



Suuren kokoluokan energiavara- rastojen rooli osana sähköver- kon reservimarkkinaa

Anniina Moilanen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

MOILANEN, ANNIINA:

Suuren kokoluokan energiavarastojen rooli osana sähköverkon reservimarkkinaa

Opinnäytetyö 33 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2022

Energiamurroksen myötä fossiilinen helposti säätyvä energiantuotanto vähenee ja sääriippuvaa energiantuotantoa tulee tilalle. Fossiilinen energiantuotanto on tuottanut sähköverkkoon inertiaa pyörivien sähkökoneiden avulla, mikä on stabiloinut sähköverkon taajuutta. Sääriippuvainen energiantuotanto on pääasiassa vaihtosuuntaajakäyttöistä, joten inertian vähentyessä sähköverkon taajuus on alttiimpi muutoksille.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli käsitellä energiamurroksen aiheuttamia haasteita sähköenergiajärjestelmässä ja selvittää erilaisia ratkaisuja tehotasapainon hallintaan. Opinnäytetyössä käsiteltiin Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämiä reservimarkkinoita ja reservituotteita. Lisäksi esiteltiin erilaisia energiavarastoratkaisuja ja käsiteltiin energiavarastojen osallistumista reservimarkkinoille.

Opinnäytetyön avulla saatiin selville, kuinka tehotasapainoa voidaan hallita jatkossa, kun sääriippuvainen energiantuotanto lisääntyy. Tehotasapainon hallintaan voidaan jokaisen käyttötunnin sisällä käyttää reservituotteita. Reservituotteista nopea taajuusreservi FFR on luotu energiamurroksen myötä pienen inertian tilanteisiin. Energiavarastoiden rooli tulee kasvamaan reservimarkkinoilla, koska niillä on teknisesti haluttavia ominaisuuksia. Esimerkkinä lyhyt vasteaika, jota vaaditaan osallistuessa nopeaan taajuusreserviin.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Electrical Power Engineering

MOILANEN, ANNIINA:

The Role of Large-Scale Energy Storages as Part of the Electricity Grid Reserve Market

Bachelor's thesis 33 pages, appendices 0 pages
May 2022

The purpose of this thesis was to gather information about the challenges caused by the energy revolution in the Finnish electrical energy system. As a result of the energy revolution, fossil energy production is giving way to renewable energy production. Fossil energy production has generated inertia in the electricity grid through rotating electrical machines which has stabilized the grid frequency. Increasing solar energy and wind power are weather dependent so their production is mainly done with inverters. Consequently, the inertia of the electricity grid is reduced.

The theoretical section explores different solutions to the challenges caused by the energy revolution. This study examines reserve markets maintained by the Finnish grid company Fingrid as well as reserve products and how they work. In addition, different energy storage technologies and different features required for energy storages to participate in reserve markets were studied.

In conclusion, reserve products can be used during each operating hour to maintain power balance. The role of energy storages will increase in the reserve markets because they have technically desirable characteristics. As an example, the short response time which is required to participate in a fast frequency reserve.

Key words: power balance, energy revolution, reserve markets, energy storages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ENERGIAMURROS.....	7
	2.1 Käynnissä oleva energiamurros.....	7
	2.1.1 Sähköenergiajärjestelmän murros.....	7
	2.2 Uusiutuva energia	8
	2.2.1 Aurinkoenergia	9
	2.2.2 Tuulivoima	9
	2.3 Sääriippuvainen energiantuotanto.....	10
	2.3.1 Ennustettavuus.....	11
3	TEHOTASAPAINO JA RESERVIMARKKINAT.....	12
	3.1 Tehotasapaino	12
	3.1.1 Tehotasapainon ylläpitäminen.....	12
	3.1.2 Vaihtosuuntaajat.....	14
	3.1.3 Tasehallinta	14
	3.2 Reservit.....	15
	3.2.1 Fingridin ylläpitämät reservituotteet Suomessa	15
	3.2.2 Reservien hankinta ja reservimarkkinoiden kehitys	17
	3.2.3 Reservimarkkinoiden toimintaperiaatteet.....	18
	3.2.4 Kysyntäjousto	19
	3.2.5 Aggregointi	21
4	ENERGIAVARASTOT JA NIIDEN ROOLI RESERVIMARKKINOILLA.....	22
	4.1 Suuren kokoluokan energiavarastojärjestelmiä.....	22
	4.1.1 Akkupohjainen energiavarasto	23
	4.1.2 Superkondensaattori ja vesivoima.....	24
	4.1.3 Vety energiavarastona.....	25
	4.2 Energiavarastot osana sähköverkkoa	26
	4.2.1 Energiavarastot reservimarkkinoilla.....	26
	4.2.2 Tekniset vaatimukset.....	27
	4.2.3 Reservilain uudistuminen	27
5	POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	30

LYHENTEET JA TERMIT

DFIG	Double Fed Induction Generator, kaksoissyötetty liukurengasepätahtigeneraattori
FFR	Fast Frequency Reserve, nopea taajuusreservi
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
MVA	megavoltiampeeri, näennäistehon yksikkö
kW	kilowatti, pätötehon yksikkö
kWh	kilowattitunti
MW	megawatti, pätötehon yksikkö
MWh	megawattitunti
TWh	terawattitunti

1 JOHDANTO

Käynnissä olevan energiamurroksen myötä fossiilinen energiantuotanto väistyy uusiutuvan energiantuotannon tieltä ja sähköenergiajärjestelmä kohtaa uusia haasteita.

Sähköverkon tehotasapainon ylläpitäminen vaatii säädettävää energiantuotantoa, jota helposti säädettävä fossiilinen energia on tarjonnut. Uusiutuvista energiantuotantomuodoista tuulivoima ja aurinkoenergia ovat lisääntymässä ja ne ovat sääriippuvaisia, joten tuotannon säätäminen on merkittävästi hankalampaa. Näin ollen on keksittävä uusia ratkaisuja, jotta sähköenergiajärjestelmän tehotasapaino saadaan säilymään ja sähköverkko toimii luotettavasti.

Sähköä on tuotettava joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Sähkön tuotanto ja kulutus on ennustettava jokaiselle käyttötunnille, mutta käyttötuntien aikana esiintyy usein poikkeamia. Poikkeamien tasapainotukseen käytetään reservejä. Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita. Reservimarkkinoille osallistuu reservituotteita, jotka ovat pääasiassa voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja. Kyseiset reservituotteet muuttavat tehoaan tarpeen mukaan jokaisen käyttötunnin aikana.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä kirjallista selvitystyötä energiamurroksen vaikutuksista sähköenergiajärjestelmässä. Työssä käsitellään erilaisia ratkaisuja tehotasapainon hallintaan sääriippuvaisen energiantuotannon lisääntymässä. Fingridin ylläpitämät reservimarkkinat tarjoavat erilaisia reservituotteita, joita käytetään sähköverkon tehotasapainon hallinnassa. Lisäksi työssä on käsitelty erilaisia energiavarastointiratkaisuja ja energiavarastojen roolia osana sähköverkon reservimarkkinaa.

2 ENERGIAMURROS

Energiamurroksen myötä uusiutuva energia lisääntyy sähköenergiajärjestelmässä. Tässä luvussa käsitellään energiamurrosta ja sen myötä lisääntyviä sääriippuvaisia energiamuotoja.

2.1 Käynnissä oleva energiamurros

Energian tarve kasvaa jatkuvasti ja ilmastonmuutosta ajatellen on keksittävä uusia ratkaisuja energian tuottamiseen. Ilmastonmuutos johtuu pääasiassa neljästä päätekijästä, joita ovat talous- ja väestönkasvu, energiankulutus asukasta kohden ja hiilidioksidipäästöt tuotettua energiayksikköä kohden. Energiamurroksen avulla voidaan vaikuttaa kahteen jälkimmäiseen. Energiamurros tarkoittaa pääasiassa siirtymäkautta, jossa fossiilisista polttoaineista pyritään pääsemään eroon ja tilalle tuodaan uusiutuvaa luontoystävällisempää energiaa. (Fortum n.d.)

2.1.1 Sähköenergiajärjestelmän murros

Energian tuotannossa käytettävät uusiutuvat energialähteet lisääntyvät, eli fossiiliset polttoaineet väistyvät uusiutuvien energialähteiden tieltä. Sähköenergiajärjestelmän kannalta tämä tarkoittaa sitä, että tarvitaan uusia keinoja, jotta sähköenergiajärjestelmä toimii luotettavasti ja laadukkaasti.

Fossiilista energiaa tuotetaan suurien pyörivien sähkökoneiden avulla, jotka tuottavat sähköverkkoon inertiaa. Inertia auttaa vastustamaan taajuuden muutoksia sähköverkossa. Kun fossiilinen energiantuotanto poistuu energiamurroksen myötä, tulee inertiaa muodostavien sähkökoneiden tilalle uusiutuvia energialähteitä ja tällöin inertia sähköverkossa vähenee. (Leinonen 2018.)

Uusiutuvista energialähteistä aurinkoenergia ei tuota lainkaan sähköverkkoon inertiaa. Aurinkosähköjärjestelmässä vaihtosähkö muodostetaan vaihtosuunta-

jien avulla, joten käytössä ei ole missään vaiheessa pyöriviä sähkökoneita (Motiva 2022). Tuulivoimalat taas ovat itsessään pyöriviä koneita ja voivat muodostaa verkkoon inertiaa, riippuen käytettävästä tuulivoimalatyypistä. Suomessa yleisin käytettävä voimalatyyppi on rajoitetusti muuttuvanopeuksinen DFIG-tuulivoimala. Tämä voimala voi syöttää noin 70 % tuottamastaan sähköenergiasta suoraan sähköverkkoon, ja loput noin 30 % syötetään verkkoon vaihtosuuntaajien kautta. (Kauhaniemi ym. 2008) Tämän myötä voidaan todeta, että tuulivoimalat tuottavat verkkoon inertiaa, mutta huomattavasti vähemmän kuin fossiiliset tuotantolaitokset.

Uusiutuvista energialähteistä aurinkoenergia ja tuulivoima ovat sääriippuvaisia, mikä luo haasteita tämänhetkisen sähköenergiajärjestelmän toimivuudelle. Fossiilista energiaa tuottavaa tuotantolaitosta ei voida suoraan korvata uusiutuvalla energialla, koska tuotannon ominaispiirteet ja säädettävyyden poikkeavat toisistaan huomattavasti. (Vattenfall 2015.)

2.2 Uusiutuva energia

Energia on uusiutuvaa, jos se on luonnon tuottamaa ja helposti uusiutuvaa, kuten tuuli-, aurinko-, vesi- ja bioenergia sekä maalämpö. Bioenergia koostuu biokaasusta, peltobiomassoista, puuperäisistä polttoaineista ja kierrätyspolttoaineiden biohajoavista osista. Aalloista ja vuorovedestä saatava energia on myös uusiutuvaa, mutta Suomen energiantuotannossa ne eivät ole kannattavia käyttää, koska kyseisille energiamuodoille ei ole sopivia olosuhteita. (Motiva 2021.)

Suomen on määrä olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä kansallisen ilmastotavoitteen mukaisesti. Yhtenä tavoitteista on lähes päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto 2030-luvun loppuun mennessä. (Ympäristöministeriö n.d.) Tavoitteen edistämiseksi uusiutuvat energialähteet ovat suuressa roolissa, koska uusiutuvista energialähteistä ei vapaudu kasvihuonekaasuja, lukuun ottamatta bioenergiaa. Bioenergiaa käyttäessä ilmakehään vapautuu hiilidioksidia saman verran, mitä bioenergiana käytettävät kasvit ovat itseensä kasvaessaan sitoneet (Jantunen 2018).

Uusiutuvilla energialähteillä on merkittävä rooli sähköenergiajärjestelmän murroksessa. Positiivisena seurauksena ilmastonrasite vähenee ja edesauttaa näin ollen osaltaan ilmastonmuutoksen hidastamisessa.

Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin sääriippuvaisia energiamuotoja, eli aurinkoenergiaa ja tuulivoimaa.

2.2.1 Aurinkoenergia

Auringon säteilemää energiaa hyödynnetään sähköenergiana aurinkokennojen avulla. Auringon säteily koostuu fotoneista, jotka kuljettavat energiaa. Kun fotoni osuu aurinkokennoon, se luovuttaa energiansa aurinkokennossa oleville elektroneille. Tämän seurauksena elektronit muodostavat sähkövirtaa aurinkokennon johtimiin. Paneelin tuottama sähkö on tasasähköä ja vaihtosuuntaajan avulla se voidaan muuntaa yleisemmin käytetyksi vaihtosähköksi. Sähköä voidaan varastoida akkuihin tai käyttää suoraan tarpeeseen. (Motiva 2022.)

2.2.2 Tuulivoima

Kun ilma liikkuu ilmamassojen paine-erojen seurauksena, syntyy tuulta. Tuulivoimalan avulla tuulen liike-energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Voimalan lavat muuntavat liike-energian pyörimisliikkeeksi ja samalla lavat pyörittävät generaattoriin kytkettyä akselia. Generaattori muuntaa pyörimisenergian sähköenergiaksi, josta se johdetaan muuntajaan. Muuntajan kautta sähkö syötetään verkkoon. (Motiva 2021.)

Tuulivoimalatyyppejä on olemassa useita erilaisia ja ne voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri kategoriaan: vakionopeuksisiin, rajoitetusti muuttuvanopeuksisiin ja muuttuvanopeuksisiin täystehoisella suuntaajakäytöllä. (Kauhaniemi ym. 2008).

Vakionopeuksiset tuulivoimalat on suunniteltu toimimaan tietyllä tuulennopeudella, ja ne ovat kytkettynä suoraan sähköverkkoon. Näin ollen vakionopeuksiset voimalat muodostavat sähköverkkoon samalla myös inertiaa. Kuitenkin kyseisen

voimalatyypin huonona puolena on se, että se tuottaa energiaa vain tietyllä tuulennopeudella ja tuulen nopeus on yleisesti vaihtelevaa. Näin kyseisellä voimalatyypillä ei saada maksimaalista hyötyä tuulen muodostamasta energiasta. Vakionopeuksisia tuulivoimaloita ei ole Suomessa merkittävästi käytössä. (Kauhaniemi ym. 2008)

Rajoitetusti muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat ovat hyvin samankaltaisia kuin vakionopeuksiset tuulivoimalat. Erona on se, että voimalan generaattorina käytetään liukurengasepätahtigeneraattoria, jossa roottoriin voidaan DFIG-käytössä syöttää osittaisen muuttuvanopeuksisuuden mahdollistavaa ohjaussignaalia. Ohjauksen avulla generaattorin sisäistä magneettikenttäjakamaa pystytään muokkaamaan, mikä mahdollistaa pyörimisnopeuden vaihtelut jättämällä kasvattamisen myötä. Tämä kuitenkin edellyttää osatehoisen suuntaajakäytön hyödyntämistä. Staattorilta saatava sähköenergia syötetään suoraan verkkoon ja roottorilta saatava energia syötetään vaihtosuuntaajan kautta verkkoon. DFIG-tuulivoimaloita käytettäessä sähköverkkoon muodostuu jonkin verran inertiaa. Kyseiset voimalat ovat yleisimpiä käytettäviä tuulivoimaloita Suomessa. (Muyeen 2012.)

Muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden käyttö täystehoisella suuntaajakäytöllä perustuu siihen, että roottorin pyörimisnopeus muuttuu tuulennopeuden mukaisesti. Tällöin myös sähköenergian taajuus on vaihtelevaa ja sähköenergia tulee syöttää sähköverkkoon vaihtosuuntaajien avulla. Kyseistä tuulivoimalaa käyttäessä sähköverkkoon ei muodostu lainkaan inertiaa, koska kaikki tuotettu sähköteho syötetään sähköverkkoon suuntaajakäytön kautta. (Muyeen 2012.)

2.3 Säariippuvainen energiantuotanto

Suomessa varsinkin tuulivoiman käyttö on lisääntynyt viime vuosina. Sitran vuonna 2021 julkaiseman raportin mukaan tuulivoima tulee hallitsemaan sähköntuotantoa, koska sitä on riittävästi käytettävissä ja se on kustannustehokkainta verrattuna muihin hiilidioksidipäästöttömiin tuotantotapoihin. Jotta suurin osa sähköntuotannosta voisi olla tuulivoimaa, se vaatisi suurien varastojen ja huipputuotannon kaasuturbiinien käyttöönottoa, jotta voidaan varmistaa tuotannon integrointi sähköverkkoon ja toimitusvarmuus. (Roques ym. 2021.)

Suomessa vuonna 2020 tuulivoimalat tuottivat noin 8 TWh sähköenergiaa, joka on noin 10 % Suomen sähkönkulutuksesta. Sitran julkaiseman raportin mukaan 10 vuoden päästä luku voisi olla jo moninkertainen, eli tuulivoimalla tuotettaisiin noin 35-40 TWh sähköenergiaa ja vuonna 2050 luku olisi jo noin 120 TWh. Tällä hetkellä tuulivoimaa on jo niin paljon käytössä, että se vaikuttaa sähköenergiajärjestelmäämme. (Roques ym. 2021.)

Aurinkoenergian osuus on huomattavasti pienempi ja aurinkoenergian tuotannosta ei puhuta vielä TWh-asteikolla. Aurinkoenergian tuotanto on kuitenkin nousussa, mutta sitä ei pidetä vielä erityisen merkittävänä tekijänä Suomessa.

2.3.1 Ennustettavuus

Sääriippuvaisten energialähteiden tuotantoennusteet perustuvat sääennusteisiin. Tuotantoennusteet tehdään vuorokaudeksi eteenpäin taseselvitysjakson mukaisella aikaikkunalla. Tällä hetkellä kyseinen jakso on tunnin mittainen, joten seuraavan päivän tuotanto tulee voida ennustaa tunti tunnilta. Aurinkoenergialla ja tuulivoimalla ei voida suoraan korvata fossiilista säätövoimaa, koska kyseiset tuotantolähteet eivät ole säädettävissä. Tärkeä osa sähköverkon tehotasapainon hallinnassa on, että sähköntuottajat ennustavat tuotantonsa. Sääennusteet ovat tarpeeksi kehittyneitä, jotta tuulivoimatuotanto voidaan ennustaa tarvittavan tarkasti. Aurinkoenergiaa on hieman hankalampaa ennustaa, koska esimerkiksi puolipilvisenä päivänä pilvisyys voi vaihdella paljon. Täysin pilvettömänä päivänä ja tasaisen pilvisenä päivänä ennustettavuus on helpompaa. (Korpela 2017.)

3 TEHOTASAPAINO JA RESERVIMARKKINAT

Energiamurroksessa fossiilista säätövoimaa korvataan sääriippuvaisella tuotannolla, joka vaikuttaa sähköenergiajärjestelmäämme. Koska sääriippuvainen tuotanto lisääntyy, täytyy keksiä uusia ratkaisuja, jotta verkon tehotasapaino saadaan säilymään.

3.1 Tehotasapaino

Sähkön tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa kutsutaan tehotasapainoksi. Jos sähköverkossa on enemmän nimelliskuormaa kuin tuotantoa, pyrkii sähköä tuottavien pyörivien koneiden pyörimisnopeus hidastumaan. Näiden sähkökoneiden pyörimisnopeus on suoraan yhteydessä sähköverkon taajuuteen, joten pyörimisnopeuden hidastuessa myös sähköverkon taajuus laskee. Tämä voi johtaa esimerkiksi kuormien poiskytkentään tai pahimmillaan jopa sähköenergiajärjestelmän kaatumiseen. Vastakkaisessa tilanteessa, kun nimelliskuormaa on vähemmän kuin tuotantoa, sähkökoneiden pyörimisnopeus kasvaa ja samalla myös sähköverkon taajuus kasvaa. Ylimääräinen tuotanto saadaan verkosta lisäämällä verkkoon esimerkiksi kulutuskohteita tai vähentämällä voimalaitosten tehoa. Yhtenä esimerkkinä toimii vesivoimalaitosten pumppuvoimalaitos, jonka tehtävänä on pumpata vettä ylituotannon aikana korkeammalle tasolle, jolloin siitä saatu energia voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi tarpeen tullen. (Moseley & Garche 2014.)

3.1.1 Tehotasapainon ylläpitäminen

Sähköenergiaa täytyy tuottaa joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Sähkön tuottajat ennustavat tuotantonsa seuraavaksi vuorokaudeksi tunti tunnilta ja tämän avulla saadaan käsitys seuraavan päivän tuntitason sähköntuotannosta. Kulutuksen osalta taas suomalaisten sähkönkäyttö ja -kulutus tunnetaan hyvin tarkasti ajankohdan ja ulkolämpötilan suhteen ja näiden tietojen avulla kulutus voi-

daan ennustaa jopa vuoden jokaiselle tunnille (Lehto n.d). Kun tuntitason tuotannosta ja kulutuksesta saadaan käsitys, on kantaverkkoyhtiö Fingridin tehtävänä säätää tehotasapaino kohdilleen jokaisen käyttötunnin sisällä (Fingrid, Tasepalvelut n.d). Tähän tarvitaan säätövoimaa, jona Suomessa on toiminut fossiilinen tuotanto ja vesivoima. Energiamurroksen myötä fossiilinen tuotanto poistuu, eikä vesivoima yksinään riitä vastaamaan kasvavasta säätövoiman tarpeesta. (Energiateollisuus n.d.)

Energiamurros näkyy tehotasapainon hallinnassa, koska tuotannon ennustaminen hankaloituu sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä. Lisäksi sähköverkossa taajuuden herkkyys tehoepätasapainosta kasvaa inertian vähentyessä. Fossiilisen säädettävän tuotannon tilalle tulee sääriippuvaa tuotantoa, eli tuulivoimaa ja aurinkoenergiaa, joita ei voida säätää. Kyseisten tuotantojen tuotantoennusteet perustuvat vain ja ainoastaan sääennusteisiin. (Hildén & Kivimaa 2020.) Tehotasapainon hallinnassa tuotantopuolen ratkaisuna on tuotannon säätäminen esimerkiksi säätövoimalaitoksissa. Kulutuspuolella ratkaisuja ovat esimerkiksi joustavat kuormat, kysyntäjousto ja tehomaksut pienasiakkailta. Energiavarastoa voidaan pitää sekä tuotanto- että kulutuspuolen ratkaisuna tehotasapainon hallinnassa. Kun energiaa syötetään energiavarastosta sähköverkkoon, on se sähköverkon kannalta tuotantoa. Vastaavasti kun energiaa syötetään sähköverkosta energiavarastoon, on se sähköverkon kannalta kulutusta. Myös aikaisemmin mainittu tunnin tasehallintaikkuna on lyhenemässä 15 minuutin aikaikkunaan, jolloin on mahdollista nähdä todelliset tehopiikit aiempaa paremmin (Brink 2021). Tämä osaltaan auttaa tehotasapainon hallinnassa.

Tehoepätasapaino näkyy ensisijaisesti verkossa taajuuden muutoksina. Fossiilisessa tuotantotavassa sähköenergiaa tuotetaan suurikokoisilla sähkökoneilla, joiden pyörivä massa tuottaa sähköverkkoon inertiaa. Inertialla, eli pyörimisliikkeeseen liittyvällä hitausmomentilla on kyky vastustaa taajuuden muutoksia sähköverkossa. Energiamurroksen myötä fossiilista säätövoimaa korvataan aurinkoenergialla ja tuulivoimalla, jotka kytkeytyvät verkkoon ilman pyörivää massaa. Näin ollen inertia vähenee sähköverkossa, joka aiheuttaa sen, että verkon taajuus on aiempaa herkempi muutoksille. (Leinonen 2018.)

3.1.2 Vaihtosuuntaajat

Kun uusiutuvia energialähteitä integroidaan sähköverkkoihin yhä enemmän, sähkövoimajärjestelmät siirtyvät synkronisesta generaattoripohjaisesta ohjauksesta vaihtosuuntaajakäyttöisiin resursseihin. Inertian vähentyessä sähköverkossa tehotasapainon nopean säädön tarve kasvaa, koska inertian väheneminen kasvattaa taajuuden häiriöherkkyyttä. Vaihtosuuntaajakäyttöisillä energialähteillä on ollut käytössä teknologia nimeltään Grid-Following inverters, eli verkkoa seuraavat vaihtosuuntaajat. Jos verkossa tapahtuu häiriö tai katkos, niin nämä kyseiset vaihtosuuntaajat katkaisevat virran näistä energialähteistä ja odottavat signaalia muualta verkosta, että häiriö tai katkos on ohi ja että uudelleenkäynnistys on turvallista. Koska vaihtosuuntaajakäyttöiset energialähteet lisääntyvät kiihtyvällä tahdilla, on käymässä epäkäytännölliseksi riippua muusta sähköverkosta häiriötilanteiden hallinnassa. Grid-Forming inverters, eli verkon muodostavat vaihtosuuntaajat ovat kehittyvä teknologia, jonka avulla uusiutuvat energialähteet kuten aurinkoenergia sekä tuulivoima ja energiavarastot voivat muodostaa ja käynnistää verkon itsenäisesti. Näin ollen nämä kyseiset vaihtosuuntaajat voivat auttaa verkon tehotasapainon stabiilisuudessa. Verkon muodostavien vaihtosuuntaajien tehtävänä on tunnistaa verkossa taajuuden heilahtelu ja säätää itsenäisesti tehonsyöttöä liian matalan tai liian korkean taajuuden aikana. (Lin ym. 2018.)

3.1.3 Tasehallinta

Tehotasapainon ylläpitoa tehdään tasehallinnan avulla. Kantaverkkoyhtiö Fingrid vastaa tasehallinnasta Suomessa. Tasehallinnan tärkein tehtävä on ylläpitää sähköenergiajärjestelmän taajuus sallituissa rajoissa ja tämä onnistuu Fingridin reservituotteiden avulla. (Fingrid, Tasepalvelut n.d.) Tasehallinnassa on tärkeää jatkuva sekuntitason tehotasapaino jokaiselle käyttötunnille. Tasehallinta lähtee liikkeelle etukäteishallinnasta, jossa tulevan vuorokauden jokaiselle tunnille ennustetaan edellisenä päivänä tuotanto ja kulutus. Tätä tuntia kutsutaan taseikkunaksi.

Pohjoismaissa siirrytään vuoden 2023 keväällä tuntitaseesta varttitaseeseen. Tämän avulla sähkömarkkinat muuttuvat reaaliaikaisemmiksi ja päästään lähemmäksi todellista tehotasapainon hallinnan tarvetta. (Brink 2021.)

3.2 Reservit

Sähköenergiajärjestelmässä sähkön tuotannon ja kulutuksen tarvitsee olla tasapainossa. Lähtökohtaisesti tasapainon säilyminen vaatii hyvää etukäteissuunnittelua ja sitä, että sähköenergiajärjestelmän tilaa seurataan jatkuvasti. Tasapainon säilymistä ei kuitenkaan voida taata edellä mainituilla keinoilla ja tällöin reservit ovat suuressa roolissa.


Sähköenergiajärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino näkyy taajuudessa, jonka tavoitearvo on 50 Hz. Normaalitilanteessa taajuuden sallitaan vaihdella 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Kun sähkön kulutus kasvaa, se näkyy taajuuden laskuna, ellei tuotantoa samalla lisätä. Jos taajuuspoikkeamia ei saada hallittua, se voi vaurioittaa sähkölaitteita ja sähköntuotantolaitoksia sekä pahimmillaan se voi johtaa laajoihin sähkökatkoksiin. Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid huolehtii taajuuden ylläpidosta reservituotteiden avulla. (Fingrid, Reservimarkkinat n.d.)

3.2.1 Fingridin ylläpitämät reservituotteet Suomessa

Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita. Pääasiassa reservit ovat tuotantolaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja. Kyseisien kohteiden tarkoituksena on muuttaa tehoaan tarpeen mukaan, jotta käyttötunnin sisäinen tehotasapaino saadaan säilymään. (Fingrid, reservimarkkinat n.d.)

Fingridillä on Suomessa viisi erilaista reservituotetta, joita käytetään eri tilanteissa. Osa tuotteista aktivoituu automaattisesti ja osa Fingridin erillisestä pyynnöstä. Kuviossa 1 on esiteltynä nämä viisi reservituotetta.

Reservituotteet Suomessa

	FFR	FD	FCR-N	aFRR	mFRR
	Nopea taajuus-reservi, Suomi 18 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi ~300 MW, Pohjoismaissa yht. 1 450 MW (ylös) ja 1400 MW (alas)	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi ~120 MW, Pohjoismaissa yht. 600 MW	Automaattinen taajuuden palautusreservi, Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa yht. 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoitettava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuus-poikkeamissa, hankitaan pieneen inertian tilanteissa	Suuremmissa taajuus-poikkeamissa, erikseen ylös- ja alassäätö	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Kolmessa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa (12,5 min)
					
5	Reservit				FINGRID

KUVIO 1. Reservituotteet Suomessa (Fingrid Oyj, reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2022.)

Kyseisistä reservituotteista taajuusohjattu käyttöreservi ja automaattinen taajuuden palautusreservi huolehtivat jatkuvasti sähköenergiajärjestelmän pienistä tasevastaavien muutoksista. Taajuusohjattu käyttöreservi toimii itsenäisesti säätäen tehoa, jos taajuus sähköenergiajärjestelmässä muuttuu, kun taas automaattinen taajuuden palautusreservi palauttaa taajuuden 50 Hz:n saadessaan Fingridiltä tehopyyntösignaalin. (Fingrid Oyj, reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2022.)

Taajuusohjattu häiriöreservi ja nopea taajuusreservi aktivoituvat, kun sähköverkossa tapahtuu häiriötilanne, jossa taajuus putoaa nopeasti. Kyseisten reservien aktivoitumisaika on muutama sekunti, joten nopeasti toimiessaan ne estävät sähköenergiajärjestelmän taajuutta laskemasta liian alhaiseksi ja estäen suuremmat ongelmat häiriötilanteessa. Taajuusohjattua häiriöreserviä käytetään myös silloin, jos taajuus nousee äkillisesti sähköenergiajärjestelmässä. (Fingrid Oyj, reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2022.)

Jotta taajuusohjattu häiriöreservi saadaan takaisin käyttöön seuraavia häiriötilanteita varten, vapautetaan se häiriötilanteesta aktivoimalla käyttöön tarjouksia säätösähkömarkkinoilta. Tarpeen tullen Fingrid voi käynnistää avuksi myös varavoimaitoksia, jotka toimivat nopeina häiriöreserveinä. (Fingrid Oyj, reservituotteet

ja reservien markkinapaikat 2022.) Nopea taajuusreservi eli FFR on kehitetty, koska sähköenergiajärjestelmän inertia on vähentynyt ja vähenee edelleen. Nopeaa taajuusreserviä käytetään sähköverkon pienen inertian tilanteiden hallinnassa (Nortio 2019). Nopeassa taajuusreservissä reservituotteilta vaaditaan nopeaa vasteaikaa, joten käytännössä kyseiseen reserviin voi osallistua energiavarastot ja säätyvät joustavat kuormat. (Fingrid Oyj, reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2022.)

3.2.2 Reservien hankinta ja reservimarkkinoiden kehitys

Suomessa on sekä suomalaisia että pohjoismaisia reservituotteita, joita Fingrid hankkii eri sähkömarkkinaosapuolilta. Reservien hankinta tapahtuu käytännössä siten, että Suomessa kaikki tuotanto- ja kulutuskohteet sekä myös energiavarastot voivat osallistua reservimarkkinoille. Lisäksi Fingrid käy kauppaa reserveista Pohjoismaiden kanssa. Pohjoismaat ovat yhdessä samassa sähköenergiajärjestelmässä Suomen kanssa. Reservien hankintaan ja reservimarkkinoiden kehitykseen kuuluu Fingridin osalta peruseriaatteita ja reunaehtoja, joiden mukaan reserveja hankitaan. Reservit hankitaan kustannustehokkaasti ja markkinaehtoisesti. Reservien kustannustehokkuus on tärkeää, koska Fingrid laskuttaa kantaverkkotariffissaan tasepalvelumaksuissa sähköenergiajärjestelmän ylläpidosta ja reserveista, joka näkyy kuluttajien ja tuottajien sähkölaskuissa. Reservien hankintahinnat määräytyvät marginaalihintaperiaatteen mukaisesti markkinapaikoilla. Eli käytännössä kalleimman tarjouksen hinta määrittää esimerkiksi kyseisen käyttötunnin ajalle reservin hinnan. Tällä hetkellä hinnat lasketaan tuntiperusteisesti, mutta myöhemmin siirytään 15 minuutin taseselvitysjaksoon. (Ihamäki & Sonkeri 2021.)

Reservimarkkinat kehittyvät jatkuvasti ja teknologianeutraalisuus on yksi reunaehdoista. Teknologianeutraalisuus on tärkeä muistaa uusia teknisiä vaatimuksia suunniteltaessa, jotta erityyppiset teknologiat pääsevät osallistumaan reservimarkkinoille. Reservimarkkinoita kehittäessä on tärkeää pohtia, mitä sähköenergiajärjestelmä tarvitsee ja sen pohjalta miettiä tarvittavia vaatimuksia, jotta reservimarkkinoilla olisi mahdollisimman paljon tarjontaa. Lisäksi Fingrid edistää säh-

kömarkkinoita ja reservimarkkinoita kehittäessä täytyy ottaa koko markkinanäkökulma huomioon sisältäen esimerkiksi vuorokausimarkkinat sekä päivän sisäiset markkinat. Reservimarkkinoiden kehittäminen on pääasiassa Fingridin omissa käsissä, mutta Energiavirasto vahvistaa ja hyväksyy Fingridin kehitysideat. (Ihamäki & Sonkeri 2021.)

3.2.3 Reservimarkkinoiden toimintaperiaatteet

Reservituotteilla on omat reservimarkkinapaikat ja eri tuotteiden osalta markkinapaikat toimivat hieman eri tavoin.

Nopean taajuusreservin ja taajuusohjattujen reservien kohdalla markkinapaikoilla on tuntikohtaiset markkinat. Nopealla taajuusreservin markkinapaikalla reservitoimija saa korvauksen ylläpidetystä kapasiteetista. Tarjottavan tuotteen vähimmäiskoko on 1 MW. Taajuusohjatuissa reserveissa korvauksen saa myös ylläpidetystä kapasiteetista, mutta lisäksi taajuusohjatussa käyttöreservissä toimija saa korvauksen reservin säätämästä energiasta. Taajuusohjatuissa reserveissa on tuntikohtaisten markkinoiden lisäksi vuosimarkkinat, joihin voi osallistua aina syksyisin seuraavan vuoden osalta. Taajuusohjatun häiriöreservin minimitarjouskoko on sama kuin nopealla taajuusreservillä, kun taas taajuusohjatun käyttöreservin osalta voi osallistua 0,1 MW tarjouksella. (Ihamäki & Sonkeri 2021.)

Automaattisella taajuudenpalautusreservillä on myös käytössä tuntikohtaiset markkinat, jonka perusteella kapasiteetti hankitaan edeltävänä vuorokautena. Tässä tuotteessa energiasta saatava korvaus määritetään säätösähkömarkkinoiden hintojen perusteella ja minimitarjouskoko on 1 MW. Manuaalisessa taajuuden palautusreservissä on hankintakanavana säätösähkömarkkinat, joka toimii reaaliaikaisena markkinapaikkana. Aina 45 minuuttia ennen kutakin tuntia markkina sulkeutuu ja ennen sitä voi jättää tarjouksia. Fingridin ja muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden valvomoissa seurataan, paljonko tarjouksia tarvitsee käyttää, jotta tehotasapaino saadaan ylläpidettyä. Säättotarjouksia käytetään pohjoismaiselta tarjouslistalta, johon kaikki pohjoismaiset tarjoukset on listattu hintajärjestyksessä. Tarjouksia käytetään aina edullisimmista lähtien ja jokaiselle

tunnille muodostuu säätösähkön hinta kalleimman hyväksytyt tarjouksen mukaan, jota kutsutaan ylössäätohinnaksi. Alassäätohintana on puolestaan halvin hyväksytty alassäätotarjous. Manuaalisessa taajuuden palautusreservissä varsinainen minimitarjouskoko on 5 MW, mutta poikkeuksena on, että yhden alle 5 MW tarjouksen voi jättää. Syynä tähän on se, että kapasiteettia ei jää saamatta, jos 5 megawatin tarjous on liian iso osallistuvalla toimijalla. (Ihamäki & Sonkeri 2021.)

Lisäksi Suomessa on oma säätökapasiteettimarkkina, jossa Fingrid tekee viikkotason hankintana säätökapasiteettia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että Fingrid ostaa sitoumuksen toimijoilta, jotka jättävät säätötarjouksia säätösähkömarkkinoille. Kyseessä on vapaaehtoinen markkinapaikka, johon kaikki voi osallistua ja korvauksen saa silloin, kuin tarjous käytetään. Fingridillä on käytössään kapasiteettimekanismi, jonka avulla Fingrid varmistaa, että heillä on tietty määrä tarjouksia käytössä. Mekanismin avulla Fingrid maksaa toimijoille, jotka jättävät mekanismin kautta tarjouksen edellisenä päivänä. (Ihamäki & Sonkeri 2021.)

Fingrid julkaisee nettisivuillaan listan, jossa on lueteltuna eri toimijat, jotka osallistuvat reservimarkkinoille. Periaatteessa kuka vain, jolla on säätökykyinen kohde, voi osallistua reservimarkkinoille. Kohteen tarvitsee täyttää asetetut tekniset vaatimukset ja markkinapaikan edellytykset. Lisäksi kohteen tulee sijaita Suomessa tai olla kytkettävissä suoraan Suomen sähköverkkoon. Itse reservimyyjän täytyy omistaa tarjoamansa kohde tai olla osapuolena sen avoimen sähkön toimitusketjussa. Reservitoimijat voivat osallistua reservien ylläpitoon halutessaan, mutta se ei ole edellytys. Lisäksi myyjän täytyy tehdä sopimus osallistumisestaan Fingridin kanssa. (Fingrid, Kuinka osallistua reservimarkkinoille n.d.)

3.2.4 Kysyntäjousto

Sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä sähköntuotanto on vaihtelevaa. Tämä vaikuttaa siihen, että myös sähkön hinta on vaihtelevaa ja ajoittain sähköä on saatavilla paljon ja edullisesti ja toisina ajanjaksoina taas vähemmän ja kalliimmin. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkönkulutuksen ohjausta, eli sähkönkäyttöä siirretään korkean kulutuksen ja näin ollen korkeamman hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan. Kysyntäjousto koostuu pääasiassa kahdesta tekijästä;

kulutusjoustosta ja tuotannonjoustosta. Kulutusjoustossa sähkön kuluttaja siirtää suunnittelemansa sähkökäyttönsä toiseen ajankohtaan ja tuotannonjoustossa sähkön tuottaja lisää tuotantoa niille ajankohdille, joilla tarvitaan enemmän sähkötehoa. (Fidelix n.d.)

Kysyntäjousto hyödynnetään sähköverkon tehotasapainon hallinnassa muuttamalla sähkön hetkellistä kulutusta tehotasapainon ylläpitämisen tarpeisiin. Kysyntäjouston avulla voidaan leikata kulutushuippuja ja turvata sähkömarkkinoiden toiminta. (Fingrid, kysyntäjousto n.d.)

Kysyntäjousto voi osallistua monille eli markkinapaikoille. Kuviossa 2 on esiteltynä kysyntäjouston osuudet eri markkinapaikoilla.



KUVIO 2. Kysyntäjouston osallistuminen eri markkinapaikoille Suomessa (Fingrid, kysyntäjousto n.d.)

Osallistumisessa on tärkeää ottaa huomioon, että reservimarkkinoille tarjottua sähkökapasiteettia on oltava tarpeeksi ja että kyseinen kapasiteetti on oltava kokonaisuudessaan käytössä sitä tarvittaessa. Reserveihin osallistuminen voi kuitenkin tarkoittaa vain hetkellistä verkosta otettavan tehon vähennystä tai pitemmällä ajanjaksolla kyse voi olla muutamien tuntien katkoista. Pyrkimys on kuitenkin säätää tehoa joustavasti, jotta katkoja ei syntyisi. (Fingrid, kysyntäjousto n.d.)

3.2.5 Aggregointi

Tässä yhteydessä aggregoinnilla tarkoitetaan säätöön kykenevien kuormien tai tuotanto- ja kulutuskohteiden tai varastoidun sähkön yhdistämistä suuremmaksi kokonaisuudeksi. Aggregointia tehdään yleensä silloin, kun tarjottavat yksittäiset kohteet ovat pieniä teholuokiltaan ja niitä yhdistämällä saadaan suurempia teho-kokonaisuuksia, jolloin osallistuminen reservimarkkinoille on mahdollista. Aggregointia tekee erillinen toimija, eli aggregaattori, joka yhdistää kohteita perinteisen sähköntoimitusketjun ulkopuolelta. Toimija ei voi olla kohteiden sähkömyyjä tai tasevastaava. Itsenäinen aggregaattori voi toimia taajuusohjatuissa reserveissa. (Fingrid, säätösähkömarkkinoiden aggregointipilotti, 2020.)

4 ENERGIAVARASTOT JA NIIDEN ROOLI RESERVIMARKKINOILLA

Energiavaraston tarkoituksena on varastoida energiaa, sekä auttaa sähköverkon kuorman tasaamisessa ja mahdollistaa se, että poikkeustilanteessa sähköenergiaa on käytettävissä. Sääriippuvaisen energiantuotannon lisääntyessä yksi merkittävä ratkaisu tehotasapainon hallintaan on energiavarastot.

4.1 Suuren kokoluokan energiavarastojärjestelmiä

Energiavarastolla tarkoitetaan energian lähdettä, johon voidaan varastoida energiaa. Energiaa voidaan varastoida esimerkiksi kemiallisesti (akut), lämpöenergiana, liike-energiana (vauhtipyörät) tai potentiaalienergiana (vesivoimalaitokset). Jotta kyseessä on sähköverkon kannalta energiavarasto, varastoitu energia on pystyttävä muuntamaan sähköenergiaksi. Sähköenergiavarastot luokitellaan teknologioiden mukaan, ja ne ovat nähtävillä taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Varastointitekniikat teknologioiden mukaan

Mekaaninen	Sähköinen	Kemiallinen	Sähkökemiallinen
Pumppuvoimalaitos	Suprajohtava magneettinen energiavarasto	Vety	Akku
Paineilmavarasto	Superkondensaattorit		
Vauhtipyörä			

Pumppuvoimalaitoksessa energian varastointi perustuu kahteen eri vesialtaaseen, joilla on korkeusero. Kun sähköntuotantoa on enemmän kuin kulutusta, vettä pumpataan korkealle yläaltaaseen. Sähköenergiaa tarvittaessa yläaltaasta lasketaan varastoitu vesi turbiinin kautta ala-altaaseen. (Lampila 2018.) Paineilmavarastoja käytetään Compressed Air Energy Storage -laitoksissa. Sähköntuotuksen ollessa alhaista, paineilma puristetaan laitoksessa kompressorin avulla ja kulutuksen ollessa korkealla, varastoa puretaan. Vauhtipyörään varastoituu liike-energiaa, jota se tuottaa pyöriessään. (Alanen, Hukari, Koljonen & Saari 2003.)

Suprajohtavan magneettisen energiavaraston toiminta perustuu käämissä kiertävään tasavirtaan, joka synnyttää sähkömagneettisen kentän, johon energia varastoituu sähköenergiana. Ja taas superkondensaattoreissa energia varastoituu kondensaattorin sisällä olevien johdinlevyjen väliin muodostuvaan sähkökenttään sähköenergiana. Sähkökenttä muodostuu johdinlevyjen varauserojen myötä. (Alanen, Hukari, Koljonen & Saari 2003.)

Vetyä voidaan käyttää varastona eri tavoin, esimerkiksi jos aurinko- ja tuulivoimaa tuotetaan yli kulutuksen, voidaan ylijäänyt sähköenergia muuttaa vedyksi ja varastoida. Tarpeen tullen vety voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi polttokennon avulla. (Vartiainen 2020.)

Energiavarastoina käytettäviä akkuja voidaan ladata ja purkaa useita kertoja. Akun lataaminen ja purkautuminen tapahtuu kemiallisten reaktioiden avulla. (Alanen, Hukari, Koljonen & Saari 2003.)

Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin varastointiteknologioita, joita käytetään jo nyt tai on suunnitteilla käyttää sähköenergiajärjestelmän murroksen myötä.

4.1.1 Akkupohjainen energiavarasto

Akkupohjaiset energiavarastot ovat yleistymässä, koska niillä on tasapainoisesti haluttavia ominaisuuksia. Akkuvarastoja voi periaatteessa rakentaa mihin vain ja niiden vasteaika on hyvä kehittyneen tehoelektroniikan vuoksi. Akkua on käytetty energian varastoinnissa jo pitkään. Akku on sähkökemiallinen varasto, jossa sähköenergiaa voidaan varastoida ja purkaa kemiallisten reaktioiden avulla. Akkujen c-arvo kuvaa suurinta mahdollista lataus- ja purkutehoa kapasiteettiin suhteutettuna. Esimerkiksi jos akun c-arvo on kaksi ja sen energiasisältö on 100 kWh, niin tällöin akuston maksimiteho on 200 kW. Mitä korkeampi c-arvo on, sitä nopeammin akku voi purkaa kapasiteettinsa, mutta myös akun hinta on korkeampi. (Korpela 2018.)

Energiavarastoissa käytetään usein litium-ioniakkuja, koska niillä on korkea energiatiheys ja kyky kestää useita lataus- ja purkukertoja. Litium-ioniakun elinikää on haastava arvioida, koska akku voi ikääntyä ajan kuluessa passiivisten kemiallisten reaktioiden myötä. Lisäksi akun sisäisiä rakenteita kuluttaa syklinen ikääntyminen, mitä tapahtuu akun lataus- ja purkaussykliin myötä. Akkupohjaista energiavarastoa suunniteltaessa on tärkeää tietää tehoprofiili, jolla akkuja käytetään. Tällöin voidaan suunnitella järkevä eliniän tavoite akuille. Litium-ioniakustoon on aina sisällytettävä myös oma valvontajärjestelmä eli Battery Management System, joka seuraa akuston tilaa. (Korpela 2018.)

Akkupohjainen energiavarasto koostuu akkumoduuleista, jotka ovat yleensä kytkettynä sarjaan halutun jännitetason saavuttamiseksi. Sarjaankytkennän tarkoituksena on nostaa jännite korkeaksi, jotta tietty teho saadaan tuotettua pienemmällä virralla. Sarjaankytketyistä moduuleista rakentuvat akkuräkit, jotka ovat yleensä rinnankytkettyinä tasajännitekiskolla. Näin saadaan haluttu energia järjestelmään. Tasajännitekisko on kytkettynä verkkovaihtosuuntaajaan, joka muuntaa tasasähköä vaihtosähköksi. Jos halutaan isotehoisia varastoja, voidaan järjestelmiä liittää toisiinsa. (Merus Power n.d.)

4.1.2 Superkondensaattori ja vesivoima

UPM Energy on investoinut superkondensaattoriin, jota voidaan hyödyntää yhdessä vesivoiman kanssa energian varastointiin. Superkondensaattorin avulla vesivoimaloissa voidaan tuottaa enemmän ja nopeammin säätövoimaa. Superkondensaattorit purkavat nopeasti suuria määriä energiaa ja ne pystyvät reagoimaan todella nopeasti menettämättä varauskykyään. (UPM Energy 2021.)

Kyseisestä tekniikasta on mahdollisuus hyötyä reservimarkkinoilla. Energiamuroksen myötä on luotu nopea taajuusreservi FFR, joka vaatii osallistuvilta tuotteilta lyhyen vasteajan (Nortio 2019). Vesivoima ei itsessään pysty tarjoamaan riittävän lyhyttä vasteaikaa, joten vesivoiman ominaisuuksia on tutkittu uusien ratkaisujen kehittämiseksi. Superkondensaattorit yhdessä vesivoiman kanssa pystyvät saavuttamaan tarvittavan vasteajan, eikä superkondensaattoreilta vaadita

tässä tilanteessa suurta energiakapasiteettia, koska vesivoiman kanssa käytettynä, vesivarasto tarjoaa sen. (UPM Energy 2021). Superkondensaattorit kestävät yleensä miljoonia syklejä, ja tämän ominaisuuden vuoksi vesivoiman rinnalla käytetään juurikin superkondensaattoreita, eikä esimerkiksi akkuja. Akut kestävät yleensä muutamia tuhansia syklejä. (Alanen, Hukari, Koljonen & Saari 2003.)

4.1.3 Vety energiavarastona

Vetyä voidaan pitää energian varastoinnin ja siirtämisen välineenä. Vetyä valmistetaan fossiilisista polttoaineista ja sitä käytetään esimerkiksi ammoniakkin tuotannossa ja öljyn jalostuksessa. Fossiilisista tuotantotavoista ollaan kuitenkin pääsemässä eroon ja on tutkittu, että vetyä voidaan valmistaa myös uusiutuvista energialähteistä. Kehittyvä teknologia on veden elektrolyyttinen hajottaminen tuulesta ja auringosta saatavalla sähköenergialla vedyksi ja hapeksi. Elektrolyysin avulla vedyn tuottaminen on lähes päästötöntä. Vetyä voidaan hyödyntää teollisissa prosesseissa fossiilisten raaka-aineiden sijasta, tai sitä voidaan käyttää energiavarastona. (Lampila 2020.)

Vedyn kaksi keskeisintä energian varastoinnin ideaa ovat vedyn varastointi sähköntuotannon tarpeisiin, ja vedyn tuottaminen synteettisten hiilivety-polttoaineiden tuotantoon. Kun vetyä varastoidaan sähköntuotannon tarpeisiin, tarvitaan polttokennoa, jonka avulla vedystä voidaan muodostaa sähköenergiaa. Yleisesti tässä energiantuotannossa käytetään korkean lämpötilan polttokennoja, jotka mahdollistavat yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon. (Korpela 2018.) Kun vetyä tuotetaan synteettisten hiilivety-polttoaineiden tuotantoa varten, käytetään prosessissa jo ilmakehässä olevaa hiilidioksidia. Hiilivetyjä polttaessa ilmakehästä otettu hiilidioksidi palautuu polton jälkeen takaisin ilmakehään. Tämä tapa on ympäristön kannalta kestävä. (Neste n.d.)

Suomessa on Vaasaan rakennettu neljän toimijan (Wärtsilä, Vaasan Sähkö, EPV Energia ja Vaasan kaupunki) kesken Power-to-X-to-Power -järjestelmä, jossa X tarkoittaa vetyä tai muita e-polttoaineita (esimerkiksi synteettinen metaani, metanoli ja ammoniakki). Järjestelmän tehtävänä on tuottaa uusiutuvasta energiasta vetyä, jota varastoidaan ja jatkojalostetaan. Vedyn valmistuksella ja varastoinnilla

voidaan hyödyntää sääriippuvaisen energiantuotannon ylijäämä. Vedyn tuotannossa syntyy lämpöä, joka varastoidaan esimerkiksi kallioluolalämpövarastoon. (Wärtsilä Finland Oy 2021)

4.2 Energiavarastot osana sähköverkkoa

Energiavarastoilla on merkittäviä tehtäviä sähköenergiajärjestelmässä. Energiavarastot voivat pitää huolta sähköverkon tehotasapainosta, varastoimalla ja tuottamalla energiaa sähköverkon tarpeiden mukaan. Energiavarastoja voidaan käyttää myös sähköverkon jännitteen hallintaan suurien kuormitushuippujen aikana. Kuormitushuippujen aikana siirtoverkon impedanssi voi aiheuttaa jännitteen laskua ja tällöin energiavarasto voi syöttää sähköverkkoa. Lisäksi energiavarastoja voidaan käyttää huipputehon ja kuormien hallinnassa. (Alanen, Hukari, Koljonen & Saari 2003.)

Energiavarastoja voidaan rakentaa esimerkiksi isojen kiinteistöjen yhteyteen, jolloin kiinteistö saa energiaa tarpeisiinsa energiavarastosta ja tarvittaessa sähköverkosta. Energiavarastot voidaan liittää myös osaksi sähköverkkoa mikroverkon avulla, jolloin energiavarastosta voidaan tarvittaessa syöttää energiaa sähköverkkoon ja näin osallistua reservimarkkinoille. Tällaisia laajamittaisempia yksiköitä löytyy Suomestakin jo useita, joista yksi esimerkki on Lidlin jakelukeskus Järvenpäässä. (Sweco 2019.)

4.2.1 Energiavarastot reservimarkkinoilla

Suuret energiavarastot ovat tärkeässä asemassa tehotasapainon hallinnassa osallistuessaan reservimarkkinoille. Energiavarastoilla on nopea vasteaika, joten reservimarkkinoilla energiavarastot voivat osallistua nopeaan taajuusreserviin sekä taajuusohjattuun häiriöreserviin ja taajuusohjattuun käyttöreserviin (Fingrid Oyj, reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2022). Taajuusreserveissä energiavaraston toiminta perustuu siihen, että taajuuden noustessa energiavarastoon varastoituu energiaa ja taajuuden laskiessa varasto purkaa energiaa tarvittavan määrän, jotta tehotasapaino sähköverkossa saadaan säilymään.

4.2.2 Tekniset vaatimukset

Taajuusohjatuille reserveille osallistumiseen on tiettyjä vaatimuksia. Osallistuvilla kohteilla on oltava riittävä staattinen ja dynaaminen suorituskyky. Lisäksi niiden on oltava tarpeeksi vakaita, etteivät ne horjuta sähköenergiajärjestelmää. Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ovat uusimassa taajuusohjattujen reservien teknisiä vaatimuksia pilottivaiheen säätökokeiden avulla. (Fingrid Oyj, Taajuusohjattujen reservien uusien teknisten vaatimusten pilotti 2021).

Reservimarkkinoille osallistuessa täytetään hakemus, jossa on oltava vähintään hakemuskirje, kuvaus tarjottavasta kokonaisuudesta, kuvaus siitä, miten tuote pystyy vastaamaan taajuuden muutoksiin ja testidataa, joka tukee tuotteen toimintaa ja vakautta. Pyydettyä tulee myös esittää reaaliaikaista dataa tuotteen suorituskyvystä ja tarkkuudesta. Lisäksi tarjottavalle kohteelle on oma lista teknisiä vaatimuksia. Jos tarjottava kohde on energiavarasto, täytyy hakemuksessa ilmetä seuraava lista teknisiä vaatimuksia,

- Energiavaraston nimellinen näennäisteho (MVA)
- Energiavaraston nimellinen energiakapasiteetti (MWh)
- Energiavaraston kapasiteetin ylä- ja alarajat (MWh)
- Säätimen tekninen kuvaus ja säätimen asetukset
- Energiahallinnan kuvaus
(ENTSO-E 2022).

4.2.3 Reservilain uudistuminen

Hallitus on esittänyt eduskunnalle lain muutosta koskien sähköntuotannon ja –kulutuksen välistä tehotasapainoa varmistavaa tehoreserviä. Reserviä on aikaisemmin hankittu 2-3 vuoden jaksoissa. Uudistuksen myötä reservin tarpeen ja määrän arviointi tapahtuisi useammin, vähintään kahden vuoden välein ja kapasiteetin hankinta tapahtuisi vuosittain. Tehoreserviin ovat osallistuneet voimalaitokset ja kulutusjousto kykenevät kohteet. Esityksen mukaan tehoreserviin voisi osallistua edellä mainittujen lisäksi myös erilaiset energiavarastot sekä va-

rastoinnin ja tuotannon yhdistelmät eli aggregointi. Aggregoinnin avulla reservimarkkinoille on mahdollista osallistua pienemmälläkin kapasiteetilla. Aggregaattori kerää pienemmistä yksiköistä suuremman kokonaisuuden, joka osallistuu reservimarkkinoille. Lisäksi reservimarkkinoille osallistumisen teknisiä vaatimuksia muokattaisiin siten, että markkinoille voisi osallistua pienemmällä tarjouskoolla, eli tarjouskoko laskisi 10 MW:sta 1 MW:iin. Näiden muutosten lisäksi on esitetty, että Ruotsissa, Virossa ja Ahvenanmaalla sijaitsevat kohteet voisivat tarvittaessa osallistua reserviin. Muutoksien koetaan lisäävän kilpailua reservien hankinnassa ja näin ollen pienentävän reservijärjestelmän kustannuksia. (Finlex 2021.)

Energiavarastoilta on vaadittu suurta kokoluokkaa, jotta ne voivat osallistua reservimarkkinoille. Lakiesitys tukee energiavarastoiden osallistumista reservimarkkinoille myös pienemmässä kokoluokassa. Tämä varmasti edesauttaa uusien energiavarastojen rakentamisessa, koska energiavarastojen taloudellinen kannattavuus tulee suurilta osin reservimarkkinoiden avulla.

5 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä luotiin katsaus energiamurroksen aiheuttamiin sähköenergiajärjestelmän haasteisiin ja mahdollisiin ratkaisuihin, jotta sähköenergiajärjestelmä säilyisi toimintavarmana sääriippuvaisen energiantuotannon lisääntyessä.

Työssä perehdyttiin Fingridin ylläpitämiin reservimarkkinoihin ja reservituotteisiin. Reservituotteiden avulla tehotasapainoa voidaan hallita aina jokaisen käyttötunnin aikana. Reservituotteita on erilaisiin tarkoituksiin ja nopea taajuusreservi FFR on luotu juurikin energiamurroksen myötä, kun sähköverkon inertia on vähentynyt.

Energian varastoinnin osuus tulee kasvamaan energiamurroksen myötä ja energiavarastot nähdään yhtenä vaihtoehtona tehotasapainon hallintaan. Sähköenergiajärjestelmässä energiavarastoilla on useita tehtäviä, mutta tämän työn kannalta oleellisin tehtävä oli tehotasapainon hallinta reservinä toimimisen kautta.

Työssä käsiteltiin energiavarastojen teknisiä vaatimuksia osallistuessaan reservimarkkinoille. Reservimarkkinoille osallistuessa energiavarastoilta vaaditaan usein suurta tarjouskoko (10 MW), mutta aggregoinnin avulla pienempiä energiavarastoja voidaan yhdistää isoimmiksi kokonaisuuksiksi. Lisäksi vireillä oleva reservilain uudistuminen edesauttaa pienemmänkin kokoluokan energiavarastojen osallistumista reservimarkkinoille. Näin ollen energiavarastojen hyödyntämisen kynnyksen pienenee ja yhä useampi energiavarasto voi osallistua reservimarkkinoille.

Opinnäytetyön myötä perehdyin kattavasti aiheeseen erilaisten lähteiden avulla. Kyseinen aihe on kokonaisuudessaan varsin uusi ja lähteitä oli välillä haastavaa löytää. Tämä opinnäytetyö auttaa ymmärtämään tehotasapainon tärkeyden, jotta jatkossakin sääriippuvaisten energiamuotojen lisääntyessä sähköenergiajärjestelmä pystyy tarjoamaan luotettavasti sähköenergiaa. Tulevaisuudessa energiavarastojen rooli sähköverkossa tulee varmasti kasvamaan entistä enemmän ja jatkuvasti kehittyvä teknologia mahdollistaa tämän.

LÄHTEET

Alanen R., Hukari S., Koljonen T. & Saari P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT. Verkkodokumentti. Luettu 16.4.2022.

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Brink P. 2021. Pohjoismainen tasehallintahanke etenee. Fingrid-lehti. Uutinen 1.9.2021. Luettu 16.4.2022.

<https://www.fingridlehti.fi/pohjoismainen-tasehallintahanke-etenee/>

Energiateollisuus. n.d. Säättövoima -säädetävää sähköntuotantoa. Luettu 7.5.2022.

<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>

ENTSO-E. 2022. Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area. Verkkodokumentti. 14.3.2022. Luettu 16.4.2022.

<https://www.epressi.com/media/userfiles/107305/1647329844/fcr-technical-requirements-14.03.2022.pdf>

Fidelix. n.d. Kysyntäjousto. Luettu 24.3.2022.

<https://www.fidelix.fi/kysyntajousto/>

Fingrid Oyj. n.d. Kysyntäjousto. Luettu 24.3.2022.

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/pilottihankkeita/kysyntajousto/>

Fingrid Oyj. 2021. Taajuusohjattujen reservien uusien teknisten vaatimusten pilotti. Webinaarikalvot. 19.4.2021. Luettu 18.4.2022.

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/pilottivaiheen-webinaarikalvot-19.4.2021.pdf>

Fingrid Oyj. n.d. Tasepalvelut. Luettu 18.4.2022.

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/>

Fingrid Oyj. 2020. Säättö sähkömarkkinoiden aggregointipilotti. Pilottihanke. Luettu 16.4.2022.

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/pilottihankkeita/saatosahkomarkkinoiden-aggregointipilotti/>

Fingrid Oyj. n.d. Kuinka osallistua reservimarkkinoille. Luettu 16.4.2022.

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>

Fingrid Oyj. 2022. Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Julkinen esitysmateriaali. 3.3.2022. Luettu 16.4.2022.

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

Fingrid Oyj. n.d. Reservimarkkinat. Luettu 18.2.2022.

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Finlex. 2021. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi sähköntuotannon ja -kulutuksen välistä tasapainoa varmistavasta tehoreservistä annetun lain muuttamisesta. Dokumentti. Luettu 10.4.2022.

<https://finlex.fi/fi/esitykset/he/2021/20210199>

Fortum. n.d. Mikä ihmeen energiamurros? Luettu 15.12.2021.

<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutishuone/tietopakettit-medialle/mika-ihmeen-energiaturros>

Hildén M. & Kivimaa P. 2020. Energy Governance in Finland. In: Knodt M., Kemmerzell J. (eds) Handbook of Energy Governance in Europe. Springer, Cham. Online ISBN 978-3-319-73526-9.

Ihamäki L. & Sonkeri H. 2021. Fingrid ja reservit -keskustelu. Video.

<https://www.youtube.com/watch?v=W6RpvDtOP4s>

Jantunen P. 2018. Miksi metsäenergia lasketaan nollapäästöiseksi? Uutta voimaa -blogi. Blogikirjoitus. 26.11.2018. Luettu 7.5.2022.

<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2018/nollapaastoisyys>

Kauhaniemi K., Haalalainen T., Nyberg J., Voima S. & Hänninen S. 2008. Tuuliverkko loppuraportti. Luettu 3.5.2022.

https://www.merinoiva.fi/wp-content/uploads/2016/10/tuuliverkko_loppuraportti_307.pdf

Korpela, A. 2018. Suuren kokoluokan energianvarastointitekniologioiden tekniset taloudelliset näkymät. Tampereen ammattikorkeakoulu. Julkaisu. <https://julkaisut.tamk.fi/PDF-tiedostot-web/B/113-Suuren-kokoluokan-energiavarastointitekniologioiden-teknis-taloudelliset-nakymat.pdf>

Korpela, A. 2017. Sähköenergiajärjestelmän murros - Paljon muutakin kuin fossiilisen korvaamista uusiutuvalla. Sähkö & Tele: sähkötekniikan ja elektroniikan teknistieteellinen ammattilehti, 91:2, 32-33.

Lampila J. 2018. Energiatalous. Pumppuvoimala on hyvä ja tehokas sähkövarasto. Artikkel. 25.10.2018. Luettu 8.4.2022.

<https://www.energiatalous.fi/?p=2210>

Lampila J. 2020. Energiatalous. Vety kestävä kehityksen ytimeen vuonna 2020. Artikkel. 31.12.2020. Luettu 8.4.2022.

<https://www.energiatalous.fi/?p=2630>

Lehto I. n.d. Tuntimittausta ja etäluentaa. Energiateollisuus. Luettu 18.4.2022.

https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_mittaus

Leinonen P. 2018. Mitä on inertia? Fingrid-lehti. Uutinen. 11.9.2018. Luettu 16.4.2022.

<https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>

Lin Y., Eto J., Johnson B., Flicker J., Lasseter R., Villegas Pico H., Seo G., Pierre B. & Ellis A. 2020. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters. Tutkimus. Luettu 18.3.2022.

<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>

Merus Power. n.d. Merus™ Energy Storage System (ESS). Luettu 10.4.2022.

<https://www.meruspower.fi/products/ess/>

Moseley P. & Garche J. 2014. Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing. Elsevier. ProQuest Ebook Central.

Motiva. 2021. Uusiutuva energia. Luettu 19.1.2022.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia

Motiva. 2021. Tuulivoima. Luettu 19.1.2022.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima

Motiva. 2022. Aurinkosähkö. Luettu 19.1.2022.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko

Muyeen, S. 2012. Wind Energy Conversion Systems. Springer London.

Neste. n.d. Power-to-X: polttoaineita vedestä ja hiilidioksidista. Luettu 17.5.2022.

<https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/tuotteet/raaka-aineet/tulevaisuuden-raaka-aineet/vesi-ja-hiilidioksidi>

Nortio J. 2019. Nopea taajuusreservi reagoi pieneen inertiaan. Fingrid-lehti. Uutinen. 13.9.2019. Luettu 18.4.2022.

<https://www.fingridlehti.fi/nopea-taajuusreservi/>

Roques F., Le Thieis Y., Aue G., Spodniak P., Pugliese G., Cail S., Peffen A., Honkapuro S. & Sihvonen V. 2021. Enabling cost-efficient electrification in Finland. Sitra. Laaja selvitys. 28.9.2021. ISBN (PDF) 978-952-347-237-2. ISSN (PDF) 1796-7112.

Sweco. 2019. Lidlin jakelukeskuksessa toimii Suomen tehokkain kiinteistön oma energiavarasto ja mikroverkko. Uutinen. 5.2.2019. Luettu 16.4.2022.

<https://www.sweco.fi/ajankohtaista/uutiset/lidlin-jakelukeskuksessa-toimii-suomen-tehokkain-kiinteiston-oma-energiavarasto-ja-mikroverkko/>

UPM Energy. 2021. UPM Energy investoi innovatiiviseen ultrakondensaattoriin, joka mahdollistaa suuremman määrän uusiutuvaa energiaa sähköverkossa. Tiedote. 19.9.2021. Luettu 8.4.2022.

<https://www.upm.com/fi/tietoa-meista/medialle/tiedotteet/2021/09/upm-energy-investoi-innovatiiviseen-ultrakondensaattoriin-joka-mahdollistaa-suuremman-maaran-uusiutuvaa-energiaa-sahkoverkossa/>

Vartiainen E. 2020. Fortum. Vetytalous tulee - ennemmin tai myöhemmin. Blogikirjoitus. 4.9.2020. Luettu 8.4.2022.

<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Vattenfall. 2015. Tämän päivän ja tulevaisuuden energialähteet. Artikkel. Päivitetty 7.7.2021. Luettu 7.5.2022.

<https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/taman-paivan-ja-tulevaisuuden-energialah-teet>

Wärtsilä Finland Oy. 2021. Vaasalaistoimijat aikovat tuottaa tuulesta vetyä ja vedystä sähköä. Paikallinen tiedote. 15.1.2021. Luettu 8.4.2022.

<https://www.wartsila.com/fin/paikallisuutinen/15-01-2021-vaasalaistoimijat-aikovat-tuottaa-tuulesta-vetya-ja-vedysta-sahkoa>

Ympäristöministeriö. n.d. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Hiilineutraali Suomi 2035. Luettu 19.12.2022.

<https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>