollisella ohituserottimella sekä erotin mukaan luettuna maadoituskytkin liittymisjohdon ja runkojohdon liittymispisteessä. Tällä ratkaisulla saavutetaan hyvä ja käytännöllinen

nen teknis-taloudellinen toimivuus. Maadoituskytkin liittymispisteessä maadoittaa liittymisjohdon tarpeen näin vaatiessa.

Sierilän vesivoimalaitoksen liittymisjohto tulee olemaan oletusarvoisesti noin kuuden kilometrin mittainen. Kaikki pääkaaviot on nähtävissä tämän työn liitteissä 2–6. Mainittu pitkä liittymisjohto sisältyy pääkaavioihin 1B ja 3B. Näissä vaihtoehdoissa liittyminen tapahtuu läheisen Permantokosken vesivoimalaitoksen yhteydessä olevaan kytkinlaitokseen katkaisijakentän välityksellä. Paikka näkyy kuvassa 29 numerolla 1. Tämän kytkinlaitoksen varsinainen suunnittelu ei sisälly tähän diplomityöhön.

Jos sen sijaan Fingridiltä saadaan erikoislupa liittyä suoraan johdolle Valajaskoski-Permantokoski, liittymisjohto on silloin 1,6 km pitkä. Katso numero 2 kuvassa 29. Tässä liittymispaikassa on olemassa kaksi vaihtoehtoa liittymisjohdon toteuttamiseksi.

Vaihtoehto 1: ilmajohto

Tässä vaihtoehdossa koko johto toteutettaisiin ilmajohtona. Runkojohdon liittymispisteeseen tulee erotin ja maadoituskytkin, jos liittyminen toteutetaan suoraan Valajaskoski-Permantokoski runkojohtoon. Erottimella ja maadoituskytkimellä johdon käytettävyys ja turvallisuus ovat paremmat. (Kemijoki 2011: 1.)

Vaihtoehto 2: maakaapeli ja ilmajohto

Vaihtoehto 2 on vaihtoehdon 1 kanssa muuten sama, mutta joen ja voimalaitoksen kytkinkentän väli on maakaapelilla. Kaapeliin on päädytty lähinnä maisemallisista syistä. Näistä kahdesta vaihtoehdosta tämä jälkimmäinen ratkaisu kaapelilla on todennäköisemmin toteutuva. (Kemijoki 2011: 2.)

20 kilovoltin sähköliittymä

Joissakin laitoksissa on käytetty liittintä 20 kilovoltin sijasta 0,4 kilovoltin pienjänniteverkkoon, mutta Sierilän tapauksessa on päädytty lähinnä käytännöllisistä syistä sekä myös laitoksen ja käytettävissä olevan keskijänniteverkon etäisyyden vuoksi yhteen 20 kilovoltin suurjänniteliittymään. Pienjänniteliittymää ei Sierilän voimalaitokseen Rovakairan verkosta tule.

Sierilän voimalaitoksen tapauksessa keskijänniteliittymä toimii aluksi työmaasähköistyksen tarpeisiin ja myöhemmin se muutetaan laitoksen varayhteydeksi. Tarvittava teho on työmaavaiheessa noin 1,25 MVA ja myöhemmin varayhteytenä toimiessaan 1 MVA. Rovakaira rakentaa noin 600 metrin pituisen 20 kV:n ilmajohtohaaran runkolinjastaan Sierilän koneaseman viereen. Liityntäpiste on sovittu johtohaaran päätepylväälle. Päätepylväältä alas ja laitoksen sisälle mennään maakaapelilla. Kaapeli ja siihen liittyvät muut asiat kuten tilavaraus Rovakairan päto- ja loisenergian mittareille kuuluvat Kemijoki Oy:n rakennettavaksi. 20 kilovoltin linjan suunnittelu kuuluu Rovakairan tehtäväalueeseen, joten sitä ei käsitellä tässä yhteydessä. Kuvassa 30 on kartta, jonka keskellä näkyy uuden haarajohdon ilmajohto-osuus päättyen koneaseman viereen.



Kuva 30. Rovakairan 20 kV:n haarajohto voimalaitoksen varayhteydeksi (Kemijoki 2011).

Keskijänniteliittymä on tarkoitettu sananmukaisesti varayhteydeksi eli tehoa vain otetaan tarpeen vaatiessa Rovakairan verkosta. Sierilän laitoksen tuottamaa sähköä ei ole tarkoitus syöttää tähän keskijänniteverkkoon vaan pelkästään 110 kilovoltin alueverkkoon. 20 kilovoltin ilmajohdon kyky ottaa vastaan tehoa on virtajohtimien tyypistä riippuen korkeintaan 10 MVA, joten laitoksen täyttä kapasiteettia ei ole mahdollistakaan syöttää keskijänniteverkkoon. Tärkeää on huomioida, että 110 kilovoltin ja varayhteytenä toimiva 20 kilovoltin verkko eivät ole suoraan yhteydessä toisiinsa. Sähkön hävitessä 110 kV:n runkolinjasta Valajaskoski–Permantokoski Rovakairan 20 kV:n verkossa pitäisi sähköä olla käytettävissä, ellei häiriö ole kovin laaja.

Fingridin asiakirjat

Seuraavassa on Sierilän voimalaitosta koskevat vastineet sivuilla 42–43 esitettyihin toimintoihin Fingridin asiakirjoista.

Yleisten liittymisehtojen kohdassa 2.5 sanottiin, että voimalaitos tulee liittää sähköverkkoon kytkinlaitoksessa katkaisijakentän välityksellä tiettyjen ehtojen täytyessä. Sierilän voimalaitoksen teho on 50 MVA, joten liityntä tehdään oletusarvoisesti uusien liittymisehtojen mukaisesti lähimpään kytkinlaitokseen eli Permantokoskelle. Liittyminen suoraan runkojohtoon Valajaskoski-Permantokoski edellyttää erikoislupaa Fingridiltä. Saman asiakirjan samaisessa kohdassa oli vaatimus eroonkytkentäreleistyksestä. Eroonkytkentäreleistys koostuu Sierilässä tähän tarkoitukseen varatuista jännite- ja taajuusreleistä.

YLE2013-asiakirjassa oli myös vaatimus tietoliikenneyhteyksistä. Tietoliikenneyhteys täytyy toteuttaa Sierilästä joko liittymisjohdon Permantokosken päähän, jos liitytään kytkinlaitokseen tai Valajaskoskelle, jos liitytään runkojohtoon. Näin varmistetaan kantaverkon (tai runkojohdon VL-PER) pikajälleenkytkennän onnistuminen. Kohdassa 4.6 oli ohjeistus käyttää ylijännitesuojaa maadoittamattomassa päämuuntajan tähtipisteessä.

Ylijännitesuoja on kytketty päämuuntajaan tähtipisteeseen kaikissa tehdyissä pääkaa-
viovaihtoehdoissa.

Voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten kohdassa 4 puhuttiin erityistarkastelu-
tarpeen arvioinnista. Sierilän voimalaitos (44 MW) kuuluu teholuokkaan 3, joten eri-
tyistarkastelutarpeen arviointi kannattaa pyytää Fingridiltä nyt voimalaitoksen esisuun-
nitteluvaiheessa. On myös mahdollista, että Sierilän voimalaitoksesta tulee suuntaaja-
kytketty voimalaitos, joten erityistarkastelu on silloin erittäin perusteltua. VJV-
asiakirjan kohdassa 5.1.1 oli kyse VJV-referenssipisteen määrittämisestä. Sierilän voi-
malaitoksen referenssipiste sijaitsee joko runkojohdolla tai Permantokoskella, riippuen
siitä, mihin liityntäpiste tulee. Tässä liittymispisteessä on Kemijoki-yhtiön ja Lapin
Sähköverkko Oy:n raja. Liittymispisteen verkonhaltija eli tässä tapauksessa Lapin Säh-
köverkko Oy määrittää referenssipisteen.

VJV2013-asiakirjan kohdassa 9.2.2 oli ohjeistus voimalaitoksen pimeäkäynnistysomi-
naisuudesta. Pimeäkäynnistysominaisuutta ei ole suunnitteilla Sierilän voimalaitokseen,
joten siitä ei tarvitse ilmoittaa Fingridille mitään. Saman asiakirjan kohdassa 10.2.2
otettiin kantaa suuntaajakytkettyihin voimalaitoksiin. Jos Sierilään päädytään hankki-
maan taajuusmuuttajakäyttö, niin sen toiminnallisuus sähköverkon jännitehäiriöiden ai-
kana on selvitettävä ja raportoitava Fingridille muiden voimalaitostietojen yhteydessä.
Relesuojauksen pääperiaatteet asiakirjan kohdassa 2.1 oli asiaa liittymisjohdon suojaus-
sesta. Sierilän voimalaitoksen liittymisjohdon pääsuojana on hidastamaton distans-
sisuojaus, joten liittymisjohdon suojausohje on täytetty.

5.3 Sähkötekniset ratkaisut

Sierilän voimalaitoksen koneistotyyppi on valittu 2 kpl bulb- eli kotelotyyppiä. Tähän
tyyppiin on päädytty lähinnä putouskorkeuden ja virtaaman perusteella.

Työssä päädyttiin seuraaviin kolmeen pääkaaviovaihtoehtoon. Pääkaavioista 1 ja 3 on kaksi versiota, A ja B. A-kaaviossa liittyminen on toteutettu runkojohtoon VL-PER ja B-kaaviossa uusien yleisten liittymisehtojen mukaisesti lähimmälle kytkinlaitokselle eli Permantokoskelle. Pääkaaviot on esitetty liitteissä 2–6.

Pääkaavio 1A ja 1B

Pääkaaviossa 1 on kaksi keskijännitekojeistoa, 12 ja 24 kV. Varayhteys Rovakairan verkosta tulee 24 kV:n kojeiston kautta sekä omakäyttökeskukselle että säännöstelypadon tulvaluukuille. Ratkaisun etuna on käyttövarmuus. Aiempina aikoina oli tapana, että padon sekä ensisijainen että varasyöttö olivat kokonaan 24 kV:n kojeiston lävitse. Kojeiston rikkoutuessa pahemmin tilanne on padon sähkösaannin kannalta hankala. Nyt on mahdollista ostaa 24 kV:n kojeisto ensin, jota voi hyödyntää laitoksen rakentamistavaiheen sähköistyksessä. Pääkaaviossa 1 on normaalit suoravetoiset bulb-koneistot. Koska laitoksen tehoa ei ole tarkoitus syöttää Rovakairan keskijänniteverkkoon, tehovälimuuntajaa ei nyt tarvita.

Pääkaavio 2

Pääkaavio 2 on muuten samanlainen pääkaavion 1:n kanssa paitsi, että nyt on taajuusmuuttajakäyttöiset generaattorit. Koneistot itsessään ovat samaa bulb-tyyppiä. Taajuusmuuttajakäytön etuja ovat pienemmät vikavirrat sekä edullisempi ja pienempikokoinen suoravetoinen generaattori. Taajuusmuuttajalla saadaan optimoitua turbiinin käyttöä ja myös laitoksen hyötysuhde paranee.

Pääkaavio 3A ja 3B

Pääkaaviossa 3 on yksi 24 kilovoltin keskijännitekojeisto. Yksi yhtenäinen kojeisto on yleensä edullisempi hankkia kuin kaksi erillistä. Kun jännite on nyt 20 kV:a aiempien pääkaavioiden 10,5 kV:n sijasta, se pienentää kuormitus- ja vikavirtoja sekä yksinker-taistaa kaapelointeja. Mahdollisen syötönvaihdon rakentaminen on nyt yhden kojeiston

sisälle helpompaa. Haittapuolena on, että koko kojeisto joudutaan hankkimaan kerralla ja varsin aikaisessa vaiheessa, jos sitä on tarkoitus hyödyntää laitoksen rakentamisvaiheessa. Rakennetaanko kojeisto heti koko laajuuteensa vai osittain, riippuu kojeiston ominaisuuksista. Jos kojeisto on modulaarinen, kuten esimerkiksi ABB:n Uniswitch, voidaan kentät +08 - +11 asentaa käyttökuntoon laitoksen rakentamisvaiheessa työmaasähkön tarpeita varten. Myöhemmin laitoksen valmistumisen lähestyessä kojeisto rakennettaisiin täyteen laajuuteensa.

5.3.1 Liittymisjohto, kytkinlaitos ja päämuuntaja

Liittymisjohto

Runkojohdon Valajaskoski–Permantokoski virtajohtimien tyyppinä ovat Valajaskosken päästä luettuna noin 24 kilometrin matkalla HAWK-johtimet ja loppuosa noin 5 km Permantokoskelle on Ostrich-johdinta. Jos Sierilän voimalaitos liittyy runkojohdolle, se liittyy kohtaan, jossa on HAWK-johtimet. Liittymisjohdon ja runkojohdon liittymiskohdille tulee erotin sekä maadoituskytkin, jotta liittymisjohdon puoli voidaan huolto- toimenpiteitä varten maadoittaa. Todennäköisemmin liityntä toteutetaan Permantokosken kytkinlaitokseen, johon täytyy rakentaa oma katkaisijakenttä liityntää varten. Liittymisjohto kulkisi noin viiden kilometrin matkan samaa johtokatua runkojohdon kanssa.

Kuormitusvirta yhdessä vaiheessa, kun jännite on 118 kilovoltia ja näennäisteho 50 MVA, on noin 250 A. Suurin mahdollinen johtimia kuormittava alkuoikosulkuvirta I_k'' on tilanteessa, jossa vikavirrat summautuvat generaattoreiden ja taustaverkon suunnista. Summautunut vikavirta on liittymisjohdolla suuruusluokkaa 6–7 kA. Tarkasteltavan voimalaitoksen liittymisjohtoon voidaan siis valita aiemmin teoriaosassa esitettyjen sähköisten arvojen perusteella mikä tahansa johtimista Suursavo, Ostrich tai Duck. Johtimia tulee yksi vaihetta kohti. Tarkastellaan johtoon liittyviä rakennus- ja häviökustannuksia.

Arvioidaan liittymisjohdon 5 kilometrin avojohtolinjan kustannuksiksi Suursavo-johtinta käyttäen 600 k€. Ostrich-johtimella kustannukset ovat noin 20 % suuremmat eli 720 k€ ja Duck-johtimella noin 40 % suuremmat eli 840 k€. Käytetään korkoprosenttina neljää prosenttia ja ajanjaksona 40 vuotta. Yhtälöitä 11 ja 12 käyttäen saadaan Suursavolle annuiteettimenetelmällä 30314 e/vuosi, Ostrichille 36360 e/vuosi ja Duckille 42420 e/vuosi. Arvioidaan keskimääräiseksi kuormitusvirraksi 150 A/vaihe. Näillä tiedoin saadaan häviötehoiksi käyttäen yhtälöä 13: Suursavo 91,1 kW, Ostrich 64,1 kW ja Duck 30,4 kW. Vuodessa on tunteja: 24 h kertaa 365 vrk eli 8760 h. Näin saadaan megawattitunneiksi: Suursavo 798 MWh, Ostrich 562 MWh ja Duck 266 MWh. Jos arvioidaan siirretyn sähkö hinnaksi 40 euroa/MWh, saadaan euroissa vuotuista häviötä Suursavolle 31920 e, Ostrichille 22480 e ja Duckille 10640 e. Tulokset on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Kustannusarvio liittymisjohdon eri johdintyypeille.

Johdintyyppi	Rakennuskustannukset [€]	Häviökustannukset [€]	Yhteensä [€]
Suursavo	30314	31920	62234
Ostrich	36360	22480	58840
Duck	42420	10640	53060

Laskelman perusteella ja 40 vuoden tarkasteluajanjaksolla on selvää, että Duck-johtin tulisi kokonaiskustannuksiltaan edullisimmaksi, joten se on paras valinta liittymisjohdon virtajohtimeksi.

Liittymisjohto kannattaa suojata distanssisuojalla ja varasuojiksi voidaan laittaa ylivirta- ja maasulkusuojaus. Ukkosjohtimiksi liittymisjohtoon sopii pienin teräsköysivaihtoehto Sustrong, poikkipinta-ala 35 mm². Näitä tulee 2 kpl vaihejohtimien yläpuolelle.

Toteutusvaihtoehdossa 2 matka joen rannasta voimalaitokselle on tarkoitus toteuttaa maakaapelilla. Kaapeloitava osuus on noin 400 m, kuormitusvirta noin 262 A ja suurin oikosulkuvirta 7 kA. 110 kV:n voimakaapeleista esimerkiksi pienimmällä AHXLMK-W 1 x 300 -kaapelilla on kuormitettavuutta 400 A, kun kaikki kolme kaapelia ovat

maahan upotettuna samaan tasoon. Terminen oikosulkuvirtakestoisuus on 28,3 kA. Näillä perustein tämä on soveltuva kaapeli.

110 kV kytkinlaitos

110 kilovoltin kytkinkentälle tulee yksi katkaisijakenttä. Yleisesti 110 kilovoltin tasolla kaikki erottimet ja tietysti katkaisijat ovat moottoriohjattuja kaukokäytön vuoksi, niin myös nyt. Jännitemuuntajat voisi sijoittaa kytkinkentän johdon puoleiseen päähän. Lisäksi kentällä tulee olla katkaisijat ja erottimet sekä virtamuuntajat tarpeellisten mittaus-tietojen saamiseksi. Lisäksi kytkinkentän kriittisimmän kojeen eli katkaisijan voisi ohittaa ohituserottimella katkaisijan rikkoutumisen ja huoltojen varalta. Ylijännitesuojat on järkevää sijoittaa kytkinkentän päämuuntajan päähän. Mittamuuntajien taakkojen suuruudet jätin merkitsemättä pääkaavioihin, koska todellisia toisiojohdotuksen johtoreittejä ei vielä tiedetä, joten taakoihin tulisi tällöin liikaa epätarkkuutta.

Virtamuuntajat kannattaa ottaa mittauskytkennällä ja kahdella suojauskytkennällä. Muuntosuhde olisi hyvä olla $\frac{250-300}{5/5/5}$ A. Alleviivaus tarkoittaa, että kytkentä tehdään ensin pienemmälle ensiövirralle. Tulevaisuudessa, jos laitoksen teho nousee, niin on mahdollista vain kytkentää muuttamalla ottaa käyttöön suurempi ensiövirta. Tällöin ei tarvitse investoida uusiin virtamuuntajiin. Toision virta voi olla joko 5 A tai pienempi 1 A. Yleensä lyhyillä etäisyyksillä käytetään suurempaa viiden ampeerin toisioarvoa. Tarkkuusluokaksi valikoituu 0.2, koska kyseisiin virtamuuntajiin tulee liittymään energiankulutuksen mittausta ja vuotuinen mitattava energiamäärä ylittää 10 GWh:a.

Päämuuntaja

Päämuuntajaksi valikoituu laitoksen tehon perusteella 50 MVA:n ja 120/20 (tai 120/10,5) kV:n tehomuuntaja. Koska päämuuntaja tulee voimalaitoksen koneaseman viereen, ei asutusta ole aivan muuntajan välittömässä läheisyydessä. Muuntajan äänen-vaimennusta ei siis tarvita. Koska muuntajan teho on luokkaa 50 MVA, eikä useita satoja megavolttiampeereja, ei yksivaiheyksiköistä synny hyötyä juuri ollenkaan esimer-

kiksi helpompana liikuteltavuutena. Yksi yhtenäinen muuntaja on myös ulkonäöllisesti tähän parempi, koska on ilmeistä että muuntajan ympärille ei tule betonista suojabunkkeria.

Käämikytkeitä ei voimalaitosmuuntajassa tarvita, mutta väliottokytkin kannattaa tilata, jotta voidaan suorittaa jännitteen hienosäätöä käsin, ei automaation avulla. Jäähdytys kannattaa olla Sierilän tapauksessa tuulettimellinen, jotta muuntajan kuormitettavuus saadaan hyödynnettyä paremmin. Muuntajan suojaukset varmistuvat vasta tilausvaiheessa, mutta todennäköisiä ovat kaikki aiemmin tässä työssä esitetyt suojaustoiminnot.

Päämuuntajan tähtipisteeseen on mahdollista asentaa joko sammutuskuristin tai ylijännitesuoja. Sierilän päämuuntajaan tulee ylijännitesuoja. Runkojohto Valajaskoskelta Permantokoskelle on sammutettua, joten päämuuntajaan tähtipisteen maadoittaminen ei tule kysymykseen. Uutta sammutuslaitteistoa ei myöskään tarvitse asentaa. Kyseeseen tulee siis maasta erotettu tähtipiste, jossa on ylijännitesuoja. Ylijännitesuoja on osa päämuuntajan suojausta. Lisäksi kannattaa laittaa ylijännitesuojat myös päämuuntajan kummallekin puolelle parantamaan suojausta.

Päämuuntajan alajännitepuolen napojen läheisyyteen on kannattavaa asentaa jokaiseen vaiheeseen kondensaattorit transientti-ilmiöiden lieventämisen vuoksi. Kondensaattorit pehmentävät erityisesti 10,5/20 kV:n jännitetason katkaisijoiden kytkentätilanteista aiheutuvia transienteja ja ne toimivat näin ollen suojaavana tekijänä. Sopiva koko on saadun tiedon mukaan 0,1 μF (Soudunsaari 2011).

5.3.2 Keskijännitekojeistot

Pääkaavioissa esitetyt keskijännitekojeistot ovat nimellisjännitteeltään joko 12 tai 24 kV ja kaikki ovat yksillä pääkiskoilla varustettuja. On olemassa myös monipuolisempia ratkaisuja, kuten pääkiskon apukiskon yhdistelmä. Sellaiset kuitenkin maksavat huomattavasti perusratkaisua enemmän, joten siksi on päädytty edullisimpaan vaihtoehtoon.

Keskijännitekojeistoihin on saatavissa sekä kiinteitä että ulosvedettäviä katkaisijoita (vaunukatkaisijoita). Voimalaitosympäristö on kojeiston osille varsin raskas, joten pääkaavioissa päädyttiin ulosvedettäviin katkaisijamalleihin. Katkaisijan rikkoutuessa se on helppo vaihtaa ja samalla se toimii erottimena. Erillistä erotinta ei välttämättä tällöin tarvita.

Kojeisto on vesivoimalaitoksen tärkeimpiä komponentteja. Sen vuoksi se kannattaa suojata hyvin. Hyvin toteutettu valokaarisuojaus estää tehokkaasti suurempien vaurioiden syntymisen. Valokaarisuojaus koostuu valokaarisuojareleestä sekä riittävän monesta valoanturista. Valoanturit on merkitty näkyviin kaikkiin pääkaavioihin. Valokaarisuoja toimii, kun niin sanotut virta- ja valoehdot täyttyvät. Valoanturit kannattaa sijoittaa pääkiskotilan molempiin päihin sekä kaikkien kenttien alaosaan eli sinne minne kaapelit liittyvät. Valokaarisuojauksen lisäksi tarvitaan ylivirta- ja maasulkusuojaus. Maasulkusuojien kannattaa olla suunnattuja paremman selektiivisyyden vuoksi. Kojeiston kiskojen maasulkusuojana voisi toimia nollajännitettä jännitemuuntajien avokolmiokytkenästä mittaava nollajänniterele.

Kojeistoja tilatessa kannattaa asentuttaa suojareleet valmiiksi kiinni tehtaalla tai pyytää valmius niille, jotta kojeiston käyttöönotto on aikanaan helpompaa. Pienille kojeille (energiakulutusmittarit, mitta-arvonmuuntimet, virtamittarit jne.) kannattaa varata tilaa kojeiston kojekaapista tai tarvittaessa tilata kojeiston katolle lisäkojekaappi. Lisäksi kojeiston sisäinen lukitus on tärkeää. Kentän kaksi maadoituserotinta ei saa voida sulkea ennen kuin kaikkien kenttien +01 - +07 katkaisijat ovat auki pääkaaviossa 3. Sama ehto pätee tietysti myös kentän +08 maadoituserottimelle.

5.3.3 Generaattorit

Generaattoreiden magnetointi toteutetaan erillismagnetoinnilla, kuten pääkaaviosta 1 näkyy. Kestomagneettiteknikalla toteutetut generaattorit eivät tule nyt kyseeseen niiden korkean hinnan vuoksi. Generaattorin staattorin tähtipiste on tapana ottaa käyttöön joltamalla se virtamuuntajien kautta ylijännitesuojille. Virtamuuntajien sähköiset arvot

ovat identtiset kojeiston kenttien +03 ja +04 virtamuuntajien kanssa. Staattorin tähtipisteen hyödyntäminen on osa generaattorin suojausta. Verkko on maasta erotettu.

Magnetointipiiriin sisältyvät virtamuuntajat, magnetointimuuntaja, tasasuuntaaja, kytkin sekä vastus, jolla demagnetoidaan roottori tarpeen vaatiessa, yleensä vikatilanteissa. Magnetointimuuntajan toisiojännite ja teho kilovolttiampeereina ratkeaa generaattorin sähköisistä arvoista vasta näiden komponenttien tilausvaiheessa. Magnetointi kannattaa kytkeä kaikissa pääkaavioissa 1–3 esitetyllä tavalla eli se yhdistetään kojeiston sisällä generaattoreille meneviin kaapeleihin. Oma katkaisijalähtö keskijännitekojeistosta magnetointipiirille ei ole toimiva etenkin pääkaaviossa 1.

Suojaukset

Nykyisin generaattorien suojaustoiminnot on tapana toteuttaa yhdellä suojausyksiköllä eli generaattorin suojareleellä. Uudet releet eroavat vanhemmista releistä siten, että niissä on useita eri toimintoja yksien kuorien sisässä. On huomattava, että vain pääkaavion 1 tapauksessa tarvitaan tämä perinteinen generaattorisuojaus. Pääkaavioissa 2 ja 3 taajuusmuuttaja hoitaa generaattorien suojauksen täysin itsenäisesti ja täydellisesti.

Eräs asia, johon tässä kohtaa voisi kiinnittää huomiota, on staattorin maasulkusuojaus. Sierilän generaattorien tähtipiste on maasta erotettu, joten generaattorien maasulkusuojauksia esiteltyssä kappaleessa viimeksi mainittu vaihtoehto voisi ehkä olla soveltuva. Täytyy muistaa, että asia riippuu paljon myös generaattorin ominaisuuksista eli kaikille tyypeille ei välttämättä saada sataprosenttista suojausta aikaiseksi.

5.3.4 Pienet muuntajat, pääkeskukset ja päämaadoituselektrodi

Omakäyttömuuntajia on neljä kappaletta. Laitoksen omakäyttökeskusta syöttävät muuntajat OKM 1 ja 3. OKM 1 toimii vakituisena syöttönä laitoksen 10,5 tai 20 kV:n pääkiskosta. Varayhteyttä hoitaa OKM 3 -muuntaja.

Jotta omakäyttömuuntajilta tarvittava kapasiteetti saadaan selville, täytyy arvioida muuntajiin kohdistuvaa kuormitusta. Arviointi kannattaa tehdä käyttäen apuna vanhojen laitosten kuormituksia. Omakäyttökeskuksen kuormitusta arvioitiin taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Sierilän voimalaitoksen omakäyttökeskuksen kuormitusarvio.

Kuorma	Kuormitus [kW]
G1-keskus	200
G2-keskus	200
Tasasähkösyöttö	10
Valaistus	20
LVI	100
Pumput	40
Muut	50
Varamagnetointi	250
Yhteensä	870

Taulukossa 2 esitettyihin generaattorikeskuksiin sisältyy kumpaankin kaksi 55 kW:n ja kaksi 18 kW:n säätö-öljypumppua ja lisäksi muutakin tekniikkaa. Taulukon Pumput-kohta tarkoittaa vuotovesipumppuja. Muut-kohta sisältää muun muassa nosturin, ovet ja työkompressorin. Tehdyn arvion perusteella 1000 kVA:n teho kahdelle omakäyttömuuntajalle on varmasti riittävä. Myös 800 kilovoltiampeerin muuntaja riittäisi varsinkin varayhteyden puolelle, mutta koska näiden kahden rahallinen erotus on todella pieni, päädyttiin kahteen 1000 kVA:n muuntajaan.

Patoa syöttävät muuntajat (OKM 2 ja 4) sijoitetaan puistomuuntamoon padon läheisyyteen. Koneasemalta on padolle matkaa 800 m. Padon sähköistyksessä on huomioitava monia kuormituksia kuten tulvaluukkujen hydraulikkapumppujen moottorit, erilaiset lämmitykset sekä kiinteistösähköistys ja LVI-tekniikka. Padon keskuksen kuormituksen arviointi on taulukossa 3.

Taulukko 3. Sierilän voimalaitoksen patokeskuksen kuormitusarvio.

Kuorma	Kuormitus [kW]
Hydrauliikan moottorit (2 kpl)	2 x 55
Lämmitykset luukuille (3 luukkua)	3 x 20
Vuotovesipumppu	1 x 30
Valaistus ja muu kiinteistötekniikka	5
Pielirautamuuntajat (2 kpl)	2 x 30 kVA
Yhteensä	265

Tehon tarpeen perusteella 315 kVA:n muuntaja padon sähköistyksen tarpeisiin on ehkä juuri ja juuri riittävä, mutta näin rajatapauksessa on parempi valita porrasta isompi 500 kVA:n muuntaja. Isomman muuntajan valinnalla ehkäistään myös mahdollisia moottorien käynnistysongelmia. Kytkentäryhmä on järkevää olla jakelumuuntajissa yleinen Dyn11 ja kaikkiin omakäyttömuuntajiin kannattaa tilata väliottokytkin. Väliottokytkin vähintään kolmiasentoinen tai jos saatavana on viisiasentoinen kytkin, niin aina parempi.

Omakäyttökeskuksen nimellisvirraksi saadaan 1600 A, arvoilla 1000 kVA ja 400 V. Vastaavasti padolla olevan pääkeskuksen nimellisvirraksi 800 A, arvoilla 500 kVA ja 400 V. Pääkeskuksiin kannattaa valita keskijännitekojeistojen tapaan ulosvedettävät katkaisijat (vaunukatkaisijat) käytettävyyden parantamiseksi. Ao. katkaisijoihin on saatavana kombinoituja suojaareita virtamuuntajalla. Katkaisijoiden yhteydessä on hyvä olla myös maadoituserotin. Se helpottaa huoltotilanteita. Lisäksi tulisi laittaa kaikkiin katkaisijalähtöihin myös virtamuuntajat mittauskytkennällä. Siihen kytkeytyvästä virtamittarista on helppo seurata kuormituksia. Virtamuuntajien ensiövirta on 1500 A ja taakaksi riittää 5 VA. Lisäksi tässä yhteydessä on myös jännitteenmittaus, ei varsinaisella jännitemuuntajilla vaan kevyemmällä ratkaisulla. Keskuksien pääkiskoon kannattaa laittaa myös maadoituserotin ja jännitteenmittaus.

Koska omakäyttö- ja patokeskus ovat suhteellisen suurivirtaisia keskuksia ja laitoksen toiminnan kannalta tärkeässä asemassa, niin on järkevää järjestää valokaarisuojaus

kumpaankin keskukseen. Suojaus koostuu valoantureista pääkiskon molemmissa päissä ja kaikissa kaapelitiloissa sekä valokaarisuojareleestä.

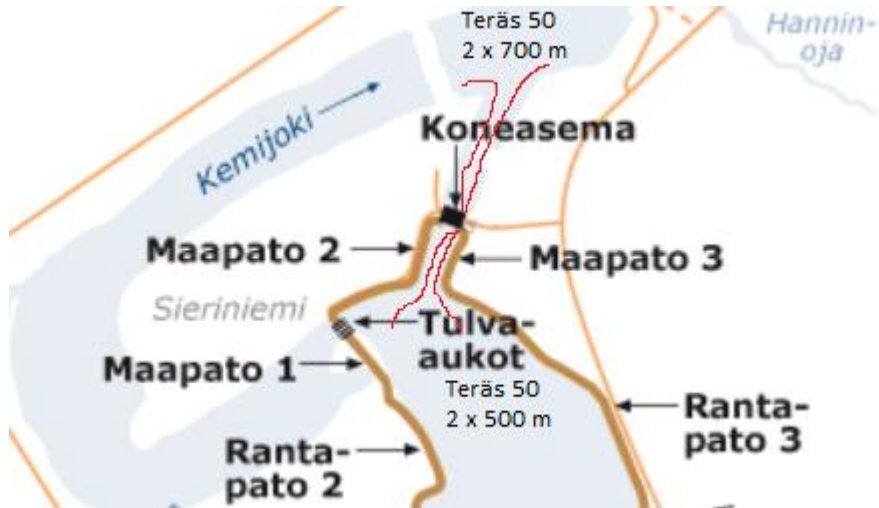
Kaikilta omakäyttömuuntajilta pääkeskuksille on nelijohdinjärjestelmä eli 3L + PEN. Nyt kyse on PEN-johtimesta eli siinä nollajohdin N ja suojamaadoitusjohdin PE ovat yhdistetty. Suojajohtimen poikkipinnan pitää olla puolet äärijohtimen poikkipinnasta, jos suojajohdin on tehty samasta metallista kuin äärijohtimet ja äärijohtimen poikkipinta on yli 35 mm². (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2010: 283, 300–304.) Tämän säännön perusteella valitaan AXMK-kaapelit OKM 1 muuntajalta omakäyttökeskukselle 2 x 800 mm² vaihetta kohti ja lisäksi 1 x 800 mm² PEN-johtimeksi. Näin edellä esitetty vaatimus suojajohtimen poikkipinnasta on täytetty. Huomattavaa on, että omakäyttömuuntajan tähtipistettä eli nollanapaa ei nyt maadoiteta.

Käyttäen aiemmin tässä työssä esitettyjä kaavoja ja liitteen 1 taulukoita, voidaan todeta laskelmien perusteella voimalaitoksen päämaadoituselektrodiksi riittävän 2400 metriä 50 mm² teräsköyttä. Teräsköysi on vesivoimalaitoksilla yleisempi päämaadoituksena kuin kupari.

Päämaadoituselektrodi on käytännössä paras toteuttaa kahdella 700 metrin pituisella haaralla alakanavaan ja kahdella 500 metrin haaralla yläkanavaan. Köydet upotetaan 0,1 metrin syvyyteen Kemijoen pohjaan. Näin potentiaalit (kosketusjännitteet) maasulkuutilanteessa pysyvät mahdollisimman pieninä ja myös jonkin elektrodihaaran katkeaminen ei romahduta maadoituskapasiteettia. Rakentamisvaiheessa useiden haarojen toteuttaminen kerralla on edullista, mutta jälkikäteen korjaaminen tai uuden elektrodin asentaminen on työläämpää. Seuraavalla sivulla on havainnollistava kuva toteutustavasta.

Toinen vaihtoehto toteuttaa päämaadoituselektrodi on rakentaa se maapatojen sisälle. Käytännössä se tapahtuisi maapatoihin 2 ja 3, jotka näkyvät kuvassa 31. Jos käytetään elektrodin kokonaispituutena 1500 metriä ja huomioidaan joen pohjan mudan vaihtuminen padon multaan, saadaan hyvin lähelle sama tulos ensimmäisen toteutusvaihtoehdon

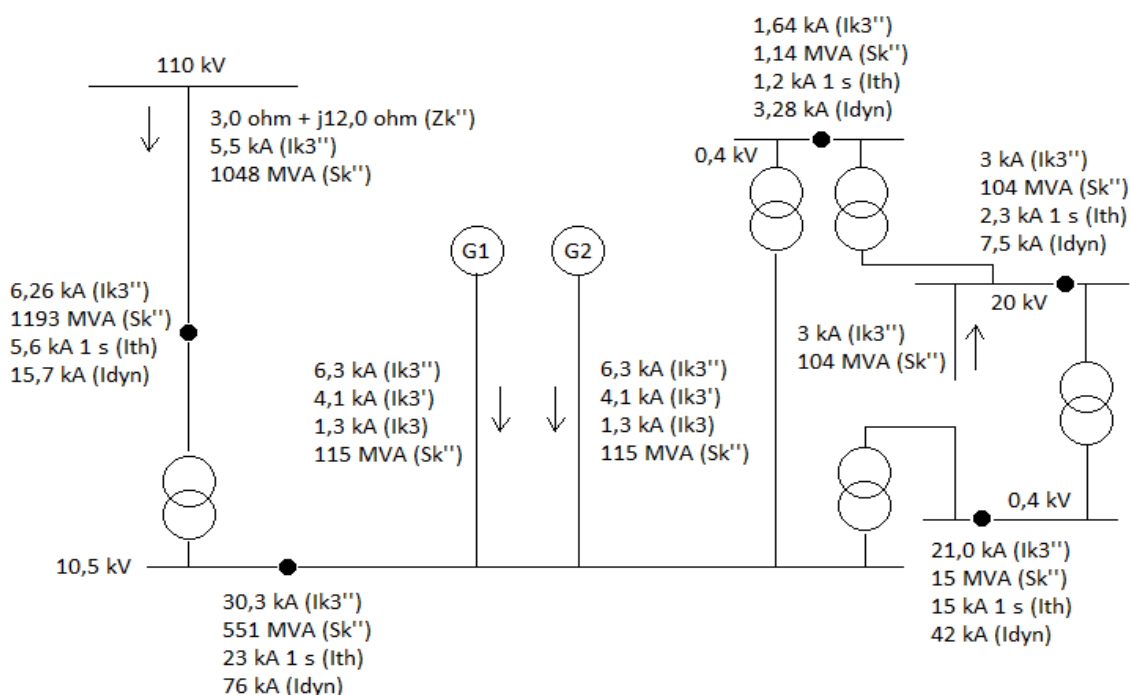
kanssa. Maasulussa potentiaalit pysyvät pieninä. Elektrodin materiaali ja vahvuus samat kuin edellä eli 50 mm² teräsköysi. Suositus on rakentaa päämaadoitus maapatojen sijasta joen pohjaan. Elektrodin vahingoittumisen todennäköisyys on joessa pienempi.



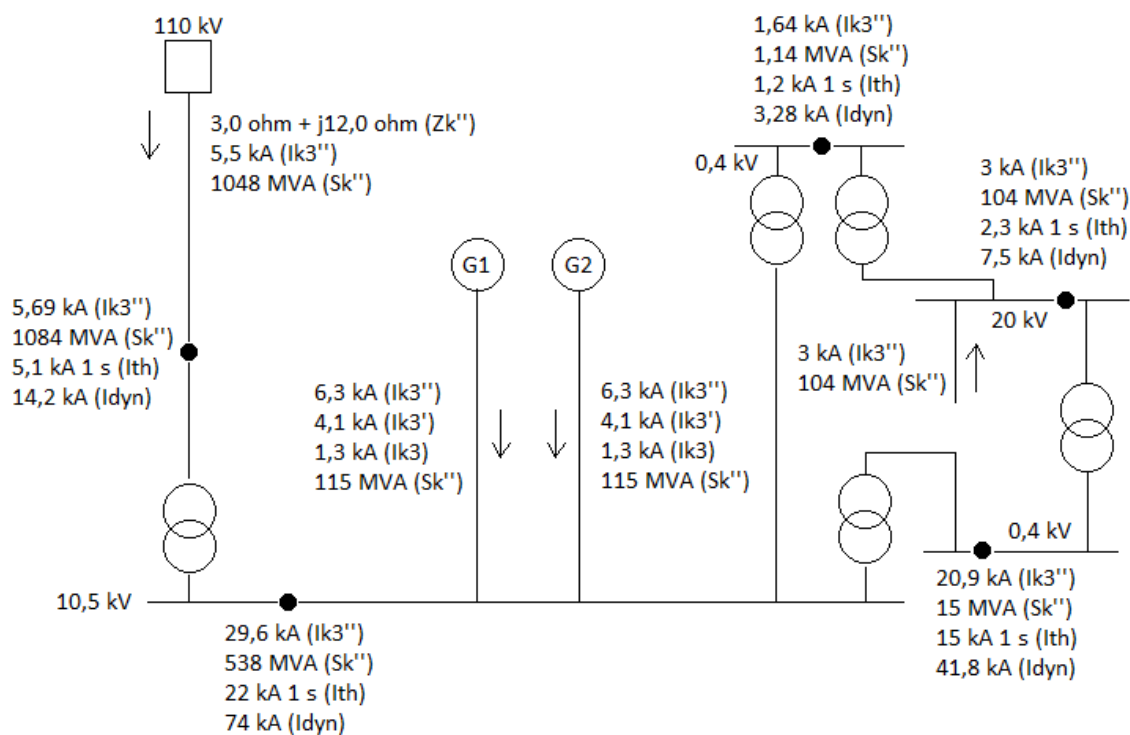
Kuva 31. Päämaadoituselektrodin toteutusperiaate (karttapohja: Kemijoki 2012a).

5.4 Lasketut vikavirrat

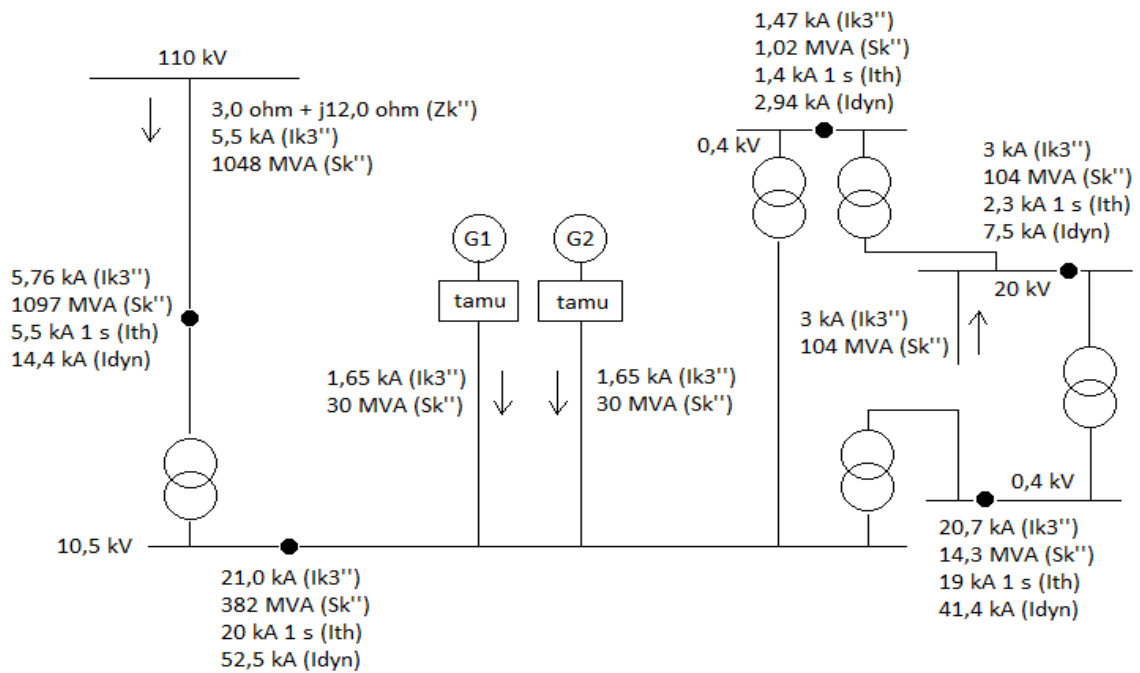
Seuraavissa kuvissa 32–36 on esitetty pääkaavioiden 1, 2 ja 3 oikosulkuvirrat sekä virtojen avulla lasketut muut arvot. Vikavirtalaskut on tehty aiemmin tässä työssä esitettyjä yhtälöitä 1–7 hyväksikäyttäen. Kuvissa nuoli tarkoittaa oikosulkuvirtaa syöttävää lähdettä (110 kV:n taustaverkko, generaattorit ja Rovakairan verkko). Musta piste tarkoittaa, että jos sen kohdalla sattuisi kolmivaiheinen oikosulku, oikosulkuarvot olisivat pisteen läheisyydessä ilmaistujen lukujen mukaiset.



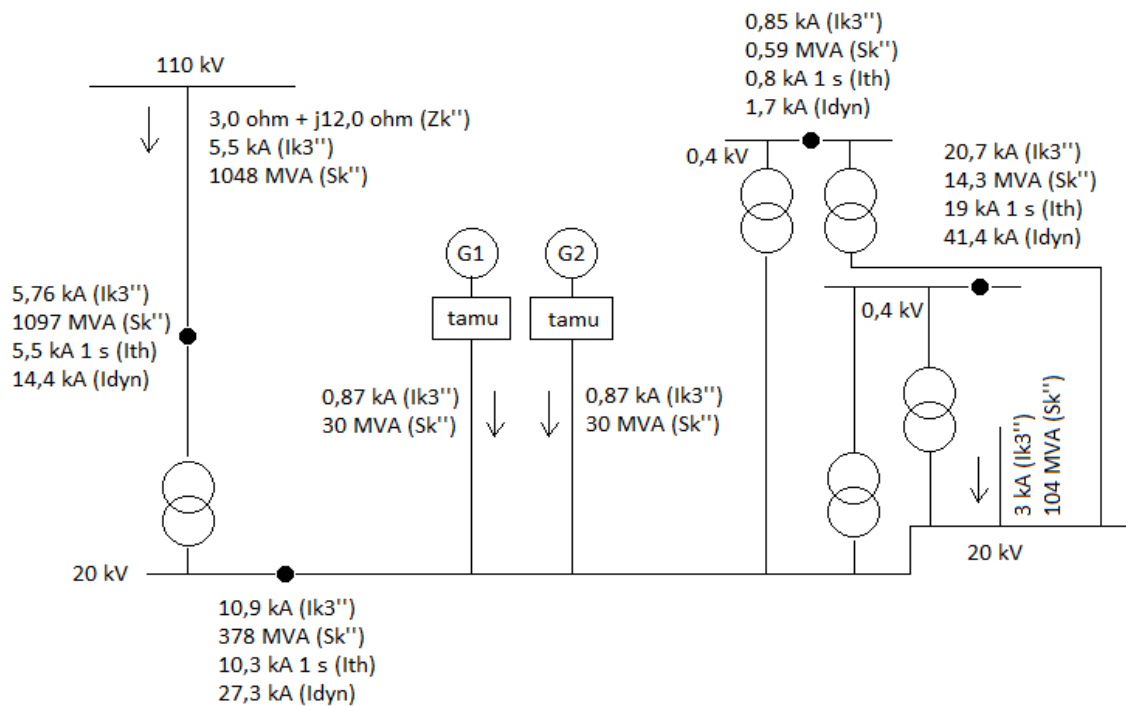
Kuva 32. Oikosulkuarvot pääkaavioon 1A.



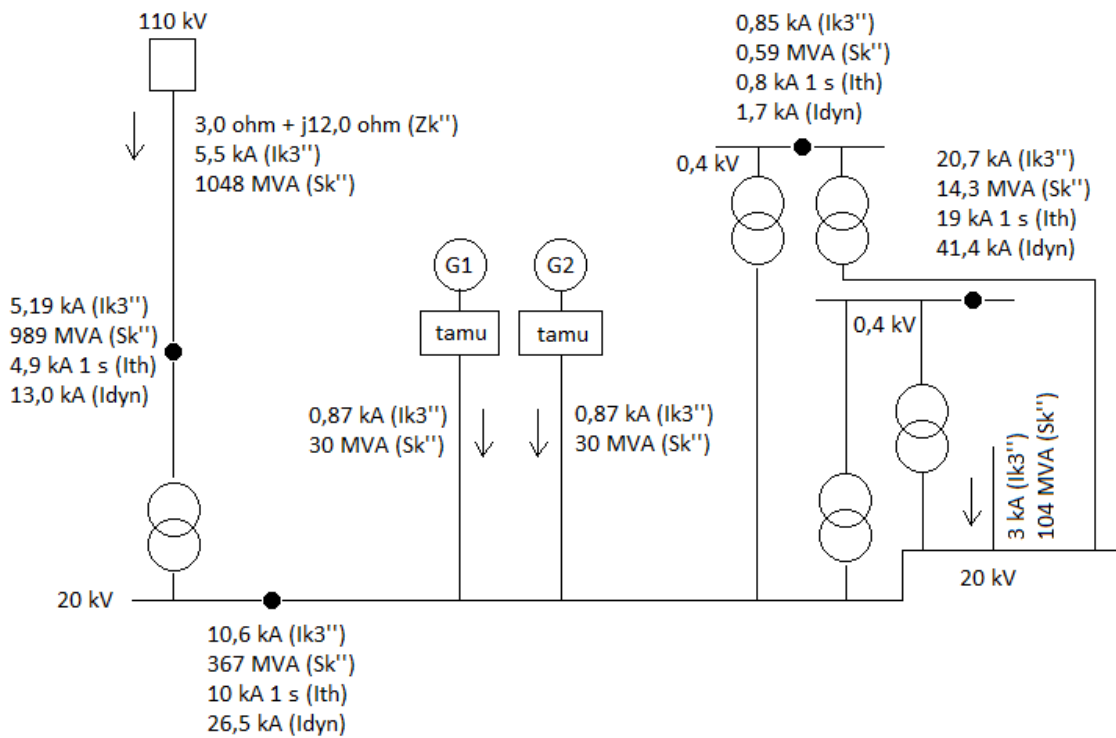
Kuva 33. Oikosulkuarvot pääkaavioon 1B.



Kuva 34. Oikosulkuarvot pääkaavioon 2.



Kuva 35. Oikosulkuarvot pääkaavioon 3A.



Kuva 36. Oikosulkuarvot pääkaavioon 3B.

Seuraavissa taulukoissa 4–8 on esitetty lasketut termiset oikosulkuvirrat samaisiin vika- paikkoihin kuin edellisissä kuvissa. Virrat on laskettu kaikkiaan kymmenelle eri vian- laukaisuajalle yhtälöä 7 ja kuvien 23 ja 24 käyriä hyväksikäyttäen.

Taulukko 4. Termiset oikosulkuvirrat pääkaavioon 1A.

Aika [s]	Terminen oikosulkuvirta [kA]				
	110 kV	10,5 kV	20 kV	Omak.	Patok.
0,01	1,0	4,9	0,5	3,0	0,2
0,02	1,3	6,5	0,6	3,8	0,3
0,05	1,9	8,9	0,9	5,2	0,4
0,1	2,3	11	1,1	6,7	0,5
0,2	3,0	14	1,3	8,7	0,7
0,5	4,3	18	1,8	12	0,9
1,0	5,6	23	2,3	15	1,2
2,0	7,5	28	2,8	19	1,5
5,0	11	38	3,7	26	2,0
10	14	47	4,6	33	2,5

Taulukko 5. Termiset oikosulkuvirrat pääkaavioon 1B.

Aika [s]	Terminen oikosulkuvirta [kA]				
	110 kV	10,5 kV	20 kV	Omak.	Patok.
0,01	0,9	4,8	0,5	3,0	0,2
0,02	1,2	6,3	0,6	3,8	0,3
0,05	1,7	8,7	0,9	5,2	0,4
0,1	2,1	11	1,1	6,7	0,5
0,2	2,7	13	1,3	8,7	0,7
0,5	3,9	18	1,8	12	0,9
1,0	5,1	22	2,3	15	1,2
2,0	6,8	28	2,8	19	1,5
5,0	9,9	37	3,7	26	2,0
10	13	46	4,6	32	2,5

Taulukko 6. Termiset oikosulkuvirrat pääkaavioon 2.

Aika [s]	Terminen oikosulkuvirta [kA]				
	110 kV	10,5 kV	20 kV	Omak.	Patok.
0,01	0,9	3,4	0,5	3,0	0,2
0,02	1,2	4,5	0,6	3,8	0,3
0,05	1,7	6,3	0,9	5,2	0,4
0,1	2,2	7,9	1,1	7,0	0,5
0,2	2,8	10	1,3	9,4	0,7
0,5	4,1	15	1,8	14	1,0
1,0	5,5	20	2,3	19	1,4
2,0	7,4	27	2,8	26	1,9
5,0	11	41	3,7	40	2,8
10	15	56	4,6	55	3,9

Taulukko 7. Termiset oikosulkuvirrat pääkaavioon 3A.

Aika [s]	Terminen oikosulkuvirta [kA]			
	110 kV	20 kV	Omak.	Patok.
0,01	0,9	1,8	3,0	0,1
0,02	1,2	2,3	3,8	0,2
0,05	1,7	3,3	5,2	0,2
0,1	2,2	4,1	7,0	0,3
0,2	2,8	5,3	9,4	0,4
0,5	4,1	7,7	14	0,6
1,0	5,5	10	19	0,8
2,0	7,4	14	26	1,1
5,0	11	21	40	1,6
10	15	29	55	2,3

Taulukko 8. Termiset oikosulkuvirrat pääkaavioon 3B.

Aika [s]	Terminen oikosulkuvirta [kA]			
	110 kV	20 kV	Omak.	Patok.
0,01	0,8	1,7	3,0	0,1
0,02	1,1	2,3	3,8	0,2
0,05	1,5	3,2	5,2	0,2
0,1	1,9	4,0	7,0	0,3
0,2	2,5	5,1	9,4	0,4
0,5	3,7	7,5	14	0,6
1,0	4,9	10	19	0,8
2,0	6,7	14	26	1,1
5,0	10	21	40	1,6
10	14	28	55	2,3

Pääkaavioihin on merkitty kojeistojen ja keskusten pääkiskojen viereen sähköiset arvot. Esimerkiksi pääkaaviossa 1A on 10,5 kV, 3000 A, I_{th} 31,5 kA 1 s ja dyn 76 kA. 10,5 kilovoltia tarkoittaa jännitettä, joka pääkiskoissa normaalisti on eli käyttöjännitettä. 3000 A on nimellisvirta pääkiskoissa eli se virta, jonka niiden pitää jatkuvassa kuormituksessa kestää. 31,5 kA 1 s on termien oikosulkuvirtakestoisuus. Laskettu arvo on

selvästi tätä pienempi (23 kA 1 s). 76 kA on dynaaminen oikosulkuvirta, joka on laskettu arvo.

5.5 Pohdintaa pääkaavioista

Ohituserotin

110 kV:n kytkinkentälle voisi ajatella hankittavan ohituserottimen, joka ohittaisi katkaisijan. Kaikkiin kolmeen pääkaavioon ohituserotin on piirretty näkyviin. Kyseinen erotin vaatii kytkinkentältä oman tilansa, mutta toisaalta se mahdollistaa laitoksen käyttämisen esimerkiksi katkaisijan rikkoutuessa tai sitä huollettaessa.

Vaihtoehto ohituserottimelle on hankkia varastoon varakatkaisija. Katkaisijarikon sattuessa katkaisijan vaihtaminen on tunteja vaativa työrupeama ja silloin laitos ei voi tuottaa sähköä verkkoon. Sama tilanne on myös katkaisijan rutiinihuollon aikana. Ohituserottimen käyttö hieman hankaloittaa liittymisjohdon suojausta, mutta mahdottomaksi se ei mene. Ymmärtääkseni Valajaskoskelta Permantokosken suuntaan oleva distanssisuojaus pystyy suojaamaan myös Sierilän liittymisjohtoa (jos liittytä toteutetaan runkojohdolle). Suojausvyöhykkeet yltyvät liittymisjohdon suojaksi hyvin, koska liittymisjohdon pituus 1,6 kilometriä on lyhyempi kuin matka liittymispisteestä Permantokoskelle (noin 5 km).

Ratkaisevaksi tekijäksi ohituserottimen ja varakatkaisijan valinnan välille jää kustannukset. Katkaisijat ovat kalliita komponentteja. Yksi 110 kilovoltin katkaisija on arvoltaan kymmeniä tuhansia euroja. Ohituserotin ja sen rakentaminen on katkaisijan arvoon verrattuna noin puolet huokeampi. Myös Kemijoki-yhtiön käyttökeskusta johtava henkilö on myötämielinen ohituserottimelle. Näillä perusteilla ohituserotin on Sierilän kytkinkentälle perusteltu hankinta.

Kiskokatkaisija ja mahdollinen varasyötön esto

Pääkaavioissa 3A ja 3B on vain yksi 20 kV:n kojeisto. Kojelistossa kiskokatkaisija yhdistää kojeiston niin sanotun käyttöpuolen ja varapuolen. Kiskokatkaisijakenttään ei mielestäni tarvita suojarlettä laisinkaan. Riittää, että katkaisijaa voidaan ohjata paikalla napista kiinni ja auki sekä ohjaus tietysti kaukokäytöllä. Koska laitoksen sähköä ei ole tarkoitus syöttää Rovakairan 20 kilovoltin verkkoon, kiskokatkaisijan (+07) ja kentän +10, SYÖTTÖ ROKA, välille voisi rakentaa eston. Kiskokatkaisijan auki ja kiinni apukoskettimet johdotettaisiin Rovakairan verkkoon yhteydessä olevan kentän suojarleen sopiviin liittimiin (digital input). Suojarleen konfiguroinnissa asia tulee ottaa huomioon. Rele saa laittaa kentän +10 varasyötön katkaisijan kiinni automaattisesti vain silloin, kun

- kiskokatkaisija kentässä +07 on auki ja
- jännitettä ei tule kentän +02 jännitemuuntajilta.

Jännitteen mittaustiedon voisi tuoda siis kentän +02 jännitemuuntajilta ja myös kentästä +08. Jos kentän +02 jännitemuuntajilla ei ole jännitettä, tarkoittaa se sitä, että sähköä ei myöskään ole käytettävissä omakäyttökeskukselle eikä padolle. Rovakairan varayhteyttä siis tarvitaan.

20 kilovoltin varayhteyden käyttötapa

Varayhteyden käyttötavaksi voidaan ajatella kolme vaihtoehtoa riippuen siitä, halutaanko varamuuntajia OKM 3 ja 4 pitää tyhjäkäynnillä eli nopeassa käyttövalmiudessa vai sähköttömänä.

Vaihtoehto 1

Pidetään muuntajien OKM 3 ja 4 ensiöpuoli jännitteisenä eli ne ovat silloin tyhjäkäynnillä. Tällöin varasyötön katkaisija on kokoajan kiinni ja muuntajien tyhjä-

käyntihäviöt näkyisivät energiamittareissa. Kemijoki Oy:lle muodostuu kustannuksia.

Vaihtoehto 2

Pidetään muuntajat OKM 3 ja 4 kylmänä eli sähköttömänä. Tällöin säästetään Rovakairan laskussa, mutta nyt varayhteyden käyttövalmius on hitaampi.

Vaihtoehto 3

Pidetään muuntajia OKM 3 ja 4 tyhjäkäynnillä takasyötön kautta eli sähkö tulisi muuntajille omakäyttö- ja patokeskuksen kautta. Tämä vaihtoehto ei ole suositeltava.

Paras näistä vaihtoehtoista on kakkonen. Tällöin ei käytetä rahaa tyhjäkäyntihäviöihin, ja varsinkin jos valitaan kuivamuuntajat, pitkäaikainen sähköttömänä seisominen ei ole kuivamuuntajille niin haitallista kuin öljytäytteisille muuntajille.

Vaihtoehto öljytäytteisille omakäyttömuuntajille

Jakelumuuntajat ovat yleensä normaaleja öljytäytteisiä muuntajia. Muuntajat on tarkoitettu käytettäväksi ja silloin kun öljymuuntaja seisoo sähköttömänä jopa useita vuosia, niin se voi muuttua käyttökelvottomaksi. Öljyn sekaan kertyy ajan mittaan kosteutta, joka heikentää sen ominaisuuksia. Ratkaisu voisi olla käyttää öljyttömiä (valuhartsieristeisiä) kuivamuuntajia erityisesti varasyöttöjen OKM 3 ja 4 tapauksissa.

Liittyminen sähköverkkoon

110 kV:n verkko, johon Sierilä liittyy, on sammutettua verkkoa. Runkojohdolla Valajaskoski–Permantokoski on jälleenkytkennät käytössä. Eroonkytkentäreleistys on jo yleisten liittymisehtojen pohjalta vaadittava toiminto. Eroonkytkentä pitää tapahtua pi-

kajalleenkytkennän jännitteettömänä väliaikana. Eroonkytkennän voisi ainakin periaatteessa järjestää siten, että Valajaskoskelta tulisi viestiyhteyksien kautta tieto, että PJK on tapahtunut ja silloin Sierilän 110 katkaisija aukeaisi ennen kuin Valajaskoskella menee katkaisija takaisin kiinni. Riippuu tekniikasta, tuleeko viesti Valajaskoskelta Sierilään riittävän nopeasti.

Sierilän 110 kV katkaisijan sijoittuminen

On tullut esille ajatus, että Sierilän 110 kV:n avokytkinlaitoksen katkaisijan voisi sijoittaa myös muualle kuin nyt suunniteltuun perinteiseen paikkaan. Jos voimalaitoksen liittymistä toteutettaisiin runkojohtoon, katkaisija voisi periaatteessa olla myös liittymisjohdon ja runkojohdon liittymispisteessä. Näin laukaistaessa liittymisjohdolla oleva vika, runkojohto ja Permantokosken laitos jatkaisivat toimintaansa periaatteessa ilman katkoa. Jos liittymistä tehdään Permantokosken kytkinasemalle, on ehkä tarpeetonta rakentaa kahta 110 kV:n katkaisijaa liittymisjohdon päihin. Koska liittymisehtojen mukaan liittymistä kytkinasemalle pitää tehdä katkaisijakentän välityksellä, liittymisjohdon Sierilän pään 110 kV:n katkaisijasta voitaisiin luopua. Tämän katkaisijan tehtävät siirtyisivät päämuuntajan alajännitepuolen eli kojeiston kentän +01 katkaisijalle ja suunniteltu ohi-tuserotin olisi tarpeeton. Ratkaisun haittapuoli on, että jouduttaisiin rakentamaan tietoliikenneyhteys suojauskien (päämuuntajan differentiaalisuojaus ja liittymisjohdon suojaus) toimivuuden vuoksi Sierilän koneasemalta Permantokosken 110 kV:n katkaisijalle. Sierilän 110 kV:n katkaisijan poisjättäminen on siis pohdinnan perusteella mahdollista, mutta kovin yleinen ratkaisu se ei ole.

Padon sähkönsyöttö

Padon sähkönsyöttö tulee olla patoturvallisuussyistä mahdollisimman luotettava. Yksi syöttöratkaisu ei riitä, vaan syöttöjä pitää olla kaksi. Kolme syöttöä ei kuitenkaan ole enää perusteltua. Pato sähköistetään ensisijaisesti koneasemalta ja varalla voisi olla yhteys paikalliseen pienjänniteverkkoon. Koska Sierilästä ei ole pienjänniteliittymää suunnitteilla Rovakairan verkkoon, täytyy padon kaksoissyöttö ratkaista käyttäen 1–

2 kpl 20 kV:n kaapelia ja 1–2 kpl muuntajia. Lisäksi hätävaravaihtoehtoja ovat riittävän iso akusto ja siirreltävä, polttomoottorikäyttöinen hätäyksikkö. Hätäyksiköllä ei tehdä sähköä, vaan siinä polttomoottori pyörittää hydraulikkapumppua, joka yhdistetään letkuilla suoraan padon luukkujen hydraulikkasyntereihin.

Suurin kustannussäästö saataisiin luopumalla toisesta patoa syöttävästä muuntajasta. Myös puistomuuntamokoppi olisi pienempi ja edullisempi. Tällöin kahta 20 kV:n kaapelia käytettäessä tarvitaan jonkinlainen kaukokäyttöinen kuormanerotin puistomuuntamon yhteyteen, jolla vaihdellaan syöttösuuntaa tarpeen vaatiessa. Toista 20 kV:n kaapeleista en poistaisi, koska jos yksi ainoa kaapeliyhteys vioittuu, se on hidas korjattava. Toisaalta hätäkäyttöä varten varattu akusto vaatii säännöllistä huoltoa ja sitä ei kuitenkaan välttämättä tarvita vuosikausiin. Suositus on toteuttaa padon sähköistys ensisijaisesti pääkaavioiden mukaisesti kahdella muuntajalla ja kahdella 20 kV:n kaapelilla. Suuremman sähkönsyöttöhäiriön aikana voidaan käyttää siirreltävää hätäyksikköä. Jos on tarvetta välttämättä säästää jostain, niin toinen patoa syöttävistä muuntajista voidaan jättää pois. Jos mahdollista, kahdet 20 kV:n kaapelit olisi suotavaa sijoittaa jokipenkelelle eri kaivantoihin, jotta ne kummatkin eivät todennäköisesti vaurioidu yhtäaikaaisesti.

Taajuusmuuttajakäytön näkökohtia

Taajuusmuuttajakäytön etuja ovat laitoksen parempi hyötysuhde, pienemmät ja edullisemmat generaattorit sekä turbiinien optimaalisempi käyttö. Taajuusmuuttaja hoitaa generaattorien suojauksen ja ohjauksen, joten se yksinkertaistaa laitoksen automaatiota. Loistehon kompensointia ei tarvita. Taajuusmuuttajaa voidaan käyttää myös alennetulla teholla yhden tyristorisillan rikkoutuessa. Haittapuoleksi voidaan lukea saarekekäyttöön soveltumattomuus. Toki, jos läheinen Permantokosken laitos on käynnissä, niin silloin saarekekäyttö Sierilän ja Permantokosken yhteistyönä on mahdollista. Tietyissä tilanteissa on kiinnitettävä huomiota myös taajuusmuuttajakäytöllä välitetyn sähkön laatuun. Kahdella tehopuolijohde (IGCT) tyristori- ja muuntajayksiköllä ajettaessa yliaaltosuodatus ei välttämättä toimi. Normaalitylanteessa kumpaankin taajuusmuuttajaan liit-

tyvät kolme, yläjännitepuoleltaan sarjaan kytkettyä 9 MVA:n muuntajaa suodattavat yliaaltoja pois. Vaihe-ero näillä muuntajilla on -20, 0 ja +20 astetta. Yksityiskohtana mainittakoon, että taajuusmuuttajien tulee pystyä ohjaamaan kojeistokatkaisija auki tarpeen vaatiessa, erityisesti jos ARU-yksikköön tulee oikosulku.

Taajuusmuuttajakäyttö kahdelle vesivoimalaitoksen koneistolle vaatii kuusi 9 MVA:n muuntajaa toimiakseen. Koneaseman sisätiloihin ei ole järkevää järjestää tilaa näin suurikokoisille kojeille. Koneaseman viereen tarvitaan maa-alaa arviolta noin 36 m² eli kuusi neliometriä muuntajaa kohden. Taajuusmuuttajakäytön etu keskijännitekojeiston kannalta on pienempi kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Taajuusmuuttaja syöttää oikosulun hetkellä vikavirtaa verkkoon 1,2-kertaa nimellisvirtansa. Tästä johtuen keskijännitekojeisto voidaan ainakin periaatteessa mitoittaa pienemmälle vikavirralla ja ostettaessa se antaa ehkä rahallista säästöä.

5.6 Suositus toteutettavaksi ratkaisuksi

Tehdyistä kolmesta (1, 2 ja 3) pääkaaviosta kakkonen on selvästi epäkäytännöllisin, koska siinä on keskijännitteenä pienempi 10,5 kV ja kojeistoja tarvitaan kaksi. Asianomainen jännitetaso aiheuttaa varsin mittavat kaapeloinnit.

Pääkaaviossa 1 on perinteiset suoravetoiset bulb-koneistot ja pääkaaviossa 3 taajuusmuuttajakäyttöiset koneistot. Perinteistä ratkaisua puoltaa tuttu ja turvallinen tekniikka, toisaalta taajuusmuuttajakäytöllä saadaan merkittäviä etuja kuten laitoksen parempi hyötysuhde, pienemmät ja edullisemmat generaattorit sekä turbiinien optimaalisempi käyttö. Haittapuolena on periaatteellinen soveltumattomuus saarekekäyttöön ja myös työmäärä on Kemijoki Oy:lle suurempi, koska laitoksen käyttäytyminen sähköverkon vikatilanteissa täytyy selvittää. Nähtävissä on, että taajuusmuuttajien tuomat hyödyt ovat haittoja selvästi suuremmat pidemmällä aikavälillä.

Edellä esitetyillä perusteilla edetään pääkaavioon 3.

Jäljelle jää siis pääkaaviot 3A ja 3B. Ero näiden kahden välillä on vain sähköverkkoon liittymisessä. Vaihtoehto 3B on uusien liittymisehtojen pohjalta todennäköisempi, mutta se edellyttää hintavan ja pitkän liittymisjohdon rakentamista Permantokosken kytkinlaitokselle saakka. Liittymisellä suoraan runkojohtoon Valajaskoski-Permantokoski säästetään pitkän liittymisjohdon ja Permantokosken kytkinaseman laajentamisen aiheuttamista kustannuksilta. Liittyminen runkojohtoon edellyttää neuvotteluja Kemijoki-yhtiön ja Fingridin välillä. Suositus toteutettavaksi ratkaisuksi on Fingridin erikoisluvasta huolimatta pääkaavio 3A.

5.7 Muita esisuunnitteluvaiheen asioita

Kaapelien dynaaminen oikosulkukestoisuus

Dynaaminen oikosulkuvirta aiheuttaa mekaanisia voimavaikutuksia. Dynaamisen oikosulkuvirran ollessa esimerkiksi 76 kA pääkaaviossa 1, voi suurin voima olla asennustavasta riippuen noin 21 kilonewtonia metriä kohti. Tämä voimalukema on saatu käytännöllä johtimien välisenä etäisyytenä arvoa 5,4 cm. Lasketun suuruusluokan voimat asettavat tiukat vaatimukset kaapelien ja päätteiden tuennalle. On olemassa nyrkkisääntö, että jos kaapeliasennuksen dynaaminen oikosulkuvirta ylittää 50 kA:a, täytyy asennuksen dynaamiseen kestoisuuteen kiinnittää erityistä huomiota.

Sierilän laitoksen pääkaavioissa 1 ja 2 esiintyy 10,5 kV:n jännitetasolla varsin korkeita, yli 50 kA:n dynaamisia oikosulkuvirtoja. Yksivaihekaapeleita käytettäessä ei tarvita erillisiä oikosulkutukia kaapelin haaroitusalueelle. Sen sijaan kaapelikenkä voi tarvita vahvisteosan, riippuen siitä mikä kenkätyyppi ja sen vahvuus valikoituvat aikanaan kaapelien asennustöiden ollessa ajankohtaisia.

Yksijohdinkaapeleille soveltuu myös käytäntö, jossa ne sidotaan kolmioon erityisen vanteen avulla. Sidosvälien etäisyyksille on olemassa jotain taulukoita ja käytettävissä

olevan vanhan taulukon mukaan 76 kA:n dynaamisella oikosulkuvirralla ja 1 x 800 mm² 10 kV:n kaapeleilla vanteiden suurin sidosväli olisi noin 48 cm. Näin kaapelilyhteydestä tulee 76 kA:n dynaamisen oikosulkuvirran kestävä.

Akustot

Sierilän voimalaitoksen koneasemalle on tarpeen rakentaa kaksi isoa 220 voltin (tai vaihtoehtoisesti kaksi 110 voltin) akustoa. Lisäksi paloilmoinlaitteisto tarvitsee ymmärryksen mukaan oman, 48 V:n akuston. Vaihtoehtoinen jännite tälle on 24 V. Tärkeimmät toiminnot, joita akustoilla hoidetaan, ovat viestilaitteet, suojaukset ja varavalaistus. Koneaseman lisäksi tarvitaan padolle yksi 220 voltin akusto paikallisille viestija suojauslaitteille.

Jos Sierilään päädytään hankkimaan taajuusmuuttajakäyttöiset muuttuvakierroksiset generaattorit, niin taajuusmuuttajalle tarvitaan myös oma akusto. Taajuusmuuttaja tarvitsee akustolla varmennettua sähkönsyöttöä jäähdytystä ja ohjausta varten. ACS 6000 taajuusmuuttajan manuaalin perusteella WCU-yksikkö eli jäähdytys sekä COU-yksikkö eli ohjaus tarvitsevat akkuvarmennettua AC-muotoista sähköä. Akuston lisäksi tarvitaan siis vaihtosuuntaaja. Taajuusmuuttajaa syöttävän akuston kapasiteetti on tarpeen selvittää taajuusmuuttajaa tilattaessa.

Suojauksien selektiivisyys

Selektiivisyys tarkoittaa, että vikatilanteessa vain vikaantunut verkon osa erotetaan muusta verkosta. Sierilässä esimerkiksi liittymisjohdon viasta saisi aueta vain Sierilän 110 kV katkaisija sekä Valajaskosken ja Permantokosken suunnilta katkaisijat siten, että vikaantunut paikka on sähkötön sillä oletuksella, että liitytään runkojohdolle. Vastavasti päämuuntajan viassa muuntaja on tehtävä sähköttömäksi sekä 110 että 10,5/20 kV puolelta. Keskijännitekojeiston viassa tarvitaan sekä generaattorikatkaisijat että kojeistosta päämuuntajalle katkaisija auki. Ja jos vika on esimerkiksi omakäyttömuuntajia syöttävissä kaapeleissa, niin silloin vain se lähtö kojeistosta saa laueta.

Taajuusmuuttajaa käytettäessä niiden kautta tuleva vikavirta on huomattavasti pienempi kuin normaaleilla generaattoreilla. Tulee ajatus, että riittääkö vikavirta laukaisemaan etenkin 110 kilovoltin vioissa, jos viereinen Permantokosken laitos ei ole vian hetkellä toiminnassa. Tähän tulee kiinnittää laitoksen suunnittelun edetessä enemmän huomiota.

6 YHTEENVETO

Vesivoimalla on ollut Suomen sähköistämässä suuri merkitys. Nykyisin vesivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta on 10–20 prosenttia. Vesivoiman ominaisuus on nopea ja helppo säädettävyyttä, mikä yhdessä vesistöjen säännöstelyn kanssa tekee siitä erinomaista säätövoimaa.

Työn tavoite oli käsitellä uuden vesivoimalaitoksen esisuunnitteluvaiheen sähkötekniisiä asioita. Esisuunnitteluvaiheessa oleellista on sähköverkkoon liittyminen noudattaen Fingridin ehtoja ja ottaen huomioon myös teknis-taloudelliset asiat. Pääkaavio on tärkeä osa esisuunnitteluvaihetta, koska sen avulla voimalaitoksen sähköjärjestelmä rakentuu helposti tulkittavaan muotoon. Esisuunnitteluvaiheeseen sisältyy myös voimalaitoksen yleisen tekniikan käsittely unohtamatta nykyisin yleistyvän taajuusmuuttajakäytön mahdollisuutta vesivoimalaitoksissa.

Aluksi työssä käsiteltiin vesivoimalaitosten tekniikkaa. Kaplan-turbiini ja muutamat erilaiset putkiturbiinityypit ovat vesivoimaloiden yleisimmät koneistovaihtoehdot. Kaplan-turbiini on yleinen suuremmilla putouskorkeuksilla ja virtaamilla. Putkiturbiineista eritoten kotelovaihtoehtoa käytetään matalilla putouskorkeuksilla ja pienehköillä virtaamilla. Voimalaitosten generaattorit ja muut oleelliset komponentit ovat kalliita, joten niiden suojaaminen tehokkaasti on tärkeää. Generaattorien suojaaminen on varsin suuri asiakokonaisuus ja huomioon kannattaa ottaa myös tekniikan kehittyminen. ABB on lanseerannut uuden REG630-sarjan suojareleen, joka sopii vesivoimageneraattoreille erinomaisesti. Tekniikkaosiossa käsiteltiin myös ABB:n ACS 6000-taajuusmuuttajan ominaisuuksia sekä taajuusmuuttajaan liittyviä kaapelointeja.

Seuraavaksi työssä oli asiaa sähköverkkoon liittymisestä. Suomen kantaverkosta vastaava Fingrid on laatinut kaikille verkkoon liittyville yhteiset yleiset liittymisehdot ja voimalaitoksille vielä erikseen järjestelmätekniiset vaatimukset. Nämä ovat tärkeitä asiakirjoja sekä uuden vesivoimalaitoksen esisuunnittelussa että myöhemmässäkin

suunnitteluvaiheessa. Näiden lisäksi Fingrid on ohjeistanut relesuojausasioita verkkoon-
sa liittyville.

Luvussa 4 puhuttiin voimalaitoksen esisuunnittelusta ja mitoittamisesta. Esisuunnittelun tärkein asia on pääkaavion laatiminen. Pääkaavio sisältää kaikki oleelliset komponentit voimalaitoksen sähköjärjestelmästä. Eri komponenttien mitoittamisessa on tärkeää, että ne kaikki ovat sekä kuormitus- että vikavirtakestoisia. Suojauksessa on tärkeää, että kaikki pääkaaviossa näkyvät paikat ovat suojattu asianmukaisesti.

Luku 5 käsitteli Sierilän vesivoimalaitosta. Sierilä on Kemijoki Oy:n viimeinen Kemi-
joen pääuomaan sijoittuva voimalaitos. Tähän voimalaitokseen ovat vaihtoehtoina pe-
rinteiset suoravetoiset bulb-generaattorit tai modernit taajuusmuuttajakäyttöiset gene-
raattorit. Luvussa on myös pohdittu pääkaavioihin liittyviä eri vaihtoehtoja.

Työhön laadittiin kolme sähköpääkaaviota, joista liitteissä esitetyistä kaavioista 1 ja 3 on vaihtoehdot A ja B. Pääkaavioiden perusteella voidaan todeta taajuusmuuttajakäytön olevan varteenotettava ja houkutteleva vaihtoehto tavanomaisille suoravetoisille bulb-generaattoreille kunhan taajuusmuuttajiin liittyvät haittapuolet otetaan tarkasti huomi-
oon. Taajuusmuuttajakäytön avulla voidaan optimoida laitoksen käyttöä. Niillä vikavir-
rat jäävät pienemmiksi ja keskijännitteenä voidaan käyttää 10,5 kilovoltin sijasta 20 ki-
lovolttia. Korkeampi jännite yksinkertaistaa kaapelointeja keskijännitetasolla ja helpot-
taa keskijännitekojeiston sähköisiä vaatimuksia. Pääkaavioista ehdottomasti pääkaavio
3 (A tai B) on järkevin toteutettava, jos taajuusmuuttajien käyttöön työssä tehdyn suosi-
tuksen mukaan lopulta päädytään. Työn tavoite käsitellä voimalaitoksen esisuunnittelu-
vaiheen asioita saavutettiin.

Sierilän voimalaitoksen suunnittelun edetessä ja teknisten ratkaisuiden varmistuessa kannattaa kiinnittää huomiota mahdollisen taajuusmuuttajakäytön minimioikosulkuvir-
toihin. Niitä ei tässä työssä käsitelty. Myös Sierilän liittymisjohdon suojaukseen kannat-
taa varata pohdinta-aikaa. Ei kannata myöskään unohtaa jo tässä työssä pohdittuja asioi-
ta kuten ohituserotinta, padon syöttöratkaisua ja omakäyttömuuntajien tekniikkaa.

LÄHDELUETTELO

- ABB Oy (2013). *power 1/13 – ABB Oy:n asiakaslehti*. Helsinki: ABB Oy.
- ABB Oy (1990). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 8. painos. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt. 586 s. ISBN 951-99366-0-2.
- Aura, Lauri & Antti Tonteri (1996). *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. Porvoo: WSOY. 544 s. ISBN 951-0-20167-7.
- Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla (2011). *Sähköverkot II – Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki: Otatieto Oy. 551 s. ISBN 978-951-672-363-4.
- Elovaara, Jarmo & Yrjö Laiho (2005). *Sähkölaitostekniikan perusteet*. 5. painos. Helsinki: Otatieto Oy. 487 s. ISBN 951-672-285-7.
- Energiamarkkinavirasto (2013). *Voimalaitosrekisteri* [Online]. [Viitattu 22.7.2013]. Saatavissa: <URL: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/alasivu.asp?gid=517&pgid=517&languageid=246>>.
- Energiamarkkinavirasto (2006). *110 kV sähköjohdon rakentamislupaneuvottelumenettely ja ympäristöselvitys*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 13.6.2011]. Saatavissa: <URL: http://energia.fi/sites/default/files/100kv_sahkojohdon_rakentamisluvan_hakeminen_ohje_2004.pdf>.
- Esko, Jouko (2010). *Näkökohtia vesivoimageneraattorin taajuusmuuttajakäyttöön*. Vaasan yliopisto. Diplomityö. Sähkötekniikka. 95 s.

Fingrid Oyj (2013a). *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 26.6.2013]. Saatavissa: <URL: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Voimalaitosten%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4tekniset%20vaatimukset%20VJV2013.pdf>>.

Fingrid Oyj (2013b). *Voimansiirtoverkko* [Online]. [Viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <URL: <http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>>.

Fingrid Oyj (2012a). *Yleiset liittymisehdot YLE2013*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 15.1.2013]. Saatavissa: <URL: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/VAHVISTETTU%20-%20Fingrid%20Oyj%20yleiset%20liittymisehdot%20YLE2013.pdf>>.

Fingrid Oyj (2012b). *Relesuojauksen pääperiaatteet*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 25.1.2013]. Saatavissa: <URL: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Relesuojauksen%20p%C3%A4%C3%A4periaatteet.pdf>>.

Fingrid Oyj (2011a). *Johtojen rakenne* [Online]. [Viitattu 27.6.2011]. Saatavissa: <URL: <http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kunnossapito/Sivut/default.aspx>>.

Fingrid Oyj (2011b). *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset uudistuvat*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 29.12.2011]. Saatavissa: <URL: http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Verkkotoimikunta/2011/9.12.2011/2011-12-09%20Verkkotoimikunta%20-%20Voimalaitosvaatimukset%20uudistuvat_.pdf>.

Fingrid Oyj (2011c). *Tutkimus varmisti ukkosjohtimettoman, läpimenevällä maajohtimella varustetun 110 kV voimajohdon turvallisuuden sammutetussa sähköverkossa* [Online]. [Viitattu 30.12.2011]. Saatavissa: <URL: <http://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut%2FTutkimus-varmisti-ukkosjohtimettoman,-1%C3%A4pimenev%C3%A4ll%C3%A4-maajohtimella-varustetun-110-kV-voimajohdon-turvallisuuden.aspx>>.

Fingrid Oyj (2011d). Seminaari: *Ukkosjohtimeton läpimenevällä maajohtimella varustettu 110 kV voimajohto*. Rovaniemi 23.9.2011.

Fingrid Oyj (2007). *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 1.6.2011]. Saatavissa: <URL: http://www.fingrid.fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/VJV2007_koko.pdf>.

Finn Electric Oy (2012). *Kuivamuuntajan asennus- ja käyttöohje*. [Verkkodokumentti]. Finn Electric Oy [Viitattu 31.1.2012]. Saatavissa: <URL: http://www.finnelectric.fi/c/document_library/get_file?uuid=425f3d01-8ad0-414c-8017-ecb51fe4ced9&groupId=214732>.

Haapakoski, Pasi (2011). *Vesivoimalaitosten rakenneratkaisut*. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. 55 s.

IEC 60038. International standard: *IEC standard voltages*. Edition 6.2, 2002-07.

Kauhaniemi, Kimmo (2011). *Opintojakso Sähkön jakelu: Taloudellisuuslaskelmat*. Luentomoniste. Vaasan yliopisto. 20 s.

Kemijoki Oy (2013). *Sierilän voimalaitos* [Online]. [Viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: <URL: http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp_Content1D06E>.

Kemijoki Oy (2012a). *Sierilän voimalaitos – perustiedot* [Online]. [Viitattu 2.1.2012]. Saatavissa: <URL: http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp_ContentC19D1>.

Kemijoki Oy (2012b). *Sierilän voimalaitos – uusiutuvaa, kotimaista, päästötöntä energiaa*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.1.2012]. Saatavissa: <URL: [http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/images/Sieril%C3%A4n%20esite%202006.pdf/\\$FILE/Sieril%C3%A4n%20esite%202006.pdf](http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/images/Sieril%C3%A4n%20esite%202006.pdf/$FILE/Sieril%C3%A4n%20esite%202006.pdf)>.

Kemijoki Oy (2011). *Voimalaitoksen 110 kV liittymisjohto*. PowerPoint-esitys. Kemijoki Oy. 2 s.

Korpinen, Leena (2008). *Sähköverkko-opus - Kanta- ja alueverkot*. [Verkkodokumentti]. Leena Korpinen [Viitattu 27.6.2011]. Saatavissa: <URL: <http://www.leenakorpinen.fi/node/157>>.

Koskinen, Stefanus (2010). *Vesivoimakoneen liittymisjohdon oiko- ja maasulkusuojausten suunnittelu Pirttikosken 20 kV:n kojeistoon*. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. 118 s.

Laaksonen, Hannu (2011). *Opintojakso Sähkön tuotanto ja siirto: Kantaverkon käyttötoiminta*. Luentomoniste. Vaasan yliopisto. 86 s.

Lapinkorpi, Ari (2011). *110 kV:n suurjännitelinjan pylväsmadoitukset ja vaarajännitteet*. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. 77 s.

Lehtonen, Sakari (2009). *Sähköaseman maadoittaminen*. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. 55 s.

Ojakaski, Esa & Tuomas Puranen (2011). *110 kV alueverkon elinkaari*. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka. 83 s.

Paavola, Martti (1975). *Sähköjohdot*. Porvoo: WSOY. 320 s. ISBN 951-0-06635-4.

Pohto Oy (2000). *Suojarelekoulutus*. Moniste. 32 s.

Risku, Mikko (2012). *Suuritehoisen taajuusmuuttajan verkkoliityntä voimantuotannossa*. Aalto-yliopisto. Diplomityö. Sähkötekniikka. 95 s.

Rovakaira Oy (2011). Sähköverkon kartat Oikaraisen kylän ympäristöstä. Julkaisematon.

Sederlund, Jarno & Petri Parviainen (2013). *Kantaverkkoon liittymisen periaatteet*. [Verkkodokumentti]. Fingrid Oyj [Viitattu 25.3.2013]. Saatavissa: <URL: http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Liittymisen_periaatteet_31%201%202013.pdf>.

Seppänen, Janne (2011). *Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet Suomessa*. Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulu. Sähkötekniikka. Diplomityö. 87 s.

Sesko ry (2009). *SFS-käsikirja 601: Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 258 s. ISBN 978-952-242-051-0.

Soudunsaari, Sami (2011). Suunnitteluinsinööri. Haastattelu, Kemijoki Oy:n toimitalo 9/2011. Rovaniemi.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry (2010). *D1-2009 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. Helsinki: Sähköinfo Oy. 386 s. ISBN 978-952-231-004-0.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry (2007). *Maadoituskirja*. Helsinki: Sähköinfo Oy. 176 s. ISBN 978-952-5600-43-8.

LIITTEET

Liite 1. Maadoituksiin liittyvät taulukot.

Maadoituselektrodien vähimmäismitat (Sesko 2009: 89)

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäiskoko				
			Ydinosa			Päällyste/vaippa	
			Halkaisija (mm)	Poikkipinta (mm)	Paksuus (mm)	Yksittäiset arvot (µm)	Keskimääräiset arvot (µm)
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha ²⁾		90	3	63	70
		Profiili (ml.levyt)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakasوران maadoituselektrodin pyöreä johdin	10				50
	Lyijyvaipalla ¹⁾	Vaakasوران maadoituselektrodin pyöreä johdin	8			1000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2000	
	Elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakasوران maadoituselektrodin pyöreä johdin		25 ³⁾			
		Köysi	1,8*	25 ³⁾			
		Putki	20		2		
	tinattu	Köysi	1,8*	25		1	5
	sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla ¹⁾	Köysi	1,8*	25		1000	
		Pyöreä johdin		25		1000	

* köyden yksittäisen johtimen halkaisija

1) ei soveltu upotettavaksi suoraan betonin

2) nauha, valssattu tai leikattu pyörästetyillä reunilla

3) olosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosioriski ja mekaanisen vaurion riski on alhainen, voidaan käyttää poikkipintaa 16 mm²

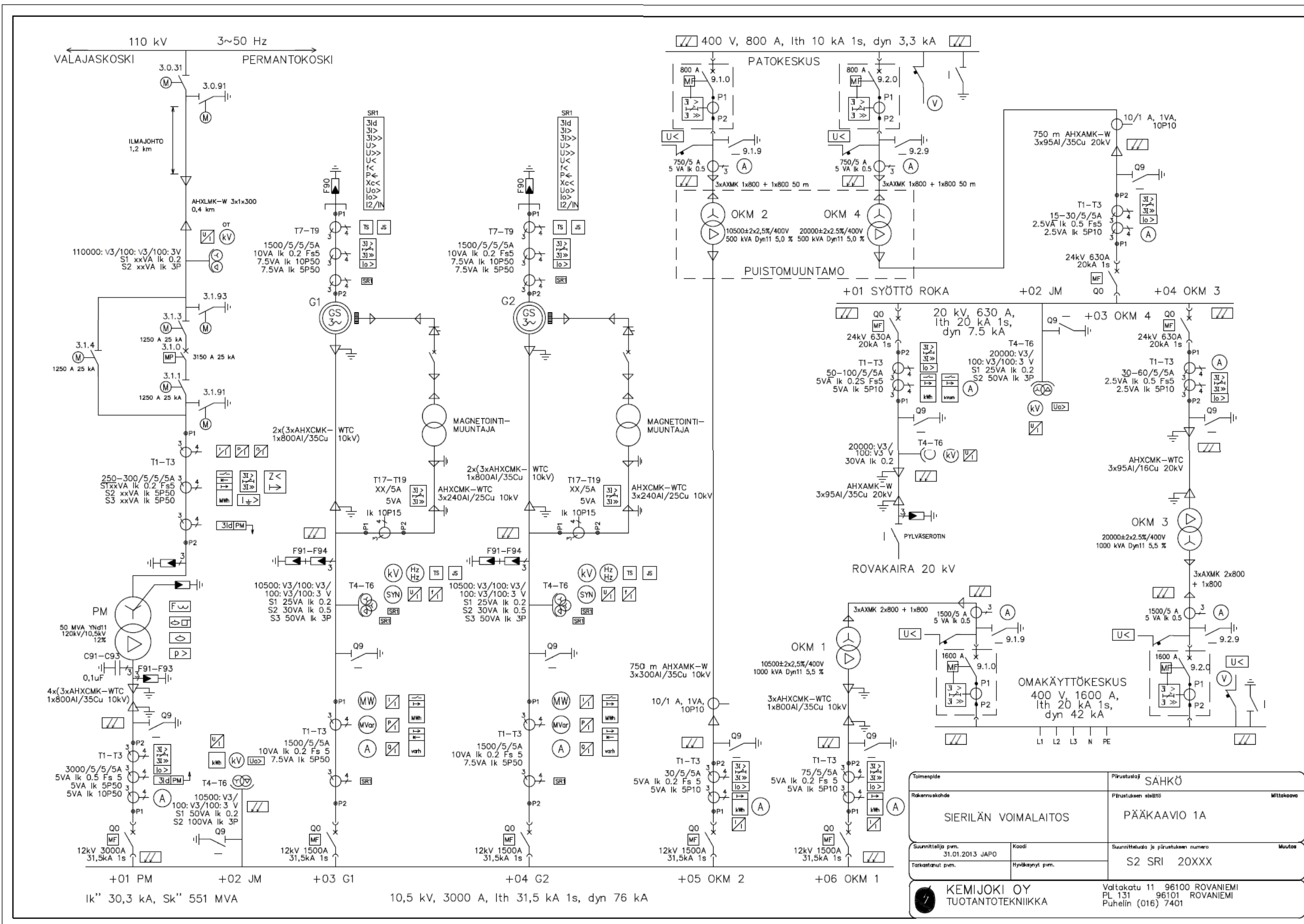
Ominaisresistanssien arvoja (Sesko 2009: 109)

Aine	Ominaisresistanssi/ ohmm	Tavallisimmat vaihtelurajat/ohmm
Savi	40	20... 70
Saven sekainen hiekka	100	40... 300
Lieju, turve, multa	150	50... 250
Hiekka, hieta	2 000	1 000... 3 000
Moreenisora	3 000	1 000... 10 000
Harjusora	15 000	3 000... 30 000
Graniittikallio	20 000	10 000... 50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50... 500
Betoni kuivana	10 000	2 000... 100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100... 400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1... 5

Maadoitusresistanssien yhtälöitä (Sesko 2009: 110)

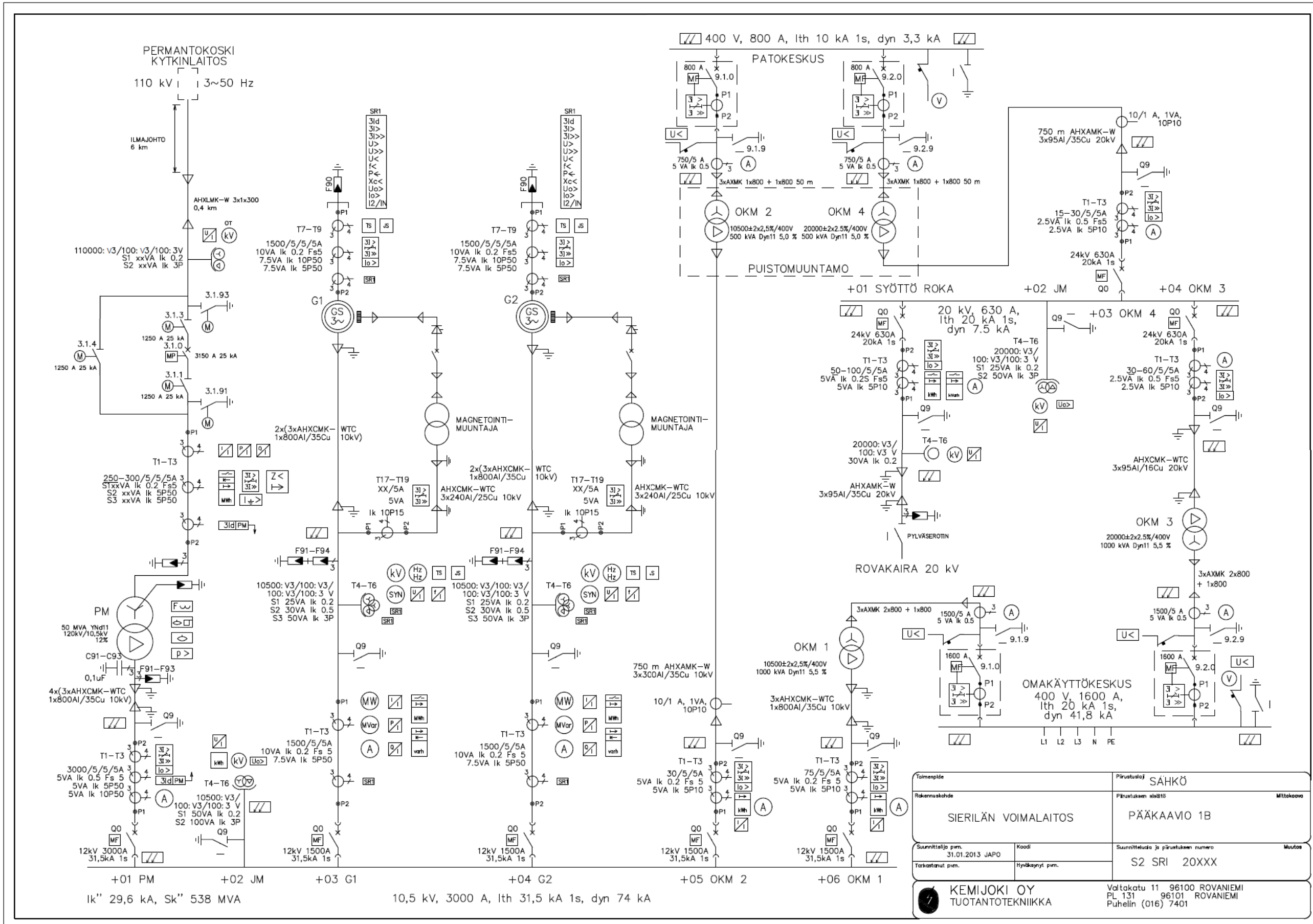
Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Verkko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

Liite 2. Pääkaavio 1A

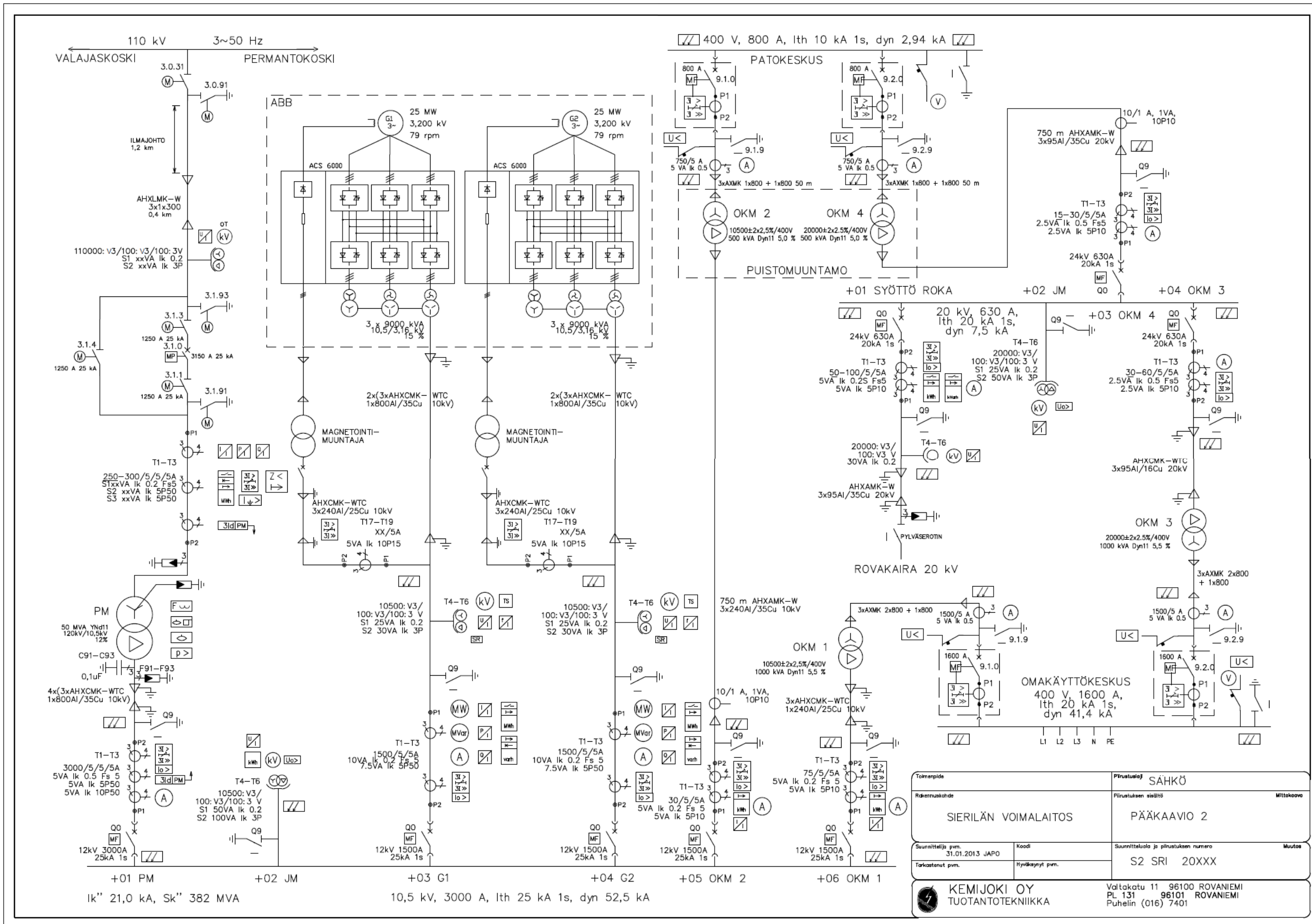


Toimenpide		Päivätyyppi SÄHKÖ	
Rakennusvaihe		Päivätyyppi sähköt	
Sierilän Voimalaitos		Pääkaavio 1A	
Suunnittelija p.m. 31.01.2013 JAPO		Koodi	Suunnittelija ja päivätyyppi numero
Tarkastanut p.m.		Hytäkäytetty p.m.	Muutos
		S2 SRI 20XXX	
KEMIJOKI OY TUOTANTOTEKNIikka		Valtakatu 11 96100 ROVANIEMI PL 131 96101 ROVANIEMI Puhelin (016) 7401	

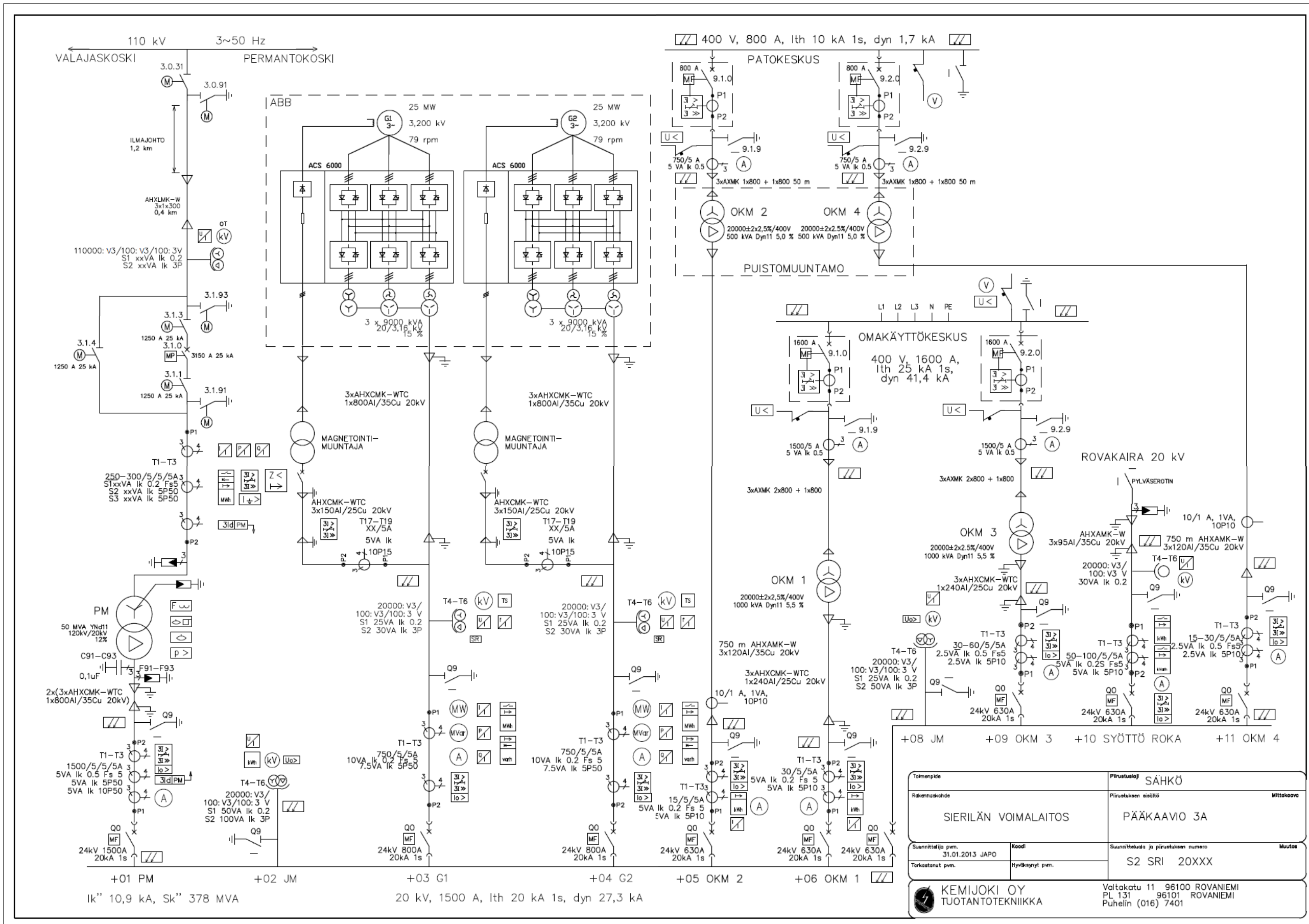
Liite 3. Pääkaavio 1B



Liite 4. Pääkaavio 2

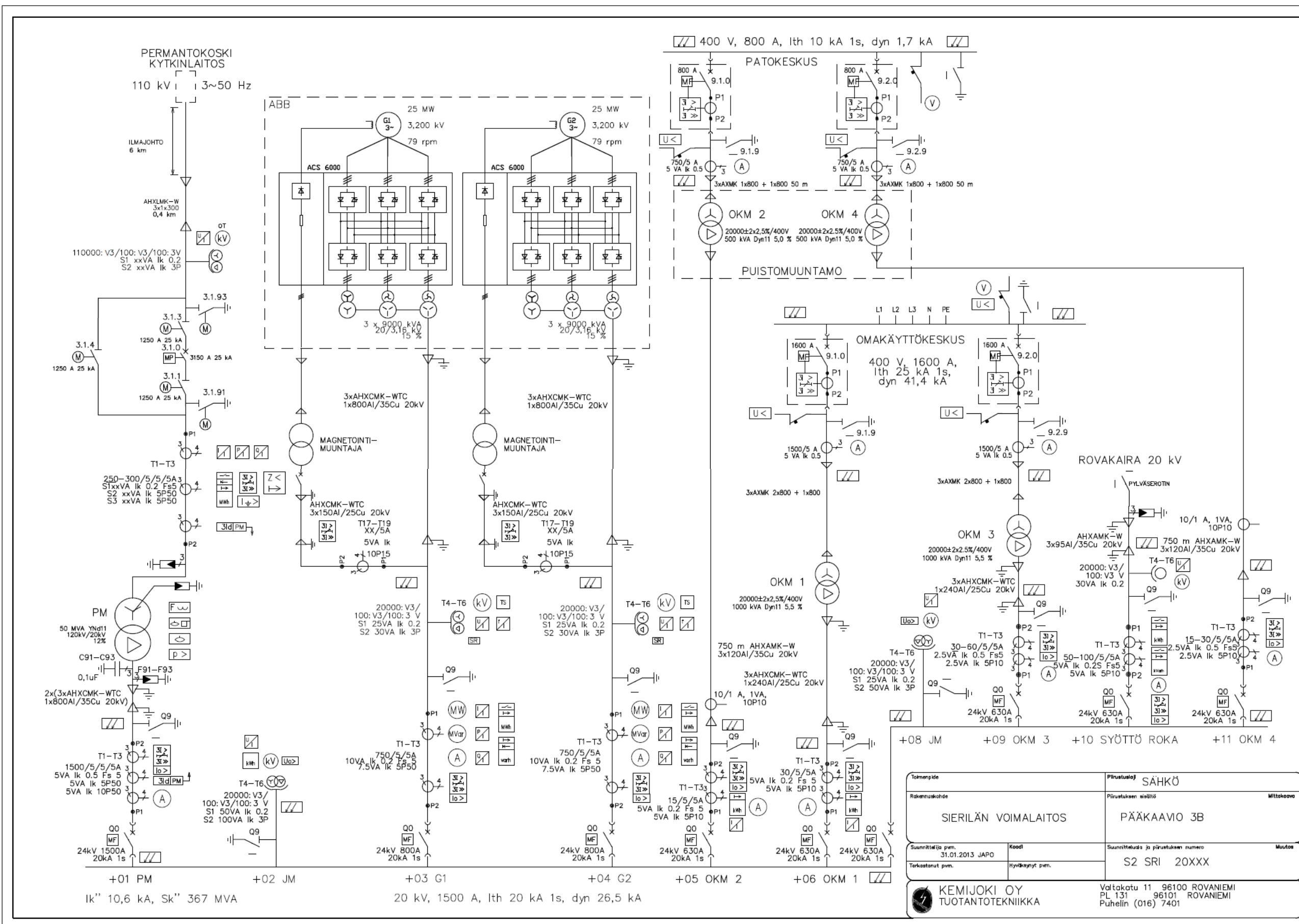


Liite 5. Pääkaavio 3A



Toimenpide		Päivätyyppi	
Rakennuskohde		SÄHKÖ	
SIERILÄN VOIMALAITOS		Päivätyyksen sisältö	
		Mittakaava	
		PÄÄKAAVIO 3A	
Summitöitä pvm.	Koodi	Seuraavaksi ja päivättyjen numero	Muutos
31.01.2013 JAPO			
Tarkastanut pvm.	Hyväksynyt pvm.	S2 SRI 20XXX	
KEMIJOKI OY TUOTANTOTEKNIikka		Valtakatu 11 96100 ROVANIEMI PL 131 96101 ROVANIEMI Puhelin (016) 7401	

Liite 6. Pääkaavio 3B



Törmäpöide		Päiväluoja SÄHKÖ	
Rakennuskohde		Päiväluoksen sisältö	
SIERILÄN VOIMALAITOS		PÄÄKAAVIO 3B	
Suunnittelija pvm.	Koodi	Suunnitelun ja päiväluoksen numero	Muutos
31.01.2013 JAPO		S2 SRI 20XXX	
Tarkastanut pvm.	Hyväksynyt pvm.		
KEMIJOKI OY TUOTANTOTEKNIikka		Valtakatu 11 96100 ROVANIEMI PL 131 96101 ROVANIEMI Puhelin (016) 7401	