



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KATSAUS SÄÄTÖSÄHKÖTEKNOLOGIOIHIN

Matias Kiviniemi

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Helmikuu 2023

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Kiviniemi, Matias		Työn ohjaaja yliopistolla Pongrácz E, professori	
Työn nimi Katsaus säätösähköteknologioihin			
Opintosuunta Energia- ja ympäristötekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Helmikuu 2023	Sivumäärä 57
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tulevaisuus asettaa monia haasteita sähköjärjestelmän toiminnalle niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Yhteiskunnan kasvava sähkönkulutus lisää kuormitusta sähköntuotannolle, ja uusia tuotantolaitoksia tarvitaan koko ajan lisää. Tuotettavan sähkön tulisi kuitenkin olla mahdollisimman ympäristöystävällistä ja puhdasta, mikä lisää sähköjärjestelmän haasteita entisestään, sillä uusiutuvien energianlähteiden avulla tuotettava sähkö on altis säätötilan muutoksille. Näin ollen sähkön tuotanto ei ole tasaista, ja tuotettavan sähkön määrää on vaikeampaa arvioida perinteisiin sähkön tuotantomuotoihin verrattuna.</p> <p>Sähköjärjestelmän toiminnan kannalta on kuitenkin hyvin tärkeää, että sähkön kysyntä ja tarjonta vastaisivat toisiaan mahdollisimman tarkasti. Ideaalitulanteessa sähköä tuotetaan täsmälleen saman verran kuin sitä kulutetaan, mutta todellisuudessa tällainen tilanne ei toteudu. Säätösähkön avulla pyritään reagoimaan sähkön tuotannon ja kulutuksen vaihteluihin ja ylläpitämään näiden välistä tasapainoa. Suomen sähköjärjestelmä käyttää erilaisia säätösähköteknologioita, joita käytetään sen mukaan, kuinka suuri tarve säädölle on.</p> <p>Työssä tarkastellaan Suomessa käytössä olevia säätösähköteknologioita. Suomen sähköverkko toimii osana yhteispohjoismaista synkronijärjestelmää, joka puolestaan liittyy muihin Euroopan alueella toimiviin vastaaviin järjestelmiin. Työssä tarkastellaan myös pohjoismaiden sähköntuotantoa ja tilannetta Euroopassa suurempana kokonaisuutena. Älykkäät energiajärjestelmät tulevat olemaan yhä suuremmassa roolissa yhteiskunnan eri teknisissä infrastruktuureissa, joten työssä pohditaan myös tulevaisuuden älykkäiden sähkö- ja energiajärjestelmien vaikutusta säätösähköä silmällä pitäen.</p> <p>Sähköntuotannossa Suomessa ollaan menossa kohti puhtaampaa ja päästöttömämpää tulevaisuutta. Esimerkiksi tuulivoimaan tullaan investoimaan paljon, ja ydinvoimankin kapasiteetti kasvaa lähitulevaisuudessa. Ympäristön kannalta tämä on erinomainen asia, mutta varsinkin tuulivoiman lisääminen kasvattaa säätösähkön tarvetta. Vesivoima tulee olemaan jatkossakin käytetyin kotimainen säätösähköteknologia sen nopean säätökyvyn ansiosta. Suomessa on kuitenkin käytetty jo suurin osa vesivoimapotentialista, ja uusia, varsinkaan suuria voimalaitoksia tuskin tullaan rakentamaan, sillä vesivoimalaitoksen ympäristövaikutukset ovat mittavat. Niinpä vesivoiman lisäämiseksi olemassa olevia voimalaitoksia täytyy päivittää uudenpien ja tehokkaampien teknologioiden pariin. Myös pumppuvoimalaitokset voivat tulevaisuudessa tarjota ympäristöystävällistä ja puhdasta energiaa sähköjärjestelmän säätötarpeisiin.</p> <p>Vesivoiman lisäksi tarvitaan myös muita toimia, jotta sähköjärjestelmän säätökyky säilyy riittävänä. Älykkäät sähkö- ja energiajärjestelmät yhdessä kysyntäjoustop kanssa tulevat mahdollistamaan sähköjärjestelmän tehokkaamman ja joustavamman käytön. Kun sähköjärjestelmän kysyntäpiikkejä voidaan siirtää tai pienentää, vähenee säätösähkön tarve. Myös pohjoismaiden välisten sähköyhteyksien merkitys korostuu, sillä Suomen lisäksi muita pohjoismaita ja Eurooppaa ajaa samat ilmastotavoitteet. Pohjoismaissa sähköntuotannon rakenne on maiden välillä hyvinkin erilainen, joten on tärkeää, että tarpeen vaatiessa säätömahdollisuuksia on saatavilla kotimaisten ratkaisujen lisäksi.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Process Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Kiviniemi, Matias		Thesis Supervisor Pongrácz E, professor	
Title of Thesis Overview of balancing energy technologies			
Major Subject Energy and Environment Engineering	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date February 2023	Number of Pages 57
Abstract <p>The future poses many challenges to the operation of the power system in Finland, world-wide. Society's growing power demand increases pressure on electricity production, and new production facilities are needed. However, the electricity produced should be as environmentally friendly and clean as possible, which increases the challenges of the power system even more, because the electricity produced with the aid of renewable energy sources is weather-dependent. Consequently, electricity production is not uniform, and it is more difficult to estimate the amount of electricity produced compared to traditional forms of electricity production.</p> <p>In terms of the operation of the power system, it is very important that the demand and supply of electricity is matched as closely as possible. In an ideal situation, exactly the same amount of electricity should be produced, as it is consumed. In reality, such situation rarely happens due to the fluctuating nature of both consumption and variable energy generation. With the help of balancing power, the aim is to react to these fluctuations in electricity production and consumption and to maintain the balance between them. The Finnish power system uses different balancing power technologies, which are used depending on how great the need for control is and how short the reaction time must be.</p> <p>The thesis examines the balancing power technologies used in Finland. Finland's electricity network operates as part of the Nordic synchronous system, which in turn is connected to other similar systems operating in Europe. The work also examines electricity production in the Nordic countries and the situation in Europe as a larger entity. Smart energy systems will play an increasingly important role in society's various technical infrastructures, therefore the work also considers the impact of smart energy technologies of the future with regard to balancing power.</p> <p>Electricity production in Finland is heading towards a cleaner and emission-free future. For example, there will be a lot of investment in wind power, and the capacity of nuclear power will also increase in the near future. From an environmental point of view, this is excellent, however, especially higher share of wind power increases the need for balancing power. Hydropower will continue to be the most used domestic balancing power technology thanks to its fast control capability. However, most of the hydropower potential has already been used in Finland, and new, especially large, power plants will hardly be built, because the environmental impacts of a hydropower plant are considerable. Therefore, in order to increase hydropower, existing power plants must be updated with newer and more efficient technologies. In the future, pumped-storage-hydro-power plants can also offer environmentally friendly and clean energy for balancing the power system.</p> <p>In addition to hydropower, other measures are also needed to maintain sufficient controllability of the power system. Smart energy systems together with demand response will enable more efficient and flexible power use. During peak power, electricity consumption can be shifted or reduced, which will reduce the need for balancing power. The importance of electricity connections between the Nordic countries is also emphasized, because other European countries are also driven by the same climate goals. In the Nordic countries, the composition of electricity production is varies between countries, so it is important that cross-border balancing possibilities are available in addition to domestic solutions.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO	6
2 SUOMEN SÄHKÖVERKKO	8
3 SÄÄTÖSÄHKÖ.....	10
3.1 Sähköverkon taajuus	10
3.2 Reservit	11
3.2.1 Taajuuden vakautusreservit	11
3.2.2 Nopea taajuusreservi.....	11
3.2.3 Taajuuden palautusreservit	12
3.2.4 Korvaavat reservit.....	12
3.2.5 Tehoreservi	13
4 SÄÄTÖSÄHKÖ SUOMESSA	14
4.1 Vesivoima	14
4.1.1 Vesivoiman säätöominaisuudet	15
4.2 Lauhdevoima.....	18
4.2.1 Lauhdevoiman säätöominaisuudet.....	18
4.3 Varavoimailaitokset	19
4.3.1 Fingridin omat varavoimailaitokset	20
4.3.2 Käyttöoikeussopimusvoimailaitokset	21
4.3.3 Tehoreservin voimailaitokset.....	21
4.4 Tuontisähkö.....	21
4.4.1 Pohjoismaat ja Viro	23
5 SÄHKÖMARKKINAT	25
5.1 Sähkön tukkumarkkinat	25
5.2 Sähkön vähittäismarkkinat	27
5.3 Säättösähkömarkkinat	28
5.3.1 Säättökapasiteettimarkkinat	28
6 SÄÄTÖSÄHKÖ POHJOISMAISSA	30
6.1 Norja.....	30
6.2 Ruotsi	32
6.3 Tanska	33
7 SÄÄTÖSÄHKÖN TULEVAISUUS SUOMESSA.....	35
7.1 Vesivoima	35

7.1.1 Vesivoiman hyödyt ja haitat	35
7.1.2 Pienvesivoima.....	36
7.1.3 Pumppuvoimalaitos	37
7.2 Tuulivoima	37
7.3 Älykkäät energiajärjestelmät.....	38
7.3.1 Älykäs sähköverkko.....	39
7.3.2 Kysyntäjousto	40
8 POHDINTA	43
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
10 YHTEENVETO	47
11 LÄHDELUETTELO.....	49

1 JOHDANTO

Nykyinen sähköjärjestelmämme on murrosvaiheessa. Tulevaisuudessa sähkön kulutus tulee lisääntymään niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Kasvavaa kysyntää varten joudutaan investoimaan uusiin tuotantolaitoksiin, jotta sähkön tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino säilyy. Lisääntyvän sähkön kulutuksen lisäksi tulevaisuudessa pyritään kohti puhtaampaa ja päästöttömämpää yhteiskuntaa. Euroopan unioni pyrkii ilmastopolitiikallaan vaikuttamaan globaaliin ilmastonmuutokseen, ja näin ollen Euroopassa tullaan investoimaan uusiutuviin energianlähteisiin ja hiilidioksidineutraaleihin tuotantomuotoihin sähköntuotannossa. Vanhat, fossiilisilla polttoaineilla toimivat tuotantolaitokset ovat hiljalleen jäämässä pois käytöstä tai päivittymässä nykyaikaisempien teknologioiden pariin. Vaikka tämä on ympäristön kannalta merkittävä edistysaskel, uusiutuvien energianlähteiden käyttö aiheuttaa haasteita sähköjärjestelmän toiminnalle niiden haasteellisen ennustettavuuden takia.

Sähköjärjestelmälle aiheutuu haasteita lisääntyvän sähkön kulutuksen lisäksi myös yhteiskunnan uudenlaisista tavoista käyttää sähköä. Monet yhteiskunnan infrastruktuurit sähköistyvät, ja älykkäitä energiapuolitoimia ja niiden välillä toimivia älykkäitä sähköverkoja alkaa olla jo käytössä. Myös kuluttajilla, niin yksittäisillä kotitalouksilla, julkisilla palveluntarjoajilla kuin teollisuuden yrityksillä on tulevaisuudessa paremmat mahdollisuudet osallistua sähköjärjestelmän toimintaan. Oma sähkön kulutusta on aiempaa helpompaa seurata, ja näin ollen kuluttajilla on esimerkiksi paremmat mahdollisuudet reagoida sähköpörssin kautta käyttämänsä sähkön hintaan.

Suomen sähköjärjestelmä on tällä hetkellä myös riippuvainen tuontisähköstä. Noin viidesosa Suomen kuluttamasta sähköstä on peräisin naapurimaistamme. Sähköä joudutaan ostamaan etenkin suurten kysyntäpiikkien aikana, kuten talvella kovien pakkasten aikana. Suomen sähköjärjestelmän toiminnan kannalta olisi järkevää, että Suomi pääsisi kohti omavaraisempaa sähköntuotantoa.

Kun kaikki nämä sähköjärjestelmää kuormittavat seikat otetaan huomioon, voidaan todeta, että Suomen sähköjärjestelmä on suurten haasteiden äärellä. Sähköjärjestelmän ensisijainen tehtävä on ylläpitää sähkön häiriötön kulku tuottajien ja kuluttajien välillä.

Tämä tarkoittaa sitä, että sähkön tuotannon pitäisi pystyä vastaamaan mahdollisimman tarkasti sähkön kulutukseen. Täydellinen tasapainotila näiden välillä olisi tietenkin sähköjärjestelmän kannalta kaikista paras tilanne, mutta tällainen tilanne ei tietenkään ole mahdollinen. Niinpä sähköjärjestelmällä täytyy olla käytössään menetelmiä sellaisten tilanteiden varalle, joissa sähköjärjestelmän tasapainotilan vakaus on uhattuna. Tällaisten tilanteiden varalle Suomen sähköjärjestelmä turvaa erilaisiin säätösähköteknologioihin, joiden avulla pystytään reagoimaan tuotannon ja kysynnän vaihteluihin ja ylläpitämään sähköjärjestelmän häiriötöntä toimintaa.

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan Suomessa käytössä olevia säätösähköteknologioita, sekä pohditaan niiden roolia tulevaisuuden sähkö- ja energiajärjestelmissä. Tällä hetkellä Suomessa käytetään säätösähkön tuotannossa sekä uusiutuvaa energiaa että fossiilisten polttoaineiden avulla saatavaa energiaa, joten voidaan jo arvioida, että tulevaisuudessa myös säätösähkön tuotannossa tullaan menemään kohti ympäristöystävällisempiä ratkaisuja.

Työssä tehdään myös katsaus muiden pohjoismaiden tilanteeseen. Pohjoismaiden omat sähköjärjestelmät muodostavat yhteispohjoismaisen synkronijärjestelmän, jonka avulla sähköä voidaan siirtää yli maiden rajojen tasapainottamaan sekä sähkön hintoja, mutta myös sähköverkon tasapainotilaa. Sähkön vienti ja tuonti ovat siis tärkeässä roolissa pohjoismaiden sähköjärjestelmien toimivuuden kannalta. Samat sähköjärjestelmän haasteet koskevat Suomen ja pohjoismaiden lisäksi muutakin Eurooppaa.

Tulevaisuudessa sähkön käyttöä ohjaa yhä enemmän älykkäät energiajärjestelmät älykkäiden teknologioiden avulla, jotka luovat uusia mahdollisuuksia säätösähkön käyttöä ajatellen. Työssä pohditaan lisäksi myös älykkäiden energiajärjestelmien sekä kulutusjoustopuolelta tulevaisuuden säätösähkön tarvetta ajatellen.

Tutkimuskysymykset, joihin tässä työssä pyritään vastaamaan, ovat seuraavat:

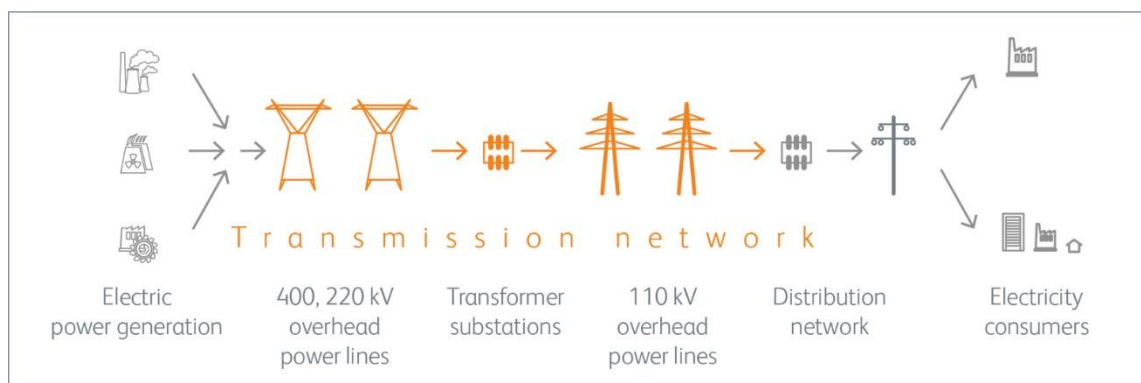
Mikä on säätösähköteknologioiden nykytila Suomessa?

Mitkä ovat säätösähköteknologioiden haasteet tulevaisuudessa?

2 SUOMEN SÄHKÖVERKKO

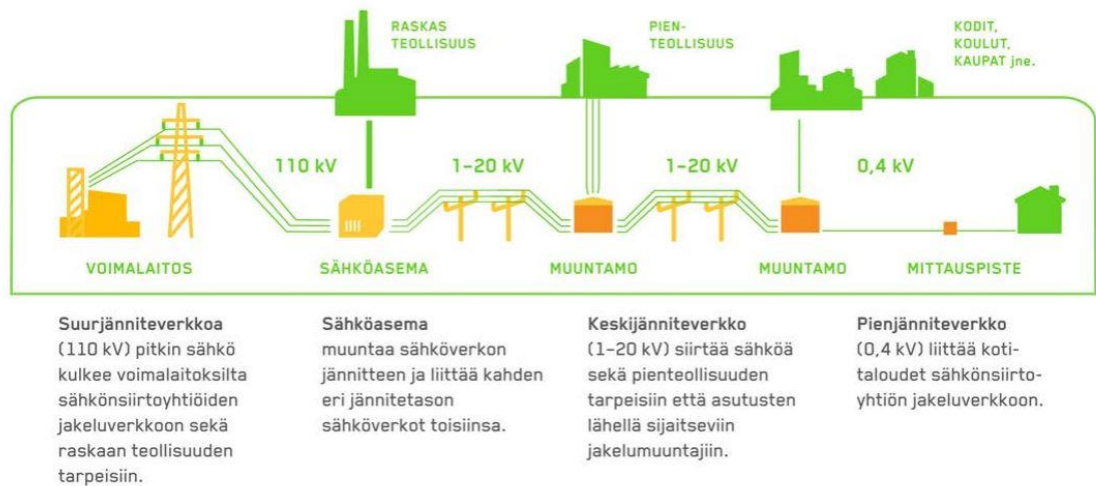
Suomen sähköjärjestelmä koostuu sähkön tuottajien, sähkön siirtoverkon ja sähkön kuluttajien muodostamasta kokonaisuudesta. Sähkön tuotannosta vastaa noin 120 sähköä tuottavaa energia-alan yritystä ja noin 400 voimalaitosta, ja tämän lisäksi Suomeen tuodaan sähköä ulkomailta (Energiateollisuus 2023d). Sähköntuotannon energianlähteistä tärkeimpiä ovat ydinenergia, vesivoima, biomassa ja tuulivoima (Energiateollisuus 2023a).

Suomen sähkösiirtoverkko koostuu kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista ja pienemmistä, alueellisista jakeluverkoista. Suomessa kantaverkkoa hallitsee ja ylläpitää Fingrid Oyj, joka toimii Suomen sähköjärjestelmän järjestelmävastaavana. Kantaverkko toimii Suomen runkoverkkona, johon voimalaitokset, suuret teollisuuden tuotantolaitokset ja alueelliset jakeluverkot ovat liitettyinä. Kantaverkko muodostuu kuvan 1 mukaisesti 110, 220 ja 400 kV voimajohdoista. Lisäksi Suomessa kantaverkon yhteyteen kuuluu 116 sähköasemaa (Fingrid 2023k).



Kuva 1. Sähkösiirtoverkon rakenne (Eles 2016).

Suurjännitteiset jakeluverkot toimivat kantaverkon ja matalajännitteisempien jakeluverkkojen välissä. Näitä toimijoita on Suomessa alle kymmenen, ja ne siirtävät sähköä 110 kV jännitteellä. Jakeluverkot puolestaan toimivat 20, 10, 1 tai 0,4 kV jännitteellä. Näiden jakeluverkkojen toiminnasta vastaa noin 80 sähköverkkoyhtiötä (Energiateollisuus 2023e). Kuva 2 havainnollistaa sähkönjakeluverkon rakennetta. Esimerkiksi kotitaloudet ovat liitettyinä pienijännitteisiin jakeluverkkoihin, kun taas pienteollisuus voi hyödyntää keskijänniteverkkoa.



Kuva 2. Sähkönsiirtoverkon jakeluverkko (Caruna 2017).

3 SÄÄTÖSÄHKÖ

Sähköjärjestelmän toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että sähkön tuotanto vastaa mahdollisimman tarkasti sähkön kulutusta. Sähkön tuotanto ja kulutus pyritään suunnittelemaan mahdollisimman tarkasti etukäteen, sillä sähkön varastointi suuressa mittakaavassa on edelleen haasteellista. Ideaalitulanteessa sähköä tuotetaan juuri sen verran kuin sitä kulutetaan, mutta mahdollisiin häiriöihin sähkön tuotannossa on varauduttava.

Tulevaisuudessa sähköä tuotetaan yhä enemmän uusiutuvien luonnonvarojen, kuten tuuli- ja aurinkoenergian avulla (Eurooppa-neuvosto 2023). Nämä energiamuodot ovat kuitenkin alttiita säätilojen vaihteluille, joka aiheuttaa haasteita sähköjärjestelmän toiminnalle. Sähkön tuotanto täytyy turvata sellaisten tilanteiden varalle, joissa näitä energiamuotoja ei voida hyödyntää niiden täydellä kapasiteetilla tai lainkaan. Voimalaitoksissa tapahtuvat häiriöt voivat aiheuttaa myös ongelmia, jos ne täytyy esimerkiksi hetkellisesti irrottaa sähköverkosta. Lisää kuormitusta sähköjärjestelmälle antaa lisäksi kovaa vauhtia sähköistyvä yhteiskunta, joka käyttää yhä enemmän sähköä esimerkiksi sähköautojen lataamiseen. Sähkön kysyntä kasvaa kiihtyvällä tahdilla, ja tuotannon on pystyttävä tähän vastaamaan. Säätosähkön avulla pyritään reagoimaan sähkön tuotannon ja kulutuksen vaihteluihin ja ylläpitämään näiden välistä tasapainoa (Energieateollisuus 2023f).

3.1 Sähköverkon taajuus

Euroopassa sähköverkon taajuuden nimellisarvoksi on asetettu 50 Hz. Tämän taajuuden sallitaan poikkeavan 0,1 Hz tasapainotilastaan, jolloin sallittu taajuuden vaihteluväli on 49,9–50,1 Hz. Taajuuden muutoksiin pyritään reagoimaan mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti. Mikäli taajuus uhkaa tippua alle sallitun vaihteluvälin, eli sähkön kulutusta on enemmän kuin sen tuotantoa, suoritetaan ylössäätö, jolloin tuotantoa kasvatetaan tai kulutusta vähennetään. Vastaavasti, jos taajuus nousee liian suureksi, esimerkiksi liian suuren tuotannon ansiosta, suoritetaan alassäätö, jolloin tuotantoa vähennetään tai kulutusta kasvatetaan (Fingrid 2018e).

3.2 Reservit

Sähköjärjestelmän taajuuden tasapainotilan ylläpitämistä varten pohjoismaisen sähköjärjestelmän järjestelmävastaavien kesken on laadittu käyttösopimus. Ylläpito tapahtuu automaattisten ja manuaalisten reservien avulla. Nämä reservit voidaan jakaa käyttöperiaatteidensa puolesta kolmeen eri kategoriaan: taajuuden vakautusreserveihin, palautusreserveihin ja korvaaviin reserveihin. Lisäksi Suomessa on käytössä lakiin perustuva tehoreservijärjestelmä, joka turvaa etenkin talvikuukausina häiriötöntä sähköntuotantoa (Fingrid 2023j).

3.2.1 Taajuuden vakautusreservit

Normaalitilan vakautta ylläpitävää taajuudensäätöä varten on muodostettu automaattisesti toimiva taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N), jonka suuruuden tulee olla yhteensä 600 MW verran. Tämä käyttöreservi on pohjoismaisen sähköjärjestelmän yhteinen, ja sen suuruus eri maiden kesken määräytyy maan käyttämän vuosienergian mukaan. Suomen osuus vuodelle 2023 on 121 MW (Fingrid 2023j). Taajuusohjatun käyttöreservin tulee aktivoitua minimissään kolmen minuutin aikana, säädön vähimmäiskoon ollessa 0,1 MW (Fingrid 2023m).

Toisena taajuuden vakautusreservinä käytetään taajuusohjattua häiriöreserviä (FCR-D), joka toimii myös automaattisesti. Sitä ylläpidetään sen verran, että sähköjärjestelmä kestää suuren tuotantoyksikön irtoamisen verkosta ilman, että pysyvä taajuuspoikkeama on suurempi kuin 0,5 Hz. Pohjoismaisen sähköjärjestelmän vaatima häiriöreservi määritetään viikoittain, ja se vastaa järjestelmän suurimman yksittäisen vian yhteydessä irtoavaa tuotantoa (Fingrid 2023m). Taajuusohjattua häiriöreserviä ylläpidetään noin 1400 MW edestä, ylössäädön enimmäistarpeen ollessa 1450 MW ja alassäädön 1400 MW. Suomen osuus taajuusohjatun häiriöreservin kapasiteetista vuodelle 2023 on noin 290 MW ylössäädölle ja 170 MW alassäädölle (Fingrid 2023j).

3.2.2 Nopea taajuusreservi

Nopea taajuusreservi (FFR) on otettu käyttöön keväällä 2020. Sen tarkoitus on turvata sähköjärjestelmän tilaa sellaisten tilanteiden varalta, joissa sähköjärjestelmän inertia

laskee matalalle tasolle. Sähköjärjestelmässä inertia pyrkii vastustamaan pyöriviin massoihin varastoituneen liike-energian avulla sähköjärjestelmän taajuuden muutoksia. Mitä enemmän inertiaa on, sitä vakaampana taajuus pysyy. Reservitoimittaja valitsee taajuuden tason, jolloin nopea taajuusreservi aktivoituu, sekä siihen liittyvän aktivoimisajan. Esimerkiksi aktivointitaajuudelle 49,5 Hz velvoitetaan maksimissaan 0,7 sekunnin aktivointiaika. Lisäksi reservin aktivoinnin vähimmäiskestoksi on määritetty joko 5 tai 30 sekuntia, riippuen tehon deaktivointinopeudesta. Reservin tulee myös kyetä uuteen aktivointiin, uudelleenaktivointiajan ollessa 15 minuuttia (Fingrid 2023h). Suomen velvoite nopeassa häiriöreservissä vaihtelee 0 ja 60 MW välillä (Fingrid 2023j).

3.2.3 Taajuuden palautusreservit

Mikäli taajuuden vakautusreservit eivät kykene palauttamaan taajuutta takaisin sallitulle vaihteluvälille, aktivoituvat taajuuden palautusreservit. Vuonna 2013 on otettu käyttöön automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) (Fingrid 2023a). Vuoden 2023 ensimmäiselle kvartaalilla sitä ylläpidetään sovitusti 300–400 MW, tunneille 00.00–01.00 ja 05.00–00.00. Näin ollen vuorokautta kohti on määritetty 20 tunnille taajuuden palautusreservin kapasiteettia. Myös automaattisen taajuudenhallintareservin suuruus muodostuu maan käyttämän vuosienergian mukaan. Suomen osuus vuodelle 2023 vaihtelee välillä 46–62 MW, mutta tämä koskee kuitenkin vain osaa vuorokauden tunneista (Fingrid 2023j).

Manuaalinen taajuudenhallintareservi (mFRR) kattaa sekä nopean häiriöreservin että säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (Fingrid 2023l). Suomessa häiriöreservin suuruus vaihtelee vuonna 2023 välillä 880–1300 MW, pitäen sisällään Fingridin omat varavoimalaitokset (927 MW) ja käyttöoikeusvoimalaitokset (278 MW) sekä säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoilta saatavan kapasiteetin (Fingrid 2023j).

3.2.4 Korvaavat reservit

Korvaavat reservit mahdollistavat aiemmin aktivoitujen taajuuden palautusreservien palauttamisen takaisin valmiuteen häiriötilanteen jälkeen, uusia häiriöitä silmällä pitäen.

Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä ei kuitenkaan käytetä kyseisiä reservejä (Fingrid 2023j).

3.2.5 Tehoreservi

Suomessa otettiin käyttöön vuonna 2007 lakiin perustuva tehoreservijärjestelmä, joka päivitettiin vuoden 2021 lopulla. Tehoreservi turvaa sähköntuotantoa, mikäli markkinaehtoista sähköä ei ole saatavilla. Siihen voi liittyä sekä voimalaitokset että sähkönkulutuksen joustoon kykenevät kohteet (Fingrid 2023e).

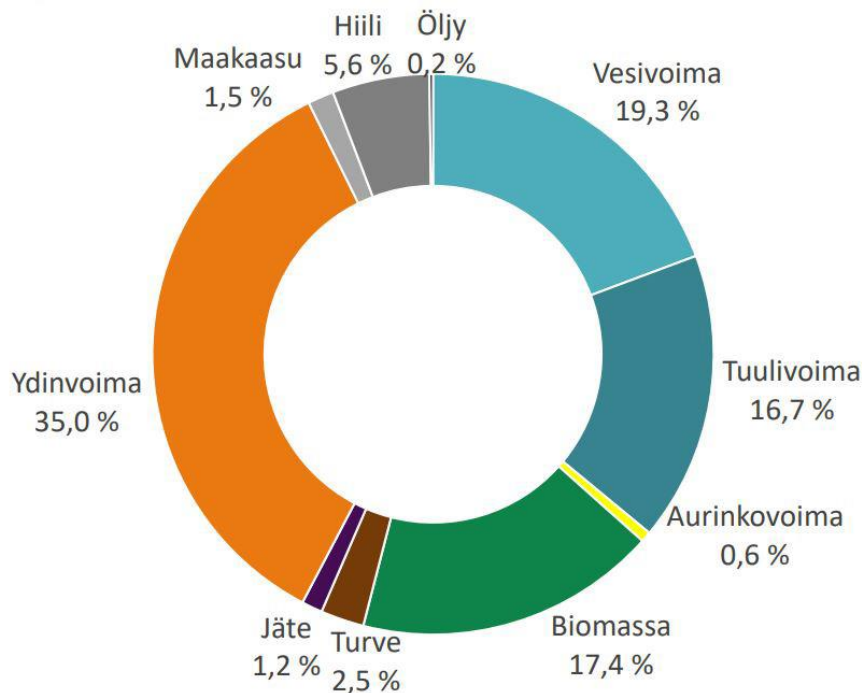
Tehoreservijärjestelmää ylläpidetään Energiaviraston ja Fingridin toimesta. Energiavirasto määrittää tarvittavan tehoreservin määrän, kilpailuttaa reservilaitokset, vahvistaa reservin ehdot sekä valvoo järjestelmän toimintaa ja lain noudattamista. Fingrid puolestaan vastaa järjestelmän hallinnoinnista ja käyttöönotosta (Energiavirasto 2023b).

Voimalaitosten tulee olla talvikuukausina (1.12.–28.2.) enintään 12 tunnin käynnistysvalmiudessa, muina kuukausina valmiusaika on 30 päivää. Kulutusjousto tarjotaan säätösähkömarkkinoille talvikuukausiksi, ja niiden on oltava 10 minuutin valmiudessa (Energiavirasto 2022).

Edellinen tehoreservikausi toteutui aikavälillä 1.7.2020 – 30.6.2022, jolloin reservin kapasiteetti oli 611 MW. Seuraavan tehoreservikauden oli tarkoitus ajoittua aikavälille 1.11.2022 – 31.10.2023, mutta Energiavirasto keskeytti tehoreservin hankinnan. Näin ollen kyseiselle aikavälille ei ole saatavilla tehoreserviä (Energiavirasto 2023b). Tehoreserviä tarvitaan kuitenkin harvoin, nimittäin Energiaviraston mukaan edellisen kerran tehoreserviä käytettiin Suomessa talvella 2009–2010 (Energiavirasto 2022).

4 SÄÄTÖSÄHKÖ SUOMESSA

Suomessa sähkön kokonaistuotanto oli vuonna 2022 69 TWh. Sähkön tuotannossa energianlähteistä uusiutuvia oli 54 %, hiilidioksidineutraaleja 89 % ja kotimaisia 57 % (Energiateollisuus 2023a). Sähköntuotannon energialähteet jakautuivat kuvan 3 osoittamalla tavalla.



Kuva 3. Sähkön tuotanto Suomessa energialähteittäin vuonna 2022 (Energiateollisuus 2023a).

4.1 Vesivoima

Vesivoima on kotimainen, uusiutuva ja päästötön energiamuoto. Se perustuu varastoidun veden potentiaalienergian muuttamiseen sähköksi voimalaitoksen turbiinin avulla (Motiva 2022). Suomessa on noin 250 vesivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu teho on noin 3190 MW (Motiva 2021b). Vesivoimalaitokset voidaan jakaa voimalan nimellistehon mukaan kolmeen eri kategoriaan. Suurvesivoimalaitosten nimellisteho on

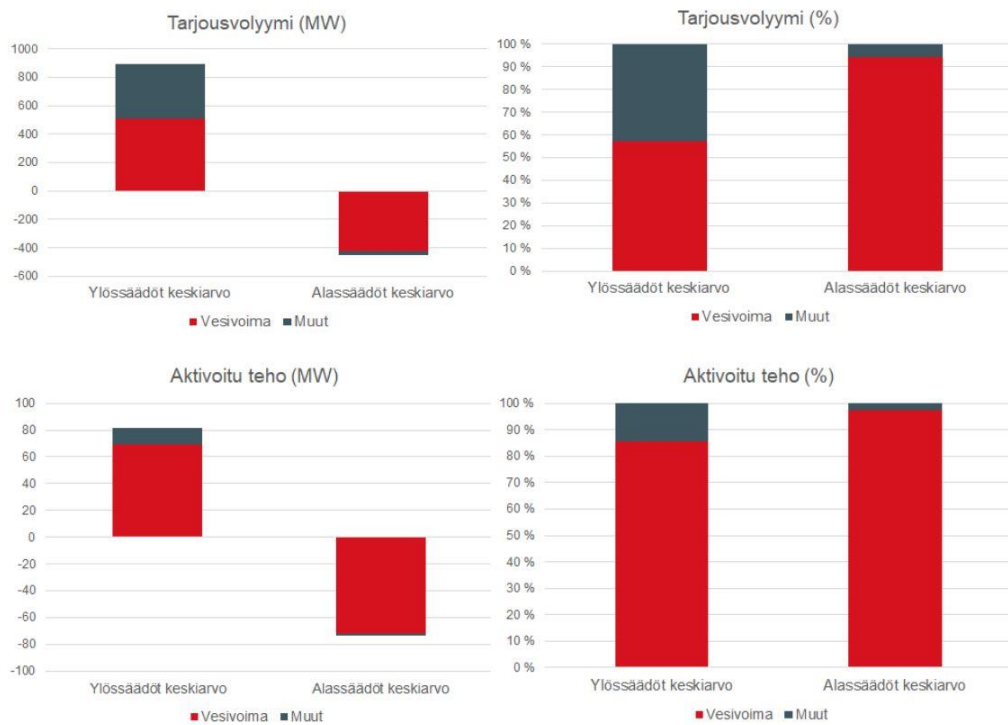
yli 10 MW, pienvesivoimalaitoksen 1–10 MW ja minivesivoimalaitoksen alle 1 MW (Motiva 2022).

Vesivoiman avulla tuotetun sähkön osuus sähkön kokonaistuotannossa vaihtelee noin 10–20 prosentin välillä, riippuen vuosittaisesta vesitilanteesta. Vuonna 2022 vesitilanne oli varsin kohtuullinen, vesivoimalla tuotettiin sähköä 16,3 prosenttia Suomen kokonaistuotannosta (Energiateollisuus 2023a).

4.1.1 Vesivoiman säätöominaisuudet

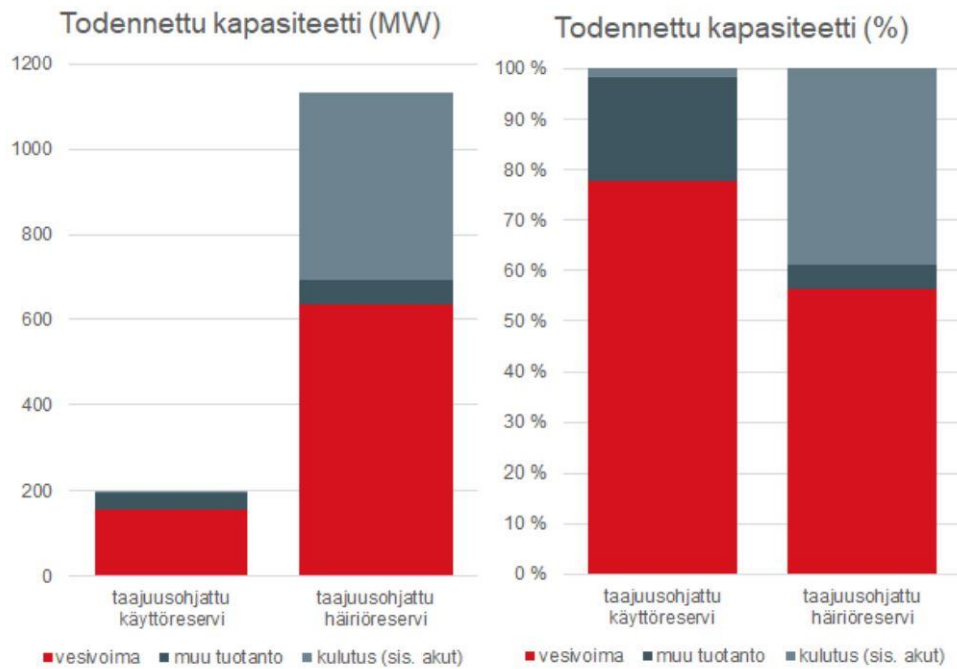
Vesivoima on Suomessa tärkein energianlähde säätösähkön tuotannossa. Vuonna 2011 tekemässä diplomityössänsä Laine totesi, perustuen omaan selvitykseensä, että vuonna 2009 noin 85 % taajuusohjatusta käyttöreservistä oli vesivoimaa. Lisäksi kappalemääräisesti noin 70 % kaikista säätösähkömarkkina-tarjouksista oli vesivoimaa (Laine, 2011).

Myös Fingridin oman tiedotteen mukaan vesivoiman tärkeys sähkömarkkinoilla on kiistatonta. Kuvassa 4 esitetyt kuvaajat kuvaavat vesivoiman keskimääräistä osuutta kaikista niistä säätösähkömarkkinoille jätetyistä säätötarjouksista, jotka ovat aktivoitu sähköjärjestelmän tilan tasapainottamiseksi. Kyseisen tarkastelu toteutettiin vuonna 2017, tammikuun ja marraskuun välillä. Kuvaajista nähdään, että varsinkin alassäädöt on toteutettu lähes yksinomaan vesivoiman avulla. Myös ylössäädöissä vesivoima on ollut pääsääntöinen valinta. Tämä nähdään vertailemalla esitettyjen ja aktivoitujen tarjousten määriä. Vaikka ylössäätötarjouksissa vesivoiman osuus on ollut noin 57 %, aktivoituista säätötarjouksista on kuitenkin noin 85 % on toteutettu vesivoiman avulla (Fingrid 2018).



Kuva 4. Vesivoiman keskimääräinen osuus säätösähkömarkkinoille jätetyistä tarjouksista (Fingrid 2018).

Sähkömarkkinoiden lisäksi vesivoima on hyvin edustettuna myös taajuusohjattujen käyttö- ja häiriöreservien kapasiteeteissa. Kuvassa 5 esitetyt kuvaajat kuvaavat näiden reservien ylläpitoon hyväksytyyn kapasiteetin jakautumista eri lähteisiin vuonna 2018. Kuten kuvaajista nähdään, taajuusohjattavan käyttöreservin kapasiteetista noin 78 % on vesivoimaa, taajuusohjatun häiriöreservistä kapasiteetin ollessa puolestaan noin 56 % (Fingrid 2018).



Kuva 5. Taajuusohjattujen reservien ylläpitoon hyväksytyyn kapasiteetin jakautuminen eri lähteisiin (Fingrid, 2018).

Lisäksi Fingrid mainitsee tiedotteessaan, että vuonna 2017, kuten myös vuoden 2018 ensimmäisellä puoliskolla, kaikki kotimainen automaattisen taajuudenhallintareservin tarjonta tuntimarkkinoilla oli vesivoimaa (Fingrid 2018).

Erinomaista vesivoimasta säätösähkön tuotannossa tekee se, että sitä on nopeasti saatavilla suuriakin määriä, ja vesistöjä säännöstelemällä sähkön tuotanto voidaan ajoittaa esimerkiksi sellaisiin ajankohtiin, jolloin säädön tarvetta arvellaan sähköjärjestelmässä olevan eniten (Energiateollisuus 2023g). Kuvasta 6 nähdään, että parhaimmillaan vesivoimalaitos voidaan käynnistää muutamassa sekunnissa.

Ominaisuudet	Pumpputurbiini-yksikkö	Vesivoima
Hyötysuhde		
	<i>vanha</i> 66 %	87 %
	<i>uusi</i> 70 %	92 %
Käynnistysajat		
<i>Kylmäkäynnistys</i>	5 – 10 minuuttia	n/a
<i>Lämmin käynnistys</i>	30 sekuntia	1 – 2 minuuttia
<i>Kuuma käynnistys</i>	1 – 2 sekuntia	1 – 2 sekuntia
Minimiteho	5 – 20 %	15 – 20 %
Tehonmuutosnopeus	suuri	suuri

Pumppuvoimayksikkö = yksi pumpputurbiini; kylmäkäynnistys = pumppaustilasta tuotantoon; lämmin käynnistys = seisovasta tilasta tuotantoon; kuuma käynnistys = turbiini jo pyörimässä

Kuva 6. Vesivoimalaitosten säätöominaisuudet (Aalto et al., 2012).

4.2 Lauhdevoima

Lämpövoimalaitoksissa voidaan tuottaa lämmön lisäksi myös pelkkää sähköä. Tällä menetelmällä tuotettua sähköenergiaa kutsutaan lauhdevoimaksi (Energiateollisuus 2023b). Vaikka Suomessa lauhdevoiman osuus sähkön tuotannossa ei ole kovin suuri (noin 4,5 % vuonna 2022, tuotannon ollessa noin 3,7 TWh), siitä on hyötyä säätösähkön tuotantoa ajatellen (Energiateollisuus 2023a).

4.2.1 Lauhdevoiman säätöominaisuudet

Lauhdevoiman käyttö säätösähkön tuotannossa perustuu suurimmalta osin niiden toiminnan ajoittamiseen sähkön käyttöhuippujen kohdalle. Nopeisiin sähköverkon häiriöihin ne eivät ehdi reagoida, sillä usein voimalaitosten käynnistykseen voi kulua useita tunteja (kuva 7). Ainoastaan kaasuturbiiniyksiköt ja esimerkiksi dieselkäyttöiset moottorit kykenevät nopeisiin tuotantarpeisiin, mutta niiden kapasiteetti ei ole kovin suuri. Myöskään niiden hyötysuhde ei ole paras mahdollinen. Lisäksi laitosten käyttämät polttoaineet ovat yleensä fossiilisia polttoaineita, joten niiden käyttäminen on sekä haitallista ympäristölle, mutta myös kallista (Energiateollisuus 2023b).

Ominaisuudet	Höyry- voima- laitos	Kombi- voima- laitos	Kaasu- turbiini	Moottori	Ydinvoima
Tyypillinen yksikkökoko					
MWe	600 - 900	60 - 400	10 - 300	1-20	1000 - 1600
Hyötysuhde					
<i>vanha</i>	40 %	50 %	32 %	45 %	33 %
<i>uusi (max)</i>	47 %	61 %	38 %	48 %	37 %
Käynnistysajat					
<i>kylmäkäynnistys</i>	5-10 h	2-3 h	10 min	15 min	2 vrk
<i>lämmän käynnistys</i>	3-5 h	1-1,5 h	10 min	15 min	1 vrk *
<i>kuuma käynnistys</i>	1,3-2,5 h	0,5-1 h	10 min	5 min	8 - 16 h, 60->100 %
Minimiteho	40 %	40-50 %	50 % **	30 %**	2 - 4 h (15 -)30 %
Tehonmuutosnopeus	3-6 %/min	4-6 %/min	5-10%/min	25%/min	

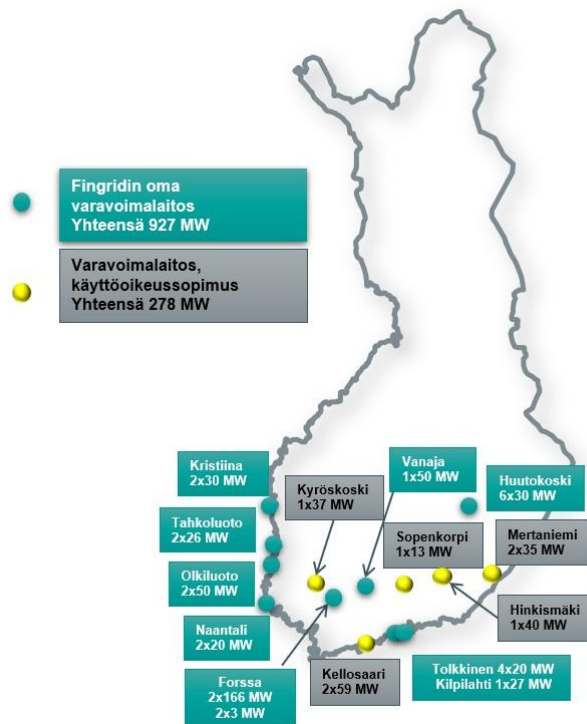
* useiden tuntien seisokin jälkeen

** Typpioksidipäästöjen raja-arvo ylittyy ajettaessa alempia tehoja. Tekninen minimiteho on n. 10 %.

Kuva 7. Lämpövoimalaitosten säätöominaisuudet (Aalto et al., 2012).

4.3 Varavoimalaitokset

Fingrid voi reagoida kasvavaan sähköntarpeeseen aktiivisella nopealla häiriöreservinsä, joka tapahtuu tuomalla lisäkapasiteettia sähköntuotantoon omien varavoimalaitoksiensa avulla. Vuonna 2022 Fingridin hallinnoimien omien varavoimalaitosten sekä käyttöoikeussopimusvoimalaitosten tuottama yhteisteho oli 1205 MW. Fingridin omat varavoimalaitokset eivät osallistu kaupalliseen sähköntuotantoon, vaan niitä käytetään ainoastaan kompensoimaan sähköverkon taajuusvaihteluja tarpeen vaatiessa. Sama pätee myös käyttöoikeussopimusvoimalaitoksiin. Kuvasta 8 nähdään voimalaitosten sijoittuminen Suomessa (Fingrid 2023o).



Kuva 8. Fingridin varavoimalaitokset (Fingrid 2023o).

4.3.1 Fingridin omat varavoimalaitokset

Vuonna 2022 Fingrid omisti yhdeksän omaa varavoimalaitosta, joiden voimalaitosyksiköiden yhteenlaskettu teho oli 917 MW (Fingrid 2023o). Taulukosta 1 nähdään varavoimalaitosten sijainti, kokonaisteho sekä erikseen voimalaitosyksiköiden teho.

Voimalaitos	Teho (MW)
Forssa	338 (2 x 166 + 2 x 3)
Huutokoski	180 (6 x 30)
Kilpilahti	27
Kristiina	60 (2 x 30)
Naantali	40 (2 x 20)
Olkiluoto	100 (2 x 50)
Tahkoluoto	52 (2 x 26)
Tolkkinen	80 (4 x 20)
Vanaja	40
Yhteensä	917

Taulukko 1. Fingridin omat varavoimalaitokset (Fingrid 2023o).

Kaikki Fingridin omistuksessa olevat varavoimalaitokset ovat toiminnaltaan kaasuturbiinivoimalaitoksia. Näissä voimalaitoksissa on yksi tai useampi kaasuturbiiniyksikkö (Fingrid 2023g).

4.3.2 Käyttöoikeussopimusvoimalaitokset

Fingrid on lisäksi sopinut käyttöoikeussopimuksen viiden muun voimalaitoksen kanssa. Näiden voimalaitosten tuottama yhteisteho on taulukon 2 mukaisesti 278 MW (Fingrid 2023o). Myös nämä voimalaitokset toimivat kaasuturbiiniyksikköiden avulla (Fingrid 2023g).

Voimalaitos	Teho (MW)
Hinkismäki	40
Kellosaari	118 (2 x 59)
Kyröskoski	37
Mertaniemi	70 (2 x 35)
Sopenkorpi	13
Yhteensä	278

Taulukko 2. Käyttöoikeussopimusvaravoimalaitokset (Fingrid 2023o).

4.3.3 Tehoreservin voimalaitokset

Edellinen tehoreservikausi toteutui aikavälillä 1.7.2020 - 30.6.2022 (Energiavirasto 2023b). Silloisen tehoreservin muodostivat taulukon 5 mukaiset voimalaitokset.

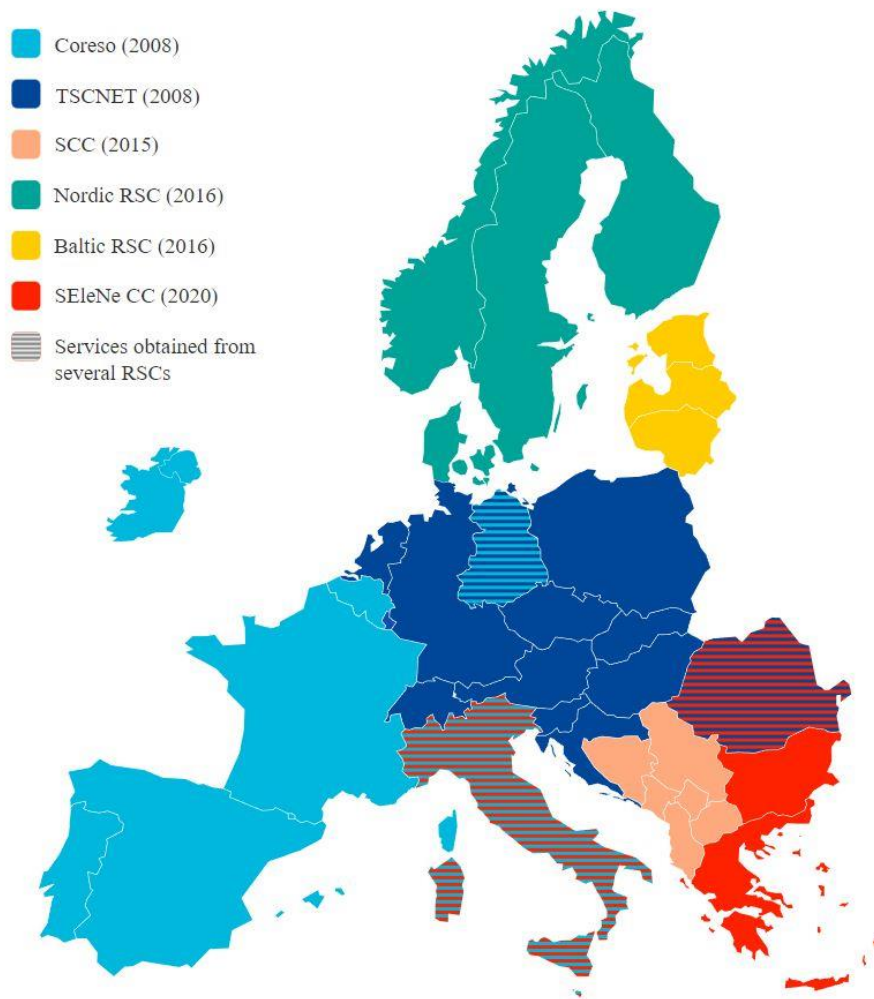
Voimalaitos	Käyttövoima	Teho (MW)	Yhtiö
Kymijärvi KT	Maakaasu	42	Lahti Energia Oy
Naistenlahti 1	Maakaasu	129	Tampereen sähkölaitos Oy
Meri-Pori	Kivihiili	440	Fortum Power and Heat Oy
Yhteensä		611	

Taulukko 3. Tehoreservikauden 1.7.2020 - 30.6.2022 tehoreserviyksiköt (Fingrid, 2023n).

4.4 Tuontisähkö

Suomen sähköverkko toimii yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan sähköjärjestelmien kanssa muodostaen yhteispohjoismaisen synkronijärjestelmän (kuva 11). Pohjoismainen

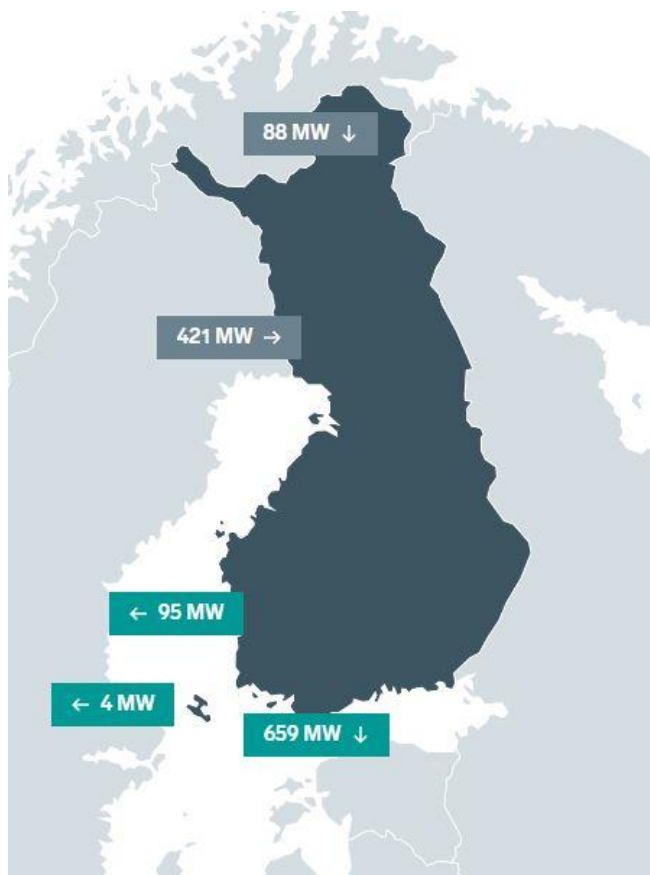
sähköjärjestelmä on kytkettynä tasasähköyhteydellä Keski-Euroopan sähköjärjestelmään, ja se kuuluu eurooppalaiseen kantaverkkoyhtiöiden keskusjärjestö ENTSO-E:hen (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Kuvan 9 mukaisesti yhteispohjoismainen synkronijärjestelmä muodostaa yhden Euroopassa toimivista alueellisista ryhmistä. Tähän pohjoiseen ryhmään kuuluu edellä mainittujen maiden lisäksi vielä Islanti. Suomella on myös tasasähköyhteydet Venäjän ja Viron kanssa, jolloin pohjoismaiden sähköjärjestelmä on liitettyä myös Venäjän ja Baltian sähköjärjestelmiin (Fingrid 2023i).



Kuva 9. ETSO-E:n alueelliset ryhmät (ENTSO-E, 2023).

Suomen sähköjärjestelmä on riippuvainen ulkomailta tuotavasta sähköstä, sillä noin viidesosa Suomen sähkönkulutuksesta katetaan tuontisähköllä. Vuonna 2021 sähkön

nettotuonti Suomeen oli noin 17,8 TWh. Suurin osa tästä tuli Ruotsista, 15 TWh (Tilastokeskus 2022).



Kuva 10. Sähkön tuonti ja vienti Suomessa 17.1.2023, klo 22.25 (Fingrid 2023).

4.4.1 Pohjoismaat ja Viro

Suomella on kuvan 11 mukaisesti vaihtosähköyhteydet sekä Ruotsin että Norjan kanssa. Pohjois-Ruotsin kanssa on kaksi 400 kV yhteyttä, ja Norjaan on 220 kV yhteys. Lisäksi Raumalta lähtee kaksi tasasähköyhteyttä Ruotsiin, Fenno-Skan 1 (400 MW) Dannebohon ja Fenno-Skan 2 (800 MW) Finnboleen. Suomesta on myös tasasähköyhteys Ahvenanmaalle, Naantalista lähtevän yhteyden teho on 100 MW (Fingrid 2023i).

Suomella on Viron kanssa kaksi tasasähköyhteyttä, Estlink 1 (350 MW) ja Estlink 2 (650 MW). Lisäksi Suomen ja Venäjän välillä on sähkönsiirtoyhteyksiä, mutta niiden käyttö päättyi kevään 2022 aikana. (Fingrid 2023i)



Kuva 11. Suomen sähköverkon yhteydet naapurimaihin (ENTSO-E, 2019).

5 SÄHKÖMARKKINAT

Kiinteän sähköverkon lisäksi sähköjärjestelmän toimintaan liittyy myös olennaisena osana sähkömarkkinat. Sähkömarkkinat voidaan jakaa tukku- ja vähittäismarkkinoihin. Tukkumarkkinoilla käydään kauppaa sähköpörssissä, jossa kaupankäynnistä vastaavat sähköntuottajat ja suuret sähkön kuluttaja- ja välittäjäyhtiöt. Sähkön tukkukauppa on mahdollista myös sähköpörssin ulkopuolella, tällöin kaupankäynti tapahtuu OTC- eli kahdenvälisillä markkinoilla. Vähittäismarkkinoilla yksityiset kuluttajat ostavat sähköä sähkön myyjiltä ja välittäjiltä.

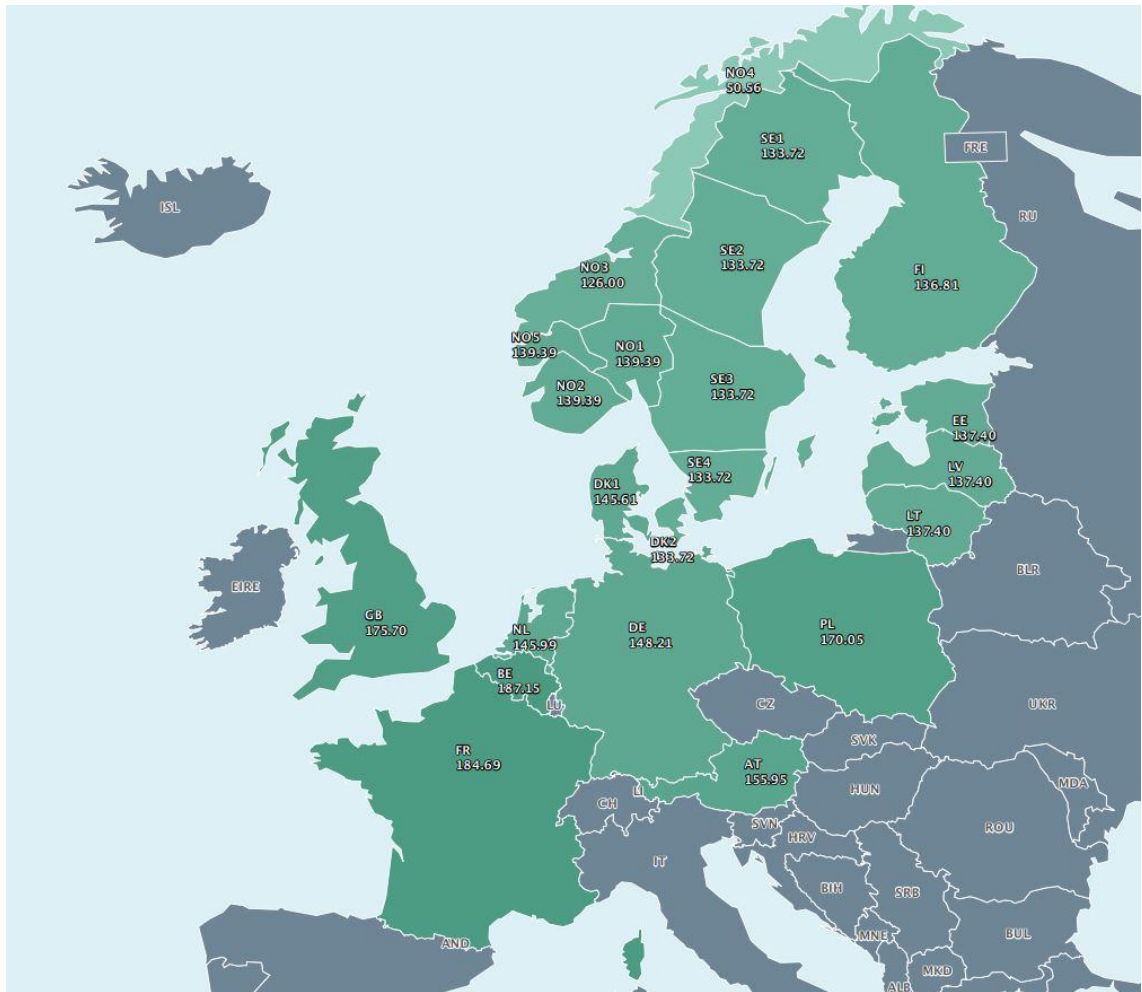
5.1 Sähkön tukkumarkkinat

Suomi kuuluu Nord Pool –sähköpörssiin, joka toimii Euroopan alueella. Kaupankäynti tukkumarkkinoilla voidaan jakaa fyysisiin tuotteisiin ja finanssituotteisiin (Partanen et al. 2015). Kaupankäynnin fyysisestä puolesta vastaa Nord Pool AS. Sen omistajat ovat Euronext (66 %) sekä TSO Holding (34 %) (Nord Pool 2020a). Euronext on eurooppalainen pörssi-yhtiö, kun taas TSO Holdingiin kuuluivat alun perin pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöt. Loppuvuodesta 2022 sekä Fingrid että tanskan kantaverkkoyhtiö Energinet myivät oman osuutensa yhtiöstä EPSO-G yhtiön tytäryhtiö Litgridille (Fingrid 2023c). Nykyisin Litgridin lisäksi TSO Holdingin omistaa siis Ruotsin kantaverkkoyhtiö Svenska Kraftnät sekä Norjan kantaverkkoyhtiö Statnett (Nasdaq 2022). Tukkumarkkinoilla kaupankäynnin finanssipuolesta vastaa Nasdaq OMX Commodities.

Sähköpörssin fyysisissä sähkökaupoissa toteutuneet kaupat johtavat aina fyysiseen sähkön toimitukseen. Fyysiset sähkökaupat eli Spot-kaupat voidaan jakaa kahteen eri kaupankäyntimekanismiin, Elspot- ja Elbas-markkinoihin.

Elspot-vuorokausimarkkinoilla (day-ahead market) kaupataan seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille tarvittava sähköntoimitus. Päivän aikana käydään yksi tarjouskierros, jossa osto- ja myyntitarjoukset määrittelevät jokaiselle tunnille markkina- eli systeemihinnan (Nord Pool 2020b). Tarjoukset tehdään rajatarjouksina suljetussa tarjousmenettelyssä omalle tarjousalueelle, ja niiden tulee olla tehtyinä Suomen aikaa

kello 13.00 mennessä, toimitusta edeltävänä päivänä (Partanen et al. 2015). Kauppaa käydään 0,1 MWh:n ja sen kerrannaisten sähkötoimituksina, sekä erilaisina blokkituotteina. Elspot-markkinoiden markkina-alueeseen kuuluu 21 tarjousaluetta, jotka jakautuvat kuvassa 12 esitettyjen maiden kesken. Nord Poolin vuorokausimarkkinoille kuuluu lisäksi myös Iso-Britannia, jossa kauppaa käydään N2EX-vuorokausimarkkinoilla (Nord Pool 2023).



Kuva 12. Elspot-markkinoiden tarjousalueet (Nordpool, 2023).

Elspot-markkinoiden sulkeuduttua kauppaa voidaan käydä edelleen päivän sisäisillä Elbas-markkinoilla (intra-day market). Kauppa toimii jatkuva-aikaisena, joten Elbas-markkinat pystyvät reagoimaan saman päivän aikana tapahtuvaan kysynnän vaihteluun vielä Spot-kauppojen jälkeenkin (Nord Pool 2020c). Säätösähkö- ja reservimarkkinat

seuraavat Elbas-markkinoita. Kauppaa käydään 1 MWh:n kerrannaisilla (Fingrid 2023l).

Finanssimarkkinoilla kauppaa käydään esimerkiksi futuureilla, DS-futuureilla ja optiosopimuksilla (Fingrid 2023d). Koska kaupan vastapuolena on aina pörssi, anonyymi kaupankäynti on turvattu, eikä vastapuoliriskiä ole. Finanssimarkkinoilla kaupankäynti on jatkuva-aikaista (Partanen et al. 2015).

OTC-markkinoilla (Over The Counter) tarkoitetaan kaikkea finanssikauppaa, jota käydään pörssin ulkopuolella. Markkinoiden tarjoamat palvelut mahdollistavat omia tarpeita vastaavan osto- ja myyntisalkun, mutta toisin kuin sähköpörssissä, OTC-markkinoilla on vastapuoliriski. Tämä tarkoittaa sitä, että OTC-markkinoilla ei ole saatavilla sähköpörssin tarjoamaa turvaa, esimerkiksi kauppojen vakuuksien suhteen (Partanen et al. 2015).

5.2 Sähkön vähittäismarkkinat

Sähkön vähittäismarkkinoilla sähkön vähittäismyyjät toimittavat sähköä kuluttajille, jonka ovat joko itse tuottaneet, ostaneet tukkumarkkinoilta tai kahdenvälisillä sopimuksilla (Energiavirasto 2023a).

Suomessa kuluttaja on vapaa ostamaan sähköä miltä tahansa Suomessa toimivalta sähkön myyjältä. Myyjä ja kuluttaja tekevät sähkönmyyntisopimuksen, jossa ilmenee ensinnäkin hinnan määriytymisperiaate. Hinta voi olla joko kiinteä tai määräytyä pörssisähkön mukaan. Kiinteähintaiset sähkösopimukset ovat joko määräaikaaisia tai toistaiseksi voimassa olevia. Määräaikaaisissa sopimuksissa sähkön hinta pysyy samana koko sopimuskauden ajan. Toistaiseksi voimassa olevassa sopimuksessa sähkön hinta seuraa sähkömarkkinoiden kehitystä, ja hinta määräytyy sopimuskohtaisesti esimerkiksi kuukauden tai vuosineljänneksen välein. Sähköpörssisopimukset seuraavat hintoja puolestaan tunti tunnilta, jolloin kuluttaja voi esimerkiksi ajoittaa sähkönkäyttöhuippunsa sellaiseen vuorokaudenaikaan, jolloin sähkön hinta on halvimmillaan. (Partanen et al. 2015)

Kuluttaja maksaa lisäksi myös sähkön siirrosta, sekä myös sähköveroa kuluttamastaan sähköstä. Sähkön siirrosta vastaavat alueelliset sähköverkkoyhtiöt. Tämä hinta on aina kiinteä, johon kuluttaja ei voi itse vaikuttaa (Ollikka 2017).

5.3 Säätosähkömarkkinat

Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä järjestelmävastaavat ylläpitävät säätosähkömarkkinoita. Suomessa Fingridin kanssa säätosähkömarkkinasopimuksen tehnyt tuotannon ja kuorman haltija voi antaa säätökykyisestä kapasiteetistaan säätötarjouksia.

Säätötarjouksen voi antaa, mikäli resurssit kykenevät tuottamaan 10 MW tehonmuutoksen 15 minuutin aikana. Säädön on oltava toteutettavissa tarjotulla teholla koko käyttötunnin ajan, säädön vähimmäiskeston ollessa yhden minuutin. Jos käytössä on elektroninen aktivointi, tehonmuutokseksi riittää 5 MW.

Säätötarjouksen voi jättää aikaisintaan kuukautta ennen tarjouksen kohteena olevaa käyttötuntia. Tarjousta voi muokata tai sen voi perua, kuitenkin ottaen huomioon, että 45 minuuttia ennen käyttötuntia tarjouksesta tulee sitova. Tämän jälkeenkin säätötarjouksia voi jättää puhelimitse, mutta Fingrid ei takaa niille määrätyn järjestyksen mukaista käytettävyyttä.

Säätötarjouksessa tulee ilmetä tiedot säädettävän kapasiteetin tehosta (MW), hinnasta (€/MWh), tuotannosta tai kulutuksesta, säätöalueesta, jossa tarjottu resurssi sijaitsee ja säätöresurssin nimestä. Lisäksi tarjouksen tulee sisältää reservitieto, josta ilmenee, onko tarjous säätö-, reservi- vai säätökapasiteettitarjous. Säätötarjouksen voi jättää sekä ylös- että alassäätöä koskien. Tarjouksia voi myös aggregoida, kunhan aggregoitava kapasiteetti sijaitsee samalla säätöalueella, on saman tasevastaavan taseessa ja kulutus- ja tuotantotase sallivat aggregoinnin keskenään. (Fingrid 20231)

5.3.1 Säätökapasiteettimarkkinat

Säätosähkömarkkinoiden lisäksi vuonna 2016 otettiin käyttöön säätökapasiteettimarkkinat. Niiden tarkoitus on varmistaa, että Fingridillä on mitoittavaa

vikaa vastaava määrä nopeaa häiriöreserviä myös siltä varalta, jos sen omat ja vuokralla olevat varavoimalaitokset eivät kykene osallistumaan järjestelmän tasapainottamiseen huolto- tai korjauskeskeytyksen takia.

Mikäli reservimyyjän jättämä kapasiteettitarjous hyväksytään, kapasiteetin haltija on velvollinen jättämään ylössäätötarjouksen säätösähkömarkkinoille kapasiteettikorvausta vastaan. Tarjouksen tulee olla jätettynä edellisenä vuorokautena kello 13.00 (EET) mennessä seuraaville CET-aikavyöhykkeen vuorokauden mukaisille tunneille.

Kuten säätösähkömarkkinoilla, myös säätökapasiteettimarkkinoilla tarjouksen vähimmäiskapasiteetin tulee olla 10 MW, elektronisen aktivoinnin ollessa käytössä 5 MW riittää. Tarjoukset tulee jättää 1 MW:n tarkkuudella, enimmäiskapasiteetin ollessa kuitenkin 50 MW. Säätökapasiteettitarjouksen tulee sisältää yhdelle viikolle vakiona oleva kapasiteetti (MW/viikko) ja kapasiteettikorvaus (€/MW/viikko). Säätösähkömarkkinoilla säätötarjoukset käytetään ennen säätökapasiteettitarjouksia (Fingrid 20231).

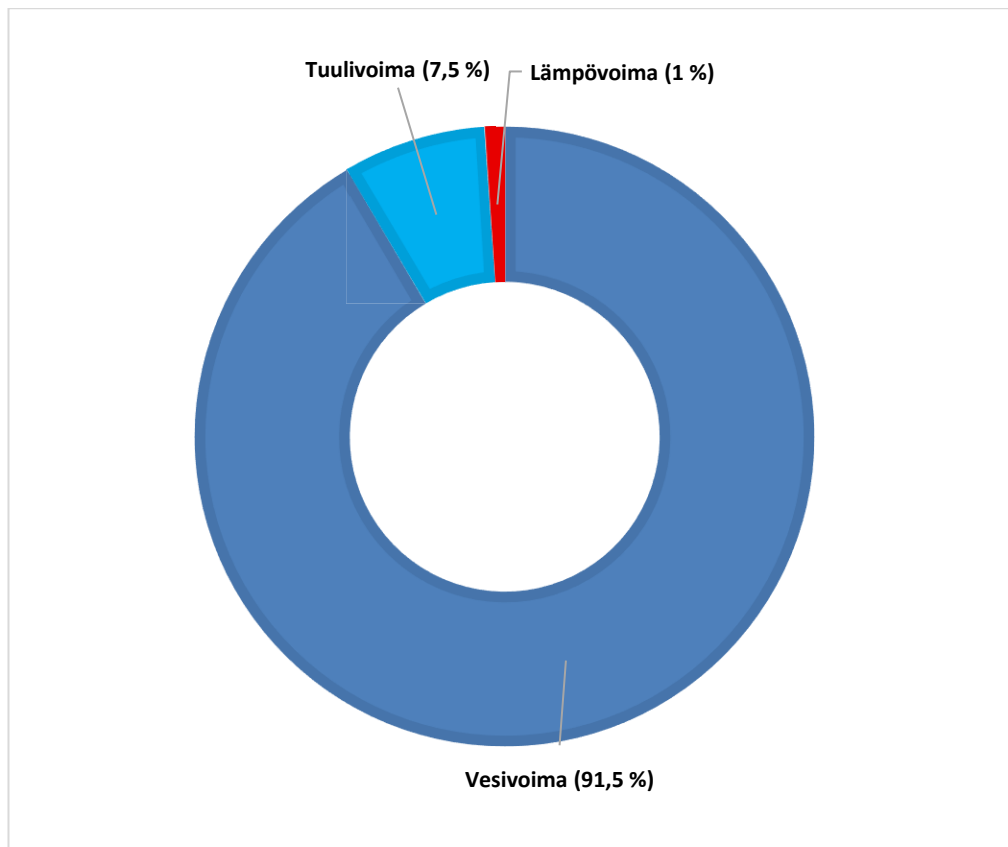
6 SÄÄTÖSÄHKÖ POHJOISMAISSA

Suomen sähköverkko muodostaa Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan sähköjärjestelmien kanssa yhteispohjoismaisen synkronijärjestelmän, joten muiden pohjoismaiden sähköntuotannolla on vaikutusta myös Suomen sähköjärjestelmän toimimiseen. Toisin kuin Suomessa, esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa sähköä tuotetaan enemmän kuin kulutetaan, joka tarkoittaa sitä, että kyseisellä ylijäämäsähköllä voidaan turvata esimerkiksi Suomen sähköverkon toiminta sellaisina ajankohtina, kun Suomessa ei pystytä tuottamaan tarpeeksi sähköä kattamaan omaa kulutusta.

Pohjoismaiden sähköntuotannon rakenne vaihtelee maiden välillä paljon. Tuotantoon vaikuttavat maan ilmasto ja pinnanmuodot, mutta myös siellä käytettävä teollisuus. Kuten Suomessa, myös muissa pohjoismaissa tullaan tulevaisuudessa siirtymään entistä enemmän kohti ympäristöystävällisempää sähköntuotantoa.

6.1 Norja

Norjassa tuotettiin sähköä 157,1 TWh vuonna 2021. Lähes kaikki Norjan sähköstä tuotetaan vesivoimalla. Vesivoimalla tuotettiin sähköä noin 143,7 TWh, joka vastaa 91,5 % koko sähköntuotannosta. Loppuosa tuotetusta sähköstä saatiin tuulivoiman (7,5 %) ja lämpövoiman (1 %) avulla (Statistiks sentralbyrå 2022).



Kuva 13. Sähkön tuotanto Norjassa vuonna 2021 (Statistiks sentralbyrå 2022).

Norjan sähkönkulutus oli vuonna 2021 puolestaan 139,5 TWh. Tämä tarkoittaa sitä, että Norja kykenee tarjoamaan tuottamaansa sähköä muille pohjoismaille, sekä myös Iso-Britannian ja Keski-Euroopan käyttöön. Vientisähkön määrä olikin 25,8 TWh, tuontisähköä oli puolestaan 8,2 TWh. (Statistiks sentralbyrå 2022)

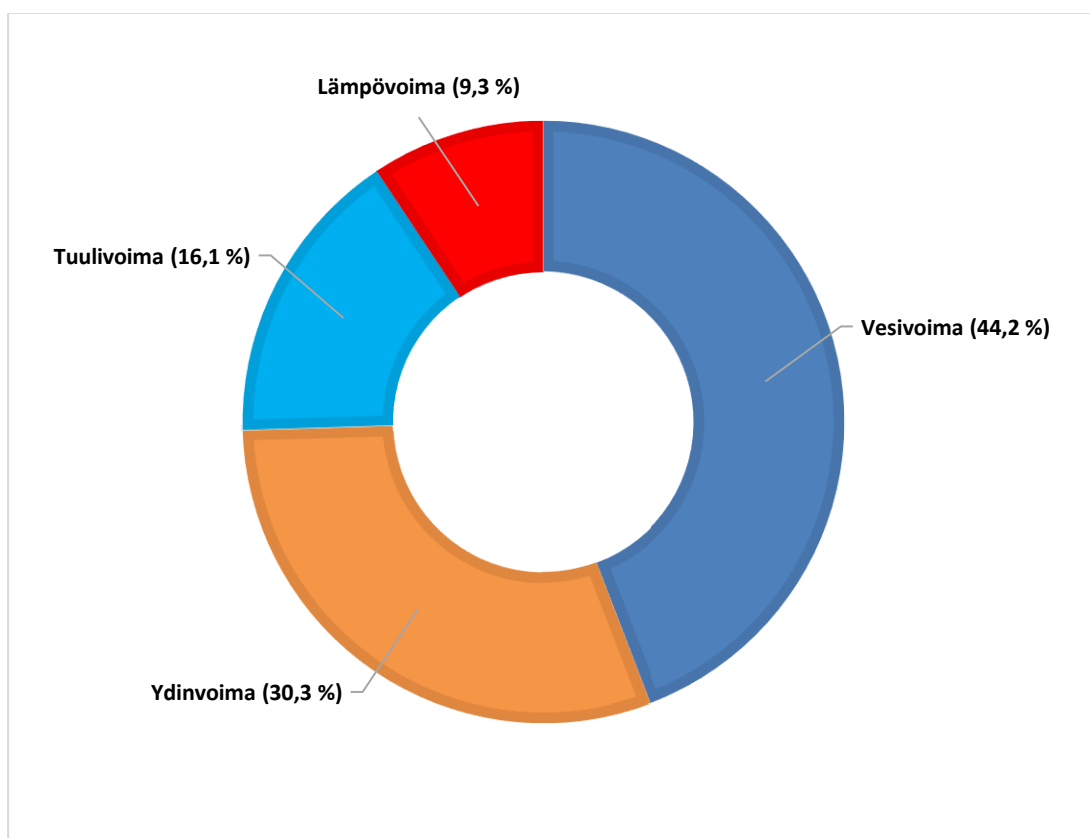
Norja on rakentanut sähköverkkoyhteydet sekä Saksan että Iso-Britannian kanssa. Saksan sähköverkkoon liittyvä Nord Link -kaapeli valmistui vuonna 2020 ja sen koekäyttö saatiin valmiiksi keväällä 2021 (Statnett 2023a). Kyseessä on 525 kV tasajännitteellä toimiva yhteys, jonka kokonaiskapasiteetti on 1400 MW. Norjan ja Iso-Britannian välille valmistunut North Sea Link otettiin käyttöön lokakuussa 2021 (Statnett 2023b). Kuten Nord Link -yhteys, myös North Sea Link -kaapeli toimii 525 kV tasajännitteellä ja 1400 MW kokonaiskapasiteetilla.

Molemmat yhteydet lisäävät joustoa Euroopan sähkömarkkinoille. Kun Saksassa tai Iso-Britanniassa on tuuli- tai aurinkoenergian avulla tuotetun sähkön ylituotantoa, Norja voi

ostaa sitä halvalla hinnalla ja säästää omia vesivarojaan. Kun Euroopassa puolestaan uusiutuvat energianlähteet eivät kykene vastaamaan sähkön kysyntään, on tarjolla säätösähköä norjalaisesta vesivoimasta.

6.2 Ruotsi

Ruotsissa tuotettiin sähköä 168,1 TWh vuonna 2021. Suurin osa Ruotsin sähköstä tuotetaan vesi- ja ydinvoimalla. Vesivoiman avulla tuotettiin sähköä 74,3 TWh, osuuden ollessa koko sähköntuotannosta noin 44,2 % ja ydinvoimalla tuotettiin sähköä 51 TWh noin 30,3 % osuudella. Tuulivoimalla sähköä tuotettiin 27,1 TWh (16,1 %) ja perinteisellä lämpövoimalla 15,6 TWh (9,3 %) (Statistics Sweden 2022).



Kuva 14. Sähköntuotanto Ruotsissa vuonna 2021 (Statistics Sweden 2022).

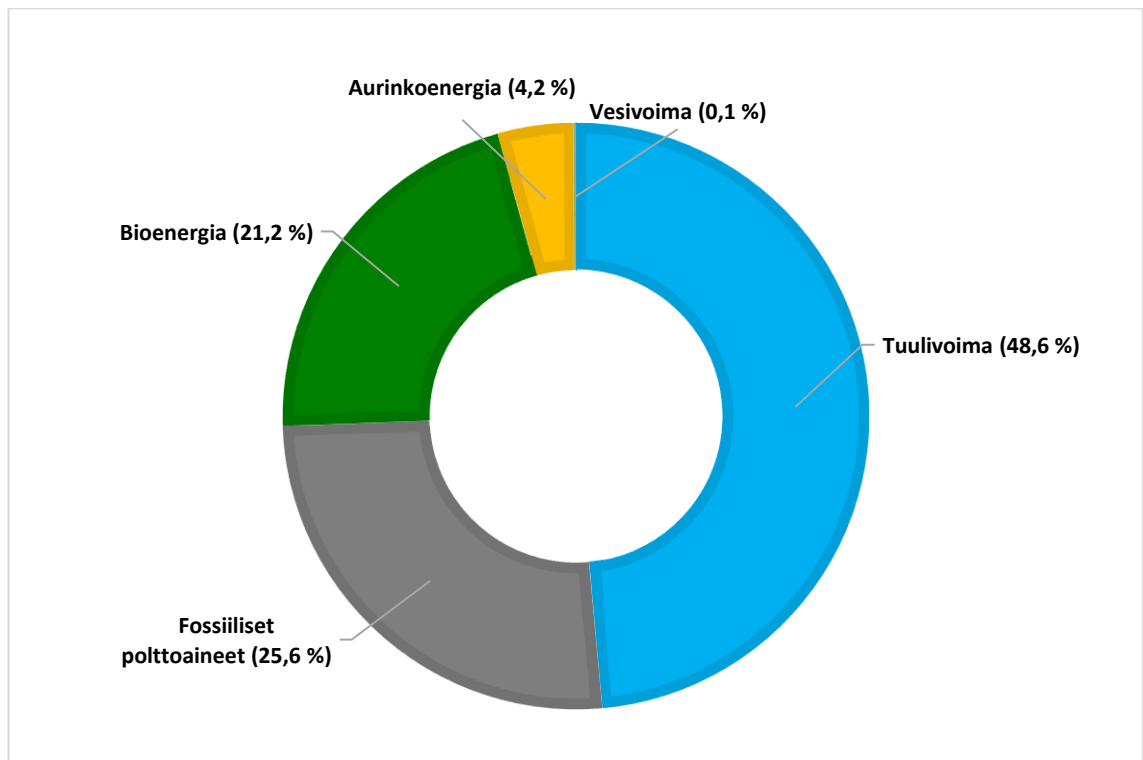
Sähkön kulutus oli puolestaan 143,0 TWh, joten Norjan tavoin Ruotsi pystyi tarjoamaan säätövoimaa muille pohjoismaille. Vientisähkön määrä oli 33,9 TWh, ja tuontisähköä oli noin 8,3 TWh (Statistics Sweden 2022).

Ruotsissa suurin osa sähköstä tuotettiin uusiutuvilla ja hiilidioksidineutraaleilla energianlähteillä, fossiilisia polttoaineita käytettiin hyvin vähän. The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences (IVA) on laatinut “Electricity Crossroads” -raportin, jossa pohditaan maan sähköntuotantoa vuosien 2030–2050 välisenä aikana. Raportin mukaan Ruotsissa on useita eri menetelmiä lisätä fossiilivapaata sähköntuotantoa. Tuuli- ja aurinkovoiman sekä biopolttoaineiden avulla tuotettavalle sähkölle nähdään paljon potentiaalia. Esimerkiksi tuulivoiman tuotannon arvioitiin kymmenkertaistuvan, ja aurinkovoiman tuotanto olisi mahdollista nostaa 0,1 TWh:sta jopa 50 TWh:iin. Lisäksi ydin- ja vesivoimaa olisi mahdollista lisätä (Byman et al. 2016, s. 7).

Suomen ja Ruotsin välille ollaan rakentamassa uutta sähköverkkoyhteyttä, jonka on tarkoitus tarjota lisäkapasiteettia sähkömarkkinoiden käyttöön, mutta myös helpottaa uusiutuvien energianlähteiden lisäämistä pohjoismaisen sähköjärjestelmän käyttöön. Aurora Line -niminen yhteys Suomen puolelta Pyhäselältä Ruotsin puolelle Messaureen. Tämä sähkönsiirtoyhteys tulee olemaan 400 kV:n vaihtosähköyhteys, joka mahdollistaa noin 900 MW sähkönsiirtokapasiteetin Suomesta Ruotsiin ja noin 800 MW sähkönsiirtokapasiteetin Ruotsista Suomeen. Aurora Line -yhteyttä ovat rakentamassa maiden kantaverkkoyhtiöt, Fingrid ja Svenska Kraftnät, ja yhteyden on tarkoitus valmistua vuonna 2025 (Fingrid 2023a).

6.3 Tanska

Tanskassa tuotettiin sähköä noin 33 TWh vuonna 2021, kulutuksen ollessa 33,6 TWh. Tuulivoiman avulla tuotettiin lähes puolet maan sähköstä, tuotannon ollessa noin 16 TWh, joka vastaa 48,6 % kokonaistuotannosta. Fossiilisten polttoaineiden avulla tuotettiin sähköä noin 8,5 TWh, yhteenlasketun osuuden ollessa 25,9 %, bioenergialla sähköä tuotettiin noin 7 TWh (21,2 %), aurinkoenergialla noin 1,4 TWh (4,2 %) ja vesivoimalla noin 0,3 TWh (0,1 %) (Danish Energy Agency 2022).



Kuva 15. Sähköntuotanto Tanskassa vuonna 2021 (Danish Energy Agency 2022).

Tanskan hallitus on vuonna 2020 julkaissut suunnitelman, jonka mukaan vuoteen 2050 mennessä maan koko energiantuotanto katetaan uusiutuvalla energialla. Suunnitelman ensimmäinen virstanpylväs on suunniteltu vuoteen 2030, jolloin maan tuottamista kasvihuonepäästöistä tulisi olla vähennettynä 70 %, verrattuna vuoden 1990 vastaaviin arvoihin. Tämän virstanpylvään toteutuminen on hyvin lähellä, sillä vuonna 2021 enää noin 25 % Tanskan sähköntuotannosta toteutettiin fossiililla polttoaineilla (International Trade Administration 2022).

Tanska on lisännyt viime vuosina paljon tuulivoimaa, ja lisäksi maan ilmasto on suotuisa bioenergian raaka-aineiden korkealle saannolle. Niinpä fossiilisia polttoaineita käyttävät voimalaitokset pyrkivät vähentämään hiilen käytön, ja hyödyntämään sen sijaan maatalouden ja metsäteollisuuden sivutuotteita (International Trade Administration 2022). Varsinkin lisääntyvä tuulivoima kuitenkin samalla lisää mahdollisesti myös ulkomaisen säätövoiman tarvetta. On mahdollista, että esimerkiksi Norjasta saatava vesivoimalla tuotettu säätövoima on tärkeässä asemassa Tanskassa.

7 SÄÄTÖSÄHKÖN TULEVAISUUS SUOMESSA

Suomessa tullaan tulevaisuudessa panostamaan ympäristöystävälliseen ja hiilidioksidineutraaliin sähköntuotantoon yhä enemmän. Varsinkin tuulivoiman osuus tulee kasvamaan kotimaisessa sähköntuotannossa. Lisäksi myös ydinvoiman kapasiteetti tulee lisääntymään Suomessa lähitulevaisuudessa. Olkiluodossa on koekäytössä kolmas ydinvoimalaitosyksikkö, joka lisää laitoksen tehoa 1600 MW:lla. Olkiluoto 3:n odotetaan kykenevän säännölliseen sähköntuotantoon kevään 2023 aikana.

Vaikka ydinvoima auttaa turvaamaan sähköntuotantoa Suomessa, se lisää myös haasteita sähköjärjestelmän toiminnalle. Olkiluoto 3:n myötä suurin sähköverkosta mahdollisesti irtoava yksittäinen kuorma tulee olemaan 1600 MW, joten säätösähköreservin kapasiteettia tulee nostaa nykyisestä tasosta.

7.1 Vesivoima

Vesivoiman tulevaisuudennäkymät Suomessa ovat ristiriitaiset. Tulevaisuudessa kasvavan säätötarpeen puolesta vesivoimaan panostaminen olisi järkevä ratkaisu, mutta vesivoiman ympäristövaikutukset ovat yksi kynnyskysymys vesivoimakysymysten äärellä (Energiateollisuus 2023g).

7.1.1 Vesivoiman hyödyt ja haitat

Vesivoimassa on paljon hyviä puolia. Se on uusiutuva energiamuoto, joka on ympäristölleen täysin puhdasta. Sen tuotannossa ei synny hiilidioksidipäästöjä, eikä siitä aiheudu kiinteitä jätteitä eikä päästöjä veteen, ilmaan tai maaperään. Vesivoimalaitoksen läpi virtaava vesi ei pilaannu eikä vähene. Vaikka vesivoimalaitokset investointikustannukset ovat suuret, sen käyttökustannukset ovat hyvin pienet. Polttoainetta ei tarvita, ja voimalaitoksen operointi tapahtuu hyvin pitkälti automaation avulla. Lisäksi vesivoiman säätöominaisuudet ovat tärkeässä roolissa sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämisessä (Vattenfall 2023).

Vesivoimalla on kuitenkin myös haittavaikutuksia. Mitä suurempi vesivoimalaitos on kyseessä, sitä suuremmat ympäristövaikutukset sillä on.

Vesivoimalaitos ja sen yhteyteen mahdollisesti rakennettava tekoallas vaikuttavat sekä valjastetun vesistön että tekoaltaan alle jäävän maa-alueen ekologiseen tasapainoon. Alueelle tyypillinen eliöstö kärsii eniten, se joutuu väistymään tai voi jopa tuhoutua kokonaan. Tekoaltaiden alleen peittämästä maaperästä veteen liukenee usein haitallisia aineita, kuten raskasmetalleja. Ilmakehään voi vuotaa myös hiilidioksidia ja metaania, mikäli veden alle jääneiltä alueilta ei kerätä puita pois. Myös ihmisasutusta voidaan joutua siirtymään tekoaltaiden vaikutusalueelta (Motiva 2021b).

Vesivoimalla on myös suuri vaikutus vesistön kalakantaan. Vaelluskalat eivät pääse toteuttamaan luonnollista vaellusta kutualueilleen. Kaloihin kertyy myös hiljalleen maaperästä liuenneita haitta-aineita, ja vesistöjen säännöstelyn aiheuttamat pinnankorkeuden vaihtelut voivat vaikuttaa kalojen kudun ja poikasten selviytymiseen. Kalakantojen tulevaisuus pyritään kuitenkin turvaamaan. Vaelluskaloja varten vesivoimalaitosten yhteyteen voidaan rakentaa kalaportaita, lisäksi kalanistutuksilla ja muilla kalanhoidollisilla toimenpiteillä pyritään ennaltaehkäisemään kalakantojen säilyvyys (Energiateollisuus 2023g).

Vaikka on totta, että vesivoimakapasiteetti on tärkeä sähköntuotantomuoto Suomessa, ja sen avulla tuotetaan suurin osa kotimaisesta säätövoimasta, on hyvin epätodennäköistä, että tulevaisuudessa olisi mahdollista lisätä vesivoimakapasiteettia varsinkaan suuria voimalaitosyksiköitä rakentamalla. Todennäköisempää on, että jo olemassa olevia vesivoimalaitoja parannetaan esimerkiksi nostamalla niiden tuotantotehoa.

7.1.2 Pienvesivoima

Vaikka suurimmat vesivoimakohteet Suomessa on jo rakennettu, mahdollisuuksia vesivoiman lisäämiseen on kuitenkin olemassa. Suomessa on suojelemattomissa vesistöissä vesivoimapotentiaalia noin 663 MW (2352 GWh/a), joka voidaan jakaa edelleen 10 MW:n vesivoiman 375 MW:n (939 GWh/a), pienvesivoiman 144 MW:n (392 GWh/a) ja minivesivoiman 144 MW (392 GWh/a) kesken (Motiva 2021).

Suomessa on pienvesivoimalaitoksia 83 kappaletta ja minivesivoimalaitoksia 68 kappaletta. Tehdyn selvityksen mukaan pien- ja minivesivoiman potentiaali olisi 288 MW (1413 GWh/a) (Motiva 2021).

7.1.3 Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalaitos toimii kuten perinteinen vesivoimalaitos, mutta pumppuvoimalaitoksissa vettä voidaan pumpata myös toiseen suuntaan, ala-altaasta yläaltaaseen. Jos sähköjärjestelmässä on enemmän tarjontaa kuin kysyntää, ylimääräinen sähkö on mahdollista käyttää veden pumppaamiseen pumppuvoimalaitoksen yläaltaaseen. Kun puolestaan sähkön kysyntä ylittää tarjonnan, voidaan pumpattu vesi laskea turbiinin läpi takaisin ala-altaaseen, jolloin tuotetaan säätösähköä sähköjärjestelmän tasapainottamiseen. Pumppuvoimalaitoksissa voidaan hyödyntää myös sähkön hinnan vaihteluita. Kun sähkö on halpaa, esimerkiksi yöaikaan, vesi voidaan pumpata yläaltaaseen, ja vastaavasti kalliimpien hintojen aikana pumpattu vesi voidaan hyödyntää (International Hydropower Association 2022).

Suomessa on ollut vuosien mittaan suunnitteilla useita pumppuvoimalaitosprojekteja. Yksi mahdollinen pumppuvoimalaitos voisi sijoittua Pyhäjärvellä sijaitsevaan Pyhäsalmen kaivokseen. Kaivoksen kaivostoiminta päättyi syksyllä 2022, ja näin ollen kaivos tarjoaisi hyvät puitteet pumppuvoimalaitoksen toiminnalle. EPV Energia Oy suunnittelee kaivoksen alueelle pumppuvoimalaitosta, joka toimisi 75 MW teholla, kapasiteetin ollessa 530 MWh (EPV Energia, 2022). Tuotannon kesto olisi seitsemän tuntia, jonka jälkeen latausvaihe kestäisi yhdeksän tuntia. Yläaltaana voisi toimia kaavailujen mukaan kaivoksen jo olemassa oleva avolouhos, ja ala-allas on suunniteltu rakennettavaksi kaivoksen nykyiseen syvyyteen, reiluun 1440 metriin (Juopperi, 2022). Toteutuessaan pumppuvoimalaitos kykenisi tuottamaan säätösähköä alueen tarpeisiin.

7.2 Tuulivoima

Tuulivoima lisääntyy Suomessa kovaa vauhtia. Vuoden 2022 loppuun mennessä tuulivoiman kapasiteetti oli 5677 MW. Tästä kapasiteetista 2430 MW rakennettiin kyseisenä vuonna, joten tuulivoiman kapasiteetti lähes kaksinkertaistui vuoden 2022 aikana. Kasvuvauhti tulee pysymään nopeana, sillä uusia tuulivoimaprojekteja on

suunnitteilla mittava määrä. Kun esimerkiksi vielä vuonna 2017 Suomessa oli suunnitteilla tuulivoimahankkeita 16 500 MW edestä, vuoden 2022 loppuun mennessä suunniteltujen tuulivoimalahankkeiden kokonaiskapasiteetti oli jo noin 66 000 MW. Maalle rakennettavia tuulivoimalahankkeita näistä oli lähes 53 000 MW, merituulivoimalahankkeiden vastaavan lukeman ollessa noin 13 000 MW. Toteutuessaan hankkeet nostaisivat Suomen tuulivoimakapasiteetin yli kymmenkertaiseksi tämänhetkisestä tilanteesta (Tuulivoimayhdistys 2022).

Vaikka lisääntyvä tuulivoiman käyttäminen sähköntuotannossa lisää säätösähkön tarvetta, tuulivoimaa on teknisesti mahdollista käyttää myös sähköjärjestelmän säätövoimana. Tuulivoimaloiden tuotantotehoa voidaan rajoittaa etukäteen, ja vasta kysynnän kasvaessa tuotantoyksikön reservissä oleva teho otetaan käyttöön kokonaisuudessaan. Ylössäätö on mahdollista toteuttaa myös siten, että esimerkiksi osa tuotantotehosta tarjotaan ylössäätökapasiteetiksi reservimarkkinoille. Alassäätö voidaan puolestaan toteuttaa vähentämällä tuotantoa hetkellisesti. Säätömahdollisuuksista huolimatta tuulivoimaa ei juuri käytetä Suomessa säätösähköinä (Fingrid 2022).

Lisääntyvä tuulivoiman käyttäminen kasvattaa myös energiansään ennustettavuuden tarpeellisuutta. Kun sähköntuotannon määrää pystytään ennustamaan, on tuotannon mitoittaminen helpompaa, ja näin ollen tarve säätösähkölle vähenee. Esimerkiksi BCDC Energia käyttää sääennustusmallia, jonka avulla saavutetaan ennustus tuuli- ja aurinkoenergian todennäköisyydestä paikkakuntaakohtaisesti. Energiasääennusteen avulla voidaan tutkia myös uusia rakennuskohteita uusiutuvia energianlähteitä hyödyntäville tuotantoyksiköille (BCDC Energia 2023).

7.3 Älykkäät energiajärjestelmät

Yhteiskunnan sähköistyminen, tulevaisuuden kasvava energiantarve ja haasteet uusiutuvien energiamuotojen käyttämisessä ajavat yhteiskuntaa kohti uusia, monipuolisempia ja joustavampia teknologioita, joilla yhteiskunnan eri infrastruktuureja hallitaan ja ylläpidetään.

Älykkäiden energiajärjestelmien avulla voidaan luoda toimiva kokonaisuus, jossa yhteiskunnan eri infrastruktuurit yhdistyvät älykkäillä tietoliikenneverkoilla toisiinsa, muodostaen joustavan ja toiminnallisen kokonaisuuden (Pöyry 2018). Esimerkiksi sähkö-, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät, liikenne, rakennukset ja teollisuus voidaan yhdistää toimivaksi, älykkääksi kokonaisuudeksi (Lund et al. 2017).

7.3.1 Älykäs sähköverkko

Älykkäille sähköverkoille ei ole olemassa yhtä yksiselitteistä määritelmää, ja määritelmä riippuukin monesti siitä, mikä taho niitä on esittelemässä. Lund määrittelee älykkäät sähköverkot seuraavasti:

”Älykkäät sähköverkot määritellään sähköinfrastruktuureiksi, jotka voivat älykkäästi integroida kaikkien niihin liittyvien käyttäjien toimet – tuottajat, kuluttajat ja ne, jotka tekevät molempia – voidakseen tarjota tehokkaasti kestävän, taloudellisen ja turvallisen sähkön tuotannon.” (Lund 2014)

Älykkäät sähköverkot tulevat olemaan keskeisessä asemassa tulevaisuuden sähköjärjestelmien toiminnassa. Siinä missä perinteiselle sähköverkolle riitti se, että sähkö toimitetaan tuotantolaitoksesta kuljetus- ja jakeluverkkojen kautta asiakkaalle, tulevaisuudessa sähköjärjestelmän toimintojen mahdollistamiseksi älykkäät sähköjärjestelmät joutuvat suoriutumaan monesti muustakin tehtävästä.

Sähköjärjestelmän tuotantokapasiteetti tulee olemaan aiempaa hajautetumpi (Lund et al. 2015), mikä tarkoittaa sitä, että muutaman suuren tuotantolaitoksen sijasta useat pienemmät tuotantoyksiköitä tuottavat sähköä järjestelmän käyttöön. Nämä tuotantoyksiköt, esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimalat, ovat sijoitettu asutuskeskusten ja teollisuuskeskittymien läheisyyteen, pidempien kuljetusetäisyyksien välttämiseksi.

Kuluttajat voivat osallistuminen sähköverkon toimintaan, ja tämä edellyttää kaksisuuntaisen sähkön siirtymisen sähköverkoissa (Dincer & Acar 2017). Lisäksi älykkäiden sähköverkkojen yksi keskeisimmistä elementeistä on informaation liikkuminen. Niinpä sähköverkon rinnalla toimii informaatioverkko, jonka avulla saadaan lähes reaaliaikaista tietoa sähkön käytöstä, sekä myös sähkön hinnasta.

Kuluttajat voivat seurata omaa sähkön kulutusta esimerkiksi älykkäillä mittareilla (Lund et al. 2015) ja ajoittaa sähkölaitteiden käyttöä halvempien sähkön hintojen ajalle, kun taas sähkönjakelun palveluntuottajat voivat kerätä tietoa kuluttajien kulutustottumuksista, laatia ennusteita sähkön kysynnästä ja mitoittaa omaa tarjontaa vastaamaan mahdollisimman tarkasti kysyntää. Myös mainitut yhteiskunnan kehittyvät infrastruktuurit hyödyntävät saatavilla olevaa tietoa mahdollisimman tarkasti.

Kun näiden seikkojen lisäksi ajatellaan sähköjärjestelmän toiminnan peruseriaatteita, kysynnän ja tarjonnan kohtaamista ja taajuuden tasapainon säilyttämistä, on selvää, että kehittyvä yhteiskunta lisää huomattavia haasteita sähköjärjestelmän toiminnalle. Siksi on tärkeää, että uudet järjestelmät rakennetaan alusta alkaen huolellisesti ja kestävästi.

7.3.2 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkön kysynnän siirtämistä sähköjärjestelmän kannalta kestävämpään ajankohtaan. Tavoitteena voi olla joko matalampien hintojen saavuttaminen tai sähköjärjestelmän tehotasapainon ylläpitäminen, joko lisäämällä tai vähentämällä sähkön kulutusta. Kysyntäjousto tulee olemaan tulevaisuudessa yhä suuremmassa roolissa suomalaisen sähköjärjestelmän toiminnassa (Fingrid 2023f).

Esimerkkinä voidaan tarkastella yhtä suomalaisen kodin suurinta sähkönkuluttajaa, sähköistä saunan kiuasta. Tavallisesti suomalaiset saunovat iltapäivisin ja iltaisin, varsinkin viikonlopun aikana. Näihin ajankohtiin sijoittuu myös sähkön kulutuksessa suurimmat piikit aamuisten kulutuspiikkien ohessa, eli sähkön kysyntä on suurinta näinä ajankohtina. Tämä tarkoittaa myös sitä, että näinä ajankohtina sähkö on yleensä myös kalleimmillaan vuorokauden aikana. Toisin sanoen, saunominen perjantai-iltana kuormittaa entisestään jo valmiiksi kuormittunutta sähköverkkoa, ja on samalla myös kallista kuluttajalle. Kysyntäjousto on yksi ratkaisu, jolla voidaan helpottaa tilannetta. Jos saunomisen ajankohdasta on mahdollista joustaa esimerkiksi siten, että sauna lämmitetään arkipäivisin tai aikaisempiin ajankohtiin, on se ensinnäkin kuluttajalle edullisempaa, mutta ennen kaikkea sen avulla valtakunnallinen sähkön kysyntä säilyy tasapainoisempana. Tasaisempi sähkön kysyntä vähentää suoraan myös säätösähkön tarvetta.

Kysyntäjoustoa voidaan hyödyntää myös muilla yhteiskunnan osa-alueilla, esimerkiksi teollisuudessa. Vuonna 2022 teollisuus kulutti 44 % Suomen kokonaiskulutuksesta (Energiateollisuus 2023a), joten on selvää, että kysyntäjouaston avulla voidaan vaikuttaa sähköjärjestelmän tasapainoon ja sitä kautta myös säätösähkön tarpeellisuuteen. Monet teollisuuden tuotantoprosesseista ovat energiantensiivisiä, joten niiden oikea-aikaisella ajoittamisella voidaan esimerkiksi ylössäätää sähköjärjestelmää sähkön alituotannon aikana. Esimerkiksi lasi-, paperi-, kemikaali- ja metalliteollisuus ovat potentiaalisia osallistujia teollisuuden kysyntäjoustoan (Heffron et al. 2020).

Sähkön kysynnän ajankohdan konkreettisen siirtämisen lisäksi kuluttajilla on myös muita keinoja vähentää sähköjärjestelmän kuormitusta, sekä samalla myös omia kustannuksia. Kodin energiajärjestelmissä, kuten lämmityksessä ja ilmastoinnissa voidaan hyödyntää automatiikkaa ja esimerkiksi älykkäitä mittareita, jolloin kodin toimintoja voidaan ajatella älykkäiksi energiajärjestelmiksi (Jordehi 2019). Nämä järjestelmät voivat huolehtia kodin sähkölaitteiden ja energiajärjestelmien oikea-aikaisesta ajoittamisesta ilman kuluttajan vaikuttamista. Myös kodissa käytettävä sähkö on mahdollista tuottaa itse. Yhä useammalla suomalaisella kuluttajalla on katollaan aurinkopaneeleja, joiden avulla on mahdollista tuottaa sähköä kotitalouden tarpeisiin.

Myös julkisissa rakennuksissa vastaavat aurinkopaneelijärjestelmät ovat yleistymässä. Esimerkiksi S-ryhmä on uutisoi vuonna 2021 asentaneensa yhtiön käyttöön 83 000 aurinkopaneelia (S-ryhmä 2021).

Mikäli itse tuotettua sähköä ei ole saatavilla välittömästi, on mahdollista hyödyntää varastoitua sähköä. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotettu sähkö on voitu varastoida kodin akkujärjestelmiin myöhempää käyttöä varten. Sähköä on voitu myös ostaa yöllä kulutuksen ollessa alimmillaan ja näin ollen sähkön hinnan ollessa halvimmillaan. Varastoitua sähköä hyödyntämällä voidaan tehokkaasti vähentää sähköjärjestelmän kuormitusta (IRENA 2018).

Yksittäisen suomalaiskodin vaikutus valtakunnallisen sähköjärjestelmän tilaan ei ole merkittävä, mutta kun yhä useampi kotitalous kykenee kuluttamaan sähköä joustavasti, vaikutukset voivat näkyä suuremmassakin mittakaavassa (Gallagher & Ross, 2021).

Kun esimerkiksi sähköverkosta saatavan sähkön kysyntä pienenee aamun ja illan kiireisimpien tuntien aikana, valtakunnallinen sähkön kysyntä tasapainottuu ja näin ollen vähenee myös säätösähkön tarve.

8 POHDINTA

Tulevaisuuden kasvava energiantarve, uusiutuvien energianmuotojen lisääntyvä osuus sähköntuotannossa, sähköistyvä yhteiskunta ja kuluttajien osallistuminen sähkömarkkinoille asettavat valtavan haasteen sähköjärjestelmän toiminnalle. Toisaalta vaaditaan yhä suurempaa sähköntuotannon kapasiteettia, ja toisaalta sähköjärjestelmältä vaaditaan yhä monipuolisempaa, joustavampaa ja toimintavarmempaa suoriutumista.

Suomessa tuulivoima tulee lisääntymään merkittävästi, samoin ydinvoiman määrä kasvaa lähitulevaisuudessa. Vaikka nämä tuotantomenetelmät ovat erilaisia keskenään, molemmat lisäävät oman haasteensa kotimaiselle sähköjärjestelmälle. Lisääntyvä tuulivoima kasvattaa samalla myös säätösähkön tarvetta, mutta samalla tarvitaan myös uusia järjestelmiä sähköjärjestelmän taustalle, jotta joustavuus ja toimintavarmuus saavutettaisiin ja pystyttäisiin ylläpitämään. Esimerkiksi erilaisten sähkön varastointimenetelmien hyödyntäminen helpottaisi tuulivoiman lisäämistä. Myös energiasään ennustettavuus tulee olemaan tärkeässä roolissa, sillä suurikaan tuulipuisto ei tuota kilowattituntiakaan energiaa, ellei tuule. Lisääntyvä ydinvoima puolestaan lisää suurten tuotantolaitosten määrää sähköjärjestelmässä, joten pahimmassa tapauksessa häiriöiden sattuessa sähköjärjestelmästä voi kadota hetkellisesti suuriakin tuotantokapasiteetteja. Sähköjärjestelmältä vaaditaan siis säätövoimaa myös tällaisia tilanteita varten. Lisäksi Olkiluoto 3:n pitkä viivästyminen ja Hankikivi 1:n peruuntuminen herättävät myös kysymyksiä ydinvoiman tulevaisuudesta Suomessa. Ydinvoima toimii hyvin sähköntuotannon perustana, mutta reaktorihankkeiden haasteet kannustavat varmasti miettimään muitakin vaihtoehtoja.

Säätösähkön saatavuutta joudutaan myös miettimään kriittisesti. Tällä hetkellä vesivoimaa käytetään eniten kotimaisena säätövoimana, mutta vesivoiman kapasiteettia on hankalaa lisätä. Lauhdevoimalaitokset puolestaan käyttävät fossiilisia polttoaineita, eikä niiden tehokapasiteetti ole kovin suuri. Sähkömarkkinoilta on varmasti saatavilla säätövoimaa jatkossakin, mutta täytyy ottaa huomioon myös muiden maiden sähköjärjestelmien haasteet. Euroopan maat pyrkivät yhdessä kohti hiilidioksidineutraalia yhteiskuntaa, mutta kuitenkin useassa maassa on käytössä edelleen paljon esimerkiksi fossiilisia polttoaineita. Tämä lisää painetta keskittää

sähköntuotantoa omaan kotimaahansa, eikä säätövoimaa välttämättä riitä muiden maiden avuksi. Lisäksi uusiin, energianintensiivisiin teollisuusprosesseihin investointi edellyttää turvattua sähköntuotantoa, joten pohjoismaiden väliset sähkönsiirtoyhteydet eivät välttämättä tule toiminaan maksimikapasiteetillaan, vaikka naapurimaa niin toivoisi.

On siis selvää, että tarvitaan uusia innovaatioita perinteisen sähköjärjestelmän rinnalle, jotta sähköjärjestelmä saadaan rakennettua vastaamaan tulevaisuuden yhä haastavampia tarpeita. Älykkäät sähköjärjestelmät ja -verkot sekä kysyntäjousto tulevat varmasti olemaan keskeisissä rooleissa tulevaisuuden yhteiskuntaa rakentaessa. Yhdessä nämä menetelmät auttavat kaikkia kuluttajia aina kotitalouksista teollisuuden suuriin yhtiöihin asti turvaamaan sähköjärjestelmän toimintaa.

Älykkäiden järjestelmien, sekä myös automaation avulla tehdyn kysyntäjoustopuoli on se, että ne eivät vaadi välttämättä kuluttajalta itseltään minkäänlaisia toimenpiteitä. Yhteiskunta kehittyy nopeasti, eivätkä kaikki käyttäjät välttämättä pysy kehityksen mukana. Siinä missä nuoret sukupolvet käyttävät suvereenisti uusinta teknologiaa, vanhemmat henkilöt eivät välttämättä uudistuksia kaipaa. Kaikki sähköverkon käyttäjät ovat kuitenkin tärkeitä, sillä mikäli halutaan saavuttaa mahdollisimman optimaalinen sähköjärjestelmän tila, tulisi käyttäjien osata tehdä oikeita ratkaisuja. Osa käyttäjistä varmasti hallitsee kodin energianjärjestelmän operoinnin, mutta osa ei välttämättä osaa, eikä kaikkia välttämättä edes kiinnosta koko asia. Näin ollen on hyvä, että älykkäiden menetelmien ja teknologioiden avulla voidaan valjastaa sellaisetkin kotitaloudet sähköjärjestelmän uudistamiseen, jotka muuten jäisivät väistämättä kehityksen ulkopuolelle.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ensimmäiseksi tässä työssä pyrittiin selvittämään, mikä on Suomessa käytettävien säätösähköteknologioiden nykytila. Säätösähköteknologioihin tehdyn katsauksen perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä suurin osa kotimaisesta säätösähköstä tuotetaan vesivoiman avulla. Sekä Laine diplomityössään (Laine 2011) että Fingrid tiedotteessaan (Fingrid 2018) toteavat, että taajuusohjatusta käyttöreservistä noin 80 % on vesivoimaa. Tuloksen pätevyyttä tukee myös se fakta, että Laineen selvitys perustui vuoden 2009 aineistoon, kun taas Fingridin aineisto oli vuodelta 2018. Näin ollen vesivoiman osuus on pysynyt lähestulkoon samansuuruisena miltei kymmenen vuoden ajan.

Suomessa käytetään myös lauhdevoimaa säätövoimana. Sen avulla voidaan turvata sähköntuotantoa sellaisina ajankohtina, jolloin muu sähköntuotanto ei kykene vastaamaan kysyntään. Nopeisiin säätötarpeisiin se ei kuitenkaan kykene reagoimaan (Aalto et al. 2012), ja se käyttää fossiilisia energianlähteitä polttoaineena, kivihiilen ollessa edelleen merkittävin energianlähde (Energiateollisuus 2023b).

Säätövoimaa on lisäksi saatavilla yhteispohjoismaisesta synkronijärjestelmästä. Suomen sähköjärjestelmä on osana taajuuden vakautus- ja palautusreservejä, jotka kompensoivat sähköjärjestelmän taajuusmuutoksia sekä verkosta hetkellisesti irtoavia kuormia. Reservien lisäksi Suomi toimii osana säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoita (Fingrid 2023j). Fingridillä on myös käytössään varavoimalaitoksia, sekä omia, että käyttöoikeusvaravoimalaitoksia. Niitä käytetään, mikäli markkinoilta ei ole saatavilla säätösähköä (Fingrid 2023n). Lisäksi Suomessa on käytössä lakiin perustuva tehoreservi, joka ei kuitenkaan ole tällä hetkellä toiminnassa (Energiavirasto 2023b).

Toiseksi tässä työssä pyrittiin selvittämään, minkälaisia haasteita säätösähköteknologiat kohtaavat tulevaisuudessa. Vesivoiman ja lauhdevoiman osalta voidaan sanoa, että on hyvin epätodennäköistä, että kumpikaan tulee lisääntymään. Vesivoiman haasteena on sen ympäristövaikutukset (Energiateollisuus 2023g), lauhdevoiman sen rajattu kapasiteetti, säätövoiman hitaus (Aalto et al. 2012) sekä ympäristön kannalta haitalliset polttoaineet (Energiateollisuus 2023b).

Säätövoimaa on varmasti jatkossa saatavilla yhteispohjoismaisesta synkronijärjestelmästä, mutta uudet ja vasta rakenteilla olevat sähköyhteydet pohjoismaiden, Iso-Britannian ja Keski-Euroopan välillä tulee kuitenkin huomioida. Norja on lisännyt siirtokapasiteettiaan pohjoismaiden ulkopuolelle (Statnett 2023a, Statnett 2023b) joten voi olla, että Suomelle elintärkeää tuontisähköä ei ole saatavilla yhtä paljon kuin aikaisemminkin. Tuleva Aurora Line -yhteys tulee kuitenkin helpottamaan Suomen ja Ruotsin välistä sähkönsiirtoa (Fingrid 2023a).

Tulevaisuudessa uusille kotimaisille säätösähköteknologioille on varmasti kysyntää. Esimerkiksi Carunalla ja Fortumilla on käytössään yhteinen sähkövarasto, jota voidaan käyttää paitsi huolto- ja vikatilanteiden varalla, mutta myös osana säätösähkömarkkinoiden kapasiteettia (Caruna 2020).

Lisäksi lisääntyvä tuulivoiman määrä mahdollistaa myös tuulivoiman hyödyntämisen säätösähkömarkkinoilla. Tuulivoimayhdistyksen mukaan vuoden 2022 loppuun mennessä tuulivoiman kapasiteetti oli 5677 MW, jolla tuotettiin 11,5 TWh energiaa (Tuulivoimayhdistys 2023). Jos kaikki suunnitteilla olevat tuulivoimalahankkeet toteutuisivat, nousisi sekä kapasiteetti että sähköntuotanto yli kymmenkertaiseksi nykyisestä. Vaikka Fingrid toteaa, että tuulivoiman säätökapasiteettia ei tällä hetkellä käytetä paljoa, on tuulivoiman avulla kuitenkin teknisesti mahdollista osallistua jokaisen reservilajin ylläpitämiseen (Fingrid 2022).

On kuitenkin selvää, että perinteiset säätösähköteknologiat eivät kykene tarjoamaan entistä monipuolisemmalle sähköjärjestelmälle tarpeeksi säätövoimaa. Näin ollen uudet säätömenetelmät ovat elintärkeitä. Kysyntäjoustopuolella voidaan vastata moniin sähköjärjestelmän haasteisiin (Jordehi 2019). Kotitaloudet, julkiset palvelun tuottajat sekä teollisuuden yritykset voivat tasapainottaa sähköjärjestelmän tilaa muuttamalla kysyntänsä ajankohtaa (Heffron et al. 2020). Kysyntäjoustopuolella älykkäitä energiajärjestelmiä ja älykkäitä sähköverkkoja tarvitaan sekä kehittyvät yhteiskunnan ohjaamiseen, että ilmastotavoitteiden saavuttamiseen (Dincer & Acar 2017).

10 YHTEENVETO

Suomessa, kuten myös muissa pohjoismaissa ja muualla Euroopassa, sähköjärjestelmä on murrosvaiheessa. Tulevaisuudessa investoidaan yhä enemmän uusiutuviin energialähteisiin globaalien ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Samalla kuitenkin aiheutetaan sähköjärjestelmälle merkittäviä haasteita. Uusiutuvat energialähteet, kuten tuuli- ja aurinkoenergia, ovat alttiita säätilojen vaihteluille ja täten niiden ennustettavuus on verrattaen heikkoa. Kun näiden sähköntuotantomuotojen kuitenkin odotetaan tuottavan yhä suurempi osa yhteiskunnan käyttämästä sähköstä, sähköjärjestelmään tarvitaan varajärjestelmä siltä varalta, ettei uusiutuvista energialähteistä saadakaan sitä tehoa, kun on arvioitu. Lisäksi sähköjärjestelmän on otettava huomioon suurissa tuotantolaitoksissa mahdollisesti tapahtuvat häiriöt, jolloin sähköverkosta saattaa hetkellisesti kadota suurikin tuotantokapasiteetti. Tällaisten tilanteiden varalle Suomen sähköjärjestelmä turvaa erilaisiin säätösähköteknologioihin.

Sähköjärjestelmän tehtävänä on ylläpitää sähkön häiriötön kulku tuottajien ja kuluttajien välillä. Euroopan sähköjärjestelmän taajuuden nimellisarvoksi on asetettu 50 Hz, jonka sallittu vaihteluväli on 0,1 Hz. Säätösähkön avulla pyritään reagoimaan sähkön tuotannon ja kulutuksen vaihteluihin ja ylläpitämään näiden välistä tasapainoa. Säätötarvetta ilmenee yleensä silloin, kun sähköä ei pystytä tuottamaan yhtä paljon kuin sitä kulutetaan.

Säätöjärjestelmän tasapainotilan ylläpitämistä varten sähköjärjestelmän järjestelmävaraavat hyödyntävät automaattisia ja manuaalisia reservejä, joiden avulla voidaan reagoida nopeasti sekä sähköverkon taajuuden vakauttamiseksi että palauttamiseksi. Tällä hetkellä Suomessa käytetään säätösähkön tuotannossa vesivoimaa ja lauhdevoimaa. Fingridillä on myös sekä omia että käyttöoikeussopimuksella toimivia varavoimalaitoksia, jotka voidaan käynnistää tarpeen vaatiessa.

Lisäksi sähköä voidaan ostaa säätötarpeisiin ulkomailta. Suomi on riippuvainen tuontisähköstä, sillä noin viidennes Suomen sähkönkulutuksesta katetaan muista pohjoismaista tuodulla sähköllä. Suomi kuuluu Nord Pool –sähköpörssiin, jossa käydään sähkökauppaa Euroopan alueella. Lisäksi Suomi muodostaa yhdessä Ruotsin,

Norjan ja Itä-Tanskan kanssa yhteispohjoismaisen synkronijärjestelmän, joka yhdistää maiden väliset sähköjärjestelmät.

Vaikka sähköjärjestelmä tulee kokemaan monia muutoksia tulevaisuudessa, säätösähkön tarve ei tule katoamaan vaan päinvastoin, sitä tarvitaan entistä enemmän. Tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannossa tulee kasvamaan yhä enemmän, kuten myös ydinvoiman osuus lisääntyy. Samaan aikaan säätösähkönä käytettävän vesivoiman tuotantokapasiteettia on vaikeaa lisätä. Näin ollen tarvitaan uusia mekanismeja sähköjärjestelmän toiminnan ylläpitämiseksi.

Tulevaisuudessa sekä kuluttajat että yhteiskunnan infrastruktuurit kykenevät osallistumaan yhä enemmän sähköverkon toimintaan. Kuluttajille, niin yksityisille kotitalouksille, julkisille palveluntuottajille kuin teollisuuden yrityksillekin, tarjotaan mahdollisuus reagoida omaan sähkön kulutukseen esimerkiksi kysyntäjouston avulla. Yhteiskunnan peruspalveluita tulee yhdistämään älykkäät sähköverkot, jotka yhdessä älykkäiden energiajärjestelmien kanssa muodostavat joustavia, energiatehokkaita ja ympäristöystävällisiä kokonaisuuksia.

11 LÄHDELUETTELO

Aalto, A., Honkasalo, N., Järvinen, P., Jääskeläinen, J., Raiko, M., Sarvaranta, A., 2012. Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf [viitattu 17.1.2023]. 124 s.

BCDC Energia, 2023. Energiaennuste: Aurinkoa ja tuulta kilowattitunteina [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.bcdcenergia.fi/energiasaa/> [viitattu 20.1.2023].

Byman, K., Nordling, J., Koebe, C., Lindberg, A., Isaksson, P., 2016. Future Electricity Production in Sweden [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-el/201705-iva-vagvalel-framtidens-elproduktion-english-c.pdf> [viitattu 18.1.2023]. 44 s.

Caruna, 2020. Fortumin ja Carunan akkuvarasto parantaa sähköjärjestelmän luotettavuutta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://caruna.fi/ajankohtaista/fortumin-ja-carunan-akkuvarasto-parantaa-sahkojarjestelman-luotettavuutta> [viitattu 20.1.2023].

Caruna, 2017. Vuosiraportti 2017 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://caruna.fi/ajankohtaista/fortumin-ja-carunan-akkuvarasto-parantaa-sahkojarjestelman-luotettavuutta> [viitattu 15.1.2023]. 175 s.

Danish Energy Agency, 2022. Annual and monthly statistics [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ens.dk/en/our-services/statistics-data-key-figures-and-energy-maps/annual-and-monthly-statistics> [viitattu 17.1.2023]

Dincer, I., Acar, C., 2017. Smart energy systems for a sustainable future. Applied Energy, 194, s. 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.058>

Eles, 2016. Slovenia's transmission network [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.eles.si/en/slovenias-transmission-network> [viitattu 15.1.2023].

Energiateollisuus, 2023a. Energiavuosi 2022 Sähkö [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf [viitattu 17.1.2023].

Energiateollisuus, 2023b. Lauhdevoima [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/lauhdevoima> [viitattu 19.1.2023].

Energiateollisuus, 2023c. Sähköpörssin ammattisanasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://energia.fi/files/1149/Sahkoporssin_ammattisanasto.pdf [viitattu 19.1.2023]. 3 s.

Energiateollisuus, 2023d. Sähköntuotanto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto> [viitattu 19.1.2023].

Energiateollisuus, 2023e. Sähköverkkoyhtiöt [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiot> [viitattu 19.1.2023].

Energiateollisuus, 2023f. Säättövoima – säädettävää sähköntuotantoa [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima> [viitattu 19.1.2023].

Energiateollisuus, 2023g. Vesivoimalla eniten uusiutuvaa sähköntuotantoa [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima> [viitattu 19.1.2023].

Energiavirasto, 2022. Tehoreservi turvaa sähkön toimitusvarmuutta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/tehoreservi-turvaa-sahkon-toimitusvarmuutta> [viitattu 20.1.2023].

Energiavirasto, 2023a. Sähkön vähittäismarkkinat [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat> [viitattu 20.1.2023].

Energiavirasto, 2023b. Toimitusvarmuus [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/toimitusvarmuus> [viitattu 19.1.2023].

ENTSO-E, 2023. Interconnected Europe [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.entsoe.eu/regions/> [viitattu 17.1.2023].

ENTSO-E, 2019. Interconnected network of Northern Europe [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/maps/2019/Map_Northern-Europe-3.000.000.pdf [viitattu 17.1.2023].

EPV Energia, 2023. Pyhäsalmen kaivokseen pumppuvoimalaitos [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.epv.fi/project/pyhasalmen-kaivokseen-pumppuvoimalaitos/> [viitattu 17.1.2023].

Eurooppa-neuvosto, 2023. Ilmastonmuutos: mitä EU tekee? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/> [viitattu 20.1.2023].

Fingrid, 2018. Vesivoiman rooli sähköjärjestelmän tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.kemijoki.fi/media/fingrid_-muistio_2018_-vesivoiman-rooli-sahkojarjestelman-tuotannon-ja-kulutuksen-tasapainottamisessa.pdf [viitattu 18.1.2023]. 5 s.

Fingrid, 2022. Tuulivoiman osallistuminen reservimarkkinoille [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/tuulivoima-reservimarkkinoilla.pdf> [viitattu 18.1.2023]. 14 s.

Fingrid, 2023a. Aurora Line [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/hankkeet/aurora-line/> [viitattu 17.1.2023].

Fingrid, 2023b. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023c. Fingrid on myynyt omistuksensa Nord Poolista [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/fingrid-on-myynt-omistuksensa-nord-poolista/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023d. Johdanto sähkömarkkinoihin [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat-> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023e. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito [verkkodokumentti]. Saatavissa; <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023f. Kysyntäjousto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pilottihankkeita/kysyntajousto/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023g. Mitä tapahtuu, jos Olkiluoto 3 ei pysty syöttämään sähköä kantaverkkoon [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/olkiluoto-3-kantaverkkoon/Jos-Olkiluoto-irtoaa-verkosta/> [viitattu 20.1.2023].

Fingrid, 2023h. Nopea taajuusreservi (FRR) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023i. Pohjoismainen sähköjärjestelmä ja liittynät muihin järjestelmiin [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liittynnat-muihin-jarjestelmiin/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023j. Reservimarkkinat [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023k. Suomen sähköjärjestelmä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023l. Säättö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko-ja-saatokapasiteettimarkkinat/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023m. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/#tekniset-vaatimukset> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023n. Tehoreservipalvelu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/tehoreservi/> [viitattu 19.1.2023].

Fingrid, 2023o. Varavoimalaitokset [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimalaitokset/> [viitattu 19.1.2023].

Gallagher, L., Ross, E., 2021. Chapter 19 – Empowering consumers to deliver flexible demand. Variable Generation, Flexible Demand, s. 425–449. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823810-3.00008-X>

Heffron, R., Körner, M-F., Wagner, J., Weibelzahl, M., Fridgen, G., 2020. Industrial demand-side flexibility: A key element of a just energy transition and industrial development. Applied Energy, 269, 115026. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115026>

International Hydropower Association, 2022. Pumped hydro [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> [viitattu 20.1.2023].

International Trade Administration, 2022. Denmark – Country Commercial Guide [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/denmark-renewable-energy-products> [viitattu 20.1.2023].

IRENA, 2018. Power system flexibility for the energy transition [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf [viitattu 1.2.2023]. 48 s.

Jordehi, A. R., 2019. Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, s. 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.054>

Juopperi, H., 2022. Euroopan syvin kaivos Pyhäjärvellä halutaan muuttaa tahkoamaan sähköä – ennen pumppuvoimalaa ei nähty kannattavana, nyt tilanne on toisin [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-12593341> [viitattu 17.1.2023].

Laine, J., 2011. Tasehallinnan kehittäminen Suomen sähkömarkkinoilla. Diplomityö. Lappeenranta tekninen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikka. Lappeenranta. 109 s.

Lund, H., 2014. Renewable energy systems: A smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions. Vol 2nd ed. Burlington: Academic Press, 362 s. ISBN 9780124104235.

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., Mathiesen, B., 2017. Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, s. 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>

Lund, P. D., Lindgren, J., Mikkola, J., Salpakari, J., 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews, 45, s. 785–807.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>

Motiva, 2021a. Pienvesivoima [verkkodokumentti]. Saatavissa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima/pienvesivoima [viitattu 20.1.2023].

Motiva, 2021b. Vesivoima [verkkodokumentti]. Saatavissa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima [viitattu 20.1.2023].

Motiva, 2022. Vesivoimateknologia [verkkodokumentti]. Saatavissa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima/vesivoimateknologia [viitattu 20.1.2023].

Nasdaq, 2022. EPSO-G increased its stake in TSO Holding, the indirect operator of the Nord Pool power exchange [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://view.news.eu.nasdaq.com/view?id=b04b2eca0eca8f4f4de6c5d649aac04a0&lang=en> [viitattu 17.1.2023].

Nord Pool, 2020a. About us [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/> [viitattu 20.1.2023].

Nord Pool, 2020b. Day-ahead market [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Day-ahead-market/> [viitattu 20.1.2023].

Nord Pool, 2020c. Intra-day market [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Intraday-market/> [viitattu 20.1.2023].

Nord Pool, 2023. Market data [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/#/nordic/map> [viitattu 17.1.2023].

Ollikka, K., 2017. Miten sähkömarkkinat toimivat? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/> [viitattu 20.1.2023].

Partanen, J., Viljainen, S., Lassila, J., Honkapuro, S., Salovaara, K., Annala, S., Makkonen, M., 2015. Sähkömarkkinat – opetusmoniste [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/3719734-Sahkomarkkinat-opetusmoniste.html> [viitattu 20.1.2023]. 87 s.

Pöyry, 2018. Älykäs kaupunkienergia [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://energia.fi/files/2862/Alykas_kaupunkienergia_LOPPURAPORTTI_20180614.pdf [viitattu 1.2.2023]. 60 s.

S-ryhmä, 2021. S-ryhmä aurinkosähkön ykkönen – suurtuotanto jo selvittelyssä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://s-ryhma.fi/uutinen/s-ryhma-aurinkosahkon-ykkonen-suurtuotanto-jo-selv/4owVZajxpLnVQjTjrxwBCy> [viitattu 20.1.2023].

Statistics Sweden, 2022. Electricity supply and use 2001–2021 (GWh) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/energy-supply-and-use/annual-energy-statistics-electricity-gas-and-district-heating/pong/tables-and-graphs/electricity-supply-and-use-20012021-gwh/> [viitattu 17.1.2023].

Statistisk sentralbyrå, 2023. Electricity [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ssb.no/en/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet> [viitattu 19.1.2023].

Statnett, 2023a. NordLink [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.statnett.no/en/our-projects/interconnectors/nordlink/> [viitattu 17.1.2023].

Statnett, 2023b. North Sea Link [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.statnett.no/en/our-projects/interconnectors/north-sea-link/> [viitattu 17.1.2023].

Suomen Tuulivoimayhdistys, 2023. Tuulivoimalat Suomessa [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa> [viitattu 17.1.2023].

Tilastokeskus, 2022. Energian hankinta ja kulutus [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://stat.fi/tilasto/ehk> [viitattu 19.1.2023].

Vattenfall, 2023. Vesivoima [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/vesivoima/> [viitattu 20.1.2023].