

Henna Saarinen

ALITAAJUUSSUOJAUKSEN SUUNNITTELU TAMPEREEN SÄHKÖVERKKO OY:SSÄ

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Sami Repo
Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Henna Saarinen : Alitaajuussuojauksen suunnittelu Tampereen Sähköverkko Oy:ssä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Elokuu 2021

Sähköverkon tehotasapainon säilymiseen tarvitaan joka hetki yhtä suuri sähkön tuotanto ja kulutus. Sähköverkon tai voimalaitoksen häiriö voi aiheuttaa sähkön tuotantolaitoksen irtoamisen verkosta, jolloin tehotasapaino voidaan menettää. Tämä voi johtaa taajuusromahdukseen, mikäli reservit eivät riitä korvaamaan puuttuvaa tuotantoa. Viimeisenä keinona taajuusromahduksen estämiseksi on verkon kuormien irtikytkeä.

EU komissio on määritellyt automaattisen alitaajuussuojauksen, jonka tarkoituksena on häiriötilanteessa kytkeä verkosta irti tarvittava määrä kuormaa tehotasapainon palauttamiseksi. Suomen siirtoverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n ja jakeluverkkoyhtiöiden vastuulla on toteuttaa alitaajuussuojaus, jossa irtikytettävän kuorman määrä on yhteensä 30 % Suomen kuormista. Fingrid on määritellyt, että jokaisen jakeluverkkoyhtiön tulee varustaa 30 % jakeluverkon kuormista alitaajuussuojilla.

Työssä suunnitellaan Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkon alitaajuussuojaus, joka noudattaa Fingridin sovellusohjetta. Alitaajuussuojauksen suunnittelua varten työssä tutkitaan Tampereen Sähköverkko Oy:n verkon rakennetta, kuormien jaottelua ja suojareleitä, sekä esitellään ABB:n valmistaman REF630 suojareleen alitaajuussuojan asettelu.

Tutkimuksen tuloksena suunniteltiin Tampereen Sähköverkko Oy:n alitaajuussuojaus erillisiin salassa pidettäviin liitteisiin. Suunnitellun alitaajuussuojauksen voi toteuttaa konfiguroimalla suojauslohkot suojaukseen valittuihin numeerisiin suojareleisiin tai asettelemalla suojareleiden alitaajuussuojaukset toimimaan. Toteutusmenetelmä tulee tarkastella ja raportoida Fingridille vuosittain sekä suojauksessa mukana olevat suojareleet tulee koestaa enintään kuuden vuoden välein.

Avainsanat: Alitaajuussuojaus, kuormien irtikytkeä, tehotasapaino, taajuusromahdus, jakeluverkko

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖVERKON JÄNNITTEEN TAAJUUS	3
2.1 Tehotasapaino	3
2.2 Taajuuden säätö	4
2.3 Taajuusromahdus	6
3. ALITAAJUUSSUOJAUSVAATIMUKSET.....	8
3.1 Euroopan komission verkkosääntö.....	9
3.2 Fingrid Oyj:n sovellusohje kulutuksen irtikytkennän toteutukselle.....	11
3.3 Alitaajuussuojauksen testaus ja raportointi Fingridille.....	13
4. TAMPEREEN SÄHKÖVERKKO OY:N SÄHKÖVERKKO	15
4.1 Tampereen Sähköverkko Oy.....	15
4.2 Tampereen Sähköverkko Oy:n suojareleet	16
4.3 Alitaajuussuojauksen asetteluesimerkki REF630 kennoterminaliin...	18
5. ALITAAJUUSSUOJAUKSEN SUUNNITTELU.....	22
5.1 Kuormien jaottelu	22
5.2 Taajuusportaiden suunnittelu ja tarkistaminen.....	24
6. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET	28
LIITTEET.....	31

1. JOHDANTO

Iso-Britannian sähkösiirtoverkossa tapahtui 9.8.2019 salamaniskun aiheuttama häiriö, jonka seurauksena n. 150 MW sähköön tuotannosta kytkeytyi irti sähköverkosta. Samaan aikaan tapahtui kaksi muuta, yhteensä 980 MW tuotantolaitoksen irtoamista verkosta. Kuorman säilyttyä samana ja tuotannon pienennyttyä verkon taajuus aleni, jolloin lisää generaattoreita kytkeytyi irti taajuusreserveistä huolimatta. Sähköverkossa oli yhteensä 1878 MW tuotantovajetta eikä Iso-Britannian sähköverkon järjestelmävastaavalla National Grid ESO:lla ollut enää tarpeeksi varavoimakapasiteettia saadakseen tehotasapainoa palautettua. Taajuusromahdus käynnisti sähköverkon alitaajuussuojien toiminnan taajuuden laskettua 48,8 Hz:iin, jolloin 5 % kuormasta irtosi alitaajuussuojauksen toiminnasta sähköverkosta. Tämä tarkoitti n. 1,1 miljoonaa asiakasta. Alitaajuussuojien ansiosta sähköverkon tehotasapaino saatiin palautettua ja taajuus stabiloitua entiselleen ennen koko systeemin romahtamista ja suurhäiriötä. Sähköön asiakkaat kokivat häiriön seurauksena noin 15–45 minuutin keskeytyksen sähköön toimituksessa. [1]

Osa irti kytketystä kuormasta oli kriittistä kuormaa kuten Ipswichin sairaala ja Newcastle'n lentoasema. Tämän seurauksena National Grid ESO ehdotti alitaajuussuojien toiminnan suunnittelua niin, että tärkeät infrastruktuurit saadaan pidettyä sähköön jakelun piirissä. [1]

Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon kantaverkkoyhtiöiden muodostama Nordic Analysis Group (NAG) on tehnyt selvityksen *Frequency Based Emergency Disconnection Policy Review for the Nordic Region* [2], jossa on tutkittu alitaajuussuojauksen kehittämistä pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa. Tätä selvitystä hyväksi käyttäen Euroopan komissio on tehnyt asetuksen (EU) 2017/2196 sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevasta verkkosäännöstä [3]. Asetuksessa määritellään järjestelmän varautumissuunnitelman toimenpiteet käyttövarmuuden turvaamiseksi ja suurhäiriöiden estämiseksi. Myös Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid on tehnyt jakeluverkon haltijoille verkkosäännökseen pohjautuvan sovellusohjeen alitaajuussuojauksen toteutuksesta Suomessa [4].

Tässä työssä tutkitaan Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkon alitaajuudesta tapahtuvan kuormien irtikytkenä toteutusta Tampereen Sähköverkko Oy:n nykyisellä 20 kV jakeluverkossa olevalla laitekannalla. Tampereen Sähköverkko Oy käyttää eri valmistajien suojareleitä sähköverkon suojaamiseen häiriöiltä, sen ohjaamiseen sekä val-

vomiseen. Tutkimuksessa käydään läpi Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkon rakenne, sen suojalaitteet, jotka soveltuvat alitaajuussuojauksen, sekä suunnitellaan alitaajuussuojaus Fingridin sovellusohjeen mukaisesti.

Tutkimuksen toisessa luvussa tutkitaan tehotasapaino ja alitaajuus ilmiöiden teoriaa. Seuraavaksi kolmannessa luvussa perehdytään Euroopan komission asetukseen, käsitellään alitaajuussuojausta koskeva laki sekä tutustutaan Fingridin sovellusohjeisiin alitaajuuden toteuttamisesta Suomessa. Neljännessä luvussa käydään läpi Tampereen Sähköverkko Oy:n sähköverkon rakenne ja jakeluverkon suojarieleet sekä lisäksi tutkitaan REF630 kennoterminaalien alitaajuussuojan asettelua. Tutkimuksen tulokset esitellään viidennessä luvussa ja kuudennessa luvussa on tutkimuksen yhteenveto.

2. SÄHKÖVERKON JÄNNITTEEN TAAJUUS

Sähköverkko yhdistää sähkön tuotannon voimalaitoksilta asiakkaalle kulutukseen. Nyky-yhteiskunnassa jakelun keskeytys koetaan kiusallisena ja siitä aiheutuu suuria haittoja eri osapuolille. Asiakkaille sopimuksen mukainen sähköntoimitus keskeytyy, jolloin jakeluverkkoyhtiö voi sähkön puutteellisesta laadusta sekä keskeytyksistä ja niiden kestosta riippuen joutua korvauksiin. [5]

Standardissa SFS-EN 50160 [6] määritellään jännitetasoittain jännitteen eri ominaisuuksien rajat, joiden sisällä kyseisten ominaisuuksien tulee pysyä, jotta sähkö täyttäisi laatuvaatimukset. Standardissa määritellään jakelujännitteen taajuus, suuruus, aaltomuoto ja kolmivaiheisen jännitteen symmetria sekä niiden vaatimukset. [6]

Verkkotaajuus on määritelty SFS-EN 50160 standardissa niin, että Suomessa sen nimellistaajuus on 50 Hz. Yhteiskäyttöverkoissa perustaajuuden keskiarvon täytyy olla 10 sekunnin aikavälin mittauksissa normaaleissa käyttöolosuhteissa $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ eli 49,5–50,5 Hz 99,5 % vuodesta. Tämän lisäksi mitattujen 10 sekuntien taajuuksien keskiarvojen täytyy aina olla vähintään 47 Hz ja enintään 52 Hz, jotta se täyttää standardien laatuvaatimuksen. [6]

2.1 Tehotasapaino

Sähköverkon tehotasapaino edellyttää kuormituksen ja tuotannon tasapainoa siten, että pätötehoa kulutetaan aina yhtä paljon kuin sitä tuotetaan. Sähkön vähittäismyyjät ostavat tuottajilta sähköä loppukäyttäjien kulutuksen arvion mukaan, mutta tarkkaa kulutuksen määrää on vaikea ennustaa etukäteen. Sähkön myyjien täytyy suunnitella ja tasapainottaa tuotanto ja kulutus. [7]

Sähköä voi ostaa eri sopimuksilla eri markkinapaikoilta kuten finanssimarkkinoilta seuraavasta päivästä jopa kymmenen vuoden päähän, vuorokausimarkkinoilta seuraavalle päivälle tai päivänsisäisiltä markkinoilta seuraavalle tunnille. Mikäli markkinatoimijat epäonnistuvat kulutuksen ja tuotannon tasapainotuksessa, Suomen kantaverkon haltija Fingrid huolehtii Suomen tasapainotuksen reservimarkkinoilla. Reservit ovat kulutusta tai tuotantoa, joita voidaan kytkeä verkkoon tai irti kytkeä siitä riippuen tehotasapainon tilasta. [8]

2.2 Taajuuden säätö

Pätötehon tuotannolla säädetään sähköverkon taajuutta. Tahtigeneraattoreiden pyöri-
vien massojen liike-energia muuttuu niin, että pätötehon pienentyessä kuorman suhteen
tahtigeneraattoreiden kulmanopeus pienenee, sillä tehovajaus otetaan tahtigeneraatto-
rin akselista. Tällöin myös taajuus pienenee. Ilmiö on vastakkainen, jos pätöteho kasvaa
ja kuorma pysyy samana. Tällöin tahtigeneraattorin akselin kulmanopeus kasvaa. Tahti-
generaattorin pyörivän akselin liike-energia W_k voidaan esittää muodossa

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2},$$

missä ω on pyörivän akselin massan kulmanopeus ja J on akselin massan hitausmo-
mentti. Kulmanopeus voidaan muuttaa taajuudeksi f yhtälöllä

$$f = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Tahtigeneraattorin akselin mekaaninen taajuus on sama kuin verkkoon syötettävän kol-
mivaiheisen virran sähköinen taajuus, mikäli generaattorin napapariluku on yksi. Napa-
pareja ollessa enemmän, generaattorin akselin taajuus on verkon taajuuden ja napapa-
riluvun osamäärä. Tahtigeneraattorit määrittelevät näin sähköverkon taajuuden ja pyöri-
vien generaattoreiden massa hidastaa taajuuden muutosta. Sähköverkossa on pyöri-
vissä massoissa hitausmomentin muodostamaa inertiaa, joka vastustaa sähköverkon
taajuuden muutosta. Tätä kutsutaan verkon luonnolliseksi säätövoimaksi. Inertian ol-
lessa suuri, pienet kuorman muutokset eivät aiheuta suurta taajuuden muutosta. [5, 9,
10]

Fingridillä on taajuuden hallintaan erilaisia reservituotteita, joita se hankkii ylläpitämiltään
reservimarkkinoilta. Pohjoismaissa reservituotteet voidaan jakaa kahteen ryhmään: taa-
juuden vakautusreserveihin, joihin kuuluu taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taa-
juusohjattu häiriöreservi (FCR-D), sekä taajuuden palautusreserveihin, joihin kuuluu au-
tomaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR) ja säätösähkömarkkinat (mFRR). Näiden
lisäksi nopeaa taajuusreserviä (FFR) käytetään hallitsemaan pienen inertian tilanteita.
[11]

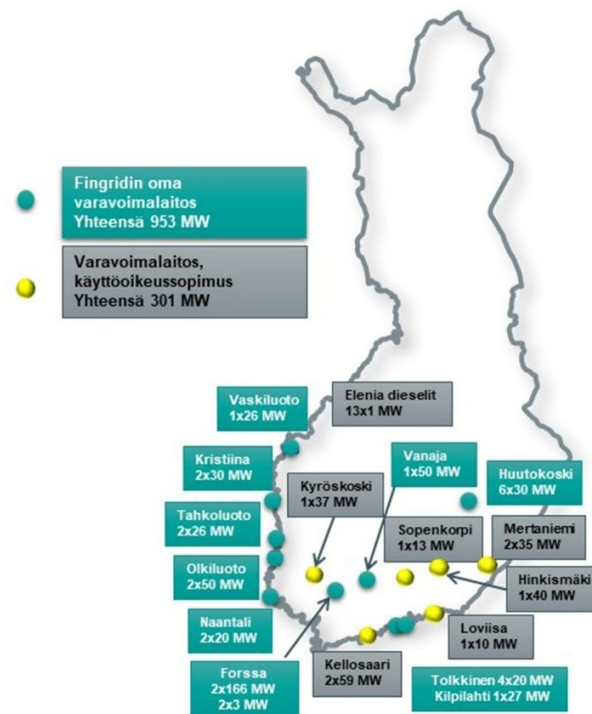
	FFR	FD	FCR-N	aFRR	MERR
	Nopea taajuus-reservi	Taajuusohjattu häiriöreservi, 220–265 MW Pohjoismaissa yht. 1 200 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi, 138 MW Pohjoismaissa yht. 600 MW	Automaattinen taajuudenhallinta-reservi, 70 MW Pohjoismaissa yht. 300 MW	Yhteispohjoismaiset säätösähkömarkkinat
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Parissa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa
					

Kuva 1. Fingridin reservituotteet [12]

Taajuusohjattu käyttöreservi sekä taajuusohjattu häiriöreservi ovat häiriötilanteessa taajuuden hallinnan kannalta merkittävimmät reservit, sillä ne saadaan käyttöön sekunneissa tai parissa minuutissa. Taajuusohjattu käyttöreservi seuraa joka hetki taajuuden muutoksia verkossa ja aktivoituu automaattisesti, kun taajuus poikkeaa normaalista 49,9–50,1 Hz:stä. Sen määrä on mitoitettu niin, että voimajärjestelmä pysyy vakaana, vaikka verkosta irtoaisi suuri tuotantolaitos. Taajuusohjattu häiriöreservi toimii vastavalla tavalla kuin taajuusohjattu käyttöreservi, mutta suuremmissa taajuuspoikkeamissa, joita esiintyy esimerkiksi häiriötilanteissa. Sen on tarkoitus pitää taajuus 49,5 Hz ja 50,5 Hz välissä. Molemmat reservituotteet pystyvät sekä ylös- että alassäätöön tuotantoa ja kuormia lisäämällä tai vähentämällä. [13]

Automaattinen taajuudenhallintareservi käytetään palauttamaan taajuus nimellisarvoonsa sekä vapauttamaan jo käytössä olevia vakautustaajuusreserveitä. Se seuraa koko pohjoismaisen synkroniverkon taajuutta ja aktivoituu taajuuden muutoksesta. Taajuuden palauttamiseksi tarvittava teho lasketaan Statnetin käytönpalautusjärjestelmässä ja lähetetään kantaverkkoyhtiöille reservien aktivointia varten. Kantaverkkoyhtiöt lähettävät signaalin reservitehon tuottaville voimalaitoksille. [14]

Säätösähkömarkkinoilla Fingrid säätää tehotasapainoa manuaalisesti ostamalla tuotantolaitoksilta pätötehoa. Fingridillä on myös nopeana häiriöreservinä toimivia varavoimalaitoksia, joita se voi liittää verkkoon, kun muut tarjoukset säätösähkömarkkinoilla on käytetty. [15]



Kuva 2. Fingridin omat varavoimalaitokset sekä käyttöoikeussopimuksella olevat varavoimalaitokset [16]

Viimeinen keino taajuuden palauttamiseen normaalitasoon on kuormien irtikytkentä. Aikaisemmin Fingridillä on ollut 110 kV siirtoverkossa tehonvajaussuojaus, joka on aseteltu toimimaan kahdessa eri taajuusportaassa joko nopeasti tai hitaasti taajuudesta riippuen. Tehonvajaussuojaus koski alle 10 % koko Suomen kuormasta eikä huomionnut kriittistä kuormaa. Nykyinen alitaajuussuojaus perustuu tähän suojaan, mutta se toteutetaan jakeluverkoissa tai kantaverkkoon liittyneen teollisuuden kuormista ja koskee 30 % koko Suomen kuormista.

2.3 Taajuusromahdus

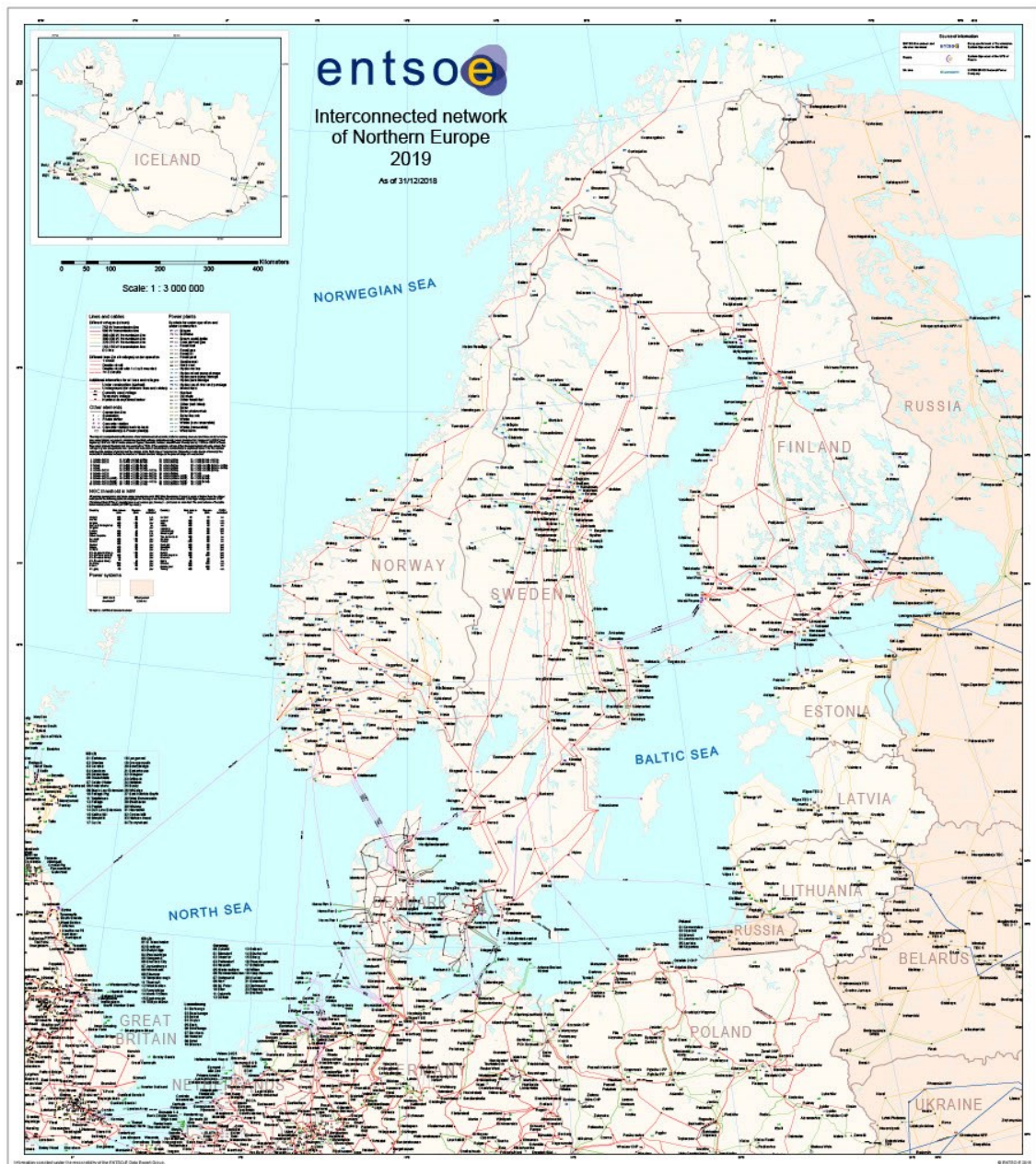
Sähköverkon häiriötilanteessa on hyötyä yhteiskäyttöverkosta taajuusstabiiliuden kannalta. Tällöin tuotantolaitoksen irtoaminen verkosta ei aiheuta taajuuden kannalta suurta muutosta, sillä verkossa on muita generaattoreita, eli pyörivää reserviä tuottamassa tehoa verkkoon. Sähköverkko on saarekekäytössä haavoittuvaisempi, sillä silloin pyörivää reserviä ei ole suhteessa niin paljoa korvaamassa irronnutta laitosta ja taajuuden muutosnopeus on suurempi.

Voimalaitos voi irrota verkosta esimerkiksi verkon vian, generaattorin rikkoutumisen tai generaattorin epästabiiliuden takia. Mikäli voimalaitos irtoaa verkosta eikä reservejä ole tarpeeksi korvaamaan tuotantoa, taajuus laskee. Tällöin myös generaattoreiden akselien taajuus laskee. Turbogeneraattoreiden siivekkeet voivat rikkoutua, kun taajuus laskee

alle 47 Hz:iin, joten ne kytketään pois verkosta ennen sitä. Tällöin pätöteho ja taajuus verkossa pienenee entisestään, jolloin muitakin generaattoreita täytyy rikkoutumisen ehkäisyksi irrottaa verkosta. Mikäli verkossa olevaa kuormaa ei vähennetä ajoissa, taajuuden lasku voi johtaa koko verkon taajuuden romahtamiseen, jolloin verkossa ei ole jännitettä. Tällaisessa tilanteessa verkkoon täytyy syöttää jännitettä uudestaan käynnistämällä voimalaitokset uudestaan. Joissain voimalaitoksissa on pimeäkäynnistysominaisuus eli ne pystyvät käynnistymään kylmään verkkoon ilman ulkopuolista sähkönsyöttöä. Tämä vaatii kuitenkin käynnistämässä saarekekäyttöä, eikä sitä ole koko Suomen mitakaavassa kokeiltu. Suomen kantaverkon kylmäkäynnistykseen voidaan ottaa siemensähkö Ruotsista. [5, 17]

3. ALITAAJUUSSUOJAUSVAATIMUKSET

Fingrid Oyj omistaa Suomen kantaverkon, joka toimii Suomen sähkösiirron runkoverkko. Yhtiö omistaa lähes kaikki 400 ja 220 kV siirtoverkot sekä noin puolet 110 kV siirtoverkoista Suomessa ja tarjoaa sähkösiirtopalveluja sähkömarkkinoiden eri osapuolille. Kantaverkko on liitetty pohjoismaiseen yhteiskäyttöverkkoon, johon kuuluvat Suomen lisäksi Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan sähköjärjestelmät. [5] Kuvassa 3 on pohjoismainen yhteiskäyttöverkon kantaverkko kuvattuna.



Kuva 3. Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko ja yhteydet Manner-Euroopan verkkoon [18].

Tämä pohjoismainen yhteiskäyttöverkko on samaa synkronista aluetta, eli verkon taajuus on kaikkialla sama. Yhteiskäyttöverkko on kytketty useilla tasesähköyhteyksillä Eurooppaan ja Venäjän verkkoihin. Yhteiskäyttöverkot parantavat verkon käyttövarmuutta huomattavasti. [5]

Fingrid toimii Suomessa sijaitsevan kantaverkon järjestelmävastaavana, eli sen tärkeimmät tehtävät ovat huolehtia kantaverkon käytöstä ja ylläpidosta teknisesti tarkoituksenmukaisella tavalla, valtakunnallisesta taseselvityksestä sekä tehotasapainon ylläpidosta ja taajuuden säädöstä [19]. Myös Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan siirtoverkkojen haltijat huolehtivat itse omien alueidensa toiminnan, mutta yhteiskäyttöverkon vuoksi tehotasapainon hallintaa ja verkon käyttöä on täytynyt yhtenäistää.

3.1 Euroopan komission verkkosääntö

Euroopan komission laatima (*Network code on Electricity Emergency and Restoration, COMMISSION REGULATION (EU) 2017/2196*) Sähköjärjestelmän hätätilaa ja käytönpalautusta koskeva verkkosääntö määrittelee tavat, joilla vältetään laajat suurhäiriöt sekä turvataan nopea käytönpalautus suurhäiriötilasta Euroopan unionin jäsenvaltioiden siirtoverkoissa sekä eri jäsenvaltioiden yhteiskäyttöverkoissa. Verkkosäännössä siis yhtenäistetään eri yhteiskäyttöverkkojen tapoja toimia suurhäiriön ja etenkin taajuuspoikkeaman sattuessa. [3]

Verkkosäännön 11 artiklassa määritetään, millä tavoin varautumissuunnitelma täytyy toteuttaa ja mitkä asiat huomioida tätä tehtäessä. Verkkosäännössä on määritelty, että siirtoverkonhaltijan sekä jakeluverkkoyhtiöiden on yhteistyössä luotava automaattinen sähköverkon alitaajuussuojajärjestelmä. Tämä toteutetaan 12 artiklan mukaan niin, että siirtoverkonhaltija ilmoittaa jakeluverkonhaltijalle toteutettavat toimenpiteet ja niiden toteuttamisen määräajat. Jakeluverkonhaltijan täytyy toteuttaa toimenpiteet viimeistään 12 kuukautta ilmoituspäivästä, vahvistaa toimenpiteiden toteutus siirtoverkonhaltijalle sekä pitää toimenpiteet voimassa. Mikäli jakeluverkkoon on liitetty merkittäviä verkkokäyttäjiä, järjestelmän varautumispalvelun tarjoajia tai muita jakeluverkonhaltijoita, täytyy siirtoverkkoon liitetyn jakeluverkonhaltijan ilmoittaa toimenpiteistä ja määräajoista näille osapuolille. [3]

Verkkosäännön 15 artiklassa määritellään tarkemmin vaadittu automaattinen alitaajuussuojajärjestelmä. Siinä käsitellään muun muassa kuormien irtikytkennät sekä taajuuskynnykset ja parametrit, joiden mukaan kuormat irrotetaan verkosta. Asetuksen 15 artiklan 5–8 kohtien voimaantulo on 18.12.2022, ja ne käsittelevät taulukon 1 arvojen mukaisesti suun-

niteltavaa alitaajuussuojausta ja siihen liittyviä ohjeistuksia. [3] Taulukossa 1 on verkkosäännön liitteenä oleva taulukko automaattisen alitaajuussuojauksen kuormien irtikytkennän parametreista eri yhteiskäyttöverkoissa.

Taulukko 1. *Automaattisen alitaajuudesta tapahtuvan kuormien irtikytkentäjärjestelmän ominaispiirteet [3].*

Parametri	Arvot Manner- Eu- rooppa	Arvot Pohjois- maat	Arvot Iso-Bri- tannia	Arvot Ir- lanti	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

Pohjoismaiset siirtoverkkoyhtiöt toteuttavat alitaajuudesta johtuvan automaattisen kuormien irtikytkennän taulukon 1 sarakkeen ”arvot Pohjoismaat” arvojen mukaan. Suomessa tämän hoitaa kantaverkonhaltija Fingrid yhteistyöllä jakeluverkon haltijoiden kanssa.

3.2 Fingrid Oyj:n sovellusohje kulutuksen irtikytkennän toteutukselle

Fingrid on tehnyt sovellusohjeen *Alitaajuudesta tapahtuvan kulutuksen irtikytkennän toteutus Suomessa* [4], jossa ohjeistetaan jakeluverkkoyhtiöitä automaattisen alitaajuussuojauksen toteuttamiseen. Siinä käsitellään kulutuksen verkosta irrottaminen eri taajuusportailla, eri vaihtoehdot taajuusportaiden toteutukselle, irtoavan kulutuksen ilmoittaminen, suojan kokonaistoiminta-aika, kulutuksen valinta ja seuranta, ohjeita jakeluverkkoyhtiöille sekä eri toteutusvaihtoehdot sähköasemilla.

Alitaajuussuojauksen piiriin tulee asettaa 30 % Suomen kuormista sovellusohjeen mukaan. Tämä tapahtuu siten, että jakeluverkkoyhtiöt saavat itse valita 30 % kulutuksestaan, joka varustetaan alitaajuussuojauksella. Mikäli jakeluverkkoyhtiö ei itse tätä halua toteuttaa, voi Fingrid kyseisen jakeluverkkoyhtiön pyynnöstä laukaista automaattisesti jakeluverkkoa syöttävät säteittäisjohdot kantaverkkotasolla. Tämä onnistuu vain, jos kaikki tähän säteittäisjohtoon liittyneet jakeluverkkoyhtiöt yhteisesti haluavat alitaajuussuojan toteutettavan Fingridin alitaajuussuojaimilla.

Taulukossa 2 esitetään taajuusportaat, joiden mukaan Fingridin asiakkaiden tulee asettaa alitaajuussuojauksensa. Ensimmäinen porras alkaa toimimaan, kun mitattu taajuus alittaa 48,8 Hz arvon. Silloin tulee irrottaa 5 % verkon kuormasta enintään 150 ms viiveellä. Mikäli taajuushäiriö jatkuu ja taajuus laskee ensimmäisen portaan toiminnasta

huolimatta, otetaan käyttöön toinen porras mitatun taajuuden laskiessa 48,6 Hz alle. Tällöin verkosta irrotetaan seuraavat 5 % kuormista. Taajuuden edelleen laskiessa tätä jatketaan portaittain, kunnes viimeisellä portaalla taajuuden alittaessa 48 Hz tiputetaan 10 % kulutuksesta. Tämän jälkeen verkon kuormista tulisi olla automaattisesti irrotettu verkkoasetusten mukaiset 30 %.

Taulukko 2. Taulukkopohja Fingridin asiakkaiden raportoimille automaattisen alitaajuudesta tapahtuvan kuorman irtikytkennän asetteluihin [4].

porras	Tavoite f (Hz)	Kokonaistoi- minta-aika(s)	% kulutuksesta	FG:n asiakas täyttää		
				% 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			

Jakeluverkkoyhtiön jakeluverkon koosta ja rakenteesta riippuen on taajuusportaat ja kulutuksen irtikytkentä mahdollista toteuttaa hajautetusti eri sähköasemilla. Yhdellä sähköasemalla voidaan toteuttaa 0–5 taajuusporrasta. Pienillä jakeluverkkoyhtiöillä voi olla vaikeuksia toteuttaa kaikkia taajuusportaita, jos jakeluverkossa on vähän sähköasemia sekä keskijännitelähtöjä, joilla toteuttaa alitaajuussuojausta. Tällöin taajuusportaita voidaan yhdistää, mutta niiden toteutus tulee asetella järjestyksessä kuitenkin niin, että aloitetaan ensimmäisestä portaasta ja käytetyn portaan irtikytkettävän kulutuksen määrä täytyy ennen kuin voidaan ottaa alempia portaita käyttöön. On myös mahdollista toteuttaa koko 30 % kuorman irrotus ensimmäisellä portaalla, jolloin muita portaita ei tarvita. Tätä ei kuitenkaan suositella Fingridin sovellusohjeessa kuin ääritapauksissa.

Alitaajuussuojan irtikytkettävän kuorman osuus jakeluverkon kokonaisvuosienergiasta tulee olla mahdollisimman lähellä taulukon 2 mukaisia arvoja jokaisella portaalla. Irtikytkettävän kuorman valinnan tarkastamiseen käytetään keskituntitehoja niin, että ensimmäisen portaan tulee olla vähintään 5 % ja kaikkien portaiden kuorman yhteensä 20–40 % sekä helmikuun 1. päivänä klo 8–9 että heinäkuun 1. päivänä klo 8–9. Mikäli nämä ehdot eivät toteudu, täytyy alitaajuussuojan laukaisemat kuormat valita uudelleen ehdot täyttäväksi.

Jakeluverkkoyhtiöiden tulee ilmoittaa irtikytkettävät kulutukset Fingridille taulukon 2 tietojen mukaisesti. Siihen kuuluu alitaajuussuojan irtikytkettävät kuormat suhteessa jakeluverkkoyhtiön kokonaisvuosienergiaan sekä helmikuun ja heinäkuun 1. päivän klo 8–9 keskituntitehoihin.

Sovellusohjeessa Fingrid antaa myös muita ohjeita ja suosituksia alitaajuussuojan irtikytkettävän kuormituksen valintaan ja muiden vikatilanteiden huomioimiseen alitaajuussuojan toiminnassa. Fingrid suosittelee hyödyntämään alitaajuussuojan suunnittelussa samoja irti kytkettäviä kuormia kuin tehonrajoitussuunnitelmassa ja valitsemaan vähintään tärkeimmän kulutuksen ensimmäiseen portaaseen. Jokaisen alitaajuussuojaukseen valitun verkosta irrotettavan kohteen sähkön kulutuksen täytyy olla suurempi kuin tuotanto. Mikäli kohteella on tuotantoa, irtoavaksi kuormaksi lasketaan kohteen nettoteho. Lisäksi Fingrid kehottaa sovellusohjeessa suunnittelemaan alitaajuussuojauksen huolella, jotta vältytään turhilta katkaisijoiden laukeamisilta vika- ja poikkeustilanteissa, kuten oikosuluissa, maasuluissa ja erilaisten kytkentätilanteiden aiheuttamissa jännitteiden muutoksissa. Myös alitaajuussuojan ei tule toimia verkon osan ollessa jännitteettömänä, jolloin alijännitelukituksen voi asettaa alueelle $0,4-0,6 \cdot U_n$ nimellisjännitteestä. Samalla tavalla voidaan käyttää nollajännitelukitusta estämään turhat laukaukset jälleenkytkentöjen jännitteettömänä aikana, jolloin hajautetut voimalaitokset voivat ylläpitää jännitettä ja nostaa nollajännitettä maasulkutapauksissa.

Jakeluverkkoyhtiöt saavat itse päättää mihin jakeluverkon osaan alitaajuussuojat sijoitetaan. Alitaajuussuojalla voidaan laukaista sähköasemalta lähteviä keskijännitejohtoja, kokonaisia jakeluverkon asemia tai 110 kV siirtoverkon säteittäisiä osia.

Sovellusohjeen mukaan palautuskytkennät tapahtuvat manuaalisesti Fingridin ohjajana, jolloin alitaajuussuojauksen irti kytkemät kuormat yhdistetään takaisin jännitteeseen jakeluverkkoon. Tämä tarkoittaa sitä, ettei kuorma saa automaattisesti kytkeytyä takaisin verkkoon taajuuden palautuessa normaalille tasolle.

3.3 Alitaajuussuojauksen testaus ja raportointi Fingridille

Alitaajuussuojaukseen kuuluvien suojareiden toiminta tulee testata enintään kuuden vuoden välein. Fingrid on ohjeistanut, että suojauksen voi koestaa sähköasemien koestussyklissä, jonka koestusväli on noin 6 vuotta. Tällöin ensimmäinen koestus tapahtuu suojan käyttöönotossa ja seuraava sähköaseman suojareiden koestuksessa. Ensimmäisen ja toisen koestuksen väli voi tällöin olla yli 6 vuotta, ja sen jälkeen tulevat koestukset ovat kuuden vuoden välein. [20]

Koestusohjelmassa testataan alitaajuussuojauksessa mukana olevan suojareleen:

- a) toiminta-aika ilman katkaisijan laukaisemista,
- b) havahtumis- ja palautumistaajuus,
- c) kaikkien käyttöön tulevien toimintaportaiden taajuusrajat ja toiminta-ajat,
- d) kaikkien releissä käytössä olevien koskettimien ja sisääntulojen toiminta,
- e) oikea toiminta alijännitetilanteessa,
- f) nollajännitelukitus, jos se on toteutettu sekä
- g) indikointien oikeellisuus.

Toiminta-aika kokonaisuudessa on 150 ms, jolloin releen toiminta-ajan pitää olla noin 100 ms. Toiminta-ajan testaukseen Fingrid on antanut ohjeiksi testata suojat nopeilla ja hitailla taajuusmuutoksilla. Nopeaa taajuusmuutosta testattaessa aloitetaan laskemaan taajuutta nimellistaajuudesta ja lopetetaan 0,5 Hz releen asetellun laukaisutaajuuden alle. Askeleen suuruuteen ei ole otettu kantaa nopeassa taajuusmuutoksessa. Hitaassa taajuusmuutoksessa askeleen suuruus on 0,1 Hz, ja aloitustaajuus on 0,5 Hz suurempi kuin laukaisutaajuus ja lopetustaajuus 0,5 Hz pienempi kuin laukaisutaajuus.

Fingrid on linjannut, että koestuksen pöytäkirjat tulee toimittaa Fingridille, ja niistä tulee näkyä mittaustulokset kullekin taajuusportaalle, jotka ovat käytössä kyseisellä kohteella. Pöytäkirja voi olla sähköasemakohtainen koonti, jossa samanlailla asetelluista samantyyppisistä releistä tarvitsee vain toimittaa yhden releen koestustulokset. Kaikki alitaajuus-suojaukseen osallistuvat suojareleet tulee kuitenkin testata koestusohjelman mukaan.

[21]

4. TAMPEREEN SÄHKÖVERKKO OY:N SÄHKÖVERKKO

Fingrid Oyj:n omistamasta ja hallinnoimasta kantaverkosta sähkö siirretään joko suoraan asiakkaalle tai alue- tai jakeluverkkoon. Jakeluverkoilla on alueellinen monopoli, jossa jakeluverkon vastuulla on syrjimättä jakaa sähköä kaikille alueen asiakkaille [19]. Tampereen Sähköverkko Oy on Tampereen alueella toimiva jakeluverkkoyhtiö, jonka täytyy myös toteuttaa Fingridin määräämä alitaajuussuojaus sovellusohjeen mukaisesti ja raportoida irtikytkennän asettelut.

4.1 Tampereen Sähköverkko Oy

Tampereen Sähköverkko Oy (edempänä TSV) toimii jakeluverkon haltijana Tampereen alueella poiketen vain hieman kunnan maantieteellisistä rajoista. Jakeluverkkoyhtiönä TSV vastaa sähköverkkonsa suunnittelusta, rakennuksesta, käytöstä ja ylläpidosta sekä asiakkaidensa liittymästä sähköverkkoon ja asiakkaiden sähköenergian mittauksista.

TSV:llä on Tampereen alueella sähköverkkoa yhteensä n. 3800 km ja se koostuu pääjännitteinä 110 kV, 20 kV, 5 kV ja 400V jännitetasoista. Osa TSV:n sähköverkosta on Tampereen keskustassa sijaitsevaa kaupunkiverkkoa ja osa Tampereen pohjoisosassa Teiskossa sijaitsevaa taajama-alueen ulkopuolista maalaisverkkoa. Kaupungin keskustassa ja lähiöissä lähes kaikki jakeluverkon 20 kV johto-osat ovat maakaapeloituja, mutta Teiskossa on paljon säteittäisiä 20 kV johtoja, jotka ovat suureksi osaksi ilmajohtoa. TSV:n maakaapelointiaste kaikilla jännitetasoilla yhteensä on n. 70 %. [22]

110 kV suurjännitejohtoja TSV:llä on yhteensä 63 km. Niitä käytetään sähköasemien väliseen tehon siirtoon rengasverkkona, jolloin verkko on vian kannalta varmempi. 20 kV keskijänniteverkkoa TSV:llä on yhteensä 1001 km ja ne on rakennettu käyttövarmuuden vuoksi renkaisiin, mutta jakelupiirit ovat erillään erottimilla katkaistuna, jolloin käyttö tapahtuu säteittäisjohtoina sähköasemilta asti. Keskijännitejohdot yhdistävät 20/0,4 kV muuntamoita, jossa verkon käyttöön tarvittavat erottimet sijaitsevat. Muuntamoilta 0,4 kV puolella sijaitsevat pienjänniteverkon johtojen lähdöt. Pienjänniteverkkoa eli 400 V jännitteistä kotitalouksien liittymispisteisiin rakennettua verkkoa TSV:llä on yhteensä 2724 km.

Sähköasemia TSV:n sähköverkossa on yhteensä 13 kappaletta, joista 12 sähköasemalla on 110/20 kV päämuuntajia. Lisäksi TSV:llä on neljä 20 kV kytkinasemaa. Fingridin

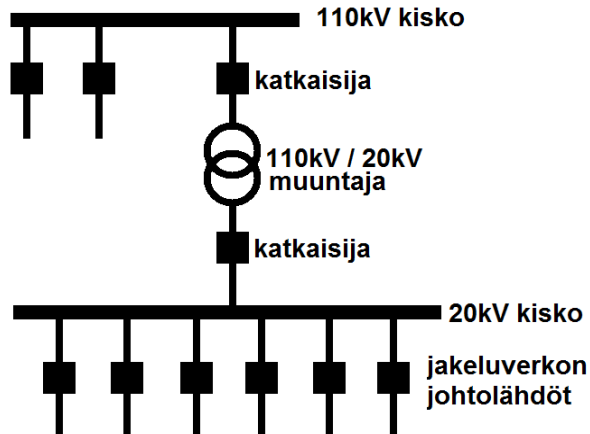
kantaverkkoon TSV:llä on 110 kV yhteys yhteensä kuudelta eri sähköasemalta. Rajapistehot TSV:n sähköasemien ja Fingridin kantaverkon välillä vaihtelevat TSV:n verkkoon liitettyjen voimalaitosten sähkön tuotannosta ja TSV:n asiakkaiden sähkön kulutuksesta riippuen. Esimerkiksi Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos sijaitsee kaukana kulutuksesta ja tuottaa kaukolämmön lisäksi sähköä noin 12 MW teholla, josta vain osa jakautuu 20 kV jakeluverkon kuormiin. Tällöin päätötehon siirtosuunta on TSV:n verkosta Fingridin kantaverkkoon. [23, 24]

TSV:n sähköverkkoon on Tammervoiman hyötyvoimalaitoksen lisäksi liitetty muita voimalaitoksia ja yhteensä niiden laskennalliset maksimi tehot olisivat 364,4 MW, mutta todellinen tuotannon päätöteho jää talvisin noin 200 MW suuruiseksi, sillä Naistenlahti 1 voimalaitos, joka tuottaa maksimissaan 129 MW, toimii Fingridin tehoreservinä [25, 26]. Se tarkoittaa sitä, että voimalaitosta käytetään vain Fingridin määräyksestä tilanteessa, jossa sähkön suunniteltu hankinta ei riitä kattamaan sähkön kulutusta. Talvikuukausina jakeluverkon kuormat ovat talven pakkasten mukaan noin 300–340 MW. Tällöin Fingridin kantaverkosta täytyy siirtyä TSV:n verkkoon noin 100–140 MW. Kesäkuukausina TSV:n sähköverkkoon liitettyjen voimalaitosten sähkön tuotanto on noin 26 MW ja TSV:n jakeluverkon kuormat ovat noin 226–256 MW suuruisia. Silloin Fingridin kantaverkosta siirtyy tehoa TSV:n verkkoon noin 200–230 MW. Tampereen alueen voimalaitokset eivät siis kata TSV:n asiakkaiden sähkön kulutusta, joten tarvittava teho tuotetaan muissa isommissa voimalaitosyksiköissä ja siirretään kantaverkossa TSV:n rajapisteisiin ja jakeluverkkoon.

4.2 Tampereen Sähköverkko Oy:n suojarieleet

Tampereen Sähköverkko Oy:n sähköasemat koostuvat 110 kV ja 20 kV jännitteisistä johto-osista, kojeistoista, muuntajista, kompensointilaitteista sekä toisiopuolen komponenteista ja suojalaitteista. Päämuuntajilla muutetaan siirtoverkon 110 kV jännite jakeluverkon 20 kV jännitteeksi kiskostoon, josta jakelu tapahtuu lähdeittäin muuntamoille.

Jokaisessa johtolähdössä on vähintään yksi katkaisija, joka pystyy laukaisemaan vian sattuessa vikaantuneen verkon osan pois terveestä verkosta (kts. kuva 4). Tällöin terveellä verkolla voidaan jatkaa keskeyttämätöntä sähkönjakelua, ja vikaantuneessa lähdössä voidaan aloittaa vian etsintä rajaamalla verkkoa muuntamoiden erottimilla, kunnes vikapaikka löydetään. Vika voi tapahtua myös sähköaseman kiskossa tai muuntajassa, jolloin kiskosuoja tai muuntajasuoja laukaisee vikaantuneen osan pois verkosta.



Kuva 4. Periaatekuva TSV:n sähköaseman sähköjakelun rakenteesta

Vian sattuessa vikavirrat voivat olla vian luonteen mukaan moninkertaisia verkon nimellisvirtoihin nähden. Näin suuri vikavirta voi rikkoa sähköjakeluun tarvittavia komponentteja ja aiheuttaa vaaratilanteita henkilöille, jotka ovat lähellä vikapaikkaa tai vikavirtaisia johto-osia. Tällöin sähkön syötön nopea poiskytkentä vikaantuneelle verkolle on tärkeää henkilövahinkojen ja laiterikkojen välttämiseksi. Suojareleet saavat suojan tyyppin mukaan signaalit ja verkon suureiden mittaukset sekä aseteltavat parametrit, joiden perusteella katkaisijalle lähtee kytkentä signaali. [27]

Suojareleiden tärkein tehtävä on estää verkon komponenttien vahingoittumista ja ylläpitää sähkön jakelua rajaamalla vikaantuneet verkon osat nopeasti pois terveestä verkosta. Tämän saavuttamiseksi suojareleiltä vaaditaan luotettavuutta, selektiivisyyttä ja nopeaa vian poiskytkentää. [27]

TSV:n suojareleiden laitekanta muodostuu eri valmistajien ja eri vuosikymmenillä valmistetuista suojareleistä. Osa sähköasemilla olevista suojareleistä on sähkömekaanisia, osa staattisia ja osa numeerisia eli niissä on mikroprosessori. Niiden suojausominaisuudet vaihtelevat suojareleen iän mukaan niin, että uudemmissa suojareleissä on enemmän ominaisuuksia ja suoja otettavissa käyttöön kuin vanhemmissa malleissa. Uudemmallisiin suojareleisiin on tuotu enemmän sisääntulosignaaleja ja mittausdataa suuren suojauslohkojen määrän ja muiden ominaisuuksien takia kuin vanhoihin suojareleisiin, joille saattaa tulla vain mittamuuntajilta virtojen ja jännitteiden mittaus sekä pieni määrä muita signaaleja.

Alitaajuussuojaukseen tarvitaan jännitteiden taajuuden mittaus, joka suojareleen valmistajan ja mallin mukaan voi olla mitattuna yksi- tai kolmivaiheisesti sekä vaihe- tai pääjännitteestä. Alitaajuussuojauksessa täytyy ottaa huomioon eri vikojen aiheuttamat jännite-

kuopat, muutostilanteet, jälleen kytkentöjen jännitteettömät ajat sekä erilaiset kytkentämuutokset. Tällöin alitaajuussuoja voi havahtua, vaikka kyse ei ole tehotasapainon järkkymisestä. Suojareleillä on tätä varten alijännitelukitus, jolloin alijännitesuoja ei toimi alitaajuudesta huolimatta. Suojareleillä voi olla myös eri alitaajuussuojauksen portaita, mutta Euroopan komission verkkosäännön ja Fingridin määräämään alitaajuussuojaukseen tarvitaan suojarelettä kohden vain yksi porras, jonka toiminta-aika on enintään 0,15 s. Jollain suojareleillä on eri asetusryhmiä, joihin voi asettaa eri taajuudet alitaajuussuojauksen toimintarajaksi. Tällöin pelkällä asetusryhmän vaihdolla voisi muuttaa alitaajuussuojauksen lähtöjen valintaa sekä toimintarajoja jakeluverkossa.

Suurella osalla TSV:n 20 kV jakeluverkon johtolähdöistä on suojareleet, joilla on mahdollista toteuttaa alitaajuussuojaus. Nämä suojareleet ovat kolmen eri valmistajan malleja. ABB Oy:ltä on käytössä mallit REF541, REF543, REF615 ja REF630, Vamp Oy:ltä on käytössä mallit VAMP255 ja VAMP257 sekä Siemensiltä on vastaavasti käytössä suojarele malli 7SJ6322. Osalla suojareleistä ei ole mahdollista suoraan asettaa alitaajuussuojausta toimimaan tietyllä toiminta-arvolla, vaan suojauslohko täytyy ensin joko konfiguroida tai laitteen ohjelmisto päivittää.

4.3 Alitaajuussuojauksen asetteluesimerkki REF630 kennotermiinaaliin

Alitaajuussuojauksen toteuttamista varten suojareleiden alitaajuussuojaus täytyy asettaa toimimaan. Aetteluesimerkkinä työssä toimii kuvassa 5 oleva ABB:n valmistama Relion sarjaan kuuluva REF630 kennotermiinaali. REF630 on numeerinen suojarele, ja se on suunniteltu sähkönsiirtojohtojen suojaukseen, mittauksiin, ohjauksiin ja valvontaan. Hankkion vuonna 2020 uudistetun sähköaseman johtolähtöjen suojaukseen valittiin REF630, jossa on valmiiksi suojauslohko alitaajuussuojalle. Vanhalla Hankkion sähköasemalla ei ollut suojareleiden puolesta mahdollista toteuttaa vaadittua alitaajuussuojausta eikä tehonmittauksia johtolähdöistä ole saatavilla ajalta ennen uuden sähköaseman valmistumista.



Kuva 5. REF630 kennotermiinali ja etupaneeli [28].

ABB on kehittänyt PCM600-työkalun releiden parametrisointiin ja konfigurointiin. Muita tapoja parametrien asetteluun ovat kuvan 5 kennotermiinalin etupaneelin käyttöliittymä sekä web-käyttöliittymä. Esimerkissä keskitytään PCM600 työkalun avulla parametrien asetteluun. Ohjelmaan rakennetaan kuvan 6 vasemmassa laidassa olevan *Plant Structure* -valikon mukaisesti hierarkkinen kansiorakenne projektista tai sähköasemasta, jossa uloimpana ensimmäisenä nimetään projekti, sen jälkeen sähköasema, seuraavaksi aseman jännitetasot ja sen jälkeen johtolähdöt. Johtolähdön alle voi luoda IED-laitteita (Intelligent electronic device), kuten esimerkkitapauksen REF630 kennotermiinalin. REF630 suojarleet ovat tulleet tehtaalta Hankkion sähköasemalle jo valmiiksi konfiguroituina. Konfiguraatiossa on mukana alitaajuussuojaus, jonka voi suoraan asettaa käyttöön PCM600-työkalulla.

Project Explorer

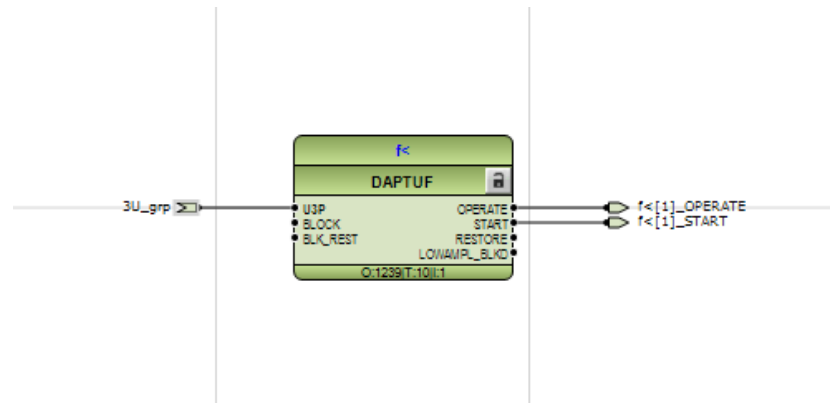
Plant Structure

- CBT048414 Hankkio(3)
 - Hankkio
 - 20kV
 - BA01
 - BA01_REF630
 - IED Configuration
 - Application Configuration
 - I/O
 - MEAS_Signals
 - Protec
 - Current protection
 - Frequency protection
 - f<: DAPTUF: 1
 - Supervision
 - Logic
 - Voltage protection
 - Control
 - Fault_Rec
 - FNKEY
 - LED
 - EVENT
 - BA02
 - BA03
 - BA04
 - BA05
 - BA06
 - BA07
 - BA08
 - BA09
 - BA10
 - BA11
 - BA12
 - BA13
 - BA14
 - HH90

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
f<: 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	0,08		s	0,08	200,00
Restore delay time	0,00		s	0,00	60,00

Kuva 6. REF630 alitaajuussuojan parametrien asettelu PCM600-työkalulla.

Kuvassa 7 on Hankkion sähköaseman johtolähdön REF630 laitteen alitaajuussuojan f< DAPTUF suojauslohko. Siinä sisääntuloksi U3P on määritelty analoginen kolmivaiheinen jännitesignaali. Muita mahdollisia sisääntuloja olisivat BLOCK ja BLK_REST signaalit, joiden tarkoituksena on estää lohkon toiminta, jos kyseiset signaalit ovat aktiivisia. Estosignaalit eivät ole Hankkion alitaajuussuojissa käytössä, sillä alitaajuussuojalohkossa on sisäänrakennettu toiminnan esto, jos mitatun jännitteen amplitudi on pieni tai jännitettä ei ole ollenkaan.



Kuva 7. Alitaajuussuojan f< suojauslohko PCM600-ohjelmassa.

Alitaajuussuojauslohkon ulostuloina ovat OPERATE, START, RESTORE sekä LOWAMP_BLKD. Näistä Hankkiassa on käytössä OPERATE ja START signaalit. START signaali aktivoituu, kun jännitteen taajuus alittaa asetellun taajuusrajan. Tästä signaalista saadaan ilmoitus suojan havahtumisesta. OPERATE signaali aktivoituu, kun suojan parametreihin määritelty *Operate delay time* eli toiminta-aika on kulunut. OPERATE signaali on viety eteenpäin eri lohkoihin, kuten laukaisulohkoon, josta katkaisijan laukaisukäsky annetaan.

REF630:ssa alitaajuussuojan parametrit ovat kuvan 6 *Parameter Setting* -välilehdellä. Tärkeimmät parametrit Fingridin ohjeen mukaiseen alitaajuussuojaukseen ovat *Operation*, jossa asetellaan suoja päälle tai pois päältä; *Reset delay time*, jossa määritellään viive kellon nollaantumiseen taajuuden palautuessa normaaliin; *Start value*, johon asetellaan taajuuden arvo, jolla suojan halutaan toimivan sekä *Operate delay time*, joka on viive suojan toimintaan taajuuden alittaessa halutun toiminta-arvon.

Esimerkitapauksen suojaus on aseteltu toimimaan ensimmäisellä taajuusportaalla eli 48,8 Hz. Viive toiminta-ajalle on aseteltu suojan alin mahdollinen arvo 0,8 s, jotta suoja kokonaisuudessa taajuuden alituksesta katkaisijan aukeamiseen on enintään 150 ms. Muut parametrien arvot ovat oletusarvoja. Muutoksien jälkeen parametrit ladataan PCM600:sta REF630:seen.

Sähköaseman tekniikasta ja laitteista riippuen saadaan TSV:n MicroSCADA Pro käytönvalvontajärjestelmään tieto suojan havahtumisesta ja toiminnasta. Hankkion REF630 kennotermiinaaleista on viety hälytykset sähköaseman ala-asemalle ja siitä edelleen MicroSCADA:an. Joillain asemilla ei saada hälytyksiä alitaajuussuojauksen toiminnasta, mutta alitaajuus on ilmiönä koko verkon laajuinen, joten on todennäköistä, että hälytys alitaajuudesta saadaan muilta sähköasemilta.

5. ALITAAJUUSSUOJAUKSEN SUUNNITTELU

TSV:n jakeluverkon alitaajuussuojauksen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon jakeluverkon sähköasemien johtolähtöjen suojareleet, kuormat, niiden jakautuminen sekä niiden muuntopiireissä olevat muuntamot ja asiakkaat. Irtikytkettävät kuormat täytyy jakaa Fingridin sovellusohjeen mukaisesti viidelle eri taajuusportaalle. Tätä varten tarvitaan verkon kuormien mittausta, josta saadaan jakeluverkon keskitehot. Myös alitaajuussuojauksen toteutustapa täytyy valita, sekä taajuusportaiden suunnittelun jälkeen täytyy tarkistaa, että portaat toteuttavat sovellusohjeen mukaiset vaatimukset.

5.1 Kuormien jaottelu

Kriittinen infrastruktuuri voidaan jakaa kolmelle tasolle, joista ensimmäisenä on tietoliikenne- ja tietotekniikka palvelut, energiahuolto sekä vesihuolto. Ensimmäinen taso mahdollistaa ylempien tasojen 2 ja 3 toiminnan. Tasoon 2 kuuluvat pankki- ja rahoitustoiminta, kuljetusala ja kemianteollisuus, sekä tasoon 3 kuuluvat puolustusvälineiteollisuus, terveydenhuolto, posti- ja jakelupalvelut, pelastuspalvelut sekä maatalous ja elintarvikehuolto. [29, katso 30] Jotta kriittisen infrastruktuurin palvelut voivat toteutua, tulee sähkönjakelun toimia näissä kohteissa.

Tampereen alueella TSV:n jakeluverkossa on kotitalousasiakkaita, teollisuutta sekä kriittiseen infrastruktuuriin kuuluvia asiakkaita, kuten sairaaloita ja vesihuoltopalvelut. Nämä kriittisen infrastruktuurin johtolähdöt ovat ns. kriittistä kuormaa, jossa sähkön jakelu pyritään pitämään katkottomana. Tampereen alueelta löytyy myös energian tuotantolaitoksia, josta osa on sähköntuotantoa. Tuotannon irtikytkennän tilanteessa täytyisi laskea irtikytkettävä nettoteho, joka suuren tuotantolaitoksen irrotessa jäisi negatiiviseksi eli kuormaa täytyisi irti kytkeä lisää kompensoidakseen tuotannon verkkoon antaman tehon. Tuotanto ja kriittinen kuorma jätetään näiden syiden takia alitaajuussuojaukseen valittavien 20 kV johtolähtöjen ulkopuolelle.

Kuormien irtikytkennän tavaksi on valittu johtolähtöjen ja niiden perässä olevien kokonaisten muuntopiirien irtikytkentä. Toinen tapa olisi ollut 110/20kV muuntajan ja siten sähköaseman kiskon irtikytkentä, jolloin olisi mahdollisesti irrotettu kriittistä kuormaa jännitteettömäksi. Tämä riippuu sähköaseman muuntajien lukumäärästä ja kiskoista. Osalla sähköasemista on vain yksi 110/20kV muuntaja, jolloin koko sähköasema irtoaa verkosta. Tällöin ei pystytä kontrolloimaan kriittisen kuorman tilaa. Mikäli sähköasemalla on kaksi tai useampi muuntaja ja kiskot voidaan kuormat jaotella niin, että toinen muuntaja

irrotetaan verkosta ja kriittinen kuorma jää jännitteisen muuntajan perään. Muuntajien irrottamisella on kuitenkin haasteena nykyisen kytkentätilanteen uudelleen suunnittelu.

TSV:n jakeluverkon sähköasemarakennukset ja laitteet saavat sähkönsä omakäyttömuuntamoilta, jotka ovat osana sähköasemien johtolähtöjä. Sähköasemalla sijaitsevat verkon mittaukseen ja ohjaukseen käytettävät laitteet ovat myös akkujen perässä, jolloin ne toimivat tietyn aikaa myös sähköaseman ollessa jännitteettömänä. Kuitenkin alitaajuussuojauksen suunnittelussa on rajattu myös omakäyttömuuntajat pois alitaajuussuojaukseen valittavista sähköasemien johtolähdöistä.

Johtolähtöjen keskitehot on saatu ABB:n kehittämästä MicroSCADA Pro käytönvalvontajärjestelmästä, jota TSV käyttää sähköverkon kaukokäytön ohjauksiin sekä sähköverkon valvontaan. Ohjelmisto tallentaa haluttuja mittauksia, jolloin niitä voidaan viedä tiedostoihin ja käyttää muissa ohjelmissa. Automaattisen alitaajuussuojauksen suunnitteluun ja laskentaan on käytetty johtolähtöjen vuosien 2019 ja 2020 tehoja. Laskentaan on käytetty näiden vuosien lähtöjen keskitehoja, 1.2. klo 8–9 tunnin keskitehoja sekä 1.7. klo 8–9 tunnin keskitehoja. Näiltä ajankohdilta on tuotu jokaisesta johtolähdöstä keskitehot sekä koko jakeluverkon keskitehot johtolähdöittäin listattuna salaisena liitteenä olevaan Keskitehot johtolähdöittäin 2019 -Excel-taulukoon. Excel-taulukosta saa valittua halutut johtolähdöt alitaajuussuojaukseen, jolloin taulukko laskee automaattisesti eri ajankohtien tehojen summat erikseen ja prosenttiosuudet kokonaisuormituksen tehoihin verrattuna. Työssä käytetään vuoden 2019 tehoja suojauksen suunnitteluun, ja suoja tarkistetaan vuoden 2020 tehoilla.

Keskitehot johtolähdöittäin 2019 -taulukosta poistamalla kriittisen kuorman, sähköntuotannon ja omakäytön johtolähdöt, jää irtikytkettävän kuorman osuudeksi noin 43 % jakeluverkon kokonaisuormasta. Tästä kuormasta on valittu automaattisen alitaajuussuojauksen irtikytkettävä kuorma, jonka osuus täytyy olla yhteensä 30 % jakeluverkon kokonaisuormasta.

Irti kytkettävien johtolähtöjen valintaan on käytetty apuna TSV:n tehonrajoitussuunnitelmaa, jossa sähköntuotannon ylittäessä tuotannon joudutaan kytkemään irti kulutusta tehotasapainon palauttamiseksi ja sähköjakelun keskeyttömän jakelun varmistamiseksi lopuille asiakkaille. Tehonrajoitussuunnitelmassa on irtikytkettävä kuorma jaoteltu eri ryhmiin, ja ryhmät ovat irti kytkettynä vain tietyn ajan, jonka jälkeen sähkö katkaistaan seuraavan ryhmän johtolähdöiltä ja kytketään takaisin edeltävän ryhmän johtolähdöille. Tehonrajoitussuunnitelman irtikytkettävät johtolähdöt ovat alitaajuussuojauksen johtolähtöjen tapaan jakeluverkon vähiten tärkeintä kulutusta. Tehonrajoitussuunnitelmassa kuorman irtikytkentä on jaoteltuna eri sähköasemille eri puolelle jakeluverkkoa.

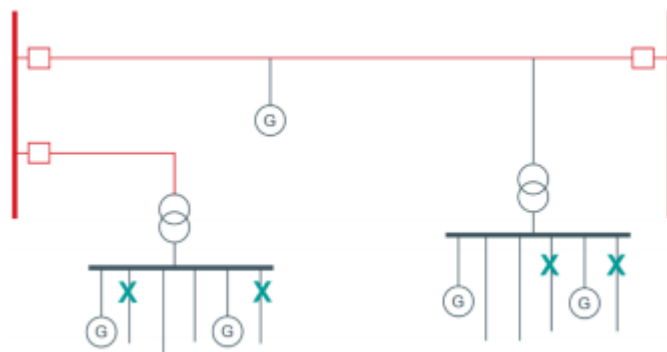
Tehopulasuunnitelmassa on valittuna sellaisia johtolähtöjä, joissa ei ole automaattiseen alitaajuussuojaukseen tarvittavia suojarieitä. Nämä on jätetty pois alitaajuussuojaukseen valittavista johtolähdöistä, jolloin jäljelle jäävien johtolähtöjen keskiteho kattaa noin 25 % vuoden 2019 koko jakeluverkon keskitehosta. Alitaajuussuojauksen toteuttamiseen Fingridin sovellusohjeen mukaisesti tarvitsee olla 30 % keskitehosta, joten alitaajuussuojaukseen tarvitsee valita vielä 5 % tehonrajoitussuunnitelman ulkopuolella olevista johtolähdöistä.

Siemensin valmistamat 7SJ6322 mallin suojarieleet tarvitsevat päivityksen ohjelmistoon, jotta ne voisivat toimia alitaajuussuojana. Tämän takia sellaiset sähköasemat, joissa on kyseisen mallin suojarieleet johdonlähtösuojina, on jätetty pois alitaajuussuojauksen piiristä. Näitä on TSV:n sähköverkossa kaksi kappaletta ja niiden pois jättämisestä huolimatta alitaajuussuojauksen 30 % kuorman vaatimus saadaan toteutettua.

5.2 Taajuusportaiden suunnittelu ja tarkistaminen

Alitaajuussuojaukseen valittava kuorma ja johtolähdöt täytyy toteuttaa siten, että kuorma on jaettu viidelle eri portaalle taajuuden mukaan niin, että 1.–4. portaissa on koko jakeluverkon kuormasta 5 %. Viidennellä eli viimeisellä portaalla irtikytkettävä kuorma on 10 %.

Taajuusportaisiin irtikytkettävät kuormat on hajautettu eri sähköasemien johtolähdöille, jolloin yksittäinen sähköasema ei koe suurta tehonmuutosta alitaajuussuojan toiminnasta. Kuvassa 8 on kuvattuna hajautuksen periaate, jossa vihreät rastit kuvaavat alitaajuussuojauksesta avautuvia johtolähtöjen katkaisijoita.



Kuva 8. Esimerkkikuva alitaajuussuojauksen hajautuksesta eri sähköasemille. [4]

Johtolähdöt, keskitehot ja niiden prosentiosuudet on koottu taajuusportaittain salassa pidettävään liitteeseen B olevaan taulukkoon Alitaajuusportaiden johtolähdöt 2019. Taulukosta pystyy tarkistamaan alitaajuusportaiden keskitehon osuuden vuoden keskitehosta, ja että ne ylittävät taajuusportaisiin vaaditun osuuden. Taulukossa on myös 1.2.2019 ja

1.7.2019 klo 8–9 tunnin keskitehot sekä niiden prosentti osuudet kyseisten päivien ja tuntien koko jakeluverkon keskitehosta. Molempien tuntien keskitehojen osuus jakeluverkon tuntien keskitehoista täytyy olla ensimmäisessä portaassa vähintään 5 %. Lämpiminä kesä kuukausina kuormat ovat pienempiä kuin talvikuukausina. Tämän takia ensimmäisen portaan vuoden keskitehon osuus koko jakeluverkon keskitehosta kasvaa yli 6,2 %, jotta 1.7.2019 klo 8–9 tunnin kuormien summa saadaan yli 5 % koko jakeluverkon kyseisen tunnin keskitehosta.

Kaikkien portaiden keskitehojen prosentti osuus on 31,5 % jakeluverkon vuoden keskitehosta. Myös 1.2.2019 ja 1.7.2019 klo 8–9 tuntien keskitehot pysyvät Fingridin sovelusohjeen mukaisesti 20–40 % tuntien jakeluverkon kokonaistehoista. 1.2.2019 kyseisen tunnin kaikkien portaiden osuuksien summa on 29,4 % ja vastaavasti 1.7.2019 tuntien portaiden summa on 24,2 %. Taulukoon 3 on täytetty TSV:n Fingridille raportoitavat alitaajuusportaiden asettelut taulukon 2 pohjaan.

Taulukko 3. TSV:n alitaajuusportaiden asettelut 2019.

porras	Tavoite f (Hz)	Kokonaistoi- minta-aika(s)	% kulutuksesta	FG:n asiakas täyttää		
				% kulutuksesta		
				1.2 klo 8–9	1.7 klo 8–9	koko vuosi
1	48,8	0,15	5	6,40	5,09	6,22
2	48,6	0,15	5	4,93	2,45	5,04
3	48,4	0,15	5	6,10	3,86	5,28
4	48,2	0,15	5	4,63	5,33	5,01
5	48	0,15	10	7,38	7,49	10,02

Vuoden 2020 keskitehot on koottu salassa pidettävään liitteeseen C Keskitehot johtolähdöittäin 2020 -taulukkoon. Alitaajuussuojan toteutuminen voidaan tarkistaa vuoden 2020 keskitehoilla valitsemalla samat johtolähdöt ja portaavat kuin 2019 vuoden alitaajuusportaiden asetteluissa. TSV:n kuormat ovat pysyneet melko samoina näiden kahden vuoden välillä, joten merkittäviä muutoksia ei tarvitse tehdä, jotta alitaajuussuoja olisi ohjeiden mukainen. Keskitehot ovat valituissa lähdöissä hieman pienemmät, mutta lisäämällä uusia johtolähtöjä suunnitelmaan saadaan portaavat toteutettua.

Alitaajuussuojaus on suunniteltu Fingridin sovelusohjeen *Alitaajuusreistykseen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa* [4] sekä Euroopan komission asetuksen 2017/2196 [3] mukaisesti. Alitaajuussuojauksen viimeinen toteutuspäivä on 18.12.2022 [3], jolloin alitaajuussuojauksen asetukset täytyy olla liitteessä B valittujen johtolähtöjen suojarleille aseteltuna toimimaan. Taajuusportaiden asettelutaulukko eli taulukko 3 lähetetään

vuosittain vuoden keskitehojen osuuksilla Fingridille Oma Fingrid -palvelussa. Myös alitaajuussuojaukseen kuuluvien suojarleiden koestuspöytäkirjat lähetetään luultavasti Oma Fingridin kautta Fingridille.

6. YHTEENVETO

Jakeluverkkoyhtiöiden tulee sähköverkon taajuustasapainon säilyttämiseksi ja suurhäiriön estämiseksi suunnitella ja toteuttaa verkossaan alitaajuussuojaus, joka alitaajuustilanteessa automaattisesti kytkee kuormaa irti verkosta. Yhteensä kuormaa tulee kytkeä irti 30 % jakeluverkon kuormasta. Jakeluverkko yhtiöt saavat itse valita alitaajuussuojauksen toteuttamistavan sekä siihen kuuluvat irti kytkettävät kuormat. Tarkoituksena on, että yhteiskunnan kannalta kriittinen kuorma säilyisi sähkönjakelun piirissä.

Jakeluverkot ovat yksilöllisiä ja niiden suojarieleet voivat olla eri valmistajan ja eri mallisia. Tampereen Sähköverkko Oy:n alitaajuussuojauksessa on rajattu pois kriittinen kuorma, ja kuormien irtikytkentä kohdistuu vain kotitalouksiin, teollisuuteen ja yrityksiin. Alitaajuussuojauksen asettelu vaatii kuorman laskennan lisäksi releasetteluja. Tampereen Sähköverkko Oy:llä on alitaajuussuojaukseen sopivia releitä useita, sekä sähköasemia uudistettaessa suojarieleet päivitetään numeerisiksi releiksi, joilla onnistuu alitaajuussuojauksen toteutus. Työssä suunniteltiin alitaajuussuojaus, joka noudattaa Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin alitaajuussuojaukseen liittyvää ohjeistusta. Suojaus tulee toteuttaa 18.12.2022 mennessä.

Verkon kytkentätilanne saattaa muuttua ja kuormat vaihdella eri johtolähdöissä. Tämän takia suojaus tulee tarkistaa vuosittain vuoden keskitehoilla sekä kahdella eri tuntitehoilla. Tarvittaessa suojauksen kuormien valinta tulee suunnitella uudelleen. Tulevaisuudessa alitaajuussuojauksen suunnittelussa saattaa olla haasteena hajautettu tuotanto, jolloin puhtaasti pelkän kuorman irrotus ei onnistu, vaan tuotannon osuus täytyy ottaa huomioon laskemalla irtikytkettävän osuuden nettoteho. Laskennan helpottamiseksi TSV voisi ohjelmoida ja toteuttaa taulukon, joka noutaisi halutut arvot palvelimelta sekä laskisi automaattisesti keskitehot johtolähdöittäin. Taulukko helpottaisi vuosittaista alitaajuussuojan tarkastamista.

LÄHTEET

- [1] Technical Report on the events of 9 August 2019, National Grid ESO, 6 September 2019, Saatavissa: <https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download>
- [2] Nordic Analysis Group, Frequency Based Emergency Disconnection Policy Review for the Nordic Region, 14 June 2017, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/tki-toiminta/raportit/frequency-based-emergency-disconnection-policy-review-for-the-nordic-region-v1.0.pdf>
- [3] Komission asetus (EU) 2017/2196, annettu 24 päivänä marraskuuta 2017, sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevasta verkkosäännöstä (ETA:n kanalta merkityksellinen teksti.), 24 November 2017, Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32017R2196>
- [4] Fingrid Oyj, Alitaajuusreleistyksen toteutus kulutuksen irtikytkentään Suomessa, sovellusohje, 22.6.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/alitaajuusreleistyksen-toteutus-kulutuksen-irtikytkentaan-suomessa.pdf>
- [5] Elovaara J, Haarla L. Sähköverkot I, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, Helsinki: Otatieto Helsinki University Press, 2011
- [6] Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN 50160:2010 +A1:2015 + A2:2019 + A3:2019, 4.10.2019
- [7] Energiavirasto, Sähkön vähittäismarkkinat, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat>
- [8] Fingrid Oyj, Johdanto sähkömarkkinoihin, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#vuorokausimarkkinat>
- [9] Fingrid Oyj, Mitä on inertia?, FINGRID-lehti, 11.9.2018, Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- [10] Fingrid Oyj, Pohjoismaisen sähköjärjestelmän inertia, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/inertia/>
- [11] Fingrid Oyj, Reservimarkkinat, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#kustannusten-kattaminen>
- [12] Fingrid Oyj, Reservituotteet ja reservien markkinapaikat, julkinen esitysmateriaali, 14.7.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- [13] Fingrid Oyj, Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#hankinta>

- [14] Fingrid Oyj, Automaattisen taajuudenhallintareservin sovellusohje LIITE 1, 26.4.2019, Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/automaattisen-taajuudenhallintareservin-sovellusohje_2019.pdf
- [15] Fingrid Oyj, Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko-ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatosahkon-hinnoittelu>
- [16] Fingrid Oyj, Varavoimalaitokset, Luettu 6.8.2021, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimalaitokset/>
- [17] Dixon A., Modern aspects of power system frequency stability and control, London, United Kingdom: Academic Press; 2019
- [18] Interconnected network of Northern Europe 2019, ENTSO-E, 2019, Saatavissa: <https://www.entsoe.eu/data/map/downloads/>
- [19] Suomen sähköjärjestelmä, Fingrid Oyj, Luettu: 28.8.2020, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- [20] Fingrid Oyj, Fingrid Oyj:n ehdotus asetuksen (EU) 2017/2196 sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskevasta verkkosäännöstä 43 artiklan 2 kohdan mukaiseksi testisuunnitelmaksi, 18.12.2019, Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/nc_er_art_43_2_legal_dokumentti_testisuunnitelmat.pdf
- [21] Fingrid Oyj, NC ER testisuunnitelmaa koskevan julkisen kuulemisen palautteet ja vastineet, muistio, 18.12.2019, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/nc-er-testisuunnitelmaa-koskevan-julkisen-kuulemisen-palautteet-ja-vastineet.pdf>
- [22] Tampereen Sähköverkko Oy, Luettu: 28.8.2020, Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/tampereen-sahkoverkko/sahkokatkot/meista/>.
- [23] Tampereen sähköverkko Oy Yritysesittely 2019, Luettu: 28.8.2020, Tampereen Sähkölaitos -konsernin intra-sivut
- [24] Tampereen Sähköverkko Oy Sähkö- ja kytkinasemat, Luettu: 31.8.2020, Tampereen Sähkölaitos -konsernin intra-sivut
- [25] Tampereen Sähkölaitos Oy voimalaitokset, Luettu: 31.8.2020, Tampereen Sähkölaitos -konsernin intra-sivut
- [26] Tehoreservi kaksivuotiskausi 7/2020–6/2022, Fingrid Oyj, Luettu: 31.8.2020, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/tehoreservi/kaudet/2020-2022/>
- [27] Blackburn J.L, Domin Thomas J., Protective relaying: principles and applications, CRC Press, 2014
- [28] ABB, Feeder protection and control REF630 IEC, Luettu: 18.8.2021, Saatavuus: <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/numerical-relays/feeder-protection-and-control/relion-for-medium-voltage/feeder-protection-and-control-ref630-iec>

- [29] T. G. Lewis, Critical Infrastructure Protection in Homeland Security: defending a networked nation, John Wiley & Sons, 2006
- [30] S. Horsmanheimo, H. Kokkonen-Tarkkanen, P. Kuusela, L. Tuomimäki, S. Puuska, J. Vankka, Kriittisen infrastruktuurin tilannetietoisuus, Valtioneuvoston kanslia, 6.2.2017, Saatavuus: https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/19_2017_Kriittisen+infrastruktuurin+tilannetietoisuus.pdf/1f3fa110-d4aa-4298-9685-1b9027b07fe6/19_2017_Kriittisen+infrastruktuurin+tilannetietoisuus.pdf?t=1486373394000

LIITTEET

Liite A: Keskitehot johtolähdöittäin 2019 (salassa pidettävä)

Liite B: Alitaajuusportaiden johtolähdöt 2019 (salassa pidettävä)

Liite C: Keskitehot johtolähdöittäin 2020 (salassa pidettävä)