



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ALITAAJUUSSUOJAUS

TEKIJÄ:

Tero Räsänen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Tero Räsänen	
Työn nimi Alitaajuussuojaus	
Päiväys 8.11.2021	Sivumäärä/Liitteet 43
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kuopion Sähköverkko Oy	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö sai alkunsa tarpeesta saada aikaan informatiivinen paketti, josta voidaan saada tietoa automaattisesta alitaajuussuojausjärjestelmästä. Aihe on melko tuore ja ajankohtainen ja oli näin ollen kiinnostavaa lähteä avaamaan aihetta syvällisemmin ja yksityiskohtaisemmin. Tavoitteena oli saada aikaan kattava asiakokonaisuus, joka käsittelee alitaajuussuojausta verkkoyhtiön näkökulmasta. Lisäksi tavoitteena oli aikaan saada ymmärrys siitä, miten alitaajuussuojausta voidaan suunnitella ja toteuttaa käytäntöön sekä ymmärrys siitä, miten tärkeässä osassa alitaajuussuojaus loppujen lopuksi toimii yhteiskunnan toimivuuden kannalta tehonvajaustilanteessa.</p> <p>Työssä avattiin alitaajuussuojauksen taustoja, sen syntymistä sähköjärjestelmässä sekä muuta teoriaa asiasta. Työssä käsiteltiin alitaajuussuojausjärjestelmän suunnittelua sekä selvitettiin suojauksen käyttöönottoa verkkoyhtiön sähköasemien keskijännitelähdöillä. Menetelminä työssä käytettiin haastatteluja oman työpaikkaohjaajan kanssa sekä kyselyjä yhteistyökumppanin suuntaan, jotka osaltaan mahdollistivat opinnäytetyön sisällön syntymisen. Lisäksi tietoa hankittiin Fingrid Oyj:n nettisivustolta, joka oli suurin yksittäinen tietolähde tässä työssä. Myös muita aiheeseen liittyviä tietolähteitä käytettiin työssä.</p> <p>Tuloksena työstä saatiin monipuolinen tietopaketti automaattisesta alitaajuussuojausjärjestelmästä. Tämä työ antaa käsityksen alitaajuussuojauksesta ja sen tarpeellisuudesta sähköjärjestelmässä. Myös suojauksen suunnittelusta sekä käyttöönotosta saadaan mielikuva, kuinka suojauksesta voidaan saada aikaan toimiva kokonaisuus käytännön tasolle. Työstä saatavaa tietoa voi tietyiltä osin soveltaa alitaajuussuojauksen suunnittelussa ja käyttöönotossa. Suojauksen täytäntöön panevana osapuolena tulee olla merkittävä tehon käyttäjä ja/tai tuottaja. Tätä työtä voisi jatkojalostaa soveltumaan tietyin osin esim. verkkoyhtiön omiin ohjeistuksiin koestustilanteissa.</p>	
Avainsanat alitaajuus, tehonvajaus, verkkoyhtiö, suojarele, taajuus, automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmä	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Tero Räsänen	
Title of Thesis Underfrequency protection	
Date 8 November 2021	Pages/Appendices 43
Client Organisation /Partners Powergrid of Kuopio Oy	
<p>Abstract</p> <p>The thesis began from the need to create an informative package which can provide information about the automatic underfrequency protection system. The topic is quite fresh and current and therefore it was interesting to start opening the topic thoroughly and in more detail. The main goal was to achieve an inclusive fact entity which handles underfrequency from the point of a power grid company. The second goal was to understand how the underfrequency protection can be planned and implemented to action and to understand the importance of underfrequency protection for the functioning of a society in a power shortage situation.</p> <p>In this thesis, the backgrounds of the underfrequency protection were explored, how it functions in the electricity system and also other theory about the topic. The thesis dealt with both the planning of the underfrequency protection and the implementation of the protection in high voltage outputs in substations owned by the power grid company. Interviews with the author's mentor at the workplace and inquiries to the cooperation partner were used as the research methods which enabled the creation of the content of the thesis. Information was also acquired from the website of Fingrid Oy. This was one of the largest single sources of information in this thesis. Other related sources of information were also used in the thesis.</p> <p>As a result, the thesis produced a versatile information package on automatic underfrequency protection. This thesis gives an idea of underfrequency protection and its necessity in the electricity system. An idea of the planning and implementation of the protection is obtained and how the protection can be made to work on a practical level. The information obtained from the thesis can be applied to certain extent in the planning and implementation of underfrequency protection. The implementing party of the protection must be a significant power user and/or producer. This thesis could be further developed to apply to some extent e.g in the power grid company's own guidelines in test situations.</p>	
<p>Keywords underfrequency, power shortage, power grid company, protection relay, frequency, automatic underfrequency protection</p>	

ESIPUHE

Haluan kiittää opinnäytetyönaiheesta Kuopion Sähköverkko Oy:n käyttöpäällikkö Simo Hyväristä. Hän on ollut kannustavana ja ohjaavana tukena tämän opinnäytetyön aikana.

Lisäksi haluan kiittää yhteistyökumppaneita, jotka olivat mukana toteuttamassa alitaajuussuojausjärjestelmää Kuopion Sähköverkko Oy:lle. Suuret kiitokset kuuluvat myös opinnäytetyöni ohjaajalle Juhani Rouvalille.

Kuopiossa 8.11.2021

Tero Räsänen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	VAATIMUS ALITAAJUUSSUOJAUKSEEN OSANA SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄN SUOJAUSTA	7
2.1	EU:n asetus 2017/2196	7
2.2	Sähköjärjestelmän kriittisyys yhteiskunnan toiminnalle	9
3	ALITAAJUUS	10
3.1	Alitaajuuden syntyminen	10
3.2	Alitaajuuden haitat ja ongelmat	10
3.3	Alitaajuushäiriöön varautuminen ja sen hallitseminen	11
3.4	Taajuusreservit	12
4	ALITAAJUUSSUOJAUKSEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	15
4.1	Toteutusvaihtoehdot	15
4.2	Suunnittelu	18
4.2.1	Nollajännitelukitus	18
4.2.2	Taajuusportaat	19
4.2.3	Kulutuksen irtikytkentä	24
4.2.4	Irtikytkettävän kulutuksen valinta	25
4.2.5	Muut ohjeet ja suositukset	26
4.3	Käyttöönotto	28
4.3.1	Käyttöönoton toteutusvaihtoehdot	31
4.3.2	Keskitetty johtojärjestelmä	31
4.3.3	Suojareleiden päivitys	35
4.3.4	Uudet suojareleet	36
4.4	Suojauslaitteisto	36
4.5	Pohdintaa alitaajuussuojauksen merkityksestä	41
5	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET	43

1 JOHDANTO

Euroopan komission asetus (EU) 2017/2196 on sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskeva verkkosäännöstö. Se velvoittaa siirtoverkonhaltijoita tekemään järjestelmän varautumis- ja käytönpalautumissuunnitelmat, joissa kuunnellaan myös jakeluverkonhaltijoita ja muita merkittäviä verkonkäyttäjiä. Nämä suunnitelmat varmistavat sähköjärjestelmän käyttövarmuuden ja estävät häiriön laajenemisen tai pahenemisen siinä. Tämä asetus sisältää yhtenä varautumissuunnitelman toimenpiteenä automaattisen alitaajuussuojausjärjestelmän. (Asetus 2017/2196/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevasta verkkosäännöstä)

Mahdollisessa sähköjärjestelmän alitaajuustilanteessa häiriötila saadaan hoidettua alitaajuussuojauksella hallitusti ja suunnitellusti. Näin minimoidaan vakavaa haittaa, joka voisi aiheuttaa yhteiskunnan lamaantumisen sähköntoimituksen häiriön seurauksena. (Asetus 2017/2196/EU)

Aihe on ajankohtainen ja tärkeä, sillä yhteiskunnan infrastruktuurin toimivuus edellyttää häiriötöntä sähköjakelua. Sähköjärjestelmän hallittavuus ja sen toimiminen on elintärkeää nyky-yhteiskunnassa.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään alitaajuussuojauksen teoriaa, suojauksen toimintaa käytännössä, sen toteutustapoja sekä lopuksi pohditaan suojauksen yhteiskunnallista merkitystä sähkövoimajärjestelmässä. Alitaajuussuojausta on tarkoitus testata Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemilla.

Alitaajuussuojauksen teoriaosuudessa kerrotaan alitaajuuden syntymisestä ja siitä aiheutuvien haittojen ja ongelmien minimoimisesta sähkövoimajärjestelmässä. Teoriaosaamisen hallitseminen ja ymmärtäminen on tärkeä osa alitaajuussuojauksen suunnittelua ja käyttöä.

Edellä jo mainittiin käytännön toimivuuden testausta suojauksen osalta. Siitä saadaan käytännön kokemuksia testaamalla sitä Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemien keskijännitelähdöillä.

Toteutustapa-vaihtoehdoissa käsitellään eri tapoja toteuttaa alitaajuussuojaus. Fingrid Oyj on ohjeistanut verkonhaltijoita tässä asiassa hyvin sekä laatinut selkeät ohjeet ja valinnat toteutukseen. Lopuksi pohditaan alitaajuussuojauksen suurempaa merkitystä nyky-yhteiskunnassa.

Tämä työ on informatiivinen tietopaketti alitaajuussuojauksesta. Työn ansiosta päästään selville suojauksen toimintaperiaatteista sekä ymmärretään sen tärkeyden osuudesta sähkövoimajärjestelmässä. Työstä saatavaa tietoa voidaan tietyiltä osin soveltaa alitaajuussuojauksen suunnittelussa ja sen käyttöönotoissa. Käyttöönotto tapahtuu aina verkkoyhtiökohtaisesti, mutta tämä työ antaa siihen yhden näkökulman toteuttaa se.

Suunnittelun osalta tätä työtä voidaan hyödyntää teoriaosuuden pohjalta. Kun alitaajuussuojauksen syvälinen ymmärrys on hallussa, auttaa sen soveltaminen suunnittelussa paljon. Näin ollen suojauksen suunnitelmista saadaan laadukkaita ja toteuttamiskelpoisia.

2 VAATIMUS ALITAAJUUSSUOJAUKSEEN OSANA SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄN SUOJAUSTA

2.1 EU:n asetus 2017/2196

Euroopan Unionin tasolta on annettu ja säädetty asetus 2017/2196 (Asetus 2017/2196/EU), joka määrittelee sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevia asioita. Tämä asetus ottaa kantaa moniin eri sähköjärjestelmään liittyvien teknisten asioiden, määritelmien, suunnitelmien, käyttöönottojen ja toimenpiteiden moninaisiin asioihin.

Asetus käsittää ensin sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevan verkkosäännösten yleisiä säännöksiä. Tässä kohtaa asetusta selvitetään eri artikloilla mm. mihin asetusta sovelletaan sekä määritellään termejä ja asioita, joita asetuksessa käsitellään. Asetus ottaa kantaa myös salassapitovelvollisuuksiin sekä kustannuksiin.

Asetuksen seuraavassa luvussa käydään läpi sähköjärjestelmän varautumissuunnitelmaa, joka käsittelee varautumissuunnitelman rakennetta, sen toteuttamista ja aktivoimista sekä siirtoverkonhaltijoiden välistä avunantoa ja koordinoitua hätätilassa. Järjestelmän varautumissuunnitelman rakennetta selvitetään tarkasti. Myös suunnitelman aktivointiin ja toteuttamiseen on otettu laajasti kantaa. Tämän artiklan perusteella siirtoverkonhaltijalla on hyvät edellytykset tehdä kattava varautumissuunnitelma.

Seuraavaksi asetuksessa perehdytään itse sähköjärjestelmän varautumissuunnitelman toimenpiteisiin. Näitä toimenpiteitä on yhteensä kahdeksan (8) kappaletta, joista yhtenä toimenpiteenä sähköjärjestelmän romahtamisen välttämiseksi on automaattinen alitaajuusjärjestelmä. 15 artikla määrittelee alitaajuussuojajärjestelmän muodostamisen periaatteet. Siinä kerrotaan mm., miten suojausjärjestelmä tulee rakentaa sekä otetaan kantaa automaattiseen alitaajuudesta tapahtuvaan kuormien irtikytkentäjärjestelmään. Taulukossa 1 on nähtävissä tämän järjestelmän tarkemmat ominaispiirteet.

Taulukossa 1 on kuusi (6) saraketta, joissa selitetään:

- parametrit, joilla automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä rakennetaan
- Euroopan alueet, joissa noudatetaan kyseisten parametrien arvoja alitaajuussuojauksessa
- mittausyksiköt, joilla asiaa mitataan

TAULUKKO 1. Automaattisen alitaajuudesta tapahtuvan kuormien irtikytkentäjärjestelmän ominaispiirteet (Asetus 2017/2196/EU 2017)

Parametri	Arvot Manner-Eurooppa	Arvot Pohjoismaat	Arvot Iso-Britannia	Arvot Irlanti	Mittausyksikkö
Kuormien irtikytkennän pakollinen aloitustaso: Taajuus	49	48,7–48,8	48,8	48,85	Hz
Kuormien irtikytkennän pakollinen aloitustaso: Irtikytkettävä kuorma	5	5	5	6	Prosenttia kokonaiskuormasta kansallisella tasolla
Kuormien irtikytkennän viimeinen pakollinen taso: Taajuus	48	48	48	48,5	Hz
Kuormien irtikytkennän viimeinen pakollinen taso: Irtikytkettävä kumulatiivinen kuorma	45	30	50	60	Prosenttia kokonaiskuormasta kansallisella tasolla
Toteutusalue	± 7	± 10	± 10	± 7	Prosenttia kokonaiskuormasta kansallisella tasolla tietyllä taajuudella
Viimeiseen pakolliseen tasoon johtavien askelten vähimmäismäärä	6	2	4	6	Askelten lukumäärä
Suurin kussakin askeleessa irtikytkettävä kuorma	10	15	10	12	Prosenttia kokonaiskuormasta kansallisella tasolla tietyssä askeleessa

Asetuksen irtikytkentäjärjestelmän ominaispiirteistä Suomessa noudatetaan Pohjoismaille tarkoitettuja ja osoitettuja arvoja. Kuormien pakolliseksi aloitustasoksi on määrätty 48,7–48,8 Hz. Suomessa aloitustasoksi on valittu 48,8 Hz.

Irtikytkettävän kuorman pakollinen aloitustaso on 5 % kokonaiskuormasta. Viimeisen portaan pakollinen taajuuden arvo on 48 Hz. Alitaajuushäiriötilanteessa irtikytkettävien kuormien kumulatiivinen osuus viimeisellä taajuusportaalla on oltava 30 % sähköjärjestelmän kokonaiskuormasta.

Seuraavaksi taulukossa 1 on esitetty toteutusalue. Siinä sanotaan vaihtelualueeksi ±10 % kokonaiskuormasta. Irtikytkettävien kuormien kokonaismäärä viimeisen taajuusportaan jälkeen voi lopulta olla 20 % - 40 % välillä. Viimeiseen pakolliseen tasoon johtavien askelten vähimmäismääräksi on asetettu 2 askelta. Suomessa noudatetaan pääsääntöisesti 5 askelta, mutta askelten määrästä voidaan verkkoyhtiökohtaisesti neuvotella Fingrid Oyj:n kanssa. Esimerkiksi jonkun verkkoyhtiön jakeluverkossa saattaa olla vain yksi (1) sähköasema, jolloin kuormien irtikytkentä kannattaa hoitaa kahdella (2) tai jopa yhdellä (1) askeleella/portaalla. Tällöin jakeluverkosta lähtevän kuorman osuus on kerralla 30 % taajuuden laskiessa alitaajuudeksi arvoon 48,8 Hz.

Viimeiseksi ominaispiirteissä mainitaan suurin kussakin askeleessa irtikytkettävä kuorma. Asetuksessa sen sanotaan olevan 15 %, mutta Suomessa käytetään kuitenkin arvoa 10 %. Tällöin kerralla irtikytkettävän kuorman osuus kullakin taajuusportaalla saadaan pidettyä melko maltillisena. Yleensä tämä osuus kytketään irti vasta viimeisellä taajuusportaalla viisi (5).

2.2 Sähköjärjestelmän kriittisyys yhteiskunnan toiminnalle

Yhteiskunnan kannalta sähköjärjestelmän toimivuus on elinehto. Ilman toimivaa infrastruktuuria nyky-yhteiskunta ei toimi, vaan alkaa rakenteiden pettäessä menemään sekasortoon. Sähkö on yhteiskunnan yksi peruselinehdoista, josta täytyy pitää huolta.

Jotta sähköjärjestelmä pysyisi toimintavarmana, täytyy se rakentaa mahdollisimman varmaksi häiriöiltä. Myös järjestelmän huollettavuutta ja kunnossapitoa pitää suunnitella niin, että ne voidaan mahdollisimman vaivattomasti ja järjestelmää häiritsemättä suorittaa.

Yksi sähköjärjestelmän suojautumiskeino on automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmä. Jotta sähköjärjestelmä on ajautunut alitaajuuden häiriötilaan, on sitä ennen tapahtunut sarja vakavia tapah-tumia. Monet voimalaitokset ovat tässä tilanteessa jo pudonneet syöttämästä ja tuottamasta energiaa sähköjärjestelmään. Koska tehoa on joka hetki tuotettava saman verran kuin sitä kulutetaan, niin tarvittavan tehontuoton putoaminen verkosta johtaa siihen, että taajuus alkaa laskemaan ja sitä myöten myös jännite alkaa laskemaan. Tämä aiheuttaa sen, että sähköjärjestelmään liitetyt laitteet ja laitteistot lakkaavat toimimasta.

Mahdollisiin häiriötilanteisiin täytyy varautua monilla eri suojausjärjestelmillä. Nämä suojausjärjestel-mät on tunnettava ja hallittava. Tätä taitoa ja osaamista tulee ylläpitää koulutuksilla ja tutkimuksilla. Tutkimalla ja panostamalla tuotekehitykseen ja koulutukseen saadaan nykyisistä suojausjärjestelmistä entistä parempia tulevaisuuden turvaksi.

3 ALITAAJUUS

3.1 Alitaajuuden syntyminen

Alitaajuustilanne sähkövoimajärjestelmässä syntyy, kun sähköntuotanto ei pysty vastamaan vallitsevaan kulutukseen. Tämän seurauksena puhutaan, että sähköjärjestelmään muodostuu tuotannon vajeusta eli tehopulaa (Fingrid Oyj 2019).

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa käytetään sähkönjakelussa kotitaloksiin, teollisuuteen ja muihin sähkökäyttöpaikkoihin vaihtosähköjärjestelmää. Tässä järjestelmässä jännite ja virta vaihtelevat 50 Hz taajuudella, jota pidetään sähköverkon nimellistaajuutena. Joka hetki sähköjärjestelmän taajuutta pyritään pitämään lähellä arvoa 50 Hz.

Jos taajuus kuitenkin pääsee laskemaan arvoon 48,8 Hz ja siitä alaspäin, puhutaan alitaajuushäiriötilanteesta. Tällöin sähköjärjestelmässä on jo päässyt tapahtumaan vakavia häiriöitä. Nämä vakavat häiriöt ovat tilanteet, joissa sähköntuotantolaitokset ovat ns. pudonneet sähköjärjestelmästä.

Sähköntuotantolaitoksissa ts. voimalaitoksissa sähköä tuotetaan pyörivillä generaattoreilla. Generaattorit saadaan pyörimään eli tuottamaan sähköenergiaa niiden mekaanisesta liike-energiasta esim. vesivoimalla, jossa veden pintaeron muutoksella vettä voidaan ohjata siivekkeellisen turbiinin läpi. Jos useita tällaisia voimalaitoksia irtoaa sähköjärjestelmästä esim. salamoinnin tai teknisten vikojen vuoksi, taajuus lähtee laskemaan. Taajuuden laskiessa myös jännitettä lasketaan, sillä seurauksella, että vallitsevaan tehon tarpeeseen ei tässä tilanteessa pystytä enää vastaamaan.

3.2 Alitaajuuden haitat ja ongelmat

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa pienjännitteiset sähkölaitteet ja sähkölaitteistot on mitoitettu ja suunniteltu 50 Hz taajuudelle ja sitä myöten 230 V/400 V pienjännitteelle. Myös suurjännitteiset laitteistot ja laitteet jännitealueella ≥ 1 kV ja ≤ 400 kV toimivat 50 Hz:n taajuudella.

Sähköjärjestelmän kohdatessa alitaajuustilanteen, jossa nimellistaajuus on päässyt laskemaan alle 49 Hz:n, sähkölaitteistot eivät enää toimi tarkoituksenmukaisesti. Niiden toiminta häiriintyy ja ne alkavat toimimaan ennalta-arvaamattomasti esim. pysähtymällä, tekemällä virhetoimintoja jne.

Alitaajuustilanteessa tehoa ei saada siirrettyä sitä tarvitseville tehon tarvisijoille eli sähkökäyttöpaikoille. Tämä luo tilanteita, joissa yhteiskunta alkaa ajautumaan epästabiliin tilanteeseen.

Pitkäaikaisessa häiriössä yhteiskunnan rakenteet eivät enää toimi normaalisti esim. rahaliikenne ei kulje, sähköiset viestintäjärjestelmät takkuilevat tai lakkaavat toimimasta kokonaan, sähköautot lopettavat toimintansa niiden mahdottomuudesta ladata niitä jne. Nämä ovat tilanteita, joilta pyritään välttymään.

3.3 Alitaajuushäiriöön varautuminen ja sen hallitseminen

Alitaajuushäiriöön voidaan varautua. Ja häiriön syntyessä sitä pystytään hallitsemaan. Tätä varten on kehitetty automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmä. Järjestelmä kytkee automaattisesti kuormia irti sähköverkosta irtikytkemisjärjestyksessä. Asiaa on havainnollistettu taulukossa 2.

Sähköjärjestelmän nimellistaajuuden laskiessa 48,8 Hz:iin suojalaitteisto havaitsee tämän muutoksen ja kytkee taajuusportaalla 1 kytkettyä kuormaa irti verkosta. Kokonaistoiminta-aika tälle tulee olla 0,15 s, joka käsittää kokonaisuudessaan katkaisijan ja releiden toimintaviiveet. Jos taajuus laskee tästäkin alemmas, suojalaitteisto toimii ohjelmoitujen taajuusportaiden mukaan taajuusporras 2, taajuusporras 3 jne. Taajuusportaiden kulutukset on valittu niin, että taajuusportaalle 1 valitaan vähiten tärkeä kulutus, taajuusportaalle 2 toiseksi vähiten tärkeä kulutus jne.

Jokaisella taajuusportaalla irtikytkettävän kuorman suuruus on määritelty 5–10 %:iin. Irtikytkettävien kuormien kumulatiivinen summa tulee olla viimeisen taajuusportaan toimittua 30 % sähköjärjestelmän kokonaiskuormasta.

TAULUKKO 2. Kulutuksen irtikytkennän asetellut ja vuosittain raportoitavat tiedot (Fingrid Oyj 2019)

	Tavoite			FG:n asiakas täyttää % kulutuksesta		
Porras	f (Hz)	Kokonaistoiminta-aika (s)	% kulutuksesta	1.2 klo 8–9	1.7 klo 8–9	Koko vuosi
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			

Automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä kannattaa toteuttaa yllä olevan taulukon 2 mukaisesti. Kulutusta tässä mallissa irrotetaan viidessä (5) portaassa. Tällä tavalla toteutettuna sähköjärjestelmässä vältetään ylitaajuuden riskiltä. Ilman tällaista porrastusta kulutusta voidaan irrottaa liian paljon suhteessa esiintyvään alitaajuuteen. Tästä voi seurata ylitaajuus, joka haittaa myös sähköjärjestelmän laitteita ja laitteistoja (Fingrid Oyj 2019). Taajuutta on pyrittävä pitämään joka hetki mahdollisimman stabiilina arvossa 50 Hz.

Taulukossa 2 esiintyvät kolme (3) oikeanpuolimmaista saraketta on varattu Fingrid Oyj:n asiakasta kuten verkkoyhtiötä varten. Niissä asiakas ilmoittaa FG:lle kerran vuodessa laukeavat kulutuksensa prosentuaalisesti tiettyinä aikoina. Nämä tietyt ajat ovat 1.2 klo 8–9, 1.7 klo 8–9 ja koko vuosi. Tuolloin ilmoitettavat tehot tulee laskea prosentuaalisesti noina aikoina tuntikeskitehoista sekä vuoden keskitehosta. Tällöin saadaan tarkistettua 30 % kokonaiskulutuksen määrä, joka tulee irrota verkosta portaittain alitaajuushäiriön sattuessa sähköjärjestelmässä. Tällä pyritään välttämään laajamittaisen suurhäiriön leviäminen hallitsemattomasti sähköjärjestelmässä.

3.4 Taajuusreservit

Taajuusreservit tarkoittavat taajuudenmuutoksista automaattisesti aktivoituvia pätötehoreservejä (Fingrid Oyj 2021). Nämä pätötehoreservit voivat olla esimerkiksi vesivoima-, ydinvoima- tai aurinkovoimalaitoksia. Näillä voimalaitoksilla ajetaan tehoa sähköjärjestelmään, kun järjestelmässä tarvitaan vastata kulutukseen vaatimaan tehontarpeeseen. Reservejä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan.

Taajuusreservit on jaettu kahdenlaisiin (2) reserveihin:

- käyttöreservit
- häiriöreservit

Käyttöreservejä ohjataan taajuudella. Tämä tapahtuu automaattisesti. Käyttöreservin automatiikka pyrkii pitämään sähköjärjestelmän taajuuden normaalitaajuusalueella 49,9–50,1 Hz. Käyttöreservi on ns. symmetrinen tuote, jonka täytyy pystyä sekä ylös- että alassäätöön. Kun reserviä säädetään ylös, sähköntuotantoa lisätään. Alassäädössä vastaavasti sähköntuotantoa vähennetään. Alassäätö voidaan toteuttaa myös kulutusta lisäämällä, jos se on mahdollista tehdä (Fingrid Oyj 2021).

Häiriöreservien ohjaus tapahtuu myös automaattisesti taajuuden ollessa säätösuureena. Myös häiriöreservi on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin. Tässäkin reservissä säätötuotteet toimivat samalla tavalla kuin käyttöreservissä.

	FFR	FCD	FCR-N	aFRR	mFRR
	Nopea taajuusreservi, Suomi 20 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi 290 MW, Pohjoismaissa 1 450 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi 120 MW, Pohjoismaissa 600 MW	Automaattinen taajuudenhallintareservi, Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoittava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Parissa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa
					

KUVA 1 Taajuusreservit (Fingrid Oyj 2020)

Kuvassa 1 on esitetty erilaiset taajuusreservit. Nämä reservit on jaoteltu viiteen (5) eri reserviin:

- nopea taajuusreservi (FFR)
- taajuusohjattu häiriöreservi (FCD)
- taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)
- automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)
- säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

Nopeaa taajuusreserviä (FFR) hankitaan reservimarkkinoilta tilanteessa, jossa sähköjärjestelmän taajuus 50,0 Hz laskee. Tämän tyyppisessä tilanteessa sanotaan, että sähkövoimajärjestelmän inertia on pieni. Inertia tarkoittaa hitautta, muutoksen vastustamista. Kun puhutaan sähköverkon inertiaa, tarkoitetaan sillä sähköverkossa olevaa liike-energiaa. Tämä liike-energia sitoutuu voimalaitoksissa ja tehtaissa pyöriviin koneisiin (generaattoreihin), jotka pyörivät sähköverkon kanssa samalla taajuudella. Sähköverkkoon tuotettu inertia saadaan aikaan siis koneiden pyörivän massan avulla (Fingrid Oyj 2021).

Pohjoismaissa nopea taajuusreservi otettiin käyttöön toukokuussa 2020. Nopeaa taajuusreserviä Fingrid Oyj hankkii kansallisilta markkinoilta (Fingrid Oyj 2021).

Jotta reservikohteet (esim. vesivoimalaitokset) voivat osallistua kansallisille markkinoille, tulee niiden täyttää reserville asetetut tekniset vaatimukset. Nämä vaatimukset katsotaan osoitetuksi säätökeilla, jotka reservintoimittaja suorittaa hyväksytysti ennen markkinoille tuloa. Tällä varmistetaan reservikohteen kuten vesivoimalaitoksen säätöominaisuuksien soveltuvuudesta sekä niiden oikeasta toimimisesta (Fingrid Oyj 2021).

Nopeaa taajuusreserviä (reservitehoa kuten vesivoimalaitoksen käytettävää potentiaalista tehoa) tulee saada aktivoitua sähkövoimajärjestelmän käyttöön täysimääräisesti vaaditun ajan kuluessa, kun taajuus laskee alle tietyn arvon. Reservitoimittajalla on mahdollisuus valita kolmesta (3) eri vaihtoehdosta, miten reserviteho aktivoidaan. Aktivointitaajuutena voidaan käyttää 49,7 Hz, 49,6 Hz tai 49,5 Hz. Ensimmäisessä vaihtoehdossa (49,7 Hz) aktivointiaika voi maksimissaan olla 1,3 s. Tämä on siis se aika, jonka jälkeen taajuusreservi tulee olla käytettävissä ja syötettävissä sähkövoimajärjestelmään. Toisessa vaihtoehdossa (49,6 Hz) maksimiaktivointiaika on 1,0 s ja kolmannessa vaihtoehdossa (49,5 Hz) 0,7 s (Fingrid Oyj 2021). Puhutaan siis todella nopeista reaktioajoista, jolloin reserviä (tehoa) on pystyttävä syöttämään tilanteessa, jossa taajuus alkaa laskemaan alle vaaditun taajuustason.

Taajuusohjatut häiriöreservi (FCR-D) ja -käyttöreservi (FCR-N) käsiteltiin tämän kappaleen alussa. Nämäkin reservit osallistuvat taajuuden säätämiseen ja sitä kautta tehon säätöön sähkövoimajärjestelmässä ja ovat osaltaan tukemassa järjestelmän vakautta ja käyttövarmuutta.

Automaattisella taajuudenhallintareservillä (aFFR) tarkoitetaan keskitettyä taajuusohjattua reserviä. Sen aktivointi perustuu pohjoismaisen synkronialueen (Suomen, Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan yhtenäinen siirtoverkkoalue) taajuuspoikkeamaan (Fingrid Oyj 2021).

Ennen reservin aktivointia taajuuspoikkeamasta lasketaan sähköjärjestelmässä tarvittava tehonmuutos, jotta taajuus saadaan palautetuksi nimelliseen arvoon 50 Hz. Tarvittava tehonmuutos lasketaan Norjan kantaverkkoyhtiön Statnetin käytönvalvontajärjestelmässä. Tästä seuraa se, että jo aktivoituneet taajuusohjatut reservit voidaan vapauttaa (Fingrid Oyj 2021).

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoilla (mFFR) tarkoitetaan Fingridin ja muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden ylläpitämää markkinapaikkaa, jossa tuotannon ja kuorman haltijat voivat antaa säätötarjouksia säätökykyisestä kapasiteetistaan. Tuotannon ja kuorman haltijoilla tulee olla Suomessa säätösähkömarkkinasopimus Fingrid Oyj:n kanssa, jotta ne pystyvät toimimaan ja antamaan tarjouksia kyseisellä markkinapaikalla (Fingrid Oyj 2021).

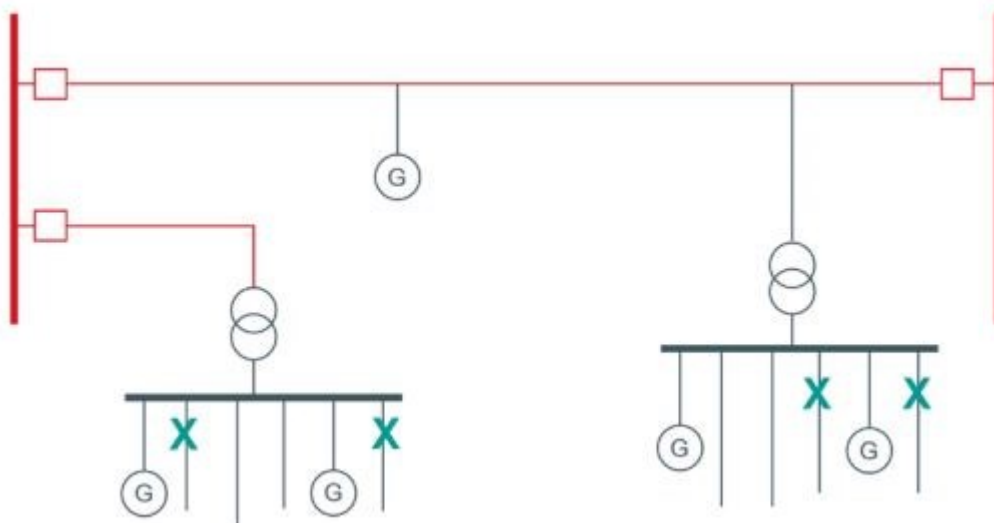
Tehotasapainon hallitsemiseksi pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt pystyvät aktivoimaan tarjouksia säätösähkömarkkinoilta. Tarjousten aktivoinnin pystyy tekemään sekä normaali- että häiriötilanteissa. Tehotarjous aktivoidaan manuaalisesti Fingrid Oyj:n kantaverkkokeskuksesta (Fingrid Oyj 2021).

Vuonna 2016 keväällä säätökapasiteettimarkkinat otettiin käyttöön varmistamaan se, että Fingridillä on mitoittavaa vikaa vastaava määrä nopeaa häiriöreserviä. Tämä häiriöreservi on lisäksi tarpeellinen varautumistoimenpide Fingrid Oyj:n omien ja vuokravoimalaitosten huolto- ja korjauskeskeytyksissä (Fingrid Oyj 2021).

4 ALITAAJUUSSUOJAUKSEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

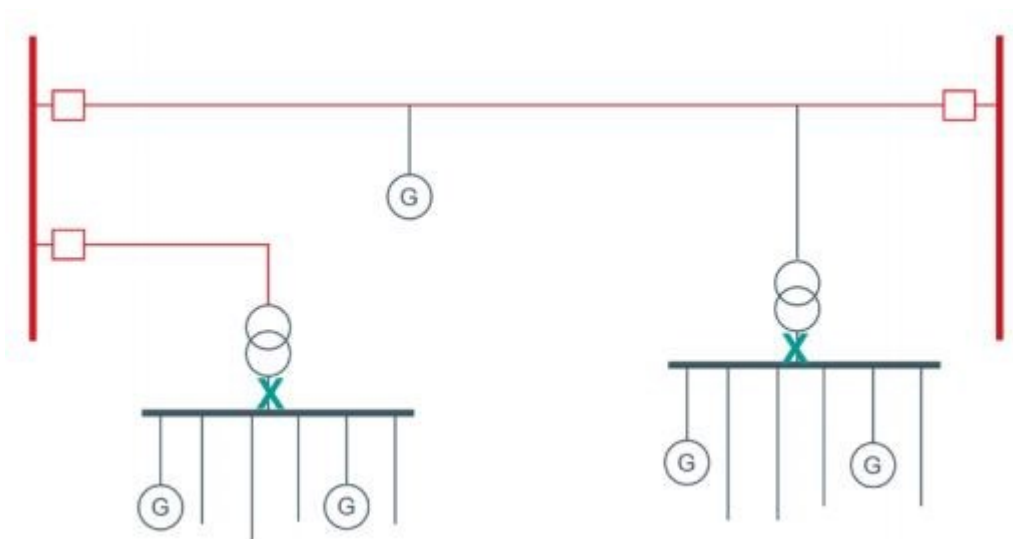
4.1 Toteutusvaihtoehdot

Alitaajuussuojausjärjestelmän toteuttamisessa voidaan valita kolmesta (3) eri vaihtoehdosta. Kuvassa 2 on kuvattuna alitaajuussuojausjärjestelmän toteutusvaihtoehto keskijännite (kj) -johdoilla. Tässä toteutusmallissa kj-lähdöissä olevat suojareleet ohjaavat lähtöjen katkaisijat auki-asentoon, kun ne havaitsevat alitaaajuuden sähköverkossa. Releet voidaan joko ohjelmoida toimimaan alitaaajuuden vallitessa tai vaihtaa ne sellaisiin releisiin, jotka tukevat tätä suojaustoimintoa. Näin toteutetulla alitaajuussuojausjärjestelmällä saadaan kaikkein hallituimmin ja tarkimmin kulutusta irti verkosta.



KUVA 2 Toteutus kj-johdoilla (Fingrid Oyj 2019)

Seuraavassa toteutusvaihtoehdossa suojaus voidaan toteuttaa kuvan 3 mukaisella tavalla, jossa kulutusta irrotetaan alitaajuushäiriössä sähköasemien päämuuntajilla. Tämä on melko raaka toimenpide, jonka vuoksi kerralla irtikytettävä kulutus on suuri. Näin toteutettuna alitaajuusportaita on vain yksi porras, joka kytkee irti esim. koko vaadittavan 30 % kuorman kerralla. Taajuusporras on tässä tapauksessa säädetty yleensä ensimmäiselle sallitulle alitaaajuuden arvolle 48,8 Hz.



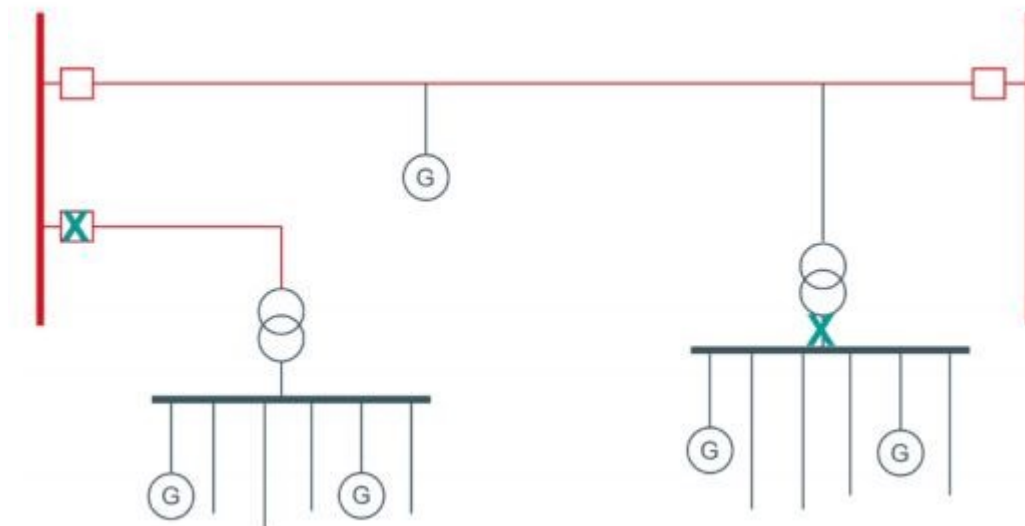
KUVA 3 Toteutus jakeluverkon asemilla (Fingrid Oyj 2019)

Kuvan 3 mukaista toteutusmallia voidaan käyttää esim. sellaisissa verkkoyhtiöissä, joissa on vain yksi (1) sähköasema. Alitaajuuden mahdollisuus sähköverkossa on melko harvinainen, mutta kuitenkin mahdollinen. Kuvan 3 mukaisella toteutusmallilla automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä on järkevä, edullinen ja yksinkertainen toteuttaa verkkoyhtiöissä, jotka omistavat vain yhden (1) sähköaseman.

Jos alitaajuussuojajärjestelmä toteutetaan jakeluverkon sähköasemilla päämuuntajakentässä, on siinä suuri riski siihen, että samalla kytketään irti kriittistä kulutusta kuten sairaaloita, kouluja ja julkisia rakennuksia. Nämä riskit on syytä tietää ja punnita hyötyjen kesken verkkoyhtiöissä, joissa kyseinen malli olisi varteenotettava vaihtoehto.

Tämä on siis yksi Fingrid Oyj:n hyväksymistä toteutusmalleista. Malli on syntynyt Fingridin ja verkkoyhtiöiden yhteistyönä yhdeksi vaihtoehdoksi. Suomessa on n. 80 eri sähköverkkoyhtiötä, joilla jokaisella on omanlaisensa jakeluverkko.

Viimeisempänä sallituista alitaajuussuojajärjestelmän toteutusmalleista on sen toteutus sekä jakeluverkon sähköasemilla että 110 kV säteittäisillä johdoilla. Kuvassa 4 on esitetty malli tästä.



KUVA 4 Toteutus jakeluverkon asemilla sekä 110 kV säteittäisillä johdoilla (Fingrid Oyj 2019)

Kuvan 4 mukaisessa toteutusmallissa verkkoyhtiön lisäksi Fingrid pystyy operoimaan sähkönkulutuksen irtikytkentää. Tässä mallissa alitaajuuden havaitsemat suojareleet on sijoitettu verkkoyhtiön sähköaseman päämuuntaja kentän lisäksi Fingridin sähköasemalta syöttävälle 110 kV säteittäiselle johdolahdolle. Tämä kolmas (3.) vaihtoehtomalli mahdollistaa sen, että verkkoyhtiön resursseja voidaan vapauttaa tai niitä ei tarvitse ainakaan lisätä suuresti, sillä osan alitaajuussuojajärjestelmän hankinnasta ja operoinnista vastaa toinen taho (Fingrid Oyj).

Huonona puolena tässä vaihtoehdossa on se, että verkkoyhtiö ei pääse itse täysin operoimaan kulutuksiinsa. Tässä mallissa, samoin kuin edellisessä toteutusmallissa, käytettäviä taajuusportaita tulisi olemaan vain yksi (1) kappale. Tämä tarkoittaa sitä, että vaadittu 30 % kuoma verkkoyhtiön kokonaiskuormituksesta kytketään verkosta yhdellä kertaa irti.

Jos verkkoyhtiöllä on vain yksi (1) sähköasema jakeluverkossaan, niin tämän mallin mukainen toteutus merkitsisi sitä, että verkkoyhtiön koko kuormitus kytkettäisiin verkosta irti. Tällaisessa tilanteessa yhtiön tulisi vakavasti harkita tästä mallista luopumista ja käyttää vaihtoehtoisia toteutusmalleja.

Verkkoyhtiön omistaessa monia sähköasemia jakeluverkossaan ja jakeluverkon ollessa laaja, osan verkon alitaajuussuojauksesta voisi toteuttaa tällä tavalla. Tässäkin vaihtoehdossa hyödyt ja haitat kannattaa punnita todella tarkkaan, jotta päästään kokonaisuuden kannalta tyydyttävään ratkaisuun.

4.2 Suunnittelu

Suunnittelun alkuvaiheessa tulee olla päätettynä se toteutusvaihtoehto, jolla automaattista alitaajuussuojajärjestelmää lähdetään suunnittelemaan ja viemään eteenpäin. Tämä antaa pohjan sille, että suojausjärjestelmästä saadaan suunniteltua juuri halutunlainen kokonaisuus.

Jotta automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä toimisi mahdollisimman tarkasti juuri todellisen alitaajuuden merkityksessä, tulee suoja suunnitella niin, ettei se toimi ohimenevissä vika- tai poikkeustilanteissa, joissa ei ole kyse tehonvajaustilanteesta. Yksi tällaisista vika- tai poikkeustilanteista voi olla silloin, kun johtolähdöllä on menossa pikajälleenkytkennät vian esim. salamoinnin, seurauksena. Pikajälleenkytkennän jännitteettömänä väliaikana johdon varrella mahdollisesti oleva voimalaitos voi pitää yllä jännitettä, mutta voimalaitoksen syöttämän alueen (saarekkeen) taajuus poikkeaa nimellisestä taajuudesta 50 Hz (Fingrid Oyj 2019). Jos taajuus pääsee laskemaan arvoon 48,8 Hz niin tässä tapauksessa alitaajuussuojauksen ei tule toimia. Näiden tilanteiden viive- ja reaktioajat ovat millisekunneissa, joten päätös siitä onko tilanne todellinen alitaajuushäiriö vai ei, tehdään hyvin nopeasti.

Sähkövoimajärjestelmän jännitteen häiriintyessä myös järjestelmän nimellinen taajuus muuttuu. Tämän vuoksi automaattinen alitaajuussuojaus suunnitellaan niin, ettei se toimi tilanteissa, joissa ei ole kyse tehonvajauksesta. Nämä aiheettomasti toimivat irtikytkentä tilanteet voidaan eliminoida alijännite- ja/tai nollajännitelukituksella.

4.2.1 Nollajännitelukitus

Nollajännitelukituksessa puhutaan ns. U_0 -salvasta, jonka avulla saadaan releiden tietoon, onko kyseessä todellinen alitaajuushäiriö. Tämän salvan kautta taajuustieto otetaan releille 110 kV nollajännitteestä U_0 . U_0 -jännitettä mitataan 110 kV kennoterminalissa. Jos nollajännite U_0 poikkeaa nollavoltin tasosta (maasulku vian seurauksena), niin tämä tapahtuma havaitaan. Tämän jälkeen tieto havahtumisesta viedään binaaritietona 20 kV kennoterminaliin inputtiin (releen sisäänmeno) (Virtanen 2021).

Binaaritieto voi olla muotoa 0 tai 1. Binaaritiedon ollessa muotoa 0 on mitattavana suureena käytetty jännite 0 volttia. Jos binaaritieto on muotoa 1, on jännitetaso nollassa poikkeava arvo. Binaarimuodossa tieto liikkuu tasajännitteenä (DC). Lopuksi binaaritieto saavuttaa releen, jossa se on jo ohjelmoitu tietyksi arvoksi suojareleellä U_0 -salvaksi, joka estää alitaajuussuojan toimimisen vikatilanteessa, jossa ei ole kyseessä tehonvajauksesta.

Joissakin tapauksissa 110 kV nollajännitettä voidaan vaihtoehtoisesti mitata myös 20 kV kennotermi-
naalilla. Tässä tapauksessa U_0 -jännitteen ylittäessä asetteluarvon, havaitsee suojariele tämän ja es-
tää alitaajuussuojan toimimisen (Virtanen 2021). Asetteluarvo määritetään suojarielelle sopivaksi
toisiopuolen arvoksi esim. 10 V – 60 V DC.

4.2.2 Taajuusportaat

Jotta alitaajuuden häiriötilanteessa (tehonvajausta tilanteessa) pystyttäisiin irtikytkettävän kokonais-
kuormitusvaatimus toteuttaa hallitusti, on kuormat jaettava irtikytkettäviksi eri taajuusportaille. Eri
taajuusportaalle on ennakkoon jaettu tietty määrä verkkoyhtiön kuormasta. Seuraavassa on kuvat-
tuna ja selostettu muutamia yhteistyökumppanin, Kuopion Sähköverkko Oy:n sähköasemilla toteu-
tettuja suojarieleiden taajuusportaiden asetteluja releiden konfiguraatioissa.

Kuvassa 5 on esitetty Kuopion Sähköverkko Oy:n Matkuksen sähköaseman suoja-asettelut ABB:n
releellä REF630. Kuvan yläosan kohdassa "DAFTUF 1, Setting Group 1" nähdään ensimmäisen (1.)
alitaajuusportaan asetteluarvot. Ensimmäinen taajuusporras aktivoidaan asetteluun mukaisesti taa-
juudella 48,80 Hz.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ DAPTUF_1; DAPTUF: 1					
✓ Operation		On			
✓ Reset delay time		0.02	s	0.00	60.00
✓ Setting Group1					
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.10	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00
✓ Setting Group2			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.08	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ DAPTUF_2; DAPTUF: 2					
✓ Operation		On			
✓ Reset delay time		0.02	s	0.00	60.00
✓ Setting Group1					
✓ Start value		48.60	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.10	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00
✓ Setting Group2			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.08	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00

KUVA 5 Matkus SA suoja-asettelut ABB REF630 (Energineering Oy 2021)

Kuvan 5 alaosassa kohdassa "DAPTUF 2, Setting Group 1" nähdään seuraavan (2.) alitaajuusportaon aktivointi taajuus, joka on 48,60 Hz jne.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ DAPTUF_3; DAPTUF: 3					
✓ Operation		On			
✓ Reset delay time		0.02	s	0.00	60.00
✓ Setting Group1					
✓ Start value		48.40	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.10	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00
✓ Setting Group2			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.08	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ DAPTUF_4; DAPTUF: 4					
✓ Operation		On			
✓ Reset delay time		0.02	s	0.00	60.00
✓ Setting Group1					
✓ Start value		48.20	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.10	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00
✓ Setting Group2			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.08	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ DAPTUF_5; DAPTUF: 5					
✓ Operation		On			
✓ Reset delay time		0.02	s	0.00	60.00
✓ Setting Group1					
✓ Start value		48.00	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.10	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00
✓ Setting Group2			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Start value		48.80	Hz	35.00	64.00
✓ Restore start Val		49.90	Hz	35.00	64.00
✓ Operate delay time		0.08	s	0.08	200.00
✓ Restore delay time		0.00	s	0.00	60.00

KUVA 6 Matkus SA suoja-asettelut ABB REF630 (Energeering Oy 2021)

Kuvassa 6 esitetään alitaajuuden viimeisimmät portaat 3, 4, ja 5. Näiden portaiden laukaisutaajuu-
det on ohjelmoitu niin, että 3. portaalla se on 48,40 Hz, 4. portaalla 48,20 Hz ja viimeiselle 5. por-
taalla 48,00 Hz.

Kuvassa 7 nähdään Männistön sähköaseman suojausasetukset, jotka on ohjelmoitu ABB:n relemalliin REX640. Tässä relemallissa konfiguraatio on hieman erilaisempi kuin aikaisemmin esitettyssä mallissa REF630. Kuvan "Start value Freq<"-kohdissa nähdään kerroin, jolla nimellistaajuus on kerrottava, jotta saadaan sen taajuusportaan aktivointitaajuus.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ FRPFRQ1: 1					
✓ f>f<.df/dt(1)					
✓ Operation		on			
✓ Reset delay Tm Freq		0	ms	0	60000
✓ Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>			
✓ Operation mode		Freq<			
✓ Start value Freq>		1.2000	xFn	0.9000	1.2000
✓ Start value Freq<		0.9760	xFn	0.8000	1.1000
✓ Start value df/dt		0.0100	xFn/s	-0.2000	0.2000
✓ Operate Tm Freq		100	ms	80	200000
✓ Operate Tm df/dt		400	ms	120	200000

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ FRPFRQ2: 2					
✓ f>f<.df/dt(2)					
✓ Operation		on			
✓ Reset delay Tm Freq		0	ms	0	60000
✓ Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>			
✓ Operation mode		Freq<			
✓ Start value Freq>		1.2000	xFn	0.9000	1.2000
✓ Start value Freq<		0.9720	xFn	0.8000	1.1000
✓ Start value df/dt		0.0100	xFn/s	-0.2000	0.2000
✓ Operate Tm Freq		100	ms	80	200000
✓ Operate Tm df/dt		400	ms	120	200000

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ FRPFRQ3: 3					
✓ f>f<.df/dt(3)					
✓ Operation		on			
✓ Reset delay Tm Freq		0	ms	0	60000
✓ Setting Group 1		<input checked="" type="checkbox"/>			
✓ Operation mode		Freq<			
✓ Start value Freq>		1.2000	xFn	0.9000	1.2000
✓ Start value Freq<		0.9680	xFn	0.8000	1.1000
✓ Start value df/dt		0.0100	xFn/s	-0.2000	0.2000
✓ Operate Tm Freq		100	ms	80	200000
✓ Operate Tm df/dt		400	ms	120	200000

KUVA 7 Männistön SA suoja-asettelut ABB REX640 (Engineering Oy 2021)

Kuvassa 7 näkyvässä "Unit"-pystysarakkeessa nähdään toimenpiteet, joilla haluttu arvo saadaan aikaan. Tässä kuvassa on siis esitetty alitaajuuden kolme (3) ensimmäistä porrasta omissa ikkunoissaan.

Kuvassa 8 on esitetty Männistön sähköaseman loput taajuusportaiden konfiguroinnit. Siinä 4. portaan aktivointitaajuus saadaan kertomalla "Start value Freq<" kohdan kertoimella 0,9640 nimellistaajuus 50 Hz. Lopputuloksena saadaan 48,20 Hz. Viides (5.) taajuusporras lasketaan samalla tavalla ja tulokseksi saadaan 48,00 Hz. Nämä taajuusarvot eivät siis näy suoraan tässä relemallin konfiguraatiossa, vaan ne on laskettava.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ FRPFRQ4: 4					
✓ f>/f<,df/dt(4)					
✓ Operation		on			
✓ Reset delay Tm Freq		0	ms	0	60000
✓ Setting Group 1			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Operation mode		Freq<			
✓ Start value Freq>		1.2000	xFn	0.9000	1.2000
✓ Start value Freq<		0.9640	xFn	0.8000	1.1000
✓ Start value df/dt		0.0100	xFn/s	-0.2000	0.2000
✓ Operate Tm Freq		100	ms	80	200000
✓ Operate Tm df/dt		400	ms	120	200000

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ FRPFRQ5: 5					
✓ f>/f<,df/dt(5)					
✓ Operation		on			
✓ Reset delay Tm Freq		0	ms	0	60000
✓ Setting Group 1			<input checked="" type="checkbox"/>		
✓ Operation mode		Freq<			
✓ Start value Freq>		1.2000	xFn	0.9000	1.2000
✓ Start value Freq<		0.9600	xFn	0.8000	1.1000
✓ Start value df/dt		0.0100	xFn/s	-0.2000	0.2000
✓ Operate Tm Freq		100	ms	80	200000
✓ Operate Tm df/dt		400	ms	120	200000

KUVA 8 Männistön SA suoja-asettelut ABB REX640 (Engeneering Oy 2021)

Kuvassa 8 esiintyvät muut asetteluarvot määrittävät alitaajuussuojauksen taajuusportaiden 4. ja 5. toiminta-aikoja. Nämä arvot löytyvät kuvan vaakariviltä kohdasta "Operate Tm Freq". Havahtumisaika näiden portaiden aktivoitumiseen on 100 ms. Kokonaistoiminta-aika, joka sisältää katkaisijan ja suojareleen toiminta-ajat, saa asetuksen mukaan olla enintään 150 ms.

4.2.3 Kulutuksen irtikytkentä

Jotta suurhäiriöltä ja sen laajenemiselta muualle sähkövoimajärjestelmään vältyttäisiin tilanteessa, jossa on kyse tehonvajauksesta (taajuus laskee), on automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä suunniteltava ja varustettava kuormien irtikytkennällä. Tilanteessa, jossa ylläpidettävä häiriöreservi ei riitä tuottamaan tarvittavaa tehoa sähköjärjestelmään, saattaa järjestelmä ajautua pisteeseen, jossa taajuus laskee 48,80 Hz:iin. Tällöin alitaajuussuojajärjestelmän on aktivoiduttava automaattisesti.

EU:n sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevan verkkosäännön (NC ER, Network Code for Emergency and Restoration) mukaisesti alitaajuussuojajärjestelmän on kytkettävä automaattisesti irti sähköjärjestelmän kuormaa 30 %, kun taajuus on laskenut alle 49 Hz.

	Uusi		
	f (Hz)	Viive(s)	%
Porras		Nopea	kuormasta
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

KUVA 9 Kulutuksen irtikytkentäjärjestyksen asettelut (Fingrid Oyj 2019)

Kuvassa 9 nähdään, kuinka irtikytkentäjärjestyksen asettelut on toteutettu Suomessa. Tätä porrastusta voidaan käyttää sellaisissa kohteissa, joissa kyseinen malli on järkevä toteuttaa esim. verkko-yhtiöiden jakeluverkoissa. Tässä mallissa kulutuksen irtikytkentä tapahtuu hallitusti ja pienissä erissä. Saattaa tapahtua niinkin, että tehonvajaustilanteessa tilanne muuttuu esim. taajuuden ollessa 48,60 Hz siten, että tuotantoa saadaan lisättyä sen verran, että taajuus alkaa nousemaan tästä. Näin ollen seuraavien taajuusportaiden 3, 4 ja 5 kulutukset jätetään irrottamatta verkosta.

Asettelut on suunniteltu käsittämään tällaisia tilanteita, joten tämä hyödyttää etenkin niitä kuluttajia, jotka ovat irtikytkettävien piirissä loppuilla taajuusportailla.

Kuvasta 9 todetaan vielä se, että taajuusportaiden toiminta-aika on hyvin nopea, 150 ms. Kokonaiskuormituksesta irtikytkettävä osuus 30 % on jaettu siten, että 1. portaalille on kytketty vähiten kriittisin kulutus. Tätä kulutusta kytketään irti yhteensä 5 %. Siitä eteenpäin kulutusta on jaettu niin, että viimeisen portaan aktivoituessa kumulatiivinen kuorman osuus kokonaiskuormituksesta on 30 %. Joka hetki alitaajuussuojareleistys valvoo sähköjärjestelmän taajuutta ja toimii kuvan 9 mukaisen taulukon asettelujen mukaisesti.

4.2.4 Irtikytkettävän kulutuksen valinta

Alitaajuussuojajärjestelmän tulee kattaa 30 % kokonaiskuormituksesta. Tämä 30 % käsittää koko Suomen kulutuksen valtakunnan tasolta katsottuna kuin myös yksittäisen verkkoyhtiön kulutuksen. Kun jokainen verkkoyhtiö ja teollisuusasiakas toteuttaa alitaajuussuojauksen omalle 30 %:n kulutuksen osuudelleen niin saadaan koko Suomeen kattava, ja sitä myöten asetuksen mukainen alitaajuussuojaus, joka sisältää 30 % irtikytkettävää kuormaa. Sähköjärjestelmän vakaudelle tehonvajaustilanteissa tämä suojaus on ehdoton, jotta estetään koko sähkövoimajärjestelmän romahtaminen.

Tästä 30 % vaateesta voidaan kuitenkin joustaa. Todellinen yhteenlaskettu kuorman osuus voi olla 20 % - 40 % välillä.

Kulutusta kuitenkin pyritään valitsemaan kuvassa 9 näkyvän taulukon mukaisesti. Kun tämä kulutuksen valinta on tehty, tarkistetaan sen jälkeen, mitkä ovat eri portaiden kuormien prosenttiosuudet kokonaiskuormasta käyttäen referenssipisteenä tehon vuosikeskiarvoa sekä tuntikeskitehoja klo 8–9 välillä helmikuun 1. päivänä sekä heinäkuun 1. päivänä. Jos molempien tuntien (helmikuun 1. päivän ja heinäkuun 1. päivän tunnint klo 8–9) keskimääräinen teho on 1. taajuusportaalla vähintään 5 % kokonaiskuormasta ja kaikkien portaiden kumulatiivinen kuorma 20–40 % kokonaiskuormasta, niin valinnat ovat sopivat (Fingrid Oyj 2021).

Valinnat eivät sen sijaan ole oikein mitoitettuja, jos 1. taajuusportaan kuorma on alle 5 % kokonaiskuormasta tai kaikkien taajuusportaiden kuormien kumulatiivinen osuus kokonaiskuormasta on alle 20 %. Lisäksi sellainen kulutuksen valinta ei ole mahdollinen tilanteissa, jossa taajuusportaiden summakuormitus ylittää 40 % kokonaiskuormasta. Näin ollen valinnat tulee tehdä uudestaan niin, että aikaisemmin mainitut ehdot täyttyvät (Fingrid Oyj 2021).

Irtikytkettävän kulutuksen valinnoissa kannattaa pyrkiä siihen, että 1. taajuusportaille valitaan vähiten kriittisin kulutus. Siitä eteenpäin tapahtuville kulutusten valinnoille eri taajuusportaille käytetään varmasti aina yhtiö kohtaista harkintaa, mutta yleisesti kulutusta valitaan seuraaville portaille kriittisyyden mukaan. Kriittinen kulutus ymmärretään sellaisena kulutuksena, joka tarkoittaa kouluja, sairaaloita, julkisia instituutioita ja muita sellaisia kohteita, joissa sähkösaannin keskeytyksestä aiheutuisi mittavaa vahinkoa, joko aineellista, rahallista tai henkilövahinkoa.

Yhtiökohtaisesti saattaa olla haastavaa löytää ja valita vaadittavia kulutuksia eri taajuusportaille. Maailmassa ei kuitenkaan mikään tekninen järjestelmä toimi täysin 100 % varmuudella, joten tietyn prosentin riskillä täytyy valintoja kuitenkin tehdä.

4.2.5 Muut ohjeet ja suositukset

Fingrid Oyj on ohjeistanut automaattisen alitaajuussuojajärjestelmän toteutuksessa verkkoyhtiöitä ja teollisuuden asiakkaita kattavasti ja monipuolisesti sekä antanut vaihtoehtomallit toteutukseen. Ohjeistuksessa Fingrid toteaa, että kunkin verkkoyhtiön olemassa olevan tehonrajoitussuunnitelman kohteita voidaan käyttää myös alitaajuussuojaukseen (Fingrid Oyj 2019). Nykyisessä alitaajuussuojauksen porrastuksessa verkon kokonaiskuormitusta on liitetty vain 10 % suojauksen piiriin kuten kuvasta 10 voidaan todeta.

	Nykyinen				
	f (Hz)		Viive (s)		%
Porras	Nopea	Hidas	Nopea	Hidas	kuormasta
1	48.5	48.7	0.15	20	5
2	48.3	48.5	0.15	20	5

KUVA 10 Nykyinen (vanha) alitaajuusporrastus (Fingrid Oyj 2019)

Nykyisestä mallista voidaan kuitenkin käyttää kolmannes uuteen vaadittuun tasoon, joka tulee olla 30 % kokonaiskuormituksesta. Uutta irtikytkettävää kuormitusta pitää siis valikoida 20 %. Tässäkin kohtaa ohjeistusta todetaan, että vähiten kriittistä kuormaa valitaan 1. taajuusportaille jatkuen 5. portaaseen niin, että irtikytkettävän kuorman kriittisyyttä arvioidaan jokaisella portaalla erikseen.

Alitaajuussuojajärjestelmän toteutuksesta aiheutuneista kustannuksista vastaa suojauksen toteutava taho (Fingrid Oyj 2019). Jos suojaus toteutetaan kantaverkon asemilla (eräs toteutustavan mahdollistama tapa) niin silloin kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa kustannuksista. Muulloin, kun suojaus toteutetaan verkkoyhtiön jakeluverkossa tai teollisuusasiakkaan omassa verkossa, niin kustannuksista vastaa jakeluverkonhaltija tai teollisuusasiakas itse.

Huolellisella suunnittelulla pyritään estämään aiheettomat virhelaukaisut sähköverkossa. Ohimenevissä vika- tai poikkeustilanteissa, joissa ei ole kyse alitaajuuden aiheuttamasta tehonvajauksesta, on alitaajuussuojauksen toimittava niin, ettei se pääse aktivoitumaan. Tällaiset vika- tai poikkeustapaukset voivat olla jälleenkytkentöjen jännitteettömät väliaikatilanteet, kytkentätilanteet sekä maasulku- ja oikosulkutilanteiden aiheuttamat jännitekuopat sähköverkossa.

Alitaajuussuojaus suunnitellaan niin, että se havaitsee todelliset tehonvajaustilanteet. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää alijännitelukitusta, joka määritellään seuraavalla kaavalla 1:

$$U_{<} = 0,4 - 0,6 * U_n \quad (1)$$

Tehdään esimerkkisijoitus 110 kV jännitetasossa lukuarvoilla kaavaan 1:

$$U_{<} = 0,6 * 110 \text{ kV} = 66 \text{ kV}$$

Todetaan alijännitelukituksen aktivoituvan jännitteen ollessa 66 kV. Tällä asetteluarvolla estetään alitaajuussuojan toimiminen. Jännitteen ollessa näin alhainen on kyseessä todellinen vika- tai poikkeustilanne, jonka suojauksen hoitaa muu suojausalueen toiminto kuten maasulun suojaustoiminto eikä näin ollen alitaajuussuojauksen irtikytkettävät taajuusportaat aktivoitu eri kj-johtolähdöillä. Taajuuden mittaukseen nopeat jännitevaihtelut synnyttävät virhettä, joten tämä tulee eliminoida alijännitelukituksella.

Alitaajuussuojan aiheettomaan aktivoitumisen estämiseksi voidaan käyttää lisäksi nollajännitelukitusta. Taajuus voi laskea tilanteissa, joissa eroon kytketyllä alueella sijaitsevat hajautetut tuotantolaitokset pitävät yllä jännitettä jälleenkytkentöjen jännitteettömällä väliajalla. Tällöin tilanteen ollessa maasulkuvika-tilanne, nollajännite alkaa nousemaan. Tämä aiheuttaa taajuuden laskua sähköverkossa, jolloin aiheeton vikalaukaisu voidaan estää kyseisellä nollajännitelukituksella.

Jos tehonvajaustilanne pääsee syntymään sähköverkkoon ja automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmä aktivoitumaan, niin verkon palautuskytkennät (oli kyseessä verkkoyhtiö tai teollisuuden asiakas) saa tehdä manuaalisesti vasta Fingridin kantaverkkokeskuksen luvalla. Aikaisempi laaja tehonvajaustilanne pääsi syntymään 1970-luvulla.

Tehonvajaustilanne on täten harvinainen, mutta mahdollinen. Tätä vasten on laadittava ja suunniteltava mahdollisimman käyttövarma sähköjärjestelmä, joka häiriötilanteissakin pystyy rajaamaan häiriön koskemaan mahdollisimman pientä osaa sähkökäyttäjiä.

4.3 Käyttöönotto

Automaattisen alitaajuussuojausjärjestelmän käyttöönotto tulee suunnitella huolellisesti. Ensimmäisiä mietittäviä asioita on pyrkiä estämään käyttöönottovaiheen koestustilanteessa mahdolliset tapahtuvat virhelaukaisut. Näiden tapahtumien eliminoimiseen on hyvä ja tarpeellinen tehdä käyttöönotto-suunnitelma, jossa yhtenä alueena on koestustapahtumat ja näiden tapahtumien suoritusjärjestys. Näin ollen kaikki koestustilanteessa olevat henkilöt ovat joka hetki ajan tasalla tapahtumien kulusta, mikä edesauttaa työn turvallista tekemistä sekä estää vahinkojen syntymistä.

Fingrid Oyj ohjeistaa verkkoyhtiöitä ja teollisuuden asiakkaitaan seuraavasti (Fingrid Oyj, Käytön verkkosäännöt ja päivitetty palveluehdot sekä tekniset ehdot 2019, s 48):

-testien toistoväli määritellään kansallisesti

-kunkin alitaajuussuojan koestamiseen on sisällettävä ainakin seuraavat testit:

1. millä taajuudella (tai taajuuksilla) suoja toimii, kun taajuus muuttuu hitaasti (enintään $0,1 \frac{Hz}{s}$)
2. mikä on suojauksen toiminta-aika, pois lukien katkaisijan toimintaviive, kun taajuus alenee nopeasti (linearisesti $10 \frac{Hz}{s}$ tai askelmaisesti)
3. mikäli käytetään alijännitelukitusta, on toistettava em. testit ja todennettava, että alitaajuussuoja ei toimi jännitteen ollessa alle lukitusrajan

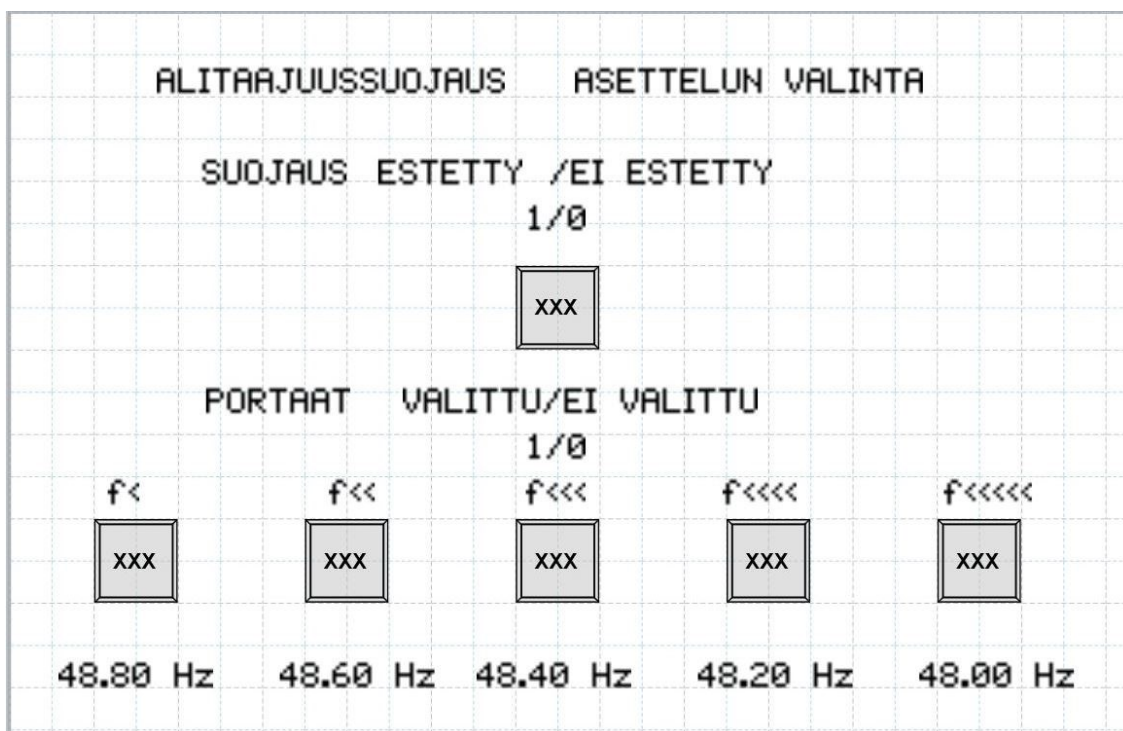
- jakeluverkkoyhtiöiden ja muiden alitaajuussuojaan osallistuvien tulee toimittaa Fingridille suojauksen koestuspöytäkirjat, joissa on kerrottu em. mittaustulokset kaikille taajuusportaille, jotka kulutuskohteessa on käytössä

Nämä ohjeet antavat selvät toimintatavat, joilla koestaa suoja releet alitaajuuden osalta. Koestusten toistoväliin ei kuitenkaan ole otettu sen tarkemmin kantaa, mutta yleinen suoja releiden koestusaikaväli on 3 vuotta. Tällä koestusaikavälillä koestettavat suoja releen suojausominaisuudet käsittävät mm maasulun ja ylivirran koestukset. Ehkäpä alitaajuuden koestuskin voitaisiin tehdä kolmen (3) vuoden välein.

Alitaajuutta koestettaessa taajuus on yksi tärkeimmistä suureista, joka täytyy saada mitatuksi tarkasti ja nopeasti. Ohjeistus antaa selyyden siihen, miten tämä tulee toteuttaa. Koestuksessa täytyy saada selville taajuus tai taajuudet, joilla suoja toimii taajuuden muuttuessa hitaasti. Myös suojaus toiminta-aika tulee mitata, kuitenkin vain toisiossa, kun taajuus laskee nopeasti.

Alitaajuussuojan toimimattomuus on todettava alijännitelukitusta käyttäessä. Lopuksi ohjeistus antaa toimintaohjeet dokumentointiin.

Jotta käyttöönotto olisi mahdollista, on alitaajuudesta luotava ja kehitettävä visuaalinen käyttöliittymä, josta suojausta voidaan operoida. Kuvassa 11 on esitetty yksi tällainen malli, jota voidaan käyttää käyttöönotossa.



KUVA 11 Releen ABB REF630 mimiikka (Engineering Oy 2021)

Kuten kuvasta 11 huomataan, voidaan suojaus kytkeä estetyksi tai ei estetyksi. Tätä toimintoa käytetään yleensä silloin, kun johtolähdöllä tehdään jotain sellaista työtä, joka voisi aiheuttomasti aiheuttaa alitaajuussuojauksen toimimisen.

Toinen syy voi olla sellainen tilanne, jossa kyseistä johtolähtöä ei haluta irtikytkettäväksi alitaajuuden vallitessa. Tämä perustuu siihen, että johtolähdöllä olevasta kulutuksesta on kriittisyystarkastelussa tullut tärkeä kohde, josta ei saa katkaista sähköjakelua.

Kyseistä toimintoa voidaan käyttää myös sellaisessa tilanteessa, jossa ko. johtolähtöä koestetaan toisiokoestuksena. Siinä mitataan ja todetaan pelkästään releen toiminta-ajat ja halutut reagoinnit.

Käyttöönnotossa voidaan myös valita, mitä taajuusportaita käytetään. Tämä valinta on helppo tehdä käytönvalvontajärjestelmästä SCADA:sta tai suoraan releen mimiikalta eli releen näytöltä olevalta käyttöliittymältä. Kuvan 11 mimiikka on ohjelmoitu ABB:n releelle REF630, joka on melko yleinen suojarеле verkko-yhtiöiden sähköasemien kj-johtolähtöjen suojausissa.

Taajuusportaat voidaan nähdä selvästi kuvasta 11. Ne on merkitty "f<" symbolein. Taajuuden arvot on merkitty kyseisen taajuusportaan alle. Yksinkertainen käyttöliittymä antaa käyttäjälleen varmuuden toimia halutulla tavalla taajuusportaiden valinnassa sekä suojaus "päälle-pois" ohjauksessa.

Toinen ABB:n relemalli, jossa alitaajuussuojausta käytetään, on REX640. Tämän relemallin visuaalinen käyttöliittymä eroaa jonkin verran aikaisemmin esitellystä releestä REF630. Kuvasta 12 voidaan nämä eroavaisuudet todeta, kun verrataan sitä kuvan 11 kesken.

ALITAAJUUSSUOJAUS PORTAIDEN VALINTA					
	K01	K02	K03	K04	K05
f<48,80 Hz	1. PORRAS	1. PORRAS	1. PORRAS	1. PORRAS	1. PORRAS
f<48,60 Hz	2. PORRAS	2. PORRAS	2. PORRAS	2. PORRAS	2. PORRAS
f<48,40 Hz	3. PORRAS	3. PORRAS	3. PORRAS	3. PORRAS	3. PORRAS
f<48,20 Hz	4. PORRAS	4. PORRAS	4. PORRAS	4. PORRAS	4. PORRAS
f<48,00 Hz	5. PORRAS	5. PORRAS	5. PORRAS	5. PORRAS	5. PORRAS
SUOJAUS ESTETTY	ESTO	ESTO	ESTO	ESTO	ESTO

KUVA 12 Releen ABB REX640 mimiikka (Engineering Oy 2021)

Kuvassa 12 on esitetty viisi (5) eri johtolähtöä K01, K02 jne. Johtolähdön alapuolelle on järjestetty allekkain käytettävät taajuusportaat. Tässä visualisoinnissa taajuusportaat on nimetty taajuuden mukaan esim. 48,80 Hz eikä erityisiä symboleja ole käytetty.

Alimmaisella rivillä nähdään toiminto suojausten estolle. Tästä ohjataan kunkin johtolähdön alitaajuussuojausta.

4.3.1 Käyttöönoton toteutusvaihtoehdot

Alitaajuussuojausjärjestelmän käyttöönotto voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla. Ne ovat seuraavat:

- keskitetyllä johtojärjestelmällä
- käytössä olevien releiden päivityksillä
- uusilla releillä

Kuopion Sähköverkko Oy:lle automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmän käyttöönotto toteutettiin käyttäen kaikkia em. tapoja. Näiden tapojen yhdistämisellä saatiin yhtiölle joustava kokonaisuus, joka huomioi yhtiön nykyisen suojaruleistyksen.

4.3.2 Keskitetty johtojärjestelmä

Keskitetyssä johtojärjestelmässä alitaajuussuojaus toteutetaan niin, että kj-kojeistossa olevia kj-lähtöjä ohjataan yhteisestä laitekaapista. Laitekaappi sisältää yleensä yhden suojarleen, REX640.

Tämä rele on sijoitettu laitekaappi OT2:n etuoveen (kuva 13). Kuvassa 13 näkyvässä laitekaapissa suojarleitä (REX640) on kaksi kappaletta, sillä kumpikin niistä suojaa omalta osaltaan 10 kV ja 20 kV kj-lähtöjä. Tällainen laitekaappi sijoitetaan sähköaseman sisätiloihin. Kuopion Sähköverkolla tämä laitekaappi on sijoitettu Männistön sähköasemalle. Sisätiloista valitaan parhaiten soveltuva paikka kaapille. Parhaiten soveltuva paikka olisi kj-kojeiston vieressä. Tästä sijainnista asennettävien ja kytkettävien kaapelointien pituuksista tulee tällöin lyhyet ja näin ollen vaikuttavat kustannuksiin alentavasti.

Kuopion Sähköverkolla keskitettyä johtojärjestelmää käytettiin lisäksi Leväsen sähköasemalla. Siellä alitaajuussuojauksesta vastaa yksi suojarle (REX640), joka on sijoitettu 20 kV kojeiston mittauskenttään.

Laitekaappi voidaan myös sijoittaa samaan tilaan 110 kV suojarlekaappien kanssa, jos tilaa on tarpeeksi. Tämä tila sijaitsee yleensä pidemmän matkan (n. 10 m - 50 m) päässä itse kj-kojeistosta, jolloin kaapelointi matkat pitenevät aiheuttaen kustannuksia verrattuna kj-kojeiston viereiseen sijaintiin.

Ohjauskaapeloinnit asennetaan tästä laitekaapista kj-lähtöjen releille. Tämän laitekaapin kaksi relettä ohjaavat siten kj-lähtöjen katkaisijoita saaden taajuustiedon 110 kV tai 20 kV kennoterminaalista. Mitatun taajuustiedon pohjalta, kaapin releet tekevät ohjaukset tehonvajaustilanteessa (alitaajuus) automaattisesti ohjaten kj-lähtöjä taajuusportaiden mukaisesti ks. kuvat 11 ja 12.



KUVA 13 Keskitetty johtojärjestelmä (Energineering Oy)

Käytetty suojarele on ABB REX640. Kuvasta 13 voidaan havaita tämä rele (2 kpl jänniteportaille 10 kV ja 20 kV).

Kuvassa 14 on laitekaappi kuvattu sen sisäpuolelta, josta jokaiselle kj-lähdöille johdotetaan omat suojauskaapeloinnit.



KUVA 14 Keskitetyn johtojärjestelmän laitekaappi (Energineering Oy)

Kaappi tarvitsee toimiakseen käyttöjännitteen 230 V AC. Se otetaan sähköaseman omakäyttökeskuksesta. Ohjaus- ja tilatietoviestit kulkevat tasajännitteellä (binaaritietona) laitekaapin ja kj-lähtöjen välillä.

Yhtiössä REX640-mallin reletyyppi valikoitui keskitetyn johtojärjestelmän alitaajuussuojaksi, koska siinä on laajalti käytössä I/O rajapintaa. Kuvasta 15 nähdään I/O (input/output) mustat korttilähdöt tunnisteilla X1 ja X2 releen vasemmalla puolella. Nämä I/O rajapinnat mahdollistavat sen, että yhdellä (1) REF640-suojareleellä voidaan suojata jopa 20 kj-lähtöä (ABB Oy Protection and control REX640 2021). Ohjaustieto vietään releen tietystä I/O korttipaikasta tietyn kj-lähdön katkaisijan laukaisuliittimille.



KUVA 15 REX640 suojarele sekä HMI-näyttöpäätte (ABB 2021)

Lisäksi REX640-suojarelessä on monia taajuuslohkoja, joilla alitaajuussuojaus voidaan toteuttaa. Yhtiön aikaisemmissa suojareleissä (SPACOM) taajuuslohkoja on vain yksi (1) kpl. Näin ollen jokaisen kj-lähdön releet olisi pitänyt uusida. Tätä ratkaisua ei nähty järkeväksi vielä tässä vaiheessa toteuttaa.

4.3.3 Suojareleiden päivitys

Toinen tapa, jolla alitaajuussuojaus toteutettiin Kuopion Sähköverkko Oy:lle, oli päivittää nykyiset suojareleet, joihin se oli mahdollista tehdä. Päivitettävät releet olivat kuvan 16 kaltaiset ABB REF630 suojareleet. Näihin päivitykset toteutettiin ohjelmoimalla laitteen konfiguraatioon asetukset alitaajuussuojauksesta.



KUVA 16 ABB REF630 suojarele

Taajuustiedon rele saa 20 kV kiskostosta U_0 -salvan kautta. Tämä täytyy johdottaa fyysisesti releelle kj-kennossa olevien riviliittimien kautta. Muuten kaikki taajuusportaat ja niiden aktivointitaajuudet pystytään ohjelmoimaan releen konfiguraatioon.

4.3.4 Uudet suojarileet

Kolmantena toteutustyylinä oli vaihtaa kj-lähtöjen suojarileet kokonaan uusiin. Tämä toimenpide tehtiin Vahtivuoren sähköaseman toisosaneerauksen yhteydessä. Suojarileiksi valikoitu Siemensin releet mallia SIPROTEC 7SJ82. Näissä releissä oli jo vakiona alitaajuussuojauksen parametointi.

Kuopion Sähköverkko Oy:ssä otettiin käyttöön suunnitelma, jossa suojarileiden alitaajuussuojaus jätetään hälyttäväksi vuoden 2022 loppuun, eli varsinainen laukaiseva toiminto jätettiin vielä releiltä toistaiseksi pois päältä. Tämä mahdollistaa sen, että yhtiölle jää aikaa vuoden verran saada käyttökokemusta alitaajuussuojauksen toimimisesta omassa jakeluverkossaan niin, ettei kulutuksen irtikyt-keminen ole kuitenkaan mahdollista. Vuoden 2023 alusta uusi alitaajuussuojaus tulee olla kaikilla Suomen merkittävillä tehonkäyttäjillä toiminnassa.

Yhtiön kahdelle sähköasemalle (Levänen ja Männistö) toteutetaan alitaajuussuojauksen keskitetty johtojärjestelmä. Nämä keskitetyt ratkaisut jätetään hoitamaan tehtävänsä vain määrääjäksi (n. 5 vuotta) siihen saakka, kunnes kyseisten sähköasemien saneeraukset tulevat ajankohtaisiksi. Tämän jälkeen sähköasemille alitaajuussuojaus toteutetaan jokaisen kj-lähtöjen omilla suojarileillä. Keskitetty johtojärjestelmä voidaan siis valita yhtiökohtaisesti palvelemaan joko väliaikaisesti myöhempiä tarpeita ajatellen tai sitten pitkäaikaisesti.

4.4 Suojauslaitteisto

Suojauslaitteistona Kuopion Sähköverkko Oy käyttää alitaajuussuojaukseen yhdellä sähköasemistaan mm. Siemensin suojarileitä. Kuvasta 17 voidaan nähdä kyseinen rele eräällä 10 kV johtolähdöllä.

Sähköasemien suojarileiden tavoitteena on suojata sähköasemien laitteita, keskijännitejakelujohtoja sekä minimoida vikatilanteissa sattuvien vahinkojen määrää ja laajuutta asiakkaille. Suojarileitä tarvitaan täten jokapäiväisessä sähköjakelussa.

Suojauslaitteistoihin kannattaa investoida tarpeeksi ja mahdollisimman pitkälle käyttöajalle, jotta niistä saadaan kannattavia ja pitkäikäisiä. Sähköasemien toisiopuolen eli suojarileistyksen uusinnat ja saneeraukset ovat yleensä kalliita operaatioita.

Suojarileet on teknisesti suunniteltu kestävänsä n. 20 vuotta. Niillä on siis pitkä elinkaari, jonka aikana niitä täytyy kuitenkin huoltaa. Suojarile, jossa on yhdistetty monia suojaustoimintoja yhteen, koestetaan yleensä kolmen (3) vuoden välein. Näissä koestuksissa todennetaan, että releet toimivat niin kuin niiden on suunniteltu toimivan.

Releiden koestuksissa koestetaan niiden suojausominaisuudet. Ne ovat ylivirrasta ja maasulkuvirrasta havahtuminen ja aktivoituminen tietyissä ajoissa, nollajännitteen havaitseminen ja aktivoituminen ja nyt uutena koestettavana asiana tulee alitaajuuden koestaminen. Alitaajuuden koestuksessa todennetaan mm. taajuudet, joilla suoja toimii taajuuden muuttuessa hitaasti.



KUVA 17 Siemensin suojarle SIPROTEC 7SJ82 eräällä kj-lähdöllä (Kuopion Sähköverkko Oy 2021)

Kuvassa 18 on esitetty Siemensin monitoimisuojarle mallia Siprotec 7SJ82. Tähän malliin on sisällytetty seuraavan suojausominaisuudet:

- ylivirran ja nollavirran (ts. maasulkuvirran) havahtumiset ja laukaisut
- alitaajuudesta laukaisu
- SF6-kaasuhälytykset

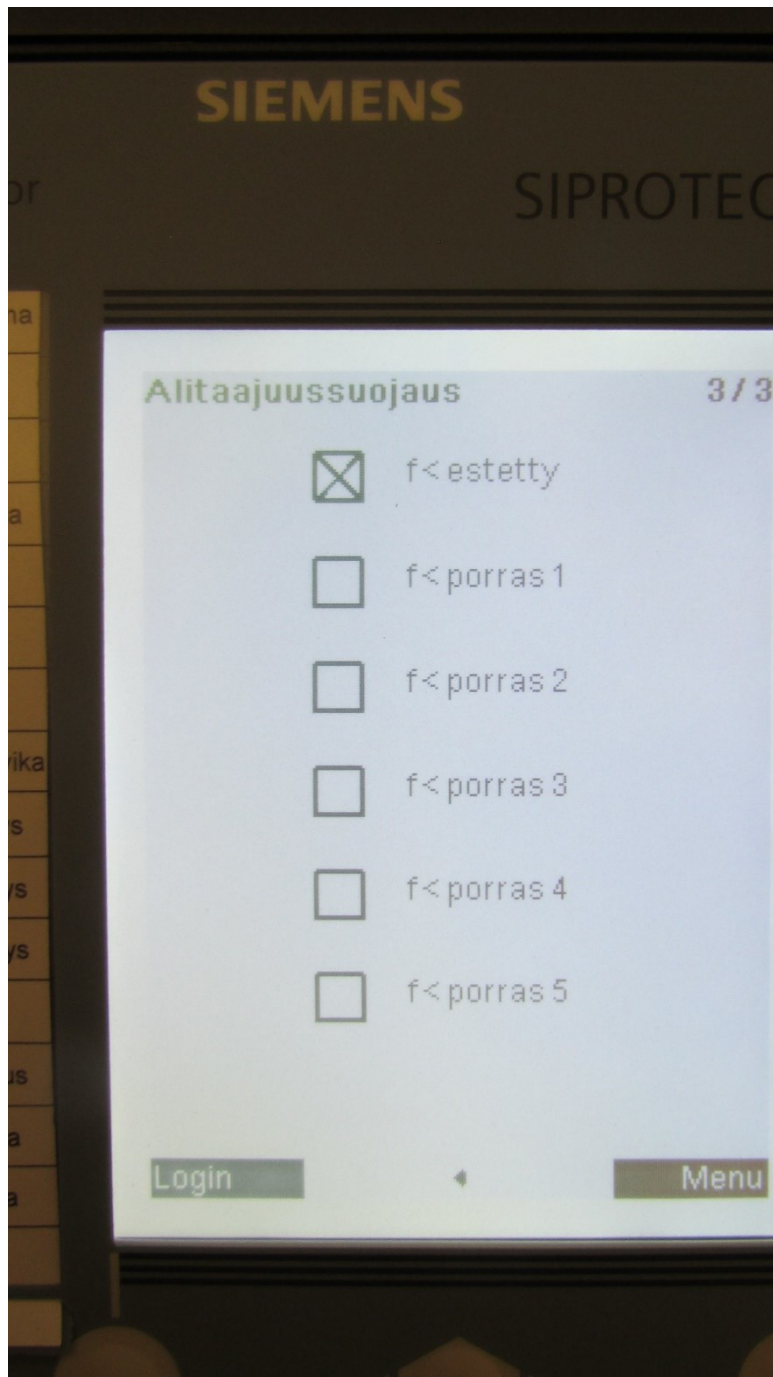
Lisäksi releeltä löytyy paikallisoijaustapa, sisäisen vian, mittapiirivian sekä väylävian indikoinnit. Yhteen releeseen on siis mahdutettu paljon suojausominaisuuksia, jotka palvelevat yhdessä kompaktissa laitteessa kj-johtolähtöä.



KUVA 18 Siemens SIPROTEC 7SJ82 suojarile (Kuopion Sähköverkko Oy 2021)

Kuten kuvasta 18 voidaan todeta, on releen alapuolelle sijoitettu johtolähdölle tarpeellisten toiminnallisuuksien mahdollistavat suojat. Nämä johdonsuojakatkaisijat suojaavat mm. erottimien moottoreita, jotka ohjaavat erottimen kytkentäelementtejä kiinni- ja aukiasentoihin. Lisäksi näiltä suojilta lähtee ohjaus- sekä apujännitteitä, joita tarvitaan johtolähdön haluttuun toimintaan.

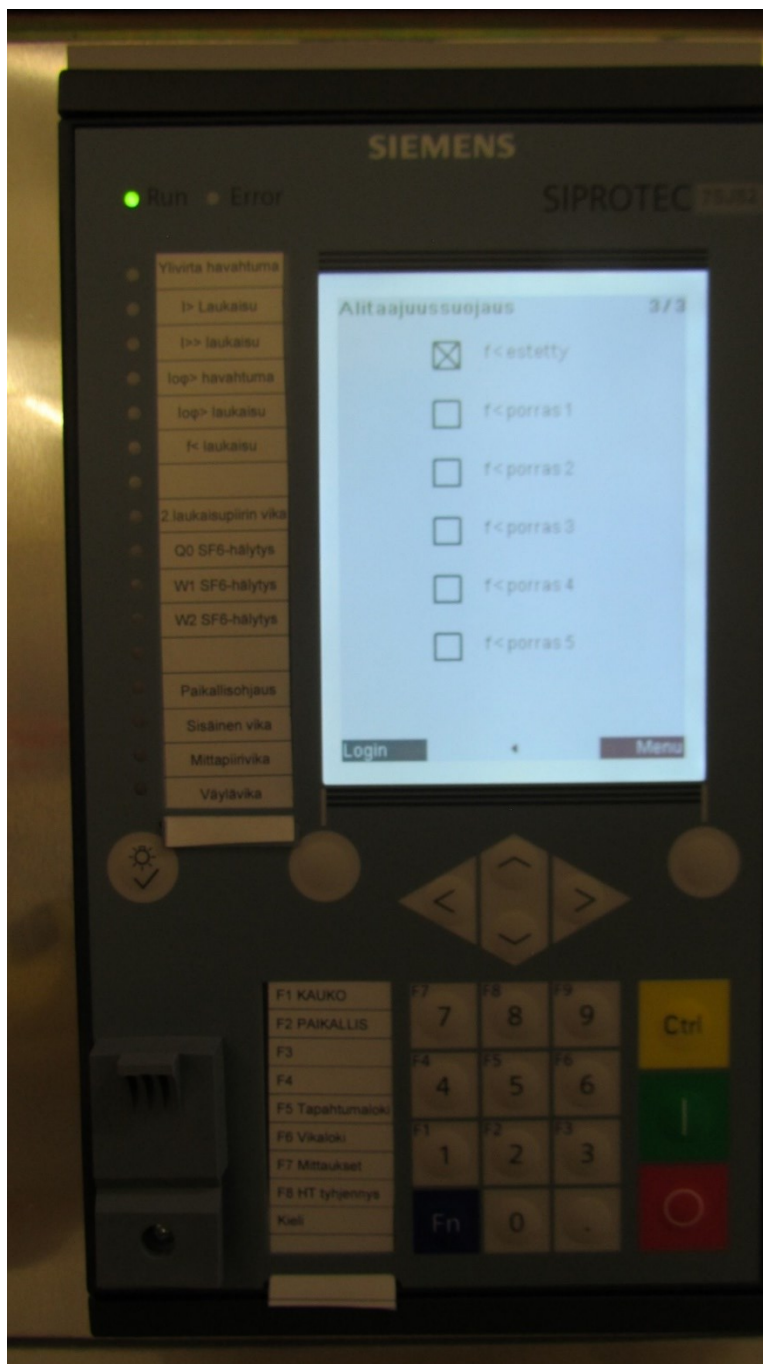
Kuvassa 19 on kuvattu alitaajuussuojauksen valikkonäkymä. Siemensin sovelluksessa, alitaajuussuojauksen esto on ylimmäisenä valikossa sekä alitaajuusportaatt on nimetty sen alle nimillä porras 1, porras 2 jne.



KUVA 19 Suojareleen mimiikka taajuusportaista (Kuopion Sähköverkko Oy 2021)

Käyttöliittymä tällä releellä, alitaajuussuojauksen osalta, näyttää selkeältä ja loogiselta. Tällaista liittymää käyttäjän on helppo käyttää.

Kuvassa 20 on vielä esitetty Siemensin samainen relemalli kuin mitä aikaisemmin esiteltiin. Toimintojen kuvaavat suomenkieliset tekstit ovat hyvä asia tämän suojarleen käyttämiselle.



KUVA 20 Releen mimiikka taajuusportaista (Kuopion Sähköverkko Oy 2021)

Myös painikkeiden väritykset tuovat käyttäjälle mielikuvaa painikkeiden merkityksestä. Esimerkiksi kj-johtolähdön erottimen paikallisojauksessa käytetään AUKI- ja KIINNI-painikkeita, jotka ovat värityksiltään vihreä (KIINNI) ja punainen (AUKI).

4.5 Pohdintaa alitaajuussuojauksen merkityksestä

Automaattista alitaajuussuojausjärjestelmää tarvitaan sähkövoimajärjestelmän suojaukseen. Se on yksi tärkeimmistä "takalautoista", joka varmistaa sen, ettei sähköjärjestelmä pääse ajautumaan romahtamispisteeseen.

Tässä romahtamispisteessä sähkön saanti keskeytyy suuresta osasta yhteiskuntaa. Tämä aiheuttaa yhteiskuntaan kaaosta, jossa mm. viesti- ja rahaliikenne ei kulje, valot eivät pala, laitteet eivät toimi sekä liikenteeseen aiheutuu vakavia häiriöitä.

Tulevaisuutta ajatellen on syytä pohtia, millä edellytyksin alitaajuussuojaus on rakennettu nykyisten suojausten päälle. Edellytykset tälle on ensinnäkin osaava ja riittävän ammattitaitoinen henkilöstö. Ilman oikeita henkilöitä ei työ valmistu ajallaan ja saattaa pahimmassa tapauksessa jäädä kokonaan toteutumatta.

Toisekseen tekniikan tulee olla käyttövarmaa ja hyvin tarkkaa. Tekniikassa käytetyissä komponenteissa täytyy käyttää laadukkaita raaka-aineita, jotta nykyisin vaatimuksiin ja haasteisiin pystytään vastaamaan.

Lisäksi edellytetään huolellista suunnittelua ja tekemistä nykyisten suojausten päivittämiselle uuden alitaajuussuojauksen vaatimuksiin. Näillä tekijöillä kokonaisuus muodostuu mahdolliseksi toteuttaa käytäntöön.

Jos yhteiskunnassa sattuisi käymään se harvinainen tilanne, jossa se ajautuu tehonvajaukseen, pohdintaa synnyttää se ajatus, miten nykyisiä taajuusportaita voitaisiin hyödyntää siinä tilanteessa. Portaitahan on yhteensä viisi (5) kpl. Näitä pystytään ohjelmallisesti muuttamaan eri kj-lähdöillä toimiviksi. Alitaajuussuojauksen ohjelmallisuus siis antaa mahdollisuuden käyttää portaita aina tilanteen mukaisesti. Tämä luo joustavuutta järjestelmään eikä näin ollen tee järjestelmästä jäykkää kokonaisuutta käyttä.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli saada Kuopion Sähköverkko Oy:lle monipuolinen ja informatiivinen tietopaketti automaattisesta alitaajuussuojausjärjestelmästä. Työ käsitteli alitaajuussuojauksia verkkoyhtiön näkökulmasta. Verkkoyhtiön kannalta oleellista on miettiä, kuinka saada alitaajuussuojauksen toteutettua teknisesti ja taloudellisesti järkevällä tavalla. Teknisiä keinoja suojauksen toteutukseen on keskitetty johtojärjestelmä, nykyisten suojareleiden päivittäminen sekä uudet suojareleet, joissa on taajuuslohko-ominaisuudet. Kuopion Sähköverkolla käytettiin toteutuksessa kaikkia em. tapoja.

Käytännössä alitaajuussuojauksen tekniset laitteet voidaan sijoittaa joko erilliseen laitekaappiin tai kj-kojeiston vapaana olevaan mittauskenttään. Suojareleet valittiin yhdessä yhteistyökumppanin kanssa. Suojareleiden valinnassa määräsivät niiden monipuolinen käytettävyys sekä niiden soveltuvuus juuri Kuopion Sähköverkon sähköasemille. Valinnat ohjautuivat Siemensin ja ABB:n suojareleisiin.

Automaattinen alitaajuussuojausjärjestelmän vaatimus osana sähköjärjestelmän suojausta tulee EU-asetuksen 2017/2196 sekä yhteiskunnan yleisen toimimisen myötä pakolliseksi kaikille niille, jotka ovat suuria tehonkäyttäjiä kuten verkkoyhtiöt ja teollisuuden toimijat. Näiden toimijoiden velvoittaminen alitaajuussuojauksen käyttöönottoon luo osaltaan varmuuden sille, että yhteiskunta pysyy toimintakunnossa vakavassakin häiriötilanteessa.

Alitaajuus syntyy, kun sähkötehon tuotanto alittaa sähkötehon kulutuksen. Pätötehoreservit huolehtivat tehotasapainosta sähköjärjestelmässä. Tehoreservien kaatuessa tulee sähköjärjestelmän vakauden kannalta tärkeä alitaajuuden suojaustoiminto käyttöön varmistaen sähkönsaannin suuremmalle osalle yhteiskuntaa.

Alitaajuussuojauksen suunnittelussa tulee huomioida verkkoyhtiön tai teollisuuden toimijan sen hetkinen suojareleistys. Tämän tiedon pohjalle voidaan suojaus suunnitella tarkemmin, yksityiskohtaisemmin ja kustannukset huomioon ottaen.

Käyttööntovaiheessa tulee ennakkoon suunnitella, miten ja missä järjestyksessä suojaus otetaan käyttöön. Tähän hyvä ja tarpeellinen työkalu on laatia käyttööntosuunnitelma, jossa nämä toimenpiteet kirjataan auki. Käyttööntosuunnitelma on syytä jakaa myös kaikille niille, jotka ovat tekemässä käyttööntovaihetta. Tämä lisää työturvallisuutta sekä minimoi mahdollisuuksia virheellisiin katkaisijoiden laukeamisiin.

Automaattisen alitaajuussuojausjärjestelmän kokonaisuuden hallitsemiseen kannattaa nähdä vaivaa, jotta siitä saadaan kokonaistaloudellisesti järkevä ja tarpeensa täyttävä suojausmekanismi. Tehonvajaus tilanne yhteiskunnassa on erittäin harvinainen, mutta mahdollinen. Tätä vasten on varauduttava kaikin tarpeellisin keinoin ja vältettävä suuremmat haitat yhteiskunnassa.

LÄHTEET

Asetus 2017/2196/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus sähköverkon hätätilaa ja käytön-palautusta koskevasta verkkosäännöstä. Euroopan unionin virallinen lehti 28.11.2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32017R2196>. Viitattu 16.8.2021.

Fingrid Oyj 2019. Ajankohtaispäivä 11.9.2019 Käytön verkkosäännöt ja päivitetty palveluehdot sekä tekniset ehdot. Pdf-tiedosto. Julkaistu 11.9.2019. <https://www.fingrid.fi/haku/?query=alitaajuussuojaus&pageSize=10&page=3&language=fi>. Viitattu 30.8.2021.

Fingrid Oyj 2019. Ajankohtaispäivä 11.9.2019 Käytön verkkosäännöt ja päivitetty palveluehdot sekä tekniset ehdot. Pdf-tiedosto. Julkaistu 11.9.2019. <https://www.fingrid.fi/haku/?query=alitaajuussuojaus&pageSize=10&page=3&language=fi>. Viitattu 17.8.2021.

Fingrid Oyj 2019. Automaattisten ali- ja ylitaajuussuojajärjestelmien toteutus Suomessa. Pdf-tiedosto. Julkaistu 16.1.2019. <https://www.fingrid.fi/haku/?query=alitaajuussuojaus&pageSize=10&page=3&language=fi&tag=4>. Viitattu 18.8.2021.

Fingrid Oyj 2019. automaattisten-ali- ja-ylitaajuussuojajärjestelmien-toteutus-suomessa-2021. Pdf-tiedosto. <https://www.fingrid.fi/haku/?query=alitaajuussuojaus&pageSize=10&page=1&language=fi&tag=4>. Viitattu 19.8.2021.

Fingrid Oyj 2021. Alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa. Pdf-tiedosto. <https://www.fingrid.fi/haku/?query=alitaajuussuojaus&pageSize=10&page=1&language=fi&tag=4>. Viitattu 6.10.2021.

Fingrid Oyj 2021. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Verkkajulkaisu. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>. Viitattu 25.8.2021.

Virtanen, Toni 2021. Sähköinsinööri. Energineering Oy. Kuvia releen mimiikasta alitaajuuden osalta. Yksityinen sähköpostiviesti 6.8.2021. Viestin saaja: Tero Räsänen

Hyvärinen, Simo 2021. Käyttöpäällikkö. Kuopion Sähköverkko Oy. Haastattelu 3.5.2021.

ABB Oy 2021. Protection and control REX640. Pdf-tiedosto. Julkaistu 13.10.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2NGA001148&LanguageCode=en&DocumentPartId=pdf&Action=Launch>. Viitattu 8.11.2021