

Saku-Petteri Hyvärinen

**ALITAAJUUSSUOJAN MERKITYS
SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄN TASAPAINOLLE**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Marraskuu 2020**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Marraskuu 2020	Tekijä/tekijät Saku-Petteri Hyvärinen
Koulutusohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn nimi ALITAAJUUSSUOJAN MERKITYS SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄN TASAPAINOLLE		
Työn ohjaaja Jari Halme		Sivumäärä 33 + 2
Työelämäohjaaja		
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua sähköverkon alitaajuussuojaukseen ja sen toimintaan. Yhtenä osana käytiin läpi Euroopan Komission antaman asetuksen 2017/2196 aiheuttamia muutoksia sekä vaatimuksia alitaajuussuojaukselle sekä sähköverkon toiminnalle. Lisäksi työssä käytiin läpi taajuuden ja jännitteen säätöön liittyvää vuorovaikutusta toisiinsa nähden sekä säätöön liittyviä toimenpiteitä. Työssä käytiin läpi yleisesti Suomen voimajärjestelmän historiaa ja sen kehitystä osaksi pohjoismaista yhteiskäyttöverkkoa.</p> <p>Työhön liittyvää materiaalia koottiin pääosin alan kirjoista sekä kantaverkkoyhtiön materiaaleista ja Euroopan Komission asetuksesta. Työssä esiteltiin ABB:n ja Samsungin valmistamia suojareleitä. Aiheeseen liittyviä artikkeleita ja esimerkkitapaus kerättiin useista lähteistä eri kielillä.</p> <p>Opinnäytetyöstä tuli tietopaketti, jonka tarkoituksena on antaa lukijalle yleiskuva alitaajuussuojauksesta sekä osoittaa lukijalle kuinka merkittävä alitaajuussuojaus on sähköverkon toiminnalle esimerkkitapauksen kautta.</p>		
Asiasanat Alitaajuus, alitaajuussuojaus, alitaajuudesta johtuvan kulutuksen irtikytkentä, hätätilan ja käytönpalautuksen verkkosäätö		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date November 2020	Author Saku-Petteri Hyvärinen
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis THE IMPORTANCE OF UNDER FREQUENCY LOAD SHEDDING FOR THE BALANCE OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM		
Instructor	Pages 33 + 2	
Supervisor Jari Halme		
<p>The purpose of this thesis was to familiarize under-frequency load shedding and operation in the electric network. As one part of the work with the changes made to the European Commission regulation 2017/2196 that makes transitions for under-frequency load shedding and requirements for the electric network were reviewed. In addition, the interaction between frequency and voltage control and control-related measures was reviewed. The work generally covered the history of the Finnish power system and its development into The Nordic Electric Market.</p> <p>The work-related content was collected mainly from books in the field, as well as from the materials of the transmission system operator and the European Commission's regulation. Related articles and case studies were collected from several sources in different languages.</p> <p>As a result an information package was put together. The purpose of which is to give the reader an overview of under-frequency protection and show to the reader how significant under-frequency protection is for the operation of the power grid through the example case.</p>		

<p>Keywords Emergency and restoration network code, low frequency demand disconnection, under frequency, under frequency load shedding</p>

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

aFRR	automatic frequency restoration reserve, automaattinen taajuudenhallintareservi
Energinet	tanskalainen kantaverkkoyhtiö
FCR-D	frequency containment reserves for disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	frequency containment reserves for normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
FFR	fast frequency reserve, nopea taajuusreservi
Fingrid Oyj	suomalainen kantaverkkoyhtiö
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
Kraftnät Åland Ab	ahvenanmaalainen verkkoyhtiö
mFRR	manual frequency restoration reserve, manuaalinen taajuuden palautusreservi
NC ER	network code for emergency and restoration, toimintasäännöt poikkeustilanteissa
Statnett SF	norjalainen kantaverkkoyhtiö
Svenska Kraftnät	ruotsalainen kantaverkkoyhtiö

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 SUOMEN VOIMAJÄRJESTELMÄ	2
2.1 Voimajärjestelmän rakenne	2
2.2 Sähkönjakelu	4
3 POHJOISMAINEN YHTEISKÄYTTÖVERKKO	5
4 SUOMEN VOIMAJÄRJESTELMÄN TILAVAIHTOEHDOT	7
4.1 Sähköjärjestelmän tilat.....	7
4.2 Sähköjärjestelmän suojaus.....	9
5 JÄNNITTEEN JA TAAJUUDEN SÄÄTÖ	10
5.1 Miksi tarvitaan säätötoimenpiteitä?.....	10
5.2 Pätötehon ja loistehon keskinäinen suhde	12
5.3 Stabiilius.....	12
5.3.1 Jännitestabiilius.....	12
5.3.2 Taajuusstabiilius	13
5.3.3 Kulmastabiilius.....	13
5.4 Tehonsäätö reservit	14
5.5 Generaattorin irrotus verkosta	15
6 INERTIA	16
6.1 Hitausmomentti.....	16
6.2 Esimerkki taajuussäädöstä suurten vaihteluiden aikana.....	17
7 VERKKOSÄÄNTÖ SÄHKÖVERKON HÄTÄTILASTA JA KÄYTÖNPALAUTUKSESTA	20
7.1 Taustaa verkkosäännön valmistelusta sekä käyttöönotosta	20
7.2 Järjestelmän varautumis- ja käytönpalautumissuunnitelmat.....	21
7.3 Alitaajuussuojaus	22
7.4 Miksi alitaajuussuojaus on tärkeä?	23
7.4.1 Taajuusportaiden toteutus	24

7.4.2 Fingridin ohjeistuksia	26
7.5 Alitaajuussuojan toimintakyvyn testaaminen	26
8 TAAJUUSRELE	27
8.1 Staattinen- ja sähkömekaaninen rele	27
8.2 ABB:n tuotteista yleisesti.....	28
8.3 Relion 615-sarja.....	29
8.4 Reyrolle, Argus 7SR158-rele	30
9 POHDINTA	33
LÄHTEET	34
TEHOVAJAUSSUOJAUKSEN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT.....	37
LÄHTEET	34
LIITTEET	
KUVAT	
KUVA 1. Tehonvajauksen asettelun vaihtoehto 1	1
KUVA 1. Tehonvajauksen asettelun vaihtoehto 2	1
KUVA 1. Tehonvajauksen asettelun vaihtoehto 3	2
KUVA 1. Tehonvajauksen asettelun vaihtoehto 4	2

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehdyttää lukija Euroopan Komission julkaiseman verkkosäännön (2017/2196) aiheuttamiin muutoksiin sähköverkon käytösäännöissä erityisesti keskittyen alitaajuussuojaukseen. Verkkosäännöt kuuluvat osaksi lainsäädäntöä, joten niiden noudattaminen on tärkeää. Työssä käydään läpi ne osapuolet, jotka kuuluvat muutosten piiriin. Lisäksi pyrkimyksenä oli havainnollistaa alitaajuussuojauksen toimintaa teorian pohjalta sekä yhden esimerkitapauksen avulla. Jännitteen ja taajuuden säätöä sekä niiden välistä vaikutussuhdetta toisiinsa tarkastellaan teoreettisesti ja kuvaillaan säätötoimenpiteitä, joilla vaikutetaan näiden kahden arvoon. Opinnäytetyön alkuosassa käydään läpi sähkövoimajärjestelmän kehitystä Suomen näkökulmasta.

Sähköverkossa tuotannon sekä kulutuksen välillä tulee olla tasapaino, sillä energiaa ei voi varastoida suuria määriä kannattavasti. Alitaajuussuojaus on yksi osakokonaisuus sähköverkon toimintaa. Sen tarkoituksena on olla viimeinen lukko ennen kuin sähköverkko romahtaa. Alitaajuussuojaus aktivoituu, kun sähköverkon taajuus laskee tarpeeksi alhaiselle tasolle. Taajuus laskee esimerkiksi salamaniskun aiheuttamien häiriöiden kautta tai suuren voimalaitoksen irrottua yllättäen verkosta. Tuotannon ja kulutuksen välinen ero saadaan tasaantumaan, kun alitaajuussuojaus kytkee kulutusta irti verkosta, kuten esimerkiksi paikallisen jakeluverkkoyhtiön sähköverkossa voidaan laukaista katuvaloja taajamista.

Opinnäytetyön tärkeimmät lähdemateriaalit olivat Elovaara & Haarlan tekemä Sähköverkot 1&2 kirjasarja sekä Euroopan Komission antama asetus (2017/2196) verkkosäännöstä koskien sähköverkon hätätilaa sekä käytönpalautusta. Paljon apua oli myös muutosten läpiajamisesta vetovastuussa olevan kanta-verkkoyhtiö Fingrid Oyj:n materiaalista.

2 SUOMEN VOIMAJÄRJESTELMÄ

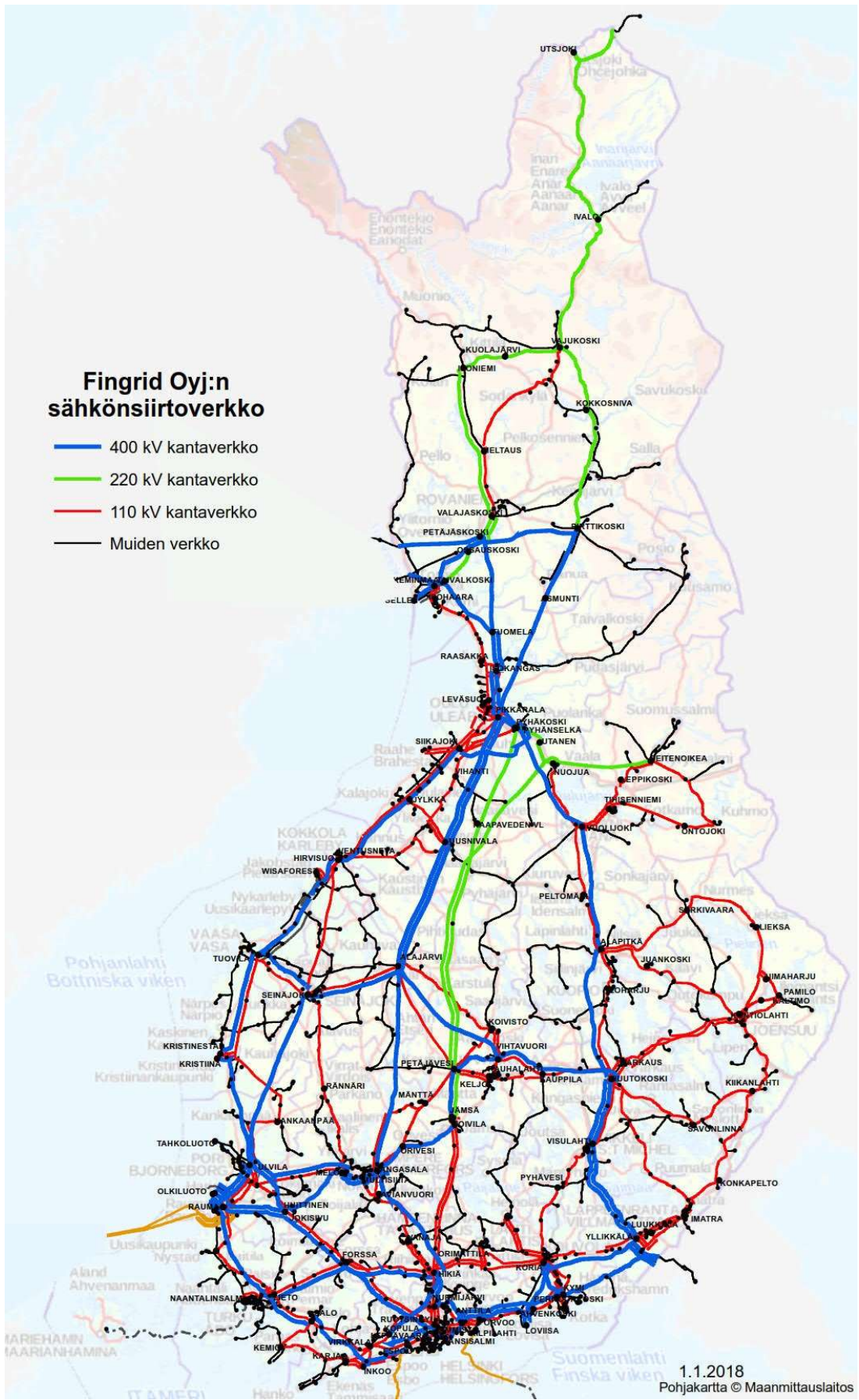
2.1 Voimajärjestelmän rakenne

Suomessa sähköverkon runko pohjautuu Fingrid Oyj:n omistamaan voimansiirtoverkkoon, josta käytetään kantaverkko-nimitystä. Kyseisellä verkolla voidaan taata optimaalinen sähkön siirto, sillä kantaverkossa käytetään suuria jännitetasoja häviöiden välttämiseksi. Nämä jännitetasot ovat 110, 220 ja 400 kilovoltin suuruisia. Kantaverkko kattaa noin 14 400 kilometriä voimajohtoja, joiden lisäksi siihen liittyy vielä 120 sähköasemaa. Suomessa siirretystä sähköstä noin 77 prosenttia kulkeutuu kantaverkon kautta. Sähköverkon taajuutena käytetään Euroopassa yleisesti 50 Hz, joka on myös Suomessa käytössä. (Fingrid Oyj 2020.)

Siirtoverkon muoto on yleensä suurilla jännitteillä suljettu silmukkaverkko, jossa siirtojohdot on rakennettu johtorenkaiksi. Suomessa käytetään 400 kV:n ja 220 kV:n verkoissa edellä mainittua tyyliä, sillä se vähentää jännitteen alenemaa sekä tehohäviöitä ja näin ollen parantaa käyttövarmuutta. Tämä kuitenkin vaatii suojaukselta enemmän, ja verkon suojaaminen tulee kalliimmaksi kuin säteittäiskäyttöisen verkon suojaus. (Elovaara & Haarla, 2011.)

110 kV:n johdoista kantaverkon sähköasemia yhdistävät johdot kuuluvat Fingrid-kantaverkkoyhtiölle. Tämä verkko on rakennettu silmukoiduksi. 110 kV:n verkon säteittäisjohdot ovat alueverkkoa. Nämä johdot syöttävät jakeluverkkoyhtiöiden sähköasemia ja teollisuuslaitoksia sekä yhdistävät voimalaitoksia kantaverkkoon. Alueverkko on paikallisessa omistuksessa.

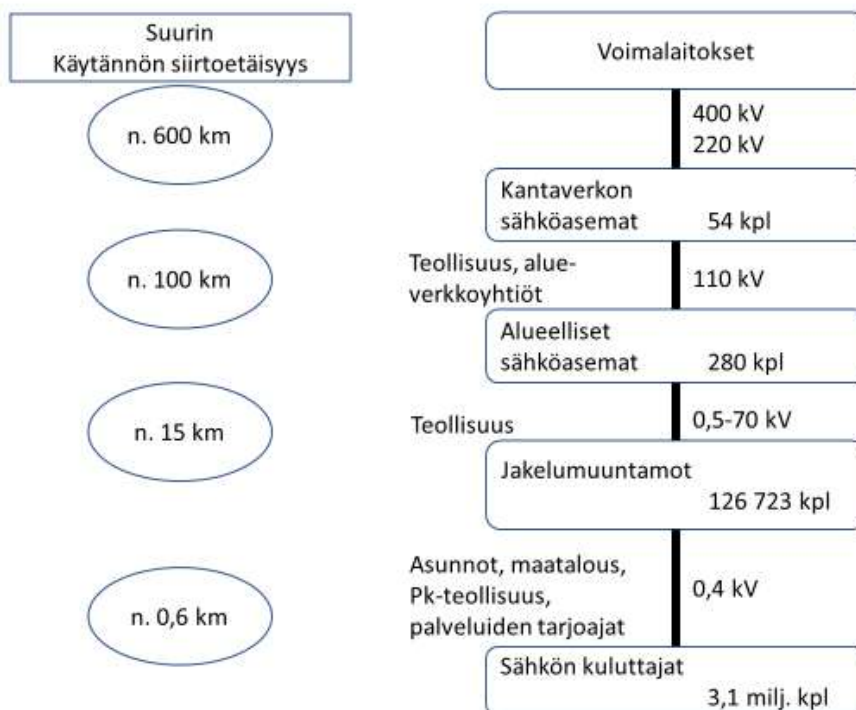
Jakeluverkoista huolehtivat verkkoyhtiöt. Sähköasemalla teho siirtyy 110 kV verkosta keskijänniteverkkoon, jonka jännite useimmiten on 20 kV. Keskijännitejohdot syöttävät jakelumuuntamoita, joissa teho siirtyy yleiseen sähkönjakeluun kuluttajille tarkoitettuun pienjänniteverkkoon. Siinä pääjännite on 400 V ja vaihejännite 230 V. Vuonna 2018 alueverkkoyhtiöitä oli yhteensä 11 kappaletta ja jakeluverkkoyhtiöitä 77 kappaletta. (Energiavirasto 2018.)



KUVA 1. Fingrid Oyj:n sähkösiirtoverkko (Fingrid 2020)

2.2 Sähkönjakelu

Sähkön siirto tapahtuu alue- ja jakeluverkoissa ja tätä kutsutaan myös jakelusiirroksi. Alue- ja jakeluverkoista huolehtivat verkkoyhtiöt. Nämä eroavat lähinnä käytetyn jännitteen sekä maantieteellisen verkkoalueen osalta. Alueverkkoyhtiö käyttää 110 kV:n suurjännitealuesiirtoverkkoa ja yleensä heidän tarkoituksenaan on siirtää sähkö omistajiensa muuntoasemille kuten esimerkiksi teollisuuden käyttöön. Vastaavasti jakeluverkkoyhtiön vastuulle kuuluu verkkomonopolin kautta liittämisen, siirto- ja sähköverkon kehittämisvelvoite. Näin ollen heillä on myös käytössä 110 kV:n jännitteen ohella pienempiä jakelujännitteitä, joista esimerkiksi yleinen 20 kV:n jakelujännite. Yleensä alueverkkoyhtiöllä on suurempi maantieteellinen vastuualue kuin jakeluverkkoyhtiöllä. (Elovaara & Haarla 1, 2011.) Vuonna 2018 alueverkkoyhtiöitä oli yhteensä 11 kappaletta ja jakeluverkkoyhtiöitä 77 kappaletta (Energiavirasto 2018.).



KUVA 2. Suomen sähköntuotanto-, siirto ja jakelujärjestelmä vuonna 2006 (Mukaiillen Haarla 1.)

3 POHJOISMAINEN YHTEISKÄYTTÖVERKKO

Vuonna 1959 Suomi liittyi pohjoismaiseen yhteiskäyttöverkkoon. Liittyminen toteutettiin rakentamalla 220 kV:n yhdysjohto välille Petäjäskoski-Kalix. Tämän jälkeen yhdysjohtoja rakennettiin lisää ja vahvistettiin Suomen yhteyttä yhteiskäyttöverkkoon muun muassa vuosina 1970 ja 1978 valmistuneilla 400 kV:n jännitteellä olevat johdot välille Petäjäskoski-Letsi ja Pikkarala-Boden. (Elovaara & Laiho 1999.)

Yhteiskäyttöverkkoon kuuluvat Norja, Ruotsi, Suomi sekä Tanskan itäiset osat. Yhteiskäyttöverkolla voidaan tasapainottaa eri maiden energian tuotantorakennetta ja hoitaa tuotantovajaukseen tai ylituotantoon liittyviä ongelmia. Lisäksi aikaerosta johtuva sähkön kulutuksen huipun eri aikaisuus maiden välillä lisää yhteiskäyttöverkon hyötyjä, kun voidaan käyttää voimalaitoksia tasaisemmalla teholla. (Elovaara & Haarla 9, 2011.)

Yhteiskäyttöverkossa taajuus on yhteinen. Sähkön tuotannon tulee joka hetki vastata kulutusta, jotta taajuus pysyy tavoitearvossa 50,0 Hz.

Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon kantaverkko-operaattoreita ovat:

- Fingrid Oyj Suomessa
- Svenska Kraftnät Ruotsissa
- Statnett SF Norjassa
- Energinet Tanskassa
- Kraftnät Åland Ab Ahvenanmaalla

Suomi kuuluu pohjoismaiseen sähkömarkkinaan, jossa ovat mukana muut Pohjoismaat sekä Baltian maat. Tämän markkina-alueen tarkoituksena on laajentua koko Euroopan laajuiseksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020.)



KUVA 3. Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko (Svenska Kraftnät 2020.)

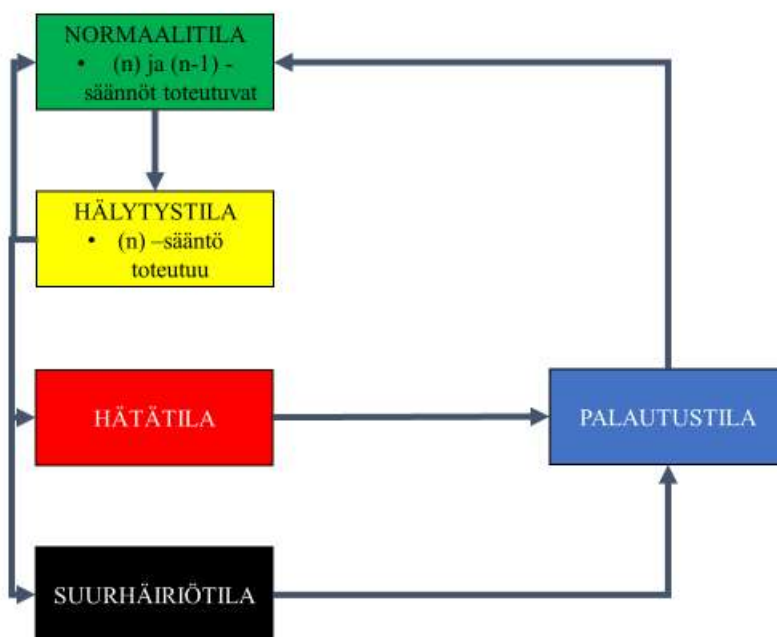
4 SUOMEN VOIMAJÄRJESTELMÄN TILAVAIHTOEHDOT

4.1 Sähköjärjestelmän tilat

Voimajärjestelmällä on viisi eri tilaa. Normaalisissa tilassa verkko toimii ja on käyttövarma eli kaikki kuormat saavat tarvitsemansa tehon ja taajuus, jännitteet ja siirrot pysyvät raja-arvojen sisällä. Taustalla toimivat tarvittavat reservit taatakseen järjestelmän kohtaavat kaikki tavalliset viat. (Elovaara & Haarla 2011.)

Hälytystilassa tilanne on samankaltainen kuin normaalissa tilassa. Poikkeuksia ovat kuitenkin tavalliset viat, jotka voivat reservien riittämättömyyden vuoksi johtaa kuormien irtoamiseen, ylikuormitukseen, liian pieniin tai suuriin jännitteisiin tai epästabiliin tilanteeseen. Näiden ongelmien kautta tilanne voi johtaa hätätilaan tai pahimmillaan romahduttaa verkon. (Elovaara & Haarla 2011.)

Hätätilassa on kohdattu vakavampi vika, jonka vuoksi verkosta on voitu irrottaa kuormaa, tuotantoa tai verkkoa on jaettu osiin. (Elovaara & Haarla 2011). Suurhäiriötilassa verkko voi olla jo kokonaan jännitteetön tai useita verkon osuuksia on romahtanut. Tähän tilanteeseen voidaan joutua usean vian ketjureaktiolla tai verkon valvojien riittämättömillä toimenpiteillä hälytys- ja hätätilassa. (Elovaara & Haarla 2011.)



KUVA 4. Sähköjärjestelmän tiloista. (mukaillen Fingrid 2020)

TAULUKKO 1. Sähköjärjestelmän tilan ominaispiirteet. (mukaillen Fingrid 2020)

HÄTÄTILA	SUURHÄIRIÖTILA	PALAUTUSTILA
Vähintään yksi seuraavista ehdoista täyttyy:	Vähintään toinen seuraavista ehdoista täyttyy:	
Kantaverkon siirrot ovat siirtorajojen ulkopuolella myös korjaavien toimenpiteiden jälkeen	Yli 50 % Suomen kulutuksesta on ilman sähköä	Toimenpiteet käytön palauttamiseksi suurhäiriön jälkeen aloitettu sekä
Taajuus on yli 15 min ajan alueen $50 \pm 0,5$ Hz ulkopuolella	Koko kantaverkko on jännitteetön yli 3 min ajan	Ensimmäiset jännitteen palautuskytkennät tehty ja tuotannon ja kulutuksen palautus aloitettu
Taajuus on alueen $50 \pm 1,0$ Hz ulkopuolella		
Käytönvalvontajärjestelmän ja muun kriittisen järjestelmän täydellinen menetys yli 30 min ajan (käytännössä Fingridin valvomotoiminnan estyminen)		
Sopimuksetonta kuormaa on irtikytetty		
Suomessa sähköpula tai suurhäiriö		

4.2 Sähköjärjestelmän suojaus

Sähköturvallisuuslaki edellyttää, että sähkölaitteet sekä laitteistot eivät aiheuta vaaraa kenenkään hengelle. Tätä varten on rakennettu mittamuuntajista, suojareleistä ja katkaisijoista kokonaisuus, joka suojaa verkon laitteita. Standardin SFS 60050-448 mukaan suojajärjestelmään kuuluvat suojauslaitteet, mittamuuntajat, johdotukset, laukaisupiiri, teholähteet, tiedonsiirtojärjestelmä ja jälleenkytkentäautomaattikka. Tähän eivät sisälly katkaisijat. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

Suojauksella pyritään havaitsemaan voimajärjestelmässä ilmenevät viat tai epänormaalit olosuhteet, jotta voidaan selvittää ja tarvittaessa palauttaa järjestelmä normaaliin tilaan. Vian havaitsemisen jälkeen voidaan irrottaa kyseinen osa verkosta ja N-1-periaatteen avulla jatkaa normaalia käyttöä. Toisinaan voi olla tärkeää saada vikaantunut osa irti verkosta todella nopeasti, sillä erityisesti oiko- tai maasulkuvika- tapaukset voivat aiheuttaa vaaraa niin ihmisen kuin eläimenkin hengelle. Laitteistoakin voi rikkoontua tai omaisuutta vahingoittua. Releen toimintanopeus vaikuttaa vahingon suuruuteen, koska vian aiheuttamat vahingot kasvavat sitä mukaan, kun vika-aika pitenee. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

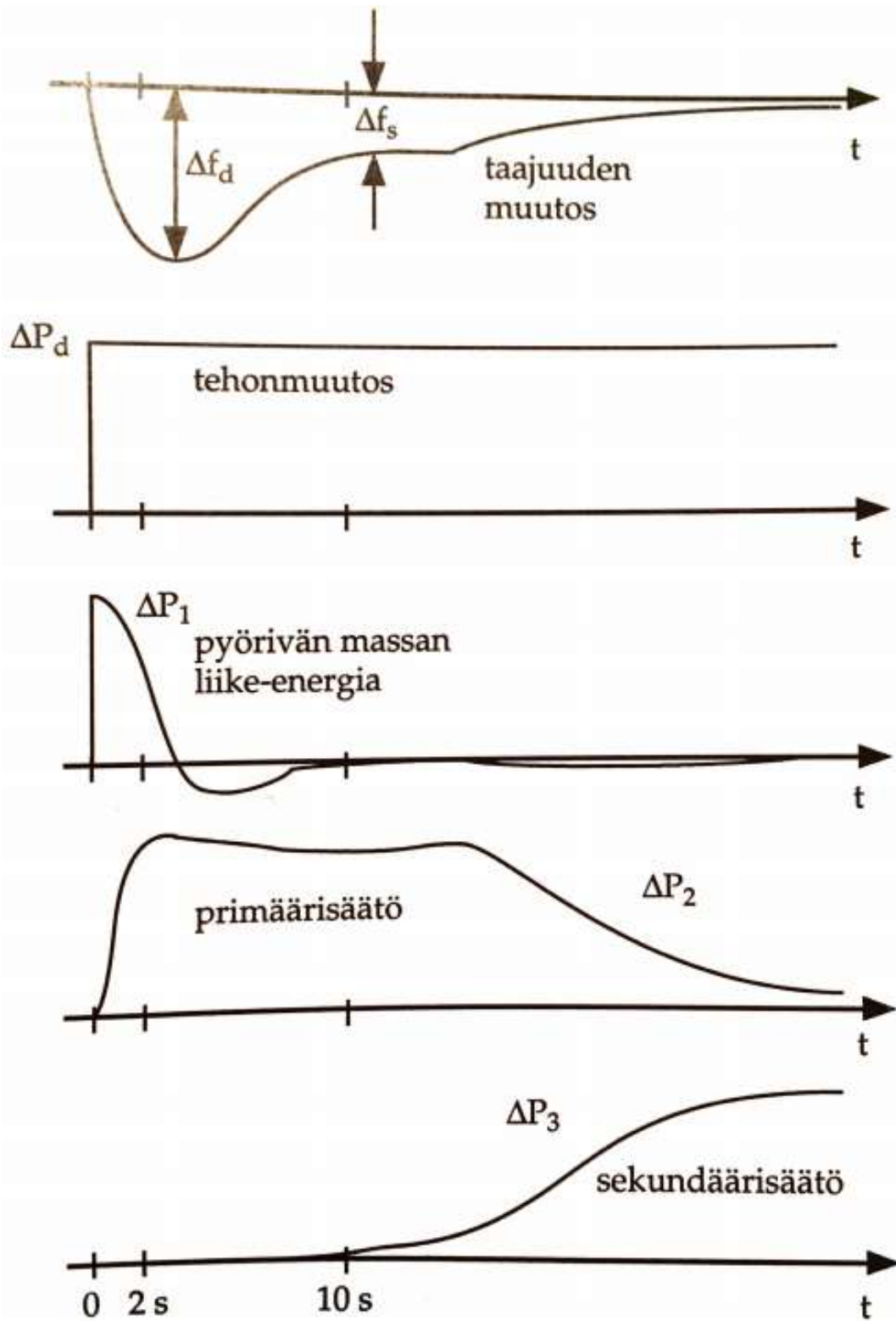
5 JÄNNITTEEN JA TAAJUUDEN SÄÄTÖ

5.1 Miksi tarvitaan säätötoimenpiteitä?

Sähkövoimajärjestelmä vaatii toimiakseen jännitteeltä sekä taajuudelta pysyvyyttä nimellisarvoissa johdettujen nykyisistä sähkön huonoista varastointimahdollisuuksista. Näin ollen sähköverkossa tuotetun ja kulutetun tehon tulee vastata toisiaan mahdollisimman paljon, jotta tasapaino verkossa säilyy. Jännitteen säätö tapahtuu loistehon kautta ja vastaavasti taajuuden säätö tapahtuu laitteiden pätötehon avulla. Toisin sanoen pätötehon kulutuksen ollessa suurempi kuin sen tuotanto, kuormitus ottaa tehonsa tahtigeneraattoreiden akselistojen pyörivien massojen liike-energiasta, joka taas hidastaa generaattoreita. Näin verkon taajuus pienenee. (Elovaara & Haarla 2011 8.)

Päinvastaisessa tilanteessa kuormituksen ollessa pienempi tuotettua tehoa kohtaan tällöin tahtigeneraattoreiden liike-energia kasvaa. Tämän seurauksena tahtigeneraattoreiden pyöriminen nopeutuu ja verkon taajuus kasvaa. Hetkellisesti taajuuteen vaikuttavat eniten suurien voimalaitoksien irtautuminen verkosta sekä verkkojen välisten yhdysjohtojen laukeaminen raskaan kuorman alaisena. (Elovaara & Haarla 2011 8.)

Kuvasta 5 nähdään taajuuden laskiessa, että teho käyrässä tapahtuu äkillinen nousu, jonka aiheuttaa pyörivä massa. Primäärisäätöön käytetään kattiloihin varastoitunutta energiaa sekä vesivoiman tehonnostoa. Sekundäärisäätöön käytetään kattiloiden tehonlisäystä. Tässä yhteydessä toiminta tapahtuu ilman kuormien irtikytkemistä.



KUVA 5. Taajuuden muutos sekä säätötoimenpiteiden vaikutukset. (Mörsky 1992, 15.)

5.2 Pätötehon ja loistehon keskinäinen suhde

Pätö- ja loistehon välinen säätö eroaa voimansiirtojohtojen impedansseista. Loistehoa ei voida siirtää kovin pitkiä matkoja, sillä siihen liittyvät häviöt kasvavat suuriksi. Tämän vuoksi loistehoa tuotetaan mahdollisimman lähellä sen kulutuspaikkoja. Vastaavasti pätötehon osalta sitä voidaan siirtää pitkiä matkoja, mikä onkin yksi voimansiirron perusedellytyksiä ja näin ollen pätötehon tuotanto voidaan valita suhteellisen vapaasti kulutuskohteesta riippumatta. (Elovaara & Laiho 1999, 6.)

5.3 Stabiilius

Sähköverkko on stabiili, kun se häiriötilanteessa kykenee pitämään verkon taajuuden ja jännitteen sekä generaattorien vaihekulmat raja-arvojen sisällä. Lisäksi verkon täytyy kyetä palaamaan tasapainotilaan häiriön jälkeen. Näin ollen sähköverkko ei ole stabiili, jos se romahtaa häiriön seurauksena. Tarpeeksi suuri järjestelmä voi olla stabiili ilman yhtä menetettyä generaattoria, jolloin tämä kokonaisuus kestää paremmin muutoksia. Stabiiliutta on kolme erilaista: kulmastabiilius (angle stability), jännitestabiilius (voltage stability) ja taajuusstabiilius (frequency stability). (Elovaara & Haarla 2011, 5)

5.3.1 Jännitestabiilius

Jännitestabiilius on voimajärjestelmän ominaisuus, jolla pidetään tasainen jännite kaikissa solmuissa jatkuvassa tilassa sekä häiriöiden jälkeen (IEE/CIGRE 2004, 1390). Normaalisti jännitestabiiliutta uhkaa kulutus, mutta yleistyneet epätahtigeneraattorit etenkin tuulivoiman tuotannossa uhkaavat myös jännitteen tasaisuutta. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

5.3.2 Taajuusstabiilius

Taajuusstabiilius on voimajärjestelmän ominaisuus, jolla pidetään tasainen taajuus, kun voimajärjestelmä on kohdannut epätasapainon taajuudessa johtuen joko kuormituksessa tapahtuneesta muutoksesta tai tuotantoon liittyvästä muutoksesta (IEEE/CIGRE 2004, 1392). Osa generaattoreista toimii niin sanottuna tuotantoreserveinä, joiden tehontuotanto muuttuu taajuuden muutosten mukana. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

Generaattoreita säädetään taajuuden muuttumisen jälkeen joko lisäämällä tai vähentämällä generaattoreiden tehoa. Lisäksi voidaan kytkeä kuormaa irti verkosta, jotta saataisiin tehotasapaino. Näillä toimenpiteillä pyritään ehkäisemään taajuusromahdusta, jolloin verkko romahtaa eikä taajuutta voida enää nostaa ilman, että verkkoa pyritään palauttamaan eri toimenpiteillä. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

5.3.3 Kulmastabiilius

Kulmastabiilius liittyy tahtigeneraattoreiden toimintaan kuten normaalikäytössä niiden tuottamalla loisteholla pidetään jännitteet raja-arvojen sisällä. Muutamia tyypillisiä ongelmia kulmastabiiliuteen lukeutuvat generaattorien heilunta toisiaan vasten sekä generaattorien välisten kulmien kasvaminen liian suureksi, jonka jälkeen generaattorit putoavat tahdistä. Yleensä näitä tapauksia syntyy verkossa tapahtuneen vian jälkeen tai suuren tehonsiirron vuoksi ja verkon heikosta vaimennuksesta. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

Käytännössä kulmastabiiliudella pidetään tahtikoneet tahtikäynnissä, joten generaattoreiden täytyy pystyä palauttaa tasapaino mekaanisen ja sähköisen tehon välille verkossa tapahtuneiden muutosten jälkeen. Generaattoriin itsessään vaikuttavia tekijöitä ovat sähkötehon suuruus ja tehoa vastaava kulmaero generaattorin sisäisen jännitteen ja verkon jännitteen välillä. Generaattoriin voidaan integroida lisästabilointisäätö, jotta voidaan parantaa stabiiliutta. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

5.4 Tehonsäätö reservit

Reservejä käytetään verkon normaalitilan säätöön sekä niiden avulla palautetaan verkkoa häiriöiden jälkeen. Reservit on jaettu eri tyyppeihin kuten taajuusohjattuun käyttöreserviin, taajuusohjattuun häiriöreserviin ja nopeaan häiriöreserviin. Lisäksi osa reservistä on käsin käynnistettäviä. Taajuusohjattava reservi toimii nimensä mukaisesti verkon taajuuden mukaan. Näitä reservejä kutsutaan myös nimellä pyörivä reservi ja erityisesti vesivoimalaitoksista käytetään tätä nimitystä. Taajuusohjattavaan reserviin kuuluu vielä Venäjän ja Viron tuonti sekä lauhdevoimalaitokset. (Fingrid Oyj 2020d)

Taulukkoon 2 on koottu erilaisia reservityyppejä. Taulukosta nähdään nopean taajuusreservin (FFR) lyhyt sekunnin käynnistysaika, jonka vuoksi sitä käytetään suurten taajuuspoikkeamien hallintaan pienen inertian tilanteessa. Tällä voidaan nopeasti paikata taajuuden laskua ja tuotetaan tarvittaessa lisäaikaa muiden reservien käynnistymiselle. Taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) tarkoituksena on ylläpitää järjestelmän tasapainoa enintään 0,5 Hz:n taajuuspoikkeamalla, kun verkosta irtoaa suuri tuotantoyksikkö. (Fingrid Oyj 2020d)

Taajuusohjatulla käyttöreservillä (FCR-N) pyritään säätämään sähköverkon taajuutta normaalitilassa. Automaattisen taajuuden hallintareservin (aFRR) tehtävänä on palauttaa taajuus normaaliin 50 Hz:n arvoon. Automaattinen taajuudenhallintareservi käynnistetään kantaverkkoyhtiön lähettämän tehonmuutossignaalin avulla. Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoita (mFRR) käytetään vain tarvittaessa tasapainottamaan sähköverkkoa normaalitilanteessa ja häiriötilanteessa. (Fingrid Oyj 2020d)

Pohjoismaisen verkkosäätöjärjestelmän mukaan pyörivästä reservistä voi kolmannesosa olla muualla kuin omassa järjestelmässä. Tällä pyritään varmistamaan kunkin valtion sähkövoimajärjestelmän tasapaino saarekekäyttöön joutuessaan. (Elovaara & Haarla 2011, 8.)

TAULUKKO 2. Reservimarkkinat Suomessa (mukaillen Fingrid 2020.)

	Nopea taajuusreservi (FFR), Suomi 20 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), Suomi 290 MW, Pohjoismaissa 1 450 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N), Suomi 120 MW, Pohjoismaissa 600 MW	Automaattinen taajuudenhallinta-reservi (aFRR), Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat (mFRR), 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

5.5 Generaattorin irrotus verkosta

Generaattorin tehon jäädessä vajaaksi suhteessa kuormaan alkaa saarekkeen taajuus laskea ja tällöin taajuusrele kytkee generaattorin irti verkosta. Toisaalta generaattorin tehon ollessa sama kuorman kanssa, taajuus ei muutu eikä taajuusrele reagoi generaattorin irrottamiseksi. Taajuus- ja jänniterele toimivat myös yhdessä. Tässä tapauksessa taajuusrele reagoi jännitereleen havahtumiseen. Jänniterele pysyy havahtuneena ennalta määrätyn ajan esimerkiksi 10 sekuntia. Käytettäessä vain jänniterelettä generaattori voi irrota muiden johtojen oikosuluissa, sillä jännitekuopat leviävät laajalle. Pelkästään taajuusrelettä käytettäessä generaattori voisi irrota, kun iso generaattori on irronnut verkosta, jolloin kaikki tarpeellinen tuotanto tarvitaan ylläpitämään taajuutta. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

6 INERTIA

6.1 Hitausmomentti

Hitausmomentti J (moment of inertia) eli toisin sanoen inertiamomentti on sähköverkko yhteydessä yksi tärkeä kokonaisuus, joka tulee ottaa huomioon alitaajuussuojausta tehtäessä. Inertialla tarkoitetaan sähköverkosta puhuttaessa generaattoreiden pyörivän massan liike-energiaa. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

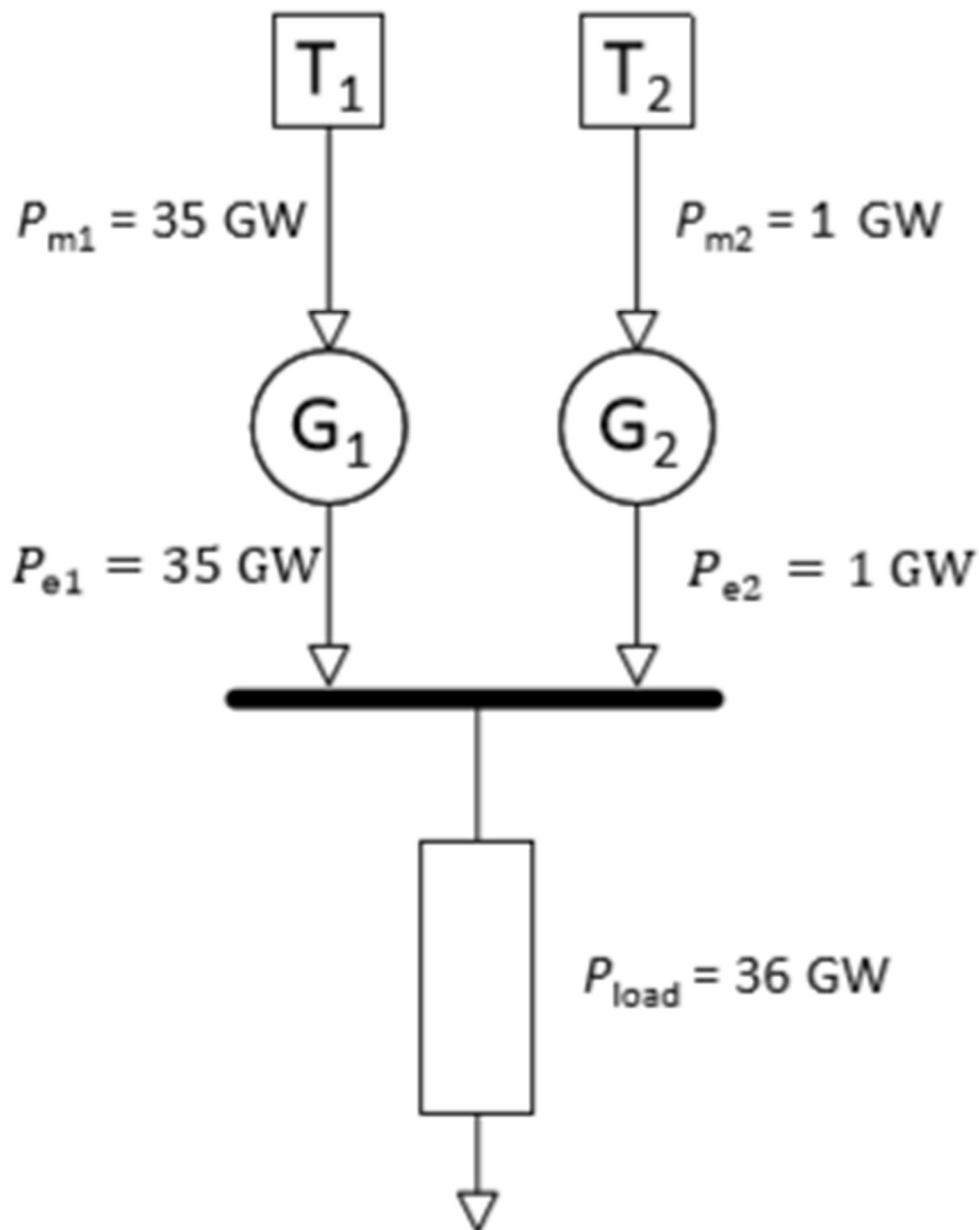
Yhä kasvava uusiutuvien energioiden tuotantokapasiteetit tuovat omat haasteensa sähköjärjestelmään. Nämä tuotantomuodot ovat kytketty sähköverkkoon käyttämällä tehoelektroniikkaa ja eivät näin ollen ole kytketty suoraan sähköverkkoon kuten isot ydinvoimalat. Inertian puuttuminen uusiutuvilta energiamuodoilta on syy tehoelektroniikan käyttöön ja miksi suora kytkentä sähköverkkoon ei onnistu. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

Hitausvakio H tarkoittaa koneen liike-energiaa tahtinopeudella, joka on jaettu generaattorin perusteholla. Verkkoon kytketyt synkroniset moottorit tuottavat myös inertiaa verkkoon, joten niitä voidaan osittain käsitellä kuten generaattoreita. Yleensä ilmaistaan pyörivien massojen varastoima kineettinen energia voimajärjestelmässä megawattia sekuntia kohden. Tämä on yleensä käytännöllisempi kuin inertian esittäminen voimajärjestelmässä. (Elovaara & Haarla 2011, 5.)

Inertian ollessa pieni ja suuritehoisen voimalaitoksen irrottua verkosta aiheuttaa tuotannon nopea sukellus sen, että myös taajuus laskee äkillisesti. Vastaavasti inertian ollessa suuri samanlainen tuotannon pudotus ei vaikuta yhtä voimakkaasti taajuuteen, sillä tuotantovajetta voidaan kompensoida pyörivien massojen liike-energialla. Yhä kasvava tuulivoiman kapasiteetti vaikuttaa omalta osaltaan sähköverkkoon. Tuulivoimageneraattorit kytketään verkkoon tehoelektroniikan avulla, jolloin generaattorin ja sähköverkon välissä on esimerkiksi taajuusmuuttaja. (Elovaara & Laiho 1999.)

6.2 Esimerkki taajuussäädöstä suurten vaihteluiden aikana

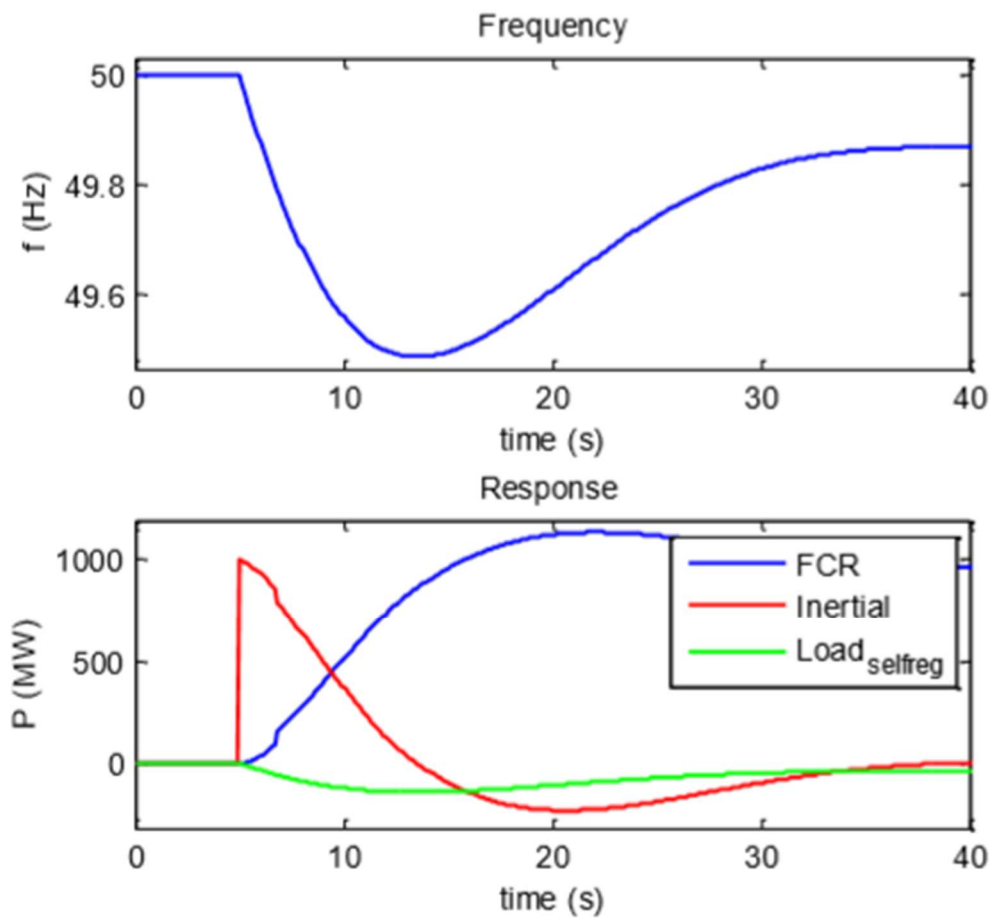
Yksinkertaistettu esimerkki koostuu kahdesta generaattorista ja yhdestä kuormasta, jotka on kytketty yhteiseen kiskoon. Nollahäviöt sekä jännite pysyvät samana. Generaattori G1 toimii myös taajuusohjattuna käyttö- ja häiriöreservinä (FCR). Kuormalla on taajuusriippuvuus 0,75 %/Hz, jolloin esimerkiksi kuorman laskiessa 270 MW taajuus laskee 1 Hz. Pyörievien massojen kineettinen energia on G1-turbiinigenaattorilla 200 GWs ja G2-turbiinigenaattorilla 8 GWs.



KUVA 6. Voimajärjestelmän tila ennen tuotantovajetta. (ENTSO-E raportti 2020)

Kun aikaa on kulunut 5 s ($t=5$ s) generaattori G2 irtautuu tilanteesta, jossa järjestelmä on tasapainossa ja taajuus on 50.0 Hz. Tuotanto sekä kulutus vastaavat toisiaan. G2-generaattorin pudottua verkosta jää generaattori G1 varaan tuottaa 36 GW kuormaa varten, minkä vuoksi tuotantoa pitäisi nostaa 1 GW, jotta saavutetaan 36 GW. Alkuun on 1 GW:n tuotantovaje, sillä mekaaninen voima ei kykene nopeaan muutokseen, joten mekaaninen voima turbiini T1 on pienempi kuin sähköinen voima generaattorissa G1. Näin ollen turbiinigenaattori alkaa hidastua ja taajuus laskee, kun pyörivien massojen kineettinen energia siirtyy sähköisen voiman kautta kuorman syöttämiseen.

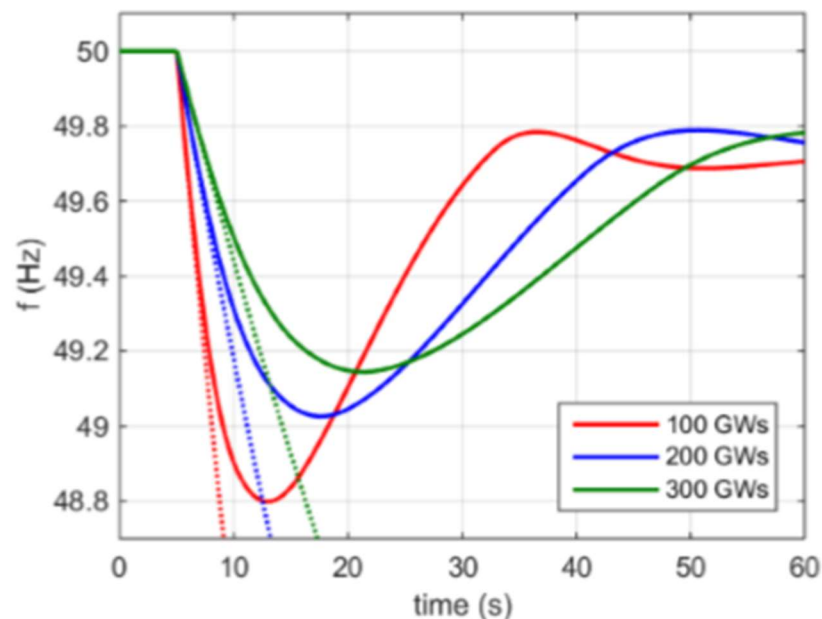
Kuva 7 osoittaa kuinka 1 GW:n tuotantovaje korvataan inertian avulla. Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin käynnistytyä tai kuorman vähentyessä laskevan taajuuden kanssa alkaa inertian vaikutus vähentyä. Taajuus tasapainottuu, kun mekaaninen voima turbiinilta on sama generaattorin sähköisen voiman kanssa. Tällöin inertian vaikutus on nolla.



KUVA 7. Taajuus, Inertian vaikutus, taajuusriippuvainen kuorma, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. (ENTSO-E raportti 2020).

Kuva 8 osoittaa taajuuden käyttäytymistä tuotannon menetyksen jälkeen, kun kineettisen energian määrä vaihtelee. Kiinteä viiva osoittaa taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin kanssa ja pisteviiva on vastavasti ilman reserviä. Lisäksi kuvassa on otettu huomioon reservien vaikutus taajuuteen. Kuten pisteviivat osoittavat taajuus jatkaa laskemista, kun reserviä ei ole käytössä. Toisaalta nähdään, miten reservit reagoivat laskevaan taajuuteen. Erityisesti myös kineettisen energian määrällä on merkitystä. Kuvan 8 mukaisesti suuri kineettinen energia hidastaa taajuuden laskemista ja samalla korottaa alataajuuden maksimiarvoa.

Vertailuna juuri 100 GWs kineettisellä energialla maksimialataajuus reservin ollessa käytössä on n. 48,8 Hz, kun käytössä on 300 GWs kineettistä energiaa on vastaava maksimi alataajuus n. 49,17. Näillä kahdella järjestelmällä on vielä erona se, että 100 GWs järjestelmä saavuttaa maksimialataajuuden 48,8 Hz n. 12 sekunnin kohdalla, kun 300 GWs järjestelmä saavuttaa oman maksimialataajuutensa noin 21 sekunnin kohdalla.



KUVA 8. Tuotantovajeen jälkeinen kineettisen energian vaikutukset taajuuteen. (ENTSO-E raportti 2020)

7 VERKKOSÄÄNTÖ SÄHKÖVERKON HÄTÄTILASTA JA KÄYTÖNPALAUTUKSESTA

7.1 Taustaa verkkosäännön valmistelusta sekä käyttöönotosta

Euroopan komissio antoi vuoden 2017 marraskuussa asetuksen 2017/2196 (NC ER), jonka avulla pyritään vahvistamaan sähköjärjestelmän turvallisuutta sekä estämään käyttöhäiriöiden leviäminen tai paheneminen. Lisäksi sen tarkoituksena on välttää laajamittainen häiriö ja suurhäiriötila sekä kuitenkin mahdollistaa sähköjärjestelmän tehokas ja nopea käytönpalautus edellä mainituista hätätiloista. Asetuksella pyritään turvaamaan pohjoismaista yhteiskäyttöverkkoa tulevaisuuden mahdollisilta muutoksilta, joita sähköverkkoon on todennäköisesti tulossa. Ennakoitavia muutoksia ovat Ruotsin ydinvoimaloiden alarajo sekä lauhdevoimalaitosten kapasiteetin vähentäminen. Asetus koskettaa muun muassa siirtoverkonhaltijoita, jakeluverkonhaltijoita, merkittäviä verkonkäyttäjiä sekä tasevastaavia. (Fingrid Oyj. 2020a)

Asetusta varten tutkimustyötä alitaajuussuojauksesta sekä verkkoon kohdistuvista muutoksista on tehnyt Nordic Analysis Group (NAG) sekä ENTSO-E. Ryhmässä on ollut toimijoita Pohjoismaiden kaikista kantaverkkoyhtiöistä. Tutkimuksessa oli tarkoituksena simuloida suurta tuotannon menetystä, ja pudotusportaita valikoitui yhteensä 11 kappaletta. Portaiden yhteenlaskettu tehon määrä oli lopulta 1800 MW:sta aina 6900 MW, joka vastaa suuruudeltaan Euroopan mantereen kaikkien tasasähköyhteyksien toimimista täydellä teholla.

Uuden verkkosäännön vuoksi kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n täytyy siirtää alitaajuussuojauksen päävastuu jakeluverkkoyhtiöille, jotta suojauksesta saadaan hieman pehmeämpi, jottei suojaus laukaise suoraan kriittistä kuormaa liian paljon. Alitaajuussuojan uudelleen järjestelyn tulee olla valmiina vuoteen 2022 mennessä, joten käytännön toteutukseen on varattu kaksi vuotta. Fingrid, jakeluverkkoyhtiöt ja kantaverkkoon liittyvä teollisuus tekevät omat valmistelunsa verkkosäännön vaatimusten mukaisesti. (Fingrid Oyj. 2020a)

Verkkosäätö edellyttää kaikkien kantaverkkoyhtiöiden toteuttavan kaksi erillistä suunnitelmaa: järjestelmän varautumissuunnitelma ja käytönpalautussuunnitelma. Verkkosäätö edellyttää, että

ympäri vuorokautinen toimintakyky sekä alitaajuussuojaus on toteutettu vuoden 2022 joulukuuhun mennessä. (Fingrid Oyj. 2020a)

7.2 Järjestelmän varautumis- ja käytönpalautumissuunnitelmat

Järjestelmän varautumissuunnitelmassa on manuaalisia toimenpiteitä ja automatisointia, joiden avulla pyritään estämään suurhäiriötilaksi eskaloituminen kantaverkon ollessa hätätilassa. Vastaavasti käytönpalautumissuunnitelman avulla voidaan ryhtyä palauttamaan järjestelmää sen joutuessa suurhäiriötilaan. Tässä tapauksessa käytetään myös manuaalisia toimenpiteitä sekä automatiikkaa. Energiavirasto on hyväksynyt Fingridin asettamat ehdotukset kesäkuussa 2019 edellä mainituista suunnitelmista. (Fingrid Oyj. 2020a)

Järjestelmän varautumissuunnitelma velvoittaa tietyt osapuolet osallistumaan alitaajuussuojausjärjestelmän toteutukseen. Nämä osapuolet ovat kaikki jakeluverkonhaltijat sekä suurjännitteisen jakeluverkon haltijat, joita on noin 90 kappaletta. Lisäksi ryhmään kuuluvat myös suoraan kantaverkkoon liittyneet sähkönkuluttajat ja niiden lukumäärä on noin 20 kappaletta. Viimeisenä osapuolena on 200 kappaleen kokoinen ryhmä nykyisiä ja uusia voimalaitoksia, jotka ovat yli 10 MW:n kokoisia tai niiden liittymispiste on kantaverkossa. Näillä osapuolilla on useita velvollisuuksia liittyen verkon tasapainon hallintaan. Niihin kuuluvat pätötehon, loistehon ja jännitteen säätö perustuen Fingridin ohjeistukseen ja vielä tuotannon ja kulutuksen irtikytkentä ovat eräitä velvoitteita varautumissuunnitelmassa. (Fingrid Oyj. 2020a)

Vastaavasti käytönpalautumissuunnitelman osapuoliin lukeutuvat kantaverkkoon liittyneet jakeluverkonhaltijat ja suurjännitteisen jakeluverkon haltijat, joilla keskikulutus on yli 30 MW. Niitä on noin 70 kappaletta ja noin 150 kappaleen ryhmä on nykyisiä sekä uusia voimalaitoksia, joilla keskikulutus on yli 30 MW tai liittymispiste on kantaverkossa. ympäri vuorokautisen toimintakyvyn ylläpitäminen edellyttää valvomon, merkittävien sähköasemien, käytönvalvontajärjestelmän ja tietoliikenteen käytettävyyttä. Puheviestintäjärjestelmä tulee toteuttaa Fingridille siten, että tulevat puhelut voidaan priorisoida.

Käytönpalautumissuunnitelma velvoittaa edellä mainittujen tilojen ja työkalujen käytettävyyden ylläpitämistä, jota tulee testata sekä valvoa vaatimusten mukaisesti. (Fingrid Oyj. 2020a)

7.3 Alitaajuussuojaus

Yleiset periaatteet tehokkaalle alitaajuussuojalle ovat seuraavat. Maantieteellisesti hajautettu kuorman laukaisu kantaverkon haltijoiden kesken sekä heidän omilla hallinnoimillaan alueilla. Samat lähtöarvot taajuudelle sekä taajuusportaille koskien sisäistä sähköverkkoa. Hyvä käytännön toteutus takaa sen, että alitaajuussuojaus kytkee vain tarvittavan määrän kuormaa irti verkosta. Kompensoi verkkoa kytkemällä irti tuotantoa, joka häiritsee taajuutta. Välttää ylitaajuutta, ylijännitettä ja transientti aaltoja (pulsseja), jotka voivat aiheuttaa lisää menetyksiä sähköntuotannossa. (Fingrid Oyj 2020a)

Suomen kokonaiskulutuksesta varustetaan 30 prosenttia alitaajuussuojilla, jotka kytkevät tarvittaessa automaattisesti kulutusta irti. Tämä toteutetaan taajuusportaiden kautta, jotta saadaan selektiivisyyttä lisättyä. Taajuuden laskiessa alle 49,5 Hz:n korjaavista toimenpiteistä huolimatta tilanne luokitellaan vakavaksi alitaajuushäiriöksi. Taajuuden laskun jatkaessa alle 49,0 Hz:n ryhdytään kytkemään sitä kuormaa irti, joka on ilmoitettu alitaajuussuojan piiriin. Käytännössä uudelleenjärjestelyssä hyödynnetään kantaverkkoyhtiön olemassa olevaa aineistoa. (Fingrid Oyj 2020a)

Suomessa on tällä hetkellä 10 % kokonaiskulutuksesta varustettu alitaajuussuojilla. Alkujaan alitaajuussuojaus on ollut jakeluverkon puolella, mutta kantaverkkoyhtiö otti päävastuun suojauksesta. Tällä kertaa alitaajuussuojaus joudutaan viemään toistamiseen kantaverkosta jakeluverkkoihin ja kantaverkkoon liittyneisiin sähköä kuluttaviin kohteisiin, koska kantaverkossa olemassa oleva suoja 110 kV:n katkaisijoilla ei riitä turvaamaan sähköverkkoa. Kuorma jaetaan siten, että alitaajuussuojilla on varustettu 30 % jakeluverkon kulutuksesta, joka vastaa noin 2000 MW. Kantaverkkoon liittyneestä teollisuudesta varustetaan 30 %, joka vastaa noin 1000 MW. Suojan kokonaistoiminta-aika saa olla enintään 150 ms:n taajuuden alituksesta. (Fingrid Oyj 2020a)

TAULUKKO 3. Alitaajuussuojauksen vaikutusten vertailua (mukaillen Fingrid Oyj 2018)

HYÖDYT	HAITAT
Tasapuolinen ratkaisu kaikelle kulutukselle	Vaatii paljon työtä toteutuksessa ja ajantasaisuuden seurannassa
Selektiivisyys, mahdollistaa kriittisten kuormien jättämisen ulkopuolelle	Vaikea seurata reaaliajassa laukeavan kuorman määrää

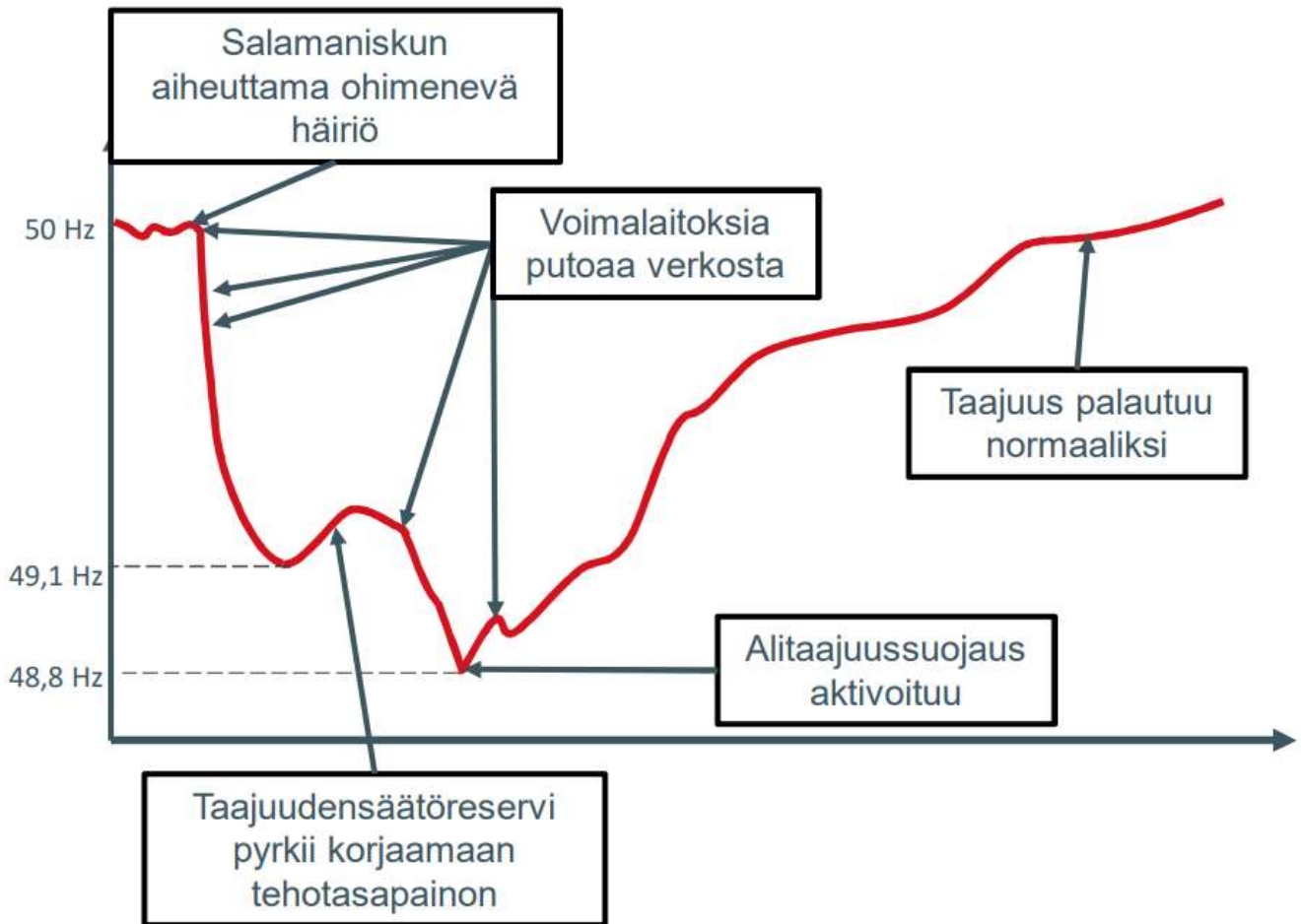
7.4 Miksi alitaajuussuojaus on tärkeä?

Yksi ennakkotapaus alitaajuussuojauksen tärkeydestä löytyy Iso-Britanniasta, jossa tapahtui vakava verkkohäiriö 9.8.2019. Virallisen raportin mukaan tapahtumat saivat alkunsa, kun salama iski ilmajohtoon ja saman aikaisesti lähistöltä irtosi useampi generaattori verkosta. Varavoimaa kytkettiin päälle 1000 MW:n verran, mutta verkosta irronnut teho olikin vähintään 2000 MW, johtuen useiden sähköasemien sekä pienempien generaattorien irtoamisesta.

Kuvasta 6 todetaan, että varavoimalla saatiin hetkellisesti nostettua taajuutta 49,1 Hz kohdalta. Kuitenkin verkosta puuttuva teho vaikuttaa edelleen verkkoon. Tuotantovaje heilautti taajuuden jatkamaan laskuaan alaspäin aina 48,8 Hz asti, jossa Iso-Britannian verkon automaattinen verkon suojaus (Low Frequency Demand Disconnection, LFDD) aktivoitui irrottaen verkosta kulutusta noin 900 MW:n verran. 900 MW:n irrotuksen johdosta 1,1 miljoonaa ihmistä menetti sähköt noin 15-45 minuutin ajaksi.

Suoja oli toteutettu kantaverkon asemilla ja tämän vuoksi kriittistä kuormaa irtosi verkosta, kuten raide-liikenne, terveys-, vesi- ja öljysektori. Lopputuloksena kulutuksesta laukaistiin 5 %, jotta jäljelle jäänyt 95 % osa sai pitää sähköt. Ilman alitaajuussuojausta Iso-Britannia olisi voinut ajautua vielä laajempaan verkkovikaan. (Government of United Kingdom 2020.)

KUVA 9. Taajuuskäyrässä tapahtuvat muutokset vakavan häiriön aikana Iso-Britanniassa 9.8.2019. (Fingrid 2020)



7.4.1 Taajuusportaiden toteutus

Fingrid on antanut kaksi vaihtoehtoa taajuusportaiden toteutuksesta, joiden tarkoituksena on ohjata niitä tarvitsevia osapuolia. Ensimmäinen vaihtoehto on kohdennettu suurille jakeluverkkoyhtiöille, joiden hallussa on monia sähköasemia. Tarkoituksena ei ole toteuttaa jokaista viittä taajuusportasta yhdellä sähköasemalla, vaan tärkeintä on, että koko jakeluverkko alueella sekä siihen liittyneet toiset jakeluverkot laukaisevat kulutusta taulukon 5 mukaisesti.

Toinen vaihtoehto on tarkoitettu pienille jakeluverkkoyhtiöille, joilla on vähän sähköasemia. Tavoitteena on saada näillekin alueille hajautettu suoja useammalle portaille. Aluksi toteutetaan ylimmäinen taajuusportas 48,8 Hz, jonka jälkeen voidaan laajentaa asteittain alemmille taajuusportaille. Joka

tapauksessa seuraava taajuusporras voidaan ottaa käyttöön vasta, kun edelliseen on kytketty vähintään 5 % kulutuksesta. Mahdollista tosin on käyttää pelkästään yhtä taajuusporrasta 48,8 Hz, jolloin tämä porras laukaisee vähintään 30 % koko jakeluverkon kokonaiskulutuksesta. (Fingrid Oyj 2020a.)

Taulukossa 3 on esitelty nykyinen alitaajuussuoja. Taajuusportaita on vain kaksi ja kokonaiskulutusta vain 10 %, joten nykyisellään alitaajuussuoja ei ole riittävän kattava sekä mukana voi olla liian paljon kriittistä kuormaa. Uusi tavoiteltava asettelu koostuu viidestä taajuusportaasta, joiden avulla voidaan jakaa kulutuksen laukaisua porrastettuun tyyliin. Kokonaiskulutuksen määrä kasvaa huomattavasti laukaistavan kuorman kasvaessa 30 %. Kuitenkin kriittistä kuormaa voi jäädä kuorman ulkopuolelle enemmän, sillä alitaajuussuojan piiriin on voitu tuoda keskitetysti vähemmän kriittistä kuormaa.

TAULUKKO 4. Alitaajuudesta johtuvan irtikytkennän nykyiset asetelut (mukaihen Fingrid Oyj 2020).

NYKYINEN ALITAAJUUSSUOJA					
TAAJUUSPORRAS	TAAJUUS		SUOJAN KOKONAISTOIMINTA-AIKA		KOKONAISKULUTUKSESTA
	NOPEA	HIDAS	NOPEA	HIDAS	
1	48,5 Hz	48,7 Hz	0,15 s	20 s	5 %
2	48,3 Hz	48,5 Hz	0,15 s	20 s	5 %

TAULUKKO 5. Alitaajuudesta johtuvan irtikytkennän asettelun tavoitteet (mukaihen Fingrid Oyj 2020).

ALITAAJUUSSUOJAN ASETTELU TAVOITE			
TAAJUUSPORRAS	TAAJUUS	SUOJAN KOKONAISTOIMINTA-AIKA	KOKONAISKULUTUKSESTA
1	48,8 Hz	0,15 s	5 %
2	48,6 Hz	0,15 s	5 %
3	48,4 Hz	0,15 s	5 %
4	48,2 Hz	0,15 s	5 %
5	48 Hz	0,15 s	10 %

7.4.2 Fingridin ohjeistuksia

Verkkoyhtiöt voivat hyödyntää olemassa olevaa materiaalia sekä kohteita, jotka ovat tehonrajoitussuunnitelmassa. Tärkeimmät kulutuskohteet ovat viimeisellä portaalla. Alitaajuussuojauksen tulee suodattaa sellaiset vikatapaukset ja poikkeustilanteet, jotka eivät koske järjestelmätason tehonvajaustilannetta. Vastaavia vikatilanteita ovat esimerkiksi oikosulut tai maasulut, jotka aiheuttavat ohimeneviä jännitekuoppia. Lisäksi alitaajuussuoja ei saa laueta jälleenkytkentöjen välillä olevassa jännitteettömässä ajassa, minkä vuoksi suositellaan alijännitelukitukseksi $0,4-0,6 * U_n$. Joissakin tilanteissa voi olla tarvetta myös nollijännitelukitukselle, jotta voidaan estää alitaajuusreleen toiminta jakeluverkon maasulun aikana. Alitaajuussuojan lauettua voidaan palautuskytkennät suorittaa manuaalisesti Fingridin kanta-verkkokeskukselta annetulla luvalla. (Fingrid 2020a.)

7.5 Alitaajuussuojan toimintakyvyn testaaminen

Alitaajuussuojausta tulee testata enintään kuuden vuoden välein. Suojan kokonaistoiminta-aika on 150 ms, joten tämän myötä releen toiminta-aika tulee olla 100 ms. Toiminta-ajan testaus alkaa katkaisijoiden keloille lähteviltä liittimiltä, jolloin laukaisuapureleet ovat mukana. Releen toiminta testataan kahdella taajuusmuutoksella. Esimerkiksi asettelun ollessa 48,50 Hz, niin ensimmäinen muutos on 50,00 Hz → 48,45 Hz ja toinen muutos on 48,55 Hz → 48,45 Hz. (Fingrid Oyj, 2020c)

TAULUKKO 6. Alitaajuussuojan testialueen rajaukset (mukaillen Fingrid Oyj 2020).

TESTIKOESTUKSET JÄRJESTELMÄSSÄ RELEKOHTAISESTI
Releen toiminta-aika ilman katkaisijan laukeamista
Releen havahtumis- ja palautumistaajuus
Kaikkien käyttöön tulevien toimintaportaiden taajuusrajat ja toiminta-ajat
Kaikkien releessä käytössä olevien koskettimien ja sisääntulojen toiminta
Oikea toiminta alijännitetilanteessa
Nollijännitelukitus, jos toteutettu
Indikointien oikeellisuus

8 TAAJUUSRELE

8.1 Staattinen- ja sähkömekaaninen rele

Alitaajuussuojaukseen käytetään kahta perustyyppiä. Ensimmäinen on staattinen rele (SFF) ja toinen sähkömekaaninen rele (CFF). Seuraavaksi käydään näiden kahden releen ominaisuuksia. Sähkömekaanista relettä on alkujaan käytetty suoraan päävirtapiiriin kytkettynä ensioreleinä, joissa virran ylittäessä asetteluarvon vapauttivat välitangon avulla katkaisijan laukaisujousen. Myöhemmin on siirrytty käyttämään mittamuuntajien toisioon liitettäviä toisioreleitä, joilla päästään parempaan taloudelliseen ja tekniseen tulokseen. Toisioreleiden etuna on koestuksen mahdollisuus käytön aikana, jota ei ensioreleillä voida toteuttaa. (Pylväinen 2013.)

Mekaaniset releet ovat tehollisarvoa mittaavia koneistoja. Niissä on hitaasti liikkuvia osia, jotka vaikuttavat siihen, ettei niillä ole mahdollista mitata vaihtosuureiden hetkellisarvoja. Vikavirrassa oleva tasakomponentti voi aiheuttaa mekaanisen releen havahtumisen asetteluarvoa pienemmällä virralla, joka aiheuttaa suojauksen epäselektiivisen toiminnan. (Pylväinen 2013.)

Staattinen rele ottaa apuenergian erillisestä apusähköliitännästä, jolloin mittauspiirin kuormitus jää vähäiseksi. Tämän vuoksi lähtöreleenä voidaan käyttää apurelettä, jossa on riittävästi koskettimia niin laukaisuun kuin hälytykseenkin. Lähtökoskettimilla voidaan suoraan ohjata katkaisijaa, jolloin ei erillisiä välireleitä tarvita. Välireleiden käyttö voi hidastaa suojausta 20...40 ms. (Pylväinen 2013.)

Staattinen rele liitetään sovitusmuuntajan välityksellä mittamuuntajan toisiopiiriin. Sovitusmuuntajan avulla virta- ja jännitesuureet muutetaan elektroniikalle sopiviksi. Sovitusmuuntaja suojaa elektroniikkaa ylivirtojen ja ylijännitteiden muodostamalta termiseltä ja dynaamisilta vaikutuksilta. (Pylväinen 2013.)

8.2 ABB:n tuotteista yleisesti

ABB:n Vaasan tehtaan tuotteita on käytetty taajuussuojaukseen Suomessa noin 50 vuoden ajan. Taajuussuojauksen omaavat tuoteperheet ovat RE615-, RE-620-, Re630-, RE640-sarja ja RED500-sarja/Multi. Kuvasta 11 selviää, että verkkosäännön vaatima 150ms:n kokonaistoiminta-aika toteutuu lähes kaikilla tuotteilla.

ABB:n tiedotuksen mukaan 630-sarjalla on kuitenkin mahdollista lyhentää 240ms:n toiminta-aikaa. Käytännössä toteutus hoidetaan siten, että 630-aseilla asennetaan mittauskenttään esimerkiksi REU615-releen, joka omaa viisi portaisen taajuussuojan. Releen huomattaessa muutoksia taajuudessa, se lähettää IEC61850/GOOSE-yhteyden kautta laukaisukäskyn valituille portaille. Tämän toteutuksen kautta 630-releen kokonaistoiminta-aika muodostuu seuraavasti: 615-releen viive 80ms + GOOSE-viive noin 5ms + 630-releen taajuussuojan sisäinen toiminta-aika 10ms + kosketinviive 20ms + katkaisijaviive noin 50ms. Tästä yhteenlaskettu aika tulee noin 160-170ms:n haarukkaan.

Näin menetellessä saadaan suojan kokonaistoiminta-aika jo lähelle vaatimusta. Lisäksi 630-sarjalla on erityinen piirre, kun taajuus putoaa noin 1 % toiminta-aika on 190ms vaikkakin asettelu olisi 80ms. Vastaavasti taajuuden pudotessa nopeammin, rele toimii kuten pitääkin 80ms asettelulla. (ABB 2020c.)

TAULUKKO 7. ABB-suojareleiden toiminta-aikoja. (ABB 2020c)

	Releen viive + katkaisijan toiminta-aika	Kokonaistoiminta-aika
RE615-sarja	80ms+50ms	130ms
RE620-sarja	80ms+50ms	130ms
RE630-sarja	190ms+50ms	240ms
RE640-sarja	80ms+50ms	130ms
RED500-sarja/Multi	100ms+50ms	150ms

8.3 Relion 615-sarja

ABB:n tuotevalikoimasta löytyvä Relion 615-sarja pohjautuu nimensä mukaisesti Relion tuoteperheeseen, joka on tarkoitettu sähköjärjestelmien suojaamiseen ja ohjaamiseen. Relion-tuotteet käyttävät IEC 61850-kommunikaatiostandardia. Relion 615-sarjan releitä käytetään suojaamaan muuntajia, moottoreita, generaattoreita ja syöttöjohtoja. 615-sarjan releille tyypillisiä ominaisuuksia ovat releen kompakti muoto sekä plug-in-tyyppinen asennus, joka nopeuttaa asennusta ja testaamista. 615-tuotteita on muun muassa seuraavanlaisia: REF615 johtolähtöjen suojaukseen, RET615 muuntajien suojaukseen, REU615 jännitesuojaukseen ja REM615 moottorien suojaukseen. (ABB 2020c)

REF615 on suunniteltu toimimaan pääsuojana johtolähdöissä, kun kyseessä on ylivirta- tai maasulkuvika. Tuotteesta on 12 eri vakiokokoonpanoa, joka vaihtelee käyttäjän tarpeen mukaan sekä verkon maadoitustavan mukaan. Tuotteen yhtenä etuna on maasulun sekä oikosulun nopea paikannus. Maasulkusuojaukselta on mahdollista laajentaa yksilöllisellä admittanssiin pohjautuvalla suojauksella, jolloin selektiivisyys ja herkkyys kasvaa. (ABB. 2020a.)

REU615 releen pääpiste on jännitteen ja taajuuden suojaamisessa. Lisäksi REU615 käytetään myös jännitteen säätelyssä. Tästä mallista on saatavilla kaksi vakiokokoonpanoa, joista ensimmäinen on suunniteltu yli- ja alijännitteen valvontaan kiskostossa, kulutuksen irtikytkentään ja palauttamiseen. REU615 voidaan suojata myös generaattoreita ali- tai ylitaajuudelta. Toisella vakioasettelulla säädellään muuntajien jännitettä joko automaattisesti tai manuaalisesti. (ABB. 2020b.)

KUVA 10. ABB:n tuotevalikoimasta löytyvä REU615 rele



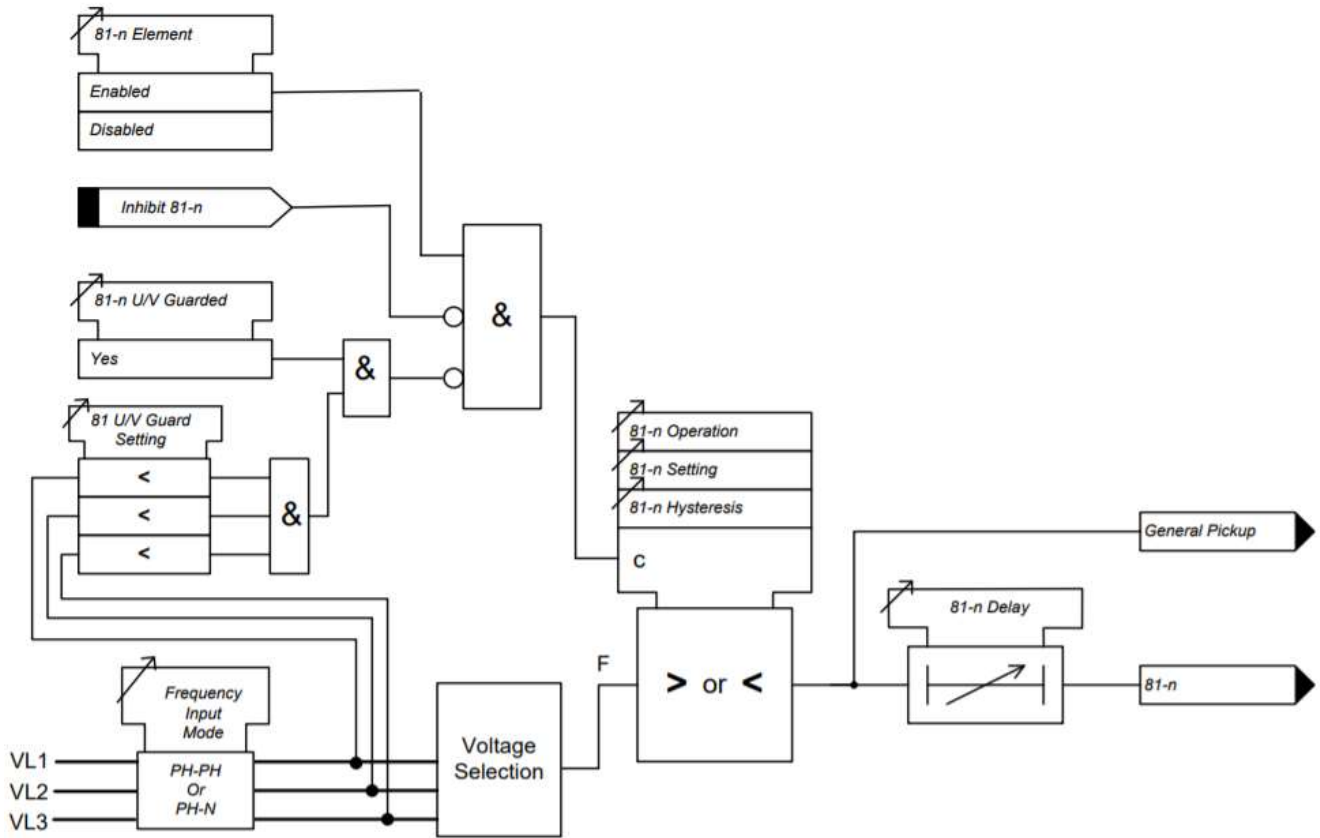
8.4 Reyrolle, Argus 7SR158-rele

Argus 7SR158 releitä käytetään pääosin automaattiseen kuorman irtikytkentään turvaamaan verkon toimintaa mittaamalla verkon taajuutta sekä jännitettä. Käyttökohteita tälle releelle ovat muun muassa seuraavat: 4-portainen ali- ja ylijännitesuojaus, 6-portainen alitaajuussuojaus, vektorivaihto saarekekäytössä. (Siemens 2020.)



KUVA 11. Siemensin tuotevalikoimaan kuuluva Reyrolle-sarjan rele. (Siemens 2020)

Alitaajuussuojareleet asennetaan tavallisesti muuntajan lähtöihin tai teollisuuden omilla sähköasemilla, koska näistä kohdista on hyvä seurata taajuutta kokoojakiskoissa. Kuorman irtikytkentä tapahtuu kokoojakiskostossa. Kuvassa 12 osoitetaan yli- ja alitaajuuden valvontaa logiikkakaavion pohjalta. Logiikkakaaviosta nähdään, kuinka alijännitteen mahdollisuus on poissuljettu erillisellä valvontaosiolla. (Siemens 2020.)



KUVA 12. Logiikkakaavio yli- ja alitaajuuden valvonnasta. (Siemens 2020)

9 POHDINTA

Työn tavoitteena oli osoittaa alitaajuussuojauksen merkitys sähkövoimajärjestelmän tasapainolle. Lisäksi pyrkimyksenä oli selvittää Euroopan Komission asetuksen (2017/2196) aiheuttamat muutokset alitaajuussuojauksen uudelleen järjestelyssä. Työssä esiteltiin muutamia käytössä olevia suojaruleitit. Työ toteutettiin tutkielmana, joten kirjallisuutta käytettiin paljon, jota löytyikin paljon niin suomeksi kuin englanniksi.

Työn suurimmaksi haasteeksi osoittautui aiheessa pysyminen, sillä sähkövoimajärjestelmä on laaja kokonaisuus ja alitaajuussuojaukseen keskittyminen oli vaikeaa ilman siihen liittyviä aiheita. Työn aloittaessani kirjallisuuden runsaus yllätti minut, mutta tärkeimmät lähteet työssä olivat Elovaara & Haaran kirjasarja Sähköverkot 1&2 sekä kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n alitaajuussuojauksen sovellusohje ja Euroopan Komission asetuksen 2017/2196 lakiteksti.

Työssä saavutettiin tarpeeksi kattava sisältö, jolla tuodaan esille alitaajuussuojauksen merkitys sähkövoimajärjestelmän toiminnalle. Työssä verrattiin onnistuneesti alitaajuussuojaukseen tulevia muutoksia nykyhetkestä tulevaan tilanteeseen Suomessa. Esimerkkitapauksen avulla saatiin hieman konkreettisempi katsaus alitaajuussuojauksen toimintaan ja tällä saatiin myös osoitettua, miksi muutoksia haluttiin kehittää nykyiseen suojaukseen. Suojausreuleista valittiin muutama kappale, jotka ovat Suomessakin käytössä.

Lopputuloksena alitaajuussuojauksessa päävastuun kantavat muutoksien jälkeen siirtoverkonhaltijat, jakeluverkonhaltijat, merkittävät verkonkäyttäjät sekä tasevastaavat. Suojauksen jalkauttamisella kantaverkkoyhtiö Fingridin hartioilta seuraavan portaalle toimijoille kohdennetaan paremmin kulutuksen laukaisua vähemmän kriittisiltä alueilta.

LÄHTEET

ABB. 2020a. tuotelehti REF615. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS756379&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Viitattu. 15.09.2020.

ABB. 2020b. tuotelehti REU615. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS757058&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Viitattu. 15.09.2020

ABB. 2020c. 615-relesarjan tuotelehti. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS759077&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Viitattu 15.09.2020

Darbandsari, A. & Amraee, T. 2018. Optimal Setting of Under Frequency Load Shedding Relays in Low Inertia Networks. Conference paper. Www-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/334765553_Optimal_Setting_of_Under_Frequency_Load_Shedding_Relays_in_Low_Inertia_Networks. Viitattu 15.07.2020

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I., 2.painos. Helsinki: Otatieto

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II., 1.painos. Helsinki: Otatieto

Elovaara, J & Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet, 4.painos

Energiavirasto. 2020. Verkkotoiminnan julkaisut. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut> Viitattu. 20.05.2020

Energiavirasto. 2018. Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2018. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>. Viitattu 19.05.2020.

ENTSO E. 2020. Reports on future system inertia. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/utvikling-av-kraftsystemet/nordisk-frekvensstabilitet/future-system-inertia-phase-2.pdf>. Viitattu. 15.07.2020.

Eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö (ENTSO-E). 2020. Www-dokumentti. Saatavissa: https://www.entsoe.eu/network_codes/er/. Viitattu. 14.04.2020.

Fingrid Oyj. 2020a. Alitaajuudesta tapahtuvan kulutuksen irtikytkenän toteutus Suomessa. Sovellusohje. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/alitaajuussuojauksen-sovellusohje-5.8.2019.pdf>. Viitattu 6.6.2020

Fingrid Oyj. 2020b. Emergency and Restoration verkkosääntö - vaatimukset ja toimeenpano Suomessa Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/nc-er-toimeenpano-perustietopaketti-20200421.pdf>. Viitattu. 15.09.2020

Fingrid Oyj. 2020c. Fingrid Oyj:n ehdotus asetuksen (EU) 2017/2196 sähköverkon hätätilaa ja käytön-palautusta koskevasta verkkosäännöstä 43 artiklan 2 kohdan mukaiseksi testisuunnitelmaksi. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/alitaajuussuojauksen-sovellusohje-5.8.2019.pdf>. Viitattu 12.05.2020

Fingrid Oyj. 2020d. Reservimarkkinat. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>. Viitattu 06.19.2020

Government of United Kingdom. 2020. Great Britain power system disruption on 9 August 2019 Energy Emergencies Executive Committee (E3C): Final report. Www-dokumentti. Saatavissa: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/855767/e3c-gb-power-disruption-9-august-2019-final-report.pdf. Viitattu 30.06.2020

Government of United Kingdom. 2020. Press release. Measures to make Britain's power network more resilient planned, after August power outage. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gov.uk/government/news/measures-to-make-britains-power-network-more-resilient-planned-after-august-power-outage>. Viitattu 30.06.2020

Laajeneva alitaajuussuojaus on sähköjärjestelmän lopullinen lukko. Fingrid-lehti. 2019a. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/laajeneva-alitaajuussuojaus/>. Viitattu 6.5.2020

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Otatieto

Pylväinen, J. 2013. Relesuojauksen kehitys johto- ja moottorisuojauksessa. Insinööriyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63211/Insinoorityo_Jani_Pylvainen.pdf?sequence=1 Viitattu 7.8.2020

Siemens. 2020. 7SR11 & 7SR12 Argus Overcurrent Relay technical manual. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109747321/reynolle-directional-overcurrent-protection-argus-7sr12-?dti=0&lc=en-US>. Viitattu 17.09.2020

Svenska Kraftnät. 2020. Map of the national grid. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.svk.se/en/national-grid/map/>. Viitattu 23.06.2020.

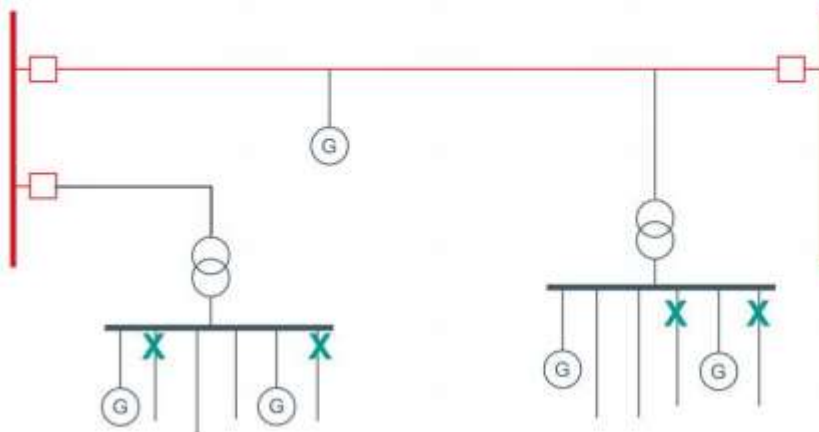
Työ- ja elinkeinoministeriö. 2020. Sähkömarkkinat. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/sahko-markkinat>. Viitattu. 18.05.2020.

Verkkosäntö sähköverkon hätätilasta ja käytönpalautuksesta. Fingrid-lehti. 2019b. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/verkkosaanto-sahkoverkon-kaytonpalautuksesta/>. Viitattu. 07.03.2020.

TEHOVAJAUSSUOJAUKSEN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT

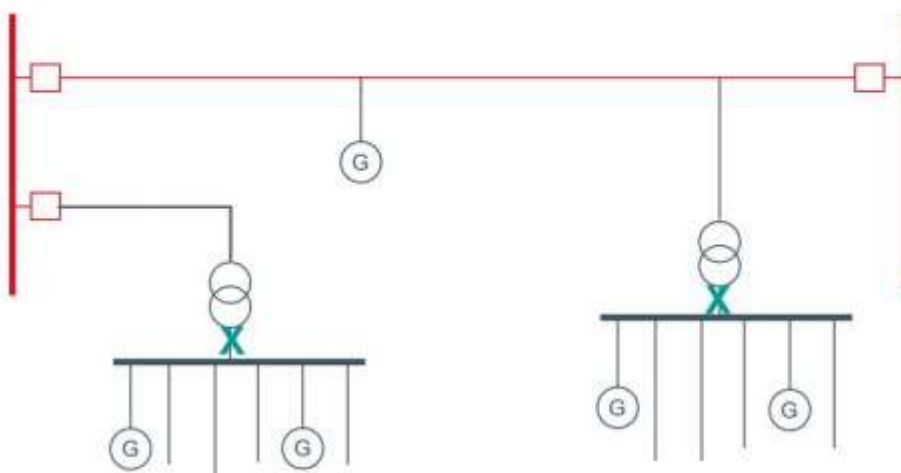
Toteutusvaihto 1 **SUOSITELTAVA**

- tehovajaussuojaus jakeluverkossa keskijännitelähdöissä (tai alempana)



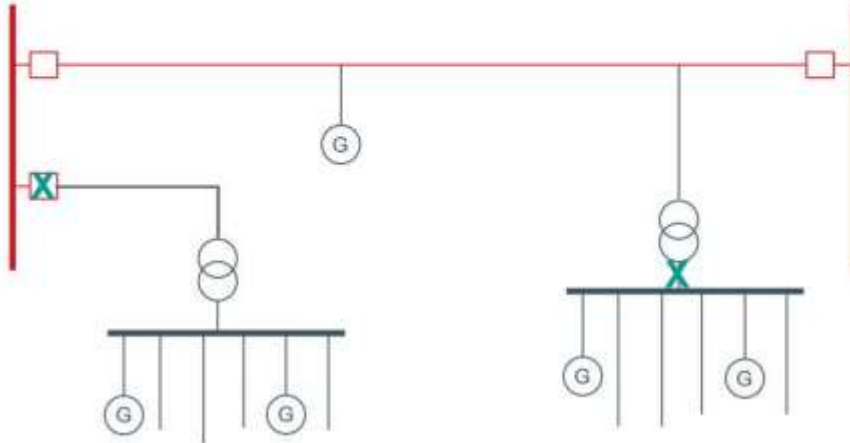
Toteutusvaihto 2 **HYVÄKSYTTÄVÄ**

- tehovajaussuojaus kokonaan tai osittain jakeluverkossa asematasolla



Toteutusvaihto 3 **HYVÄKSYTTÄVÄ**

- tehovajaussuojaus osittain kantaverkon säteittäisillä johdoilla



Toteutusvaihto 4 **EI MAHDOLLINEN**

- tehovajaussuojaus osittain kantaverkon runkojohdoilla

