

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Otava Koski

KAUKAAN SÄHKÖJÄRJESTELMÄN LIITYNTÄPISTEEN SUOJAUS

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Juha Haakana

Työn ohjaaja: DI Henri Hiltunen

22.6.2023

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Otava Koski

Kaukaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojaus

Diplomityö

2023

83 sivua, 22 kuvaa, 17 taulukkoa ja 5 liitettä

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Juha Haakana

Työn ohjaaja: DI Henri Hiltunen

Hakusanat: teollisuussähköverkko, relesuojaus, eroonkytkentä, alitaajuussuojaus, saarekekäyttö

Tämä diplomityö keskittyy selvittämään UPM:n Kaukaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojaustasoa. Tämän lisäksi työssä tutkitaan Kaukaan alitaajuusreleistyksen toimintaa kuormien irtikytkennässä. Työn tavoitteena on varmistaa, että Kaukaan teollisuussähköverkon toiminta on mahdollisimman turvallista ja luotettavaa vika- ja häiriötilanteissa.

Työn alussa tutustutaan tarkasti Fingridin voimalaitoksille asetettuihin vaatimuksiin ja muihin ohjeisiin kuten alitaajuusreleistyksen toteutukseen. Tällä luodaan tarvittavat reunaehdot voimalaitoksissa käytettävien suojauslaitteiden toimintojen ja aseteluiden arvioimiselle

Tapaustutkimuksessa selvitetään Kaukaan eroonkytkennän ja alitaajuusreleistyksen nykytilannetta. Nykytilanteen arvioinnissa hyödynnetään saatavilla olevaa dokumentaatiota sekä kenttäkierroksia, jotta selvitettiin suojausten nykyiset toiminnot, kytkennät ja asetelut.

Tutkimuksen perusteella saatiin luotua selkeä kuvaus sekä eroonkytkennän suojausten että alitaajuusreleistyksen nykytilanteesta, joihin laadittiin tarkastus- ja muutosehdotuksia. Alitaajuusreleistyksen todettiin täyttävän melkein Fingridin kanssa sovitut alustavat vaatimukset, mutta yksi suoja vielä puuttui. Eroonkytkennän suojaukseen tulisi tehdä myös muutamia lisäyksiä ja asetteluarvojen muutoksia, joilla se saataisiin vaatimusten mukaisiksi.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Otava Koski

Protection of the connection point for the electrical system of Kaukas

Master's Thesis

2023

83 pages, 22 figures, 17 tables and 5 appendixes

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila
 D.Sc. (Tech.) Juha Haakana
Supervisor: M.Sc. (Tech) Henri Hiltunen

Keywords: industrial electrical network, relay protection, disconnecting switch, under frequency protection, island mode operation

This master's thesis focuses on determining the level of protection at the connection point of UPM's Kaukas electrical system. Additionally, the thesis investigates the operation of the under frequency relay system in Kaukas during load disconnections. The objective of this work is to ensure the safety and reliability of the Kaukas industrial electrical network during fault and disturbance situations.

At the beginning of the study, a thorough examination is conducted on the requirements and guidelines set by Fingrid for power plants, particularly regarding the implementation of the under frequency relay system. This establishes the necessary framework for evaluating the functions and configurations of protection relays used in power plants.

A case study is conducted to assess the current status of the disconnection protection and under frequency relay system in Kaukas. The assessment utilizes available documentation and field surveys to examine the current functionality, connections, and configurations of the protection systems.

Based on the case study findings, a clear description of the current state of the disconnection protection and under frequency relay system is presented, along with inspection and modification proposals. The under frequency relay system was found to meet almost all the preliminary requirements agreed with Fingrid, but one protection was still missing. Also, several additions and adjustments to configurations values are recommended for the disconnection protections to meet the specified requirements.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty UPM:n Kaukaan tehtaille aiheesta Kaukaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojaus. Haluan ensin kiittää työn tarkastajaa, apul. prof. Jukka Lassilaa, hänen arvokkaasta panoksestaan työn arvioinnissa ja ohjauksessa. Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajaa, DI Henri Hiltusta, hänen ammattitaidostaan ja tuestaan työn edistymisessä. Hänen neuvojensa avulla olen saanut arvokasta opastusta ja inspiraatiota työn eri vaiheissa.

Haluan myös kiittää kaikkia muita henkilöitä UPM:llä, jotka ovat osallistuneet ja auttaneet tässä tutkimuksessa. Ilman heidän panostaan tämän diplomityön tekeminen olisi ollut mahdotonta

Lopuksi haluan kiittää läheisiäni, ystäviäni ja erityisesti tyttöystävääni heidän jatkuvasta tuestaan ja kannustuksestaan. He ovat olleet rinnallani tämän matkan aikana ja motivoineet jatkamaan eteenpäin.

Toivon, että tämä diplomityö tarjoaa uutta tietoa ja näkemystä Kaukaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojausta koskevissa asioissa. Toivon myös, että työ voi toimia pohjana ja lähtökohtana jatkotutkimuksille ja kehitystoimenpiteille tällä alueella

Lappeenrannassa 22.6.2023

Otava Koski

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tavoitteet	10
1.2 Työn rajausta.....	10
1.3 Työn toteutus	11
2 VAATIMUKSET VOIMALAITOKSILLE.....	12
2.1 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV2018).....	12
2.1.1 Tyypiluokittelu	13
2.1.2 Yleiset vaatimukset	14
2.1.3 Tahtikonevoimalaitosten pätötehon ja taajuuden säätö.....	18
2.1.4 Tahtikonevoimalaitosten loistehokapasiteetti	20
2.1.5 Tahtikonevoimalaitosten jännitteensäätö	22
2.1.6 Tahtikonevoimalaitosten käyttöönottokokeet	23
2.2 Alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa.....	25
2.3 Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaukset	30
2.3.1 Kantaverkon relesuojauksen pääperiaatteet	30
2.3.2 Asiakasliityntöjen relesuojauksella.....	31
2.3.3 Asiakkaan 110 kV liityntä kantaverkon voimajohtoon.....	32
3 TEOLLISUUSVERKKO.....	37
3.1 Sähkönjakelu teollisuusverkoissa	37
3.2 Yleiset teollisuusverkon rakenteet	38
3.2.1 Säteittäinen verkko	39
3.2.2 Rengasverkko	39
3.2.3 Silmukoitu verkko	40
3.3 Saarekekäyttö	41
4 TEOLLISUUSVERKON SUOJAUS.....	42
4.1 Sulakesuojaukset.....	42
4.2 Relesuojaukset	44
4.2.1 Virtarele.....	48
4.2.2 Distanssirele	49
4.2.3 Differentiaalirele	49

4.2.4	Yli- ja alijänniterele.....	50
4.2.5	Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele.....	51
4.3	Suojaus katkaisijalla.....	51
5	KAUKAAN TEHTAAT.....	53
5.1	Kaukaan sähköverkko.....	55
5.1.1	110 kV kytkinlaitokset.....	57
5.2	Nykyisen alitaajuussuojauksen kuvaus.....	59
5.3	Nykyisen eroonkytkennän kuvaus.....	62
5.4	Suojareleiden asettelut.....	64
5.4.1	Kenttä A1-KS1.....	64
5.4.2	Kenttä A1-KS4.....	65
5.4.3	Kenttä A1-KS8.....	67
5.4.4	Kenttä A0-KA1.....	68
5.4.5	Kenttä A0-KA2.....	69
5.4.6	Kenttä A0-KA4.....	69
6	MUUTOSEHDOTUKSET SUOJAUKSEEN.....	73
6.1	Muutosehdotukset alitaajuussuojaukseen.....	73
6.2	Muutosehdotukset liityntäpisteen suojaukseen.....	74
7	YHTEENVETO.....	80
	LÄHDELUETTELO.....	81
	LIITTEET.....	84

LIITE I: Alkuperäiset A1-kytkinlaitoksen suojarele asettelut

LIITE II: Alkuperäiset A0-kytkinlaitoksen suojarele asettelut

LIITE III: Uudet A1-kytkinlaitoksen suojarele asettelut perustuen VJV2018 vaatimukseen

LIITE IV: Uudet A0-kytkinlaitoksen suojarele asettelut perustuen VJV2018 vaatimukseen

LIITE V. Vanhat ja uudet tahdissaolon valvojan asettelut

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

f	taajuus
f_1	ensimmäinen taajuusporras
f_2	toinen taajuusporras
$I >$	ylivirtaporras
$I \gg$	pikalaukaisuporras
$I_\varphi >$	suunnatun maasulkureleen alempi toimintaporras
$I_\varphi \gg$	suunnatun maasulkureleen ylempi toimintaporras
$I_{0\varphi} >$	suunnatun maasulkusuojan alempi toimintaporras
$I_{0\varphi} \gg$	suunnatun maasulkusuojan ylempi toimintaporras
I_n	nimellisvirta
$I \sin\varphi$	toimintakarakteristika
P_{max}	mitoitusteho
U	jännite, pääjännite
$U >$	ylijännite
$U <$	alijännite
U_0	nollajännite
$U_0 >$	nollajännitteen alempi toimintaporras
$U_0 \gg$	nollajännitteen ylempi toimintaporras
U_n	nimellisjännite
U_v	vaihejännite

Lyhenteet

AVR	automaattinen jänniteensäätö (<i>engl. automatic voltage regulator</i>)
EVY	eroonkytkennän viestiyhteys
GIS	kaasueristeinen kytkinlaitos (<i>engl. gas-insulated switchgear</i>)
kap	kapasitiivinen
ind	indusoitu

PSS	lisästabilointipiiri (<i>engl. power system stabilizer</i>)
pu	suhteellisarvo (<i>engl. per unit</i>)
SVY	suojauksen viestiyhteyslaite
TG9	turbiinigeneraattori 9
TG10	turbiinigeneraattori 10
VJV2018	voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2018
VJV2013	voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2013
YLE2021	yleiset liittymisehdot 2021

1 JOHDANTO

Modernin teollisuuslaitoksen toimintaa on vaikea kuvitella ilman sähköä, koska se on yksi keskeisimpiä osia koko teollisuusjärjestelmästä ja se mahdollistaa muun koneiston ja prosessien toiminnan. Erilaiset viat ja häiriötilanteet kantaverkossa vaikuttavat näin ollen koko teollisuuslaitoksen toimintaan ja voivat aiheuttaa pahimmassa tapauksessa kriittisiä laiterikkoja, joiden takia teollisuuslaitos joutuu seisomaan pysähdyksissä. Jokainen hetki teollisuuslaitoksen seisoessa, aiheuttaa yritykselle tuotannonmenetyksiä ja jos tällaiset seisomiset pitkittyvät taloudelliset menetykset voivat olla hyvinkin mittavia. Näiden tilanteiden ehkäisemiseksi on erityisen tärkeää, että teollisuuslaitoksen oma sähköverkon suojaus on sekä ajan tasalla että toimiva.

Monilla teollisuuslaitoksilla Suomessa on kuitenkin pitkät perinteet samalla paikalla, jolloin laitosten eri osia on jouduttu modernisoimaan monta kertaa vuosien kuluessa. Tällöin uusia laitteita on lisätty paljon vanhojen sekaan, jolloin on päädytty tilanteeseen, jossa useamman eri aikakauden laitteet kohtaavat. Näin on myös toimittu teollisuuslaitosten sähköverkkojen suojauksessa, koska suojausta ylläpidetään ja päivitetään monesti vasta erilaisten investointiprojektien yhteydessä. Vaikkakin laitteiden ensisijainen käyttötarkoitus on pysynyt samana, niiden tekniikka on kuitenkin kehittynyt huomasti vuosikymmenten aikana. Tämä taas on ajanut säädösten ja vaatimusten muuttumiseen, jonka takia esimerkiksi suojaruleiden asetteluajat ja -rajat ovat muuttuneet. Suojauksen toiminnallisuuden ja turvallisuuden takia olisi tärkeää tarkistaa järjestelmien suojausten vaatimukset aika ajoin. Tällä varmistetaan, että suojausjärjestelmät pysyvät ajan tasalla ja kykenevät tehokkaasti havaitsemaan ja torjumaan mahdolliset häiriö- ja vikatilanteet.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia UPM:n Kaukaan integraatin sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojauksen nykytilaa ja selvittää mahdolliset tarvittavat muutokset, jotta suojaus täyttäisi uudet vaatimukset. Työssä tullaan erityisesti tarkastelemaan Fingridin asettamia vaatimuksia voimalaitosten toiminnalle (VJV2018) sekä kantaverkon että asiakasliityntöjen relesuojaukselle. Näiden lisäksi työssä tutkitaan vuonna 2022 voimaan tulleiden alitaajuusreleistyksen määräyksiä ja toimintaa. Työhön kuuluu myös tapaustutkimus, jossa tarkastellaan Kaukaan eroonkytkennän ja suojausten toimintaa, releasetteluja ja puutteita. Tapaustutkimuksen perusteella laaditaan muutosehdotukset nykyiselle liityntäpisteen suojaukselle, joilla se saadaan nykyisten vaatimusten mukaiseksi. Tämän työn tutkimuskysymykset ovat:

- Mitkä ovat tämän päivän säädökset ja vaatimukset voimalaitosten toiminnalle ja suojaukselle?
- Millä tasolla on Kaukaan tehtaiden eroonkytkennän suojaus ja minkälaiset muutokset pitäisi tehdä, että suojaus olisi VJV2018 vaatimusten mukainen?
- Millä tavalla Kaukaan tehtaiden alitaajuusreleistyks on toteutettu?

1.2 Työn rajaus

Tässä diplomityössä keskitytään teollisuuslaitosverkkoon ja sen liityntäpisteen suojaukseen. Koko teollisuuslaitosverkkoa ei tässä työssä tulla tutkimaan vaan verkosta keskitytään 110 kV suurjännitekytkinlaitosten liitännöihin kantaverkkoon ja niiden suojauksiin. Täten teollisuuslaitosverkon keski- ja pienjänniteverkko jätetään täysin työn ulkopuolelle.

Tapaustutkimuksessa keskitytään Kaukaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojauksen nykytilanteen kartoittamiseen (kenttäkytkentöjen tarkastus ja suojarleiden asettelut) ja minkälaisia muutoksia sekä eroonkytkentään että suojauksiin tarvitsee tehdä, että nykyiset voimalaitoksia koskevat vaatimukset täytyisivät. Muut mahdolliset osat kuten muutosehdotusten kustannusten arviointi ja esimerkiksi eri tuotantotilanteiden vaikutukset eroonkytkentään jätetään tapaustutkimuksen ulkopuolelle. Tapaustutkimuksessa otetaan myös kantaa Kaukaan alitaajuusreleistykseseen, jonka tarkoitus on irtikytkä tehtaiden kuormaa kantaverkon taajuuden tukemiseksi. Mahdolliset puutteet kyseisessä releistyksessä kartoitetaan ja niihin laaditaan korjaavat muutosehdotukset.

1.3 Työn toteutus

Aivan aluksi työssä tullaan tekemään kirjallisuuskatsaus, jossa tutustutaan Fingridin asettamiin teknisiin vaatimuksiin voimalaitoksille ja niiden suojaukselle. Tämän lisäksi perehdytään teollisuusverkkoon ja millä tavalla teollisuusverkkoa suojataan erilaisilta ilmiöiltä. Näiden perusteella saadaan hyvä kuva liittymispisteen suojauksen tavoitetilanteesta, jota hyödynnetään tapaustutkimuksessa.

Tapaustutkimuksessa käydään aluksi läpi Kaukaan tehtaiden nykyisen eroonkytkennän sekä alitaajuusreleistyksen toimintaa, jotta pystytään muodostamaan selkeä kuva nykytilanteesta. Tässä vaiheessa käydään myös suojareleiden asettelut läpi dokumentaation ja kenttäkierrosten avulla. Tämän jälkeen tapaustutkimuksessa vertaillaan suojauksien nykytilannetta tavoitetilanteeseen, minkä jälkeen laaditaan tarvittavat muutosehdotukset, joilla liittymispisteen suojaus saadaan vaatimusten mukaiseksi.

2 VAATIMUKSET VOIMALAITOKSILLE

Voimalaitokset ovat tärkeä osa Suomen sähköjärjestelmää, koska ne tuottavat merkittävän osan sähköstä. Voimalaitosten toimintaa on säädelty erilaisilla laeilla ja säädöksillä, jotta pystytään varmistamaan voimalaitosten toimivuus ja tehokkuus. Kaksi tärkeintä säädöstä ovat Fingridin laatimat yleiset liittymisehdot (YLE2021) ja alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa. Yleisiin liittymisehtoihin kuuluu voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2018 (VJV2018) sekä kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus, mitkä ovat isossa osassa tässä työssä. Näiden kahden säädöksen sisältöä ja minkälaisia vaatimuksia niissä on säädelty voimalaitosten toiminnalle ja suojaukselle tullaan käymään läpi seuraavissa osioissa.

2.1 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV2018)

VJV2018 perustuu Euroopan komission antamaan asetukseen 2016/631, minkä tavoitteena on taata tasapuoliset ja syrjimättömät kilpailuolosuhteet sähkön sisämarkkinoille, varmistaa sähköjärjestelmän käyttövarmuus ja luoda yhtenäiset liittymisehdot verkkoliitynnöille (Fingrid, 2018, s. 5). Tässä uudessa asetuksessa päivitetään aiempia VJV2013 vaatimuksia. Teknisesti vaatimukset eivät ole muuttuneet merkittävästi aiemmin käytössä olleesta VJV2013 vaatimuksista, mutta joitakin laajennuksia ja lisäyksiä tehtiin uusiin VJV2018 vaatimuksiin. Uudessa sääntelyssä otetaan huomioon tahtikonevoimalaitokset ja suuntaajakäyttöiset voimalaitokset erikseen sekä loistehokapasiteettivaatimus on lisätty koskemaan myös tyyppin C voimalaitoksia. Tämän lisäksi jännite-taajuus-toiminta-aluetta on muutettu vanhasta ja voimalaitosten todentamisprosessi on laajennettu kolmiportaiseksi. (Siltala, 2017)

Näihin vaatimuksiin Fingrid on tehnyt vielä omat kansalliset lisäykset ja täsmennykset, joilla halutaan varmistaa, että

- voimalaitos kestää sähköjärjestelmässä esiintyvät jännite- ja taajuusvaihtelut
- voimalaitos tukee sähköjärjestelmän toimintaa häiriötilanteiden yhteydessä sekä toimii luotettavasti niiden aikana ja niiden jälkeen
- voimalaitos ei aiheuta haittaa muille sähköjärjestelmään kytketyille laitteille ollessaan verkossa

- liittymispisteen verkonhaltijalla ja Fingridillä on käytössään tarvittavat tiedot voimalaitoksesta sähköjärjestelmän suunnittelua, käyttöä ja käyttövarmuuden ylläpitoa varten. (Fingrid, 2018, s. 5)

2.1.1 Tyyppiluokittelu

Kaikki nimellistehoaltaan 0,8 kW tai yli olevat voimalaitokset, jotka ovat kytkeytyneet Suomen sähköjärjestelmään, tulee täyttää Fingridin antamat VJV2018 vaatimukset. Kyseiset vaatimukset koskevat lähinnä sähköjärjestelmään kytkettäviä uusia voimalaitoksia. Näitä vaatimuksia tulee soveltaa myös jo sähköjärjestelmässä oleviin voimalaitoksiin, jos niiden järjestelmäteknisiä ominaisuuksia muutetaan sen verran merkittävästi, että voimalaitoksen suorituskyky muuttuu. Liittymispisteen verkonhaltija on vastuussa arvioimaan tällöisten muutosten vaikutukset ja asettamaan voimaan uudet järjestelmätekniset vaatimukset kaikkiin muutosten kohteena oleviin laitteistoihin ja järjestelmiin. Nämä voimalaitoksiin kohdistuvat järjestelmätekniset vaatimukset on jaettu neljään tyyppiluokkaan (A, B, C, D), jotka määräytyvät voimalaitoksen mitoitustehon ja liityntäpisteen jännitteen mukaan. (Fingrid, 2018, s 9 & 15) Taulukossa 2.1 esitetään voimalaitosten tyyppiluokat.

Taulukko 2.1 Voimalaitosten tyyppiluokittelu mitoitustehon ja liityntäpisteen jännitetason mukaan (Fingrid, 2018, s. 9).

Tyyppiluokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{\max}
Tyyppi A	Alle 110 kV	ja	Vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW ($0,8 \text{ kW} \leq P_{\max} < 1 \text{ MW}$)
Tyyppi B	Alle 110 kV	ja	Vähintään 1 MW mutta alle 10 MW ($1 \text{ MW} \leq P_{\max} < 10 \text{ MW}$)
Tyyppi C	Alle 110 kV	ja	Vähintään 10 MW mutta alle 30 MW ($10 \text{ MW} \leq P_{\max} < 30 \text{ MW}$)
Tyyppi D	Vähintään 110 kV	tai	Vähintään 30 MW ($P_{\max} \geq 30 \text{ MW}$)

Kuvassa 2.1 esitetyn tyypin A voimalaitoksia ovat yleensä omakotitalojen aurinkosähköjärjestelmät, koska ne eivät ylitä 1 MW nimellisteho.

Jokaiselle eri tyypin voimalaitokselle on määrätty tietyt yleiset vaatimukset, jotka niiden tulee täyttää, jotta ne voivat toimia tehokkaasti ja turvallisesti. Tässä työssä tullaan tutkimaan tyypin D voimalaitosta, joten seuraavissa osioissa ei käydä läpi kaikkia vaatimuksia jokaiselle tyypille. Työssä keskitytään ainoastaan tyypin D voimalaitoksen vaatimuksiin. Tyypin D voimalaitoksia koskevat yleiset vaatimukset ovat kuitenkin hyvin samankaltaiset kuin muilla tyypeillä (A-C), mutta tiettyjä tarkennuksia ja lisäyksiä on tehty.

2.1.2 Yleiset vaatimukset

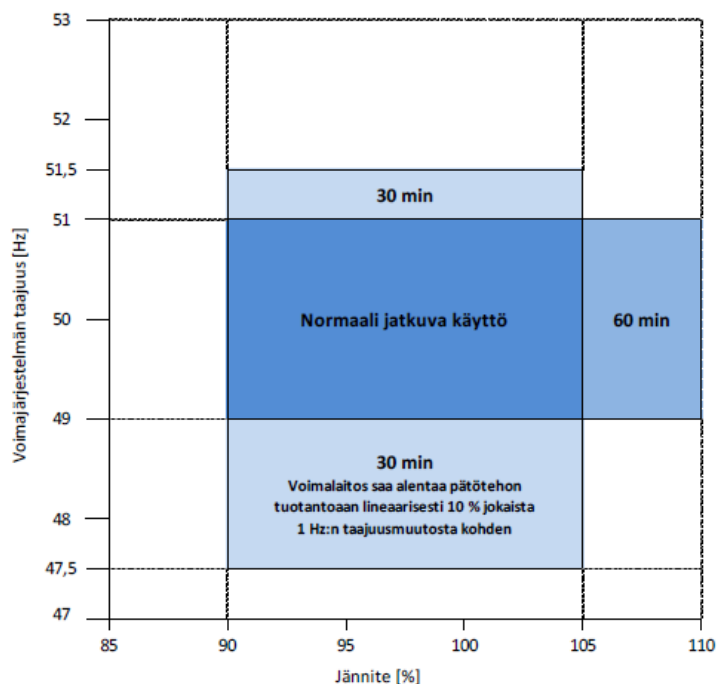
Sähköjärjestelmän jännitteen ja taajuuden mitoituksen perustana käytetään liittymispisteen normaalia käyttöjännitettä, mikä vaihtelee liittymispisteittäin ja sen takia kyseinen jännite on selvitettävä aina liittymispisteen verkonhaltijalta. Verkonhaltija määrittää jännitteen vaihtelualueet sekä normaalitilanteessa että häiriö- ja poikkeustilanteissa. Normaalitilanteessa jännitteen vaihtelualue tulee olla vähintään 0,90–1,05 pu normaalista käyttöjännitteestä. (Fingrid, 2018, s. 33)

Suomen kantaverkko sisältää kolme nimellisjännitetasoa, jotka ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV. Liittymissuunnittelun lähtökohtana käytettävät liittymispisteen normaalit käyttöjännitteet ovat kuitenkin 118 kV, 233 kV ja 410 kV. Fingrid määrittelee jännitteen vaihtelualueet jokaiselle nimellisjännitetasolle sekä normaalitilanteessa että häiriö- ja poikkeustilanteessa. (Fingrid, 2018, s. 33) Taulukossa 2.2 on esitetty Fingridin sähköverkon jännitteiden vaihtelualueet eri tilanteissa.

Taulukko 2.2. Fingridin sähköverkon jännitteen vaihtelualueet eri tilanteissa (Fingrid, 2018, s. 33).

Verkon nimellisjännite (kV)	Normaali vaihtelualue (kV)	Häiriö- ja poikkeustilanteiden vaihtelualue (kV)
400	395–420	360–420
220	215–245	210–245
110	105–123	100–123

Pohjoismaisen sähköjärjestelmän nimellistaajuus on 50 Hz ja taajuuden ollessa normaalisti 49,0–51,0 Hz. Käytännössä sähköverkon normaalikäytön aikana taajuuden odotetaan vaihtelevan 49,0–51,0 Hz välillä, mutta häiriö- ja poikkeustilanteissa jopa 47,5–51,5 Hz (Fingrid, 2018, s. 33). Käydään seuraavaksi läpi voimalaitoksen jännite-taajuustoiminta-alue vaatimuksia, joita havainnollistaa kuva 2.1.

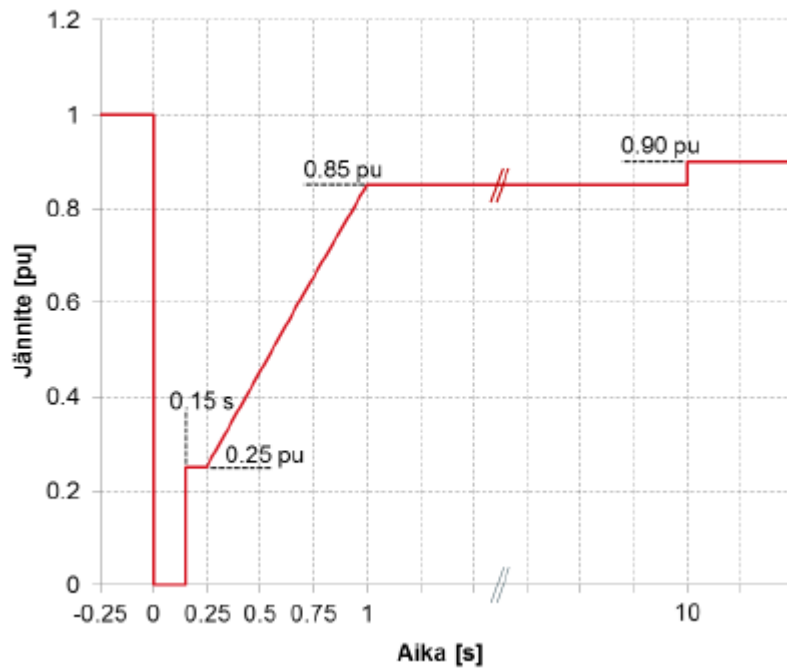


Kuva 2.1 Voimalaitokselta vaaditut toiminta-ajat verkossa pysymiseen erilaisilla liittymispisteen taajuuksilla ja jännitteillä (Fingrid, 2018, s. 43).

Kuvasta 2.1 nähdään, että voimalaitoksen tulee pystyä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti, kun liittymispisteen jännite vaihtelee 90–105 % normaalista käyttöjännitteestä ja taajuus pysyy 49,0–51,0 Hz alueella. Tilanteissa, joissa taajuus ja/tai jännite poikkeavat näistä arvoista, voimalaitoksen tulee pystyä toimimaan 30 tai 60 minuutin ajan.

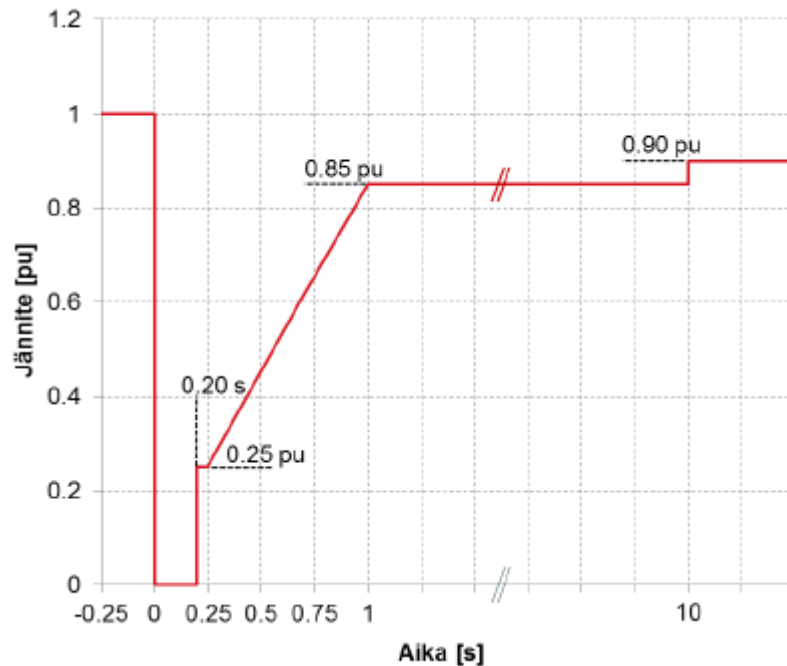
Voimalaitoksille on määritelty lähivikakestoisuusvaatimukset, koska niiden on kyettävä jatkamaan normaalia toimintaansa sähköjärjestelmän häiriöiden aikana ja niiden jälkeen. Tahtikonevoimalaitos omakäyttöineen tulee suunnitella siten, että se kestää lyhytaikaiset jännitteen vaihtelut ilman, että se irtoaa verkosta tai menettää tahtikäyttöään. Tahtikonevoimalaitosten lähivikakestoisuusvaatimukset on jaettu myös liittymispisteen jännitteen mukaan. Tyypin D tahtivoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on alle 400 kV, tulee kestää erilailla liittymispisteen jännitteen vaihtelut kuin tyypin D

tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on vähintään 400 kV. (Fingrid, 2018, s. 44) Kuva 2.2 esittää kuinka tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on alle 400 kV, on kestävä liittymispisteen jännitteen vaihtelut.



Kuva 2.2 Liittymispisteen jännite lyhytaikaisen jännitehäiriön aikana, jonka aikana ja jälkeen tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on alle 400 kV, tulee jatkaa normaalia toimintaansa (Fingrid, 2018, s. 44).

Kuvasta 2.2 nähdään, kuinka tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on alle 400 kV, tulee kestää ja jatkaa normaalia toimintaansa, kun liittymispisteessä esiintyy lyhytaikainen jännitehäiriö. Kuva 2.3 esittää kuinka tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellisjännite on vähintään 400 kV, on kestävä liittymispisteen jännitteen vaihtelut.



Kuva 2.3 Liittymispisteen jännite lyhytaikaisen jännitehäiriön aikana, jonka aikana ja jälkeen tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellijännite on vähintään 400 kV, tulee jatkaa normaalia toimintaansa (Fingrid, 2018, s. 45).

Kuvasta 2.3 nähdään, kuinka tyypin D tahtikonevoimalaitoksen, jonka liittymispisteen nimellijännite on vähintään 400 kV, tulee kestää ja jatkaa normaalia toimintaansa, kun liittymispisteessä esiintyy lyhytaikainen jännitehäiriö. Voimalaitoksen on pystyttävä toimimaan verkosta irtoamatta jännitehäiriön jälkeen, vaikka häiriö olisi aiheuttanut lyhytaikaisia jännitteen amplitudin ja vaihekulman vaihteluita. Voimalaitoksen automaattinen irtikytketyminen sähköverkosta ei saa tapahtua myöskään useiden perättäisten jännitehäiriöiden seurauksena. Sähköverkosta irtikytketyminen on ainoastaan sallittua tilanteissa, joissa voimalaitoksen transienttikulmastabiilius on uhattuna tai jarrutusenergian kestoisuus ylittää mitoitusarvon. (Fingrid, 2018, s. 46) Tällöin voimalaitoksen automaattisella irtikytketyksellä pystytään säilyttämään sähköjärjestelmän käyttövarmuus tai estämään voimalaitoksen vaurioituminen (Fingrid, 2018, s. 41). Lähivikavaatimus on määritelty seuraavissa olosuhteissa:

- Ennen jännitehäiriötä voimalaitoksen liittymispisteen jännite on 1,0 pu
- Ennen jännitehäiriötä voimalaitos ei syötä eikä ota loistehoa liittymispisteestä
- Ennen jännitehäiriötä voimalaitoksen automaattinen jännitteensäätö (AVR) on toiminnassa

- Liittymispisteen oikosulkutehon oletetaan olevan kesätilanteen normaali ennen lähivikaa sekä sen jälkeen. (Fingrid, 2018, s. 44)

Voimalaitoksen tahdistamista takaisin kantaverkkoon koskee seuraavat vaatimukset. Voimalaitos täytyy varustaa tarvittavilla tahdistuslaitteilla ja sen tulee kyetä tahdistamaan kantaverkkoon normaalin ja jatkuvan käytön taajuuksilla sekä jännitteillä. Näiden lisäksi voimalaitoksen saa tahdistaa kantaverkkoon vasta silloin, kun liittymispisteen verkonhaltija antaa siihen luvan. (Fingrid, 2018, s.47) Liittyjän vastuulla on aina sopia tahtikonevoimalaitoksen uusista tahdistusehdoista liityntäpisteen verkonhaltijan kanssa, jos ehdot poikkeavat esitellyistä:

- Taajuuden tulee olla 49,0–51,0 Hz
- Jännitteen tulee olla 0,90–1,05 pu
- Vaihekulmaero saa olla enintään 10°
- Taajuuspoikkeama saa olla enintään 0,2 Hz
- Jännitepoikkeama saa olla enintään 0,05 pu
- Vaihejärjestys tulee olla sama tahdistavan katkaisijan molemmin puolin. (Fingrid, 2018, s. 47)

2.1.3 Tahtikonevoimalaitosten pätötehon ja taajuuden säätö

Tahtikonevoimalaitoksen on kyettävä säätämään pätötehoa ja taajuutta sekä ylläpitämään tarvittavaa tehotasoa. Tahtikonevoimalaitoksella tulee olla pätötehon ja taajuuden säätöön sekä tehotason ylläpitoon vaadittavat seuraavat toiminnallisuudet. Fingridillä on kuitenkin oikeus vaatia voimalaitoksia säätämään tehoaan vastaamaan vaatimuksia ja sähköverkon tilannetta (Fingrid, 2018, s. 48).

Voimalaitosten minimitehon tulee olla mahdollisimman pieni. Tämän takia suunnittelun perusteena pitää aina käyttää esitettyjä minimitehoja:

- Vesi-, kaasuturbiini- ja moottorivoimalaitokset: 10 % mitoitustehosta,
- Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset sekä muut voimalaitokset: 40 % mitoitustehosta. (Fingrid, 2018, s. 48)

Joissakin tilanteissa voimalaitos koostuu monista generaattoreista, minkä takia minimiteho ei jakaudu tasaisesti generaattoreiden välillä. Tällöin on tärkeää ilmoittaa paitsi koko voimalaitoksen minimiteho myös yksittäisten generaattoreiden minimitehot. (Fingrid, 2018, s. 48).

Vesi-, kaasuturbiini- ja moottorivoimalaitoksille on asetettu 15 minuutin käynnistysaikavaatimus, jonka jälkeen niiden pitää olla täydessä tehossa. Toisaalta sähkön ja lämmön yhteistuotantovoimalaitoksille sekä muille voimalaitoksille ei ole määrätty tarkempia käynnistysaikavaatimuksia kuin mitä on määritelty vaatimuksiksi omakäytöltä paluun yhteydessä. (Fingrid, 2018, s. 49) Omakäyttövaatimukset määräävät, että voimalaitosten pitää pystyä siirtymään turvallisesti omakäytölle, kun liittymispisteen jännitteet ja/tai taajuudet edellyttävät siihen. Siirtyminen omakäytölle tulee tapahtua myös miltä tahansa tehotasolta minimi- ja mitoitus- ja välillä. Vesivoimalaitosten ja reservikaasuturbiinivoimalaitosten on kyettävä toimimaan omakäytöllä ainakin kahdeksan tunnin ajan. Muiden kuin vesi- ja ydinvoimalaitosten on kyettävä toimimaan omakäytöllä vähintään tunnin ajan. Omakäytön jälkeen voimalaitokset voidaan teknisten rajoitusten mukaisesti uudelleen käynnistää ja tahdistaa takaisin sähköjärjestelmään enintään neljän tunnin kuluessa seuraavan 12 tunnin aikana. Ydinvoimalaitoksille ei ole määrätty mitään aikarajaa omakäytölle, vaan niiden tulee toimia omakäytöllä ja oltava käynnistettävissä turvamääräysten mukaisesti. (Fingrid, 2018, s. 52)

Tahtikonevoimalaitos on varustettava turbiinisäätäjällä ja siihen liittyvällä pyörimisnopeuden säädöllä, jotta teho ja tehon muutosnopeus voidaan säätää halutuille tasoille. Tehonsäädön on mahdollistettava sekä manuaalinen tehon säätäminen että taajuusmittauksen perusteella tapahtuva taajuussäätö turbiinisäätäjän ja mahdollisen laitossäätäjän avulla. Voimalaitoksen taajuussäädön pitää pystyä osallistumaan automaattisesti sähköjärjestelmän taajuuden tukemiseen häiriötilanteissa, jolloin taajuussäätö seuraa sähköjärjestelmän taajuutta. (Fingrid, 2018, s. 49)

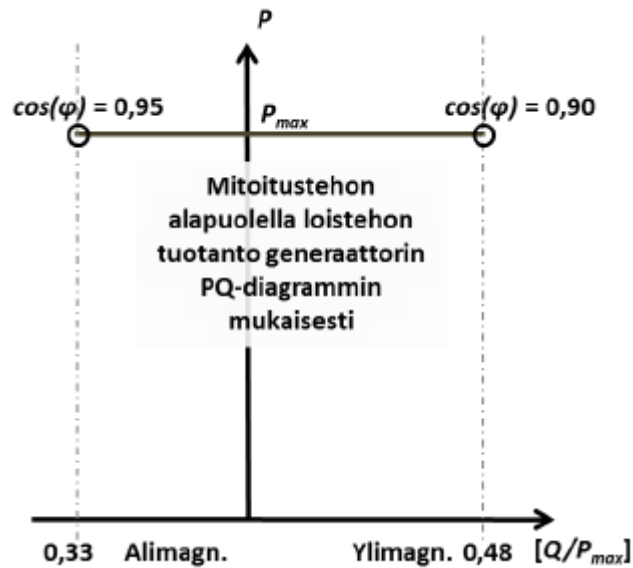
Taajuussäädöllä on oltava vähintään kaksi toimintatilaa: normaalitila ja häiriötila. Jos näiden toimintatilojen lisäksi on määritelty muita tiloja, niistä ja niiden asetteluista on ilmoitettava Fingridille. Taajuusmittaukseen perustuvan toimintatilojen automaattisen vaihtumisen kriteerit on asetettava vähintään seuraavien rajojen mukaisesti:

- Taajuusrajat, jotka aiheuttavat tilamuutoksen: ± 2 Hz enintään 0,1 Hz:n välein,
- Viive, jonka jälkeen tilamuutos toteutetaan: 0–60 s enintään 1 sekunnin välein,
- Viive, jonka jälkeen palautuminen tilamuutoksesta toteutetaan: 0–600 s enintään 1 sekunnin välein. (Fingrid, 2018, s. 50)

Taajuussäädölle on oltava mahdollisuus asetella sekä kuollut alue että lineaarinen statiikka. Statiikan säädettävyyden tulee olla rajojen 2–12 % välillä enintään yhden prosenttiyksikön välein. Kuolleen alueen säädettävyyden tulee olla rajojen 0,0–0,5 Hz välillä enintään 0,01 Hz:n välein. Voimalaitoksen pätötehoa on voitava säätää vähintään 1 MW:n tarkkuudella ja taajuussäädön herkkyys täytyy olla vähintään 10 mHz, reagointiajan ollessa enintään 2 s. Sekä pätötehon että taajuuden säädön tarkkuus ja herkkyys on todennettava käyttöönottokokeiden yhteydessä. (Fingrid, 2018, s. 50)

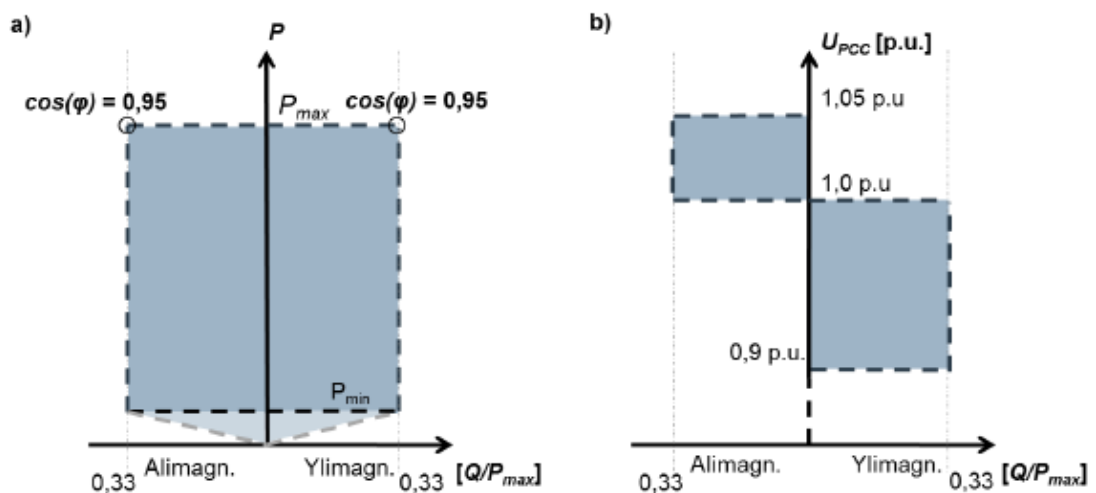
2.1.4 Tahtikonevoimalaitosten loistehokapasiteetti

Voimalaitoksen generaattorien tulee pystyä toimimaan jatkuvasti mitoitustehollaan P_{max} , kun generaattorin liittimistä mitattava tehokerroin on 0,95_{kap}-0,90_{ind} ja kuva 2.4 havainnollistaa tätä. Mitoitustehoa pienemmillä tehoilla generaattorin tulee pystyä tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa PQ-diagrammin mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että tahtikonevoimalaitoksen on pystyttävä rajoittamaan liittymispisteen jännitteen nousua kuluttamalla loistehoa, jos jännite on liian korkea verrattuna liittymispisteen normaaliin käyttöjännitteeseen. Tahtikonevoimalaitoksen täytyy myös pystyä rajoittamaan liittymispisteen jännitteen laskua tuottamalla loistehoa, jos jännite on liian matala verrattuna liittymispisteen normaaliin käyttöjännitteeseen. (Fingrid, 2018, s. 54)



Kuva 2.4 Tahtikonevoimalaitokselta vaadittava loistehokapasiteetti (Fingrid, 2018, s. 53).

Tahtikonevoimalaitoksen on kyettävä tuottamaan ja kuluttamaan loistehoaan siten, että se pysyy toimintarajojensa sisällä yli- tai alimagnetoituneena loistehokapasiteetilla. Tämä loistehokapasiteetti vastaa nimellistehon tehokertoimella 0,95 olevaa toimintapistettä. Kuvassa 2.5 on esitetty vasemmalla a-kohdassa tahtikonevoimalaitoksen loistehokapasiteettialue ja oikealla b-kohdassa, miten liittymispisteestä mitatun loistehon täytyy olla. (Fingrid, 2018, s. 54)



Kuva 2.5 Loistehokapasiteettivaatimukset pätötehon ja liittymispisteen jännitteen funktiona (Fingrid, 2018, s. 54).

Kuvasta 2.5 nähdään, että voimalaitoksen liittymispisteen jännitteen ollessa 0,90–1,00 pu, ylimagnetoituneen loistehokapasiteetin alue on välillä 0–0,33. Kun liittymispisteen jännite

on puolestaan 1,00–1,05 pu, alimagnetoituneen loistehokapasiteetin alue on välillä 0–0,33. Voimalaitoksen loistehokapasiteetista pitää toimittaa laskelma liittymispisteen verkonhaltijalle, josta pitää käydä ilmi voimalaitoksen kyky tuottaa ja kuluttaa loistehoa VJV2018 vaatimuksissa määritetyillä liittymispisteen jännitetasoilla ja voimalaitoksen tehotasoilla (Fingrid, 2018, s. 54).

2.1.5 Tahtikonevoimalaitosten jännitteensäätö

Jännitteensäätö on tärkeä toimenpide, joka takaa generaattorin liitinjännitteen tasaisen tason sähköverkon häiriöistä riippumatta. Tahtikonevoimalaitoksen generaattorin ensisijainen jännitteensäädön käytötapa on liitinjännitteen vakiojännitesäätö. Säädön toiminta tulee olla sekä jatkuvaa että portaatonta ja sen tulee pystyä mahdollistamaan luvussa 2.1.4 esitelty tahtikonevoimalaitoksen loistehokapasiteetin hyödyntäminen, kun voimalaitos tuottaa pätötehoa sähköjärjestelmään. (Fingrid, 2018, s. 56)

Jännitteensäätäjän on oltava kaksikanavainen, jolloin kummassakin kanavassa täytyy olla automaattinen generaattorin liitinjännitteen vakiojännitesäätö sekä magnetointivirran vakiovirtasäätö varajärjestelmänä. Generaattorin jännitteensäätäjä tulee mitoittaa siten, että sen kattojännite on vähintään kaksinkertainen staattisella magnetoinnilla ja vähintään 1,6-kertainen harjattomalla magnetoinnilla generaattorin mitoituskuormitusta vastaavaan magnetointijännitteeseen nähden. Tämä kattojännite pitää pystyä ylläpitämään vähintään 10 s ajan. Jos voimalaitoksen ensisijaisena jännitteensäädön käytötapana halutaan käyttää jotain muuta kuin vakiojännitesäätöä, siitä on sovittava erikseen verkonhaltijan ja Fingridin kanssa. (Fingrid, 2018, s. 56)

Tyhjäkäyvän ja verkosta irti olevan generaattorin jännitteensäätäjän askelvasteen tulee olla seuraavanlainen, kun asetteluarvoa muutetaan askeleittain ylöspäin 95 prosentista 105 prosenttiin:

- 1) Staattisella magnetoinnilla askelvasteen nousuajan nolasta 90 prosenttiin liitinjännitteen kokonaismuutoksesta tulee olla välillä 0,2–0,3 s,
- 2) Harjattomalla magnetoinnilla askelvasteen nousuajan nolasta 90 prosenttiin liitinjännitteen kokonaismuutoksesta tulee olla välillä 0,2–0,5 s. (Fingrid, 2018, s. 57)

Tyhjäkäyvän ja verkosta irti olevan generaattorin jännitteensäätäjän askelvasteen tulee olla seuraavanlainen, kun asettelu-arvoa muutetaan askeleittain alaspäin 105 prosentista 95 prosenttiin:

- 1) Staattisella magnetoinnilla askelvasteen negatiivisen nousuajan nollassa 90 prosenttiin liitinjännitteen kokonaismuutoksesta tulee olla välillä 0,2–0,3 s,
- 2) Harjattomalla magnetoinnilla askelvasteen negatiivisen nousuajan nollassa 90 prosenttiin liitinjännitteen kokonaismuutoksesta tulee olla välillä 0,2–1,0 s. (Fingrid, 2018, s. 57)

Generaattorin jännitteensäätäjän askelvasteen tulee olla värähtelemätön ja ylitys korkeintaan 15 % mitatusta liitinjännitteen kokonaismuutoksesta. Nämä suorituskykyvaatimukset on täyttyvä käyttöönoton aikana suoritettavassa keskeytymättömässä testiajossa, joka suoritetaan normaalia matalammassa tai korkeintaan generaattorin käyttölämpötilassa. (Fingrid, 2018, s. 57)

Näiden vaatimusten lisäksi tyyppin D tahtikonevoimalaitoksen generaattoreiden jännitteensäätö on varustettava lisästabilointipiirillä (PSS). Lisästabilointipiirin on vaimennettava generaattorin ja sähköjärjestelmän välisiä heilahteluja 0,2–2,0 Hz:n taajuuksilla, mutta se ei saa vahvistaa 0,3 Hz:n järjestelmätaajuisia heilahteluja. Jos järjestelmätaajuisia heilahteluja halutaan vaimentaa, siitä tulee aina sopia erikseen Fingridin kanssa. Kyseisten vaatimusten täyttämiseksi Fingrid suosittelee käyttämään IEEE 421.5 standardin mukaista PSS2A tai PSS2B kaksituloista lisästabilointia. Tämän täytyy olla mahdollista kytkeä pois päältä. Lisästabilointipiirin vaatimusten mukainen toiminta täytyy varmistaa käyttöönottokokeiden yhteydessä. (Fingrid, 2018, s. 59)

2.1.6 Tahtikonevoimalaitosten käyttöönottokokeet

Liittyjän tulee todentaa voimalaitoksen toiminta sille asetettujen vaatimusten mukaan ja näin ollen laatia voimalaitoskohtainen käyttöönottosuunnitelma. Voimalaitoksen vaatimukset todennetaan ensisijaisesti voimalaitoksen käyttöönoton yhteydessä tehdyillä kokeilla, jotka tehdään voimalaitoksen tavanomaisen primäärienergianlähteen avulla. (Fingrid, 2018, s. 60)

Liittyjän tulee toimittaa liittymispisteen verkonhaltijalle tarvittavat asiakirjat vähintään kaksi kuukautta ennen suunniteltua käyttöönottokokeiden aloitusajankohtaa. Nämä tarvittavat asiakirjat ovat käyttöönottosuunnitelma, alustavat käyttöönotto-ohjeet ja kuvaukset

kokeiden käytännönjärjestelyistä, joista pitäisi tulla ilmi vähintään mittausjärjestelyt, vastuuhenkilöt ja alustava aikataulu. (Fingrid, 2018, s. 61)

Tahtikonevoimalaitosten käyttöönottokokeissa tulee mitata vähintään 1 kHz:n näytteistystaajuudella ja tallentaa vähintään 50 Hz:n tallennustaajuudella seuraavat suuret:

- Generaattorin liitinjännite
- Generaattorin tai sen magnetointikoneen magnetointijännite
- Generaattorin taajuus
- Generaattorin tai sen magnetointikoneen magnetointivirta
- Generaattorin pätöteho
- Generaattorin loisteho (Fingrid, 2018, s. 62)

Näiden lisäksi käyttöönottokokeessa säädettävän suureen asetteluarvo ja asetteluarvon muutokset täytyy tallentaa. Käyttöönottokokeiden suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon, että voimalaitosten todellisen toiminnan ja dynamiikkamallinnustietojen vastaavuus voidaan todistaa laskennallisesti. (Fingrid, 2018, s. 62)

Käyttöönottokokeessa tulee muistaa todentaa myös generaattorin jännitteensäädön lisästabiloitimpiirin (PSS) toiminta ja ominaisuudet. Tällä tarkoitetaan säätäjän vasteen todentamista sähkömekaanisille heilahteluille, jotka vaikuttavat sähköverkon siirtokykyyn ja siirtokyvyn arvioimiseen. (Fingrid, 2018, s. 67) Lisästabiloitimpiirin käyttöönottokokeiden tarkka sisältö ja laajuus pitää aina sopia erikseen Fingridin ja liittymispisteen verkonhaltijan kanssa. Käyttöönottokokeeseen tulee sisällyttää vähintään seuraavat asiat:

- Kokeet on suoritettava mitoitusteholla ja vähintään yhdellä poikkeavalla pätötehotasolla
- Voimalaitosten säätäjien vaste järjestelmätaajuuksien heilahteluiden taajuusalueella on todennettava. Tämä voidaan toteuttaa muuttamalla verkon kytkentätilannetta tai syöttämällä säätäjille erillinen heilahtelua jäljittelevä signaali.
- Voimalaitoksen ja sen säätäjän toiminta on tallennettava kattavasti numeerisessa muodossa käyttäen mittalaitteita, joiden näytteenottotaajuus on riittävä säätäjän vasteen analysointiin. (Fingrid, 2018, s. 67)

Käyttöönottokoe on mahdollista korvata jollain toisella menetelmällä, mikäli käyttöönottokoetta ei pystytä suorittamaan jostain syystä kuten liittymispisteen verkonhaltijan verkon tai sähköjärjestelmän käyttötilanteesta johtuen (Fingrid, 2018, s. 62). Tällöin Fingrid määrittää voiko jonkun käyttöönottokokeen korvata jollakin esitetyistä menetelmistä:

- Valtuutetun todentajan myöntämät laitetodistukset, akkreditoitujen laboratorioiden sertifikaatit tai vastaavat yksityiskohtaiset turbiinigeneraattoreiden testausraportit,
- Jatkuva seuranta,
- Laskentatarkastelut, jotka perustuvat todennettuihin laskentamalleihin. (Fingrid, 2018, s. 62)

Erityisesti tässä listauksessa on huomioitava valtuutetun todentajan myöntämät laitetodistukset, koska niillä ei voida täysin taata voimalaitoskokonaisuuden ja sen apulaitteiden virheetöntä yhteistoimintaa. Tämän takia Fingrid ei hyväksy laitetodistuksia ensisijaisena todentamismenetelmänä ja niiden käytöstä tulee sopia aina erikseen. (Fingrid, 2018, s. 62)

2.2 Alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa

Euroopan komissio laati vuonna 2017 sähköjärjestelmän hätätilaa ja käytönpalautusta koskevan verkkosäännön, jonka mukaan Fingridin ja jakeluverkkoyhtiöiden tulee luoda yhdessä alitaajuussuojausjärjestelmä. Tämän tavoitteena on varmistaa, että sähköjakeluverkko toimii turvallisesti ja luotettavasti alitaajuuksien aiheuttamien häiriöiden estämiseksi. Automaattinen alitaajuussuojaus on järjestelmä, joka automaattisesti katkaisee kulutuksen irti verkosta heti, kun alitaajuus havaitaan syöttöjännitteessä. Tällaisia tilanteita ovat vakavat häiriötilanteet, jolloin sähköverkon normaali tuotanto ja koko ajan ylläpidettävä häiriöreservi eivät riitä korvaamaan syntynyttä tuotannonvajetta, mikä johtaa voimajärjestelmän taajuuden laskemiseen. Alitaajuussuojausjärjestelmä on viimeinen keino kyseisessä tilanteessa, jolla pystytään pysäyttämään taajuuden lasku ja ennaltaehkäistä mahdolliset laitteiden vaurioitumiset ja laajat sähkökatkot. Tästä johtuen 30 % kaikesta Suomen kulutuksesta täytyy olla varustettu alitaajuussuojilla, jotka kytkevät automaattisesti kulutusta irti tarpeen vaatiessa. (Fingrid, 2021a, s. 3) Tämä 30 % on jaettu enintään viiteen eri taajuusportaaseen, mitkä esitetään taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3 Alitaajuudesta johtuvan kulutuksen irtikytkennän taajuusportaat (muokattu kohteesta Fingrid, 2021a, s. 3).

Porras	Taajuus [Hz]	Kokonaistoiminta-aika (s)	Kulutus [%]
1	48,8	0,15	5
2	48,6	0,15	5
3	48,4	0,15	5
4	48,2	0,15	5
5	48	0,15	10

Taulukossa 2.3 oleva ensimmäinen porras toimii, kun voimajärjestelmän taajuus alittaa 48,8 Hz. Tällöin tulee kytkeä 5 % kulutuksesta irti enintään 150 ms viiveellä. Tähän alitaajuussuojauksen kokonaistoiminta-aikaan sisältyy releen toiminta-aika, laukaisukoskettimien viive ja katkaisijan toimintaviive (Fingrid, 2021a, s. 4). Jos taajuus jatkaa laskemista ensimmäisen portaan toimista huolimatta, toinen porras toimii vasta, kun taajuus laskee alle 48,6 Hz. Tällöin kytketään seuraavat 5 % kulutuksesta irti ja taajuuden vielä laskiessa käydään loput taajuusportaat läpi taulukon 2. mukaisesti aina viimeiseen portaaseen asti. Viimeisessä portaassa taajuuden alittaessa 48 Hz täytyy kytkeä 10 % kulutuksesta irti, minkä jälkeen kulutuksesta tulisi olla irrotettu Fingridin sovellusohjeen mukaiset 30 %. Sallittu vaihteluväli tälle kulutukselle on $\pm 10\%$ eli irtikytkettävä kulutus tulee olla 20–40 % vaihteluvälin sisällä (Fingrid, 2020, s. 25).

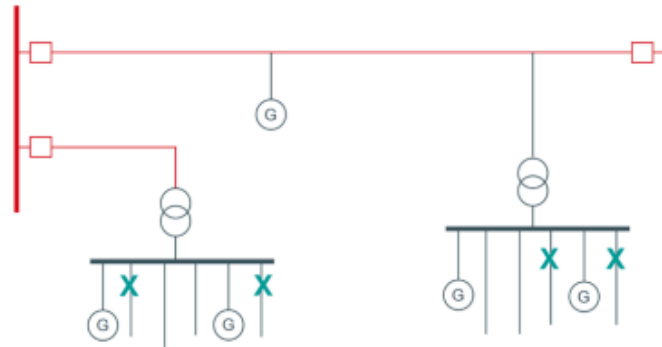
Ensimmäiseen laukaisuportaaseen (48,8 Hz) tulee pyrkiä aina valitsemaan vähiten tärkein kulutus, toiseen laukaisuportaaseen (48,6 Hz) toiseksi vähiten tärkeä kulutus ja niin edelleen. Jokaisen taajuusportaan laukaistavaksi tulee valita sellainen määrä kulutusta, että niiden koko vuosienergia on mahdollisimman tarkasti taulukon 2.3 mukainen osuus asiakkaan kokonaisvuosienergiasta (Fingrid, 2021a, s. 5). Jos kulutuksen laukaisussa irrotetaan myös tuotantoa, silloin täytyy laskea irtoava nettoteho ja nettotehon määrän täytyy olla taulukon 2.3 mukainen (Fingrid, 2021a, s. 3).

Fingrid voi joko laukaista teollisuuskulutusta selektiivisesti kantaverkkotasolla, jolloin laukaisu kohdistuu usein vain muutamaaan suureen kulutuskohteeseen, tai teollisuusasiakas voi valita itse, mitkä osat kulutuksesta se varustaa alitaajuussuojilla, kunhan tarvittavat 30 % kulutuksesta saadaan suojattua. Jos teollisuusasiakas valitsee taas itse, mitkä kuormat se laukaisee, niiden kappalemäärä jää yleensä huomattavasti pienemmäksi kuin

jakeluverkkokuormien määrä. Näin ollen teollisuuskulutusta ei ole aina mahdollista jakaa tasaisesti taulukon 2.3 mukaisesti, vaan taajuusportaiden määrä voi olla myös vähemmän kuin viisi asiakasta kohti. Esimerkiksi alitaajuussuojauksia voidaan toteuttaa vain yhdellä taajuusportaalla (asettelulla 48,8 Hz), joka laukaisee vaadittavat 30 % kulutuksesta. (Fingrid, 2021a, s. 4) Tällainen tilanne on kuitenkin hyvin harvinainen ja suositeltu käytettäväksi vain joissakin ääritapauksissa.

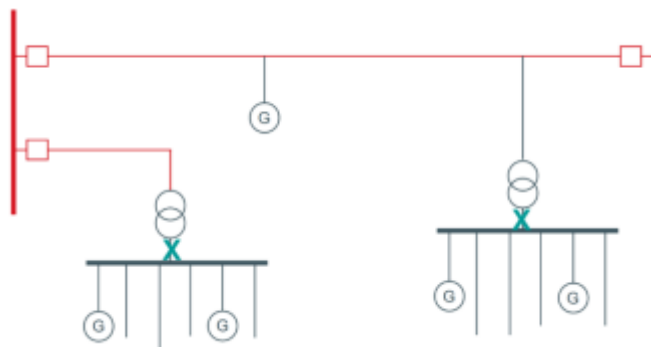
Fingrid on määritellyt sovellusohjeessaan alitaajuussuojille tietyt ehdot ja tilanteet, jolloin suoja ei saisi toimia. Alitaajuussuojauksia ei saa toimia tilapäisissä vika- tai poikkeustilanteissa, joissa ei ole kyse oikeasti sähköjärjestelmän tehonvajaustilanteesta. Tällaisia vika- tai poikkeustilanteita ovat esimerkiksi oikosuluista tai maasuluista johtuvat ohimenevät jännitekuopat ja väliaikaiset jännitteettömät tilanteet liittymisten tai muutoskytkentöjen aikana. Alitaajuussuojan toiminta on myöskin estettävä tilanteessa, jossa jännite on alhainen kuten esimerkiksi vian tai automaattisen jälleenkytkennän aikana jännitteettömällä väliajalla. Tällöin Fingrid suosittelee jännitelukituksen asettelualueeksi $0,4-0,6 \cdot U_n$ nimellisjännitteestä. Erityisesti nopeat jännitevaihtelut voivat aiheuttaa virheitä taajuuden mittauksessa ja johtaa alitaajuussuojan virhelaukaisuun. (Fingrid, 2018, s. 5) Tällaisia tilanteita pystytään kuitenkin välttämään suojauksen huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella. Joissakin tapauksissa tarvitsee myös käyttää nollajännitelukitusta alitaajuussuojauksen kanssa. Nollajännitelukitusta tarvitaan vain tapauksissa, joissa halutaan estää virhelaukeamiset jälleenkytkentöjen jännitteettömänä aikana, jolloin suojauksen eroonkytkemällä alueella sijaitsevat hajautetut voimalaitokset saattavat ylläpitää jännitettä ja kasvattaa nollajännitettä maasulkutapauksissa (Fingrid, 2021a, s. 6).

Fingrid antaa omassa ohjeistuksessaan muutamia esimerkkejä erilaisista alitaajuussuojauksen toteutusvaihtoehdoista sähköverkossa, joista jakeluverkonhaltijat ja kantaverkkoon liittyneet voivat valita itselleen parhaiten sopivan. Nämä eri toteutusvaihtoehdot on esitetty kuvissa 2.6–2.9, missä 'X' merkitsee alitaajuussuojauksella varustettua kohdetta. Kuvassa 2.6 nähdään, miten alitaajuussuojauksia toteutetaan laukaisemalla sähköasemien keskijännitejohtoja.



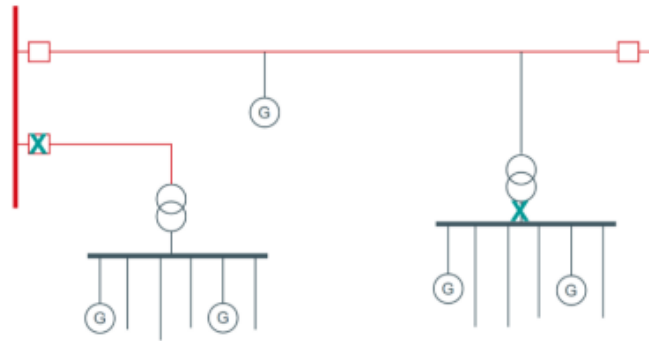
Kuva 2.6 Alitaajuussuojaus toteutettu laukaisemalla keskijännitejohtoja (Fingrid, 2021a, s. 6).

Keskijännitejohtojen laukaiseminen soveltuu erittäin hyvin suurille sähköasemille, joihin kuuluu paljon kulutusta ja monia johtolähtöjä, koska kuormien pudotus pystytään jakamaan monelle eri portaalle. Kuvassa 2.7 nähdään, miten alitaajuussuojaus toteutetaan laukaisemalla jakeluverkon asemia.



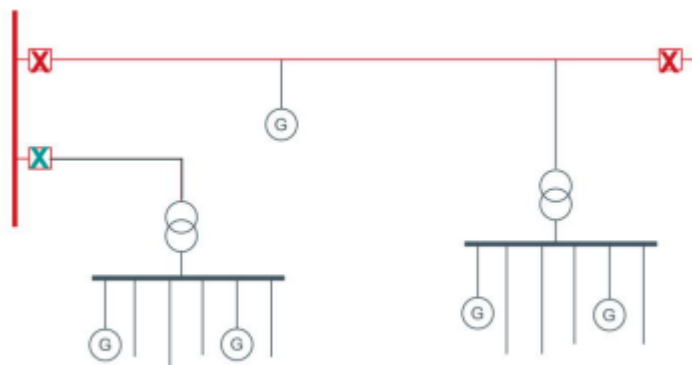
Kuva 2.7 Alitaajuussuojaus toteutettu laukaisemalla jakeluverkon asemia (Fingrid, 2021a, s. 6).

Jakeluverkon asemien laukaiseminen soveltuu pienille sähköasemille, joissa on vain vähän ei-kriittisiä kulutuskohteita, jolloin voidaan laukausta koko asema. Kuvassa 2.8 nähdään, miten alitaajuussuojaus toteutetaan laukaisemalla 110 kV säteittäinen suurjännitejohto.



Kuva 2.8 Alitaajuussuojaus, jossa laukaistaan jakeluverkon asema ja 110 kV säteittäinen johto (Fingrid, 2021a, s. 7).

110 kV säteittäisen johdon laukaisemista alitaajuussuojana suositellaan käytettäväksi vain, jos mikään muu toteutustapa ei ole mahdollinen. Samasta kuvasta löytyy alitaajuussuojaus, jossa laukaistaan jakeluverkon asema. Kuvassa 2.9 nähdään, miten alitaajuussuojaus on toteutettu laukaisemalla kantaverkon runkojohto.



Kuva 2.9 Alitaajuussuojaus, jossa laukaistaan 110 kV säteittäinen johto ja kantaverkon runkojohto (Fingrid, 2020, s. 24).

Kantaverkon runkojohdon laukaisemista ei saa käyttää alitaajuussuojana missään tilanteessa ikinä, koska se heikentää voimajärjestelmän stabiiliutta ja käyttövarmuutta. Samasta kuvasta löytyy myös alitaajuussuojaus, jossa laukaistaan 110 kV säteittäinen suurjännitejohto.

2.3 Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus

Fingridin relesuojauksen sovellusohjeessa esitetään toiminnalliset pääperiaatteet sekä vaatimukset Fingridin asiakkaiden suojausjärjestelmille, jotka on tarkoitettu liitettäviksi Fingridin 110 kV, 220 kV ja 400 kV sähköverkkoihin. Näiden vaatimusten avulla varmistetaan, että liitettävien sähköverkkojen relesuojaukset ovat yhteensopivia.

2.3.1 Kantaverkon relesuojauksen pääperiaatteet

Kantaverkko on valtakunnan sähkönsiirron selkäranka, jonka häiriöttömyyttä on tärkeä ylläpitää, koska se on olennainen osa sähkönsaannin luotettavuutta ja eri energijärjestelmien toimintaa. Kantaverkon suojuksilla varmistetaan sähkön toimitusvarmuus ja vähennetään mahdollisia häiriöitä. Fingridin käyttämän N-1 mitoitussäännön mukaisesti yksikään verkkovika ei saa johtaa laajenevaan häiriöön tai stabiiliuden menetykseen (Fingrid, 2022, s. 2). Verkkovikojen erottaminen ja nopea laukaisu relesuojauksia käyttämällä varmistavat häiriöiden leviämisen estämisen ja stabiiliuden säilyttämisen.

Kantaverkon 400 kV sähköverkko on varustettu relesuojauksella, joka erottaa oikosulut ja varmistaa nopean laukaisun vikatilanteessa. 400 kV kytkinlaitokset on varustettu kiskosuojalla, jotta suojuksella olisi nopea laukaisu. 400 kV voimajohdot sekä muuntajat on varustettu kahdennetulla suojuksella, joiden täytyy toimia viiveettä. Kiskosuojausta ei ole T-haara asemilla, mutta niiden kokoojakiskot kuuluvat viiveettömän johtosuojausten piiriin. Näiden lisäksi kaikki 400 kV:n katkaisijat on varustettu katkaisijavikasuojuksella, joka erottaa vian noin 0,25 s kuluessa, mikäli itse katkaisija ei toimi. (Fingrid, 2022, s. 2)

Kantaverkon 110 ja 220 kV voimajohdot ovat yleensä rengaskäytössä. Nämä kantaverkon voimajohdot on suojattu kahdennetulla pääsuojuksella, joka erottaa oikosulut ja tavanomaiset maasulut. Lyhyillä rengasjohdoilla pääsuojausten hidastamaton laukaisu kattaa koko johdon, kun taas pitkillä rengasjohdoilla kokonaiskesto aika saa olla enintään 0,5 s. Voimajohdon oikosulkuutilanteissa varasuoja toimii yleensä hidastuksella, joka vaihtelee 0,1–1,0 s välillä. Tarkka hidastus riippuu sähköaseman vikavirran tasosta ja vikapaikasta. (Fingrid, 2022, s. 2) Pääsuojaan ja/tai varasuojaan täytyy sisältyä herkkä maasulkuvirtatoiminto, joka kytkee irti suuriresistanssiset maasulut yleensä 1–3 s aikana, mutta viimeistään 5 s kuluttua vian alkamisesta. Mikäli kantaverkon 110 kV:n voimajohtoon

liitetään tuotantoa, joka ylittää 1 MW:n rajan, voimajohdon pääteasemille täytyy toteuttaa tahdissaolon valvonta. Tämän suojan tarkoituksena on estää epätahtikytkentä. (Fingrid, 2022, s. 3)

2.3.2 Asiakasliityntöjen relesuojausvaatimukset

Kantaverkon yhteensopivuus asiakkaiden sähköverkon kanssa on yksi avainasemassa oleva tekijä kantaverkon käyttövarmuuden kannalta. Kantaverkon käyttövarmuuden kannalta on tärkeää, että asiakkaat noudattavat vikojen irtikytkentäaikoja, jotta heidän sähköverkkonsa suojaukset toimivat yhteensopivasti ja koordinoitusti kantaverkon suojauksen kanssa. Kantaverkkoon kytkettyjen laitteiden sekä niihin suoraan tai välillisesti liittyvien järjestelmien on täytettävä Fingridin yleisten liittymisehtojen (YLE) määrittämät jännite- ja taajuusaluevaatimukset. Tämä tarkoittaa, että asiakkaan on varmistettava, että sähkölaitteistonsa toimii halutuilla parametreilla, ja että se ei aiheuta vahinkoa asiakkaan tai muiden osapuolien sähkölaitteistoille. Lisäksi asiakkaan on varustettava sähkölaitteistonsa asianmukaisella yli- ja alijännitesuojauksella sekä tarvittaessa taajuussuojauksella. Jokainen osapuoli on vastuussa oman katkaisijakenttensä suojalaitteiden toteutuksesta ja toimintakunnosta, lukuun ottamatta differentiaalireleitä, suojauksen viestiyhteyksilaitteita (SVY) ja signaali siirtolaitteita, jotka kuuluvat voimajohdon haltijan vastuulle. Liittyjä puolestaan vastaa suojauksen tarkoituksenmukaisuudesta ja asetteluiden määrittämisestä. Tarvittaessa Fingrid voi tarjota liittyjälle apua näiden asetteluiden määrittelyssä. (Fingrid, 2022, s. 3)

Asiakkaan 400 kV sähköverkon suojauksen on toimittava välittömästi kaikissa vikatilanteissa ja erotettava vika viimeistään 0,1 s kuluessa, paitsi suuriresistanssisissa maasuluissa. Kaikkien 400 kV voimajohtojen pääsuojan on oltava kahdennettu ja suuriresistanssisia maasulkuja varten on oltava suojaus. (Fingrid, 2022, s. 3)

Asiakkaan 110 kV sähköverkon suojauksen tavoitteena on varmistaa, että vika erotetaan pääsuojauksella viimeistään 0,1 s kuluttua ja varasuojauksella viimeistään 0,5 s kuluttua. Suuriresistanssisissa maasuluissa suojauksen toiminta-aika on rajoitettava 1 s:in tai sitä lyhyempään. Kiskosuojausta suositellaan alle 5 Ω etäisyydellä Fingridin asemasta oleville asemille jännitekuoppien lyhentämiseksi. Kiskosuojaus voidaan toteuttaa pienillä asemilla esimerkiksi muuntajadifferentiaalireleellä. Pääsuojauksen tulee toimia aina normaalisti, vaikka yksi voimajohto olisi poissa käytöstä. Varasuojauksen toiminta saa hidastua

tällaisissa tilanteissa, mutta ei estyä kokonaan. Jännitereleellä varmistetaan, että kompensointilaitteisto ohjaa laitteistoa sallitun jännitteen normaalin vaihtelualueen ylittyessä tai alittuessa. 110 kV sähköverkon suojaamiseksi ei vaadita erillistä yli- ja alijännitesuojausta. Sen sijaan alajännitepuolen yli- ja alijännitesuojaus on hyvin tarpeellinen kuluttajalaitteiden vaurioiden estämiseksi. (Fingrid, 2022, s. 4) Alitaajuussuojaus on myös tarpeen asiakkaan 110 kV sähköverkossa, mutta sitä ei käydy tässä sen enempää, koska siitä on kerrottu luvussa 2.2.

2.3.3 Asiakkaan 110 kV liityntä kantaverkon voimajohtoon

Fingrid on laatinut sovellusohjeessaan erilaisille liityntätilanteilla omat periaatteet ja vaatimukset. Tällaisia liityntätilanteita ovat muun muassa asiakkaan 110 kV voimajohdon liityntä kantaverkon kytkinlaitokseen, asiakkaan 110 kV muuntajan liityntä kantaverkon kytkinlaitokseen ja asiakkaan 110 kV liityntä kantaverkon voimajohtoon. Kaukaan tehtaiden liityntä on kytkinlaitosliityntä, jolloin eroonkytkentää ei vaadita. Kaukaalta kuitenkin löytyy oma eroonkytkentäreleistys, joka on aikanaan rakennettu estääkseen saarekekäyttö. Saarekekäytön estolla tarkoitetaan tilannetta, jossa tuotantolaitosta estetään syöttämästä sähköä jännitteettömään verkkoon. Eroonkytkennän käyttäminen ei ole kiellettyä, kunhan se täyttää laitokselle esitetyt VJV2018 vaatimukset. Tämän lisäksi laitoksen omaehtoinen eroonkytkentä ei ole sallittua, vaan laukaisun tulee perustua jännite- ja taajuusehtojen yhdistelmään. Eroonkytkentäreleistyksen vaatimuksista on kerrottu voimajohtoliitynnän osiossa, minkä takia käydään tässä osiossa voimajohtoliitynnän suojausta läpi ja minkälaisia vaatimuksia tilanteeseen kuuluu. Keskitytään kuitenkin tässä osiossa paikallisen eroonkytkennän toteutukseen.

Asiakkaan 110 kV sähköverkon pääsuojauksen on toimittava välittömästi ja viiveettömästi, jotta oikosulkuvikoja ei pääse syntymään. Muuntajan suojauksessa suositellaan käytettäväksi differentiaalirelettä, joka suojaa tehokkaasti muuntajaa erilaisilta vikatilanteilta. Kantaverkon voimajohdon suojauksessa on tärkeää myös asiakkaan haarajohdon suojauksen viiveetön laukaisuvyöhyke, jotta kantaverkon vika ei vaikuta koko verkossa oleviin asiakkaisiin. (Fingrid, 2022, s. 10) Haarajohdon suojauksessa tulee noudattaa selektiivisyyden periaatetta, joka edellyttää, että pikajälleenkytkentää ei saa käyttää. Sen sijaan tulee käyttää lyhyempää jälleenkytkentäaikaa, jonka on oltava pienempi kuin Fingridin voimajohdon aikajälleenkytkentä. Tämä varmistaa, että haarajohdon

suojauksen toiminta on nopeampaa ja että vikatilanteet voidaan erottaa tarkasti. Tämän lisäksi herkän maasulkureleen laukaisun on estettävä jälleenkytkentä, jotta vikatilanne ei toistu. Varasuojauksen toiminta-aika on myös sovittava yhteen kantaverkon suojauksen kanssa, jotta suojaus toimisi mahdollisimman tehokkaasti ja koordinoitusti. Suositeltava vaihtoehto varasuojaukselle on käyttää kahta viiveettömästi laukaisevaa relettä. (Fingrid, 2022, s. 11)

Kun asiakkaan päämuuntaja on huollossa, muuntajasuojauksen laukaisutoiminnot on hoidettava sähköaseman muilla katkaisijoilla. Tässä tapauksessa päämuuntajan oikosulkureaktanssin on oltava vähintään 48Ω , jotta sallitaan asiakkaan alajännitepuolen kisko-oikosulut ja keskijänniteverkon johtojen alkupäiden oikosulut, joiden laukaisuaika voi olla enintään 1,0 s. Jos olemassa olevan päämuuntajan oikosulkureaktanssi on alle 48Ω , laukaisuaika saa olla enintään 0,2 s. Muuntaja täytyy varustaa 110 kV maasulkujännitesuojauksella, jos sen kautta on liitetty tuotantoa verkkoon. Tämän maasulkujännitesuojauksen avulla voidaan erottaa tuotanto 110 kV voimajohdon maasuluissa. Tuotannon erottaminen voidaan myös tarvittaessa laukaista joko muuntajan 110 kV tai alajännitepuolen katkaisija tai keskijännitejohdot, joilla on tuotantoa. Laukaiseva maasulkusuojaus on aina rakennettava, kun yksittäisen voimalaitoksen liityntäteho on enemmän kuin 1 MW. (Fingrid, 2022, s. 11). Voimalaitoksen suojauksen on varmistettava, että laitos irrottautuu verkosta ainoastaan oman liityntäjohdon vian aikana eikä muissa tilanteissa. Voimalaitosgeneraattoreiden alijännite- ja taajuusreleiden asettelujen on oltava yhteensopivia voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten (VJV2018) kanssa.

Kantaverkon voimajohdon pikajälleenkytkennän onnistuminen edellyttää, että tuotanto, joka on liitetty suoraan tai välillisesti, ei ylläpidä jännitettä voimajohdossa, kun voimajohtoa syöttävät katkaisijat ovat avautuneet kantaverkon sähköasemilla sähköverkkoviassa (Fingrid, 2022, s. 11). Voimalaitoksen suojauksen on varmistettava, että laitos irrottautuu verkosta ainoastaan oman liityntäjohdon vian aikana eikä muissa tilanteissa. Voimalaitosgeneraattoreiden alijännite- ja taajuusreleiden asettelujen on oltava yhteensopivia voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten (VJV2018) kanssa. (Fingrid, 2022, s. 12) Fingrid suosittelee näin ollen seuraavia asetteluita:

Taulukko 2.4 Alijännitereleet (Fingrid, 2022, s. 12).

	Jännite [pu]	Aika [s]
$U <$	0,8	1,5
$U <<$	0,2	0,5

Taulukko 2.5 Taajuusreleet (Fingrid, 2022, s. 12).

	Taajuus [Hz]	Aika [s]
$f <$	47,4	0,5
$f >$	51,6	0,5

Jos kyseessä on pelkkä tuotantoliityntä tai yhdistetty tuotanto- ja kulutusliityntä tuotannon erottaminen on mahdollista laukaisemalla liityntän 110 kV katkaisija tai alajännitepuolen katkaisijoilla. Kun kyseessä on yli 1 MW:n tuotantoliityntä, tuotanto on erotettava voimajohdosta suojareleen laukaisun jälkeen ennen pikajälleenkytkennän kiinniohjausta. Yleensä tuotannon eroonkytkentä tapahtuu paikallisella eroonkytkentäreleistyksellä, mutta jos tämä ei ole mahdollista voidaan käyttää eroonkytkennän viestiyhteyttä. (Fingrid, 2022, s. 12) Tällöin rakennetaan tuotannolle etälaukaisu, joka kulkee vastaanottoehdon kautta varmistaen, että sähköverkossa on vika ennen kuin tuotanto irrotetaan. Varmistuksen avulla ehkäistään tapaukset, jolloin irrotetaan tuotanto virheellisesti lähetetyn EVY-signaalin perusteella, joita voi syntyä inhimillisen erehdyksen tai viestiverkon takia. (Fingrid, 2022, s. 16) Vastaanottoehdon releistys koostuu:

- $3U <$ releestä, joka toimii, jos vähintään yksi pääjännite laskee alle asetetun arvon.
- $U_{0>}$ -releestä, joka mittaa 110 kV maasulkujännitettä.
- Pitopiiristä, joka mahdollistaa EVY-etälaukaisun toiminnan, vaikka jännitereleiden toimintaehdot palautuisivatkin nopeasti. (Fingrid, 2022, s. 16)

Kantaverkon voimajohdon suojausten toiminnan varmistamiseksi tuotannon syöttämä symmetrinen vikavirta voimajohtoliitynnässä saa 300 ms kuluttua vian alkamisesta olla korkeintaan 1,2-kertainen laitoksen nimellisvirtaan verrattuna. Tämä aikaraja on tärkeä varmistaessa, että vikavirta pysyy hallinnassa ja voimajohdon suojaus toimii välittömästi mahdollisiin vikoihin. Mikäli vikavirtaa ei saada rajoitettua 300 ms tasolle vian alkamisesta, asiakkaan tulee asentaa suojaus, joka varmistaa vikavirran syötön katkaisun (Fingrid, 2022,

s. 16). Tämän suojan vaatimukset määritellään tapauskohtaisesti Fingridin toimesta. Eroonkytkennän viestiyhteyden käyttäminen on perusteltua niin taloudellisesti kuin teknisesti vain seuraavissa tilanteissa:

- 1) Sähkönsiirron kannalta on haitallista, jos jälleenkytkentä pitkittyy merkittävästi.
- 2) Pitkäkestoinen jälleenkytkentä aiheuttaa haittaa muille asiakkaille, jotka ovat liittyneet samaan voimajohtoon, kuten laitteiden vaurioitumista, tuotantohäiriöitä tai muita vastaavia ongelmia.
- 3) Voimajohdon luotettava jälleenkytkentä ei ole mahdollista paikallisen eroonkytkentäreleistystä käytettäessä. (Fingrid, 2022, s. 13)

Muissa tapauksissa eroonkytkennän viestiyhteyden toteuttaminen pienentää vain jakeluverkkoyhtiön mittaamaa laskennallista keskeytyksen aiheuttamaa haittaa, mutta ei asiakkaan kokemaa haittaa jälleenkytkennän aiheuttaessa katkon sähköntoimituksessa. (Fingrid, 2022, s. 13)

Kun kyseessä on yhdistetty tuotanto- ja kulutusliityntä, jonka tuotantoteho voi lyhytaikaisesti olla yli 50 % liittymän kulutuksen minimitehosta tai yksittäisen voimalaitoksen tuotantoteho on yli 1 MW, on sille rakennettava eroonkytkentä. Eroonkytkentä voidaan toteuttaa jollain seuraavista tavoista:

- Ensisijaisena vaihtoehtona on erottaa ne muuntajan alajännitepuolen johdot, joilla on tuotantoa. Tällöin automaattinen jälleenkytkentä palauttaa jännitteet ensin 110 kV johdolle ja sen jälkeen muuntajan alajännitepuolen johdoille tilapäisissä vioissa.
- Toisena vaihtoehtona on laukaista muuntajan 110 kV katkaisija. Tällöin jännitteen palauttaminen muuntajalle suoritetaan käsinohjauksella 110 kV voimajohdon jännitteen palautuksen jälkeen.
- Kolmantena vaihtoehtona on erottaa vain osa tuotannosta, noudattaen mainittua 50 % periaatetta, jolloin tuotanto ei riitä ylläpitämään jännitettä sähköverkossa. (Fingrid, 2018, s.13)

Voimajohtoliitännälle vaaditaan paikallinen eroonkytkentäreleistys, joka sisältää seuraavat suojaustoiminnot:

- Ali- ja ylitaajuussuoja, joka mittaa ylä-, keski- tai generaattorijännitettä.
- Alijännite- maasulkujännitesuojan, joka mittaa 110 kV jännitettä. (Fingrid, 2018, s. 13)

Asiakkaan tulee toteuttaa voimalaitoksen paikallinen eroonkytkentä sähköaseman releistyksellä ja tämän eroonkytkennän on perustuttava jännite- ja taajuusehtojen yhdistelmään. Voimalaitoksen paikallisen eroonkytkennän osalta on huomioitava seuraavat ehdot:

- Jos minkä tahansa vaihejännite (U_v) alittaa 0,80 pu tai nollassa (U_0) ylittää 0,05 pu (maadoitettu verkko) yli 30 ms ajan, ja samalla taajuus menee 47,5–51,5 Hz ikkunan ulkopuolelle seuraavan 15 s aikana, voimalaitos laukaistaan verkosta. Taajuuden tulee ylittää tai alittaa raja-arvo 200 ms ajan.
- Lisäksi tarvitsee käyttää hidastettua (5 s) muuntajasuojausta, joka perustuu nollassa ($U_0 > 0,20$ pu) havahtumiseen. (Fingrid, 2022, s. 14)

Paikallinen eroonkytkentä varmistetaan usein vielä reaaliaikatietoon perustuvilla mittauksilla, jotka voidaan toteuttaa voimalaitoksen sähköaseman releistyksellä (Fingrid, 2022, s. 14). Näin ollen voimalaitoksen voimajohtoliitännän suojauksessa on otettava huomioon vasta-asemien suojaavien katkaisijoiden tilatiedot. Jos molemmat vasta-aseman katkaisijat ovat auki ja viestiyhteys on toiminnassa, voimalaitos laukaistaan verkosta. Mikäli viestiyhteys jostain syystä ei ole käytettävissä, voimalaitosta ei laukaista suoraan verkosta, vaan luotetaan paikalliseen eroonkytkentään. (Fingrid, 2022, s. 15) Kun kyseessä on kuitenkin alle 5 MW:n voimalaitos, reaaliaikatietoon perustuva eroonkytkentä voidaan jättää pois. Jos taas yli 5 MW voimalaitoksen ja Fingridin välinen tiedonvaihto määräytyy IEC 60870-5-104 protokollaan, reaaliaikatietoon perustuvasta eroonkytkennästä päätetään tapauskohtaisesti (Fingrid, 2022, s. 13).

3 TEOLLISUUSVERKKO

Teollisuusverkko tarkoittaa yleisesti sähköverkkoa, joka palvelee teollisuuslaitoksen sähkönkulutusta. Se on erittäin tärkeä osa teollisuuslaitosta, koska teollisuuslaitosten tuotantoprosessit ja laitteet ovat aina riippuvaisia sähköstä. Laitteiden ja tuotantoprosessien kannalta teollisuusverkkojen toimiminen tulisi olla mahdollisimman luotettavaa ja käyttäjien kannalta myös mahdollisimman turvallista.

Teollisuusverkot voidaan jakaa eri tyyppisiin verkkoihin, kuten pienjänniteverkkoihin, keskijänniteverkkoihin ja suurjänniteverkkoihin. Näiden verkkojen ominaisuudet kuten jännitetasot, vaihtelevat eri käyttökohteiden ja alueiden mukaan. Yleisesti teollisuuslaitos on liittynyt kantaverkkoon 0,4, 10, 20 tai 110 kV:n jännitetasoilla. Suurissa yksittäisissä teollisuuslaitoksissa tai teollisuusintegraateissa liittymispisteenä käytetään 110 kV:n jännitettä. Tämän takia suuret teollisuuslaitokset omaavat vahvan yhteyden kantaverkkoon ja sijaitsevat hyvin usein lähellä verkon solmukohtia. Suurissa teollisuuslaitoksissa on kuitenkin yleensä omia voimalaitoksia, jotka tuottavat osan laitoksen sähkön tarpeesta tai sähkö myydään verkkoon. Pienissä ja keskisuurissa teollisuuslaitoksissa käytetään yleensä 20 tai 0,4 kV jännitettä.

Teollisuusverkot eroavat jonkun verran kaupunkien sähköverkoista, sillä teollisuusverkoissa on yleensä korkeampi jännite ja suurempi sähkötehon tarve kuin kaupunkien sähköverkoissa. Teollisuusverkoissa johtoyhteydet on toteutettu hyllyillä tai maassa kulkevilla kaapeleilla, jotka ovat lyhyitä ja omaavat suuret poikkipinnat. Näiden kaapeli ominaisuuksien takia teollisuusverkoissa esiintyy suuria oikosulkuvirtoja. Joissakin tilanteissa teollisuusverkot kattavat laajoja alueita ja palvelevat montaa erilaista sähkönkuluttajaa kuten suuria teollisuuslaitoksia, kaivoksia ja tehtaita. Tällaisissa tilanteissa, kun teollisuusverkkoon on kytketty eri teollisuudenaloja, on erityisen tärkeää, että teollisuusverkko pystyy toimimaan tehokkaasti.

3.1 Sähkönjakelu teollisuusverkoissa

Teollisuusverkkojen sähkönjakelu voidaan yleensä jakaa tuotannon sähkönjakeluun, valaistus- ja huoltosähköverkkoon sekä apusähköjärjestelmään. Tuotannon sähkönjakelu on näistä tyypillisesti tärkein. Sen suurimman kuluttajaryhmän muodostaa moottorit, joiden jännitteinä Suomessa käytetään 400 V, 690 V, 3 kV, 6 kV ja 10 kV. Näistä 10 kV

moottorijännitettä käytetään vain moottoreilla, joiden teho on yli 1 MW, kun taas 400 V moottorijännite on hyvin yleisesti käytetty pienessä ja keskisuudessa teollisuudessa. Moottorijännitteen valintaan vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat huipputehon tarve, suurimpien moottoreiden teho, käyttöalueen laajuus, jo olemassa olevat jännitteet laitoksessa sekä jakelumuuntajien oikosulkuteho. (Korpinen, 2023, s. 9)

Teollisuusverkkojen moottorit aiheuttavat haasteita sähkönjakeluun. Suurimmat moottorit aiheuttavat käynnistyksessä jännitteenalenemaa, joka ei saa aiheuttaa haittaa verkon muihin laitteisiin tai niiden toimintaan. Tämän lisäksi moottoreiden ohjauksessa käytetään nykyään monesti taajuusmuuttajia, jotka synnyttävät verkkoon yliaaltoja (Korpinen, 2023, s. 10). Yliaaltojen leviämisen estämiseksi suositellaan, että taajuusmuuttajalla ohjatut moottorit kytketään omaan jakelumuuntajaan.

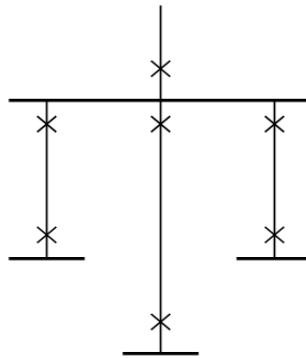
Teollisuuslaitoksessa voidaan käyttää joko yhtä tai useampaa keskijännitetasoa. Teollisuuslaitoksen pääjakelujännitteeksi kuitenkin määritellään se jännite, jolla sähkönjakelu pääosin tapahtuu ja johon on pääosa jakelumuuntajista liitetty. Yleisiä pääjakelujännitteitä teollisuuslaitoksissa on 6 kV, 10 kV tai 20 kV. Pienteollisuudessa pääjakelujännite on luonnollisesti 0,4 kV, koska pienteollisuuden oma liityntäjännite on myös 0,4 kV. (Korpinen, 2023, s. 9) Pääjakelujännitteen valinta perustuu muun muassa sähkönkulutukseen suuruuteen, teollisuuslaitoksen sähköntarpeisiin ja taloudellisiin sekä teknisiin tekijöihin.

3.2 Yleiset teollisuusverkon rakenteet

Teollisuusverkkojen rakentamisessa käytetään kolmea eri perustyyppiä: säteittäinen, rengas- tai silmukoitu verkko. Jokaisella verkkotyypillä on omat etunsa ja haittansa, joiden takia ne soveltuvat hieman eri käyttötilanteisiin. Verkkojen käyttöön liittyy tämän lisäksi monia teknillisiä ja taloudellisia näkökohtia kuten, investointien kustannukset, käytön taloudellisuus ja luotettavuus, varasyöttöjen mahdollisuus sekä erityisesti verkon suojaukseen liittyvät vaatimukset. Käydään seuraavaksi läpi näiden kolmen eri verkkotyypin ominaisuuksia.

3.2.1 Säteittäinen verkko

Säteittäinen verkko sähköverkon rakenne, jossa johdot lähtevät keskusasemalta tai syöttöpisteestä säteittäisesti eri suuntiin. Kuvassa 3.1 on esitetty säteittäisen verkon rakenne.

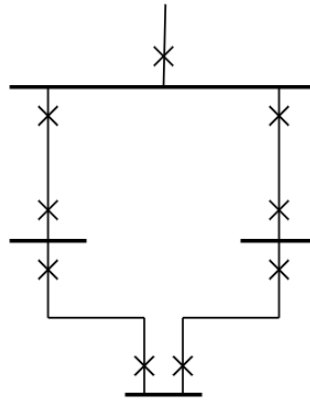


Kuva 3.1 Säteittäinen verkko (Muokattu lähteestä ABB, 2000a).

Kuvasta 3.1 nähdään, että säteittäisen verkon avulla voidaan helposti irtikytkä niiden päissä olevia kuormia erilaisissa vikatilanteissa ilman, että ne vaikuttavat toisiin johtolähtöihin. Tämän verkkotyypin etuina on sen selkeä yleisrakenne, käytön yksinkertaisuus ja suojauksen helppous. Verkkotyypin omat haittapuolet ovat varmistusmahdollisuuden puuttuminen sekä huollon vaatimat käyttökeskeytykset. Säteittäistä verkkoa käytetään tavallisesti keski- ja pienjännitteellä. Esimerkiksi Suomessa yleensä rakennetaan 20 kV verkko renkaiksi, vaikka sen käyttö on säteittäistä jakorajojen avulla. (ABB, 2000a)

3.2.2 Rengasverkko

Yleensä suuremmilla jännitteillä verkot rakennetaan rengasverkoiksi. Se pystytään kuitenkin myös kytkemään yleensä säteittäiseksi verkoksi. Kuvassa 3.2 on esitetty rengasverkon rakenne.

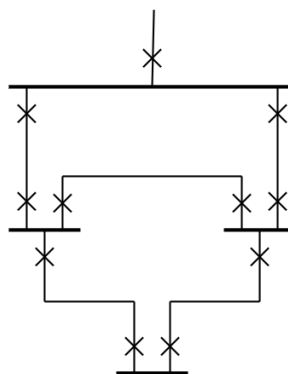


Kuva 3.2 Rengasverkko (Muokattu lähteestä ABB, 2000a).

Kuvasta 3.2 nähdään, kuinka kahden eri johdon lähdöt muodostavat selkeän renkaan. Sen etuina on varmistettu syöttö, parempi jännitevakavuus ja pienemmät tehohäviöt verrattuna säteittäisverkkoon. Tämän verkko tyyppin haasteina puolestaan on verkon käytön vaikeutuminen ja relesuojauksen monimutkaistuminen. 110 kV:n verkot kytketään Suomessa yleensä renkaiksi pois lukien sellaiset johdot, jotka syöttävät vain yhtä tai paria 110/20 kV sähköasemaa. (ABB, 2000a)

3.2.3 Silmukoitu verkko

Silmukoitu verkko on hyvin samankaltainen kuin rengasverkko, mutta silmukoitu verkko sisältää renkaan sisäisiä väliyhteyksiä. Kuvassa 3.3 on esitetty silmukoidun verkon rakenne.



Kuva 3.3 Silmukkaverkko (Muokattu lähteestä ABB, 2000a).

Kuvasta 3.3 nähdään, että silmukkaverkon rakenne on hyvin paljon monimutkaisempi kuin säteittäisen verkon tai rengasverkon. Verkosta löytyvien väliyhteyksien avulla pystytään kasvattamaan syöttöjen varmistusmahdollisuuksia, parantaa verkon jännitevakavuutta ja

pienentää verkon tehohäviöitä. Rakenteen monimutkaistuminen tarkoittaa myös, että verkon käyttö vaikeutuu ja verkon relesuojaus on kalliimpaa. (ABB, 2000a) Esimerkiksi 400 kV:n ja 220 kV:n sähköverkot ovat Suomessa silmukoituja. Tämä johtuu siitä, että näille verkoille on erityisen tärkeää, että verkossa tapahtuvat siirtohäviöt ovat mahdollisimman pieniä ja verkon jännitevakavuus on erittäin hyvä.

3.3 Saarekekäyttö

Saarekekäytöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa yksi tai useampi samassa sähköverkossa oleva voimalaitos jää kantaverkon ulkopuolelle. Tämä tarkoittaa, että pyörivät tehtaot ovat oman sähköntuotannon varassa. Saarekekäyttöön siirtymisen onnistumiseksi on tehtaon kuormitus tasapainotettava oman sähköntuotannon kanssa. Jos tehtaon kuormitusta ei tasapainoteta ennen saarekekäyttöön siirtymistä, seurauksena voi olla sähkökatkoja ja ylikuormitusta tehtaon sähköjärjestelmässä. Kyseiset haittavaikutukset aiheutuvat siitä, että tehdas ei kykene tuottamaan riittävästi sähköä omien tuotantoprosessien tarpeisiin. Nämä voivat johtaa laitteiden vaurioitumiseen tai jopa koko tehtaon pysähtymiseen.

Normaalitilanteessa kantaverkossa olevien voimalaitosten tulee tukea valtakunnan sähköjärjestelmää ja saarekkeeseen saa siirtyä vain tietyissä tilanteissa. Näitä ovat häiriötilanteet, joissa sähköjärjestelmän jännite ja/tai taajuus on VJV2018 vaatimusten määräämien jännite-taajuus-alueiden ulkopuolella. Tämä saarekekäyttöön siirtyminen ei saa kuitenkaan häiritä verkossa olevia muita käyttäjiä tai katkaista kantaverkon siirtoyhteyksiä. (Fingrid, 2021b, s. 9)

Verkonhaltija voi kuitenkin tietyissä tilanteissa irrottaa sähkölaitteistonsa sähköverkosta tai siirtyä saarekekäyttöön ilman ennakkovaroitusta, jos Fingridin kanssa on näin sovittu etukäteen. Tällöin yhden liittynän takana tulee olla tuotantoa ja kulutusta sekä pätötehon siirron tulee olla tasapainossa (~0 MW) kantaverkon liityntäpisteessä. Tämän irtautumisen saa tehdä vasta tilanteissa, joissa torjutaan tai ennalta ehkäistään häiriö- tai vaaratilanteita sekä sähköverkon vika- tai häiriötapauksia. (Fingrid, 2021b, s. 9)

4 TEOLLISUUSVERKON SUOJAUS

Teollisuusverkkojen suojauksella tarkoitetaan erilaisten suojalaitteiden käyttöä sähköverkkojen vikatilanteissa. Näitä vikatilanteita voivat olla esimerkiksi oikosulut, maasulut, ylikuormitukset, ylijännitteet, alijännitteet ja johdinkatkokset. Eri suojalaitteita, kuten sulakkeita, suojareleitä, katkaisijoita ja erottimia, käytetään paljon voimalaitoksilla, sähköasemilla ja kytkinlaitoksilla. Suojauksen luotettavuuden varmistamiseksi käytetään usein myös varasuojausta pääsuojauksen kanssa. Joissakin tilanteissa kuitenkin tehtaiden teollisuusverkkojen toisarvoiset kohteet voivat jäädä vaille varasuojausta tai pahimmassa tapauksessa ilman suojausta, mikäli suojalaitteet on suunniteltu ja asennettu vain tärkeimmille kohteille (Mörsky, 1992, s. 16).

Teollisuusverkon suojausjärjestelmän tärkeimpiä ominaisuuksia ovat selektiivisyys, nopeus, luotettavuus ja herkkyys. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa ainoastaan vikaa lähinnä olevat suojalaitteen avataan. Tämän ansiosta mahdollisimman pieni osa verkosta kytketään irti ja verkon toiminta jatkuu mahdollisimman häiriöttömästi. Toinen keskeinen selektiivisyyteen vaikuttava asia on se, että jokainen verkon osa on suojattu jollain suojalaitteella (Haarla, 2023). Toimintanopeus on myös tärkeä tekijä teollisuusverkon suojaamisessa, koska mitä nopeammin vika saadaan poistettua, sitä pienemmät ovat vikavirran aiheuttamat vahingot laitteille. Nopeutta voidaan käyttää myös selektiivisyyden saavuttamiseen siten, että lähellä olevat viat laukaistaan nopeammin kuin kaukana olevat viat (Haarla, 2023). Suojausjärjestelmän luotettavuus ja herkkyys ovat hyvin keskeisiä ominaisuuksia, koska niiden avulla varmistetaan suojalaitteiden oikea toiminta ja vikojen nopea havaitseminen.

4.1 Sulakesuojaus

Sulake on sähköinen suojauskomponentti, joka suojaa sähkölaitteita ja sähköpiirejä ylikuormituksilta ja oikosuluilta. Sulakkeen toiminta perustuu sen sulakelangan sulamiseen, kun sulakkeeseen kohdistuu liian suuri virta tai pitkäaikainen ylikuormitus. Tällöisissä tilanteissa sulakelanka lämpenee ja sulaa, mikä puolestaan aiheuttaa valokaaren syttymisen, joka sammuu sulakelangan ympärillä olevan kvartsihiekan avulla. Samalla kvartsihiekkä absorboi sulamisprosessista vapautuvia kaasuja. (Mörsky, 1992, s. 382) Kun sulakelanka on sulanut ja virtapiiri katkaistu, sulake on palanut ja se on vaihdettava uuteen. Sulakkeiden

vaihtaminen on suhteellisen helppoa ja edullista verrattuna muihin suojausmenetelmiin, mikä tekee sulakkeista suosittua valinnan monissa sähköasennuksissa.

Eri sulaketyyppejä, kuten tulppa-, kahva- ja putkisulakkeita, käytetään eri jännitetasoilla. Alle yhden kilovoltin jännitteillä käytetään yleisesti tulppa- ja kahvasulakkeita, kun taas suurjännitteillä käytetään putkisulakkeita. Sulakkeiden valinta riippuu tarvittavasta virrasta ja käyttökohteesta. Tulppasulakkeet soveltuvat pienille virroille ja niitä käytetään pääasiassa rakennusten sähköverkoissa. Ne tarjoavat hyvin suojaa esimerkiksi kotitalouksien ja pienempien laitosten sähköjärjestelmille. Kahvasulakkeet ovat taas yleisempiä sähkölaitostoiminnassa ja teollisuudessa. Ne tarjoavat suojaa suuremmille virroille ja ovat käytössä esimerkiksi voimalaitoksissa ja suurteollisuuden sähköjärjestelmissä. Suurjännitesulakkeina käytetään pääasiassa putkisulakkeita, jotka sijoitetaan jakelumuuntajien ensiöpuolelle. Putkisulakkeet kykenevät käsittelemään suuria sähkövirtoja ja tarjoavat näin ollen tehokkaan suojan suurjännitejärjestelmissä. (Mörsky, 1992, s. 382)

Sulakkeiden käyttöluokka ilmoitetaan kahden kirjaimen avulla ja se kertoo, minkä tyyppisestä sulakkeesta on kyse ja mitä sillä voi suojata. Käyttöluokan ensimmäinen kirjain ilmoittaa, sulakkeen rajavirran eli mistä virrasta lähtien sulake toimii. Esitetään ensimmäisen kirjaimen määrittelyt:

- g rajavirta ei ole kovin paljon sulakkeen nimellisvirtaa suurempi
- a rajavirta on moninkertainen sulakkeen nimellisvirtaan verrattuna – sulake soveltuu vara- ja oikosulkusuojaukseen (Mörsky, 1992, s. 388)

Sulakkeen käyttöluokan toinen kirjain määrittelee sulakkeen varsinaisen käyttötavan. Esitetään toisen kirjaimen määrittelyt:

- G kaapeli- ja johdinsuojaukseen sekä yleiskäyttö
- M käyttölaitteiden, kontaktorien ja kytkinlaitteiden sekä hitaasti käynnistyvien moottoreiden oikosulkusuojaukseen
- R puolijohdesuojaukseen (Mörsky, 1992, s. 388)

G-tyypin sulakkeita kutsutaan hidas-nopeiksi sulakkeiksi ja niiden päällä on yleensä merkintä, joka kertoo, onko kyseessä nopea vai hidas sulake. R-tyypin sulakkeita käytetään

puolijohdesuojauksessa, koska ne toimivat erittäin nopeasti, jotta herkät puolijohteet eivät vahingoittuisi vikavirran vaikutuksesta. M-tyyppin sulakkeet on suunniteltu erityisesti hitaasti käynnistyvien moottorien suojaamiseen. Käynnistysvirta näissä moottoreissa voi olla pitkäaikainen ja huomattavasti suurempi kuin sulakkeen nimellisvirta. (Mörsky, 1992, s. 388)

Sulake ei yleensä vanhene normaalissa käytössä. Jatkuvat lähellä sulamisvirtaa olevat ylivirrat voivat aiheuttaa kuitenkin sulakkeen vanhenemista ja herkkyyden lisääntymistä. Tämä voi puolestaan johtaa sulakkeen epätoivottuun toimintaan tai selektiivisyyden menettämiseen. Ympäristön lämpötilalla on myös hyvin vähäinen vaikutus sulakkeen toimintaan. Sulakkeen virta-aikaominaiskäyrä pysyy suurin piirtein $\pm 5-10$ % rajoissa lämpötilan ollessa $-5-+40$ rajoissa. Sulakkeita ei kuitenkaan tulisi sijoittaa kuumaan ja tiiviisti suljettuun tilaan, sillä se saattaa aiheuttaa sulakkeen ei-toivottua toimintaa. (Mörsky, 1992, s. 389)

4.2 Relesuojaus

Relesuojauksella tarkoitetaan sähköverkoissa käytettäviä suojalaitteita, jotka havaitsevat vikatilanteita ja suorittavat automaattisia kytkentöjä sähköverkon tilanteen turvaamiseksi (Mörsky, 1992, s. 15). Suojauksessa käytetty rele on laite, joka mittaa tiettyä suuretta kuten taajuutta, jännitettä tai virtaa. Rele havahtuu silloin, kun mitattava suure ylittää tai alittaa releelle asetellun toiminta-arvon, ja antaa toiminta-ajan kuluttua katkaisijalle laukaisukäskyn. Releen toiminta on yleensä hetkellinen, ellei toiminta-aikaan sisälly tahallista hidastusta. Hidastetun releen toiminta-aikaan sisältyy joko vakioaikarelettä käytettäessä vakiohidastus tai käänteisaikarelettä käytettäessä hidastus, joka riippuu mitattavan suureen arvosta. (ABB, 2000a)

Vanhimmat suojareleet ovat sähkömekaanisia releitä ja ne sisältävät liikkuvia osia. Esimerkiksi sähkömekaanisten ylivirtareleiden toiminta perustuu virran kasvun aiheuttamaan magneettikentän kasvuun, joka saa aikaan releen liikkeen. Vaikka nämä releet ovat kestäviä ja kookkaita, ne ovat hieman epätarkkoja, joka rajoittaa niiden käyttöä. Sähkömekaanisia releitä on edelleen käytössä teollisuudessa, mutta niitä pitää säännöllisin väliajoin koestaa, jotta ne eivät jäykisty. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 344) Kuvassa 4.1 on esitetty sähkömekaaninen lämpörele.



Kuva 4.1 Sähkömekaaninen lämpörele [Schossig, 2020]

Kuvassa 4.1 on esitetty Brown Boverin lämpörele, jota käytettiin hyvin paljon generaattoreiden suojaamisessa. Näiden releiden asettelut tulee aina tehdä fyysisesti releeltä ja yksittäinen rele pystyy ainoastaan yhteen suojaustoimintoon.

Staattiset releet ovat elektronisia releitä, jotka otettiin käyttöön 1960-luvulla. Niissä ei ole liikkuvia osia, vaan ne koostuvat puolijohdekomponenteista ja mikropiireistä. Staattisilla releillä voidaan toteuttaa haastavampia suojaustoimintoja kuin sähkömekaanisilla releillä, mutta niiden toimintojen valikoima on silti rajoitettu. Näitä releitä käytetään laajasti teollisuudessa, koska ne ovat sähkömekaanisia releitä tarkempia. Staattisten releiden haittapuoli on niiden herkkyys ylijännitteille, joka voi vahingoittaa niitä. Lisäksi staattiset releet vaativat jatkuvaa aputehon tarvetta akusta, ja elektronisten osien vanheneminen voi johtaa siihen, että releitä on korjattava tai vaihdettava. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 344–345) Kuvassa 4.2 on esitetty ABB:n SPAA 321 C1 syötön suojauspaketti.



Kuva 4.2 ABB:n SPAA 321 C1 staattinen syötön suojapaketti, joka sisältää ylivirtarelemoduulin ja suunnatun maasulkurelemoduulin.

Kuvasta 4.2 nähdään, että staattisella releellä on jokaiselle suojaustoiminnolle oma releyksikkö. Näiden releyksikköiden asetelut tehdään fyysisesti releeltä säätämällä asettelupotentiometriä haluttuun kohtaan ja releen toiminnot valitaan etulevyssä olevasta ohjelmointikytkinryhmästä SG1.

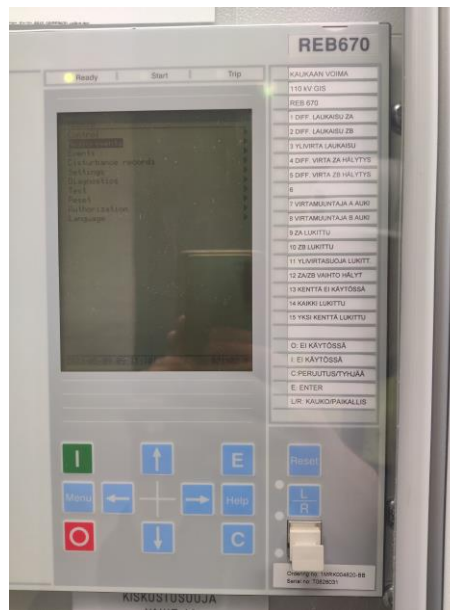
Ensimmäiset mikroprosessorireleet eli digitaaliset releet tulivat markkinoille 1980-luvun lopulla. Digitaaliset releet mullistivat suojausteknologian aikoinaan, koska niissä oli paljon laajemmat suojaustoiminnot ja asettelumahdollisuudet kuin aikaisemmin käytössä olleilla releillä. Toisaalta releiden monimutkaisuus voivat aiheuttaa välillä virheitä asetteluissa. Digitaaliset releet sisältävät myös itsevalvontatoimintoja, jotka havaitsevat mahdolliset viat. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 345) Kuvassa 4.3 on esitetty ABB:n SPAD 320 C3 differentiaalirele.



Kuva 4.3 ABB:n SPAD 320 C3 digitaalinen differentiaalirele, joka sisältää vakavoidun differentiaalirelemoduulin SPCD 3D53 ja siinä on vielä kaksi releyksikköä vapaana laajennettavaksi.

Kuvasta 4.3 nähdään, että ensimmäisissä digitaalisissa releissä on vielä erilliset releyksiköt, joiden takia niiden toiminnot on vähän rajatut. Näiden releiden asettelut tarvitsee tehdä tietokoneohjelmalla, ja niitä ei pysty tekemään fyysisesti releeltä.

Digitaaliset releet jatkoivat nopeaa kehitystä ja niin kutsuttu 2. sukupolvi otettiin käyttöön 2000-luvun alussa. Uudet digitaaliset releet ovat ohjelmoitavia, mikä mahdollistaa joustavuuden suojaustoiminnoissa. Ohjelmistopäivityksiä voidaan ladata tarvittaessa, jolloin uusia suojaustoimintoja voidaan tuoda releeseen ilman, että kokonaan uusi rele tarvitaan. Uusissa digitaalisissa releissä on muun muassa vikapaikan laskenta, häiriötallennus ja itsevalvonta, joka vähentää koestuksen tarvetta. Vaikka näissä releissä ei ole kuluvia mekaanisia osia, ohjelmointivirheitä voi esiintyä, mitkä aiheuttavat sitten virheikäyttötymistä. (Elovaara, 2023) Kuvassa 4.4 on esitetty ABB:n REB670 digitaalinen monitoimirele.



Kuva 4.4 ABB:n REB670 digitaalinen monitoimirele, jolla on monta eri sujaustoimintoa kuten kaksiporaiset yli- ja alijännitesuojat, alitaajuussuojaus sekä neliportainen ylivirtasuoja.

Kuvasta 4.4 nähdään, että erilliset releyksiköt ovat hävinneet ja yhdessä samassa yksikössä on nyt monta eri suojaustoimintoa. Asettelut ja niiden säätö voidaan tehdä tämän tyyppisissä releissä joko etänä tai fyysisesti releen ohjauspaneelista.

4.2.1 Virtarele

Virtarele on suojalaite, joka toimii sähkövirran avulla. Sen tarkoituksena on havaita sähkövirran muutoksia ja käyttää tätä tietoa suojalaitteen toiminnan ohjaamiseen. Virtareleitä on käytössä monia erilaisia kuten hetkellinen ylivirtarele, vakioaikaylivirtarele ja käänteisaikaylivirtarele, jotka toimivat omilla periaatteillaan.

Hetkellinen ylivirtarele toimii ilman viivettä, kun releen läpi kulkeva virta ylittää asetetun toiminta-arvon. Vakioaikaylivirtarele puolestaan koostuu sekä hetkellisestä ylivirtareleestä että aikareleestä, jonka toiminta-aikaa voidaan säätää. (Mörsky, 1992, s. 35) Molemmat niin hetkellinen ylivirtarele kuin vakioaikavirtarele ovat tyypillisiä oikosulkusuojareleitä. Ne on aseteltava huomattavasti nimellisvirran yläpuolelle kuten $1,5-2I_n$, jotta ne eivät laukea lyhytaikaisista kuormitusnykäyksistä. Nämä releet eivät pysty kuitenkaan suojaamaan kohdettaan pitkittyneiltä ylikuormituksilta, jotka voivat ajan myötä aiheuttaa kohteessa liiallista lämpenemistä. (Mörsky, 1992, s. 36)

Käänteisaikaylivirta toimii taas sitä nopeammin, mitä enemmän virta ylittää releeseen asetetun toiminta-arvon (Mörsky, 1992, s. 35). Käänteisaikaylivirtareleet sopivat hyvin esimerkiksi yhteistoimintaan sulakkeiden kanssa. Ne soveltuvat myös verkon kohteisiin, joissa vikavirrat ovat erilaisia ja jokseenkin vakioita. (Mörsky, 1992, s. 37)

4.2.2 Distanssirele

Distanssireleen toiminta perustuu etäisyysmittaukseen, jossa se mittaa sijaintipaikkansa ja vikapaikan välisen impedanssin. Tämä impedanssi lasketaan releen sijaintipaikassa esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla (Mörsky, 1992, s. 57). Mitä lähempänä vikapaikka on releen sijaintipaikkaa, sitä pienempi on impedanssin arvo. Impedanssin mittaaminen tarkoittaa myös sitä, että verkon eri kytkentätilanteet tai kuormitustilat eivät häiritse suojien toimintaa (Mörsky, 1992, s. 57).

Distanssirele soveltuu todella hyvin pitkien sähkölinjojen suojaamiseen, koska ne pystyvät havaitsemaan ja paikantamaan vikoja luotettavasti ja nopeasti. Ne pystyvät myös toimimaan selektiivisesti, mikä tarkoittaa, että distanssireleet pystyvät erottamaan paikalliset viat ja rajoittamaan vikatilanteen vaikutusta vain viialliseen osaan sähköverkosta. (Mörsky, 1992, s. 57) Lyhyiden, kuten alle 10 km, johtojen suojaukseen distanssireleet eivät sovellu (Mörsky, 1992, s.58). Distanssireleet eivät myöskään havahdu tilanteissa, joissa vikaresistanssi on suuri, koska silloin vikavirta on resistiivistä (Haarla, 2023). Distanssireleet eivät pysty tällaisissa tilanteissa erottamaan vikavirtaa normaalista kuormitusvirrasta.

4.2.3 Differentiaalirele

Differentiaalireleen toiminta perustuu suojattavan kohteen tulevien ja lähtevien virtojen erotukseen. Kyseinen virran mittaus tapahtuu suojattavan kohteen tulo- ja lähtöpuolella sijaitsevilla virtamuuntajilla. Normaalissa tilanteessa mitattavat virrat kulkevat suojausalueen läpi, jolloin virtojen summa on nolla. Vikatilanteessa taas virta ei mene suojattavan alueen läpi vaan ulkopuolelta tulevat vikavirrat tulevat alueelle. Tällöin releen mittaama virtojen summa ei ole enää nolla ja jos virtojen summa ylittää releen asetteluarvon, rele toimii. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 354)

Differentiaalireleitä käytetään erityisesti muuntajan suojauksessa, koska se voi havaita esimerkiksi oikosulut, maasulut, käämisulut ja kierrossulut, mitkä aiheuttavat virtamuuntajiin tarpeeksi suuret erovirrat. Differentiaalireleet pystyvät suojaamaan vain aluetta, jonka virtoja se vertailee, minkä takia se ei pysty toimimaan muiden alueiden varasuojana. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 354)

4.2.4 Yli- ja alijänniterele

Yli- ja alijänniterele ovat suojalaitteita, jotka tarkkailevat järjestelmän jännitetasoja. Alijänniterele on suojarele, joka toimii, kun jännite alittaa releeseen asetellun toiminta-arvon. Tällaisia releitä käytetään hyvin paljon suurten moottoreiden yhteydessä, sillä ne kykenevät erottamaan moottorin sähköverkosta, kun jännite laskee tai poistuu sen verran paljon, että moottori on vaarassa pysähtyä. Jos moottori jäisi kytketyksi tällöin, seuraisi jännitteen palatessa oikosulkua muistuttava suuri sysäysvirta. Yleensä yhtä moottoria varten asennetaan yksi alijänniterele. (Mörsky, 1992, s. 38) Alijännitereleiden toiminta ei saa häiriintyä lyhytaikaisten jännitevaihteluiden seurauksena, jotta vältettäisiin tarpeettomat käyttökatkokset. Tämän takia hyvän alijännitereleen toimintajännite on asetettava noin 50 %:iin nimellisjännitteestä ja niille tulee asettaa aikahidastus. Riittävä epäherkkyys on myös tärkeä, jotta alijänniterele ei toimisi pikajälleenkytkennän tapahtuessa johtolähdössä. (Mörsky, 1992, s. 39)

Ylijänniterele puolestaan toimii, kun jännite ylittää releelle asetetun toiminta-arvon. Ylijännitereleitä käytetään laajasti maasulkujen havaitsemiseen ja ne ovat yleensä aikahidastettuja. Ylijännitereleitä käytetään monesti myös tahtigeneraattoreiden kanssa, missä ne suojaavat generaattoria vaaralliselta jännitteennousulta. Yleensä ylijännitereleissä tulee olla koskettimia tai niiden apuna tulee käyttää monikoskettimista apurelettä, koska niiden tulee antaa yleensä kytkentävirhe usealle kohteelle, kuten katkaisijalle, kenttäkatkaisijalle ja pysäytykselle. (Mörsky, 1992, s.39)

4.2.5 Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele

Nollavirtarele on ylivirtarele, joka toimii maasulussa. Sen toiminta perustuu suojattavan kohteen vaihevirtojen summavirtaan. Jos tämä summavirta on suurempi kuin releen asetteluarvo, rele toimii. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 354) Nollavirtarelettä voidaan käyttää esimerkiksi johdonsuojina, jolloin se pystyy havaitsemaan ja suojaamaan sähköjohtoa epäsymmetrisissä vioissa.

Suunnattu maasulkurele on taas nollavirtarele, joka vikavirran lisäksi mittaa vian suuntaa nollavirran ja nollajännitteen välisestä vaihekulmasta. Suunnattujen maasulkureleiden merkittävä etu verrattuna nollavirtareleisiin on niiden asettelujen riippumattomuus johtojen pituuksista laajalla alueella. Tämä tarkoittaa sitä, että suojaus säilyttää selektiivisyytensä ilman asettelujen muutoksia myös esimerkiksi varasyötön kytkemisen yhteydessä. Suuntareleen oikean toiminnan edellytyksenä on kuitenkin, että virtamuuntajien näkökulmasta verkon puolella on riittävästi maakapasitanssia, jotta releen havahtumiskynnys ylittyy ja nollavirta saadaan aikaan. (Mörsky, 1992, s. 40)

4.3 Suojaus katkaisijalla

Katkaisija ei ole suoraan suojalaite vaan kytkinlaite, joka pystyy avaamaan ja sulkemaan virtapiirin suurimmillakin mahdollisilla virroilla vahingoittumatta. Tämän takia katkaisijaa käytetään aina muiden suojien kanssa. Kun suojarele havaitsee esimerkiksi liian suuren virran, antaa suojarele ohjauksikäskyn katkaisijalle, joka irtikytkee viallisen osan verkkoa muusta verkosta. Katkaisijan avautuessa sulavat sen koskettimet, minkä takia koskettimia ympäröivä aine ionisoituu. Ionisoituminen synnyttää taas valokaaren, jonka välityksellä virta pystyy kulkemaan samalla, kun katkaisijan koskettimet erkanevat. Valokaari sammuu vasta koskettimien erkaannuttua riittävästi tai virran nollakohdassa. Virran nollakohdassa valokaari sammuu, koska sen resistanssi on kasvanut niin suureksi, että se toimii eristeenä. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 163)

Katkaisijoiden tyyppi määräytyy niiden katkaisukammiossa käytetyn aineen mukaan. Väliaineena voidaan käyttää esimerkiksi öljyä, ilmaa tai SF₆-kaasua. Näiden lisäksi tyhjiökatkaisijoiden, joissa ei ole mitään väliainetta, käyttö on yleistynyt. Katkaisijat voidaan jakaa myös sen perusteella ovatko niiden katkaisukammio verkon vai maan potentiaalissa. Tällaisia ovat dead-tank ja live-tank katkaisijat, joista dead-tank katkaisijat

ovat maan potentiaalissa ja live-tank katkaisijat ovat verkon potentiaalissa. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 169) Suomessa käytetyt katkaisijat ovat yleensä live-tank tyyppisiä katkaisijoita ja dead-tank tyyppisiä katkaisijoita ei löydy monia Suomesta (Elovaara & Haarla, 2011, s. 170).

5 KAUKAAN TEHTAAT

Kaukaan tehtaat muodostavat itsessään biometsäteollisuuden keskittymän, jossa valmistetaan uusiutuvasta raaka-aineesta sellua, paperia, sahatavaraa, energiaa, biopolttoaineita, biokemikaaleja ja biomediakaaleja. UPM:n tehtaiden lisäksi alueella toimii Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitos, joka tuottaa lämpöä ja sähköä Kaukaan tehtaille sekä lähialueen asukkaille. (UPM. 2023a)

Vuonna 1873 Mäntsälän Kaukaankoskella ruukinpatruuna Robert Björkenheim keksi etsiä teollista käyttöä Kellokosken tilan metsissä kasvavalle koivulle. Tämän myötä myöhemmin Kaukaan Tehdas Osakeyhtiö rakensi lankarullatehtaan Lappeenrannan itäpuolelle Saimaan rannalle vuonna 1892. Lankarullien valmistuksesta jäi runsaasti ylimääräistä puuainesta, jolle piti keksiä jokin tarkoitus, ettei kallisarvoinen puuraaka-aine menisi hukkaan. Tämän seurauksena vuonna 1897 Kaukaan tehdasalueella aloitettiin sulfiittisellun valmistus lankarullien sorvaustähteistä. Seuraavien vuosikymmenten aikana Kaukaan tehdasalueelle rakennettiin myös saha ja paperitehdas. Tehdasalueella oli ollut jo alun perin vaneritehdas, jonka tuotanto myöhemmin siirtyi muihin UPM:n tuotantolaitoksiin Suomessa. Kaukaan tehtaiden tuotanto kehittyi koko metsäteollisuuden murroskauden ajan ja muuttui maailman markkinoiden kysynnän mukaisesti. Uusin tulokas Kaukaan tehdasalueella on vuonna 2015 aloittanut biojalostamo, joka valmistaa päätuotteena uusiutuvaa dieseliä liikenteen polttoaineeksi sellun valmistuksesta syntyvästä sivuvirrasta, mäntyöljystä. Kyseinen tehdas on maailman ensimmäinen ja ainoa mäntyöljystä uusiutuvia biopolttoaineita ja biokemikaaleja valmistava biojalostamo. (UPM. 2023b) Kuvassa 5.1 on esitetty miltä Kaukaan tehtaat näyttävät tällä hetkellä ilmasta katsottuna.



Kuva 5.1 Ilmakuva Kaukaan tehdasintegraatista (UPM, 2023)

Kuvan 5.1 esittämällä tehdasalueella toimii sellu- ja paperitehdas, biojalostamo ja saha. Alueella sijaitsevat myös UPM:n suurin tutkimus- ja tuotekehityskeskus sekä UPM Metsän Itä-Suomen puunhankinnan johto että Lappeenrannan metsäpalvelutoimisto (UPM. 2023a). Samalle alueelle keskitetyllä toiminnalla on useita etuja kuten kustannussäästöt, ympäristövaikutusten tehokas hallinta ja tuotannossa syntyvien sivuvirtojen hyödyntäminen.

Samalla alueella toimivat tehdasyksiköt pystyvät jakamaan infrastruktuurin ja palvelut, mikä johtaa kustannussäästöihin. Esimerkiksi yhteinen energiantuotanto, jätehuolto ja jätevesien käsittely ovat kustannustehokkaampia kuin yksittäisten tehtaiden vastaavat palvelut, koska ne voidaan suunnitella yhdessä ja niitä pystyy käyttämään kaikki. Tämä johtaa myös siihen, että yhtiö pystyy vähentämään ympäristövaikutuksiaan huomattavasti, kun tehdasalueella olevat eri yksiköt jakavat resursseja. Tehtaiden läheinen sijainti vähentää myös kuljetuskustannuksia ja lyhentää toimitusketjua, mikä parantaa logistiikkaa ja nopeuttaa raaka-aineiden toimitusta, mikä yleensä johtaa suurempaan tuottavuuteen ja tehokkuuteen. Esimerkiksi sellutehtaalla valmistettu sellu pystytään pumppaamaan märkäselluna suoraan paperitehtaalle, jolloin säästetään sekä kuivaus- että logistiikkakustannuksia. (UPM. 2017) Kuvassa 5.2 on esitetty Kaukaalla olevien eri tuotantojen sivuvirtoja

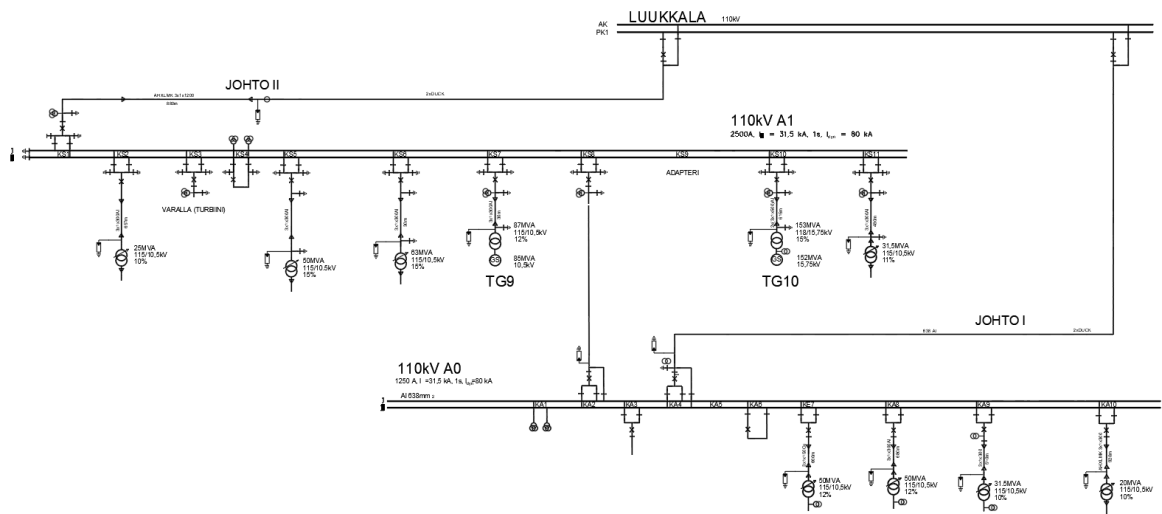


Kuva 5.2 Tehdasintegraatin rakenne ja eri osien yhteistyö (UPM, 2023)

Kuvasta 5.2 nähdään, että Kaukaalla tuotanto on suunniteltu niin, että tuotannossa syntyvät sivuvirrat ja tähteet tulevat tarkasti hyötykäyttöön. Esimerkiksi Kaukaan tehdasalueelle tulevasta tukeista tuotetaan sahalla mänty- ja kuusitavaraa. Sahatavaran tuotannosta syntyvät myyntiin kelpaamattomat pintalaudat puolestaan haketetaan ja syntynyt hake hyödynnetään viereisellä sellutehtaalla sellun valmistukseen sahalta tulevan sahanpurun kanssa. Sellun keittoprosessin sivutuotteena syntyvästä raakamäntyöljystä valmistetaan biojalostamossa uusiutuvaa dieseliä ja naftaa. Kaikki biojalostamolta syntyvät sivuvirrat pystytään edelleen hyödyntämään muissa prosesseissa. (UPM. 2017)

5.1 Kaukaan sähköverkko

Kaukaan tehtaiden sähköverkko koostuu kantaverkon 110 kV liitännästä, kahdesta 110 kV kytkinlaitoksesta, keski- ja pienjänniteverkosta sekä niihin kytkeytyvästä kuormasta ja tuotannosta. Kuva 5.3 esittää Kaukaan 110 kV sähköverkon rakenteen.



Kuva 5.3 Kaukaan tehtaiden 110 kV sähköverkko (Muokattu kohteesta Pöyry, 2014)

Kuvasta 5.3 nähdään, että tehtaat on liitetty kantaverkkoon Fingrid Oy:n Luukkalan 110 kV kytkinlaitoksen kautta, josta tehtaalle tulee kaksi 110 kV ilmajohtoa (johto I ja johto II). Johto I liittyy suoraan tehtaan 110 kV ulkokytkinlaitokseen A0 ja johto II liittyy 110 kV kaapeliin, joka johtaa soodakattilalaitoksella sijaitsevaan 110 kV sisäkytkinlaitokseen A1. Molempien 110 kV kytkinlaitosten välillä on kaapeli, jonka takia 110 kV verkko toimii yleensä renkaana Luukkala – A0-kytkinlaitos – A1-kytkinlaitos – Luukkala. 110 kV verkko pystytään kytkemään myös säteittäiseen verkkokuvaan, kun väliyhteys A0–A1 kytkinlaitosten välillä irtikytketään (Pöyry 2022).

Tehtailla on käytettävissä sähkön tuotantoon väliottovastapaineturbiini TG9 (90 MVA) ja väliottolauhdeturbiini TG10 (152,2 MVA). Molemmat turbiinigeneraattorit TG9 sekä TG10 on liitetty omalla blokkimuuntajallaan 110 kV kytkinlaitokseen A1. Tehtaiden kulutus on kytketty Kaukaan 110 kV:n sähköverkonrunkoon kahdeksalla 110/10 kV päämuuntajalla, joista neljä kappaletta sijaitsevat A1-kytkinlaitoksen puolella ja toiset neljä kappaletta A0-kytkinlaitoksen puolella. Kyseiset päämuuntajat syöttävät tehtaiden keskijänniteverkkoa, jonka kautta sähköä jaetaan alemmilla jännitetasoilla oleviin kulutuskohteisiin. Alemmille jännitetasoille tässä tapauksessa kuuluvat 500 ja 690 V:n kojeistot oikosulkumoottoreille sekä tehtaiden 3 kV:n kojeisto keskijännitemoottoreille. Näiden lisäksi tehtailla on vielä 400 V:n valaistusverkko.

5.1.1 110 kV kytkinlaitokset

110 kV kytkinlaitokset ovat keskeinen osa sähköverkon siirtoketjua ja ne mahdollistavat sähkönsiirron suurjännitteisestä voimalaitoksesta jakeluverkkoon. Kaukaalla on kaksi 110 kV kytkinlaitosta nimeltään A0 ja A1, joista A0-kytkinlaitos on avorakenteinen ulkokytkinlaitos ja A1 SF6-kaasueristeinen (GIS) sisäkytkinlaitos.

A0-kytkinlaitos on avorakenteinen ulkokytkinlaitos, jossa ilmajohdot ja kaapelit liittyvät avoimien erottimien kautta kokoojakiskoihin ja sieltä edelleen muuntajalle tai muille kuormituksille. Kytkinlaitoksessa on 2-kiskojärjestelmä ja katkaisijoiden ohituserottimet kentässä KA2, joka on väliyhteys kojeistoon A1, ja KA4, joka on Luukkalasta tuleva syöttö. Ohituserottimet on liitetty kokoojakiskoon II, jonka nimellisvirta on 1250 A. Ohituserottimella varustettu katkaisija voidaan korvata kiskokatkaisijalla, jos kisko II on vapaa muusta kuormasta. Kaikki katkaisijat ovat SF6-katkaisijoita ja erottimet ovat käsiohjattavia kiertoerottimia. Nämä käsiohjattavat kiertoerottimet mahdollistavat sähkönsiirron tiettyyn osaan sähköverkkoa erotetun alueen ollessa samanaikaisesti kytketty pois päältä. Kytkinlaitoksen oikosulkukestoisuus on 31,5 kA 1 s. Kentässä KA4 on Luukkalasta tulevan ilmajohdon maadoituserotin ja muita maadoituserottimia ei ole. Tämä tarkoittaa, että kyseessä on yhden maadoituspisteen kytkinlaitos, joka tarjoaa tehokkaan maadoituksen kaikille siihen kytketyille laitteille. (Pöyry, 2022) Taulukossa 5.1 on esitetty A0-kytkinlaitoksen eri kenttien suojalaitteet.

Taulukko 5.1 A0-kytkinlaitoksen suojalaitteet (Muokattu lähteestä Pöyry, 2022).

Kenttä	KA1	KA2	KA3	KA4	KA5	KA6	KA7	KA8	KA9	KA10
Alijännite	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yli- ja ali taajuus	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nollajännite	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ylivirta	-	1	1	1	-	1	1	1	1	1
Differentiaalirele	-	-	1	-	-	-	1	1	1	1
Suunnattu ylivirta	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Maasulkusuojaus	-	-	-	1	-	-	1	1	1	1
Häiriötallennin	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-

Taulukossa 5.1 esitellyt suojat ovat kaikki toteutettu VAMP 255 -monitoimireleillä paitsi differentiaalireleet ovat tyyppiä VAMP 265. VAMP 255 -suojareleellä pystytään havaitsemaan useita erilaisia häiriöitä ja vikoja sähköverkossa kuten ylijännitteet, alijännitteet ylikuormitukset ja oikosulut (Schneider, 2018). Se pystyy myös havaitsemaan maasulut.

A1-kytkinlaitos on SF6-kaasueriteinen (GIS) sisäkytkinlaitos, jossa on 2-kiskojärjestelmä ja 3-vaiheinen alumiinikotelointi. Kytkinlaitoksessa on pystymalliset katkaisijat, jotka on varustettu hydraulisella toimilaitteella, mikä takaa niiden luotettavan toiminnan. Erottimet ovat moottoriohjattuja ja niissä on käsiohjausmahdollisuus. Laitoksen kaapelilähtöjen maadoituskytkimissä on moottorijousiohjain, joka mahdollistaa kytkimen kestämisen myös sulkemisen jännitettä vastaan. Kokoojakiskojen nimellisvirta on kennoissa KS1-KS8 2500 A ja kennoissa KS10 sekä KS11 1250 A. Kytkinlaitoksen oikosulkukestoisuus on 31,5 kA 1 s. (Pöyry, 2022) Taulukossa 5.2 on esitetty A1-kytkinlaitoksen eri kenttien suojalaitteet.

Taulukko 5.2 A1-kytkinlaitoksen suojareleet (Muokattu lähteestä Pöyry, 2022).

Kenttä	KS1	KS2	KS3	KS4	KS5	KS6	KS7	KS8	KS10	KS11
Alijännite	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Yli- ja alitaajuus	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Nollajännite	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Ylivirta	1	1	-	-	1	1	1	1	1	1
Suunnattu ylivirta	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maasulkuvirta	1	1	-	-	1	1	1	1	1	1
Differentiaalirele	-	1	-	-	1	1	-	1	1	1
Kiskostodifferentiaali	1	1	-	-	1	1	1	1	1	1

Taulukossa 5.2 esitellyt suojareleet ovat pääosin ABB:n SPAA 321 C1 ja SPAD 330 C3 differentiaalirele, mutta kenttien KS4, KS10 ja KS11 suojareleet eroavat näistä. Kentän KS4 suojauksessa on käytetty ABB:n SPAU 320 C1 ja Strömbergin SPAF 1G50 J3 taajuusrelettä. Kenttien KS10 ja KS11 suojaustoiminnot on toteutettu ABB:n REX521 monitoimireleellä ja RET541 differentiaalireleillä.

5.2 Nykyisen alitaajuussuojauksen kuvaus

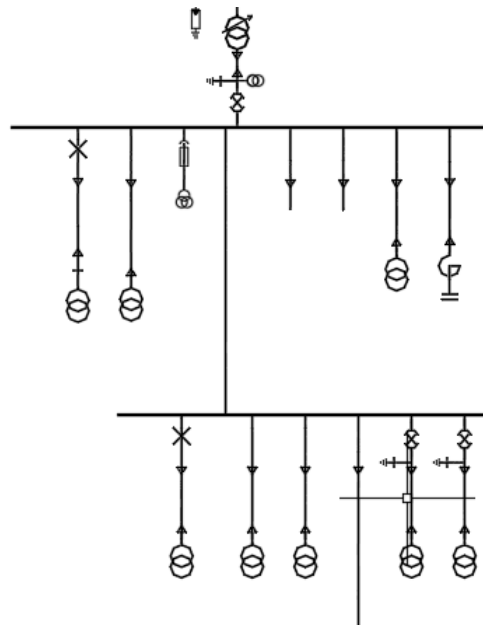
Alitaajuussuojausta käytetään sekä sähkölaitteiden suojaamiseen että verkon toiminnan tukemiseen erilaisissa vika- ja häiriötilanteissa. Käydään tässä osiossa perusteellisesti kuinka Kaukaan tehtailla on toteutettu verkon tukemisen alitaajuussuojaus, jos verkon taajuus lähtee tippumaan. Verkon taajuuden tippumisen pysäyttämiseksi verkkoon tarvitsee joko kytkeä lisää tuotantoa tai verkon kuormia tulee irtikytkä pois.

Kaukaan alkuperäinen alitaajuusreleistys on toteutettu kolmiportaisena kuormien kevennyksenä. Tässä ensimmäisessä portaassa ($\leq 49,7$ Hz) irrotettiin hiomalinja 3 pois 0,15 s aikana. Jos taajuus jatkaa edelleen laskemista ensimmäisen portaan jälkeen, toisessa portaassa ($\leq 49,5$ Hz) irrotetaan hiomalinjat 1 ja 2 pois 0,15 s aikana. Viimeisessä portaassa ($\leq 48,5$ Hz) irrotettiin vielä viimeiset ei-kriittiset kuormat, jotka olivat seuraavat:

- kuorimo
- paperitehtaan infrat
- paperikoneiden pick-up-telat nousevat ylös
- sahan tukkien käsittely ja sahauslinja

Juuri kuvailtu kuormien kevennys on kuitenkin vanha järjestely, joka ei ole enää käytössä. Kaukaalla on nykyään tehty alustavia suunnitelmia ja muutoksia Fingridin uuden alitaajuusreleistyksen käyttöönottamiseksi. Alustavien suunnitelmien mukaan Kaukaan tehtailla tulisi ottaa käyttöön kaksiportainen kuormien irtikytkeä. Ensimmäisessä portaassa ($\leq 48,5$ Hz) irtoaisivat sahan tukkien käsittely ja sahauslinja sekä sellukuorimon omakäyttökojeisto 0,15 s aikana. Toisessa portaassa ($\leq 48,4$ Hz) irtoaisi paperitehtaan hiomo 0,15 s aikana.

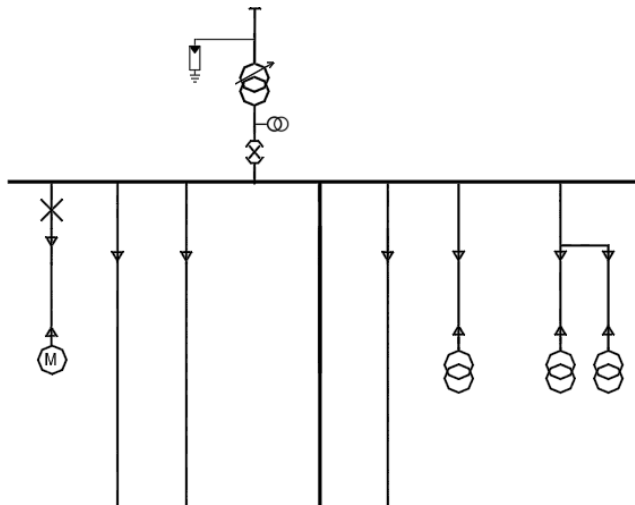
Ensimmäisessä portaassa olevien sahan tukkien käsittelyn ja sahauslinjan irtoaminen on toteutettu ABB:n SPAG 1G50 taajuusreleellä. Taajuusreleen molemmille alitaajuusportaille on asetettu havahtumisarvoiksi 48,5 Hz ja toiminta-ajaksi 0,15 s. Kuva 5.4 esittää sahan tukkien käsittelyn ja sahauslinjan alitaajuussuojia.



Kuvassa 5.4 Sahan tukkien käsittelyn ja sahauslinjan alitaajuussuojia. (Muokattu lähteestä Pöyry, 2014)

Kuvasta 5.4 nähdään, että alitaajuussuojaus irtikytkee sahan säteittäisiä keskijännitejohtoja. Ensimmäisessä portaassa on suunniteltu irtikytkettäväksi myös sellukuorimon omakäyttökojeisto, mutta tätä suojaa ei ole vielä otettu käyttöön.

Toisessa portaassa irtoaa rejektijauhin 1, jonka irtoaminen on toteutettu Arcteqin moottorisuojalla, josta löytyy kahdeksanportainen alitaajuussuojaustoiminto. Alitaajuuden havahtumisportaaksi on asetettu 48,4 Hz ja sen toiminta-aika on 0,075 s. Kuvassa 5.5 on esitetty rejektijauhin 1:llä sijaitseva alitaajuussuoja.



Kuva 5.5 Rejektijauhin 1:sellä sijaitseva alitaajuussuojaus (Muokattu kohteesta Pöyry, 2014)

Kuvasta 5.5 nähdään, että alitaajuussuoja laukaisee tehtaan keskijännitejohdon, johon on kytketty rejektijauhin 1. Rejektijauhin 1:lle asennettu rele irrottaa myös toimiessaan hiomon tahtimoottorit 1 ja 2. Tässä portaassa irtikytetään yhteensä 14 MW:a, joka on 30 % paperitehtaan nimellisestä tehon kulutuksesta.

Kuormien irtikytettä on aina aivan viimeinen tapa pysäyttää taajuuden laskeminen. Kaukaalla on tämän lisäksi käytössä muita tapoja, joilla pystytään tukemaan kantaverkon taajuuden vaihtelua ja pysäyttämään taajuuden aleneminen. Käydään seuraavaksi lyhyesti nämä tavat läpi.

Ensimmäinen tapa on A0-kytkinlaitoksen puolella oleva yksiportainen hiomalinjojen taajuuskevennys, joka toteutetaan taajuuden laskiessa alle 49,7 Hz yli 0,14 s ajaksi. Tällöin hiomapesien hydrauliset kuormituslaitteet ajetaan auki, jonka seurauksena teho putoaa vastamomentin häviämisen myötä. Tilanne on normalisoitunut, kun kantaverkon taajuus nousee ja pysyy yli 49,9 Hz:ssä 180 s ajan. Toinen tapa on A1-kytkinlaitoksen puolella oleva TG9:n taajuudentuenta, joka aktivoituu, jos kantaverkon taajuus tippuu alle 49,5 Hz. Tällöin TG9 siirtyy taajuuden tuentaan ja palautuu takaisin omalle ohjaukselle vasta, kun taajuus nousee yli 49,5 Hz rajan.

Jos kantaverkon taajuuden tippumista ei saada pysäytettyä ja verkon taajuus jatkaa tippumista edelleen näiden suojaustoimien ja kuormien irtikytkemisen jälkeen. Seuraava vaihe on suorittaa eroonkytkentä, joka käynnistyy Kaukaalla taajuuden tippuessa alle 48,0 Hz.

5.3 Nykyisen eroonkytkennän kuvaus

Eroonkytkennällä tarkoitetaan tilannetta, jolloin tehdas irtoaa kantaverkosta ja tehtaan ajaminen siirtyy saarekekäyttöön. Kaukaan eroonkytkennässä laukeavat A1-kojeiston syöttökatkaisija Fingrid/Luukkala ja A1-kojeiston kentän E08 katkaisija, joka on väliyhitys A0:aan. 110 kV kojeisto A1 jää saarekekäyttöön ja sillä ei ole enää kantaverkkoon yhteyttä. Toinen 110 kV kojeisto A0 jää näin ollen saarekekäytön ulkopuolelle ja saa kaiken tarvitsemansa tehon kantaverkosta. Saarekekäyttöön jäävästä 110 kV kojeistosta A1 syötetään sähkö soodakattilalle, sellutehtaalle ja voimalaitoksille. Kojeistoon syöttävät sähköä Kaukaan omat generaattorit TG9 ja TG10. Generaattori TG9 pitää saarekkeen jaksolukua oikeana ensisijaisesti, mutta jos TG9 ei ole käytössä, jolloin TG10 pitää jaksolukua oikeana. (Pöyry. 2022) Jos saarekekäytössä taajuus laskee alle 47,5 Hz laukeavat kaikki omat generaattorit pois automaattisesti, koska ne eivät kestä niin alhaista taajuusalueta.

Kaukaan eroonkytkentä käynnistyy vain, jos seuraavat ehdot toteutuvat:

- Alitaajuusreleen eroonkytkentäporras $f < 48$ Hz aktivoituu tai
- Virran suuntareleet toimivat ja jännite on $U < 80$ %

Eroonkytkentä on toteutettu kummallakin 110 kV:n kytkinlaitoksella erillisinä, mutta toteutukseltaan eroonkytkentäreleistys on lähes samanlainen kummallakin laitoksella. Alitaajuustilanteen eroonkytkentä käynnistyy, kun alitaajuusrele havahtuu. Ennen alitaajuusreleen havahtumista on suoritettu kaksiportainen kuormien irtikytkentä, mutta jos nämä toimet eivät ole toimineet ja sähköverkon taajuus jatkaa laskemista, niin eroonkytkentä käynnistyy.

Alijännitetilanteen eroonkytkentä käynnistyy, kun alijänniterele havahtuu sekä R- ja T-vaiheissa olevat virran suuntareleet havahtuvat. Virran suuntareleillä varmistetaan, että eroonkytkentä käynnistyy vain silloin, kun laitoksen oma teho riittää saarekeajon onnistumiseen (Willman, 1992). Näiden suuntareleiden havahtumiskoskettimet on kytketty sarjaan, jolloin molempien vaiheiden on mitattava virtaa ulos päin (Willman, 1992). Suuntaehto on riippumaton virran suuruudesta ja se on otettu syötön suuntareleeltä kummallakin kytkinlaitoksella. Molempien kytkinlaitosten virran suuntareleet mittaavat

vaihevirran ja sille vastakkaisen pääjännitteen ja muodostavat näiden avulla virran ja vaihejännitteen välisen vaihekulman (Strömberg, 1980).

Eroonkytkentä on kuitenkin estetty ulkopuolisissa vioissa, joissa muu suojareleistys pystyy erottamaan vikapaikan riittävän nopeasti. Riittävän nopeana suojana voidaan pitää tulevien johtojen differentiaalisuojausta useimmissa vioissa. Tämän seurauksena A0- kytkinlaitoksella eroonkytkentä on lukittu A0-KA4 ja A1-KS1 johtodifferentiaali releisiin, kun taas A1-kytkinlaitoksella vain A0-KA4 johtodifferentiaali releeseen. Nämä differentiaalireleet tullaan vaihtamaan tulevassa syksyn seisokissa, kun Fingrid uudistaa Luukkalan syöttöaseman suojausta. Näitä ei sen takia sen suuremmin tutkita tässä työssä.

Jos eroonkytkentä ja sen jälkeinen saarekeajo onnistuu, kantaverkkoon voidaan liittyä vasta, kun siihen saadaan Fingridiltä lupa. Kantaverkkoon liittymiseen tarvitaan tahdistamista, joka tarkoittaa kahden erillisen sähköverkon hallittua yhteen kytkemistä. Kytkinlaitteena käytetään yleensä katkaisijaa. Tahdistettaessa täytyy kytkettävien sähköverkkojen välillä olla voimassa seuraavat ehdot ennen katkaisijan kiinniohjausta:

1. Vaihejärjestys on sama
2. Jännitteet on yhtä suuret tai toinen on jännitteetön
3. Taajuudet eli jaksoluku on yhtä suuri
4. Jännitteiden vaihekulma on yhtä suuri

Jos näiden ehtojen voimassa olon lisäksi sähköverkossa on tehty kaikki tarpeelliset kytkennät, voidaan katkaisija ohjata tahdistuslaitteen avulla kiinni. Generaattoreilta TG9 ja TG10 löytyvät täysin omat tahdistuslaitteensa, jos niitä tarvitsee kytkeä verkkoon. Nämä tahdistuslaitteet toimivat täysin automaattisesti. Tämä tarkoittaa, että tahdistusehdot on ensin säädettävä käsin laitteen säätöalueelle, jonka jälkeen tahdistuslaite säätää edellä mainitut suuret automaattisesti kohdalleen ja antaa katkaisijalle kiinniohjauskäskyn. (Pöyry. 2022)

Generaattorin TG9 tahdistuslaitetta käytetään myös sähköjakelun tahdistuksissa, jolloin sen toiminto on puoliautomaattinen. Sähköjakelun tahdistuksissa kysymyksessä on saman sähköverkon osien kytkentä, jolloin vain jännitteiden suuruudessa voi olla eroa. Tahdistuslaite ei säädä tässä tilanteessa jännitteitä oikeaksi, vaan se tehdään päämuuntajien käämikytkimillä, minkä jälkeen joko tahdistuslaite antaa katkaisijalle kiinniohjauskäskyn tai se annetaan manuaalisesti ohjauspainikkeesta. Kun generaattorin TG9 tahdistuslaitetta

käytetään sähköjakelun kytkentöihin käytössä, on myös tahdissaolon valvontalaite, jolla varmistetaan, että tahdistusehdot ovat oikeat hallittua kytkentätapahtumaa varten. Jos tahdistusehdot eivät ole valvontalaitteeseen aseteltujen kriteerien rajoissa, katkaisijan kiinniohjausta ei voi suorittaa. (Pöyry, 2022) Kaukaan tehtaiden tahdissaolon valvontalaitteen rajat on esitetty:

- Kytkettävien jännitteiden ero saa olla maksimissaan 5 % tai toinen on jännitteetön (0 V)
- Kytkettävät jännitteet ovat vähintään 85 % nimellisjännitteistä
- Taajuusero on maksimissaan 0,2 Hz
- Jännitteiden vaihekulmaero on maksimissaan 20°.

Näiden vaatimusten lisäksi arvojen on pysyttävä näissä rajoissa 20 s ennen kytkentätapahtumaa.

5.4 Suojareleiden asettelut

Eroonkytkennän tapaustutkimuksessa tarkastellaan A1-kytkinlaitoksen kenttien KS1, KS4 ja KS8 sekä A0-kytkinlaitoksen kenttien KA1, KA2, KA4 ja KA6 suojausja. Toteutukseltaan eroonkytkentäreleistys on lähes samanlainen kummallakin puolella vaikka niissä käytetään erilaisia suojareleitä. Käydään ensiksi läpi A1-kytkinlaitoksen kenttien suojareleiden asettelut ja sen jälkeen A0-kytkinlaitoksen asettelut.

5.4.1 Kenttä A1-KS1

Kentän A1-KS1, joka on Luukkalan syöttö tehtaalle, suojana on yksi ABB:n johdonsuoja valvoja SPAA 321 C1, joka pitää sisällään ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3 ja suunnatun maasulkurelemoduulin SPCS 3C4. Näiden lisäksi kentän suojauksessa on käytetty kahta Strömbergin suunnattua ylivirtarelettä SPAS 1K1 J3.

SPAA 321 C1 ohjelmointikytkimestä on valittu SGR/2 toiminto, joka ohjaa havahtumissignaalin ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3 pikalaukaisuportaalta $I >>$ lähtöreleelle D (ABB, 1992). SPCJ 3C3 ohjelmointikytkimestä on valittu vain SG1/1 toiminto, jolloin ylivirtaporras $I >$ toimii vakioaikatoiminnassa ja sen laukaisuaajan asettelualue on 0,5–10,0 s (ABB, 2002). SPCS 3C4 ohjelmointikytkimestä on valittu SG1/3 ja SG1/8 toiminnot. SG1/3 toiminto tarkoittaa, että toimintakarakteristikan vaihtotapa hoidetaan käsin etulevyltä ja

karakteristika on $I_{sin\phi}$ (ABB, 2000b). SG1/8 toiminto asettaa sitten nollajännitteen havahtumisarvoksi 10 % releen nimellisjännitteestä (ABB, 2000b). SPAS 1K1 J3 releillä ei ole ohjelmointikytkintä. Taulukossa 5.3 esitetään kentän A1-KS1 suojuareiden nykyiset asetellut.

Taulukko 5.3 Kentän A1-KS1 suojuareiden asetellut

<u>SPCJ 3C3</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]
$I>$	1,0	1,0
$I>>$	9,0	1,0
<u>SPCS 3C4</u>	Havahtumisarvo [%]	Laukaisuaika [s]
$I_{\phi}>$	5,0	0,3
$I_{\phi}>>$	20,0	0,08
<u>SPAS 1K1 J3</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]
$I>$	0,5	0,1
<u>SPAS 1K1 J3</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]
$I>$	0,5	0,1

Taulukosta 5.3 nähdään ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3, suunnatun maasulkurelemoduulin SPCS 3C4 sekä kahden suunnatun ylivirtareleen SPAS 1K1 J3 eri portaiden havahtumiskertoimet ja -arvot. Näiden kaikkien suojuareiden asetellut tulee kertoa nimellisvirralla I_n , jotta voidaan määrittää suojuareiden eri portaiden havahtumisvirta.

5.4.2 Kenttä A1-KS4

Kiskon BBI suojuauksessa on käytetty yhtä ABB:n kiskostojännitteiden valvojaa SPAU 320 C1, joka pitää sisällään nollajänniterelemoduulin SPCU 1C6 sekä yli- ja alijänniterelemoduulin SPCU 1C1. Näiden lisäksi kiskolta BBI löytyy Strömbergin taajuusrele SPAF 1G50 J3.

SPAU 320 C1 ohjelmointikytkimistä on valittu SGR/5, SGR/6 ja SGR/8 toiminnot. SGR/5 ja SGR/6 toiminnot aiheuttavat laukeamissignaalin yli- tai alijännite portaiden havahtuessa (ABB, 2013). SGR/8 toiminto aiheuttaa taas hälytyssignaalin alijännite portaan havahtuessa (ABB, 2013). SPCU 1C6 ohjelmointikytkimistä on valittu SG1/6 toiminto, jolloin ylemmän toimintaportaan $U_{0>>}$ havahtumisarvon asetellualue on $2-16 \% \times U_n + \infty$ (ABB, 1997).

SPCU 1C1 ohjelmointikytkimistä ei ole valittu mitään toimintoa päälle. SPAF 1G50 J3 taajuusreleellä ei ole samanlaisia ohjelmointikytkimiä kuin aikaisemmillä releillä, vaan taajuusreleen toiminnot riippuvat mihin kohtiin valintapistikkeet on asetettu. Ensimmäisen taajuusportaan f_1 valintapistike on keskiasennossa (0,15 s), jolloin taajuusportaalta f_1 tuleva havahtumissignaali ohjaa 0,15 s toimintahidastuksen kuluttua lähtöreleen A vetäneeksi (Strömberg, 1981). Toisen taajuusportaan f_2 valintapistike on taas yläasennossa (t_2), jolloin taajuusportaalta f_2 tuleva havahtumissignaali ohjaa asetellun t_2 toimintahidastuksen kuluttua lähtöreleen B vetäneeksi (Strömberg, 1981). Toimintahidastus t_2 säädetään releen etulevyssä olevalla potentiometrillä jollekin toimintahidastuksen alueen 0,5–5 s välille. Tässä tapauksessa potentiometri on aseteltu minimiin eli toisen taajuusportaan f_2 toimintahidastus on 0,5 s. Taulukossa 5.4 esitetään kiskon BBI suojarahleiden nykyisiä asetteluita.

Taulukko 5.4 Kentän A1-KS4 kiskon BBI suojarahleiden asettelut

<u>SPCU 1C6</u>	Havahtumisarvo [%]	Laukaisuaika [s]
$U_{0>}$	2,0	1,0
$U_{0>>}$	2,0	1,0
<u>SPCS 1C1</u>	Havahtumisarvo [pu]	Laukaisuaika [s]
$U_{>}$	1,2	0,9
$U_{<}$	0,8	0,1
<u>SPAF 1G50 J3</u>	Havahtumisarvo [Hz]	Laukaisuaika [s]
f_1	49,5	0,15
f_2	48,0	0,5

Taulukosta 5.4 nähdään nollajänniterelemoduulin SPCU 1C6 sekä yli- ja alijänniterelemoduulin SPCU 1C1 eri portaiden havahtumisarvot. Molempien suojarahleiden asettelut tulevat kertoa nimellisjännitteellä U_n , jotta voidaan määrittää suojarahleiden eri portaiden havahtumisjännite. Alitaajuusreleen SPAF 1G50 J3 molempien portaiden havahtumisarvoa ei kerrota millään.

Kiskon BBII suojauksessa on käytetty täysin samoja suojareleitä kuin kiskossa BBI eli yhtä ABB:n kiskostojännitteiden valvojaa SPAU 320 C1, joka pitää sisällään nollajänniterelemoduulin SPCU 1C6 sekä yli- ja alijänniterelemoduulin SPCU 1C1. Näiden lisäksi kiskolta BBII löytyy myös Strömbergin taajuusrele SPAF 1G50 J3.

Kiskon BBII suojareleiden ohjelmointikytkimien asennot ovat myös täysin samoja kuin kiskon BBI yhtä lisäystä lukuun ottamatta. Kiskon BBII yli- ja alijänniterelemoduulin SPCU 1C1 ohjelmointikytkimistä on valittu SG1/5 toiminto, joka estää alijänniteportaan havahtumisen ja laukaisun, jos mitattava jännite laskee pienemmäksi kuin $0,2 \times U_n$ (ABB, 1998). Tätä toimintoa ei ole kiskon BBI yli- ja alijänniterelemoduulissa SPCU 1C1 otettu käyttöön. Kiskon BBII suojareleiden asettelut ovat täysin samanlaiset kuin aiemmin esitellyn kiskon BBI, minkä takia niitä ei ole esitetty omassa taulukossaan.

5.4.3 Kenttä A1-KS8

Kentän A1-KS8, joka on väliyhteys A1–A0 kytkinlaitosten välillä, suojana on yksi ABB:n johdonsuoja valvoja SPAA 321 C1, joka pitää sisällään ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3 ja suunnatun maasulkurelemoduulin SPCS 3C4.

SPAA 321 C1 ohjelmointikytkimestä on valittu SGR/2 toiminto, joka ohjaa havahtumissignaalin ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3 pikalaukaisuportaalta $I >>$ lähtöreleelle D (ABB, 1992). SPCJ 3C3 ohjelmointikytkimestä on valittu SG1/1 toiminto, jolloin ylivirtaporras $I >$ toimii vakioaikatoiminnassa ja sen laukaisuajan asettelualue on 0,5–10,0 s (ABB, 2002). SPCS 3C4 ohjelmointikytkimestä on valittu SG1/3 ja SG1/8 toiminnot. SG1/3 toiminto tarkoittaa, että toimintakarakteristikan vaihtotapa hoituu käsin etulevyltä ja karakteristika on $I \sin \varphi$ (ABB, 2000b). SG1/8 toiminto asettaa taas nollajännitteen havahtumisarvoksi 10 % releen nimellisjännitteestä (ABB, 2000b). Taulukossa 5.5 esitetään suojareleiden nykyisiä asetteluita.

Taulukko 5.5 Kentän A1-KS8 suojarleiden asettelut

<u>SPCJ 3C3</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]
$I>$	1,0	0,75
$I>>$	7,0	0,4
<u>SPCS 3C4</u>	Havahtumisarvo [%]	Laukaisuaika [s]
$I_{\varphi}>$	5,0	0,3
$I_{\varphi}>>$	20,0	0,08

Taulukosta 5.5 nähdään ylivirtarelemoduulin SPCJ 3C3 sekä suunnatun maasulkurelemoduulin SPCS 3C4 eri portaiden havahtumiskertoimet ja -arvot. Molempien suojarleiden asettelut tulee kertoa nimellisvirralla I_n , jotta voidaan määrittää suojarleen eri portaiden havahtumisvirta.

5.4.4 Kenttä A0-KA1

Kentän A0-KA1 kiskon I suojaustoimintoina on käytetty Schneider Electricin VAMP 255 releeltä löytyviä yli- ja alijännitesuojausta, taajuussuojausta sekä nollajännitesuojausta. Alijännitteelle on valittu lukitusraja, joka on $10 \% \times U_n$. Tämä tarkoittaa, että kun suurin kolmen vaihejännitteen välinen jännite tippuu asetetun rajan alapuolelle, suojan laukaisu estetään (Schneider, 2018). Tällä toiminnolla pyritään välttämään turhat releen laukeamiset, kun jännite kytketään pois päältä. Releessä on myös hälytys, joka aktivoituu ylijännitetilanteissa $U>$. Taulukossa 5.6 esitetään kiskon I suojarleiden nykyisiä asetteluita.

Taulukko 5.6 Kentän A0-KA1 kiskon I suojarleiden asettelut

<u>Nollajännite</u>	Havahtumisarvo [%]	Laukaisuaika [s]
$U_0>$	30,0	5,0
$U_0>>$	50,0	0,5
<u>Yli- ja alijännite</u>	Havahtumisarvo (pu)	Laukaisuaika [s]
$U>$	1,23	0,54
$U<$	0,86	1,0
<u>Alitaajuus</u>	Havahtumisarvo [Hz]	Laukaisuaika [s]
f_1	49,7	0,14
f_2	48,0	0,14

Taulukossa 5.6 esitettyjen suojureletoimintojen havahtumisarvot, lukuun ottamatta taajuusreleen portaita, tulee kertoa aina nimellisjännitteellä U_n . Näin ollen saadaan määritettyä havahtumisjännite eri suojureletoimintojen portaille. Alitaajuustoiminnon molempien portaiden havahtumisarvoa ei kerrota millään.

Kentän A0-KA1 toisella kiskolla (kisko II) on aivan samat suojaustoiminnot kuin kiskolla I. Tämän lisäksi kiskolla II on täysin identtiset suojalaitteiden toiminnot sekä asetellut kuin kiskolla I. Näiden takia ei olla esitetty kiskon II suojaustoimintoja tai releasetteluita.

5.4.5 Kenttä A0-KA2

Kentän A0-KA2, joka on väliyhteys A1–A0 kytkinlaitosten välillä, suojaustoimintona on käytetty vain ylivirtasuojasta. Taulukossa 5.7 on esitetty kentän suojureleen nykyiset asetellut.

Taulukko 5.7 Kentän A0-KA2 suojureleen asetellut

<u>Ylivirta</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]
$I>$	1,50	1,0
$I>>$	-	-

Taulukosta 5.7 nähdään, että ylivirtasuojana on käytetty vain yhtä porrasta. Tämän portaan havahtumiskerroin tulee kertoa nimellisvirralla I_n , jotta saadaan ylivirtasuojan ainoan portaan havahtumisvirta.

5.4.6 Kenttä A0-KA4

Kentän A0-KA4, joka on Luukkalasta tuleva syöttö, suojaustoimintoina on käytetty ylivirtasuojasta, suunnattu ylivirtasuojasta ja maasulkusuojasta. Taulukossa 5.8 on esitetty kentän suojureleiden nykyiset asetellut.

Taulukko 5.8 Kentän A0-KA4 suojuareleiden asettelut

<u>Ylivirta</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]	
$I>$	1,0	1,0	
$I>>$	9,0	0,1	
<u>Suunnattu ylivirta</u>	Havahtumiskerroin	Laukaisuaika [s]	Peruskulma [°]
$I_{\varphi}>$	0,26	0,06	135
$I_{\varphi}>>>$	9,0	0,06	135
<u>Maasulku</u>	Havahtumisarvo [%]	Laukaisuaika [s]	Havahtumisarvo [%]
$I_{0\varphi}>$	5,0	0,5	2,0
$I_{0\varphi}>>$	10,0	0,1	2,0

Taulukosta 5.8 nähdään ylivirtasuojan ja suunnatun ylivirtasuojan eri portaiden havahtumiskertoimet. Nämä asettelut tulee kertoa nimellisvirralla I_n , jotta saadaan suojuareleen eri portaiden havahtumisvirta. Maasulkusuojauksen asetteluissa on kaksi havahtumisarvoa. Vasemmalla puolella esitetty havahtumisarvo tulee kertoa nimellisvirralla I_n ja oikealla puolella oleva nimellisjännitteellä U_n .

Näiden kenttien suojalaitteiden toimintojen ja asetteluiden kartoituksen jälkeen pystyttiin luomaan selkeä kuva, millä tasolla nykytilanteen suojaus todella on. Kun tarkastellaan sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojausten kokonaiskuvaa, voidaan huomata, että se on peräisin useiden aikakausien takaa. Erityisesti A1 ja A0 kytkinlaitosten välillä havaittiin pieniä eroavaisuuksia suojalaitteiden asetteluissa. Tämä johtuu osittain siitä, että A0-puolen suojuareleet on modernisoitu jossain vaiheessa uudempiin digitaalisiin releihin, kun taas A1-puolella suojalaitteet ovat lähes alkuperäisiä. Tässä muutoksessa suojuareleiden asettelut on todennäköisesti tarkistettu ja säädetty sen ajan vaatimusten mukaisiksi. Liitteissä I ja II on esitetty molempien kytkinlaitosten kaikki nykyiset asettelut.

Hieman haasteita suojalaitteiden toiminnallisuuksien ja asetteluiden kartoittamisessa aiheutti dokumentaation puuttuminen tai sen virheellisyys. Vaikka käytettävissä oli Kaukaalta löytyvä dokumentti, jossa olisi pitänyt olla kaikki releasettelut, dokumentti osoittautui hieman puutteelliseksi eikä se sisältänyt kaikkia Kaukaan suojuja tai kenttiä.

Osittain alkuperäistä dokumentaatiota löytyi, mikä antoi jonkin verran suuntaa suojuareiden asetteluihin ja toimintoihin. Näistä kuitenkin huomattiin, että joidenkin suojuareiden asettelut olivat muuttuneet ajan myötä. Kartoittaminen edellytti näin ollen tarkempaa tutkimusta ja varmistusta, jotta suojuareiden toiminnallisuudet ja asettelut saatiin täysin selvitettyä.

Suojalaitteiden asetteluiden kartoittamisen aikana huomattiin myös, että muutaman suojualaitteen koestukset olivat joko unohtuneet tehdä tai tehty virheellisesti. Yksi puuttuva koestus löydettiin vertailemalla kenttäkierroksella havaittuja laitteita dokumentaatioon ja relekoestuspöytäkirjoihin. Kyseessä oleva staattinen suojuarele tulisi koestaa kolmen vuoden välein, jotta vältytään releen jäykistymiseltä. Virheelliset koestukset taas huomattiin vertailemalla suojualaitteiden koestuspöytäkirjoja ja kentällä olevia asetteluita. Näiden pohjalta havaittiin, että parin suojuareleen koestuksessa oli puutteita, koska tuloksissa oli ristiriitoja. Tarkemmassa tarkastelussa tuli ilmi, että relekoestuspöytäkirjoissa oli käytetty kyseisille suojuareleille sellaisia asetteluarvoja, jotka eivät olleet mahdollisia asetella kyseisen tyyppin suojuareleelle. Näiden puutoksien korjaamiseksi on sovittu päivämäärät, jolloin puuttuva ja virheellisesti koestetut suojualaitteet koestetaan uudelleen.

Nykyään monissa suurissa teollisuuslaitoksissa ja tehdasintegraateissa vallitsee sellainen kiire, ettei aina ole riittävästi aikaa päivittää tai tarkistaa dokumentaatioita virheiden varalta. Tämä johtuu pitkälti siitä, että töitä ja projekteja on sen verran paljon ja aikaa vain rajallisesti, ettei kaikkia töitä ehditä tekemään. Tällaisissa tilanteissa joudutaan usein valita mitä jätetään tekemättä tai tehdään myöhemmin ja tavallisesti dokumentaatio on se, mikä kärsii. Kun dokumentaatiota ei päivitetä välittömästi, se unohdetaan liian useasti tehdä kokonaan. Toisinaan voi olla tilanteita, missä kaikki tieto muutoksista on keskittynyt yhteen henkilöön, kun muutoksia ei ole tehty dokumentaatioon. Sitten, kun kyseinen henkilö siirtyy esimerkiksi eläkkeelle, kaikki tieto häviää ja joudutaan pohtimaan, että miksi asiat ovat niin kuin ne ovat. Tällaiset tilanteet luovat turhaan haasteita tulevaisuudessa ja vievät turhaa aikaa, kun asiaa pitää tutkia tarkemmin.

Yleensä dokumentteja tutkitaan tarkemmin lisäys- tai uusimisprojekteissa, jolloin virheet sekä puutteet huomataan. Toisaalta suojualaitteiden toiminnot ja asettelut saadaan selville myös kenttäkierrosten avulla, mutta esimerkiksi kytkentöjä ei pysty yleensä tuotannon aikana tarkistamaan. Tällöin tarkastaminen tarvitsee tehdä seisokin aikana, mutta silloinkin

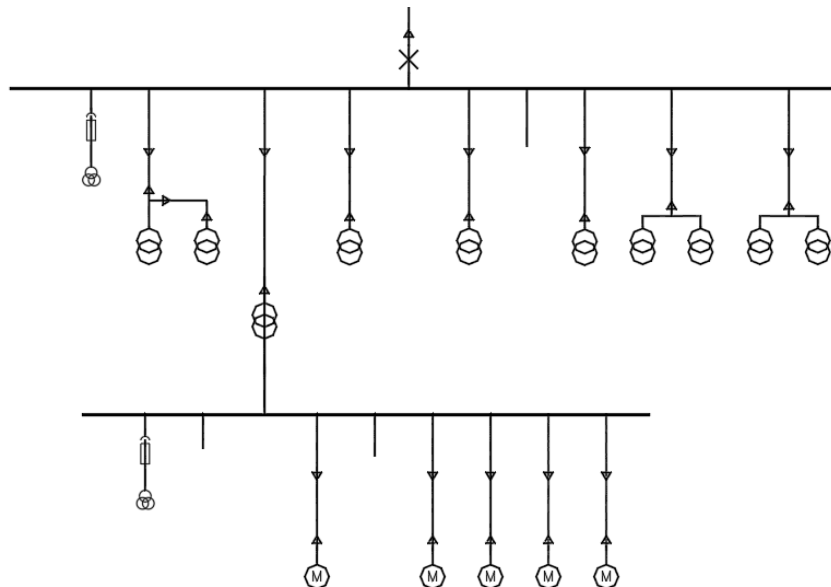
tehtaiden sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojausten kytkentöjen tarkastaminen on erittäin haasteellista, koska sähköä tarvitaan jatkuvasti. Näiden kaikkien vaikeuksien ja tarkastusten välttämiseksi pitäisi muistaa vain korjata tai muuttaa dokumentaatio ajan tasalle.

6 MUUTOSEHDOTUKSET SUOJAJUKSEEN

Työn tavoitteena oli selvittää, miten nykyinen liityntäpisteen suojaus eroaa tämän päiväisistä vaatimuksista. Tähän tarkasteluun liittyen on seuraavissa kappaleissa esitetty alitaajuussuojauksen ja eroonkytkennän osalta mahdollisia tarkasteluja ja/tai muutoksia, joilla tehtaan suojaus saataisiin nykyisten vaatimusten alaisiksi.

6.1 Muutosehdotukset alitaajuussuojaukseen

Käydään seuraavaksi mitä pitää vielä Kaukaan alitaajuussuojaukseen lisätä. Alitaajuussuojaus oli melkein kokonaan toteutettu, mutta siitä puuttui vain ensimmäisessä portaassa irtikytkettävä sellukuorimon omakäyttö-kojeisto. Tämän irtoaminen pitäisi toteuttaa massaosaston kojeistossa sijaitsevalla Siemensin monitoimisuojaareleella. Taajuussuojaustoimintoa ei ole vielä otettu releestä käyttöön, mutta siinä on mahdollisuus valita neljäportainen yli- tai alitaajuussuoja. Näin ollen alitaajuuden havahtumisportaaksi aseteltaisiin 48,5 Hz ja toiminta-ajaksi 0,12 s. Kuvassa 6.1 on esitetty sellukuorimon omakäyttö-kojeiston alitaajuussuojaus.



Kuva 6.1 Sellukuorimon omakäyttö-kojeiston kuormien irtoaminen ensimmäisessä portaassa (Muokattu kohteesta Pöyry, 2014)

Kuvasta 6.1 nähdään, että alitaajuussuojaus irtikytkee kokonaisen kojeiston toimiessaan. Tämän suojauksen lisäämisen jälkeen Kaukaan alitaajuussuojaus on suunnitellun mukainen.

Tulevaisuudessa saattaa olla tarpeen tehdä joitakin muutoksia tai lisäyksiä, sillä Fingridin kanssa käytävät keskustelut alitaajuussuojauksen toteuttamisesta ovat vielä käynnissä. Tämän lisäksi on huomioitavaa, että UPM:n kolmen sellutehtaan (Kaukas, Kymi ja Pietarsaari) alitaajuussuojausta tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena. Nykyisessä tilanteessa vain Kaukaalla on toteutettu Fingridin alitaajuussuojaus. Tällä hetkellä esimerkiksi 30 % raja ei täyty sellutehtaiden kanssa, mutta se ei todennäköisesti täyty koskaan. Tämä johtuu siitä, että sellutehtaissa on vain muutamia kulutuskohteita, joiden irtikytkeminen ei aiheuta ongelmia tehtaan tuotannolle.

Muihin taajuustuentatapoihin ei tarvitse tehdä muutoksia, koska niiden vaatimukset eivät ole muuttuneet. Huomioitavaa on, että Fortum teki alkuvuonna 2023 TG9 saarikäyttö ja taajuustuenta selvityksen, jossa käytiin yksityiskohtaisesti läpi, miten TG9 osallistuu saarikäyttö ja taajuudentuenta tilanteisiin. Selvityksessä käytiin nykytilanteen kartoituksen jälkeen läpi parannus- ja muutosehdotuksia, joilla voitaisiin parantaa TG9:n toimivuutta näissä tilanteissa. Vastikään tehdyn kattavan selvityksen takia tähän ei tarvitse ottaa tässä työssä sen suuremmin kantaa. Yksi huomionarvoinen nosto kyseisestä selvityksestä ja sen lopputuloksista on kuitenkin tehty. Tämä on 110 kV A1-kytkinlaitoksen alitaajuusreleiden aika-asettelu, jota käydään eroonkytkennän osiossa läpi.

6.2 Muutosehdotukset liityntäpisteen suojaukseen

Kaukaan sähköjärjestelmän nykyiset suojareleiden asetellut eivät täytyä Fingridin VJV2018-ohjeessa asettamia jännite- ja taajuusikkunan sekä lähivikakestoisuuden vaatimuksia. VJV2018 vaatimuksissa määritellään voimalaitoksen toiminta-alue jännitteelle ja taajuudelle, joka on 0,90–1,10 pu ja 47,5–51,5 Hz. Kaukaalla voimassa oleva jännite- ja taajuusikkuna on taas muodoltaan sellainen, että taajuuden alaraja on 48,0 Hz, mutta ylärajaa ei ole määritelty johtuen puuttuvasta ylitaajuussuojasta. Jänniteikkunan rajat ovat puolestaan 0,80–1,20 pu. Näiden lisäksi nykyiset suojareleiden asetellut eivät takaa vaadittua lähivikakestoisuutta, jonka tarkoitus on estää voimalaitoksen irrottautumisen lyhyissä jännitehäiriöissä. Näin ollen tämän hetkiseen liityntäpisteen suojaukseen on tehtävä muutoksia, jotta se täyttäisi nykyiset vaatimukset. Käydään seuraavaksi tarkemmin läpi, millaisia muutoksia suojareleihin ja niiden aseteluihin tarvittaisiin, jotta nykyinen suojaus olisi linjassa Fingridin vaatimusten kanssa.

Yksi iso puute eroonkytkennän suojauksessa on ylitaajuussuojauksen puuttuminen kokonaan. Ylitaajuussuojaus voitaisiin ottaa käyttöön generaattorijännitetasolla, jossa molemmat generaattorit TG9 ja TG10 varustettaisiin ylitaajuussuojilla. Molemmilta generaattoreilta löytyy jo generaattorisuojaus, johon voidaan asettaa ylitaajuusportaita joko hälyttäväksi tai laukeaviksi. Kyseiseen ylitaajuussuojaukseen riittäisi yksiportainen suojaus, joka olisi hälyttävä sekä laukeava, kun taajuus nousisi yli asetteluarvon. Yksiportaisen ylitaajuussuojan asetellut esitetään taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 Uuden yksiportaisen ylitaajuussuojan asetellut

	Uudet asetellut	
Ylitaajuusportaat	Havahtumisarvo [Hz]	Toiminta- aika [s]
$f >$	51,0	0,5

Toinen vaihtoehto olisi tehdä kaksiportainen ylitaajuussuoja, jossa ensimmäinen porrassuojitus olisi hälyttävä ja toinen porrassuojitus laukeava. Tällöin ensimmäinen porrassuojitus voitaisiin asettaa viittamaan normaalitilasta poikkeavaa tilaa kuvan 2.1 mukaisesti. Toinen porrassuojitus voitaisiin asettaa laukeavaksi silloin, kun voimalaitoksen ei tule olla enää kiinni verkossa. Tämän vaihtoehdon ylitaajuussuojan asetellut esitetään taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2 Uuden kaksiportaisen ylitaajuussuojan asetellut

	Uudet asetellut	
Ylitaajuusportaat	Havahtumisarvo [Hz]	Toiminta- aika [s]
$f >$	51,0	0,5
$f \gg$	51,5	0,5

Ainoa puuttuva suojaustoiminto on ylitaajuussuojaus, joka tulisi lisätä nykyiseen suojaukseen. Tämän jälkeen muutokset painottuvat pitkälti käytössä olevien suojausasetteluiden muutoksiin. Voimalaitoksilta nykyään vaadittu lähivikakestoisuusvaatimus ei päde tämän hetkisten releasetteluiden kanssa. Tällä hetkellä alijännitesuoja havahtuu 0,1 s jälkeen ja käynnistää eroonkytkennän, jos virran suuntareleet ovat myös havahtuneet. Lähivikakestoisuusvaatimuksen mukaan voimalaitoksen tulisi kestää tietynlaiset lyhyet jännitteenalenemiset ennen kuin se voi irrota verkosta. Nykyisillä alijännitesuojien asetteluilla verkosta irtoaminen tapahtuu liian aikaisin, minkä takia alijännitereleen asettelut tulisi muuttaa taulukon 6.3 mukaisiksi.

Taulukko 6.3 Alijänniteportaan uusi ja vanha asettelu

	Uudet asettelut		Vanhat asettelut	
Alijänniteporras	Havahtumiskerroin [pu]	Toiminta- aika [s]	Havahtumiskerroin [pu]	Toiminta- aika [s]
$U<$	0,80	1,0	0,80	0,1

Vuonna 2022 Kaukaalla tapahtui kaksi identtistä lähivikaa viikon sisään, joissa ukkonen aiheutti S- ja T-vaiheisten oikosulkujen syntymisen Luukkalan 110 kV voimajohtoihin. Tämä häiriö aiheutti sitten väliaikaisen jännitteenaleneman alueella, jonka seurauksena Kaukaan ja alueella sijaitsevien muiden suurten teollisuuslaitosten tuotantoa tippui. Tällöin kyseessä ollut lähivika oli erittäin nopea ja verkko saatiin normaaleiden jänniterajojen sisälle nopeasti. Tämän takia Kaukaalla silloin olleet väärät alijännitereleiden asettelut eivät havahtuneet ja eroonkytkentä ei käynnistynyt. Oikeilla asetteluilla tuskin olisi myöskään estetty tuotannon tippumista, koska lähivika on tunnetusti haastava teollisuuslaitoksille. Tämä johtuu siitä, että vaikka generaattori pysyisikin asetteluidensa puolesta verkossa, laitoksen omakäytössä laukeaa laitteita ja koko prosessi tuotantoyksikköineen tulee alas (Linnamaa, 2023).

A1-kytkinlaitoksen molempien kiskojen BBI ja BBII taajuusreleiden kytkennät ja asettelut olisi hyvä tarkistaa. Näiden taajuusreleiden asettelut on esitetty taulukossa 6.4

Taulukko 6.4 A1-kytkinlaitoksen taajuusreleiden uudet ja vanhat asettelut

	Uudet asettelut		Vanhat asettelut	
	Havahtumisarvo [Hz]	Toiminta- aika [s]	Havahtumisarvo [Hz]	Toiminta- aika [s]
f_1	49,5	0,5	49,5	0,15
f_2	47,5	0,15	48,0	0,5

Asettelumuutoksia tulee varsinkin toiselle taajuusportaalle, jos seurataan suoraan VJV2018 esitettyä jännite-taajuus-aluetta (kuva 2.1). Toisaalta toiselle taajuusportaalle ei ole mitään järkeä asettaa 47,5 Hz vaikka VJV2018 niin määrääkin, koska sillä taajuusasettelulla Kaukaan omat generaattorit laukeavat. Näin ollen Kaukaan tehdas ei ikinä pääsisi suorittamaan onnistunutta saarekekäyttöä, koska eroonkytkennän aikana omat generaattorit laukeaisivat. Omien generaattorien laukeamisen seurauksena koko tehdas tulisi alas, kun sähköntuotanto loppuisi saarekeajossa. Yksi vaihtoehto olisi pitää alitaajuustilanteen havahtumisasettelu ennallaan 48,0 Hz, koska kyseessä on vanhempi tuotantolaitos ja tällä estettäisiin omien generaattoreiden laukeaminen. Lopullisesta alitaajuusreleiden havahtumisasettelusta tulee kuitenkin keskustella ja sopia Fingridin kanssa tulevaisuudessa, koska omaehtoiset saarekekäytöt on kielletty.

Vanhoista taajuussuojien asetteluista huomataan myös, että eri portaiden havahtumisrajat ovat oikeat, mutta vanhat laukaisuajat ovat väärinpäin haluttuihin aikoihin nähden. Tämä voi johtua siitä, että taajuusreleiden kytkennät on laitettu ristiin, jossa ensimmäinen taajuusporras on oikeasti toinen taajuusporras ja toisinpäin. Tämä kytkentä on tehty siksi, että haluttua laukaisuajaa ei voi asettaa tällä taajuusreleellä ensimmäiselle taajuusportaalle, mutta se on mahdollinen toisella taajuusportaalla. Voi kuitenkin olla mahdollista, että taajuusrele on kytketty aivan normaalisti, jolloin esitettyä ensimmäisen taajuusportaan aika-asettelua ei voida saavuttaa. Tällöin ensimmäisen taajuusportaan laukaisuajaksi tulee asettaa vakioaika 0,15 s. Tässä tilanteessa tulee huomioida, että Fortumin tekemä TG9 saarikäyttö

ja taajuustuenta selvitys on näin ollen tehty virheellisen dokumentaation kanssa. Tämän takia selvityksessä esitetyt asetellut 110 kV A1-kytkinlaitoksen taajuusreleille eivät heijasta toimivaa nykytilannetta.

Eroonkytkennässä käytettävien virran suuntareleiden kytkennät tulisi myös tarkistaa molemmilla kytkinlaitoksissa, koska suuntareleiden kytkennöistä on saatavilla ristiriitaista dokumentaatiota. Jotkut dokumentaatiot esittävät, että suuntareleet on kytketty sarjaan ja rinnan, mutta toisissa dokumentaatioissa esitetään taas, että suuntareleet ovat vain sarjassa. Eroonkytkennän toimivuuden kannalta pitäisi olla varma tieto, miten suuntareleet on kytketty. Tarkistuksessa tulee huomioida erityisesti, että mihin suuntaan rele on kytketty. Releen suunta tulisi olla kytketty kiskolta poispäin ja eroonkytkentään pitäisi olla otettu käyttöön releen havahtumiskosketin. Releessä on sisäinen ohjelmointipistike, jolla voidaan valita havahtumiskoskettimen toimintatapa. Tämän pistikkeen tulisi olla siten, että kosketin toimii suunnan havahtuessa kiskolta poispäin.

Joissakin vikatilanteissa toiselle virran suuntareleen mittaamalle vaiheelle voi kuitenkin muodostua sellainen virran ja jännitteen välinen vaihekulma, että se estää toisen virran suuntareleen havahtumisen ja siten myös eroonkytkennän. Suunnatun ylivirtareleen väärän mittauksen todennäköisyys on suuri epäsymmetrisissä vioissa, kuten oiko- ja maasuluissa, joissa vikavirta on suuri (Willman, 1992). Tällöisten tilanteiden ehkäisemiseksi virran suuntareleiden havahtumiskoskettimet tulisi kytkeä rinnan, jolloin toisen suuntareleen havahtuminen riittäisi eroonkytkennän suorittamiseen. Rinnan kytketyt releet seuraavat sitä, että onko ulkoisessa verkossa vikaa, sen sijaan että ne valvoisi riittääkö saarekkeen teho onnistuneelle eroonkytkennälle (Willman, 1992).

Käydään vielä lopuksi tahdissaolon valvojan ehtoja läpi ja minkälaisia muutoksia näihin pitäisi tehdä, että ne olisivat nykyisten vaatimusten mukaisia. Tahdissaolon valvojasta tulisi muuttaa jännitteen alarajaa sekä jännitteiden vaihekulmaeroa. Nykyinen jännitteen alaraja 85 %, kun taas VJV2018 vaatimuksissa määrätään jännitteen alarajaksi 90 %. Tämän lisäksi nykyinen jännitteiden vaihekulmaero on asetettu 20°, kun määräykset sallivat maksimissaan 10° vaihekulmaeron. Muutetut asetukset olisivat näin ollen seuraavanlaiset:

- Kytkettävät jännitteet vähintään 90 % nimellisjännitteistä. (Vanha asettelu 85 %)
- Jännitteiden vaihekulmaero on maksimissaan 10°. (Vanha asettelu 20°)

Näiden muutoksien lisäksi huomattiin, että tahdissaolon valvojasta puuttui täysin taajuusalue ja jännitteen ylempi raja. Näiden uusien asettelujen pitäisi olla seuraavanlaiset:

- Kytkevät jännitteet enintään 105 % nimellisjännitteistä. (Uusi asettelu)
- Taajuuden tulee olla rajojen 49,0–51,0 Hz sisällä. (Uusi asettelu)

Uusien rajojen tarkoitus on estää tahdistus, jos verkossa on joku muu kuin normaalitilanne. Näitä rajoja ei pystytä kuitenkaan asettelemaan käytössä olevalle tahdissaolon valvojalle, koska siinä ei ole tarvittavia portaita. Tämän takia tahdissaolon valvoja tulisi vaihtaa uudempaan. Samalla, kun vaihdetaan tahdissaolon valvoja, pitäisi vaihtaa myös tahdistuslaite, koska se on samanaikaisesti asennettu eikä sen asettelualueet tai toiminnot riitä. Liitteessä V on esitetty tahdissaolon valvojan vanhat ja uudet asettelut.

Ylhäällä esitetyt muutokset lukuun ottamatta ylitaajuussuojien lisäämistä tai muutoksia tahdistukseen soveltuvat molemmille kytkinlaitoksille. Näillä asetteluiden muutoksilla ja tarkastuksilla pyritään parantamaan sähköjärjestelmän turvallisuutta ja varmistamaan sen toimintakyky häiriö- ja poikkeustilanteissa. Erityisesti on huomioitavaa, että A0 ja A1 kytkinlaitosten taajuusreleiden ensimmäisten portaiden tulee olla erilaiset, koska ne osallistuvat eri taajuudentuentatapoihin. Lopulliset suojareleiden asettelut molemmille kytkinlaitoksille on esitetty liitteissä III ja IV.

7 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia UPM:n Kaukaan tehdasintegraatin sähköjärjestelmän liityntäpisteen suojausta ja kartoittaa kuinka nykytilanne eroaa Fingridin VJV2018 vaatimuksista ja muista sovellusohjeista. Tämän lisäksi työssä tutkittiin Kaukaalla viime vuonna käyttöön otettua alitaajuusreleistystä, jonka tulee irtikytkyä ennalta määritettyjä kuormia tehonvajaustilanteissa.

Alitaajuustilanteiden suojauksen vertailussa havaittiin nykyisen tason olevan moderni ja suojaustasoltaan melkein valmis. Vain yksi irtikytkettävä suoja puuttui, mutta siitä oli jo tehty alustavat suunnitelmat. Samaan aikaan esitetyt muut alitaajuustilanteiden tuentatavat ovat ajan tasalla, eivätkä niihin tarvitse tehdä muutoksia, vaikka toisen dokumentaatiossa esiintyy joitain pieniä virheitä.

Eroonkytkennän suojauksen nykytilanteen selvityksessä taas havaittiin muutamia puutteita tämän päivän vaatimuksiin nähden. Nämä puutteet pääosin johtuvat siitä, että vaatimukset ja määräykset ovat muuttuneet siitä lähtien, kun alkuperäinen eroonkytkentäreleistys on rakennettu. Suurimmaksi osaksi alkuperäinen suojajärjestelmä täytti tarvittavat suojaustoiminnot, lukuun ottamatta yhtä toimintoa, joka voidaan kuitenkin helposti lisätä jo ennestään löytyvää releeseen. Suojausten suurimpana kehityskohteenä tai muutoskohteenä oli lähinnä suojarahojien asetteluiden säätäminen nykyisten vaatimusten tasolle. Näiden lisäksi eroonkytkennän suojauksen tutkimuksissa havaittiin dokumentaatioiden ristiriitaisuuksia. Nämä ovat syntyneet tilanteista, joissa vanhaa dokumenttikantaa ei ole päivitetty ja uusia dokumentteja on vain lisätty mukaan.

Työssä huomattiin, että voimalaitoksien suojaustoiminnot ovat muuttuneet eri aikakausien aikana yllättävän vähän. Suurempia muutoksia on tullut lähinnä voimalaitosten vaatimuksiin, joiden avulla pyritään suojaamaan paremmin voimalaitoksia ja kantaverkkoa erilaisilta häiriöiltä. Työssä laaditut ja esitetyt muutosehdotukset alitaajuussuojaukselle ja eroonkytkennälle on tehty täysin Fingridin antamien VJV2018 vaatimusten ja muiden ohjeiden perusteella. Toisaalta täytyy muistaa, että Fingridin VJV2018 vaatimukset astuvat kuitenkin vasta siinä kohtaa tarkasteltavaksi, kun liityntäpisteen suojauksessa tehdään isompia päivityksiä ja modernisointeja. Tällainen isompi päivitys ja modernisointi olisi kyseessä, jos A1-kytkinlaitoksen suojarahojet ajateltaisiin vaihtaa uudempiin.

LÄHDELUETTELO

ABB. 1992. Feeder protection SPAA 321 C User's manual and technical description. ID: 34 SPAA 4 EN1 A

ABB. 1997. SPCU 1C6 Nollajänniterelemoduuli Käyttöohje ja tekninen selostus. Versio A. ID: 1MRS 750911-MUM FI

ABB. 1998. SPCU 1C1 Yli- ja alijänniterelemoduuli Käyttöohje ja tekninen selostus. Versio A. ID: 1MRS 750948-MUM FI

ABB. 2000a. ABB:n TTT-käsikirja, Luku 13: Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot.

ABB. 2000b. SPCS 3C4 Suunnattu maasulkurelemoduuli Käyttöohje ja tekninen selostus. Versio B. ID: 1MRS 750950-MUM FI

ABB. 2002. SPCJ 3C3 Ylivirtarelemoduuli Käyttöohje ja tekninen selostus. Versio C. ID: 1MRS 750949-MUM FI

ABB. 2003. SPAU 320 C Overvoltage, undervoltage and residual voltage relay User's manual and technical description. Version C. ID: 1MRS 750726-MUM EN

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot. 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto. ISBN 978-951-672-363-4

Fingrid Oyj, 2018. Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset VJV2018. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.1.2023]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>

Fingrid Oyj, 2020. Emergency and Restoration verkkosääntö-vaatimukset ja toimeenpano Suomessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.2.2023]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/nc-er-toimeenpano-perustietopaketti-julkinen.pdf>

- Fingrid Oyj, 2021a. Alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.1.2023]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/alitaajuus_releistyksen-toteutus-kulutuksen-irtikytkentaan-suomessa.pdf
- Fingrid. 2021b. Fingrid Oyj:n Yleiset Liittymisehdot YLE2021. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.6.2023]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/yle2021-fingrid-oyj-yleiset-liittymisehdot.pdf>
- Fingrid Oyj, 2022. Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.3.2023]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliityntojen-relesuojausohje.pdf>
- Haarla, L. 2023, Sähköverkkojen suojaus. [Luento 27.3.2023]. [Viitattu 29.3.2023]
- Korpinen, L. 2023. SHKVOIMATEKNIikkaOPUS, 3 Sähkön siirto- ja jakeluverkot. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.6.2023]. Saatavilla: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- Linnamaa, L. 2023. Erikoisasiantuntija voimalaitokset Fingrid Oyj. Sähköpostikeskustelu
- Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Karisto. ISBN 951-672-143-5
- Pöyry Oyj. 2014. Sähkönjakelun yleiskaavio. [Sisäinen dokumentti]
- Pöyry Oyj. 2022. Sähkönjakelun käyttöohje UPM Kaukas. [Sisäinen dokumentti]
- Schneider Electric. 2018. VAMP 255/VAMP 230 Feeder and Motor Manager. [User manual]
- Schossig, W. 2020. History of Protection Engineering. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 13.5.2023]. Saatavilla: <https://www.electrical-engineering.academy/posts/history-of-protection-engineering>
- Siltala, J. 2017. VJV2018 voimaan ensi vuonna. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.2.2023]. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/vjv2018-voimaan-ensi-vuonna/>

Strömberg Ab. 1980. Suunnattu ylivirtarele SPAS 1K5 J3. [Ohjelehti]

Strömberg Ab. 1981. Taajuusrele SPAF 1G50 J3. [Ohjelehti]

UPM. 2017. UPM Kaukas näyttää mallia kiertotaloudesta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.4.2023]. Saatavilla: [UPM Kaukas näyttää mallia kiertotaloudessa | UPM.FI](#)

UPM. 2023a. Yleistietoa Kaukaasta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.3.2023]. Saatavilla: [Yleistietoa Kaukaasta \(upm.com\)](#)

UPM. 2023b. Kaukaan historia. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 26.4.2023]. Saatavilla: [Kaukaan historia \(upm.com\)](#)

Willman, J. 1992. Kaukas Oy Lappeenrannan tehtaiden eroonkytkentä releistys. [Sisäinen dokumentti]

LIITE III. Uudet A1-kytkinlaitoksen suoja-arele asetellut perustuen VJV2018 vaatimuksiin

<u>A1 suoja-arele asetellut</u>			Ylivirta		Ylivirta		Suunnattu ylivirta		Suunnattu maasulku		Suunnattu maasulku		Nollajännite		Nollajännite		Ylijännite		Alijännite		Alitaajuus		Alitaajuus							
Kenttä	Rele	Valmistaja	Malli	I>	t>	I>	t>>	I>	t>	I0Dir>	t>	I0Dir>>	t>>	U0>	t>	U0>>	t>>	U>	t>	U<	t>	f<	t>	f<<	t>>					
				[pu]	[s]	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[%]	[s]	[%]	[s]	[%]	[s]	[%]	[s]	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[Hz]	[s]	[Hz]	[s]			
KS1	ABB	ABB	SPCU 3C3	1.0	1.0	9.0	1.0																							
			SPCS 3C4								5.0	0.3	20.0	0.08																
			STRÖMBERG	SPAS 1K1 J3						0.5	0.1																			
			STRÖMBERG	SPAS 1K1 J3						0.5	0.1																			
KS4	ABB	ABB	SPCU 1C6																											
			SPCU 1C1																											
			STRÖMBERG	SPAF 1G50 J3																										
			STRÖMBERG	SPAF 1G50 J3																										
KS8	ABB	ABB	SPCU 1C6																											
			SPCU 1C1																											
			STRÖMBERG	SPAF 1G50 J3																										
			STRÖMBERG	SPAF 1G50 J3																										
KS8	ABB	ABB	SPCU 3C3	1.0	0.75	7.0	0.4																							
			SPCS 3C4								5.0	0.3	20.0	0.08																

* Tätä havaitumisarvoa ei ei suositella käytettäväksi. Katso työstä selitys

** Alitaajuusreleiden kytkennät pitää tarkistaa. Katso työstä selitys

LIITE IV. Uudet A0-kytkinlaitoksen suoja-arele asetellut perustuen VJV2018 vaatimukseen

A0 suoja-arele asetellut		Ylivirta		Ylivirta		Suunnattu ylivirta			Suunnattu ylivirta			Suunnattu maasulku			Suunnattu maasulku			Nollajännite		Nollajännite		Ylijännite		Alijännite		Alitaajuus		Alitaajuus		
Kenttä	Rele	t>	t>	t>	t>	IDir>	t>	Deg	IDir>>	t>>	Deg	Iodir>	t>	Uo>	Iodir>>	t>>	Uo>>	Uo>	t>	Uo>>	t>>	U>	t>	U<	t>	f<	t>	f<<	t>>	
Valmistaja	Malli	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[°]	[pu]	[s]	[°]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[s]	[s]	[pu]	[s]	[pu]	[s]	[Hz]	[s]	[Hz]	[s]	
KA1	Schneider	VAMP 255																	30,0	5,0	50,0	0,50	1,15	1,0	0,80	1,0	49,70	0,12	47,5*	0,15
KA2	Schneider	VAMP 255	1,50	1,0	-	-																								
KA4	Schneider	VAMP 255	1,0	1,0	9,0	0,10	0,26	0,06	135	9,0	0,06	135	5,0	0,50	2,0	10,0	0,10	2,0												
KA6	Schneider	VAMP 255	0,60	1,20	2,50	0,04																								

* Tätä havaintumisarvoa ei ei suositella käytettäväksi. Katso työstä selitys

LIITE V. Vanhat ja uudet tahdissaolon valvojan asettelut

	Vanhat	Uudet
Taajuus [Hz]	-	49,0
	-	51,0
Jännite [pu]	0,85	0,9
	-	1,05
Vaihekulmaero [°]	20,0	10,0
Taajuuspoikkeama [Hz]	0,20	0,20
Jännitepoikkeama [pu]	0,05	0,05
Vaihejärjestys on sama	X	X