



Aurinkovoimaloiden liittäminen osaksi sähkön reservimarkkinoita

Topi Kankaansyrjä

Opinnäytetyö, AMK

Joulukuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Kankaansyrjä, Topi

Aurinkovoimaloiden liittäminen osaksi sähkön reservimarkkinoita

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Joulukuu 2024, 78 sivua

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää ratkaisu, jolla toimeksiantajan – Solarigo Systems Oy:n omistamat aurinkovoimalat voidaan liittää osaksi sähkön reservimarkkinoita. Reservimarkkinoita käytetään sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainotukseen, ja niitä ylläpitää Suomessa kantaverkkooyhtiö Fingrid.

Osallistumalla reservimarkkinoille toimeksiantaja saa suoraan taloudellista hyötyä reservien ylläpidosta maksettavien korvausten muodossa, mutta reservien ylläpitoon osallistuvien voimaloiden tulee kuitenkin täyttää Fingridin asettamat tekniset vaatimukset. Aihe rajattiin koskemaan reservien ylläpitoon osallistuvien aurinkovoimaloiden ja niiden ohjaamiseen käytetyn ohjausjärjestelmän vaadittuja teknisiä ominaisuuksia ja erilaisia ratkaisuja näiden ominaisuuksien saavuttamiseksi.

Työ toteutettiin tutkimuksellisenä kehittämistyönä. Tutkimuksellisen kehittämistyön periaatteiden mukaisesti kerättiin tutkimuksen aineisto, pääosin Fingridin julkisista dokumenteista reservien teknisiin vaatimuksiin liittyen. Tutkimuksellisessa kehittämistyössä päätavoite on saavuttaa konkreettinen ratkaisu johonkin käytännön ongelmaan hyödyntämällä jo olemassa olevaa tietoa ja luomalla myös uutta tietoa.

Työssä perehdyttiin reservituotteille asetettuihin teknisiin vaatimuksiin ja analysoitiin näiden vaatimusten keskeisimmät haasteet aurinkovoimaloiden näkökulmasta. Tämän pohjalta määriteltiin ohjausjärjestelmältä vaadittavat ominaisuudet ja kehitettiin ratkaisuja näiden ominaisuuksien saavuttamiseksi. Lisäksi eri reservimarkkinapaikkojen välillä suoritettiin vertailua teknisestä näkökulmasta.

Tuloksina saatiin kuvaus reservien ylläpitoon käytettävän ohjausjärjestelmän vaadituista ominaisuuksista ja ratkaisuehdotuksia, joilla nämä ominaisuudet voidaan saavuttaa. Työssä esitellään kaksi toimintaperiaatetta eroavaa yksittäiselle voimalalle asennettavaa kokonaisuutta, sekä tehdään vertailua näiden kustannusten ja toteutuskelpoisuuden suhteen.

Työssä esitettyjä ratkaisuja ei päästy käytännössä testaamaan ajan puutteen vuoksi, mutta työn tulosten pohjalta on hyvät edellytykset jatkokehitykselle, johon myös käytännön testaaminen sisältyy.

Avainsanat (asiasanat)

Aurinkoenergia, sähkön reservimarkkinat, hajautettu ohjausjärjestelmä

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Kankaansyrjä, Topi

Incorporating solar plants to the electricity reserve markets

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, December 2024, 78 pages

Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The objective of this thesis was to develop a solution for integrating solar power plants owned by the employer – Solarigo Systems Oy, into the reserve electricity markets. The reserve markets are used to balance the consumption and production of electricity, and they are maintained by the TSO Fingrid.

By participating in the reserve markets, the employer can gain economic benefits through the compensations that are given for participating in maintaining the reserves. However, power plants participating in the upkeep of reserves must meet the technical requirements. The scope of the study is limited to the required features of the solar plants and their control systems for fulfilling these technical requirements.

The thesis was conducted as a research and development project. Following the principles of research and development, the research material was primarily collected from Fingrid's publicly available documents regarding the technical requirements for power plants participating in the upkeep of the reserves. The main goal of research and development projects is to provide practical solutions to real-world problems by utilizing existing knowledge while generating new insights.

The study focused on the technical requirements for the different reserve products and analyzed the most significant challenges these requirements pose for solar plants. Based on this analysis, the necessary features for the control systems were defined and different solutions to fulfill these requirements were developed. Additionally, a comparison of the different reserve products from a technological standpoint was conducted.

The results of the thesis include a detailed description of the required features from the control system used to upkeep reserves and proposed solutions to achieve these features. The thesis presents alternative configurations for individual power plants and compares them in terms of costs and feasibility

Due to time constraints, the proposed solutions could not be tested in practice. However, the results of this study provide a strong foundation for further development, including practical testing, to validate the proposed solutions.

Keywords/tags (subjects)

Solar Energy, electricity reserve markets, distributed control system

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Työn tausta ja rajaukset	4
1.2	Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset	6
1.3	Toimeksiantajan esittely	6
2	Suomi osana Pohjoismaista sähköjärjestelmää	7
2.1	Pohjoismainen synkronialue	7
2.2	Suomen sähköjärjestelmä	7
2.2.1	Kantaverkko	7
2.2.2	Jakeluverkot	8
3	Sähkömarkkinat	8
3.1	Sähkömarkkinoiden osapuolet.....	8
3.2	Sähkön eri markkinapaikat.....	9
3.2.1	Johdannaismarkkinat	9
3.2.2	Vuorokausimarkkinat.....	10
3.2.3	Päivänsisäiset markkinat.....	10
3.2.4	Taseselvitys	10
4	Tasehallinta ja reservimarkkinat	10
5	Reservituotteet	11
5.1	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	12
5.2	Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	12
5.3	Nopea taajuusreservi (FFR)	13
5.4	Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)	13
5.5	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	14
6	Reservituotteiden tekniset vaatimukset	14
6.1	Reservituotteiden hyväksyttämismenettely	14
6.2	Taajuusohjatut reservituotteet (FCR-N ja FCR-D)	16
6.2.1	FCR-N normaalitilan vaste, kestävyys ja dynaaminen suorituskyky	16
6.2.2	FCR-D normaalitilan vaste, kestävyys ja dynaaminen suorituskyky	18
6.2.3	Taajuusohjattujen reservituotteiden säädön stabiilisuus	24
6.2.4	Taajuusohjattujen reservituotteiden säädön lineaarisuus.....	30
6.3	FFR tekniset vaatimukset	31
6.3.1	Vaatimukset nopean taajuusreservin aktivoinnille ja deaktivoinnille.....	31
6.3.2	Nopean taajuusreservin testisekvenssi.....	33

6.4	Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) tekniset vaatimukset	34
6.4.1	aFRR aktivointisignaali	34
6.4.2	aFRR aktivoinnin nopeus ja aktivoinnin tarkkuus.....	35
6.4.3	aFRR säätökokeen sekvenssi	36
6.5	Reservikapasiteetin aggregointi useista kohteista.....	37
6.5.1	Taajuusohjattujen reservituotteiden aggregointi	37
6.5.2	Nopean taajuusreservin aggregointi	38
6.5.3	Automaattisen taajuuden palautusreservin aggregointi.....	39
6.6	Reservituotteiden mittauslaitteiden vaatimukset, tallennettavat historiatiedot ja tiedonvaihto Fingridin kanssa	39
6.6.1	Taajuusohjattujen reservituotteiden (FCR-N ja FCR-D) mittauslaitteiden vaatimukset ja tallennettavat historiatiedot	39
6.6.2	Nopean taajuusreservin mittausvaatimukset ja historiatiedot.....	42
6.6.3	Automaattisen taajuuden palautusreservin mittausvaatimukset ja historiatiedot.....	43
6.6.4	Tiedonvaihto reservitoimittajan ja Fingridin välillä	43
7	Aurinkovoimalan käyttö reservimarkkinoilla	45
7.1	Aurinkovoimalan komponentit	45
7.2	Sääriippuvien kohteiden erityispiirteet reservituotteena	46
8	Mahdollisuudet käytännössä	49
8.1	Ohjausjärjestelmä	49
8.1.1	Alajärjestelmän toiminta	50
8.1.2	Yläjärjestelmän toiminta.....	50
9	Markkinapaikan valinta	50
9.1	Taajuusohjatun käyttöreservin ylläpito	51
9.2	Taajuusohjatun häiriöreservin ylläpito	51
9.3	Nopean taajuusreservin ylläpito	52
9.4	Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpito	53
10	Alajärjestelmän suunnittelu	54
10.1	Aurinkovoimalan peruskomponentit	54
10.1.1	Aurinkopaneelit	54
10.1.2	Invertteri ja loggeri	55
10.1.3	Keskitetty suojaus ja voimalan häiriösuojaus.....	55
10.1.4	Internetyhteyden luominen.....	55
10.2	Itsenäiseen säätön kykenevän alajärjestelmän suunnittelu	56
10.2.1	Alajärjestelmän ohjausyksikkö	56
10.2.2	Sähkönlaatumittari	57

10.2.3	Alajärjestelmä nopean taajuusreservin ylläpitoon.....	57
10.3	Ylätason ohjaukseen perustuvan alajärjestelmän suunnittelu.....	58
10.4	Saatavilla olevan pätötehon laskenta	58
10.5	Datan käsittely ja tiedonsiirto alajärjestelmässä	59
10.6	Tiedonsiirto alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välillä.....	59
11	Yläjärjestelmän suunnittelu	60
12	Reservikapasiteetin kerääminen	61
13	Tulokset.....	62
13.1	Erilaiset alajärjestelmäkoonpanot	62
13.1.1	Itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä.....	62
13.1.2	Nopean taajuusreservin ylläpitoon osallistuva alajärjestelmä.....	65
13.1.3	Ylätasolta tulevan ohjaussignaalin perusteella aktivoituva alajärjestelmä.....	66
13.1.4	Itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä + ylätason ohjaus.....	68
13.1.5	Keskitetyn suojauksen ja häiriösuojauksen integrointi alajärjestelmään	69
13.2	Yläjärjestelmän toteutus ja alajärjestelmän ohjelmointikulut	69
13.3	Yhteenveto	70
13.4	Jatkokehitys.....	71
14	Pohdinta.....	72
Lähteet		74
Liitteet		77
Liite 1.	Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän toiminta.....	77
Liite 2.	Ylätason signaalilla ohjattavan alajärjestelmän toiminta	78
 Kuviot		
Kuvio 1.	Sähkömarkkinoiden markkinapaikat.....	9
Kuvio 2.	Reservituotteiden hyväksyttämisen prosessi	15
Kuvio 3.	FCR-N testaussekvenssi, esimerkki.	17
Kuvio 4.	FCR-D ylös ramppitesti.	20
Kuvio 5.	FCR-D alas ramppitesti.	21
Kuvio 6.	FCR-D suorituskyky rampilla nro. 5.	22
Kuvio 7.	FCR-D deaktivoinnin vaatimus.	24
Kuvio 8.	Esimerkkireservituotteen vaste siniaaltotestin aikana.	26
Kuvio 9.	Esimerkki Nyquist-käyrästä ja stabiilisuusvaatimuksesta.	29
Kuvio 10.	Sovitettu sinikäyrä ja todellinen tehovaste.	31
Kuvio 11.	FFR ramppimainen testisignaali.	33

Kuvio 12. FFR askelmainen testisignaali, kun valittu aktivointitaajuus on 49,6 Hz.	34
Kuvio 13. aFRR aktivoinnin miniminopeus (Automaattisen taajuuden palautusreservin	35
Kuvio 14. aFRR testisekvenssi.	36
Kuvio 15. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän kytkennät.	63
Kuvio 16. Ylätason ohjaukseen perustuvan alajärjestelmän kytkennät.	67

Taulukot

Taulukko 1. FCR-N testaussekvenssi	16
Taulukko 2. FCR-D testaussekvenssi.	19
Taulukko 3. FCR-X stabiilisuustestin jaksonajat	25
Taulukko 4. Sähköjärjestelmän siirtofunktion parametrit.	28
Taulukko 5. FFR aktivointiajat.	32
Taulukko 6. FFR vähimmäiskesto	32
Taulukko 7. aFRR testisekvenssi.....	36
Taulukko 8. Aggregoinnin joustavuuden tasot	38
Taulukko 9. Taajuusohjattujen reservituotteiden mittauksen tarkkuus	39
Taulukko 10. FCR mittaukset.	41
Taulukko 11. FFR mittaukset.....	42
Taulukko 12. aFRR. Mittaukset.	43
Taulukko 13. Keskeiset käsitteet.....	47
Taulukko 14. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän komponentit.	63
Taulukko 15. Keskitetyn taajuuden mittauksen perusteella säätävä alajärjestelmä.	65
Taulukko 16. Ylätason ohjaussignaaliilla aktivoituvan alajärjestelmän komponentit.....	66
Taulukko 17. Itsenäiseen säätöön kykenevän ja ylätason ohjaukseen kykenevän alajärjestelmän komponentit.....	68

1 Johdanto

1.1 Työn tausta ja rajaukset

Käynnissä olevan energiamurroksen myötä uusiutuvien energialähteiden käytön määrä on jatkuvasti kiihtyvässä kasvussa. Säästä riippuvan sähköntuotannon määrän kasvun vuoksi sähkön tuo-

tannon ja kulutuksen pitäminen tasapainossa on vaikeutunut. Tuotannon ja kulutuksen tasapainottelua tehdään, koska näiden poiketessa sähköverkon taajuudessa esiintyy poikkeamia, joiden seurauksena laitteet eivät toimi oikein tai jopa rikkoutuvat. Tuotannon ja kulutuksen tasapainotus pyritään tekemään edellisenä päivänä sähköpörssissä tuottajien ja kuluttajien ennusteiden perusteella, mutta käyttötunnin aikaisia poikkeamia esiintyy siitä huolimatta, esimerkiksi siirtoyhteyksien yllättävän vikaantumisen vuoksi. Käyttötunnin aikaisten tuotannon ja kulutuksen tasapainotilan poikkeamien hallintaan käytetään säätökykyisiä reservejä, joita Fingrid hankkii ylläpitämiltään reservimarkkinoilta.

Reservien ylläpidosta maksetaan reservitoimittajille korvauksia, ja reservimarkkinoille osallistuminen tuokin säätökykyisten kulutus- ja tuotantolaitteistojen haltijoille houkuttelevan lisäansaintamahdollisuuden. Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja Solarigo Systems Oy omistaa merkittävät määrät aurinkosähköä tuottavia voimaloita ja onkin täten myös kiinnostunut mahdollisuuksista reservimarkkinoille osallistumiseen hallussaan olevilla resursseilla.

Reservimarkkinoille osallistumisen edellytyksenä on, että ne resurssit, joilla reservejä aiotaan ylläpitää täyttävät niille asetellut tekniset vaatimukset. Tämä opinnäytetyö on rajattu koskemaan näitä teknisiä vaatimuksia ja erilaisia ratkaisuja niiden täyttämiseksi. Työn päätavoitteena on löytää tekniset vaatimukset täyttävä ratkaisu, jolla toimeksiantajan omistamilla aurinkovoimaloilla voidaan osallistua sähkön reservimarkkinoille. Toissijaisena tavoitteena on tuottaa toimeksiantajalle lisätietoa reservimarkkinoiden teknisistä vaatimuksista ja niiden täyttämisestä aurinkovoimalan näkökulmasta

Reservimarkkinat ovat ajankohtainen aihe alalla myös laajemminkin, se voidaan nähdä jo nopealla Google-haulla. Siitä huolimatta aihepiiriin liittyviä tutkimuksia löytyy vielä varsin niukanlaisesti, erityisesti aurinkovoimaloiden osalta tässä opinnäytetyössä tehty tutkimus on ensimmäinen laatuaan. Muiden laitteistojenkin osalta reservimarkkinoita koskevien tutkimusten pääpaino kohdistuu reservien markkinatekniseen puoleen, eikä niinkään ratkaisuihin reservituotteiden teknisten vaatimusten täyttämiseen.

1.2 Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset

Työ toteutetaan tutkimuksellisena kehittämistyönä, eli niin kutsuttuna soveltavana tutkimuksena. Tutkimuksellisen kehittämistyön pääpainona on konkreettisten ratkaisujen löytäminen ongelmiin. Tyypillisesti lähtökohtana on toimeksiantajalta saatu toimeksianto, jolla etsitään ratkaisua johonkin käytännön ongelmaan. Tutkimuksellisessa kehittämistoiminnassa hankittua aineistoa analysoidaan ja sovelletaan konkreettisen ratkaisun löytämiseksi, sekä tuotetaan myös uutta tietoa.

Tämän tutkimuksen aineisto koostuu pääosin Fingridin julkisista dokumenteista reservituotteiden vaatimukseen liittyen ja näiden pohjalta rakennettavasta kattavasta tietoperustasta. Tutkimuksen aineistoa sovelletaan ja analysoidaan toimeksiantajan omistamien aurinkovoimaloiden kontekstissa ja pyritään saavuttamaan vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisia teknisiä vaatimuksia eri reservituotteilla on?
2. Millaisilla ratkaisuilla tekniset vaatimukset voidaan täyttää toimeksiantajan aurinkovoimaloissa?

1.3 Toimeksiantajan esittely

Työn toimeksiantaja Solarigo Systems Oy – jota myöhemmin kutsutaan myös nimellä Solarigo, on suomalainen vuonna 2015 perustettu yritys, joka työllistää noin 50 henkeä. Solarigon ydinliiketoimintaan kuuluu aurinkosähköä tuottavien voimaloiden rakentaminen asiakkaille ja omistamiensa voimaloiden tuottaman aurinkosähkön myynti. Tämän lisäksi Solarigo tarjoaa aurinkovoimaloiden huoltopalveluja.

Solarigo tarjoaa siis perinteisiä EPC-järjestelmätoimituksia (Engineering, Procurement, Construction), jossa Solarigo suunnittelee ja toteuttaa voimalan asiakkaan omistukseen avaimet käteen periaatteella. Perinteisten EPC-järjestelmätoimitusten lisäksi toinen merkittävämpi osa Solarigon liiketoimintaa on Solarigon omistamien aurinkovoimaloiden tuottaman sähkön myynti asiakkaille PPA-sopimusten (Power Purchase Agreement) kautta. PPA-ratkaisussa Solarigo investoi, suunnittelee ja toteuttaa voimalan asiakkaan kiinteistöön tai maa-alueelle. Voimalan omistus jää Solarigolle ja asiakkaan kanssa solmitaan pitkäaikainen PPA-sähkönmyyntisopimus, jonka avulla Solarigo myy

voimalan tuottamaa sähköä suoraan asiakkaalle. Asiakkaan näkökulmasta PPA-ratkaisu on houkutteleva, koska se mahdollistaa uusiutuvan energian hyödyntämisen ilman merkittäviä alkuinvestointeja.

2 Suomi osana Pohjoismaista sähköjärjestelmää

2.1 Pohjoismainen synkronialue

Suomi kuuluu pohjoismaiseen synkronialueeseen. Synkronialueella tarkoitetaan aluetta, jonka sähköverkot ovat toisiinsa yhteydessä vaihtosähköyhteyksillä. Pohjoismaiseen synkronialueeseen Suomen kanssa kuuluvat Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Liityntä Suomen ja Ruotsin kantaverkkojen välillä on tehty kahdella 400 kV vaihtosähköyhteydellä Pohjois-Suomessa. Lisäksi Norjan verkkoon on Inarista 220 kV vaihtosähköyhteys. (Osa pohjoismaista sähköjärjestelmää n.d.)

Synkronialueen sisäisiin yhteyksiin hyödynnetään vaihtosähköyhteyksien lisäksi myös tasasähköyhteyksiä, jos se katsotaan teknistaloudellisesti kannattavaksi. Suomen ja Ruotsin välille on rakennettu kaksi tasasähköyhteyttä – Fenno-Skan 1 (Raumalta Ruotsin Dannebohon) ja Fenno-Skan 2 (Raumalta Finnböleen). Tämän lisäksi Naantalista Ahvenanmaalle kulkee tasasähköyhteys, jonka käytöstä vastaa Kraftnet Åland. Pohjoismainen synkronialue yhdistyy muihin synkronialueisiin tasasähköyhteyksien avulla, esimerkiksi Suomen ja Viron välillä on kaksi tasavirtayhteyttä EstLink 1 ja EstLink 2. (Osa pohjoismaista sähköjärjestelmää n.d.)

2.2 Suomen sähköjärjestelmä

2.2.1 Kantaverkko

Suurin osa Suomessa kulutetusta sähköstä siirretään kantaverkon kautta. Kantaverkkoyhtiö Fingrid vastaa kantaverkon valvonnasta, ylläpidosta ja käytön suunnittelusta. Kantaverkko on eräänlainen runkoverkko, johon on liitetty suoraan suurimmat voimalaitokset ja tehtaot, sekä jakeluverkot, joita hallinnoivat jakeluverkkoyhtiöt. Kantaverkko operoi 110–400 kV jännitealueella ja siihen kuuluu noin 14 500 kilometriä voimajohtoa, sekä 120 sähköasemaa. (Suomen sähköjärjestelmä, n.d.)

2.2.2 Jakeluverkot

Jakeluverkot liittyvät kantaverkkoon tyypillisesti 110 kV:n muuntajan avulla ja siirtävät sähköä alueellisesti 110 kV:n johdoilla. Jakeluverkot operoivat 110–0,4 kV:n jännitetasoilla. Kotitaloudet ovat liitettynä jakeluverkkoihin, kun taas teollisuus, kauppa ja muu kulutus (esim. maatalous) on liitettyä jakeluverkkoon tai kantaverkkoon tapauksen mukaan. Jakeluverkkojen ylläpidosta vastaavat jakeluverkkoyhtiöt, joita on Suomessa noin 80. (Suomen sähköjärjestelmä, n.d.)

3 Sähkömarkkinat

Sähkömarkkinoilla sähkön kuluttajat ja tuottajat kohtaavat ja käyvät kauppaa sähköllä. Sähkömarkkinat toimivat kysynnän ja tarjonnan periaatteilla aivan samaan tapaan kuin muutkin hyödyke-markkinat. Sähkömarkkinoissa erityistä on se, että sähkön varastointi on kallista ja hankalaa, joten kysynnän ja tarjonnan, eli kulutuksen ja tuotannon tulee kohdata joka hetkellä. Kustannustehokain tuotannon ja kulutuksen tasapainotustapa on toimivat sähkömarkkinat. (Yleistietoa sähkömarkkinoista n.d.; Markkinapaikat n.d.)

3.1 Sähkömarkkinoiden osapuolet

Sähkön niin sanotun tukkumarkkinan osapuolet ovat sähkön tuottajat ja kuluttajat. Sähkön tuottajat ovat erilaisia voimalaitoksia. Kuluttajia taas ovat sekä sähkön suurkuluttajat, kuten suuret teollisuuslaitokset, sekä sähkön vähittäismarkkinoilla toimivat sähköyhtiöt. Vähittäismarkkinoilla sähköyhtiöt myyvät asiakkailleen joko itse tuottamaansa tai tukkumarkkinoilta ostamaansa sähköä. Viime vuosina yleistyneet kuluttajien kiinteistöihin asennettavat pientuotantolaitteistot mahdollistavat myös tällaisten laitteistojen haltijoille osallistumisen sähkömarkkinoille. (Markkinapaikat n.d.)

Sähkön fyysisestä siirrosta asiakkaille vastaavat verkkoyhtiöt, jotka jakautuvat Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingridiin ja jakeluverkkoyhtiöihin. Fingrid vastaa sähkön siirrosta valtakunnallisesti kantaverkossa ja kantaverkkoon liittyvät jakeluverkkoyhtiöt vastaavat sähkön jakelusta paikallisesti omille asiakkailleen. (Markkinapaikat n.d.)

3.2 Sähkön eri markkinapaikat

Nasdaq eex		NORD POOL epexspot		FINGRID Statnett SVENSKA KRAFTNÄT ENERGINET		NORD POOL epexspot		FINGRID Statnett SVENSKA KRAFTNÄT ENERGINET		eSett	
Johdannais- markkinat	Vuorokausi- markkinat	Reservikapasi- teettimarkkinat	Päivänsisäiset markkinat	Reservienegia- markkinat						Taseselvitys	
Kaupankäynti											
10 vuotta - päivä eteenpäin	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa ja jatkuva kaupankäynti	Reaaliaika	Toimitus					Toimituksen jälkeen	
Ajanjaksot											
Vuosi, kvartaali, kuukausi ja viikko	Tunti	Tunti	15 min	15-60 min							Tasesähkö Taseselvitysjakso: 15 min

Kuvio 1. Sähkömarkkinoiden markkinapaikat. (Markkinapaikat n.d.)

Kuviosta 1 voidaan nähdä eri sähkön markkinapaikat ja niiden aikavälien pituudet. Sähkön eri markkinapaikkoja ovat siis johdannaismarkkinat, vuorokausimarkkinat, reservikapasiteettimarkkinat, päivänsisäiset markkinat ja reservimarkkinat. Toimituksen jälkeen tapahtuva taseselvitys ei ole varsinainen markkinapaikka, mutta silti oleellinen osa sähkömarkkinoita. Reservimarkkinoita käsitellään tarkemmin luvussa 4. (Markkinapaikat n.d.)

3.2.1 Johdannaismarkkinat

Johdannaismarkkinoilla sähkömarkkinoiden osapuolet voivat suojata sähkön hintaa pitkällä aikavälillä. Johdannaismarkkinoiden kaupankäyntituotteet ovat sähkön hintaan liittyviä johdannaisia, kuten futuureita ja optioita. Varsinaista sähkön fyysistä luovuttamista johdannaismarkkinoilla ei siis tapahdu, ja se mahdollistaa myös täysin spekulatiivisten toimijoiden osallistumisen markkinoille. (Markkinapaikat n.d.)

3.2.2 Vuorokausimarkkinat

Sähkön vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa sähkön tuntikohtaisesta hinnasta seuraavalle päivälle. Sähkön tuottajat ja kuluttajat asettavat tekemiensä tuotanto- ja kulutusennusteiden perusteella tarjoukset sähköpörssiin. Sähköpörssit toteuttavat annettujen tarjousten perusteella huutokaupan ja laskevat aluekohtaisen sähkön tukkumarkkinahinnan jokaiselle tunnille. Suomi on omana tarjousalueenaan yhteiseurooppalaisilla sähkömarkkinoilla. Vuorokausimarkkinoilla määritetty sähkön hinta on sama jokaisella tarjousalueella, jos alueiden välinen siirtokapasiteetti on riittävä. Mikäli siirtokapasiteetti ei riitä muodostuu alueiden väleille sähkön hintaeroja. (Markkinapaikat n.d.)

3.2.3 Päivänsisäiset markkinat

Vuorokausimarkkinan sulkeutumisen jälkeen aukeavien vuorokausimarkkinoiden tarve perustuu muuttuvien tilanteiden luomaan tarpeeseen tasapainottaa kulutusta ja tuotantoa. Vuorokausimarkkinoiden sulkeuduttua tapahtuva laiterikko, säätilanne tai muu tuotantoon tai kulutusennusteeseen vaikuttava yllättävä tapahtuma luo tarpeen lähempänä käyttötuntia tapahtuvalle kaupankäynnille. (Markkinapaikat n.d.)

3.2.4 Taseselvitys

Sähkön toimituksen jälkeen markkinatoimijoiden toteutunut tuotanto ja kulutus selvitetään taseselvityksessä. Taseselvityksen aikana tarkastellaan markkinaosapuolen vuorokausimarkkinoilta ja päivänsisäisiltä markkinoilta ostetun tai myydyin sähkön määrä ja verrataan niitä toteutuneisiin määriin. Jos suunnitellut määrät eivät vastaa toteutuneita määriä syntyy tasepoikkeama. Tasepoikkeaman aiheuttaneelle taholle maksetaan tai siltä peritään tasepoikkeaman suuruuden, suunnan ja tasesähkön hinnan perusteella määräytyvä maksu. Tasesähkön hinta asetellaan sellaiseksi, että se kannustaa markkinoilla toimivia tasevastaavia suunnittelemaan kulutuksensa ja tuotantonsa tasapainoon. (Markkinapaikat n.d.)

4 Tasehallinta ja reservimarkkinat

Vaikka sähkömarkkinaosapuolet pyrkivätkin suunnittelemaan kulutuksensa ja tuotantonsa mahdollisimman tarkasti, eivät suunnitelmat käytännössä koskaan toteudu sellaisinaan. Käyttötunnin

aikaisten tasepoikkeamien hallintaa voidaan kutsua yleisesti tasehallinnaksi. Fingrid vastaa verkonvalvojana tasehallinnasta ostamalla ylläpitämiltään säätösähkö- ja reservimarkkinoilta säätökykyistä kapasiteettia. Ilman aktiivista tasehallintaa käyttötunnin aikaiset kulutuksen ja tuotannon poikkeamat aiheuttaisivat sähköjärjestelmään taajuuden poikkeamia. (Reservimarkkinat n.d.).

Reservien ylläpitovelvoitteet pohjoismaisessa yhteiskäyttäjärjestelmässä (Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska) on sovittu järjestelmävastaavien käyttösopimuksella. Kunkin maan kantaverkkoyhtiö hankkii reservinsä parhaaksi katsomallaan tavalla. Reservivelvoitteiden täyttämiseksi voidaan myös käydä kauppaa maiden välillä, mutta jokaisen maan tulee pitää riittäviä kansallisia reservejä, jotta taajuus saadaan ylläpidettyä myös saarekekäyttötilanteessa. Normaalitilanteessa 1/3 reservivelvoitteesta voidaan täyttää muista Pohjoismaista hankitulla kapasiteetilla. (Reservimarkkinat n.d.).

5 Reservituotteet

Pohjoismaisilla reservimarkkinoilla käytetään viittä eri reservituotetta. Reservituotteita on sekä automaattisia, että manuaalisia. Nopeammat automaattiset reservit aktivoituvat verkon taajuuden perusteella tai Fingridin lähettämän ohjaussignaalin mukaan. Taajuusohjatut reservit reagoivat nopeasti verkossa tapahtuviin poikkeamiin, kun hitaammilla signaali-ohjatuilla ja manuaali-ohjatuilla reserveillä vapautetaan nopeampaa reserviä taas käytettäväksi. Reservituotteet voidaan täten jaotella käyttötarkoituksensa perusteella kolmeen eri ryhmään: (Reservimarkkinat n.d.)

1. Taajuuden vakautusreservit, joita käytetään taajuuden jatkuvaan hallintaan, taajuusalueella 49,9–50,1 Hz
2. Taajuuden palautusreservit, jotka aktivoituvat suurten taajuuspoikkeamien aikaan (<49,9 Hz ja >50,1 Hz)
3. Korvaavilla reserveillä valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin mahdollisiin uusiin vikatilanteisiin palauttamalla aiemmin aktivoituneet palautusreservit takaisin käyttöön (Ei käytössä Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä)

Yllä mainittujen lisäksi Pohjoismaissa on käytössä nopea taajuusreservi. Nopeaa taajuusreserviä käytetään taajuuden hallintaan pienen inertian käyttötilanteissa taajuuden vakautusreservien lisäksi. (Reservimarkkinat n.d.)

Jokaisella reservituotteella on omat tekniset vaatimuksensa mm. vähimmäiskoon, vasteajan ja mittalaitteiden tarkkuuden suhteen. Teknisiä vaatimuksia käydään tarkemmin läpi luvussa 6.

5.1 Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)

Taajuusohjatun käyttöreservin tarkoitus on pitää sähköverkon taajuus normaalitaajuusalueella välillä 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjattua käyttöreserviä ylläpidetään pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä 600 MW, josta Fingridin hankintavelvoite on vuonna 2024 122 MW. Taajuusohjattujen reservituotteiden (FCR-N ja FCR-D) hankintavelvoitteet maiden järjestelmävastaavien kesken jaetaan vuosittain maiden käyttämien ja tuottamien vuosienergioiden suhteessa. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet n.d.)

Taajuusohjatun käyttöreservi aktivoituu taajuuden poikkeamien aikana, ja sen aktivointi tulee tapahtua automaattisesti ilman erillistä ohjaussignaalia Fingridiltä. Taajuusohjattu käyttöreservi on symmetrinen tuote, joten sen pitää pystyä ylös- ja alassäätöön. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) n.d.)

5.2 Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)

Taajuusohjattu häiriöreservi aktivoituu silloin, kun sähköverkon taajuus alittaa 49,9 Hz tai ylittää 50,1 Hz. Taajuusohjatun häiriöreservin tarve Pohjoismaissa määräytyy suurimman yksittäisen vian perusteella ja se mitoitetaan erikseen ali- ja ylitaajuushäiriötä varten. Alitaajuushäiriötä verkkoon saattaa aiheuttaa esimerkiksi suuren tuotantolaitoksen tai sähköä Pohjoismaihin tuovan siirtoyhteyden irtoamisesta sähköverkosta. Ylitaajuushäiriötä voi aiheuttaa suuren kulutuskohteen tai sähköä Pohjoismaista pois vievän siirtoyhteyden irtoaminen sähköverkosta. Pohjoismaisella synkronialueella alitaajuushäiriötä varten tarvitaan 1450 MW ylössäätöä ja ylitaajuushäiriötä varten 1400 MW alassäätöä. Fingridin osalta hankintavelvoite vuonna 2024 FCR-D ylössäädölle on n. 290 MW ja alassäädölle n. 250 MW. FCR-D on jaettu erikseen ylössäätö- ja alassäätötuotteisiin. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) n.d.)

5.3 Nopea taajuusreservi (FFR)

Pohjoismaissa on otettu käyttöön nopea taajuusreservi matalan inertian tilanteita varten. Sähköverkon inertialla tarkoitetaan siinä sidottuna olevan liike-energian määrää. Inertian avulla sähköverkko pystyy vastustamaan siinä esiintyviä taajuuden muutoksia. Inertiaa sähköverkkoon luovat erilaiset pyörivät massat, eli käytännössä erityyppiset generaattorit. Käynnissä olevan energiamuroksen takia kasvava määrä sähköverkossa tuotetusta sähköstä on invertteripohjaista ja tämän vuoksi sähköverkossa olevan inertian määrä on vähentynyt, ja täten myös sähköverkon kyky vastustaa muutoksia taajuudessa on heikentynyt. (Nopea taajuusreservi (FFR) n.d.)

Nopeaa taajuusreserviä hankitaan tarpeen mukaan, tarvittava määrä riippuu sähköverkon inertian määrästä ja mitoittavan vian suuruudesta. Fingridin hankintavelvoite vaihtelee välillä 0–60 MW kullakin hetkellä. Nopea taajuusreservi on ylösäättötuote, ja pienin tarjottava kapasiteetti on 1,0 MW (Nopea taajuusreservi (FFR) n.d.)

5.4 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)

Automaattinen taajuuden palautusreservi on otettu Pohjoismaissa käyttöön vuonna 2013. Sen käyttötarkoituksena on sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen ja tehotaapainon ylläpito suunnitellussa arvossa. Automaattinen taajuuden palautusreservi on keskitetty, automaattisesti aktivoituva reservi. Sen aktivointi tapahtuu Fingridin lähettämän tehonmuutossignaalien perusteella. (Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) n.d.)

Fingrid hankkii automaattista taajuuden palautusreserviä myös pohjoismaisilta kapasiteettimarkkinoilta, sekä Virossa Estlink-tasasähkölinkin kautta. Hankintaa tehdään niille tunneille, joilla taajuuden vaihtelu on tyypillisesti ollut suurinta, ja hankintatunnit ilmoitetaan etukäteen. Automaattista taajuuden palautusreserviä ylläpidetään Pohjoismaissa 300–400 MW, josta Fingridin hankintavelvoite vuonna 2024 on n. 46–62 MW. Reserviä hankitaan ennalta sovittaville aamun, illan ja yön tunneille. (Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) n.d.)

Reservitoimittajat voivat antaa tuntimarkkinoille tarjouksia erikseen ylös- ja alassäättökykyisestä kapasiteetistaan. Reservitoimittajat saavat kapasiteetin ylläpidosta kapasiteettikorvauksen, joka

määräytyy kalleimman hyväksytyin tarjouksen mukaan. (Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) n.d.)

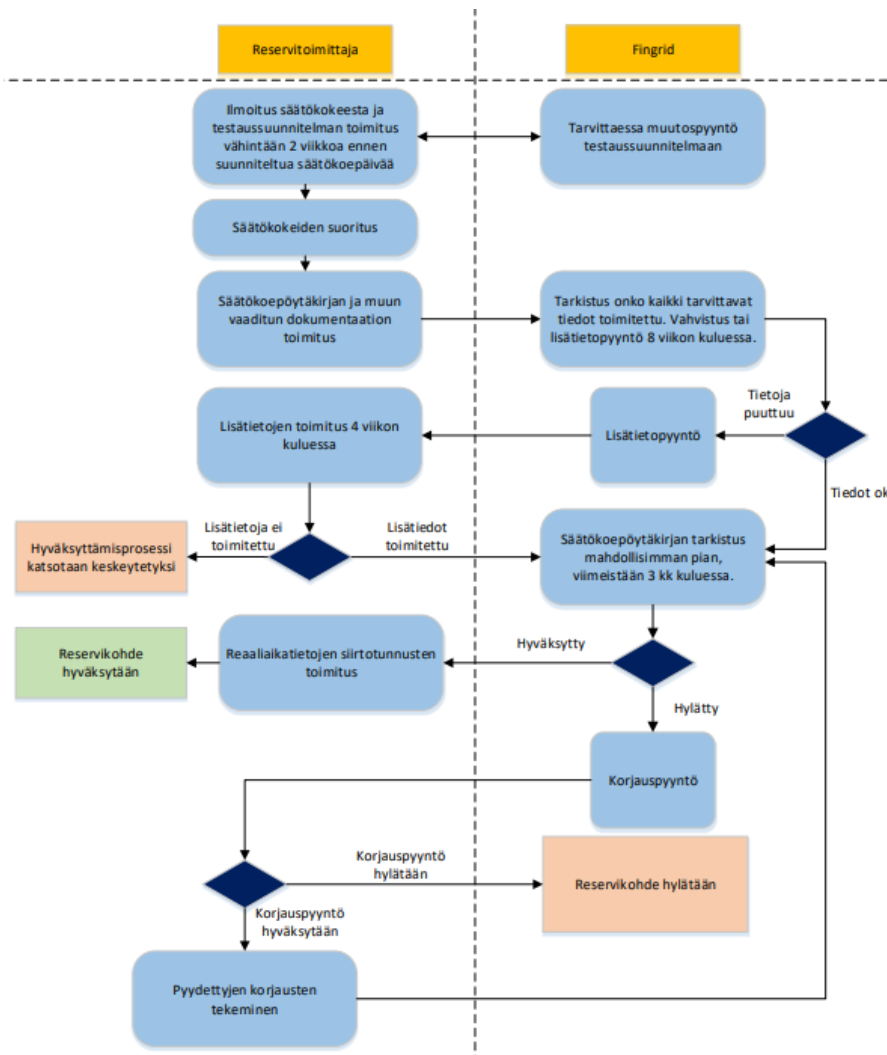
5.5 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoita, eli manuaalista taajuuden palautusreserviä ylläpidetään Fingridin ja muiden pohjoismaisten verkkoyhtiöiden toimesta. Säättökykyisten laitteistojen haltijat antavat säätosähkömarkkinoille säätötarjouksia ja saavat hyväksytyistä tarjouksista korvauksia. Reservitoimittajat voivat antaa säätosähkömarkkinoille tarjouksia ylössäätö- tai allassäätökykyisestä kapasiteetistaan. Fingridin hankintavelvoite manuaaliselle taajuuden palautusreserville on vuonna 2024 880–1300 MW ylössäätöä ja 450 MW allassäätöä. (Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) n.d.)

6 Reservituotteiden tekniset vaatimukset

6.1 Reservituotteiden hyväksyttämisen prosessi

Reservimarkkinoille liittyäkseen reservitoimittajan tulee käydä läpi reservituotteen hyväksyttämisen prosessi. Reservituotteiden hyväksyttämisen prosessi on samanlainen kaikkien reservituotteiden osalta, lukuun ottamatta manuaalista taajuuden palautusreserviä (mFRR), jolle ei tarvitse suorittaa säätökoetta. Reservituotteiden hyväksyttämisen prosessin kulku on kuvattu kuviossa 2:



Kuvio 2. Reservituotteiden hyväksyttämisen prosessi (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2023, 2.)

FCR-tuotteiden hakemus tehdään viralliselle pohjalle, kun taas muiden reservituotteiden hakemukset toimitetaan vapaamuotoisemmin. Kaikkien reservituotteiden osalta säätökokeen tulokset dokumentoidaan säätökoepöytäkirjaan, joka lähetetään Fingridille hakemuksen yhteydessä. Hakemuksen muu vaadittava dokumentaatio vaihtelee reservituotteittain, tyypillisesti siihen kuuluu kuitenkin mm. teknisen kuvauksen säätöjärjestelmän toiminnasta, reaaliaikatietojen laskennassa käytetyt oletukset ja mallit, sekä näyte reaaliaikaisen datan tallennusjärjestelmän toiminnasta.

Hyväksytyt säätökoe on voimassa kerrallaan viisi vuotta. Määräajan päätyttyä säätökoe tulee suorittaa uudelleen. Säätökoe tulee myös suorittaa uudelleen, jos reservikohteeseen tehdään reservikäyttöön vaikuttavia muutoksia.

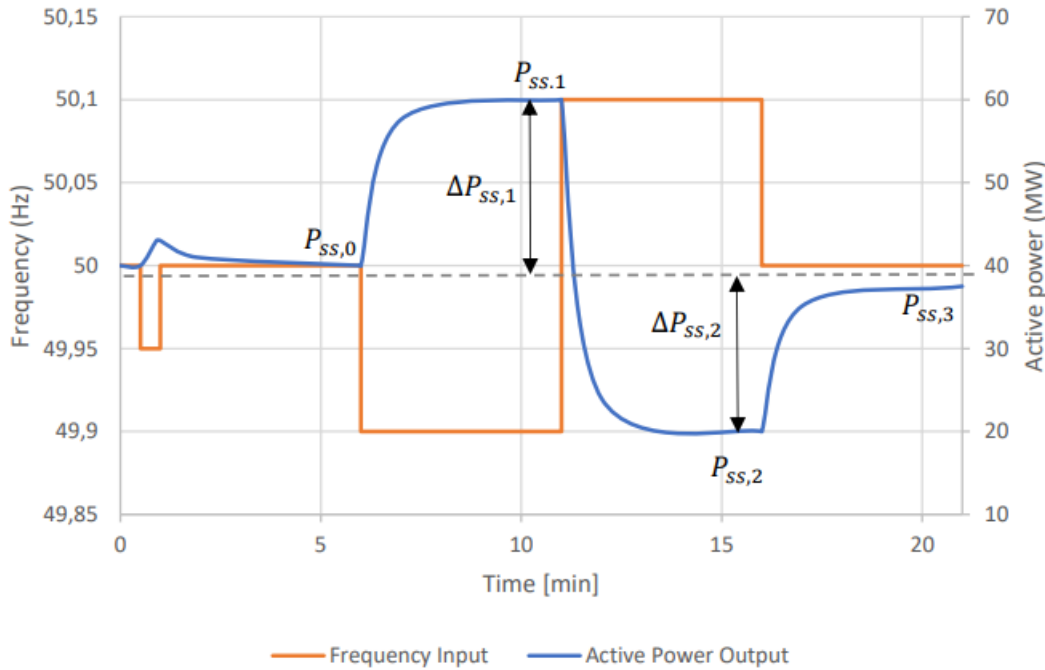
6.2 Taajuusohjatut reservituotteet (FCR-N ja FCR-D)

6.2.1 FCR-N normaalitilan vaste, kestävyys ja dynaaminen suorituskyky

Taajuusohjatun käyttöreservin ohjauksen vastetta testataan askelkokeella, jossa syötettyä testitaajuutta vaihdellaan askelmaisesti välillä 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjatun käyttöreservin testaussekvenssin eteneminen on esitetty taulukossa 1:

Taulukko 1. FCR-N testaussekvenssi (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2023, 13.)

Askel	Aloitusaika (min)	Kesto (min)	Taajuus (Hz)	Huom.
	0	0,5	50,0	Aloitus
Esiaskel	0,5	0,5	49,95	Pieni askel reaktion arvioimiseen
0	1	5	50,0	Askel f_0 ja P_0
1	6	15	49,9	Askel f_1 ja P_1
2	21	15	50,1	Askel f_2 ja P_2
3	36	5	50,0	Askel f_3 ja P_3
	41			Lopetus



Kuvio 3. FCR-N testaussekvenssi, esimerkki. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiprosessi, 2023.)

Kuviossa 3 on esitetty testaussekvenssin eteneminen syötetyn taajuuden ja esimerkireservituotteen tehon osalta ajan funktiona. Oranssi viiva ja vasemmalla näkyvät numeroarvot esittävät testin aikana syötetyn taajuuden muutoksia sekvenssin aikana. Sininen viiva ja oikealla näkyvät numeroarvot esittävät esimerkireservituotteen tehon muutosta testin aikana. Yllä olevan esimerkin tapauksessa reservitoimittajan myymä kapasiteetti on 20 MW.

Testin aikana todettu normaalitilan vaste ei saa erota liikaa teoreettisesta normaalitilan vasteesta. Teoreettisella normaalitilan vasteella tarkoitetaan ns. ihanteellista vastetta, joka on saatu laskeamalla. Teoreettisen normaalitilan vasteen laskukaava on esitetty luvussa 6.2.4.

Normaalitilan vaste ylöspäin lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\Delta P_{ss,1} = P_{ss,1} - \frac{1}{2} (P_{ss,0} + P_{ss,3})$$

Normaalitilan vaste alaspäin:

$$\Delta P_{SS,2} = P_{SS,2} - \frac{1}{2} (P_{SS,0} + P_{SS,3})$$

, jossa $P_{SS,0}$ on teho kun $f_0 = 50 \text{ Hz}$ ennen askelta nro. 1,

$P_{SS,3}$ on teho kun $f_3 = 50 \text{ Hz}$ askeleen nro. 3 jälkeen,

$P_{SS,1}$ on teho kun $f_1 = 49,9 \text{ Hz}$ askeleen nro. 1 jälkeen ja

$P_{SS,2}$ on teho kun $f_2 = 50,1 \text{ Hz}$ askeleen nro. 2 jälkeen. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiprosessi 2023, 14.)

Ihanteellinen vaste on täysin lineaarinen tehon muutos suhteessa taajuuden muutokseen. Testin aikana mitattu tehon normaalitilan vaste taajuuden muutoksiin saa poiketa teoreettisesta normaalitilan vasteesta korkeintaan 5 % alitoimituksen suuntaan ja 20 % ylitoimituksen suuntaan. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiprosessi 2023, 14.)

Taajuusohjatun käyttöreservin ylläpitoon suunnitellun reservituotteen kestävyys testataan myös askelilla nro. 1 ja 2. Reservituotteen täytyy pysyä aktiivisena koko askeleen keston, eli 15 minuuttia. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiprosessi 2023, 15.)

Taajuusohjatun käyttöreservin dynaaminen suorituskyky testataan siniaaltotestillä, jonka eteneminen on esitetty stabiilisuutta käsittelevässä luvussa 6.2.3. Vaatimus vastaa aikatasossa n. 63 % aktiivointia minuutissa ja 95 % aktiivointia kolmessa minuutissa taajuuden muuttuessa askelmaisesti $50,0 \text{ Hz} \rightarrow 49,9 \text{ Hz}$ tai $50,0 \text{ Hz} \rightarrow 50,1 \text{ Hz}$ askelien 1 ja 2 aikana. (Tuotekuvaus: taajuuden vakautusreservit (FCR) 2023, 5.)

6.2.2 FCR-D normaalitilan vaste, kestävyys ja dynaaminen suorituskyky

Taajuusohjatun häiriöreservin suorituskyky testataan ramppikokeella. Ramppikokeen aikana syötettyä testitaajuutta muunnellaan rampeissa muuttuvilla nopeuksilla.

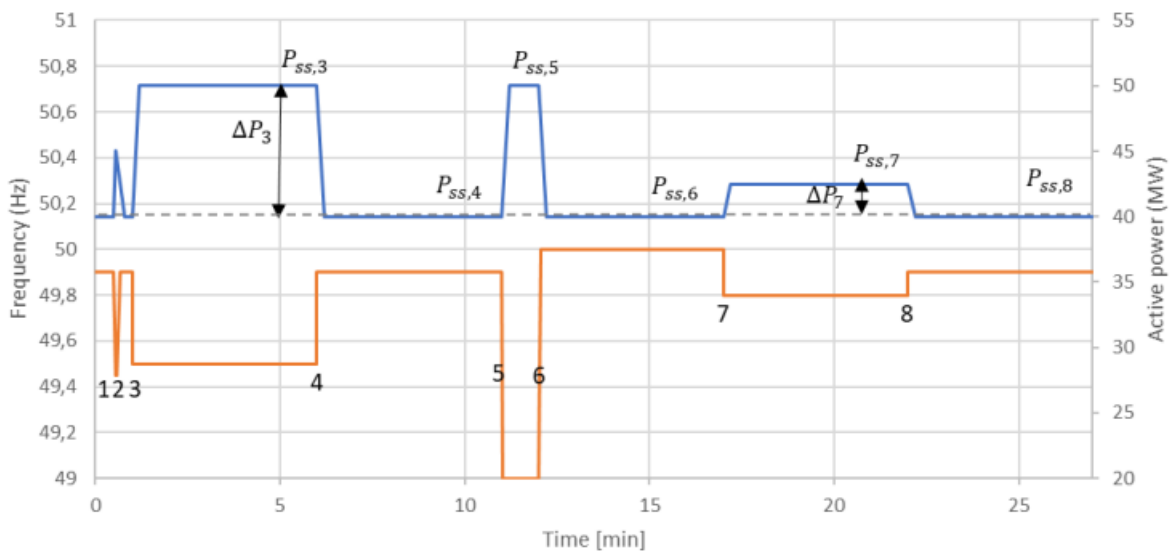
Taajuusohjatun häiriöreservin testaussekvenssi etenee taulukon 2 mukaisesti:

Taulukko 2. FCR-D testaussekvenssi. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiprosessi 2023, 16.)

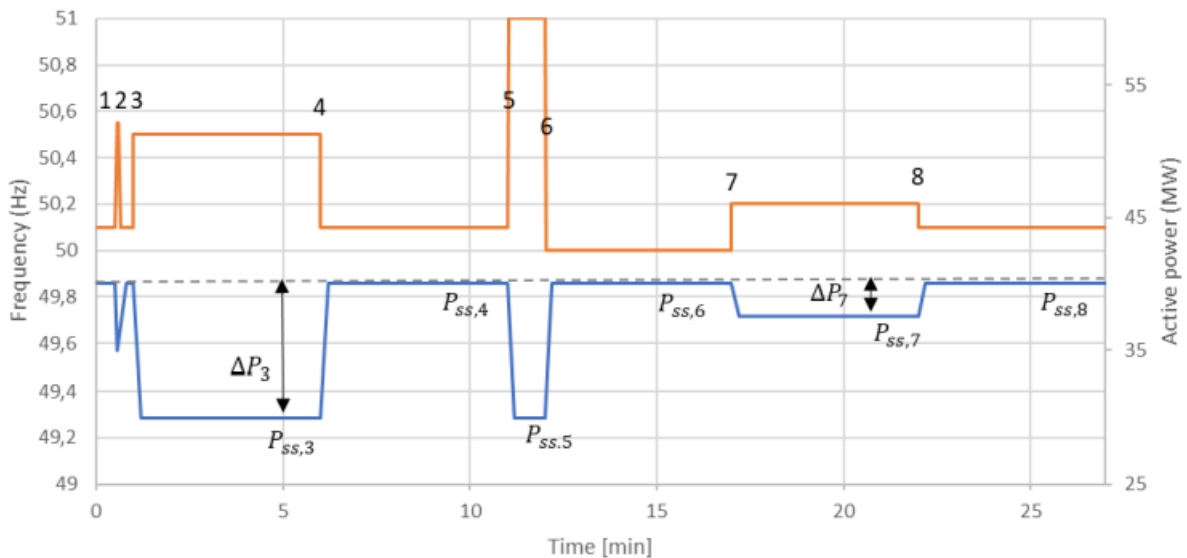
Ramppi n.o.	Aloitusaika [s]	Rampin lopetus-aika [s]	Mittauksen lopetus [s]	Rampin nopeus [Hz/s]	Mittauksen kesto [s]	Taajuus FCR-D ylös [Hz]	Taajuus FCR-D alas [Hz]	Kommentti	Säätimen moodi (jos moodinvaihto käytössä)
	0	0	30	0	30	49,9	50,1	Odotakunnes voimалан teho on stabiili ennen testin aloitusta	
1	30	33,1	34,9	0,14	4,9	49,45	50,55	Suorituskykytesti 1	Suorituskyky-moodi
2	34,9	39,9	90	0,09	55,1	49,9	50,1	Deaktivaatiotesti 1	Vakaus-moodi
3	90	91,7	390	0,24	300/900	49,5	50,5	Sietokyvyn testaus	Suorituskyky-moodi estetty, ei vaihtoa
4	390	391,7	690	0,24	väh. 300	49,9	50,1	Normaalivasteen testaus deaktivoinnin aikana	Suorituskyky-moodi takaisin käyttöön
5	690	693,8	750	0,24	60	49	51	Suorituskykytesti 2	Suorituskyky-moodi
6	750	754,2	1050	0,24	300	50	50	Deaktivaatiotesti 2	Vakaus-moodi
7	1050	1050,8	1350	0,24	300	49,8	50,2	FCR-N/FCR-D kombinaatiotesti	
8	1350	1350,4	1650	0,24	300	49,89	50,11	FCR-N/FCR-D kombinaatiotesti	

Oikeanpuoleisin sarake kertoo missä moodissa säätimen täytyy olla, jos säätimessä käytetään moodin vaihtelua. Moodin vaihtelua käytetään yleensä sellaisissa tapauksissa, jossa reserviresursia käytetään samanaikaisesti FCR-N ja FCR-D markkinoilla. FCR-N markkinalle myytävä kapasiteetti on tyypillisesti pienempi, kuin FCR-D markkinalle myytävä kapasiteetti. Suuremman kapasiteetin vuoksi FCR-D vaatii usein nopeammin ja suuremmalla vahvistuksella toimivan säätimen, jotta tekniset vaatimukset saavutetaan. Kaksi viimeistä ramppia (nro. 7 ja 8) testataan vain siinä tapauksessa, jos reservituotetta aiotaan myydä sekä FCR-N ja FCR-D reserveihin. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 20–21.)

Esimerkkireservituotteen tehon ohjauksen vasteet syötettyyn testitaajuuteen on esitetty kuvioissa 4 ja 5:



Kuvio 4. FCR-D ylös ramppitesti. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 17.)

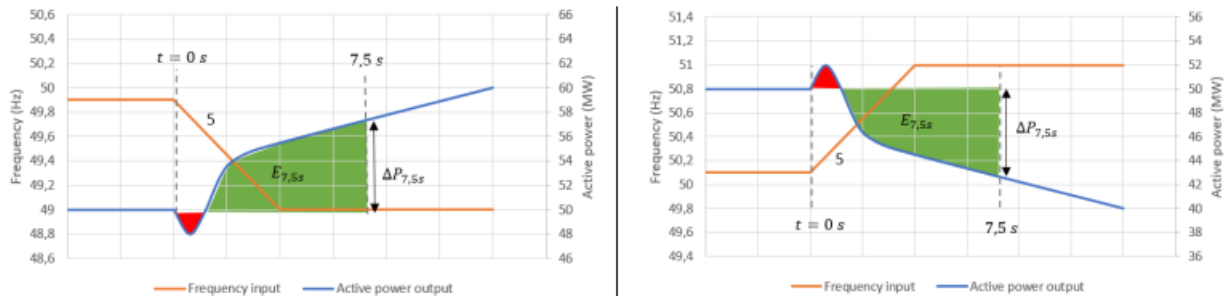


Kuvio 5. FCR-D alas ramppitesti. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 17.)

Kuvassa 4 on FCR-D ylösäädön esimerkkivaste ja kuviossa 5 vastaavasti FCR-D alasäädön esimerkkivaste. Oranssilla piirretty käyrä on syötetty testitaajuus ja sininen käyrä tehonsäädön vaste syötettyyn taajuuteen. Testattu normaalitilan vaste lasketaan rampin 3 (49,5 Hz FCR-D ylösäädöllä ja 50,5 Hz FCR-D alasäädöllä) ja rampin 4 (49,9 Hz FCR-D ylösäädöllä ja 50,1 Hz FCR-D alasäädöllä) erotuksena. Mitattua normaalitilan vasteen kokoa koskee sama vaatimus kuin taajuusohjattulla käyttöreservillä – korkeintaan 5 % alitoimitusta ja 20 % ylitoimitusta vrt. teoreettinen normaalitilan vaste. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 18.)

Suorituskyvyn osalta taajuusohjattua häiriöreserviä koskee vaatimus, jossa reservin tulee kyetä aktivoimaan vähintään 86 % täydestä kapasiteetista 7,5 sekunnissa, sekä aktivoitun kokonaisenergian määrä tulee olla 3,2-kertainen täydestä kapasiteetista 7,5 sekunnin kuluttua. Nämä vaatimukset testataan rampilla nro. 5. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 18.)

Suorituskyvyn vaatimusta on havainnollistettu kuviossa 6:



Kuvio 6. FCR-D suorituskyky rampilla nro. 5. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2023, 17.)

Yllä olevassa kuviossa vasemmalla puolella on FCR-D ylössäädön esimerkkivaste ja oikealla FCR-D alassäädön esimerkkivaste. Oranssi käyrä on syötetty testitaajuus ja sininen käyrä esimerkkituotteen tehon vaste syötettyyn testitaajuuteen. Vihreä alue on halutun säädön suuntaista tehon syöttöä ja punainen alue säädön vastaista.

Suorituskykyvaatimuksen täytyminen voidaan todeta seuraavilla kaavoilla:

$$|\Delta P_{7.5s}| \geq 0.86 \cdot |\Delta P_{ss,theoretical}|$$

$$|E_{7.5s}| \geq 3.2s \cdot |\Delta P_{ss,theoretical}|$$

, jossa

$\Delta P_{7.5s}$ (MW) = aktivoitunut teho 7,5 sekunnin kuluttua rampin nro. 5 alusta ja

$E_{7.5s}$ (MWs) = kokonaisenergian määrä 7,5 sekunnin kuluttua rampin nro. 5 alusta, joka lasketaan kaavalla:

$$E_{7.5s} = \int_t^{t+7.5s} \Delta P(t) dt$$

, jossa

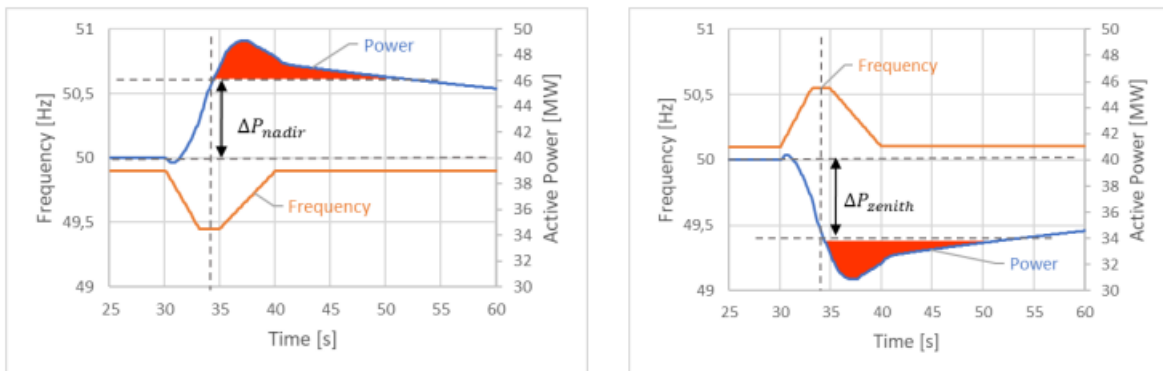
$\Delta P_{ss,theoretical}$ (MW) on teoreettinen normaalitilan vaste, reservitoimittajan laskujen mukaan. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 18.)

Taajuusohjatun häiriöreservin kestävyys testataan rampilla nro. 3, joka pidetään aktiivisena 15 minuuttia. Reservituotteen täytyy pysyä aktiivisena koko tämän ajan. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 18.)

Taajuusohjatun häiriöreservin tapauksessa yhtenä riskinä taajuuspoikkeaman tapahtuessa on mahdollinen ohjauksen ja täten tehon syötön ylilyönti taajuuspoikkeaman vaimentuessa. Tämän vuoksi myös häiriöreservin deaktivoinnille on omat vaatimuksensa. Vaatimuksena on, että taajuuspoikkeaman ns. aallonpohjan, eli nadiirin (ylössäädön tapauksessa) jälkeen syötetty lisäenergia saa olla korkeintaan 1,7-kertainen sen hetken teoreettiseen normaalitilan vasteeseen nähden. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 19.)

Tätä vaatimusta on helpompi havainnollistaa käytännön esimerkin kautta, katso myös kuvio 7:

1. Olkoon reservituote taajuusohjattua häiriöreserviä ylöspäin kapasiteetilla 10 MW
2. Kuvitellaan tilanne, jossa verkon taajuus laskee 50 Hz → 49,5 Hz. Reservi aktivoituu ja alkaa toimittaa tehoa taajuuden vakauttamiseksi
3. Nadiiri saavutetaan nopeasti ja reservituote syöttää verkkoon tehoa nadiirin hetkellä 7 MW
4. Taajuus alkaa palautua normaaliksi nadiirin saavuttamisen jälkeen. Taajuus alkoi palautumaan niin nopeasti, että reservituote ei ehtinyt syöttää tehoa koko kapasiteetillaan.
5. Reservituote alkaa deaktivoitua, eli vähentää tehoaan
6. Syötetty teho ei saa ylittää nadiirin aikana saavutettua tehoa (7 MW) yli 1,7-kertaisesti sen hetkiseen teoreettiseen normaalitilan vasteeseen nähden
7. Otetaan esimerkiksi hetki, jolloin verkon taajuus on palautunut 49,85 Hz tasolle. 10 MW kapasiteetilla teoreettinen normaalitilan vaste taajuudella 49,85 on 1,25 MW
8. Tässä tapauksessa taajuuden ollessa 49,85 reservituote saa siis syöttää verkkoon maksimissaan $7 \text{ MW} + 1,25 \text{ MW} \times 1,7 = 9,125 \text{ MW}$ tehoa



Kuvio 7. FCR-D deaktivoinnin vaatimus. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 19.)

Yllä olevassa kuvassa vasemmalla on ylösäädön ja oikealla alassäädön esimerkkireservituotteiden tehokäyrät reservin aktivoinnin ja sitä seuraavan deaktivoinnin aikana. Yllä kuvatussa käytännön esimerkissä käytetty reservituote on FCR-D ylösäättötuote, mutta sama vaatimus koskee myös alassäättötuotteita. Deaktivoinnin vaatimuksen täyttyminen todetaan ramppitestin ramppien nro. 1 ja 2 aikana, testin aikana tehon mittauksen tulee jatkua vähintään 40 sekuntia nadiirin (tai alassäädön tapauksessa zeniitin) saavuttamisen jälkeen. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 19.)

6.2.3 Taajuusohjattujen reservituotteiden säädön stabiilisuus

Taajuusohjattujen reservituotteiden säädön tulee myös olla riittävän stabiili. Stabiilisuutta testataan siniaaltotestillä, jossa reservituotteen mittalaitteelle syötetään sinimuotoisesti vaihtelevaa taajuutta. Syötetyn testitaajuuden ajanjaksot vaihtelevat väleillä 10–300 s. Testin aikana tulee täyttyä tietty määrä ns. vakaita jaksoja. Vakailta jaksolla tarkoitetaan sellaista jaksoa, jossa reservituotteen tehon ohjaus seuraa syötettyä taajuussignaalia tasaisesti. Vakaiden jaksoiden vähimmäismäärän vaatimus perustuu siihen, että testin ensimmäisten jaksoiden aikana saattaa esiintyä transienteja, jotka eivät edusta reservituotteen ja sen ohjausjärjestelmän todellista käyttäytymistä taajuusheilauksen aikana. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenetti 2023, 24–25.)

Taajuusohjatun käyttöreservin tapauksessa taajuuden vaihtelu on keskitetty normaalin 50 Hz taajuuden ympärille amplitudin ollessa ± 100 mHz. Taajuuden häiriöreservin tapauksessa amplitudi on

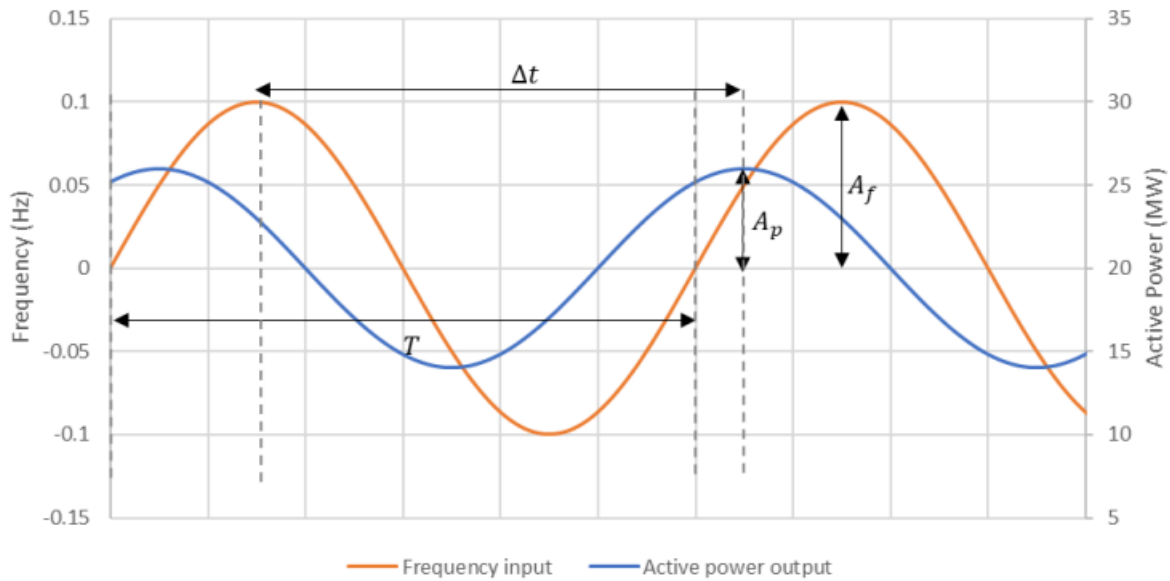
sama ± 100 mHz, mutta se on keskitetty ylös säädön tapauksessa 49,7 Hz ympärille ja allassäädön tapauksessa 50,3 Hz ympärille. Jos FCR-D ylös- ja allassäädössä käytetään samoja säätimen parametrejä, testi tarvitsee suorittaa vain toisen suunnan säädölle. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 24.)

Siniaaltotestissä syötetyn taajuuden jaksonajat ja vaaditut vakaat jaksonajat on esitetty taulukossa 3:

Taulukko 3. FCR-X stabiilisuustestin jaksonajat. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 25.)

Jaksonajan pituus T [s]	Vakaiden jaksojen määrä (suluissa suositeltu jaksojen kokonaismäärä)
10	5 (20)
15	5 (15)
25	5 (10)
40	5 (7)
50	5 (7)
60	5 (7)
70	5 (7)
90	5 (7)
150	3 (4)
300	2 (3)

Kuviossa 8 on esitetty esimerkireservituotteen tehonsäädön vaste syötettyyn testitaajuuteen.



Kuvio 8. Esimerkkireservituotteen vaste siniaaltotestin aikana. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 26.)

Kuvassa oranssilla käyrällä on merkitty syötetty taajuus ja sinisellä käyrällä esimerkkireservituotteen tehovaste. Kun tiedetään jaksonajan pituus T , voidaan laskea testisignaalin kulmataajuus ω alla olevalla kaavalla:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Reservituotteen säädön vahvistuksen määrää voidaan kuvata funktiolla:

$$|F(j\omega)| = \frac{A_p(\omega)}{A_f(\omega)} \frac{|\Delta f_{FCR-X}|}{|\Delta P_{FCR-X,ss,theoretic}|}$$

, jossa

$A_p(\omega)$ = tehon muutoksen amplitudi (MW)

$A_f(\omega)$ = syötetyn testisignaalin amplitudi, eli 0,1 Hz

Δf_{FCR-X} = testisignaalin taajuuskaista, eli 0,1 Hz

$\Delta P_{FCR-X,ss,theoretic}$ = reservituotteen teoreettinen normaalitilan vaste (MW), reservitoimittajan laskujen mukaan. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 26.)

Tehon ja syötetyn signaalin välinen vaihesiirto φ asteina lasketaan kaavalla:

$$\varphi = \text{Arg}(F(j\omega)) = \Delta t(\omega) \frac{360^\circ}{T}$$

, jossa

$\Delta t(\omega)$ = syötetyn testisignaalin ja mitatun tehon huippukohtien ero sekunneissa

T = on testisignaalin jaksonaika (s). (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 26.)

Reservituotteen tehonsäädön vasteelle saadaan täten siirtofunktio:

$$F(j\omega) = |F(j\omega)| \cos(\varphi(\omega)) + |F(j\omega)| j \sin(\varphi(\omega))$$

Sähköjärjestelmän ja reservikohteen stabiilisuutta voidaan arvioida kertomalla reservituotteen siirtofunktio $F(j\omega)$ sähköjärjestelmän siirtofunktiolla $G(j\omega)$:

$$G_0(j\omega) = F(j\omega)G(j\omega)$$

Sähköjärjestelmää kuvaava siirtofunktio on:

$$G(j\omega) = \frac{\Delta P_{FCR-X}}{\Delta f_{FCR-X}} \frac{f_0}{S_n} \frac{1}{2H j\omega + K_f \cdot f_0}$$

(Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 27.)

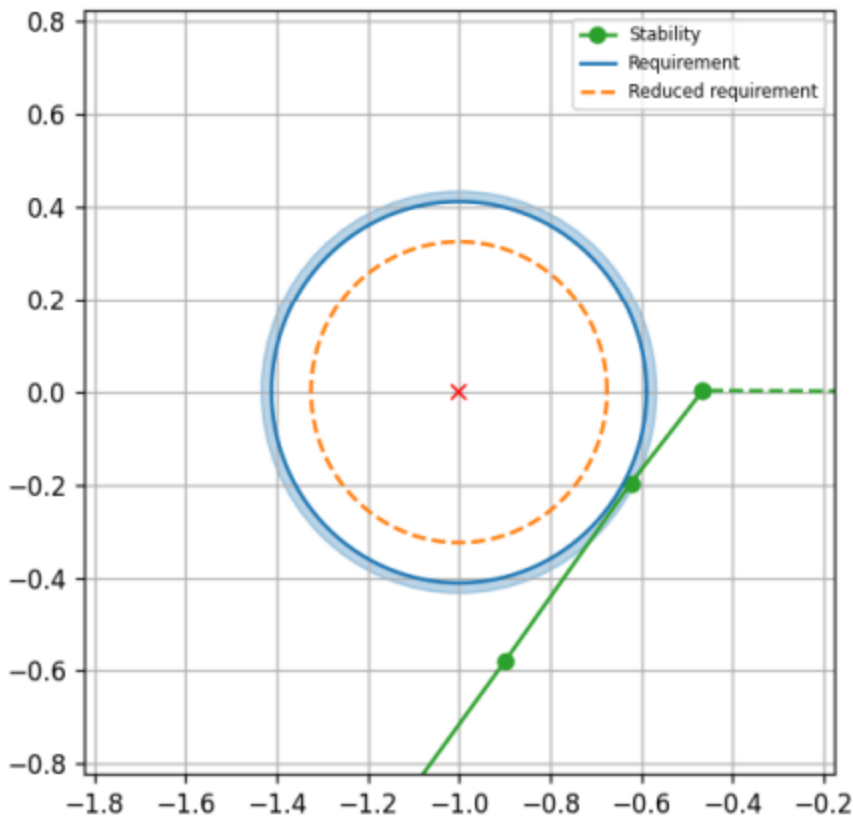
Koko järjestelmän siirtofunktiossa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 4:

Taulukko 4. Sähköjärjestelmän siirtofunktion parametrit. (Taajuuden vakautusreservien (FCR)
teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 27.)

Parametri	Selite	FCR-N suori- tuskyky	FCR-N stabiili	FCR-D suori- tuskyky	FCR-D stabiili
ΔP_{FCR-X} [MW]	FCR määrä	600	600	1450	1450
Δf_{FCR-X} [Hz]	FCR taa- juuskaista yhteen suuntaan	0,1	0,1	0,4	0,4
f_0 [Hz]	Nimellis- taajuus	50	50	50	50
S_n [MW]	Nimellis- teho	42 000	23 000	42 000	23 000
H [s]	Inertiava- kio	190 000 $MWs/S_n =$ 4,5238 s	120 000 $MWs/S_n =$ 5,2174 s	190 000 $MWs/S_n =$ 4,5238 s	120 000 $MWs/S_n =$ 5,2174 s
K_f [p.u.]	Kuormituk- sen taa- juusriippu- vuus	0,01	0,01	0,01	0,01

Nyt voidaan tarkastella järjestelmän $G_0(j\omega)$ stabiilisuutta piirtämällä sille Nyquist-käyrä kompleksitasossa. Järjestelmä on stabiili, jos se kiertää kompleksitason pisteen (-1,0j) oikealta puolelta riittävän etäisyyden päästä eikä myöskään kierrä em. pisteen ympäriltä. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämipro-
sessi 2023, 27–28)

Esimerkkituotteen käyrä voidaan nähdä kuviosta 9:



Kuvio 9. Esimerkki Nyquist-käyrästä ja stabiilisuusvaatimuksesta. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 28.)

Kuvassa vihreät pisteet ovat eri sinitestin jaksonajoilla saatuja tuloksia ja vihreä käyrä on interpoloitu näiden pisteiden välille. Pisteeseen $(-1,0j)$ ympärille piirretty vaalean sininen ympyrä (halkaisija $r=0,43$) on vaadittu stabiilisuus. Vaaditussa stabiilisuudessa on 95 % prosentoinen marginaali, eli käytännössä oikea stabiilisuuden rajaa merkitsevän ympyrän halkaisija on $0,95 \cdot 0,43$ (tumman sininen ympyrä). Jos reservituotteella ei päästä edellä mainittuun stabiilisuuteen on sille mahdollista hakea poikkeuslupaa Fingridiltä. Poikkeusluvalla vaadittu stabiilisuuden marginaali voidaan laskea 75 %:iin. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 28.)

Vaadittuun stabiilisuuteen voidaan tehdä poikkeamia sen takia, että yksittäisen reservituotteen heikompi stabiilisuus ei todellisuudessa merkittävästi heilauta sähköverkon tasapainoa. Stabiilisuusvaatimuksen pohjalla on ajatus siitä, että sähköverkon tulisi olla stabiili, jos jokainen siihen kytketty reservituote olisi samanlainen kuin testattavana oleva. Tämä voidaan nähdä myös yllä

olevista laskuista, joissa oletetaan, että jokainen verkkoon kytketty reservituote on ominaisuuksiltaan samanlainen kuin testattava tuote. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 24)

6.2.4 Taajuusohjattujen reservituotteiden säädön lineaarisuus

Taajuusohjattujen reservituotteiden aktivoinnin ja deaktivoinnin tulee seurata lineaarista säätimen statiikan mukaista käyrää mahdollisimman tarkasti. Normaalitilanteessa reservituotteen normaalitilan tehovaste taajuuden muuttuessa tulisi olla mahdollisimman lähellä alla olevalla kaavalla saatua arvoa:

$$\Delta P_{FCR} = -\frac{1}{e_p} \Delta f$$

, jossa e_p on säätimen statiikka

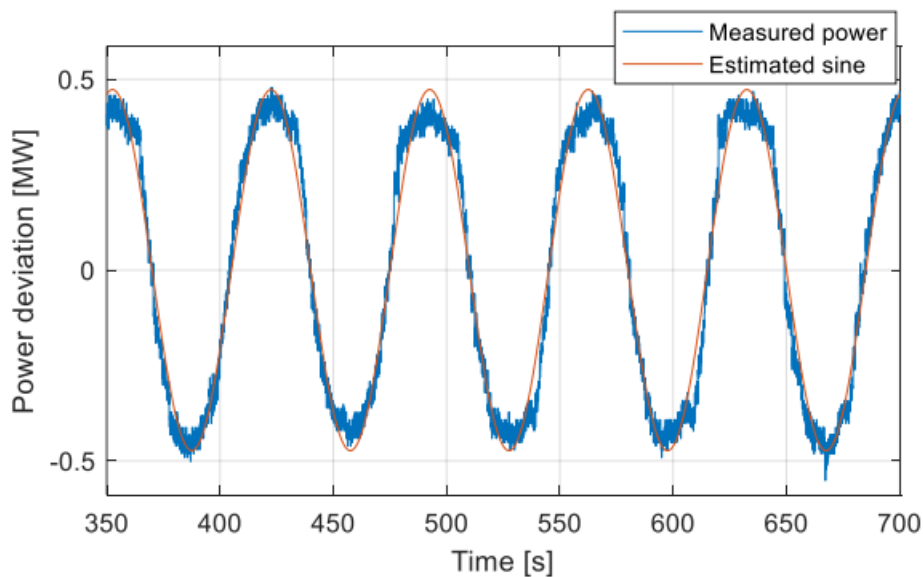
Δf on taajuuspoikkeman suuruus. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 67.)

Yllä olevaa kaavaa voitaisiin myös kutsua teoreettisen normaalitilan vasteen kaavaksi. Kun säätimen statiikka on tiedossa, kaavan avulla voidaan selvittää teoreettinen normaalitilan vaste mitattuun taajuuspoikkeamaan.

Dynaamiseen säätöön kykenevien reservituotteiden lineaarisuutta arvioidaan sinitestin avulla. Sinitestin kulku ja jaksonajat ovat esitelty tarkemmin luvussa 6.2.3. Stabiilisuutta käsittelevässä luvussa 6.2.3 sinitestin syöttösignaalin ja reservituotteen tehovasteen amplitudia ja vaihetta verrattiin keskenään. Lineaarisuutta arvioitaessa reservituotteen tehovastedatan perusteella sovitetaan sinikäyrä samaan vaiheeseen mitatun todellisen tehovasteen kanssa. Sovitus tehdään hyödyntämällä pienimmän neliösumman menetelmää. Sovituksen jälkeen sovitetun sinikäyrän keskiarvolista neliöllistä virhettä verrataan sovitetun käyrän keskihajonnalla normalisoituun mitattuun tehoon. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 30.)

Sovitetun käyrän keskiarvollisen neliöllisen virheen ja normalisoidun mitatun tehon jakolaskun tulos tulisi olla pienempi kuin 1, alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N |P_{mv}(t) - P_{est}(t)|^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^N \left| P_{est}(t) - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P_{est}(t) \right|^2}} < 1$$



Kuvio 10. Sovitettu sinikäyrä ja todellinen tehovaste. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 31.)

Kuviosta 10 voidaan nähdä miltä pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettu tasainen sinikäyrä (oranssi) ja todellinen mitattu tehokäyrä (sininen) saattaisi näyttää.

6.3 FFR tekniset vaatimukset

6.3.1 Vaatimukset nopean taajuusreservin aktivoinnille ja deaktivoinnille

Nopealla taajuusreservillä on kolme taajuuden kynnsarvoa ja niitä vastaavat aktivointiajat. Reservitoimittaja valitsee näistä kolmesta yhden. Reservikohde tulee aktivoida täysimääräisesti vaaditun

aktivointiajan sisällä taajuuden saavuttaessa valitun kynnsarvon. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 5.)

Nopean taajuusreservin vaaditut aktivointiajat on esitetty taulukossa 5:

Taulukko 5. FFR aktivointiajat. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 5)

Aktivointitaajuus (Hz)	Aktivointiaika (s)
≤49,70	≤1,30
≤49,60	≤1,00
≤49,50	≤0,70

Aktivoinnin vähimmäiskestolle on kaksi vaihtoehtoa riippuen reservikohteen deaktivoinnin nopeudesta. Deaktivoinnilla tarkoitetaan reservikohteen palauttamista tilaan, jossa reservikapasiteetti ei ole aktivoituneena. Reservin tulee pysyä aktivoituneena vähimmäiskeston ajan taajuudesta riippumatta. Vähimmäiskeston ajan kuluttua deaktivointi on niin ikään sallittua taajuudesta riippumatta. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 5)

Vähimmäiskestot ja vastaavat deaktivoinnin nopeudet on esitetty taulukossa 6:

Taulukko 6. FFR vähimmäiskesto

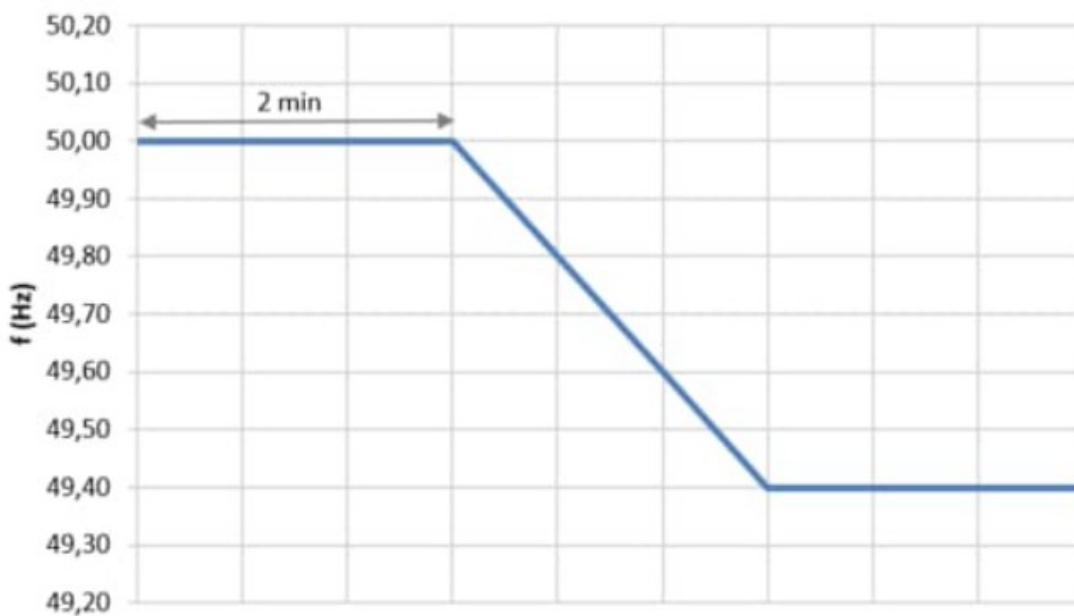
Aktivoinnin vähimmäiskesto (s)	Deaktivoinnin maksiminopeus
30 s	ei rajoitettu
5 s	enintään 20 % reservikapasiteetista sekunnissa

Reservin aktivoimisesta seuraava tehonmuutos saa ylittää hyväksytyn kapasiteetin korkeintaan 20 %:lla. Fingridiltä on mahdollisuutta hakea rajaan muutosta 35 %:iin asti. Poikkeus voidaan myöntää, jos Fingridin arvion mukaan Suomen maakohtainen ylitys ei kasva yli 20 %:iin. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 5–6.)

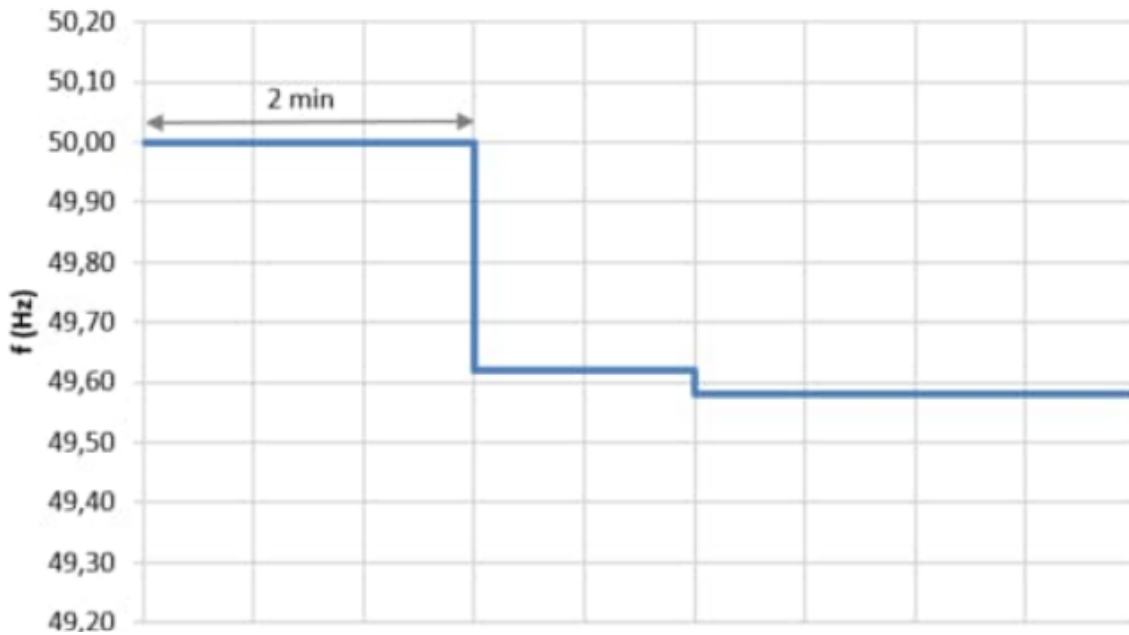
6.3.2 Nopean taajuusreservin testisekvenssi

Nopean taajuusreservin säätökokeessa mittaus tulee aloittaa vähintään kaksi minuuttia ennen testisignaalin syöttämistä. Mittausta tulee jatkaa, kunnes reservikohde on deaktivoitunut ja valmiina uuteen aktivointiin. Testin aikana syötetty signaali on joko ramppimainen tai askelmainen. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2023, 8.)

Syötetyt signaalit on esitetty kuvioissa 11 ja 12:



Kuvio 11. FFR ramppimainen testisignaali. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2023, 9.)



Kuvio 12. FFR askelmainen testisignaali, kun valittu aktivointitaajuus on 49,6 Hz. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 9.)

Ramppimainen testisignaali alkaa arvosta 50 Hz ja päättyy arvoon 49,4 Hz. Rampin nopeus on enintään 0,2 Hz/s. Askelmaista signaalia käytettäessä ensimmäinen askel pysyy enintään 0,05 Hz valitun aktivointitaajuuden yläpuolella, jolloin reservin ei tule aktivoitua. Tämän jälkeen testitaajuus lasketaan aktivointitaajuuteen tai enintään 0,05 Hz sen alle, jolloin reservin tulee aktivoitua vaatimusten mukaisesti. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 8–9.)

6.4 Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) tekniset vaatimukset

6.4.1 aFRR aktivointisignaali

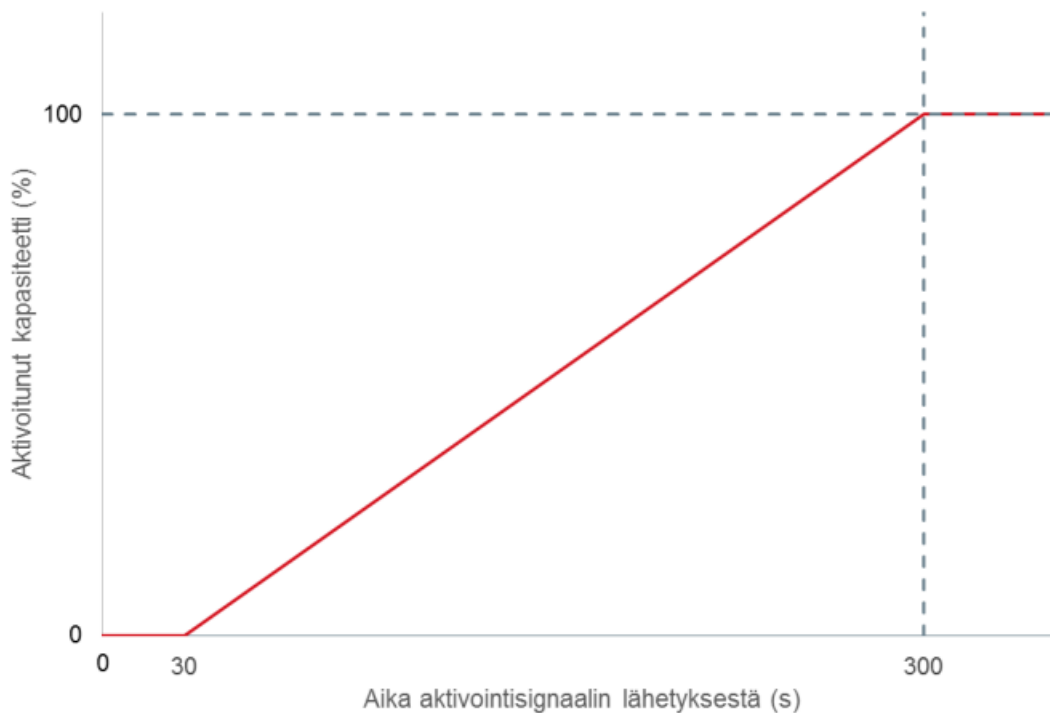
Kuten aiemmin mainittiin, aFRR on keskitetysti ohjattu reservituote, jonka aktivointi perustuu pohjoismaisen synkronialueen taajuuspoikkeamaan. Tarvittava tehonmuutos riippuu taajuuspoikkeaman suuruudesta. Tarvittava tehonmuutos lasketaan taajuuden palauttamiseksi, sekä jo aktivoituneiden taajuusohjattujen reservien vapauttamiseksi. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2022, 4.)

Automaattisen taajuuden palautusreservin tarvittavan tehonmuutoksen laskennassa käytetään integroivaa laskentaa, joten Fingridin lähettämä aktivointipyyntö vaihtaa suuntaa vain, jos tavoitetaajuus on saavutettu. Tavoitetaajuus on tyypillisesti nimellistaajuus 50 Hz, mutta voi myös poiketa tästä, mikäli aFRR avulla palautetaan sähköjärjestelmän aikapoikkeamaa. Aktivointisignaalia lähetetään Fingridin toimesta 10 sekunnin välein. Tiedonsiirtoon käytetään ELCOM tai ICCC protokollia. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2022, 4.)

6.4.2 aFRR aktivoinnin nopeus ja aktivoinnin tarkkuus

aFRR-reservituotteen tulee aktivoida reservikapasiteettinsa 5 minuutin kuluessa aktivointisignaalin lähetyksestä ja aktivointi tulee aloittaa viimeistään 30 sekuntia aktivointisignaalin lähetyksestä. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2022, 4.)

Aktivoinnin miniminopeus on esitetty kuviossa 13:



Kuvio 13. aFRR aktivoinnin miniminopeus (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2022, 5.)

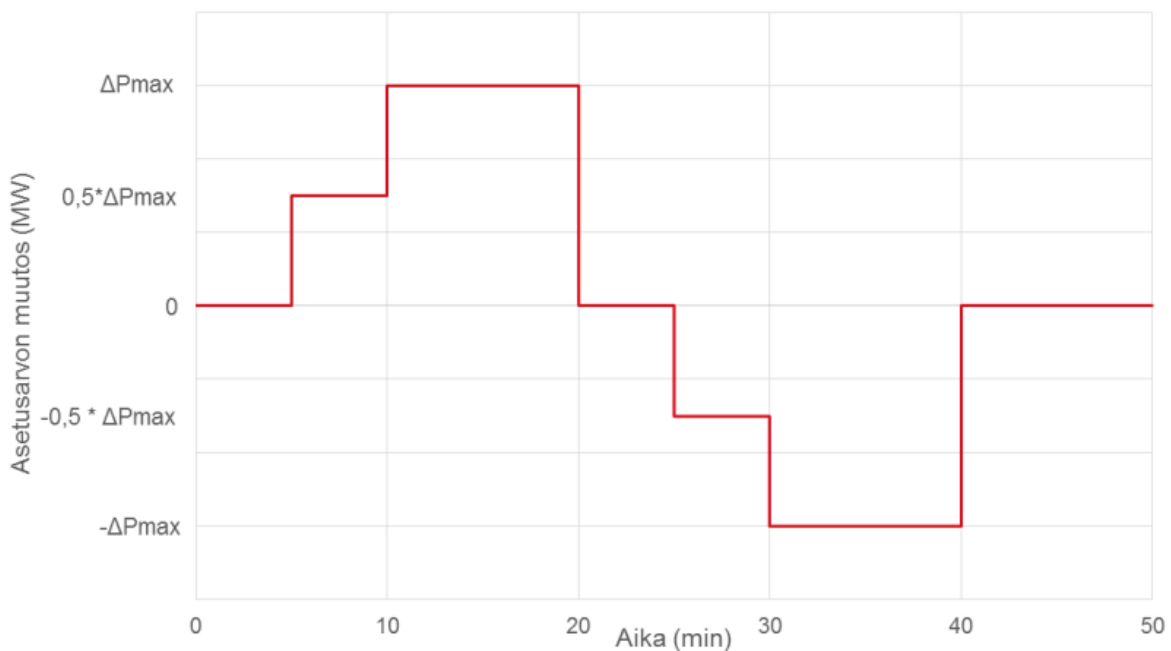
Aktivoinnin tarkkuuden osalta vaatimuksena on, että aktivoituvan reservin määrän tulee olla 90–110 % tehonpyynnöstä. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2022, 5.)

6.4.3 aFRR säätökokeen sekvenssi

Automaattisen taajuuden palautusreservin testisekvenssi on kuvattu taulukossa 7 ja kuviossa 14:

Taulukko 7. aFRR testisekvenssi (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2022, 6.)

Aika [min]	Asetusarvon muutos [MW]
0	0
5	$50\% \Delta P_{max}$
10	ΔP_{max}
20	0
25	$50\% \Delta P_{min}$
30	ΔP_{min}
40	0



Kuvio 14. aFRR testisekvenssi. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2022, 6.)

Sekvenssin aikana testataan suurin (ΔP_{max}) ja pienin (ΔP_{min}) tehonmuutos, jota reservikohteen on tarkoitus toteuttaa. Sekvenssin aikana reservikohteen tulee täyttää luvussa 6.4.2 kuvatut vaatimukset. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2022, 5.)

6.5 Reservikapasiteetin aggregointi useista kohteista

Reservituotteiden minimitarjouksen koko on pääosin 1 MW, poikkeuksena taajuusohjattu käyttöreservi, jonka minimitarjouskoko on 0,1 MW. Reserviresursseja voidaan aggregoida, jotta myös pienempien tuotantolaitosten on mahdollista osallistua reservimarkkinoille. Tällaisia pienempiä tuotantolaitoksia ovat esimerkiksi kiinteistöjen katoille asennettavat aurinkovoimalat.

Reservien aggregointi on pääosin sallittua myös eri tasevastaavien resursseista. Taajuusohjatun käyttöreservin tapauksessa saman suunnan säädön aggregointi eri tasevastaavilta ei ole sallittua, mutta eri suunnan säätö voidaan aggregoida eri tasevastaavien resursseista.

6.5.1 Taajuusohjattujen reservituotteiden aggregointi

Taajuusohjattujen reservituotteiden tapauksessa reservituotteiden aggregointi on tehty joustavaksi. Aggregoiduilla reservituotteilla on kaksi ns. joustavuuden tasoa. Nämä kaksi tasoa ovat käytön aikainen joustavuus ja hyväksyttämiproessin aikainen joustavuus. Näistä kahdesta voidaan hyödyntää vain toista tai molempia samanaikaisesti. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 51.)

Joustavuuden tasot ovat esitetty taulukossa 8:

Taulukko 8. Aggregoinnin joustavuuden tasot (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 52.)

	Staattinen käyttö	Joustava käyttö
Staattinen hyväksyttämisprosessi	Aggregoitu reservituote testataan kokonaisuutena kuten se olisi yksittäinen tuote	Aggregoitu reservituote testataan kokonaisuutena, mutta käytön aikana osa hyväksytyistä resursseista ei osallistu säätöön
Joustava hyväksyttämisprosessi	Resursseja lisätään/poistetaan aggregoidusta tuotteesta, mutta käytön aikana kaikki hyväksytyt resurssit osallistuvat säätöön	Resursseja lisätään/poistetaan ja käytön aikana osa hyväksytyistä resursseista ei osallistu säätöön

Joustavalla hyväksyttämisprosessilla tarkoitetaan tilanteita, joissa reservitoimittaja on suorittanut säätökokeet aggregoidulle reservituoteryhmälle hyväksytysti, mutta haluaa lisätä edellä mainittuun ryhmään lisää yksittäisiä resursseja. Joustavan hyväksyttämisprosessin avulla säätökoe vaaditaan suoritettavaksi vain myöhemmin lisätyille resursseille ilman koko ryhmän testaamista kokonaisuutena. Joustavaa hyväksyttämisprosessia hyödynnetään tyypillisesti sellaisten tuotteiden osalta, jotka täyttävät yksittäisinä tekniset vaatimukset, mutta vaativat pienen kokonsa vuoksi aggregointia tarjottavan reservikapasiteetin minimikoon saavuttamiseksi. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 52.)

Joustavalla käytöllä tarkoitetaan tilanteita, joissa reservitoimittaja on suorittanut reservituoteryhmälle tarvittavat säätökokeet hyväksytysti, mutta ei halua käyttää jokaista ryhmän resurssia reservin ylläpitoon kaikkina aikoina. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 53.)

6.5.2 Nopean taajuusreservin aggregointi

Nopean taajuusreservin ylläpitoon voidaan myös osallistua aggregoiduilla resursseilla. Aggregoitujen nopean taajuusreservin kohteiden säätökyvyn todentaminen voidaan tehdä testaamalla aggregoitu reservituote kokonaisuutena tai vaihtoehtoisesti testaamalla yksittäiset resurssit erikseen. Testattaessa yksittäiset resurssit erikseen, tulee reservitoimittajan osoittaa, että vaatimukset mm.

tiedonsiirron osalta täyttyvät koko järjestelmän osalta. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämispöytäkirja 2023, 10–11.)

6.5.3 Automaattisen taajuuden palautusreservin aggregointi

Myös automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon voidaan osallistua aggregoidulla resursseilla. Automaattisen taajuuden palautusreservin tapauksessa aggregointi on mahdollista myös eri tasevastaavien resursseista, mutta reservitoimittajan tulee lähettää Fingridille tarvittavat reaaliaikaiset tiedot taseiden jakosuhteista tasevastaavien kesken. (Ehdot ja edellytykset automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) toimittajalle 2024, 8)

6.6 Reservituotteiden mittauslaitteiden vaatimukset, tallennettavat historiatiedot ja tiedonvaihto Fingridin kanssa

6.6.1 Taajuusohjattujen reservituotteiden (FCR-N ja FCR-D) mittauslaitteiden vaatimukset ja tallennettavat historiatiedot

Taajuusohjattujen reservituotteiden mittalaitteille on aseteltu tiettyjä vaatimuksia mm. tarkkuuden, resoluution ja näytteenottovälin suhteen. Pätötehon mittauksen tarkkuuden vaatimus riippuu reservituotteen nimellistehosta. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 22.)

Mittaustarkkuuden vaatimus pättötehon ja taajuuden osalta on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Taajuusohjattujen reservituotteiden mittauksen tarkkuus

Mitattava suure	Kategoria	Nimellisteho	Sallittu epätarkkuus
Pätöteho	A	$P < 1,5 \text{ MW}$	$\pm 5 \%$
	B	$1,5 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$\pm 1 \%$
	C+D	$\geq 10 \text{ MW}$	$\pm 0,5 \%$
Verkon taajuus	-	-	$\pm 10 \text{ mHz}$
Testin aikainen testitaajuus	-	-	$\pm 10 \text{ mHz}$

Pätötehon mittauksen vaadittu resoluutio on 0,01 MW tai 0,025 %. Pätötehon mittauksessa suositellaan käyttämään 16-bittistä muunninta, jolloin mittauksessa hyödynnettävien tasojen määrä on

$2^{16} = 65536$. Jos mitta-alue on 0-100 %, saadaan resoluutioksi $\frac{100}{65536} = 0,0015$ %. Taajuuden mittausten resoluution tulee olla vähintään 5 mHz. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 56.)

Mittalaitteiden näytteenottovälin testien aikana tulee olla enintään 0,1 sekuntia FCR-D osalta ja 0,2 sekuntia FCR-N osalta. Käytön aikaisten mittausten näytteenottovälin tulee olla enintään 1 sekunti. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi 2023, 56.)

Fingrid vaatii tietoa ylläpidettävästä reservin määrästä (erikseen FCR-N, FCR-D ylösäättö ja FCR-D alassäättö) ja hetkellisestä pätötehosta reaaliaikaisesti 60 sekunnin päivitysvälein. Sääriippuvilta tuotteilta vaaditaan lisäksi saatavilla oleva pätöteho (Pavailable) kymmenen sekunnin päivitysvälein. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 22.)

Taajuusohjattujen reservituotteiden käytön ja testien aikana vaaditut mittaukset ovat esitetty taulukossa 10. X-merkki ruudussa tarkoittaa, että mittaus vaaditaan. "suos."-teksti tarkoittaa, että mittaus on suositeltavaa. "per testi"-teksti tarkoittaa, että arvo tulee ilmetä testiraportissa, mutta sitä ei tarvitse mitata jatkuvasti testin aikana. Kaikki kirjattava data tulee olla double-tietotyyppiä kolmen desimaalin tarkkuudella (esim. 37.500), lukuun ottamatta on/off-tyyppisiä muuttujia, joiden mittausdata ilmoitetaan binäärisenä (on=1, off=0).

Taulukko 10. FCR mittaukset. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely 2023, 62.)

Nimi	Selite	Vaaditaan testin aikana (sulussa vaadittu näytteenottoväli)	Vaaditaan käytön aikana (sulussa vaadittu näytteenottoväli)	Vaaditaan reaaliaikaisesti (sulussa päivitysväli)	Yksikkö
InsAcPow	Hetkellinen pätöteho	X (0,1 s / 0,2 s)	X (1 s)	X (60 s)	MW
Pavailable	Saatavilla oleva pätöteho			X (10 s)	MW
GridFreq	Verkkotaajuus	X (0,1 s / 0,2 s)	X (1 s)		Hz
ApplFreqSig	Testin aikana syötetty taajuus	X (0,1 s / 0,2 s)			Hz
ContMode_Fcrn ContMode_FcrdUp ContMode_FcrdDo	Säätimen moodi (tuotekohtaisesti)	X (0,1 s / 0,2 s)	suos.		merkkijono
Cap_Fcrn Cap_FcrdUp Cap_FcrdDo	Ylläpidetty reservikapasiteetti	per testi	X (1 s)	X (60 s)	MW
ContStatus_Fcrn ContStatus_FcrdUp ContStatus_FcrdDo	Säädön aktiivisuus (tuotekohtaisesti)	per testi	X (1 s)		on/off
RegStr_Fcrn RegStr_FcrdUp RegStr_FcrdDo	Säätövoima (tuotekohtaisesti)		X (1 s)		MW/Hz
CalcBaseline	Tehoasetus / laskennallinen baseline / referenssiteho	suos.	X (1 s)		MW
Pmax	Reservikohteen maksimateho	per testi	X (1 s)		MW
Pmin	Reservikohteen minimateho	per testi	X (1 s)		MW
ContOutSig	Säätimen output-signaali	suos.	suos.		
ContSetP	Setpoint ennen FCR	per testi			% tai MW
Act_Fcrn Act_FcrdUp Act_FcrdDo	Aktivoitunut reservi (laskennallinen)		X (1 s)		MW
SolarIrr	Auringon säteilyn määrä		suos. (1 s)		W/m ²

6.6.2 Nopean taajuusreservin mittausvaatimukset ja historiatiedot

Vaatimukset nopean taajuusreservin mittausten tarkkuuteen ja resoluutioon liittyen ovat samat kuin taajuusohjatuilla reserveillä, lukuun ottamatta käytön aikaisten mittausten näytteenottoväliä, joka on nopealla taajuusreservillä korkeintaan 0,1 sekuntia. Taajuusohjattujen reservituotteiden tapaan myös osalle nopean taajuusreservin mitattavista muuttujista vaaditaan reaaliaikaista tiedonsiirtoa. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisprosessi 2023, 10.)

Nopean taajuusreservin mitattavat muuttujat on esitetty taulukossa 11:

Taulukko 11. FFR mittaukset (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 22, 26.)

Nimi	Selite	Vaaditaan testin ja käytön aikana (suluissa näytteenottoväli)	Vaaditaan reaaliaikaisesti (suluissa päivitysväli)	Yksikkö
InsAcPow	Hetkellinen pätöteho	X (0,1 s)	X (60 s)	MW
Pavailable	Saatavilla oleva pätöteho		X (10 s)	MW
GridFreq	Verkkotaajuus	X (0,1 s)		Hz
Cap_Ffr	Ylläpidetty reservikapasiteetti	X (0,1 s)	X (60 s)	MW
ContSetP	Säätimen asetusarvo	X (0,1 s)		MW
ContOutSig	Säätimen ulostulo	suos.		MW
ContMode	Säätimen toimintatila	X (0,1 s)		merkkijono
inLimFfr	inLimFfr	suos.		on/off
SolarIrr	Auringon säteilyn määrä	suos.		W/m ²

6.6.3 Automaattisen taajuuden palautusreservin mittausvaatimukset ja historiatiedot

Automaattisen taajuuden palautusreservin vaaditut mittaukset on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. aFRR. Mittaukset. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 27.)

Nimi	Selite	Vaaditaan käytön aikana (suluissa näytteenottoväli)	Vaaditaan reaaliaikaisesti (suluissa päivitysväli)	Yksikkö
InsAcPow	Hetkellinen pätöteho		X (10 s)	MW
aFRR_activated	Aktivoitu aFRR-energia	X (60 s)		MW
Pavailable	Saatavilla oleva pätöteho		X (10 s)	MW
aFRR_cap_up aFRR_cap_down	Ylläpidetty reservikapasiteetti (ylös-säätö ja alassäätö)	X (60 s)	X (10 s)	MW
aFRR_signal	Fingridin lähettämän aktivointisignaali	X (60 s)	X (10 s)	MW
	Fingridin lähettämän watchdog-signaalin takaisinlähetytys.		X (4 s)	MW
SolarIrr	Auringon säteilyn määrä	suos.		W/m ²

Taulukon tiedoista voidaan nähdä, että aFRR mittausvaatimukset historiatiedoille ovat kevyemmät, kuin FCR- ja FFR-tuotteilla. Vastavuoroisesti taas reaaliaikaisen tiedonvaihdon osalta vaatimukset ovat raskaammat. Tämä on varsin loogista, sillä aFRR:n aktivointisignaali saadaan keskitetysti Fingridiltä, joten reaaliaikaisen tiedonvaihdon toiminta vaikuttaa myös oleellisesti reservin aktivointiin. Käytön aikaiset historiatiedot tallennetaan 60 sekunnin keskiarvoina. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 27.)

6.6.4 Tiedonvaihto reservitoimittajan ja Fingridin välillä

Reservitoimittaja on veloitettu säilyttämään käytön aikaisia historiatietoja vähintään 14 päivän ajan FCR- ja FFR-reservituotteiden osalta. aFRR historiatiedot tulee säilyttää vähintään kuukauden

ajan. Fingridillä on oikeus pyytää reservitoimittajaa lähettämään historiatiedot, reservitoimittajan ollessa veloitettu toimittamaan em. tiedot enintään 5 työpäivän kuluessa. Tiedot tulee toimittaa reservikohdekohtaisina .csv-tiedostoina. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 24–27.)

Toimitettavan tiedoston nimeäminen FCR- ja FFR-tuotteiden osalta: (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 25.)

[Date]_[Area]_[Resource]_[Interval]_[Timezone].csv, jossa

[Date] on päivä, jona data on kirjoitettu tiedostoon, muodossa YYYYMMDD, esim. 20180916,
 [Area] on alue, jolla reservikohde sijaitsee, Suomessa aina FI,
 [Resource] on reservikohteen nimi, kuten se on kirjattu Restore-tietojärjestelmään,
 [Interval] on ajanjakso, jolta historiatiedot toimitetaan muodossa YYYYMMDDThhmmYYYYMMDDThhmm, esim. 20180914T0935-20180914T0935 (standardin ISO 8601 mukaisesti),
 [Timezone] on datan aikavyöhyke, esim. CET tai UTC

Toimitettavan tiedoston nimeäminen aFRR osalta: (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 27.)

[Date]_[BSP]_[Interval]_[Timezone].csv, jossa

[Date] on päivä, jona data on kirjoitettu tiedostoon, muodossa YYYYMMDD, esim. 20180916,
 [BSP] on reservitoimittajan nimi,
 [Interval] on ajanjakso, jolta historiatiedot toimitetaan muodossa YYYYMMDDThhmmYYYYMMDDThhmm, esim. 20180914T0935-20180914T0935 (standardin ISO 8601 mukaisesti),
 [Timezone] on datan aikavyöhyke, esim. CET tai UTC

Toimitettavan tiedoston formaatti: (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 27.)

- Sisältää otsikkorivin ja vastaavat arvot
- Merkistökooodaus on ASCII, kentät erotetaan toisistaan pilkulla (,), desimaalierottimena käytetään pistettä (.) ja rivinvaihtona ASCII/CRLF

- Aika (DateTime) tulee esittää standardin ISO 8601 mukaisessa formaatissa YYYYMMDDThhmmss.nnn, jossa nnn esittää sekunnin murto-osia
- Lukuarvot raportoidaan kolmen desimaalin tarkkuudella ilman yksikköä
- Tilatiedot (on/off) binäärisinä (0=off, 1=on)
- Tallennusväli on vähintään 1 s FCR:lle, 0,1 s FFR:lle ja 60 s aFRR:lle
- Pätötehon merkkisääntö: nettokulutus negatiivista (-), nettotuotanto positiivista (+)

Toimitettavan tiedoston esimerkkisisältö FFR:lle: (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 25.)

DateTime,Cap_Ffr,InsAcPow,GridFreq,ContSetP,ContMode,ContOutSig,inLimFfr

20180914T093502.000,10.000,10.000,50.000,10.000,FFR1,0.000,0

20180914T093503.000,10.100,10.100,49.990,10.100,FFR1,0.000,0

Reaaliaikaisen tiedonvaihdon toteutukseen reservitoimittajalla on kaksi rajapintavaihtoehtoa. Nämä ovat FEN / KoVa FEN-verkko (ELCOM-, IICCP- tai IEC 60870-5-104-protokolla) tai vaihtoehtoisesti kevyempi web-pohjainen tiedonsiirto. Reservitoimittajan tulee huomioida, että aFRR tapauksessa reaaliaikainen tiedonsiirtoyhteys vaatii aina erillisen ICCP-tiedonsiirtoyhteyden. (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje 2024, 21.)

7 Aurinkovoimalan käyttö reservimarkkinoilla

7.1 Aurinkovoimalan komponentit

Aurinkovoimalan tärkeimmät komponentit ovat aurinkopaneelit, telinejärjestelmä ja invertteri. Aurinkopaneelit koostuvat useista puolijohdemateriaalista valmistetuista sarjaan kytketyistä kennoista, jotka tuottavat sähköä auringon energiasta valosähköisen ilmiön avulla. Aurinkokennoista yli 90 % on piikidekennoja, jotka voidaan vielä jaotella erikseen yksi- ja monikidepiikennoihin. Yksittäisen aurinkopaneelin nimellisteho on yleensä n. 360–640 Wp. Huomaa yksikkö Wp, eli watti-piikki. Aurinkopaneelin nimellisteho ilmoitetaan wattipiikeissä, joka on paneelin tuottama teho laboratoriossa, standardoiduissa olosuhteissa. Aurinkopaneelin kullakin hetkellä tuottama teho riippuu mm. auringon säteilyn voimakkuudesta, ympäristön lämpötilasta, paneelien iästä ja varjostuksesta. Aurinkovoimaloiden nimellistehot ilmoitetaan paneelien nimellistehon tapaan kilowattipiikeissä (kWp) tai megawattipiikeissä (MWp). Aurinkopaneelit kytketään 16–24 paneelin pituisiksi ketjuiksi, eli stringeiksi. Stringit kytketään invertterin MPPT-tuloihin. (Aurinkosähköteknologiat 2024)

Telinejärjestelmän tarkoituksena on paneelien ripustaminen optimaaliseen kulmaan, siten että auringon säteilystä saadaan suurin osa hyödynnettyä. Telinejärjestelmiä on erilaisia, käyttötarkoituksen mukaan. Telinejärjestelmän suunnittelussa tulee ottaa huomioon mahdolliset tuuli- ja lumi-kuormat.

Alkujaan invertteri-termillä on tarkoitettu paneelien tasasähkön verkkoon syötettäväksi vaihtosähköksi muuntavaa vaihtosuuntaajaa. Nykyään invertteri on yleisnimitys erilaisille aurinkovoimalan keskuslaitteille, jotka tekevät paljon muutakin kuin pelkän paneelien tasasähkön muunnon vaihtosähköksi. Useimmat invertterivalmistajat myyvät lisävarusteena inverttereihin liitettäviä logge-reita, jotka mahdollistavat voimalan etäseurannan ja -ohjauksen internetin välityksellä, tyypillisesti valmistajan oman järjestelmän avulla. Invertterin valinta tehdään siihen liitettävien aurinkopaneelien yhteenlasketun nimellistehon perusteella. Invertterin tulot ovat varustettu MPPT-säätimillä, jotka säätävät säätimeen liitetyn paneeliketjun jännitettä ja virtaa parhaan tehokertoimen saavuttamiseksi. Yksittäisen invertterin MPPT-säätimien määrä vaihtelee. Tyypillisesti yhdelle MPPT-säätimelle on rinnankytkettynä kaksi paneeliketjua. (Kortetmäki, Lehto, Heikkilä, Orrberg, Ylinen, Andersen & Nikander 2023, 70–73.)

Nimellisteholtaan yli 50 kWp aurinkovoimaloille täytyy toteuttaa keskitetty suojaus. Keskitetyllä suojauksella tarkoitetaan lukittavalla kytkimellä varustettua suojalaitetta, jonka avulla koko voimala pystytään irrottaa verkosta esimerkiksi jakeluverkossa tehtäviä huoltotoimenpiteitä varten. Keskitetyn suojauksen toimilaitteeseen tulee myös integroida suojauslaite, joka irrottaa voimalan verkosta verkon häiriöiden aikana ja saarekekäyttötilanteessa. (Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon YA 9:23 2023, 9.)

7.2 Sääriippuvien kohteiden erityispiirteet reservituotteena

Sääriippuville reservikohteille on Fingridin toimesta asetettu tiettyjä lisävaatimuksia ja -ohjeita. Vaatimukset koskevat erityisesti ylösäättöreservien ylläpitoon osallistumista.

Taulukossa 13 on määritelty tässä luvussa käytettävät keskeiset käsitteet.

Taulukko 13. Keskeiset käsitteet. (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 1-2.)

Käsite	Määritelmä
Suurin saatavilla oleva pätöteho [$P_{available}$]	Suurin mahdollinen sen hetkisissä olosuhteissa tuotettava teho. Laskennallinen arvo, jonka suuruuteen vaikuttaa aurinkovoimalan ta-pauksessa mm. auringonsäteilyn määrä ja paneelien lämpötila.
Tehorajoitus [P_{limit}]	Pätötehon arvo, johon voimalaitoksen teho on sillä hetkellä rajoitettu
Referenssiteho [$P_{baseline}$]	Teho, jonka voimalaitos tuottaisi, mikäli reservejä ei ole aktivoitu-neena
Minimiteho [P_{min}]	Pienin teho, jolla voimalaitos voi toimia
Maksimiteho [P_{max}]	Suurin teho, jolla voimalaitos voi toimia. Vastaa saatavilla olevaa pätö-tehoa, ellei verkonhaltija ole asettanut tehorajoitusta
Hetkellinen pätöteho	Mitattu teho verkkoon
Aktivoitunut reservi	Reservin aktivoitumisesta aiheutunut tehomuutos. Lasketaan mitatun hetkellistehon ja referenssitehon erotuksena
Ylläpidetty reservikapasiteetti	Tehokapasiteetti, joka voimalaitoksella on käytössä reservin aktivoitu-miseen, enintään säätökokeessa todettu määrä. Reservin aktivoitumi-nen ei pienennä ylläpidettyä reservikapasiteettia

Sääriippuvalle tuotannolle tulee aina selvittää riittävän tarkka referenssiteho. Referenssitehon pe-rustella tehdään säädöt voimalan tehoon ja todennetaan reservien aktivoituminen laskutusta var-ten. Referenssitehon tulee kytkeytyä aina todelliseen tuotantotehoon. Referenssiteho on joko saa-tavilla oleva pätöteho $P_{available}$ tai vaihtoehtoisesti tehorajoitettu pätöteho P_{limit} , jos tehorajoitus on käytössä ja se on arvoltaan pienempi kuin saatavilla oleva pätöteho. (Ohje ennus-tepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 2.)

Voimalaitokset tyypillisesti rajoittavat tehoaan ylössäätöreservin tarjoamiseksi. Kun tehoa rajoite-taan ylössäätökapasiteetin tarjoamiseksi, täytyy rajoituksen olla riittävä, että tarjottu reservikapasiteetti täyttyy. Tehonrajoitus voidaan asettaa joko suhteessa saatavilla olevaan pätötehoon tai absoluuttisena tehorajana. Rajoittaessa tehoa absoluuttiseen tehorajaan, täytyy siinä olla riittä-västi marginaalia saatavilla olevan pätötehon vaihteluun nähden. Jos tehoa on rajoitettu verkon-haltijan vaatimusten vuoksi, ei ylössäädön aktivoituminen saa aiheuttaa tehorajan ylitystä. (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 2.)

FCR-D:ssä ja FFR:ssä referenssitehona voidaan käyttää hetkellistä tehoa juuri ennen reservin aktivoitumista. FCR-D ja FFR aktivoituvat häiriöiden aikaan, ja aktivointien keston voidaan olettaa olevan lyhyitä. Lyhyen aktivointiajan vuoksi aktivoinnin aikaiset referenssitehon vaihtelut voidaan jättää huomiotta. Hetkellistehoon perustuvalla menetelmällä voidaan FCR-D alassäättömarkkinalle osallistua ilman laskennallisen pätötehon käyttöä. Tällöin myöskään saatavilla olevaa pätötehoa ei tarvita reaaliaikaiseen raportointiin. (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 2–3.)

Pätötehon laskennan tarkkuudelle on omat vaatimuksensa. Vaatimuksen täyttymisen todentamiseksi reservitoimittajan tulee toimittaa seuraavat tiedot Fingridille: (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 3.)

- Kuvaus saatavilla olevan pätötehon laskennasta
 - Käytettävät mittaukset, oletukset, mallit jne.
 - Onko käytössä tekoälyä tai muita vastaavia menetelmiä
 - Miten laskenta huomioi poikkeukselliset tilanteet, kuten vaikkapa jäätyminen
- Yhden kuukauden jakso dataa vähintään 10 s resoluutiolla:
 - Aikaleima
 - Laskettu saatavilla oleva pätöteho [MW]
 - Mitattu todellinen hetkellinen pätöteho [MW]
 - Tiedostomuoto .csv, .xlsx, tai .xls
- Tarkastelujaksolla ei saa olla reservin aktivointia tai tehorajoituksia
- Datan tulee olla edustava näyte olosuhteista, joissa reservikohde osallistuisi reservin ylläpitoon.

Pätötehon laskennan laatu arvioidaan seuraavasti:

Lasketaan saatavilla olevan pätötehon poikkeama jokaiselle aikaleimalle:

$$P_{deviation}(t) = P_{available}(t) - P_{measured}(t)$$

Saatavilla olevan pätötehon keskiarvoista lasketaan normalisointiteho:

$$P_{normal} = \frac{\sum P_{available}}{N}$$

, jossa N on aikaleimojen lukumäärä datassa. (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 4.)

Lasketaan normalisoitu keskineliövirheen neliöjuuri, joka ei saa olla yli 5 %:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{P_{deviation}(t)^2}}{P_{normal}}$$

(Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 4.)

Yllä esitetty päätötehon laskennan laatuvaatimus tulee täyttyä niissä olosuhteissa, joissa reserviä aiotaan ylläpitää. Eli laatuvaatimuksen mukaista referenssitehon laskentaa ei vaadita joka hetkelle. Jos huonot olosuhteet (kuten esimerkiksi pilvinen sää), vaikuttavat laskentaan negatiivisesti, voidaan ne korvata tarkastelujaksoilla, joissa on paremmat olosuhteet. Reservin ylläpito tulee ajoittaa sellaisille hetkille, joilla laskennan laatuvaatimus täyttyy. (Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa 2024, 4.)

8 Mahdollisuudet käytännössä

Aurinkovoimalat soveltuvat lähtökohtaisesti reservikäyttöön hyvin, koska niiden tehoa pystytään säätämään nopeasti ja tarkasti myös etäyhteyden avulla, mikä on perusedellytys reservimarkkinoilla toimimiseen. Tällä hetkellä Solarigon voimaloissa etäohjaukseen käytettävillä loggereilla ja valmistajien omilla etäseurantaportaaleilla ei kuitenkaan ole mahdollista täyttää automaattisille reservituotteille asetettuja korkeita teknisiä vaatimuksia. Reservimarkkinoille osallistuminen vaatii siis järjestelmäarkkitehtuurin päivittämistä, mikä taas tarkoittaa lisäinvestointeja komponentteihin ja ohjelmistoihin.

8.1 Ohjausjärjestelmä

Reservimarkkinoille osallistuminen vaatii suorituskykyisen ja luotettavasti toimivan ohjausjärjestelmän. Ohjausjärjestelmä voidaan erilaisten toiminnallisuuksien tasojen perusteella jakaa ala- ja ylä-

tasojen järjestelmiin. Koko ohjausjärjestelmä koostuu useasta voimalakohtaisesta alatasojen järjestelmästä ja yhdestä alajärjestelmiä ohjaavasta ylätasojen järjestelmästä, kyseessä on siis ns. hajautettu ohjausjärjestelmä.

8.1.1 Alajärjestelmän toiminta

Alajärjestelmällä tarkoitetaan jokaisella reserviresurssina käytettävällä voimalla sijaitsevaa kokonaisuutta, jonka tarkka kokoonpano vaihtelee valitun markkinapaikan ja suunnittelun aikana tehtyjen ratkaisujen mukaan. Alajärjestelmän tehtävänä on säätää voimalan tehoa paikallisen taajuusmittauksen tai yläjärjestelmästä saadun ohjaussignaalin perusteella. Erilaisia ratkaisuja alajärjestelmän toteutukseen käydään läpi tarkemmin luvussa 10.

8.1.2 Yläjärjestelmän toiminta

Yläjärjestelmällä tarkoitetaan keskitettyä valvomoa, johon alajärjestelmät liitetään. Yläjärjestelmästä käsin tulisi pystyä ohjaamaan ja valvomaan alajärjestelmien toimintaa, mm. reservisäädön ajoitusten ja reservimarkkinoilla ylläpidettävän kapasiteetin osalta. Reaaliaikainen tiedonvaihto Fingridin kanssa on myös järkevin toteuttaa keskitetysti yläjärjestelmän kautta.

Ylätasojen järjestelmä yhdistää kaikki alajärjestelmät ja täten koko hallinnassa olevan reservikapasiteetin yhteen keskitettyyn käyttöliittymään. Yläjärjestelmästä käsin tulisi olla mahdollista asetella resurssien parametrejä alajärjestelmätasolla ja valvoa resurssien toimintaa reaaliajassa. Erityisesti aggregoitujen kokonaisuuksien hallintaan tarvitaan luotettavasti toimivaa yläjärjestelmää, joka kerää aggregoituun resurssiin kuuluvilta alajärjestelmiltä niiden lähettämän datan ja yhdistää sen. Yläjärjestelmässä käsitellään suuret määrät dataa ja tehokkaasti toimiva yläjärjestelmän tarvitsee-kin rinnalleen myös toimivan tietokannan. Erilaisista yläjärjestelmän toteutusratkaisuista lisää luvussa 11.

9 Markkinapaikan valinta

Oleellinen osa reservimarkkinaprojektia on valita markkinapaikka, jolle toimeksiantajan hallussa olevalla kapasiteetilla aiotaan osallistua. Periaatteessa osallistuminen kaikkien reservien ylläpitoon on aurinkovoimalalla mahdollista, mutta jokaista alajärjestelmää ei kuitenkaan ole tarkoituksen-

mukaista suunnitella siten, että sillä voidaan osallistua kaikkien reservien ylläpitoon. Eri markkina-
paikkojen erot teknisten vaatimusten osalta ovat merkittävät ja vaikuttavatkin täten myös erityi-
sesti alajärjestelmiltä vaadittaviin ominaisuuksiin.

9.1 Taajuusohjatun käyttöreservin ylläpito

Taajuusohjatun käyttöreservin vaatimukset säädön nopeudelle on esitetty taajuustasossa, ja vas-
taavat aikatasossa noin 63 % vaatimusta aktivoinnille minuutin kuluessa ja 95 % aktivoinnille kol-
men minuutin kuluessa. Säädön nopeuden vaatimus on siis varsin maltillinen ja vaatimuksen saa-
vuttamisessa tuskin esiintyy haasteita.

Historiatietojen vaadittu tallennusväli on säätökokeen aikana 0,2 sekuntia ja käytön aikana 1,0 se-
kuntia. Erityisesti säätökokeen aikana vaadittu tallennusväli on tiheä, ja saattaa aiheuttaa ongel-
mia. Taajuuden mittauksen vaadittu tarkkuus $\pm 0,01$ Hz on saavutettavissa, mutta vaatii investoin-
tia korkealaatuiseen sähkönlaatumittariin.

FCR-N on symmetrinen tuote, eli sen ylläpitoon osallistuvan resurssin tulee kyetä tuottamaan sää-
töä molempiin suuntiin. Ylössäätökomponentin vuoksi FCR-N ylläpitoon osallistuvalla resurssille
täytyy toteuttaa luotettavasti toimiva saatavilla olevan pätötehon laskenta, joka vaatii lisäinves-
tointia pyranometriin ja kasvattaa ohjelmointikuluja.

Symmetrisen säädön vuoksi FCR-N on haastava tuote myös taloudellisesta näkökulmasta. Riittävän
ylössäätökapasiteetin ylläpitämiseksi tulee voimalan tehoa rajoittaa niinä hetkinä, kun reserviä yl-
läpidetään. Tehon rajoittaminen on ongelmallista erityisesti sellaisissa voimaloissa, joissa on asiak-
kaan kanssa solmittu PPA-sopimus, sillä tehoa rajoittamalla menetetään tuloja asiakkaalle myydyn
energian määrän ollessa tehonrajoituksen vuoksi pienempi.

9.2 Taajuusohjatun häiriöreservin ylläpito

Taajuusohjatun häiriöreservin säädön tulee toimia huomattavasti nopeammin kuin taajuusohja-
tulla käyttöreservillä. Vaatimusten mukaan voimalan tulee kyetä aktivoimaan 86 % koko kapasitee-
tistaan 7,5 sekunnin kuluessa taajuuspoikkeaman ilmetessä. Historiatietojen vaadittu näytteenot-
toväli on säätökokeen aikana 0,1 sekuntia ja käytön aikana 1,0 sekuntia, eli taajuusohjattua

häiriöreserviä koskee samat säätökokeen aikaisten historiatietojen tallennuksen haasteet kuin käyttöreserviäkin, myös taajuuden vaadittu mittaustarkkuus (0,01 Hz) on sama kuin käyttöreservillä ja vaatii investointia korkealaatuiseen sähkönlaatumittariin.

Taajuusohjattu häiriöreservi on jaettu ylössäätö- ja alassäätötuotteisiin. Ylössäätöreservin ylläpitoon liittyvät samat haasteet kuin aiemmin esitetyn taajuusohjatun käyttöreservin tapauksessa, eli vaatimus saatavilla olevan pätötehon laskennasta, sekä tehonrajoituksista seuraavat myymättömästä sähköstä koituvat tulonmenetykset. FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon osallistuminen ei aiheuta myymättömän sähkön osalta yhtä merkittäviä tulonmenetyksiä kuin ylössäätöreservien ylläpitoon osallistuminen, jossa tehoa täytyy rajoittaa pitkäkestoisesti riittävän ylössäätökapasiteetin riittävyden varmistamiseksi. Alassäätöreserviä ylläpidettäessä tehoa rajoitetaan vain taajuuspoikkeamien aikana ja taajuusohjatun häiriöreservin aktivointiajat ovat tyypillisesti lyhyitä.

Lyhyiden aktivointiaikojen vuoksi FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon ei myöskään tarvita saatavilla olevan pätötehon laskentaa, vaan aktivoitu kapasiteetti voidaan laskea käyttämällä referenssitehona hetkellistä pätötehoa juuri ennen reservin aktivoitumista (kts. luku 7.2).

9.3 Nopean taajuusreservin ylläpito

Nopean taajuusreservin ylläpitoon vaaditaan erittäin nopeaa aktivointiaikaa (0,7–1,3 sekuntia) ja tiheää historiatietojen tallennusväliä (0,1 sekuntia). Myös vaadittu taajuuden mittauksen tarkkuus (0,01 Hz) on muiden taajuusohjattujen tuotteiden tapaan korkea. Nopea taajuusreservi on ylössäätötuote, joten sille tulee toteuttaa saatavilla olevan pätötehon laskenta ja riittävän ylössäätökapasiteetin varmistamiseksi myös voimalan tehoa on rajoitettava.

Muista taajuusohjatuista reservituotteista poiketen nopean taajuusreservin aktivoitua kapasiteettia ei säädellä taajuuden poikkeaman suuruuden mukaan. Koko kapasiteetti aktivoidaan nopeasti taajuuden alittaessa etukäteen asetellun kynnyksarvon. Yksinkertaisemman toimintalogiikkansa vuoksi nopean taajuusreservin ylläpitoon ei tarvita yhtä edistynyttä säätöohjelmaa kuin muilla taajuusohjatuilla reservituotteilla.

9.4 Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpito

Automaattinen taajuuden palautusreservi eroaa aiemmin esitellyistä taajuusohjatuista reservituotteista aktivointitavaltaan. Automaattinen taajuuden palautusreservi aktivoidaan Fingridin lähettämän signaalin perusteella. Reservitoimittaja voi tarjota automaattisen taajuuden palautusreservin markkinoille ylös- tai alassäätökapasiteettia.

Ylössäätöreservin ylläpitoon liittyvät samat haasteet kuin muillakin ylössäätötuotteilla ja taajuusohjatun häiriöreservin alassäädöstä poiketen automaattisen taajuusreservin ylläpitämiseksi täytyy jokaiseen alajärjestelmään toteuttaa saatavilla olevan pätötehon laskenta, riippumatta siitä aiotanko resurssia käyttää ylössäätötuotteena vai ei.

Automaattisen taajuuden palautusreservin vaatimukset säädön nopeudelle ovat huomattavasti sallivammat ja helpommin saavutettavat kuin taajuuden perusteella aktivoituvilla reservituotteilla. Automaattisen taajuuden palautusreservin säätö tulee aloittaa 30 sekunnin kuluessa aktivointisignaalin lähetyksestä ja kapasiteetti tulee olla aktivoituna viiden minuutin kuluessa. Vaadittu historiatietojen tallennusväli (60 s keskiarvo) on myös helposti saavutettavissa.

Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivoinnit kestävät tyypillisesti pidemmän aikaa kuin taajuusohjatuilla reserveilla (lukuunottamatta FCR-N joka säätää käytännössä jatkuvasti). Pidempien aktivointiaikojen vuoksi myös alassäätöreserviä ylläpidettäessä tulee ottaa huomioon säädön aktivoitumisesta johtuvat myymättömästä sähköstä aiheutuvat tulonmenetykset.

Automaattisen taajuusreservin tekniset vaatimukset säädön nopeuden ja historiatietojen tallennusvälin suhteen ovat siis sallivat vrt. taajuusohjatut reservituotteet. Merkittäviä haasteita tuovat kuitenkin reaaliaikaisen tiedonvaihdon vaatimukset. Vaatimusten mukainen reaaliaikainen tiedonvaihto osallistuttaessa aFRR-reservien ylläpitoon tulee toteuttaa FEN- tai KoVa-FEN-verkkoa hyödyntämällä. FEN-verkko on Fingridin ja eri energia-alan toimijoiden välinen analoginen verkko, jonka välityksellä toimijoiden valvomot kommunikoivat. Jos tarvittavaa FEN-yhteyttä ei ole muodostettu voidaan käyttää ulkoista toimijaa, jolta tarvittava yhteys löytyy. Ulkoiselle toimijalle reaaliaikainen data voidaan lähettää kevyemmällä web-pohjaisella tiedonsiirrolla.

10 Alajärjestelmän suunnittelu

Alajärjestelmän suunnittelussa tulisi pyrkiä löytämään sellainen ratkaisu, joka on mahdollisimman yhdenmukainen kaikkien resurssien välillä vaatien mahdollisimman vähän resurssikohtaista räätälöintiä, ainakin samalle markkinalle osallistuvien resurssien osalta.

Markkinapaikkojen tekniset vaatimukset täyttävän alajärjestelmän suunnitteluun on muutamia erilaisia vaihtoehtoja, joita esitellään seuraavissa alaluvuissa. Reservejä ylläpitävät alajärjestelmät voidaan jakaa toimintaperiaatteen ja toteutustavan perusteella kahteen päätyyppiin: itsenäiseen säätöön kykenevään alajärjestelmään ja ylätasen ohjaussignaalilla ohjattavaan alajärjestelmään. Näiden kahden toimintaperiaatteita ja toteutustapoja käsitellään tarkemmin luvuissa 10.2 ja 10.3.

10.1 Aurinkovoimalan peruskomponentit

Kaikille alajärjestelmille asennettavia komponentteja ovat aurinkopaneelit, invertteri, loggeri ja keskitetyn suojauksen sekä voimalan verkonvalvonnan laitteisto. Lisäksi jokaiselle voimalalle luodaan etäohjauksen mahdollistava internetyhteys joko asiakkaan verkon tai oman reitittimen välityksellä. Nämä laitteet muodostavat niin sanotun aurinkovoimalan perusrakenteen ja tarjoavat sille perustoimintamahdollisuudet energian tuotantoon sekä turvalliseen ja vaatimusten mukaiseen operointiin. Peruskomponentit kuuluvat voimalakokonaisuuteen riippumatta siitä, aiotaanko voimalalla osallistua reservimarkkinoille vai ei.

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty aurinkovoimalan peruskomponentit toimeksiantajan voimaloissa, sekä niiden valinnassa huomioon otettavat asiat reservien ylläpitoon liittyen.

10.1.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelit ovat alajärjestelmän komponentti, jotka tuottavat voimalan päätötehon. Aurinkopaneelin valinnalla ei ole juurikaan vaikutusta voimalan suorituskykyyn reservien ylläpitoon liittyen. Solarigon voimaloissa käytetään tyypillisesti Jinko Solar:in valmistamia piikidekenno-aurinkopaneeleita.

10.1.2 Invertteri ja loggeri

Yhteen voimalaan voi sisältyä sen paneelien tuottaman nimellistehon mukaan yksi tai useampia inverttereitä. Yksi loggeri kykenee ohjaamaan useaa invertteriä, joten loggereita asennetaan tyyppillisesti vain yksi. Suuremmissa aurinkopuistoissa, joissa inverttereitä voi olla kymmeniä voidaan joutua käyttämään myös useita loggereita.

Invertterien ja loggerin välinen kommunikointi tapahtuu tyyppillisesti RS485-porttien kautta Modbus-RTU sarjaliikenneprotokollan avulla. Loggereiden kommunikointirajapinnat ulkoisiin järjestelmiin vaihtelevat valmistajan mukaan, mutta käytännössä kaikista löytyy vähintäänkin Modbus-RTU kommunikaation mahdollistava RS485-sarjaliikenneportti.

Reservien ylläpitoon käytettävään voimalaan tulisi valita sellaiset loggerit ja invertterit, joilla on mahdollisimman nopeat ja tarkat säädön vasteet vastaanotettuun ohjaussignaaliin.

10.1.3 Keskitetty suojaus ja voimalan häiriösuojaus

Keskitetyn suojauksen erotuslaite ja häiriösuojaus tulee integroida myös reservien ylläpitoon osallistuvalla voimalalla. Tällä hetkellä Solarigon voimaloihin asennetaan TamControl:in iSMO-etäerotuskytkimet, jotka toimivat keskitetyn suojauksen erotuskytkimenä, sekä häiriösuojalaitteena. Häiriösuojaus on toteutettu verkonvalvontareleellä, joka kytkee voimalan irti verkosta sen havaitessa verkossa asetusarvot ylittävän häiriön.

10.1.4 Internetyhteyden luominen

Jotta aurinkovoimalaa voidaan ohjata ja valvoa etäyhteydellä, tarvitsee sille luoda yhteys internetiin. Internetyhteys pyritään Solarigon voimaloissa luomaan asiakkaan kiinteistöihin asennettujen voimaloiden tapauksessa ensisijaisesti asiakkaan verkon välityksellä. Jos asiakkaan verkon välityksellä ei voida luoda yhteyttä, käytetään Teltonikan RUT200-reititintä. Suurempien, yli 1 MVA aurinkopuistojen tapauksissa internetyhteys luodaan käyttämällä Tosiboxin Lock 670 reititintä.

10.2 Itsenäiseen säätön kykenevän alajärjestelmän suunnittelu

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän etuja verrattuna ylätason ohjaussignaali ohjattavaan alajärjestelmään ovat sen korkea toimintavarmuus ja mahdollisuus saavuttaa nopeampi säädön vaste taajuuden muutoksiin. Itsenäiseen säätön kykenevä alajärjestelmä voidaan myös suunnitella siten, että katkokset tiedonsiirrossa yläjärjestelmän kanssa eivät vaikuta säädön toteutumiseen tai historiatietojen tallennukseen.

Tarve itsenäiseen säätön kykenevälle ohjausjärjestelmälle ilmenee silloin, kun yläjärjestelmästä tulevan ohjaussignaalin perusteella toimivalla säädöllä ei saavuteta teknisiä vaatimuksia esimerkiksi tiedonsiirrossa esiintyvien viiveiden vuoksi tai silloin kun tiedonsiirtoa ei saada toimimaan tarpeeksi luotettavasti.

Itsenäiseen säätöön kykenevää alajärjestelmää voidaan käyttää taajuuden perusteella aktivoituvien reservituotteiden (FCR-N, FCR-D ja FFR) ylläpitoon. Automaattinen taajuuden palautusreservi on joka tapauksessa riippuvainen ylätason järjestelmästä lähetetystä signaalista. Itsenäiseen säätöön kykenevään alajärjestelmän kokoonpanoon kuuluu aurinkovoimalan peruskomponenttien lisäksi erillinen alajärjestelmän ohjausyksikkö ja sähkönlaatumittari.

10.2.1 Alajärjestelmän ohjausyksikkö

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän kriittisin komponentti on sen ohjausyksikkö. Ohjausyksikön tehtävänä on suorittaa paikalliseen taajuuden mittaukseen perustuva pätötehon ohjausviestin laskenta ja välittää tämä ohjausviesti loggerille. Ohjausyksikössä suoritetaan myös muut reservitoimintaan liittyvät laskutoimitukset, esimerkiksi saatavilla olevan pätötehon laskenta, jos sellainen vaaditaan.

Ohjausyksikön tulisi sisältää tarvittavat kommunikointirajapinnat ja tuki valitulle kenttäväyläteknologialle, jotta tiedonvaihto muiden alajärjestelmän laitteiden kanssa on mahdollista. Lisäksi siinä tulisi olla riittävä kapasiteetti muistia, jotta sitä voidaan hyödyntää historiatietojen tallennukseen paikallisesti. Luonnollisesti ohjausyksiköltä vaaditaan myös riittävää laskentatehoa vaaditun säädön nopeuden ja historiatietojen tallennusvälin saavuttamiseksi.

Yllä mainittujen vaatimusten täyttämiseksi voidaan ohjausyksikkönä käyttää ohjelmoitavaa logiikkamoduulia. Ohjelmoitavat logiikat ovat luotettavia teollisuusympäristöissä käytettyjä pienikokoisia tietokoneita, joihin voidaan ohjelmoida erilaisia ohjelmia. Valitaan tässä vaiheessa ohjausyksiköksi Schneider Electricin Modicon M221-sarjan logiikkamoduuli.

10.2.2 Sähkönlaatumittari

Taajuuden perusteella aktivoituvien reservien (FCR-N, FCR-D ja FFR) ylläpitoon osallistumiseksi tarvitaan tarkka sähköverkon taajuuden mittausta. Taajuusohjattujen reservien osalta mittarilta vaadittu tarkkuus ± 0.01 Hz on erittäin korkea, ja tarkkuuden vaatimuksen täyttämiseen tarvitaan korkealaatuista sähkönlaatumittaria. Vaaditun mittauksen tarkkuuden vaatimuksen täyttämisen lisäksi valittavan mittarin tulee tukea samaa väyläprotokollaa kuin ohjausyksikkö, jotta mittausdata voidaan lähettää ohjausyksikölle. Yksi yllä mainitut vaatimukset täyttävä mittari on Janitzan UMG-604-PRO, joten valitaan se käytettäväksi mittariksi tässä vaiheessa.

10.2.3 Alajärjestelmä nopean taajuusreservin ylläpitoon

Nopean taajuusreservin aktivointinopeuden vaatimuksen (0,7–1,3 sekuntia) ja historiatietojen lyhyen tallennusvälin (0,1 sekuntia) vuoksi nopean taajuusreservin ylläpitoa varten on rakennettava itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä. Ongelmaksi saattaa silti muodostua alajärjestelmän sisäisen tiedonsiirron viiveet, jos ohjausviesti lähetetään kenttäväylän välityksellä ohjausyksiköltä loggerille ja siitä invertterille.

Kenttäväylän välityksellä lähetetyille ohjausviestille ei toisaalta ole nopean taajuusreservin tapauksessa tarvetta, sillä reservi aktivoidaan aina koko kapasiteetillaan, jolloin ohjausviestiksi riittää pelkkä binäärinen on/off-käsky vrt. FCR-tuotteet, joiden säädön suuruus vaihtelee taajuuden poikkeaman mukaan. Yksinkertaisemman toimintalogiikan vuoksi myöskään ohjausyksikön säätöohjelman ei tarvitse olla erityisen hienostunut. Ohjausyksiköltä itseltään vaaditaan kuitenkin edelleen hyvää suorituskykyä historiatietojen tallennuksessa vaaditun lyhyen näytteenottovälin vuoksi, joten ohjausyksikön komponenttikuluista ei ole mahdollisuutta tinkiä.

Mahdollinen ratkaisu nopean aktivoinnin saavuttamiseksi voi olla joihinkin inverttereihin sisältyvien DI-tulojen hyödyntäminen. Näitä DI-tuloja käytetään tyypillisesti hätäseis-toimintoihin, eli nopeaan tehonsyötön katkaisemiseen. Nopea taajuusreservi on ylössäätötuote, eli tässä tapauksessa nopeutta ei niinkään vaadita tehonsyötön katkaisulta vaan päinvastoin syötön takaisinkytkennältä.

Säätö aktivoituu ohjausyksikön DO-lähdöltä invertterin DI-tuloon kytkettävän jännitteen avulla. Muista reservituotteista poiketen nopean taajuusreservin aktivointi tapahtuu siis suoraan invertterille lähetettävän ohjausviestin välityksellä. Tällä tavoin päästää eroon yhdestä tiedonsiirron viiveistä aiheuttavasta solmusta, eli loggerista.

10.3 Ylätason ohjaukseen perustuvan alajärjestelmän suunnittelu

Ylätason ohjaukseen perustuvan alajärjestelmän etuja ovat sen matalammat alajärjestelmäkohtaiset komponenttikulut ja pienemmän komponenttien määrän myötä yksinkertaisempi toimintaperiaate. Merkittävimpiä haittoja ovat riippuvaisuus alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välisen tiedonsiirron toimivuudesta, jonka viiveet vaikuttavat suoraan säädön vasteaikaan ja stabiilisuuteen. Tiedonsiirtokatkokset estävät reservien ylläpitoon liittyvän toiminnan kokonaan. Lisäksi yläjärjestelmältä vaaditaan korkeaa suorituskykyä suurten datamäärien nopeaan käsittelyyn, joka kasvattaa yläjärjestelmän hankinta- ja ylläpitokustannuksia.

Alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välistä tiedonsiirron toteutusta käsitellään luvussa 10.6 ja yläjärjestelmän toteutusta luvussa 11.

10.4 Saatavilla olevan pätötehon laskenta

Ylössäätötuotteille, sekä automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon osallistuville alajärjestelmille tulee toteuttaa saatavilla olevan pätötehon laskenta. Saatavilla oleva pätöteho voidaan laskea paikallisesti asennettavan auringon säteilytehoa mittaavien pyranometrillä avulla. Vaihtoehtoisesti saatavilla oleva pätöteho voitaisiin laskea esimerkiksi säätiedotteen ja voimalakohtaisesta historiadatasta tehdyn ennusteen avulla, mutta tällä tuskin saavutetaan vaadittavaa pätötehon laskennan tarkkuutta. Saatavilla olevan pätötehon mittauksen tarkkuusvaatimus on esitetty tarkemmin luvussa 7.2. Käytetään saatavilla olevan pätötehon laskentaan Omni Instrumentsin SMP3-pyranometriä.

10.5 Datan käsittely ja tiedonsiirto alajärjestelmässä

Toimivan säädön ja vaatimusten mukaisten historiatietojen keräykseen alajärjestelmässä tarvitaan tehokkaasti ja luotettavasti toimiva tiedonsiirto. Tiedonsiirto tulee toteuttaa kenttäväylää hyödyntämällä. Erilaisia kenttäväyläteknikoita on lukuisia erilaisia, mm. Modbus, Profibus, Profinet, EtherCAT ja BACnet. Valitaan tässä vaiheessa pääasiallisesti käytettäväksi väyläteknologiaksi ethernetin välityksellä kommunikoiva Modbus-TCP/IP. Valinta perustuu sen mataliin kustannuksiin ja käyttäjäystävällisyyteen. Modbus on alalla laajasti käytetty standardi, joten Modbus-yhteensopivia laitteita on myös helppo löytää. Esimerkiksi Solarigon voimaloissaan käyttävät loggerit ja invertterit kommunikoivat keskenään tyypillisesti Modbus-RTU protokollalla.

Ethernetin välityksellä tapahtuva Modbus-TCP tiedonsiirto vaatii laitteiden yhdistämiseksi verkkokytkimen, johon alajärjestelmän laitteet kytketään. Toimeksiantajan yleisesti käyttämä verkkokytkin on Teltonikan TSW200, ja se sopii ominaisuuksiltaan myös tähän käyttötapaukseen.

Vaikka eri valmistajien invertterit ja loggerit kommunikoivatkin standardoidulla Modbus-protokollalla, on eri valmistajien invertterien ja loggerien väleillä eroja, jotka täytyy ottaa huomioon tiedonsiirron ja koko järjestelmän suunnittelussa. Eroavaisuuksia on esimerkiksi Modbus-rekisterien osoitteissa ja tehonohjausviestin skaalauksessa, joka täytyy lähettää valmistajasta riippuen muodossa 0–999 kW tai 0–100 %. Valmistajakohtaisista eroista aiheutuva lisätyö ja siitä johtuvat kustannukset voidaan tietysti välttää keräämällä reservien ylläpitoon käytettävä kapasiteetti voimaloilta, joissa käytetään yhden valmistajan tuotteita.

10.6 Tiedonsiirto alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välillä

Alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välisen tiedonsiirron merkitys vaihtelee riippuen valitusta alajärjestelmän kokoonpanosta. Itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä voidaan suunnitella toimimaan luotettavasti myös tiedonsiirtoyhteyden lyhytaikaisten katkosten aikana, kun taas vastavasti yläjärjestelmästä tulevan ohjaussignaalin perusteella ohjattujen alajärjestelmien säädön toteutuminen on täysin riippuvainen alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välisen tiedonsiirron toimivuudesta.

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän tapauksessa voidaan alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välinen tiedonsiirto toteuttaa samoilla komponenteilla ja suunnitteluperiaatteilla kuin nykyisessäkin ratkaisussa, joka on esitetty luvussa 10.1.4. Taajuusohjattujen reservituotteiden historiatietojen vaaditut tallennusvälit vaihtelevat välillä 0,1–1,0 sekuntia, mutta alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välisen tiedonsiirron päivitysväliä ei itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän tapauksessa kannata pitää yhtä tiheänä, koska itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän historiadataa tallennetaan myös ohjausyksikköön. Paikallisesti tallennettu data voidaan lähettää yläjärjestelmään suurempina paketteina, mutta pidemmillä päivitysväleillä. Tällä tavoin voidaan vähentää tiedonsiirtoyhteyden kuormitusta ja samalla myös yläjärjestelmän kuormitusta.

Ylätason ohjaussignaalin perusteella säätävän alajärjestelmän tiedonsiirrossa tulee kiinnittää huomiota sen toimintavarmuuteen. Toimintavarmuutta voidaan parantaa käyttämällä korkealaatuisia komponentteja ja varajärjestelmiä. Käytetään ylätason ohjaussignaaliin perustuvan ohjausjärjestelmän tiedonsiirtoon ensisijaisesti Tosibox Lock 670-reititintä ja varayhteytenä asiakkaan verkkoa tai Teltonika RUT200-reititintä. Tosibox-reitittimellä on mahdollista käyttää kahden eri verkko-operaattorin yhteyksiä kahden sim-kortin avulla, jolloin operaattorikohtaisista verkon häiriöistä johtuvia katkoksia voidaan välttää.

Suomessa on kolme verkko-operaattoria (DNA, Telia ja Elisa), joten käyttämällä Tosiboxissa esimerkiksi DNA:n ja Elisan verkkoyhteyttä ja varayhteytenä käytettävän RUT200-reitittimen tai asiakkaan verkossa Telian yhteyttä, saavutetaan operaattorien yhteyksien suhteen täysin redundanttijärjestelmä, jonka tiedonsiirto katkeaa vain tilanteissa, jossa kaikkien operaattorien verkot ovat samanaikaisesti poissa käytöstä, mitä voidaan pitää äärimmäisen harvinaisena. On toki muistettava, että asiakkaan verkko-operaattorin valintaan ei juurikaan voida vaikuttaa

11 Yläjärjestelmän suunnittelu

Yläjärjestelmä toimii hajautettujen alajärjestelmien keskitettynä koordinaattorina, jonka tehtäviin kuuluu alajärjestelmien ohjaus ja seuranta, sekä tiedonvaihto Fingridin kanssa. Yläjärjestelmän eri toimintoja voidaan hajauttaa eri järjestelmien välille siten, että esimerkiksi historiatietojen keruu ja hallinta on oma järjestelmänsä ja varsinainen resurssien ohjaus omansa. Hyödynnettäessä itsenäiseen säätöön kykeneviä alajärjestelmiä merkittävä osa resurssien ohjauksesta ja historiatietojen tallennuksesta on jo hajautettu alajärjestelmien vastuulle. Valittu alajärjestelmäkokoontyö

vaikuttaa siis merkittävästi yläjärjestelmältä vaadittuun suorituskäyttöön. Vaikka itsenäiseen säätöön kykenevien alajärjestelmien kohdalla yläjärjestelmän suorituskäyttövaatimukset ovatkin matalammat niin yläjärjestelmästä ei voida kuitenkaan kokonaan luopua.

Käytännössä yläjärjestelmän eri toiminnallisuudet tullaan toteuttamaan ainakin osittain ulkoisten palveluntarjoajien avulla. Toimeksiantajan suurempien aurinkopuistojen tiedonkeruu on jo ulkoistettu palveluntarjoajalle SaaS (Software as a Service) palveluna. Yläjärjestelmän muutkin toiminnallisuudet kannattaa toteuttaa hankkimalla ne SaaS-palveluina, koska tällöin vältetään tarvittavan IT-infrastruktuurin rakentamisesta ja ylläpitämisestä aiheutuvat kulut. Esimerkiksi aFFR ylläpitoon vaaditun FEN- tai KoVa-FEN-yhteyden rakentaminen itse ei ole kannattavaa vaan tämä yläjärjestelmän toiminnallisuus kannattaa ulkoistaa ulkopuoliselle toimijalle, jolta yhteys löytyy.

12 Reservikapasiteetin kerääminen

Keskeinen osa reservimarkkinaprojektia on määrittellä, että millaisilta voimaloilta reservimarkkinoille myytävä kapasiteetti kerätään. Reservien aggregointimahdollisuuden ansiosta koko toimeksiantajan hallussa olevalla kapasiteetilla on periaatteessa mahdollista osallistua reservimarkkinoille, mutta voimalakohtaista arviointia on silti syytä tehdä kustannustehokkuuden ja resurssien oikeanlaisen kohdistamisen vuoksi.

Yksi merkittävä tekijä reservien ylläpitoon valittavan voimalan valinnassa on voimalan nimellinen teho. Yksittäisen alajärjestelmän kulut ovat käytännössä samat riippumatta voimalan nimellisestä tehosta. Keskittämällä reservien ylläpito suuremmille voimaloille, joilta saadaan yhdellä kertaa suurempi kapasiteetti, vähennetään minimitarjoukseen saavuttamiseksi tarvittavien alajärjestelmien määrää ja tämän myötä kokonaiskustannuksia. Alajärjestelmien pienempi määrä myös yksinkertaistaa koko ohjausjärjestelmän infrastruktuuria ja vähentää yläjärjestelmään kohdistuvaa kuormaa.

Reservien ylläpitoon käytettävällä voimalalla tulisi myös olla mahdollisimman hyvälaatuinen ja tasainen tuotantoprofiili. Esimerkiksi varjostaviin paikkoihin ja epäoptimaalisiin ilmansuuntiin asennettuja voimaloita tulisi välttää. Toisin sanoen, voimalan nimellistehon lisäksi tulee myös arvioida sen todellista saatavilla olevaa pätötehoa. Myös voimalan maantieteellinen sijainti vaikuttaa sen tuotantoprofiiliin.

Maantieteellisellä sijainnilla on vaikutusta myös alajärjestelmän ja yläjärjestelmän välisen tiedonsiirron toimintavarmuuteen. Internetin välityksellä tapahtuva tiedonsiirto edellyttää luotettavaa verkkoyhteyttä, mikä voi osoittautua haasteeksi syrjäisemmillä alueilla. Syrjäisemmille alueille voidaan tietenkin rakentaa itsenäiseen säätöön kykenevä järjestelmä, jolloin järjestelmä ei ole enää yhtä riippuvainen tiedonsiirron toimivuudesta

Mahdollinen PPA-sopimus on myös tärkeää huomioida arvioitaessa yksittäisen voimalan liittämistä reservimarkkinoille. PPA-sopimuksessa määritellään voimalan tuottaman sähkön myyntihinta sekä mahdolliset tuotantotakuut. PPA-sopimuksen ehdot voivat vaikuttaa merkittävästi voimalan kannattavuuteen reservien ylläpidossa.

13 Tulokset

13.1 Erilaiset alajärjestelmäkoonpanot

Nyt kun tiedossa on erilaisten alajärjestelmäkoonpanojen eri komponentit ja toimintaperiaatteet, voidaan näiden välillä tehdä vertailua. Alajärjestelmäkoonpanojen komponenttikustannusten vertailussa ei ole otettu huomioon aurinkopaneelien, invertterien tai loggerien kustannuksia, koska nämä ovat aurinkovoimalan peruskomponentteja, jotka asennetaan riippumatta siitä, aiotanko voimalalla osallistua reservien ylläpitoon vai ei.

13.1.1 Itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä

Itsenäiseen säätöön kykenevää alajärjestelmää voidaan käyttää taajuusohjattujen reservituotteiden (FCR-N, FCR-D ja FFR) ylläpitoon. Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon ratkaisu ei sovellu, sillä automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon tarvitaan luotettavampi tiedonsiirto.

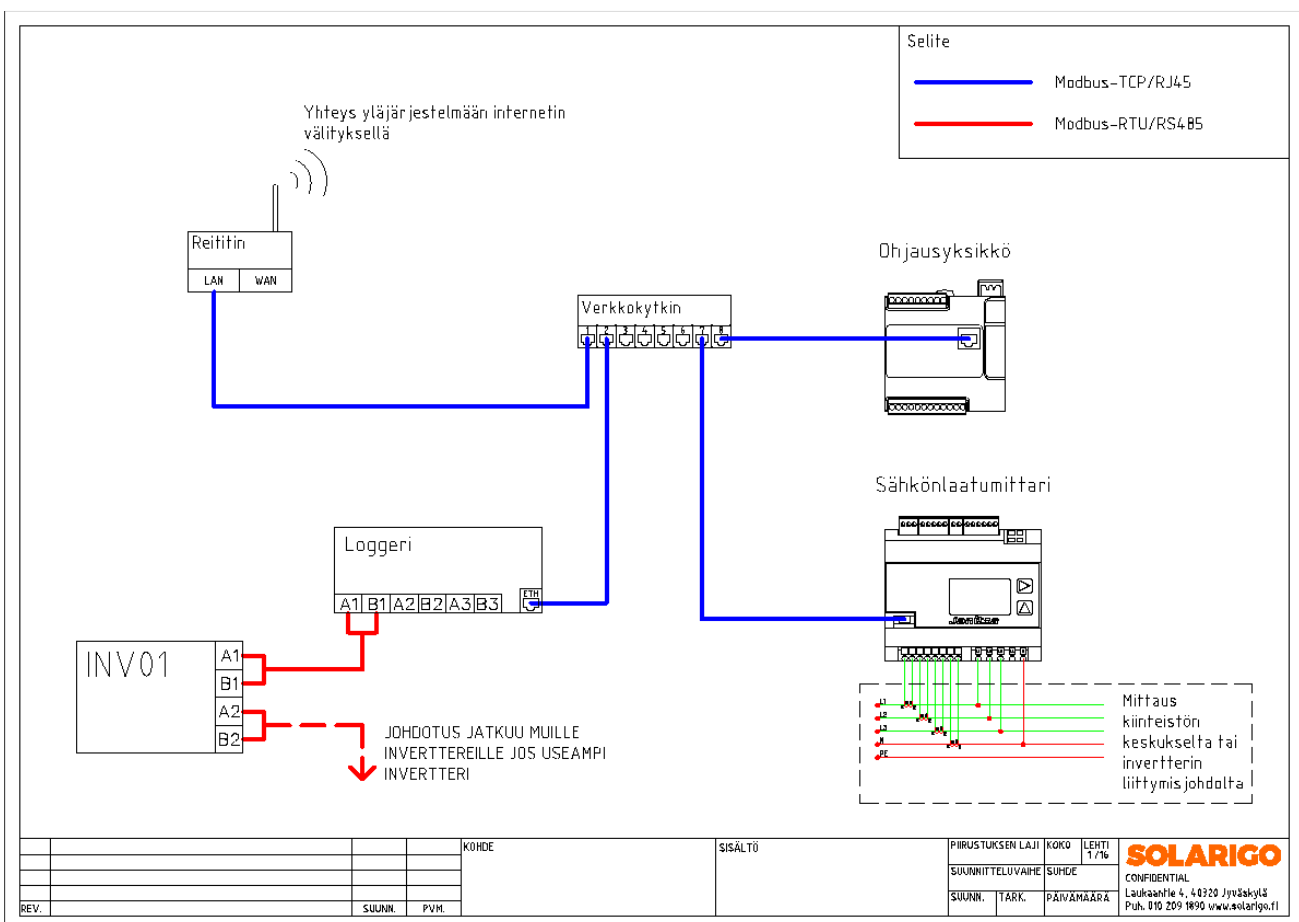
Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän komponentit ja hinnat on esitetty taulukossa 14 ja kytkennät kuviossa 15.

Taulukko 14. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän komponentit.

Valmistaja	Malli	Hinta (€)	Huom.
Janitza	Janitza UMG-604-PRO	1008,54	Sähkönlaatumittari
Schneider Electric	MODICON M221-16IORELAY ETHERNET	214,40	Ohjausyksikkö
Teltonika	TSW200	109,99	Verkkokytkin
Teltonika	RUT200	144,60	Varayhteys*
Omni Instruments	SMP 3 Smart Pyranometer	1090,80	Pyranometri**

* ei tarvita, jos asiakkaan verkko käytettävissä

** ei tarvita, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon



Kuvio 15. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän kytkennät.

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän komponenttikustannukset ovat siis **1477,53 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon ja **2568,33 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan myös ylösäätöreservien ylläpitoon.

Kuvio 15 ei sisällä pyranometriä, eli kuvion 15 kokoonpanolla voidaan osallistua vain FCR-D aläsäätöreservin ylläpitoon. Lisäksi loggerista oletetaan löytyvän Modbus-TCP kommunikaation mahdollistava ethernet-portti. Jos loggerista löytyy ainoastaan RS485-sarjaliikenneportti, voidaan käyttää TCP/RTU-protokollamuunninta kytkimen ja loggerin välisessä kommunikoinnissa taikka kytkeä loggeri suoraan ohjausyksikön RS485-porttiin.

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän tapauksessa voidaan myös harkita ohjausyksikön kytkemistä suoraan invertteriin, jolloin ohjauskäskyt lähetetään suoraan ohjausyksiköltä invertteriin ilman loggeria. Tällä voidaan yksinkertaistaa alajärjestelmän arkkitehtuuria ja säästää komponenttikustannuksissa. On kuitenkin otettava huomioon, että joitain loggereihin sisäänrakennetuista ominaisuuksista täytyy tällöin sisällyttää ohjausyksikköön, joka kasvattaa ohjausyksikön ohjelmoinnin kustannuksia ja ohjausyksikön kuormitusta. Ohjausyksikön kasvanut kuormitus saattaa aiheuttaa suorituskykyongelmia koko alajärjestelmään.

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän kallein yksittäinen komponentti on sähkönlaatu mittari. Tarkastellaan alajärjestelmän komponenttikustannuksia, jos toteutetaan taajuuden mittaus keskitetyn mittauksen avulla ja suoritetaan säätö tämän keskitetyn mittauksen avulla. Tällöin alajärjestelmä ei ole enää itsenäiseen säätöön kykenevä, vaan riippuvainen yläjärjestelmästä lähetetystä taajuuden mittauksesta, joten noudatetaan tiedonsiirron toteutuksessa samoja periaatteita kuin ylätason ohjaussignaali ohjattavalla alajärjestelmällä.

Luotettavamman tiedonsiirron toteutuksen ansiosta keskitetyn taajuuden perusteella aktivoituvalla alajärjestelmällä voidaan osallistua myös automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon. Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon tarvitaan saatavilla olevan pätötehon laskenta, eli myös pyranometri tulee tällöin hankkia.

Keskitetyn taajuuden mittauksen perusteella aktivoituvan alajärjestelmän komponenttikustannukset on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Keskitetyn taajuuden mittauksen perusteella säätävä alajärjestelmä.

Valmistaja	Malli	Hinta (€)	Huom.
Tosibox	Lock 670	931	Reititin
Schneider Electric	MODICON M221-16IORELAY ETHERNET	214,40	Ohjausyksikkö
Teltonika	TSW200	109,99	Verkkokytkin
Teltonika	RUT200	144,60	Varayhteys*
Omni Instruments	SMP 3 Smart Pyranometer	1090,80	Pyranometri**

* ei tarvita, jos asiakkaan verkko käytettävissä

** ei tarvita, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon

Keskitetyn taajuuden mittauksen perusteella säätävän alajärjestelmän komponenttikulut ovat siis **1399,99 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon ja **2490,79 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan ylössäätöreservien tai automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon.

Voidaan huomata, että keskitetyn taajuuden mittauksen perusteella aktivoitua alajärjestelmä ei ole merkittävästi halvempi, mutta luo mahdollisuuden osallistua myös automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon, mitä voidaan pitää etuna. Toki tällöin on hankittava kallis pyranometri.

13.1.2 Nopean taajuusreservin ylläpitoon osallistuva alajärjestelmä

Nopean taajuusreservin ylläpitoon osallistuvan alajärjestelmän komponentit ovat samat kuin itsenäiseen säätöön kykenevällä alajärjestelmällä, mutta toimintaperiaate ja laitteiden kytkennät ovat erilaiset. Kuten luvussa 10.2.3 kerrotaan, on joihinkin inverttereihin sisäänrakennettuna erilaisia DI-tuloja, joita käytetään tyypillisesti hätäseis-toimintoihin, eli nopeaan poiskytkentään. Ohjausyksikön DO-lähdöltä kytkettävän jännitteen avulla voidaan siis mahdollisesti kytkeä invertteri ensin pois päältä odottamaan aktivointia ja takaisin päälle taajuuspoikkeaman tapahtuessa.

Nopean taajuusreservin tapauksessa nopeutta ei niinkään vaadita poiskytkennältä, vaan syötön takaisinkytkennältä ja on mahdollista, että takaisinkytkennän tapahtuessa invertterissä käynnistyy jonkinlainen Soft Start-toiminto, jolloin vaadittuun nopeuteen ei päästä. Kaikki invertterit eivät

myöskään sisällä vaadittavia DI-tuloja, joten kuvattu ratkaisu on erittäin tilannekohtainen ja kaipaa lisäselvityksiä.

13.1.3 Ylätasolta tulevan ohjaussignaalin perusteella aktivoituva alajärjestelmä

Ylätasolta tulevan ohjaussignaalin perusteella aktivoituvaa alajärjestelmää voidaan periaatteessa käyttää kaikkien reservien ylläpitoon, mutta ominaisuuksiensa puolesta se soveltuu parhaiten automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon.

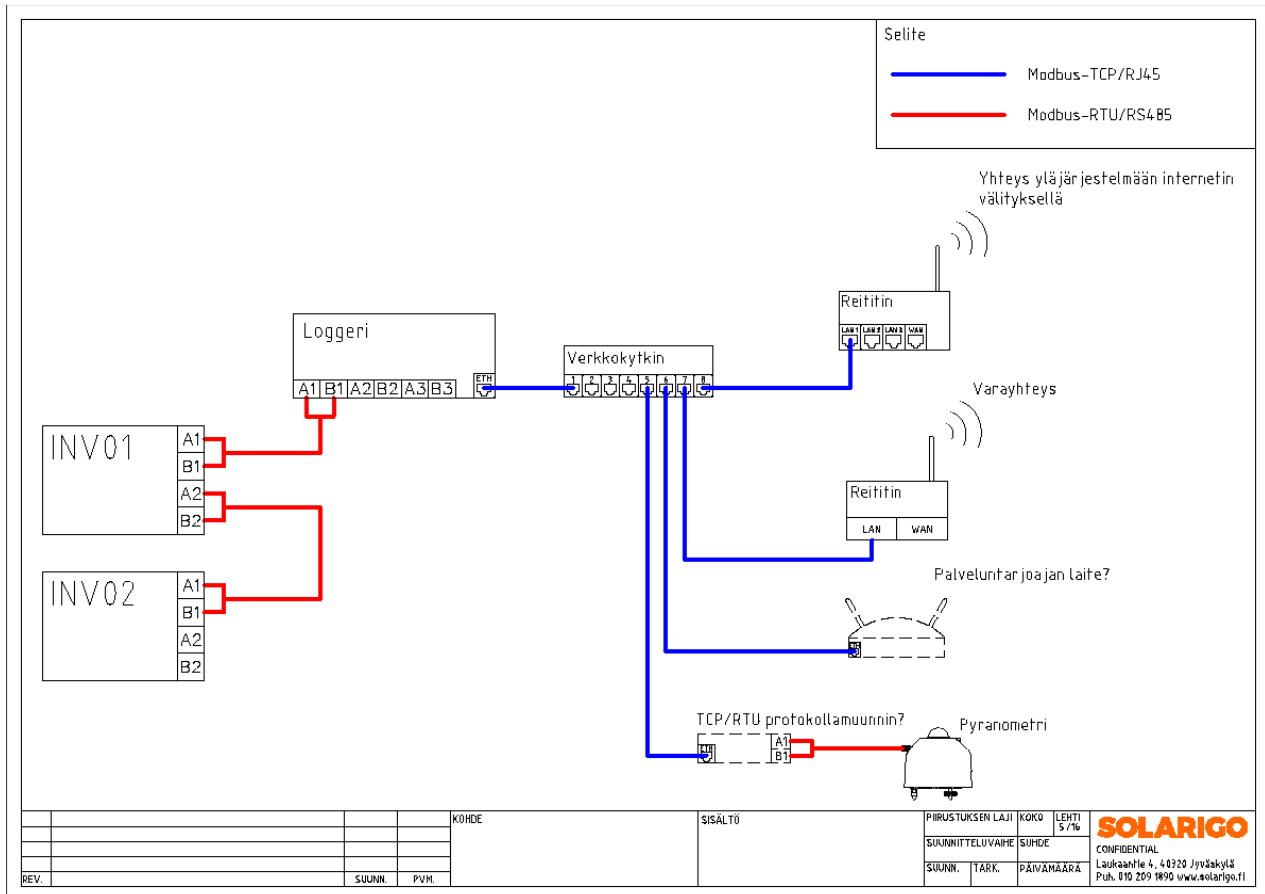
Ylätasolta tulevan ohjaussignaalin perusteella aktivoituvan yläjärjestelmän komponentit on esitetty taulukossa 16 ja alajärjestelmän kytkennät kuviossa 16.

Taulukko 16. Ylätason ohjaussignaalilla aktivoituvan alajärjestelmän komponentit.

Valmistaja	Malli	Hinta (€)	Huom.
Tosibox	Lock 670	931	Reititin
Teltonika	TSW200	109,99	Verkkokytin
Teltonika	RUT200	144,60	Varayhteys*
Omni Instruments	SMP 3 Smart Pyranometer	1090,80	Pyranometri**

* ei tarvita, jos asiakkaan verkko käytettävissä

** ei tarvita, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon



Kuvio 16. Ylätason ohjaukseen perustuvan alajärjestelmän kytkennät.

Ylätason signaalilla ohjattavan alajärjestelmän komponenttikustannukset ovat siis **1185,59 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan pelkästään FCR-D allassäätöreservin ylläpitoon ja **2276,39 euroa** per alajärjestelmä, jos osallistutaan ylösäätöreservien tai automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon. Kuviossa 16 esitettyyn kokoonpanoon kuuluu pyranometri, joten ylösäätöreservien ja aFRR ylläpito on mahdollista. Huomioi myös pyranometrin yhdistämiseksi mahdollisesti tarvittava TCP/RTU protokollamuunnin.

Huomionarvoista on, että tässä ratkaisussa oletetaan loggerilta saatavan pätötehon mittauksen täyttävän sille annetun tarkkuuden vaatimukset. Jos loggerin mittauksella ei täytetä annettuja vaatimuksia, on hankittava energiamittari mittaamaan invertterin verkkoon syöttämää pätötehoa. Pätötehon tarkkuuden vaatimukset ovat sallivammat kuin taajuuden mittauksen vaatimukset, ja perustason energiamittarilla on mahdollista täyttää annettu vaatimus ilman merkittävää alajärjestelmäkohtaisten kulujen kasvua.

Kuten kuviosta 16 voidaan nähdä (katkoviivoilla piirretty mahdollinen palveluntarjoajan laite), ylä-tason signaalilla ohjatun alajärjestelmän komponentteihin vaikuttaa myös yläjärjestelmän valittu toteutustapa, taikka tarkemmin ilmaistuna yläjärjestelmän toiminnallisuudet toimittavan palveluntarjoajan valinta ja heidän tekninen toteutuksensa yläjärjestelmän toiminnallisuuksille. Esimerkiksi tällä hetkellä isompien aurinkopuistojen tiedonkeruupalveluun sisältyy voimalalle asennettava gateway-laite, jonka avulla voimalan dataa lähetään palveluntarjoajan palvelimelle.

13.1.4 Itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä + ylätason ohjaus

Ylätasolta ohjattavan alajärjestelmän toteutuskelpoisuus vaatii vielä lisäselvityksiä ja riskinä on, että se todetaan toteutuskelvottomaksi. Lisäksi luvussa 13.1.1 esitetyllä itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän ratkaisulla ei voida osallistua automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon. Jos itsenäiseen säätöön kykenevälle alajärjestelmälle halutaan lisätä mahdollisuus osallistua myös automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon, täytyy sen kokoonpanoon lisätä Tosibox Lock 670 reititin ja saatavilla olevan pätötehon laskemiseksi pyranometri.

Yllä kuvatun ratkaisun komponentit on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Itsenäiseen säätöön kykenevän ja ylätason ohjaukseen kykenevän alajärjestelmän komponentit

Valmistaja	Malli	Hinta (€)	Huom.
Janitza	Janitza UMG-604-PRO	1008,54	Sähkönlaatumittari
Tosibox	Lock 670	931	Reititin
Schneider Electric	MODICON M221-16IORELAY ETHERNET	214,40	Ohjausyksikkö
Teltonika	TSW200	109,99	Verkkokytkin
Teltonika	RUT200	144,60	Varayhteys*
Omni Instruments	SMP 3 Smart Pyranometer	1090,80	Pyranometri**

* ei tarvita, jos asiakkaan verkko käytettävissä

** ei tarvita, jos osallistutaan vain FCR-D alassäätöreservin ylläpitoon

Yllä kuvatulla alajärjestelmäratkaisulla voidaan siis osallistua lähes kaikkien reservien ylläpitoon, mukaan lukien FCR-N, FCR-D ylössäätö ja mahdollisesti myös FFR. Komponenttikustannukset ovat

täten **3499,33 euroa** per alajärjestelmä. Voidaan huomata, että kyseessä on selkeästi kallein alajärjestelmäkoonpano.

13.1.5 Keskitetyn suojauksen ja häiriösuojauksen integrointi alajärjestelmään

Solarigon voimaloissa käytettyjen iSMO-etäerotuskytkinten käyttöä voidaan jatkaa, sillä siihen sisältyvän verkonvalvontareleen asetteluarvot ovat erotuksen aktivoinnin vaatiman taajuuspoikkeaman osalta niin suuret, että häiriösuojaus ei todennäköisesti aiheuta ongelmia reservien ylläpitoon liittyen. Tieto erotuskytkimen tai häiriösuojan aktivoitumisesta tulisi kuitenkin lähettää yläjärjestelmään.

13.2 Yläjärjestelmän toteutus ja alajärjestelmän ohjelmointikulut

Valittu alajärjestelmien toteutustapa – itsenäiseen säätöön kykenevä tai ylätason signaalilla ohjattava – vaikuttaa merkittävästi yläjärjestelmältä vaadittuihin ominaisuuksiin ja täten myös ohjausjärjestelmän kokonaiskuluihin ja kulurakenteeseen. Tämän työn aikapuitteissa ei valitettavasti ollut mahdollista syventyä yläjärjestelmän syvällisempään suunnitteluun taikka eri palveluntarjoajien ratkaisujen tarkempaan analyysiin.

Merkittävä osa yläjärjestelmän toiminnallisuuksista tullaan toteuttamaan hankkimalla se SaaS-palveluna ulkoisilta toimijoilta. Esimerkiksi tällä hetkellä aurinkopuistoissa tiedonkeruuseen käytetty palvelu on todettu toimivaksi ja tämän jatkokäyttömahdollisuuksia tulee myös arvioida. Alajärjestelmän ohjausyksikön ohjelmointi tullaan myös todennäköisesti suorittamaan ulkoisen toimijan avulla, mutta perinteisenä järjestelmätoimituksena, eikä SaaS-malliin perustuvana.

Yleisesti voidaan siis todeta, että reservien ohjaus itsenäiseen säätöön kykenevillä alajärjestelmillä johtaa todennäköisesti korkeampiin alkuinvestointeihin, koska ohjausyksikkönä käytettävän ohjelmoitavan logiikan ohjelmointi ja käyttöönotto vaativat resursseja. Toisaalta itsenäiseen säätöön kykenevien alajärjestelmien avulla voidaan kuitenkin saavuttaa alhaisemmat operointikustannukset, sillä yläjärjestelmältä vaadittu suorituskyky on alhaisempi. Vastaavasti ylätason signaalilla ohjattavassa järjestelmässä alkuinvestointi on todennäköisesti matalampi, mutta operointikulut ovat korkeammat yläjärjestelmältä vaaditun korkeamman suorituskyvyn vuoksi.

13.3 Yhteenveto

Aiemmissa luvuissa tarkasteltiin erilaisia alajärjestelmäkokonaisuuksia ja näiden ominaisuuksia, sekä mahdollisuuksia eri reservituotteiden ylläpitoon. Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että molemmat alajärjestelmävaihtoehdot vaikuttavat tällä hetkellä toteuttamiskelpoisilta, mutta erityisesti ylätasolta ohjattavan alajärjestelmätoteutuksen osalta tarvitaan vielä lisäselvityksiä. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän osalta tilanne on selkeämpi ja epäselvyyksien ratkaiseminen on järkevintä toteuttaa käytännössä testaamalla, esimerkiksi pilottiprojektin avulla.

Myös yläjärjestelmäratkaisuun liittyy useita avoimia kysymyksiä, jotka osaltaan vaikuttavat myös ylätasolta ohjattavan alajärjestelmän epäselvyyksiin. Yläjärjestelmän toiminnallisuudet hankitaan mitä todennäköisimmin SaaS-palveluna ulkoiselta palveluntarjoajalta ja kysymysten selvittämiseksi täytyisi näiltä palveluntarjoajilta kysyä tarjoukset yläjärjestelmän toiminnallisuuksista, sekä suorittaa tarkempaa analyysiä tarjotun palvelun ominaisuuksista. Tässä yhteydessä tulisi arvioida myös jo käytössä olevien järjestelmien jatkokäyttömahdollisuudet ja tarvittaessa näiden integraatio uuteen järjestelmään, jos sellainen hankitaan.

Markkinapaikan valinnasta ja sen vaikutuksista ohjausjärjestelmältä vaadittaviin ominaisuuksiin voidaan todeta, että potentiaalisimmat markkinapaikat teknisestä näkökulmasta ovat FCR-D alassäätöreservi ja automaattinen taajuuden palautusreservi. FCR-D alassäätöreservin merkittävin etu on se, että sille ei tarvitse suorittaa saatavilla olevan pätötehon laskentaa ja täten kallista pyranometriä ei tarvitse hankkia, vastaavasti merkittävin haaste on vaaditun säädön nopeuden ja stabiilisuuden saavuttaminen. aFRR merkittävimpana etuna voidaan pitää sallivampia säädön nopeuden vaatimuksia, ja haasteena vaatimusta tiedonsiirron toteuttamiselle FEN-verkon välityksellä.

Vaikka aiemmissa luvuissa on vertailtu erilaisia alajärjestelmäkoonpanoja ja niiden toteutuskelpoisuuksia, niin se ei suinkaan tarkoita sitä, että näiden välillä tulee tehdä jonkinlainen perustavanlaatuinen valinta ja poissulkea toinen kokonaan. Tällä hetkellä ei ole havaittavissa esteitä sille, että samaan aikaan ylläpidettäisiin sekä itsenäiseen säätöön kykeneviä, että ylätason signaalilla ohjattavia alajärjestelmiä. Eri toimintaperiaatteella toimivien alajärjestelmien samanaikainen ylläpito voi olla jopa suositeltavaa, sillä eri toimintaperiaatteen alajärjestelmät soveltuvat paremmin eri markkinapaikoille. Esimerkiksi luvussa 13.1.1 esitelty itsenäiseen säätöön kykenevä alajärjestelmä

soveltuu vain taajuusohjattujen tuotteiden ylläpitoon. Vastaavasti taas luvussa 13.1.3 esitellyllä ylätasen signaalilla säätävällä alajärjestelmällä taajuusohjattujen reservituotteiden teknisten vaatimusten saavuttaminen voi olla haastavaa – ellei jopa mahdotonta, joten se soveltuu tämänhetkellä tiedoilla paremmin automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitoon. Luvussa 13.1.4 esitetyllä ratkaisulla voidaan osallistua molempien reservien ylläpitoon, mutta sen alajärjestelmäkohtaiset kustannukset nousevat esitetyistä vaihtoehdoista korkeimmiksi.

13.4 Jatkokehitys

Kriittisin jatkokehityksen kohde tällä hetkellä on yläjärjestelmän toiminnallisuuksia tarjoavien palveluntarjoajien palveluiden teknistaloudellinen analyysi ja sen perusteella tehtävä valinta yläjärjestelmän toiminnallisuuksien toimittajasta tai toimittajista. Itsenäiseen säätöön kykenevien alajärjestelmien osalta sopivan palveluntarjoajan löytäminen ei tuota todennäköisesti haasteita.

Esimerkiksi tällä hetkellä käytössä oleva aurinkopuistojen tiedonkeruujärjestelmä saattaa tarjota pohjan, johon itsenäiseen säätöön kykenevien alajärjestelmien yläjärjestelmältä vaadittavat ohjaustoiminnot voidaan integroida.

Ylätasolta ohjattavan alajärjestelmäratkaisun osalta yläjärjestelmältä vaaditut toiminnallisuudet sisältävän palvelun löytäminen voi osoittautua hankalaksi yläjärjestelmältä vaaditun korkean suorituskyvyn vuoksi ja on kynnyskysymys koko ylätasolta ohjattavan alajärjestelmäratkaisun toteutuskelpoisuudelle. Erityisesti taajuusohjattujen tuotteiden osalta riittävän nopean ohjauksen vasteen ja historiatietojen tallennusvälin saavuttaminen ylätasolta lähetettävällä ohjaussignaalilla voi osoittautua teknisesti mahdottomaksi.

Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän osalta jatkokehitystä voidaan tehdä esimerkiksi pilotiprojektien tai muiden käytännön testausten muodossa. Näiden avulla voidaan havaita mahdollisia suunnittelun aikana huomaamatta jääneitä esteitä, tunnistaa mahdollisia kehityskohtia ja todentaa ratkaisun käytännön toteutuskelpoisuus.

Yksi jatkokehityksen kohde on myös tarkat tekniset analyysit toimeksiantajan invertterien ja loggerien ominaisuuksista esimerkiksi ohjauksen vasteaikojen ja sisältyvien kommunikointirajapintojen muodossa. Valmistajilta on varmasti myös mahdollista saada heidän laatimiensa mittausten ja tes-

tien pohjalta tarkempaa dataa esimerkiksi invertterien ja loggerien vasteista syötettyyn ohjaussignaaliin, mutta näitä arvioitaessa tulee pitää mielessä, että ne ovat laboratoriossa, optimaalisissa ympäristöissä saatuja tuloksia. Käytännössä siis näidenkin osalta vaaditaan pilotointia oikeassa toimintaympäristössä.

14 Pohdinta

Työn päätavoite oli löytää Solarigo Systems Oy:n hallinnoimiin aurinkovoimaloihin soveltuva ratkaisu liittyä reservimarkkinoille. Tätä tavoitetta ei työn aikana täysin saavutettu, aiheen yllättävän laajuuden ja monimutkaisuuden vuoksi. Toissijaisen tavoitteen, eli lisätiedon tuottamisen reservimarkkinoille liittymiseen liittyen voidaan katsoa täyttyneen. Tietoperustassa luotu laaja katsaus reservimarkkinoiden teknisiin vaatimuksiin ja soveltavan vaiheen aikana annetut näkemykset ja esitetyt ratkaisut näiden vaatimusten täyttämistä tuovat toimeksiantajalle lisätietoa reservimarkkinoille liittymisen keskeisistä haasteista, reservien ylläpitoon käytettävältä voimalalta vaadituista ominaisuuksista ja näkökulmia teknisten vaatimusten täyttämiseen. Vaikka työn päätavoitetta ei täysin saavutettukaan, työ tarjoaa hyvän pohjan jatkokehitykselle ja itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän osalta on mahdollista aloittaa mahdollinen pilottiprojektin toteutus, jos toimeksiantaja sellaisen haluaa tehdä.

Kuten mainittu, aiheen laajuus yllätti ja siitä syystä joitain osia, joita halusin tähän opinnäytetyöhön sisällyttää, jäi nyt jatkokehityksen alaisiksi. Esimerkiksi oleellinen asia, josta myös toimeksiantajalle olisi ollut konkreettista hyötyä olisi ollut toimeksiantajan voimaloissa käytettyjen invertterien ja loggerien välinen tarkempi tekninen analyysi soveltuvuudesta reservien ylläpitoon mm. vasteaikojen ja kommunikointirajapintojen osalta. Myös palveluntarjoajien tarjoamien yläjärjestelmäratkaisujen tarkempi vertailu tai yläjärjestelmän suunnittelu olisi ollut arvokas lisä tälle työlle. Valitettavasti näitä osa-alueita ei ajan puutteen vuoksi voitu tähän työhön sisällyttää.

Yläjärjestelmän tarkempaan suunnitteluun tai palveluntarjoajien palveluiden tarkkaan analyysiin ei paneuduttu myöskään siitä syystä, että oma tietotaito rajoittuu tässä kontekstissa itsenäiseen säätöön kykenevien alajärjestelmien suunnitteluun liittyviin seikkoihin ja luotettavan teknisen analyysin tuottaminen esimerkiksi eri palveluntarjoajien yläjärjestelmätoteutuksista olisi vaatinut huomattavasti itseopiskelua, johon olisi kulunut suuret määrät jo muutenkin vähissä ollutta aikaa.

Työssä esitettyjen tulosten luotettavuutta arvioitaessa täytyy ottaa huomioon, että esitettyjä ratkaisuja aurinkovoimalan liittämiseksi sähkön reservimarkkinoille ei ole käytännössä testattu. Suunnitteluprosessissa on kuitenkin pyritty noudattamaan korkeinta mahdollista huolellisuutta välttämällä mutkien oikomista tai oleellisten seikkojen sivuuttamista, jonka vuoksi työssä esitettyjä tuloksia voidaan pitää luotettavina.

Työssä käytetyt lähteet ovat pääosin Fingridin julkaisemia dokumentteja reservituotteille asetetuista teknisistä vaatimuksista. Nämä teknisten vaatimusten ohjedokumentit voidaan tässä yhteydessä rinnastaa standardeihin, joten niitä voidaan pitää luotettavina lähteinä. Huomioon on otettava, että reservituotteiden tekniset vaatimukset saattavat muuttua ja tässä työssä esitetty analyysit ja ratkaisut perustuvat syksyn 2024 tilanteeseen.

Vaikka päätavoitetta ei täysin saavutettukaan, niin voi työhön kokonaisuutena olla tyytyväinen. Työ muodostaa eheän kokonaisuuden tutkittavasta aiheesta ja vaikka aihe osoittautui yllättävän haastavaksi ja monimutkaiseksi, niin tekemisestä ei kadonnut mielekkyys missään vaiheessa. Koko kirjoittamisprosessi oli mielenkiintoinen ja opettava kokemus, jonka aikana saaduista opeista on varmasti hyötyä myös tulevaisuudessa.

Lähteiden käytössä ja opinnäytetyöprosessissa ylipäätään on noudatettu hyviä tieteellisiä käytäntöjä ja Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettisiä periaatteita. Lähteiden osalta on varmistettu, että lähteet ovat luotettavia, ajantasaisia ja tarkoituksenmukaisesti valittu työn kontekstissa. Lähdeviitteet on tehty asianmukaisesti. Tekoprosessissa on kiinnitetty huomiota eettisiin ja vastuullisiin kohtiin. Raportointi on läpinäkyvää ja tulosten todenmukaisuus on pyritty varmistamaan huolellisella suunnittelulla.

Tässä työssä on käytetty tekoälyä ns. tukiälynä lauserakenteiden paranteluun, yleiseen keskusteluun ja apuna englanninkielisten lähteiden kääntämiseen. Tekoälyn antamia vastauksia ei ole sellaisenaan kopioitu työhön suoraan ja lauserakenteiden sekä kääntämisen apuna käytettäessä on kiinnitetty erityishuomiota, että syötetyn tekstin merkitys ei muutu tekoälyn vastauksessa. Tekoälylle ei ole myöskään syötetty mitään toimeksiantajaan liittyviä arkaluonteisia tietoja. Käytetty tekoälytyökalu oli OpenAI:n kehittämä ChatGPT-4o generatiivinen kielimalli.

Lähteet

Aurinkosähköteknologiat. 2024. Internet-sivu. Motiva. Viitattu 21.10.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 23.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallinta-reservi/>

Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. 2022. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 24.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/uusi-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisprosessi.pdf>

Ehdot ja edellytykset automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) toimittajalle. 2024. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-afrr-ehdot-2024-3-saatoominaisuuksien-tarkistaminen-voimaantulo-1.9.2024.pdf>

Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin (FCR) toimittajalle. 2024. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservitoimittajien-fcr-ehdot-ja-edellytykset-voimaantulo-29.5.2024.pdf>

Kortetmäki, A., Lehto, I., Heikkilä, T., Orrberg, M., Ylinen, M., Andersen, M. & Nikander, M. 2023. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. 3., uud. p. Sähköinfo.

Markkinapaikat. N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 1.12.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>

Nopea taajuusreservi (FFR). N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 29.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>

Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. 2023. Dokumentti. Fingrid. Viitattu 29.9.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisprosessi.pdf>

Ohje ennustepohjaiselle tuotannolle ja kulutukselle automaattisissa reserveissa. 2024. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 5.11.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/ohje-ennustepohjaiselle-tuotannolle-ja-kulutukselle-automattisissa-reserveissa.pdf>

Osa pohjoismaista sähköjärjestelmää. N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 23.9.2024. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/>

Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon YA 9:23. 2023. Verkostosuositus. Energiategollisuus. Viitattu 28.11.2024. <https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/12/YA-9-23-pientuotannon-liittaminen-sahkonjakeluverkkoon-2023-11-29-final.pdf>

Reserveistä ja reservimarkkinoista. 2024. Artikkelit. Fingrid. Viitattu 20.9.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien-perusteet.pdf>

Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto-ohje. 2024. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 28.11.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fingridin-reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto--ohje.pdf>

Reservimarkkinat. N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 20.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko>

Suomen sähköjärjestelmä. N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 23.9.2024. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/>

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 23.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>

Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi. 2023. Dokumentti. Fingrid. Viitattu 20.9.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-2-taajuuden-vakautusreservien-fcr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvakysyttamisprosessi.pdf>

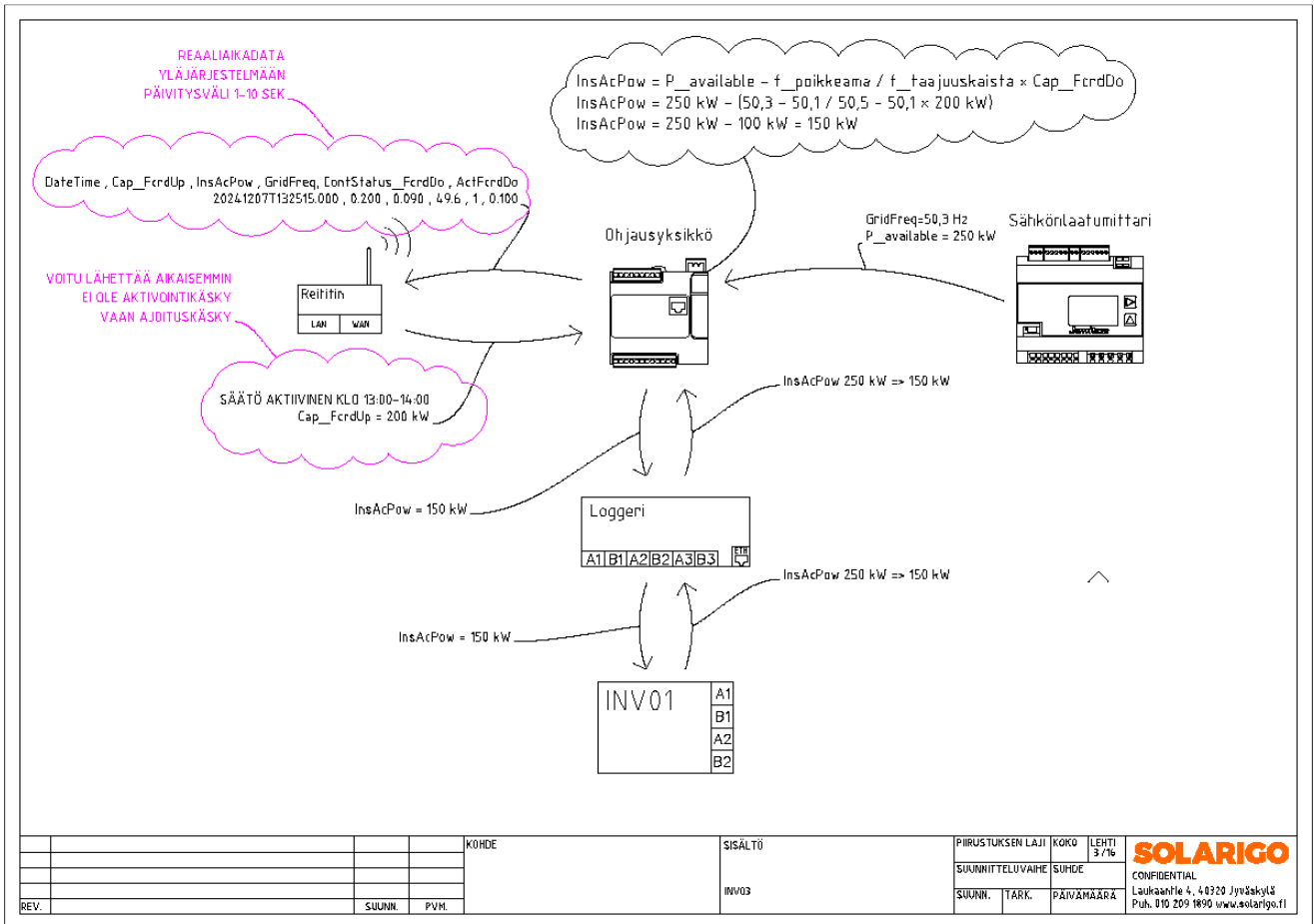
Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 20.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>

Tuotekuvaus: taajuuden vakautusreservit (FCR). 2023. Julkinen dokumentti. Fingrid. Viitattu 23.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/tuotekuvaus-taajuuden-vakautusreservit-fcr.pdf>

Yleistietoa sähkömarkkinoista. N.d. Internet-sivu. Fingrid. Viitattu 1.12.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&pageSize=5&page=1&language=fi>

Liitteet

Liite 1. Itsenäiseen säätöön kykenevän alajärjestelmän toiminta



Liite 2. Ylätason signaalilla ohjattavan alajärjestelmän toiminta

