

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jesse Mansikkamäki

**SÄÄTÖVOIMA SUOMESSA JA
SÄÄTÖVOIMAKAPASITEETIT POHJOISMAISSA**

Kandidaatintyö

Työn tarkastaja:

Tutkijatohtori Juha Haakana

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jesse Mansikkamäki

Säätövoima Suomessa ja säätövoimakapasiteetit Pohjoismaissa

Kandidaatintyö

5.2.2021

36 sivua, 11 kuvaa, 2 taulukkoa

Työn tarkastaja: Tutkijatohtori Juha Haakana

Hakusanat: Säätövoima, Pohjoismainen sähköjärjestelmä, Reservivoima, Varavoima, Kysyntäjousto, CHP, Energiavarastot, Energialähteet

Suomen valtion tavoite saavuttaa hiilineutraalius energiajärjestelmässä vuoteen 2035 mennessä on saanut aikaan energiamurroksen, jolla on oma vaikutuksensa sähköjärjestelmän säädettävyyteen. Tässä työssä käydään läpi niin Suomen kuin muunkin Pohjoismaisen sähköjärjestelmän säädettävyyttä ja säätövoimakapasiteetteja sekä yleisellä tasolla voimalaitoksia ja energialähteitä. Työssä tarkastellaan myös Suomen reservi- ja varavoiman tilaa sekä poistunutta kapasiteettia. Tämä kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja tilastanalyysinä käymällä läpi vuosien 2010–2020 tilastodataa voimalaitoskapasiteeteista ja sähkön tuotannosta sekä tulevaisuuden näkymiin säätövoiman kannalta.

Energiamurroksen seurauksena fossiilisilla polttoaineilla käyvien voimalaitosten tuotanto ajetaan alas ja korvaava tuotantokapasiteetti korvataan uusiutuvilla ja vähäpäästöisillä tuotantomuodoilla. Uusien tuotantomuotojen ongelmana on monesti niiden heikko säädettävyys toisin kuin monilla fossiilisia polttoaineita käyttävillä laitoksilla. Uusiutuvien energialähteiden vaihteleva tuotanto voi luoda haasteita energia- ja tehovajeen näkökulmasta, jolloin sähkön kysynnän joustava rajoittaminen voi tulla kysymykseen.

Fossiilisen säätövoiman korvaaminen puhtaammilla energiamuodoilla ja uusilla teknologioilla on mahdollista. Fossiilisten polttoaineiden poistuessa käytöstä, Suomen energiajärjestelmän monipuolisuus voi supistua ja mahdollisesti aiheuttaa tulevaisuudessa riippuvuutta joistakin energialähteistä. Energiavarastoilla ja muilla tulevaisuudessa hyödynnettävillä smart grid -ratkaisuilla voidaan joustavasti huolehtia säädettävyydestä niin sähkön kuin lämmönkin osalta.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Degree Program in Electrical Engineering

Jesse Mansikkamäki

Balancing power in Finland and capacity in Nordic countries

Bachelor's Thesis

5.2.2021

36 pages, 11 figures, 2 tables

Thesis Examiner: Postdoctoral researcher Juha Haakana

Keywords: Balancing power, Nordic electricity system, Reserve power, Backup power, Demand response, CHP, Energy storages, Energy resources

The goal of the Finnish government to achieve carbon neutrality in energy systems by 2035 has brought energy transition which has effects in electricity systems' regulating capabilities. In this thesis both Finland and Nordic's regulating capabilities and capacities in electricity system and in general level powerplants and energy resources are examined. This bachelor's thesis is a literature review and statistical data analysis of powerplant capacities and electricity generation from years 2010–2020 and future views in terms of balancing power. The thesis was done as a literature review and statistical analysis by studying powerplant capacities and electricity generation from years 2010–2020 and future views in terms of regulating power.

As a result of energy transition, powerplants generation ran with fossil fuels is run down and substituted with renewable and low emission electricity generation. The issue with new generation is their low regulation unlike many fossil-based powerplants. Renewable energy is very variable by nature and will pose challenges in energy and power shortfall point of view, in which case flexible demand limitation must be considered.

Balancing power generated in fossil fuels is possible to compensate with cleaner energy sources and new technologies. Abandoning the use of fossil fuels, the Finnish energy system's versatility could diminish and possibly cause dependence on some energy sources in the future. With energy storages and other future smart grid solutions, it is possible in flexible way to take care the balancing/adjustability in electric and heat energy systems.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|-----------|
| Tiivistelmä | 1 |
| Abstract | 2 |
| Sisällysluettelo | 3 |
| Lyhenneluettelo | 4 |
| 1. Johdanto | 5 |
| 2. Sähköjärjestelmän säädettävyys | 6 |
| 2.1 Säättövoima | 6 |
| 2.2 Reservivoima | 7 |
| 2.3 Tehoreservi | 8 |
| 2.4 Varavoima | 8 |
| 2.5 Kysyntäjousto | 9 |
| 3. Suomen voimalaitoskapasiteetti | 11 |
| 3.1 Voimalaitostekniikka | 11 |
| 3.2 Nykyiset voimalaitokset | 12 |
| 3.3 Poistuneet voimalaitokset | 14 |
| 3.4 Voimalaitosprojektit | 14 |
| 4. Energiajärjestelmän tulevaisuus | 16 |
| 4.1 Energiamuodot säättövoimana | 16 |
| 4.2 Energian varastointi osana säättövoimaa | 19 |
| 4.3 Voimalaitokset tulevaisuudessa | 21 |
| 4.4 Energiahuoltovarmuus | 22 |
| 5. Pohjoismainen sähköjärjestelmä | 24 |
| 5.1 Sähkön tuotanto | 24 |
| 5.2 Pohjoismaiden voimalaitoskapasiteetit | 25 |
| 5.3 Pohjoismaisen sähköjärjestelmän tulevaisuus | 27 |
| 6. Yhteenveto | 29 |
| Lähdeluettelo | 31 |

LYHENNELUETTELO

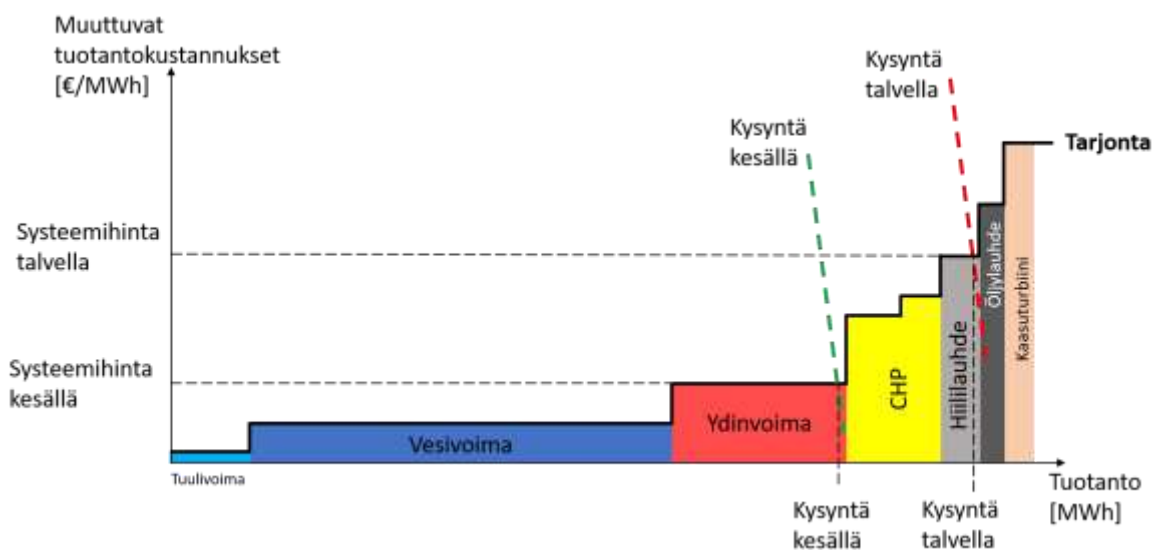
| | |
|---------|---|
| aFFR | Automaattinen taajuudenhallintareservi |
| CCS | Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi |
| CHP | Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto |
| ENTSO-E | Eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö |
| FCR | Taajuuden vakautusreservi |
| FCR-D | Taajuusohjattu häiriöreservi |
| FCR-N | Taajuusohjattu käyttöreservi |
| FFR | Nopea taajuusreservi |
| FH1 | Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitos |
| FRR | Taajuuden palautusreservi |
| HRSG | Heat Recovery Steam Generator, kombivoimalan jätelämpökattila |
| IEA | International Energy Agency |
| IoT | Esineiden internet |
| mFFR | Käsinohjattu taajuudenhallintareservi |
| OL3 | Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitos |
| SMES | Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto |
| TEM | Suomen työ- ja elinkeinoministeriö |
| VTT | Teknologian tutkimuskeskus |

1. JOHDANTO

Tässä työssä käydään ensin läpi säätö-, reservi- ja varavoiman määritelmiä, tarvetta ja niiden tilaa Suomessa. Seuraavaksi tarkastellaan säätövoiman menneisyyttä ja haen katsausta tulevaisuuteen. Tarkoituksena on selvittää, mistä on tultu tähän päivään ja mikä on suunta, johon ollaan menossa. Tämän jälkeen tarkastelen poistettua tuotantokapasiteettia ja sen vaikutusta verkkoon. Seuraavaksi tarkastelen Pohjoismaisen verkon tilaa ja säädettävyys ominaisuuksia. Lopuksi tarkastelen eri energiamuotojen soveltumista säätövoimaksi korvaamaan fossiiliin polttoaineisiin perustuvaa säätövoimaa. Lopputuloksena tulisi olla selkeä kartoitus Suomen säätövoiman tilasta ja sen tulevaisuudesta.

Nykypäivänä ja tulevaisuudessa tarvitaan säätövoimaa, koska kulutus ja tuotanto eivät kohtaa toisiaan täsmällisesti. Maailmassa monet asiat tapahtuvat nykyään pääosin sähköisesti, joten sähköä tulisi olla aina saatavilla. Ilman varmaa sähköntuotantoa voidaan päätyä sähköpulaan, joka taas johtaa ongelmiin ja mahdollisiin sähkökatkoihin, joilla on vaikutuksia yhteiskunnan toimintaan. Vahvan perusvoiman tueksi tarvitsemme siis vahvan säätövoiman, jolla pystymme kompensoimaan kulutuksen ja tuotannon epäsuhtaa. Halutessamme eroon fossiilisista polttoaineista joudumme miettimään, mitkä energiamuodot voisivat toimia säätövoimana.

Kulutuksen ja tuotannon epäsuhta sekä käytettävät tuotantomuodot vaikuttavat myös sähkön hintaan. Kuvassa 1 on esitetty havainnollistava kuva sähkön hinnan muodostumisesta Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. Pohjoismaisen sähköjärjestelmän laaja vesivoimatuotanto näyttäytyy kuvaajassa leveänä ja matalana palkkina. Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä sähkön systeemihinnan määrittää suurilta osin verkossa olevan vesivarantojen määrä. Tuulivoima on tuotantokustannuksiltaan halvinta ja muutkin uusiutuvat halvempia kuin fossiilisia polttoaineita käyttävät laitokset, jolloin kysyntäkäyrät siirtyisivät vasemmalle, kun halvempien uusiutuvien energialähteiden tuotantoteho kasvaa. Kasvaneen uusiutuvan kapasiteetin myötä, vaadittu tuotantomäärä voidaan saavuttaa halvemmalla eikä erillishiililauhde-tuotantoa tarvitse välttämättä lainkaan käyttää talvella.



Kuva 1. Havainnollistava kuva sähkön hinnan muodostumisesta sähkömarkkinoilla.

2. SÄHKÖJÄRJESTELMÄN SÄÄDETTÄVYYS

Tässä kappaleessa esitellään tutkimukseen liittyvät keskeisimmät termistöt sekä niiden toiminnan kuvaamiset, joita tullaan jatkossa käyttämään. Seuraavien käsitteiden avulla sähköjärjestelmää voidaan säätää ja varmistaa sähkön toimitus mahdollisimman monessa eri tilanteessa. Toiset turvaavat jatkuvan tilan ja toisten avulla varaudutaan erilaisiin virhetilanteisiin.

2.1 Säättövoima

Sähköntuotanto voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: perusvoimaan, säättövoimaan ja vaihtelevaan tuotantoon. Säättövoimana käytetään Suomessa vesivoimaa, CHP-laitoksia, erillistuotantoa sekä aikaisemmin sähkön tuontia Venäjältä. CHP-laitoksissa, Combined Heat and Power eli yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto, polttoaineina toimivat kivihiihi, maakaasu, turve sekä erilaiset puupohjaiset polttoaineet ja puunjalostusteollisuuden tuottamat jäteliemet. Venäjällä sähkö tuotetaan noin 64 prosenttisesti fossiililla polttoaineilla, enimmäkseen maakaasulla, mutta myös kivihieillä ja öljyllä (IEA, 2018).

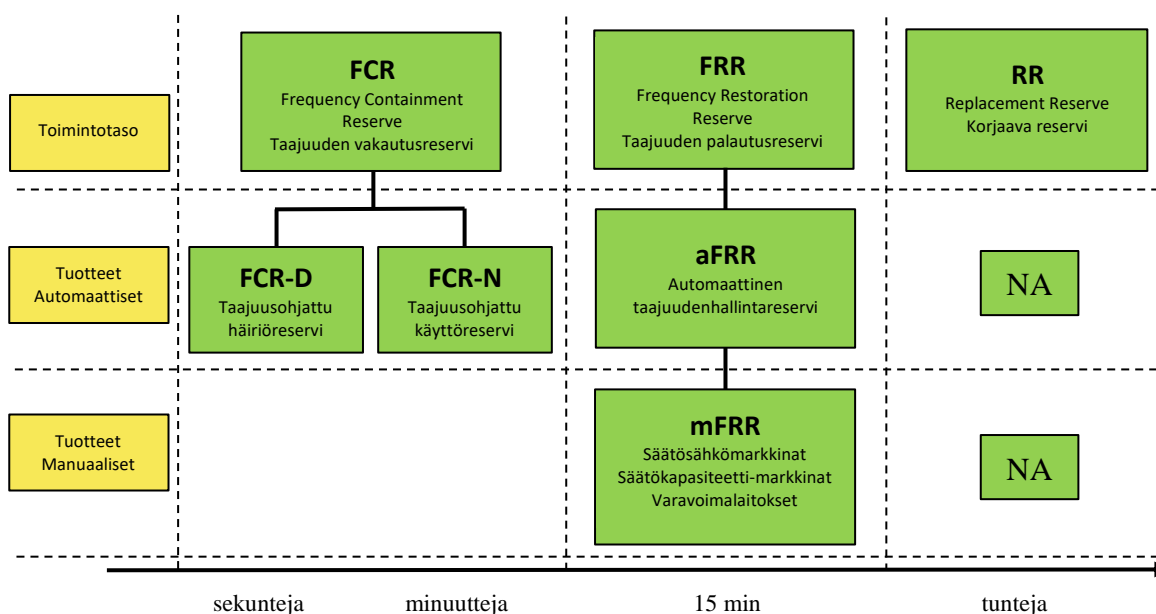
Nykypäivänä ja tulevaisuudessa tarvitaan säättövoimaa, koska kulutus ja tuotanto eivät kohtaa toisiaan täsmällisesti. Säättövoimaa siis tarvitaan kompensoimaan kulutuksen ja tuotannon epäsuhdanteet. Ilman varmaa sähköntuotantoa voidaan päätyä sähköpulaan ja sen aiheuttamiin sähkökatkoksiin, jolloin Suomen toiminta häiriintyy. Nykyisen säättövoiman haittana on se, että se tuotetaan fossiililla polttoaineilla, vesivoima on poikkeus. Nykyisellä säättövoimalla on myös etunsa, Suomen säättövoima on monipuolista eikä siten riippuvainen jostakin tietystä tuotantotavasta tai energialähteestä. Tulevaisuuden haasteisiin siis kuuluu, mitkä energiamuodot voisivat toimia säättövoimana, jotta voisimme vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Perusvoima tarkoittaa tasaista ja ennakoitavaa tuotantoa, joita ovat Suomessa osa vesivoimasta ja CHP-tuotannosta sekä ydinvoima, jota on asennettu 2794 MW. Ydinvoiman etuihin voidaan katsoa sen päästöttömyys, Suomen määräysten tuoma turvallisuus sekä varma taloudellinen vakaus. Ydinvoiman määrä on tulevaisuudessa kasvamassa, kun Olkiluoto 3, OL3, valmistuu. Olkiluoto 3 tehon on ilmoitettu olevan 1500 MW ja sen olisi määrä käynnistyä helmikuussa 2022. Lisäksi Pyhäjoelle ollaan rakentamassa Fennovoiman toimesta Hanhikivi 1, FH1, joka tehon tulisi olla 1200 MW. Hanhikiven tulisi alkaa tuottaa sähköä vuonna 2028, neljä vuotta alkuperäisestä aikataulusta myöhemmin. Mikäli OL3 ja FH1 saadaan joskus käynnistettyä, niin Suomen ydinvoiman kapasiteetti lähes kaksinkertaistuu nykyiseen nähden. (Energiavirasto, 2017c; Fennovoima, 2017). Huippuvoimaa puolestaan käytetään huippukulutuksen aikana, joten sen vuotuinen käyttöaika on lyhyt ja sitä tuotetaan esimerkiksi hiili- ja öljylaitoksissa (Aalto et al. 2012).

Kolmanteen luokkaan, eli vaihtelevaan tuotantoon, kuuluvat muut energiamuodot, kuten tuuli- ja aurinkoenergia. Näiden tuotanto on riippuvainen säästä ja vuodenajasta, joihin ihminen ei voi vaikuttaa. Aina ei tuule eikä paista, ja talvella valoisaa aikaa on vähemmän kuin kesällä. Talvella myös lumi saattaa vaikuttaa aurinkopaneeleista saatavan energian määrään. Näissä energiamuodoissa on kuitenkin myös monia mahdollisuuksia. Tekniikka kehittyä, hyötysuhteet paranevat ja vaihtelevan tuotannon määrä kasvaa tulevaisuudessa.

2.2 Reservivoima

Reservivoimalat ovat jatkuvassa valmiudessa reagoimaan nopeisiin kulutuksen ja taajuuden vaihteluihin. Reservivoimaloina voivat toimia mm. kaasuturbiinit, jotka saadaan käynnistettyä nopeasti tarpeen mukaan. Kuvassa 2 on esitetty Pohjoismaissa käytössä olevat reservilajit, jotka osallistuvat sekä tuotantoon että kulutukseen. Pohjoismaat ovat sopineet yhteisestä reservimäärästä ja jokaisella maalla on maakohtaiset velvoitteet. Kukin maa huolehtii taajuuden säädöstä, mutta Ruotsin kantaverkkoyhtiö Svenska Kraftnät huolehtii Pohjoismaisen verkon taajuuden hienosäädöstä. Reservejä on ylläpidettävä kansallisella tasolla riittävästi, jotta selviydytään myös saarekekäyttötilanteista. Saarekekäytöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa maiden väliset siirtoyhteydet eivät syystä tai toisesta ole käytettävissä ja maan on tultava toimeen omilla voimalaitoksilla.



Kuva 2. Reservilajit (Fingrid, 2017c).

Taajuuden vakautusreservi (FCR) koostuu taajuusohjatusta häiriöreservistä (FCR-D) ja käyttöreservistä (FCR-N). Käyttöreservin tarkoituksena on pyrkiä pitämään taajuus normaali-alueella eli 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjattu käyttöreservi toimii jatkuvana säätäjänä parin minuutin viiveellä ja se kykenee sekä tehonlisäykseen että tehonpudotukseen (ns. symmetrinen säätö). Käyttöreserviä on Suomessa 120 MW ja Pohjoismaissa 600 MW. Taajuusohjattua häiriöreserviä on Suomessa 290 MW ja Pohjoismaissa yhteensä 1450 MW. Häiriöreservi aktivoituu muutamissa sekunneissa tarkoituksenaan vakauttaa taajuus vähintään 49,5 Hz:iin taajuuden laskiessa normaalista taajuusalueesta. Häiriöreservi kykenee vain ylössäätöön eli voimalaitosten tehonlisäykseen tai kuormien tehonpudotukseen.

Taajuuden palautusreservi (FRR) muodostuu automaattisesta taajuudenhallintareservistä (aFRR) sekä säätösähkömarkkinoista ja varavoimalaitoksista (mFRR). Taajuudenhallintareservejä on Suomessa 60–80 MW ja Pohjoismaissa 300–400 MW. aFRR säätää jatkuvasti voimalaitosten ja kulutuskohteiden ohjetehoa Fingridiltä tulevan tehonpyyntösignaalin mukaan parin minuutin viiveellä, tarkoituksenaan palauttaa taajuus nimellisarvoon 50 Hz. Säätösähkömarkkinoilla säätövoimaan kykenevän tuotantolaitoksen omistaja voi tehdä ylös- ja allassäätötarjouksia tarjotuille tunneille, kuitenkin niin että saman tunnin aikana voi tarjota vain toista säätömahdollisuutta.

mFFR on markkinapohjainen, joten sille ei ole antaa selkeää tehomäärää, Suomella on kuitenkin velvoite ylläpitää 880–1100 MW reserviä kyseisessä reservilajissa. mFFR:ssä on erikseen ylös- ja alassäätötarjoukset, jotka aktivoidaan markkinoilla hintajärjestyksessä tekniset reunaehdot huomioiden. mFFR aktivoidaan manuaalisesti 15 minuutissa. Nopealla häiriöreservillä tarkoitetaan varmistettua 15 minuutin ylössäätökapasiteettia, joka siis kuuluu mFFR:än. mFFR:än kuuluu myös varavoimalaitokset, joista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 2.4. Säättökapasiteettimarkkinoilla Fingrid varmistaa, että sen käytettävissä on riittävästi ylössäätötarjouksia, markkinoilla kilpailutus tehdään viikoittain ja reservimyyjän tulee julkistamaan säättökapasiteettitarjouksen aina edellisenä päivänä klo 13.00 mennessä. Säättösähkömarkkinoiden tarkoituksena on korjata tuotannon ja kulutuksen epätasapaino ja siten vapauttaa häiriötilanteessa aktivoituneet FRR- ja FCR-reservit, jotta uuden häiriön sattuessa FRR- ja FCR-reservit voisivat aktivoitua uudelleen.

Edellä mainittujen reservien lisäksi toukokuussa 2020 on otettu käyttöön uusi nopea taajuusreservi (FRR), jolla hallitaan pienen inertian tilanteita. Sähköjärjestelmässä pyöriviin massoihin, eli generaattoreihin, on varastoituneena liike-energiaa, joka vastustaa taajuuden muutoksia, tätä kutsutaan inertiaksi. FRR:n käyttö on tyypillistä keväästä syksyyn ja painottuu viikonloppuihin ja öihin, jolloin inertian määrä on pienimmillään. FRR:stä saatava tehovaste on erittäin nopea suuren alitaajuushäiriön aikana, aktivointiajan ollessa sekunnin molemmin puolin riippuen aktivointitaajuuden poikkeavuudesta normaaliin taajuuteen. Nopean taajuusreservin on arvioitu olevan Pohjoismaissa maksimissaan 300 MW. (Fingrid, 2019a).

2.3 Tehoreservi

Tehoreservien avulla pyritään turvaamaan sähkön toimintavarmuus Suomessa, jos suunniteltu sähkön hankinta ei riitä kattamaan ennakoitua sähkön kulutusta. Suomen kantaverkko-yhtiö, Fingrid Oyj, vastaa tehoreservijärjestelmän hallinnoinnista ja laitosten käynnistämisestä. Energiavirasto määrittää Suomessa tarvittavan tehoreservin määrän, kilpailuttaa reservilaitokset sekä valvoo järjestelmän toimintaa ja lain noudattamista. Tehoreserviin voivat osallistua sekä voimalaitokset että sähkönkulutuksen joustoon kykenevät kohteet.

Tehoreservikaudella 1.7.2017 – 30.6.2020 tehoreserveinä toimi neljä voimalaitosta sekä sähkönkulutuksen joustoon talvikausille kaksi kulutuskohdetta. Tällaisista reservivoimaloista esimerkkinä voisi toimia iso Meri-Porin hiililauhdevoimala, jonka omistaa Fortum Oyj. Meri-Porin voimalaitos asetettiin reserviin vuonna 2015. Kokonaiskapasiteetti edellä mainitulla kaudella on 729 MW, kun taas edelliskaudella se oli 299 MW. (Fingrid, 2020c; Energiavirasto, 2017b)

Tehoreservikaudelle 1.7.2020 – 30.6.2022 tehoreserveinä toimivat puolestaan kolme voimalaitosta: Meri-Pori, Naistenlahti 1 ja Kymijärvi KT, joiden kokonaiskapasiteetti on 611 MW. (Fingrid, 2020c).

2.4 Varavoima

Varavoimalat otetaan käyttöön vain silloin, kun tarvitaan paljon lisää tehoa. Hyvä esimerkki tällaisesta tilanteesta voisi olla kovat talvipakkaset, jolloin sähkölämmitysjärjestelmät kuluttavat paljon enemmän sähköä pyrkimään pitämään lämmön halutunlaisena. Toinen tilanne voisi olla ison voimalaitoksen, kuten ydinvoimalan, kytkeytyminen irti sähköverkosta esimerkiksi teknisen vian vuoksi. Tällöin tehon tarve kasvaa niin paljon, että sen kompensoin-

tiin tarvitaan jotain tehokkaampaa kuin pieniä kaasuturbiineja tai polttomoottoreita. Esimerkkinä tällaisista voimaloista voisi käyttää Forssassa sijaitsevaa isoa 320 MW:n varavoimalaitosta, joka on kaasuturbiinivoimala. Suomessa hätäkäyttöön tarkoitettujen varavoimaloiden kapasiteetti vuonna 2013 oli 1229 MW (Fingrid 2013) ja vuodesta 2018 lähtien 1254 MW (Fingrid 2018).

2.5 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkökäytön siirtämistä ruuhkakulutuksesta hetkeen, jolloin kulutusta on vähemmän. Korkean kulutuksen aikana myös hinnat ovat korkeammat, joten näin voidaan samalla saavuttaa suuriakin säästöjä. Kysyntäjoustolla voidaan hallita tehotasapainoa ja sitä tarvitaankin jatkossa entistä enemmän, kun ydinvoiman ja ajoittaistuotannon määrän lisääntyessä verkossa. Tämä tarkoittaa siis sitä, että ruuhkakulutuksen aikaan kysyntäjousto osallistuvat teollisuusyritykset pienentävät, tai ainakin rajoittavat tuotantoaan, ja sitä kautta pienentää sähkönkulutustaan. Kun riittävän moni yritys tekee tämän, niin kuormitus verkossa laskee ja sähkön saanti muualle saadaan turvattua. Yrityksille maksetaan korvauksia toimiessaan kysyntäjoustopuolella.

Kysyntäjousto osallistuu myös kotitaloudet, jolloin he rajoittavat sähkönkulutustaan. Kotitalouksilla kysyntäjousto voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kodinkonetta tai sähköauton latausta ei käytetä suuren kulutuksen aikaan. Kulutuksen hallinta tapahtuu tyypillisesti automaattisesti perustuen esimerkiksi hintasignaaliin tai taajuuteen. Tulevaisuudessa voidaan hyödyntää myös enemmän IoT-tekniikkaa kodinkoneiden joustokyvyn ja esimerkiksi jääkaapin tai pakastimen kompressorin käyttöhetken hallinnassa. Kotitaloudet voivat kysyntäjoustopuolella alentaa sähkön hankintakustannuksia sekä optimoida kulutustaan esimerkiksi pienaurinkovoimalansa tuotannon mukaan, jolloin aurinkosähkö tulee hyödynnettyä tehokkaasti.

Suomessa suurteollisuus, kuten metsä-, metalli- ja kemianteollisuus, ovat toimineet tehotasapainon ylläpidossa pitkään. Teollisuuden kysyntäjoustopotentiaalista ei ole luotettavia tietoja, mutta arviot vuosilta 2007 ja 2008 ovat 500–1280 MW välillä (Aalto et al. 2012). Tuoreemmassa 2017 tehdyssä arviossa joustopuolella on arvioitu olevan 1500 MW (Marttila et al. 2017). Samassa lähteessä mainitaan, että vuoteen 2030 mennessä potentiaalista uutta joustovaraa olisi saatavilla noin 1000 MW lisää uusien toimijoiden ja prosessien jaksottamisella kulutusseurannan kautta. Uutena asiana ovat pienet yritykset, jotka kokoavat joustokuormaa muista yrityksistä muodostaen näin isomman kokonaisuuden. Näitä yrityksiä voidaan kutsua myös aggregaattoreiksi, kysyntäjoustopuolella voisivat muodostaa rakennusten ja liiketilöiden varavoimakoneista yhteenkoottua joustokuormaa. Pienteollisuusyritykset voivat myös itse kerätä omia joustokuormiaan yhteen ja hyödyntää sitä kysyntäjoustopuolella. Kysyntäjousto osallistuminen edellyttää sopimusta yrityksen ja Fingrid Oyj:n välillä. Alussa se voi myös edellyttää investointeja yritykseltä, mutta pitemmällä aikavälillä se voi olla hyvin kustannustehokas ratkaisu niin yritykselle kuin kansantaloudellekin. (Fingrid, 2017b).

Kysyntäjoustopuolella eräänlaisena sovelluksena voidaan nähdä myös kriittiseen voimalaitokseen liittyvä suojausmenettely, esimerkkinä tällaisesta on OL3:n järjestelmäsuojaus. OL3:n äkillinen irtoaminen verkosta sen koon (1600 MW) vuoksi on merkittävä riski, johon on varauduttu järjestelmäsuojalla. Järjestelmäsuojan tarkoituksena on kytkeä irti teollisuuden kuormaa siten, että kantaverkkoon kohdistuva tehonmuutos on maksimissaan 1300 MW. Järjestelmään tarjouskilvalla 2017 valittujen teollisuuslaitosten kokonaiskulutus on 371 MW ja

valitut kuormat ovat voimassa huhtikuun 2021 loppuun asti voimassa. Valitut kuormat edustavat metsäteollisuuden tuotantolaitoksia sekä kemianteollisuuden tuotantolaitosta. Fingrid kustantaa järjestelmäsuojaan osallistuvien välittömät kustannukset 250 MW saakka ja TVO siitä ylittävät osat sekä markkinaperusteiset korvaukset kuormanhaltijalle. Fingridin maksettavaksi 250 MW:sta arvioidaan olevan noin 1,1 M€ vuodessa. (Fingrid, 2020a).

3. SUOMEN VOIMALAITOSKAPASITEETTI

Tässä kappaleessa perehdytään Suomen voimalaitoskapasiteetteihin. Vuosien 2010–2016 data on saatu Energiavirastolta pyytämällä ja vuodesta 2017 eteenpäin vuosittain tarkastamalla Energiaviraston ylläpitämä Voimalaitosrekisteri (Energiavirasto, 2017c). Tarkastelun kohteena ovat tämänhetkiset voimalaitokset ja niiden tuotantokapasiteetit, vuosien aikana poistettu kapasiteetti sekä eri lähteistä saatavat tiedot uusista voimalaitosprojekteista. Voimalaitosrekisterin tuotantokapasiteetit esittävät laitoksen sähkötehoja.

3.1 Voimalaitostekniikka

Erillistuotantolaitokset voivat olla höyryvoimalaitoksia, moottorivoimalaitoksia tai kaasuturbiinilaitoksia, jotka hyödyntävät tuottamansa höyryn tai savukaasun ainoastaan sähkön tuotantoon. Kaasuturbiinilaitoksissa tämä tarkoittaa savukaasujen päästämistä taivaalle turbiinin jälkeen. Höyryvoimalaitoksissa höyry palautuu lauhduttimen sekä matala- ja korkeapaine esilämmittimien kautta takaisin kattilaan.

CHP-tuotantoa käytetään kaukolämpöverkossa ja teollisuudessa prosessihöyryn tuottamisessa. Kaukolämpölaitos on tavallisesti mitoitettu niin, että 50 % huippulämpötehosta voidaan tuottaa CHP-höyryvoimalaitoksella. Loppu energia voidaan tuottaa harvemmin käynnistettävillä ja polttoainekustannuksiltaan kalliimmilla voimalaitoksilla, kuten huippulämpökeskuksilla, kaasuturbiineilla tai moottorivoimalaitoksilla. Teollisuusprosesseissa lämmöntarve ei vaihtelee merkittävästi vuodenaikojen välillä ja höyryvoimalaitos mitoitetaan tuottamaan kokonaan teollisuusprosessin lämmöntarve. Samalla tuotettu ylijäämä sähkö on helppo myydä verkkoon tai puuttuva sähköteho ostaa verkosta.

CHP-tuotanto vastapainevoimalaitoksessa perustuu pelkästään höyryprosessiin, jossa turbiini tuottaa sähköä ja turbiinista lähtevä höyry ohjataan haluttuun prosessiin esim. lämmönsiirtimen kautta kaukolämpöverkkoon, tuotettu sähköteho on riippuvainen lämpökuormasta eikä sähkön tarvetta voida seurata joustavasti. Väliottolauhdutusvoimalaitoksessa turbiinin välioton kautta voidaan ottaa höyryä haluttuun tarkoitukseen sopivassa paineessa ja lämpötilassa, lopun höyryn paisuessa turbiinissa lauhduttimen paineeseen. Tietyissä laajuudessa tuotetun sähkötehon säätö on mahdollista säätämällä turbiinin läpi virtaavan höyryn määrää, lämpökuormasta riippumatta.

Kaasuturbiiniprosessissa kaasuturbiinista poistuvien kuumien savukaasujen lämpö voidaan ottaa talteen kaasusta veteen lämmöntalteenottokattilassa (HRSG – Heat Recovery Steam Generator) ja hyödyntää höyry halutussa prosessissa esim. höyryn tuottamiseen tai kaukolämpöön (Huhtinen et al. 2008). HRSG-kattilassa voidaan myös käyttää lisäpolttoa, jossa hyödynnetään savukaasujen suurta ilmaylimäärää, koska savukaasujen happipitoisuus on suuri. Brayton-Rankine-kombiprosessissa lämmönsiirtokattilasta hyödynnettävä höyry kierätettäisiin ensin höyryturbiinin kautta, jonka jälkeen höyry hyödynnettäisiin lämmön osalta (Zohuri, 2015). Näin saadaan polttoaineesta synnytetty lämpö hyödynnettyä tehokkaasti.

Kombivoimalaitos koostuu yhdestä tai useammasta kaasuturbiinivoimalaitoksesta tai polttomoottorivoimalaitoksesta, joka on yhdistetty höyrykattilalaitokseen (Langston, 2014). Kaasuturbiinin ja höyryvoimalaitoksen muodostamassa kombilaitoksessa voi olla omat turbiinigeneraattorinsa, jolloin kaasuturbiini voidaan kytkeä irti höyryvoimalasta ja käyttää ta-

vallisena kaasuturbiinina. Toinen vaihtoehto on kytkeä kaasuturbiini, höyryturbiini ja generaattori samalle akselille, jolloin saavutetaan investointisäästöjä. Kaasuturbiinia voi edelleen käyttää yksinään, mutta se vaatii kytkimen höyryturbiinin ja generaattorin välille.

3.2 Nykyiset voimalaitokset

Viimeisimmän Energiaviraston ylläpitämän voimalaitosrekisterin mukaan (26.8.2020), Suomessa on 429 voimalaitosta. Energiavirasto ylläpitää rekisteriä, josta löytyvät noin 1 MW suuruiset voimalaitokset. Voimalaitoksia on niin erillistuotannosta, teollisuuden ja kaukolämmön CHP:stä, vesi-, ydin-, tuuli- ja aurinkovoimasta. Rekisterin laitoksista 137 on vesivoimaa, teollisuus CHP:tä 72 ja kaukolämpö CHP:tä 61 kappaletta, lisäksi rekisterissä on 35 erillistuotantolaitosta.

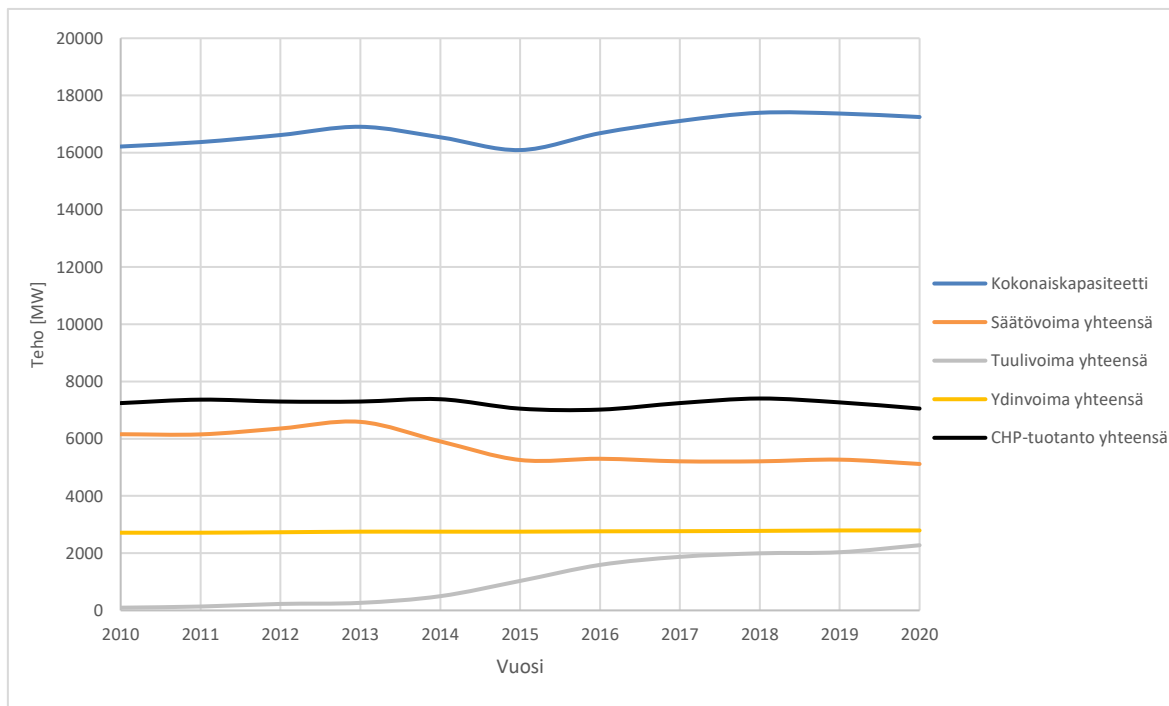
Taulukkoon 1 on koottu vuosien 2010–2020 maksimi tuotantokapasiteetit. Taulukon havainnollistamiseksi kuvissa 2 ja 3 on esitetty samat asiat käyrästöinä.

Taulukko 1. Voimalaitosrekisterin tuotantokapasiteetit 2010–2020, yksikössä [MW].

| | Vuosi | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| Yhteensä | 16215,3 | 16370,9 | 16617,0 | 16905,5 | 16538,8 | 16091,4 | 16681,4 | 17107,7 | 17395,5 | 17368,7 | 17246,7 |
| Säätövoimatehot yhteensä | 6158,4 | 6152,9 | 6358,4 | 6590,3 | 5908,5 | 5257,7 | 5300,2 | 5211,2 | 5211,2 | 5269,2 | 5118,9 |
| Erillistuotanto yhteensä | 3068,0 | 3045,6 | 3220,7 | 3450,7 | 2760,7 | 2092,1 | 2135,1 | 2010,1 | 2010,1 | 2029,5 | 1875,5 |
| Vesivoima yhteensä | 3090,4 | 3107,3 | 3137,7 | 3139,6 | 3147,8 | 3165,6 | 3165,1 | 3201,1 | 3201,1 | 3239,7 | 3243,4 |
| CHP-tuotanto yhteensä | 7246,5 | 7366,9 | 7300,6 | 7300,0 | 7381,4 | 7052,1 | 7018,8 | 7246,8 | 7406,8 | 7270,9 | 7055,1 |
| Teollisuus CHP yhteensä | 2940,5 | 2973,6 | 2930,6 | 2930,6 | 2930,6 | 2907,7 | 2837,3 | 3113,3 | 3113,3 | 3110,5 | 3103,7 |
| Kaukolämpö CHP yhteensä | 4306,0 | 4393,3 | 4370,0 | 4369,4 | 4450,8 | 4144,4 | 4181,5 | 4133,5 | 4293,5 | 4160,4 | 3951,4 |
| Tuulivoimatehot yhteensä | 94,4 | 135,2 | 226,1 | 263,3 | 497,0 | 1029,7 | 1590,0 | 1872,3 | 1994,9 | 2033,6 | 2277,7 |
| Ydinvoimatehot yhteensä | 2716,0 | 2716,0 | 2732,0 | 2752,0 | 2752,0 | 2752,0 | 2764,0 | 2769,0 | 2779,0 | 2794,0 | 2794,0 |

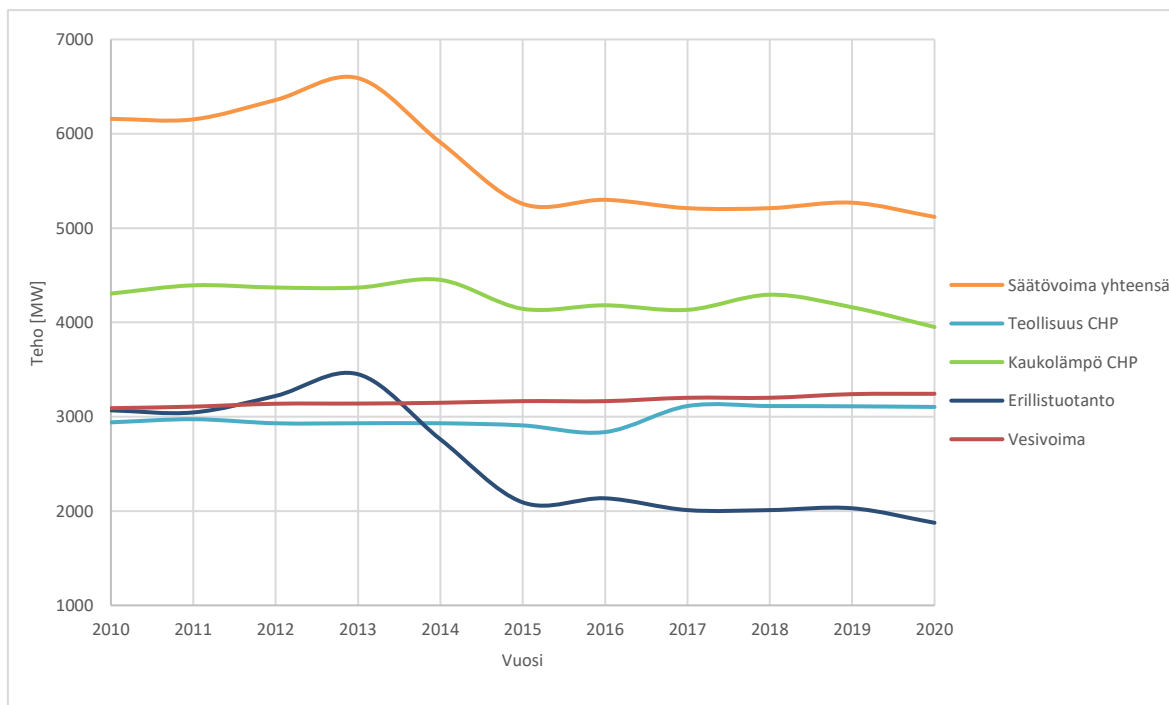
Taulukossa ja kuvissa säätövoimatehoon sisällytetään erillistuotanto sekä CHP-laitosten oma erillistuotanto ja vesivoima. CHP-laitosten oman erillistuotannon määrä on marginaalinen muuhun säätövoimaan nähden. CHP-laitoksilla on pieni säädettävyyden sähköntuotannon kannalta, joka riippuu voimalaitostekniikasta ja sähkön tuottamiseen vaaditun lämmön tarpeesta.

Kuvasta 3 voidaan havaita kokonaiskapasiteetin olleen pääasiassa noususuuntainen, joka selittyy lähes kokonaan tuulivoimakapasiteetin kasvusta. Tuulivoima on kasvanut huomasti 2010-luvulla. CHP-tuotanto on liikkunut vuosikymmenen aikana 7300 MW molemmin puolin, joka johtuu uusien tuotantolaitosten investoinneista ja vanhojen poistumisesta. Erillistuotannon määrästä on vuosien aikana hävinnyt reilu kolmannes, kun taas vesivoima on pysynyt suurin piirtein samoissa.



Kuva 3. Kokonaiskapasiteetin ja pääluokkien kehitys.

Kuvasta 3 nähdään taulukkoa paremmin, että pääasiallinen säätövoima on laskenut huomattavan paljon melko lyhyessä ajassa. CHP-tuotanto ei ole merkittävästi muuttunut, mutta tuulivoimaa on tullut merkittävästi lisää.



Kuva 4. Säätövoiman tarkempi kehitys tuotantomuodoittain.

Kuvasta 4 näemme selkeästi, että erillistuotannon jyrkkä kapasiteetin lasku on vaikuttanut selvästi säätövoimaan.

3.3 Poistuneet voimalaitokset

Suomesta on poistunut vuosien 2010–2020 välisenä aikana kapasiteettia noin 3409 MW, joista noin 426 MW on toteutunut laitoksen kapasiteettia alentamalla. Suurin osa Suomessa poistuneesta kapasiteetista on erillistuotanto-laitoksia, noin 2506 MW. Merkittävin poistettu voimalaitos on Inkoon 1000 MW hiililauhdevoimala. Toinen merkittävä poistuma on Mus-salon voimaloiden 1–3 sulkeminen, yhteensä 316 MW. Muut merkittävät poistuneet erillis-tuotantolaitokset ovat Kristiinan 1–2, yhteensä 452 MW, Tahkoluodon kivihiihivoimala 233 MW sekä Haapaveden 154 MW turvevoimala.

Kaukolämmön CHP-laitoksia on poistunut noin 660 MW ja teollisuuden CHP-laitoksia noin 205 MW. Näistä merkittävimmät ovat kaukolämpölaitokset, kuten Naantalin 1–2 kattiloiden 248 MW, 150 megawattia Lahden Kymijärvi 1 voimalassa sekä Vaskiluodon 3.kattilan 164 MW. Näiden lisäksi Oulusta ja Lahdesta ollaan poistamassa kahta kaukolämpölaitosta vuo-den 2020 paikkeilla, näiden voimaloiden yhteisteho on 110 MW. Fortum on myös poista-massa Espoon Suomenojan voimalaitoksen kattilat 1, 3 ja 6 muutamien seuraavien vuosien aikana. Tämä tarkoittaa 358 megawattia, joista osa on kaukolämpöä ja osa sähkön tuotantoa.

Suomi on päättänyt luopua kokonaan kivihiilestä osana kansallista energia- ja ilmastostrate-giaa. Suomen oli tarkoitus luopua kivihiielen käytöstä lailla vuonna 2030, mutta päätöstä on aikaistettu vuoteen 2029. Lisäksi energiayhtiöitä ollaan kannustamassa tukipaketin avulla luopumaan kivihiielen käytöstä vuoteen 2025 mennessä. Tuki on tarkoitettu jakaa puoliksi uusiutuvalle CHP-tuotannolle ja puoliksi muille tuotantomuodoille ja teknologioille. Kivi-hiilestä luopuminen tulee tarkoittamaan Suomenojan voimalaitoksen lisäksi vielä neljän muun ison voimalaitoksen, joiden primääripolttoaine on kivihiihi, sulkemista. Nämä laitokset ovat Meri-Porin voimalaitos, Hanasaari B, Salmisaari B, Vaskiluoto 2 sekä pienempi Kant-vikin laitos sekä kapasiteettiaan alentaneen Kymijärvi 1. Kivihiilestä luopuminen tarkoittaa yhteensä noin 1577 MW kokonaiskapasiteettia, josta 565 MW on erillistuotantoa ja 1008 MW kaukolämpöä ja loput teollisuus-CHP:tä. Kahdessa muussa voimalaitoksessa kivihiihi toimii sekundääripolttoaineena, joten kyseiset laitokset voivat jatkaa toimintaansa.

Edellä mainittujen voimaloiden lisäksi jotkin voimalat ovat alentaneet kapasiteettiaan tar-kastelujakson aikana yhteensä 426,4 MW edestä. Tällaisia voimaloita ovat mm. Mertaniemi, Porvoo ja Waskiluoto Validation Center. Viimeksi mainittu on alentanut kapasiteettiaan kah-desti; vuonna 2010 erillistuotantokapasiteetti oli 32,4 MW, 2011 kapasiteettia oli vähennetty 22,4 MW ja vuotta myöhemmin lopullinen kapasiteetti oli enää 5,5 MW. Tarkastelun kan-nalta harmilliseksi tämän tekee se, että ensimmäistä vähennystä ei näe Voimalaitosrekisteri-ssä enää myöhemminä vuosina. Porvoon voimalaitoksesta on poistunut 45 MW teollisuus CHP:tä ja Mertaniemestä 64 MW kaukolämpöä. Mertaniemen kohdalla tilastoissa on tapah-tunut muutakin kuin pelkkä kapasiteetin poistuma. Vielä vuonna 2014 Mertaniemen kauko-lämpö kapasiteetti oli 141 MW ja erillistuotantoteho 33 MW. Vuonna 2015 kaukolämpöka-pasiteetti on poistunut kokonaan ja erillistuotantokapasiteetti on noussut 102 megawattiin.

3.4 Voimalaitosprojektit

Vuosien 2010–2020 välisenä aikana Suomeen on rakennettu yhteensä noin 3305 MW uutta voimalaitoskapasiteettia. Merkittävin lisäys on tullut tuulivoimaan, jonka määrä on kasvanut noin 2183 MW. Erillistuotannon kapasiteettia on kasvatettu 457,6 MW, joista merkittävämpi on ollut Forssan 332,6 MW varavoimalaitoksen rakentaminen. Toinen voimalaitos on Raa-heen valmistunut 125 MW voimala. Lisäksi Nurmoon on valmistunut Suomen tämän hetken suurin aurinkovoimala, joka on huipputeholtaan 6 MW, Voimalaitosrekisterissä sen tehoksi

ilmoitettiin 3,6 MW vuonna 2018, jonka jälkeen sen koko on ilmoitettu olevan vain 1 MW. Kaukolämmön CHP-kapasiteetti on kasvanut lähes 380 MW, joista merkittävimmät ovat olleet Naantalin 4.kattila 256 MW ja Vantaan jätevoimala 81,4 MW. Lisäksi Lahteen on valmistumassa 190 MW:n Kymijärvi 3 -biolämpölaite vuoden 2020 aikana. Teollisuuden CHP on kasvanut Äänekosken biotuotetehtaan ansiosta 280 MW.

Suomeen ollaan rakentamassa noin 400 MW edestä uusia kaukolämmön CHP-laitoksia Kymijärvi 3.kattilan lisäksi, joista merkittävin sijaitsee Oulussa, Laanilaan valmistuva biovoimalaitos korvaa Toppila 1 -laitoksen ja tuottaa 70 MW sähköä sekä 175 MW kaukolämpöä. Ämmäsuolle on suunnitteilla 110 MW monipolttoainelaitos kaukolämmön tarpeisiin. Muita voimalaitosprojekteja ovat biolämpölaite Kivenlahdessa 49 MW, geoterminen lämpölaite Otaniemessä 40 MW ja lämpöpumppulaitos Suomenojalla 20 MW. Näiden lisäksi on suunniteltu Rovaniemen Sierilään 44 MW vesivoimalaa Kemijoen varrelle, joka kohtaa vahvaa vastustusta. Laitoksella on vesitalouslupa voimalaitoksen rakentamiselle, mutta myönnetty koneaseman ja luokkuaseman rakennusluvasta on valitettu hallinto-oikeuteen, joten laitoksen lopullisesta kohtalosta ei voi vielä sanoa mitään varmaa.

Saloon on valmistumassa Ekokemin uusi jätteenpolttolaitos vuonna 2021, joka lisää jätteen energiapolton määrää. Määrää voisi lisätä merkittävästikin, koska osa Suomessa syntyvistä jätteistä laivataan Ruotsiin ja Viroon. Tämä johtuu siitä, että laitoksissa poltetaan kotitalous jätteen lisäksi teollisuudessa ja yrityksissä syntyvää jätettä. Geolämpölaitoksien ja lämpövarastojen suunnittelu ja toteutus ovat uudenlaisia investointeja Suomessa. Espoon Koskeloon rakennettu geolämpölaite on yksi esimerkki, Vantaan Varistoon on myös rakenteilla kaukolämpöverkkoon liitettävä geolämpölaite.

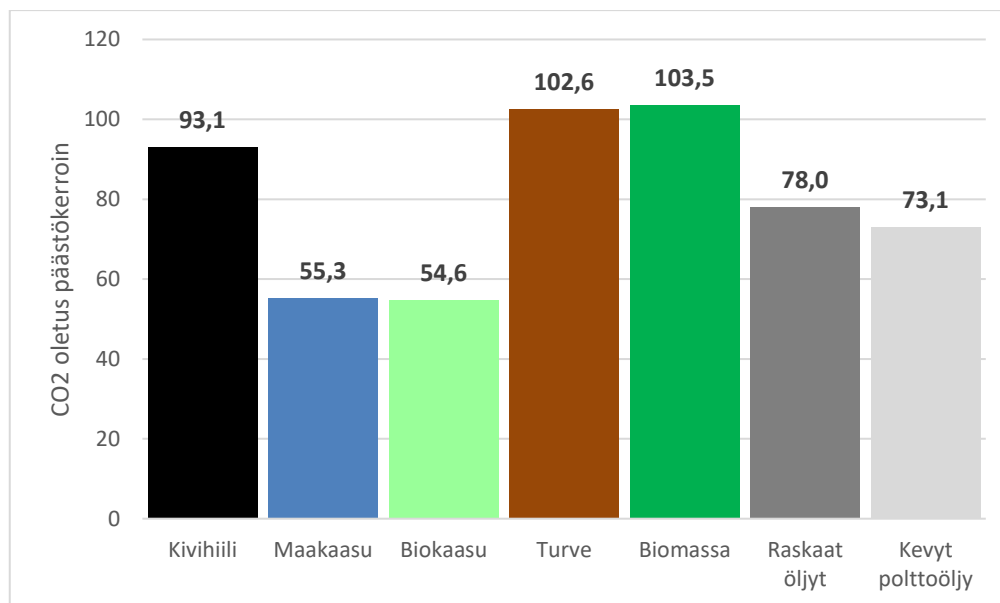
4. ENERGIAJÄRJESTELMÄN TULEVAISUUS

Tulevaisuudessa pyritään pääsemään hiilineutraaliin ja puhtaaseen energiantuotantoon. Suomen energia- ja ilmastotavoitteessa mainitaan, että uusiutuvan energian tuotantoa pyritään nostamaan yli 50 prosenttiin sekä kasvattamaan energiaomavaraisuutta yli 55 prosenttiin 2020-luvulla. Hiilestä halutaan luopua asteittain vuoteen 2029 mennessä, mahdollisesti jopa nopeammassakin aikataulussa. Turpeen käyttö energialähteenä on tarkoitus vähintään puolittaa vuoteen 2030 mennessä ja Suomen tulisi siirtyä hiilineutraaliksi 2035 mennessä. Turpeesta oltaisiin lopullisesti luopumassa 2030-luvun aikana. Näiden lisäksi pyritään puolittamaan tuontiöljyn käyttö 2020-luvun aikana ja nostetaan uusiutuvien polttoaineiden osuutta 40 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Näiden lisäksi pyritään täyttämään EU:n asettamat energia- ja ilmastotavoitteet, joita ovat kasviuonekaasupäästöjen vähentäminen EU:n komission ehdotuksen mukaan 55 prosentilla vuoden 1990 tasosta aiemman 40 % sijaan ja parantaa energiatehokkuutta 27 prosenttia verrattuna 2007 arvioituun kehityspolkuun. (Energiateollisuus, 2017b; TEM, 2017)

4.1 Energiamuodot säättövoimana

Pyrkiessämme vähentämään fossiilisten polttoaineiden ja muiden päästöllisten polttoaineiden käyttöä, joudumme miettimään, miten saamme uskottavasti ylläpidettyä riittävää ja toimivaa säättövoimaa. Säättövoima tuotetaan perinteisesti vesivoimalla ja fossiilisista polttoaineista, joten joudumme keksimään ja kehittämään uusia menetelmiä tuottamaan säättövoimaa. Siirtyessämme entistä enemmän uusiutuviin energiamuotoihin, vanhaa ja fossiilista poistuu tuotannosta. Uusiutuvat energiamuodot syrjäyttävät markkinoilta erityisesti kaasuturbiineihin perustuvaa nopeasti reagoivaa säättövoimaa sekä hitaampia lauhdevoimaloita, koska niiden käyttö ei ole kannattavaa korkeiden tuotantokustannusten takia. Tätä voidaan pitää ongelmallisena, koska juuri tällaisia tuotantomuotoja uusiutuva tarvitsee rinnalleen. Tuotantoa, joka pystyy nopeasti reagoimaan energiantuotannon muutoksiin, sekä tuotantoa, jolla pystytään korvaamaan selkeät tehovajeen hetket.

Kivihielestä luopumisen yhteydessä turpeen käyttö nousee myös keskustelun aiheeksi. Turpeen energiakäytöstä on pääministeri Marinin hallituksen mukaan tarkoitus luopua nopeutella aikataululla niin, että käyttö vähintään puolitetaan vuoteen 2030 mennessä. Turvetta ei ole aiemmin pidetty niin suurena ongelmana kuin kivihieitä, perusteluna on käytetty kotimaisuutta sekä sitä, että turvetta käytetään vähemmän kuin kivihieitä. Vuoden 2018 Tilastokeskuksen raportista (Tilastokeskus, 2019a) käy ilmi, että kivihielellä tuotetaan erillistuotannossa, CHP-tuotannossa ja erillisessä lämmöntuotannossa yhteensä 13 902 GWh. Vastaava luku turpeelle on 12 452 GWh, joten turpeen käyttö ei ole merkittävästi pienempi kuin kivihielellä. Mutta kumpi on lopulta ympäristölle haitallisempi? Tarkasteluun on otettava avuksi Tilastokeskuksen polttoaineluokitus 2020 (Tilastokeskus, 2019b), josta saadaan selville kivihieiden ja turpeen oletuspäästökertoimet, kuva 5.



Kuva 5. Energialähteiden päästökertoimet [t/TJ].

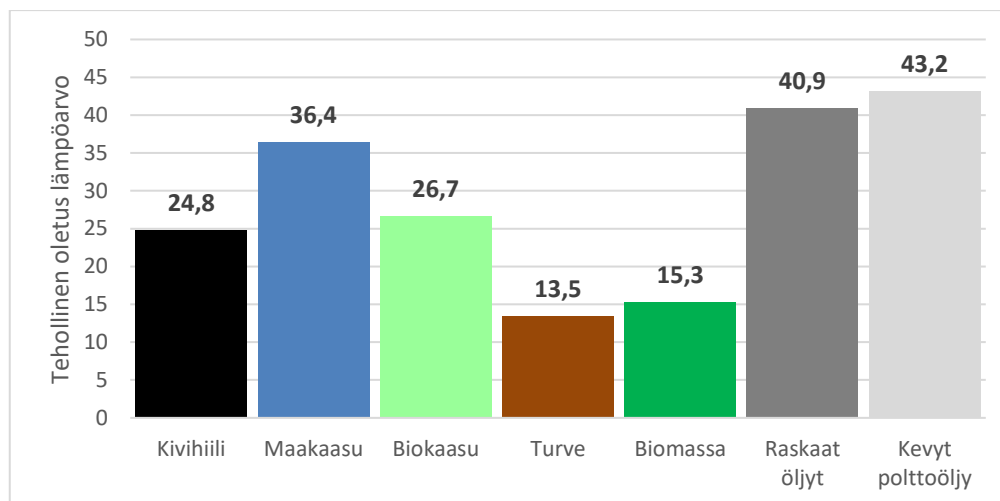
Turpeen kohdalla käytetään keskiarvoa jyrsin-, pala- sekä pelletti- ja brikettiturpeesta. Biomassan kohdalla on myös käytetty keskiarvoa mm. kuori, hake, mäntyöljy ja puunjalostusteollisuuden jäteliemet. Muuntamalla gigawattitunnit terajouleiksi ja kertomalla päästökertoimella saadaan vuoden aikana tuotetut CO₂ -päästöt lähes yhtä suuriksi, ero vain 1,3 %-yksikköä. Kivihiili ja turve ovat siis yhtä suuri ongelma, mutta turpeen kotimaisuus pitää turpeen energiakäytössä kivihiiltä pidempään. Laskenta on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kivihiilen ja turpeen tuottamat CO₂ -päästöt vuonna 2018.

| Vuosi 2018 | Sähkön ja lämmön tuotanto [GWh] | Sähkön ja lämmön tuotanto [TJ] | CO ₂ -kerroin [t/TJ] | CO ₂ -päästöt [kt] |
|------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Kivihiili | 13 902 | 50 047,2 | 93,1 | 4 659,391 |
| Turve | 12 452 | 44 827,2 | 102,6 | 4 599,267 |

Voimalaitosrekisterin mukaan Suomessa on kivihiiltä ensisijaisesti polttoaineenaan käyttävää laitosta 7 kpl ja toissijaisena polttoaineena käyttävää 2 kpl. Ensisijaisten kokonaiskapasiteetti on 1577,2 MW. Ensisijaisia turvevoimaloita on puolestaan 34 kpl ja 15 kpl toissijaisena, ensisijaisten kokonaiskapasiteetti on puolestaan 1622,24 MW.

Kuvasta 6 on esitetty polttoaineiden lämpöarvot, turpeen ja biomassan lämpöarvot on laskettu keskiarvoina samoin kuin kuvassa 5. Turve on lämpöarvoltaan varsin heikko polttoaine verrattuna esimerkiksi kivihiileen, jolloin turvetta on poltettava enemmän kuin kivihiiltä tuottaaksemme saman verran energiaa.



Kuva 6. Energialähteiden lämpöarvot [GJ/t].

Biomassan käyttöä ollaan Suomessa lisäämässä merkittävästi energiantuotannossa. Biomassalla saadaan tuotettua energiaa kotimaisesti, joka lisää puolestaan huoltovarmuutta ja vähentää Suomen riippuvuutta ulkomaisista energialähteistä. Biomassaan käytetään puusta kaikki muu paitsi itse runkopuu eli latvustot, oksat, juurakot, kuoret sekä taimikot, joita saadaan taimikkojen harvennuksessa. Tämä on järkevää, jotta saadaan kaikki mahdollinen puuainekasvatus hyödynnettyä. Biomassan käytöstä käydään kovaa keskustelua sen hiilidioksidipäästöjen osalta, tulisiko puupolttoaineet lukea hiilidioksidia aiheuttaviksi vai ei. Tällä hetkellä niiden käyttö on hiilidioksidineutraalia laskennallisesti, joten energian voi ajatella olevan kestävästi tuotettua, vaikka ne todellisuudessa tuottavatkin päästöjä kuvan 5 mukaisesti. Puut sitovat kasvaessaan itseensä hiilidioksidia ja siksi puun jalostusastetta tulisi kasvattaa, puuta tulisi käyttää enemmän rakentamiseen, jolloin hiilidioksidi sitoutuu pitkäksi ajaksi. Biomassaa voidaan käyttää monissa voimalaitoksissa ja sekapolttaa yhdessä turpeen kanssa. Sekapolttamalla turvetta biomassan kanssa on omat hyötynsä. Turpeen polttamisesta vapautuva rikki sitoo biomassasta vapautuvia pienhiukkasia ja reagoi biomassasta vapautuvan kloorin kanssa muodostaen suolahappokaasua (Pöyry, 2019). Suolahappokaasu ei tiivisty polttokattilan tulistimien lämmönsiirtopinnoille. Näin vältetään polttokattilakorrosiota ja korrosiota esim. savupiipussa.

Vesivoima tulee jatkossakin toimimaan hyvänä säätövoiman lähteenä, mutta sen kapasiteettia ei pystytä Suomessa kovinkaan paljon kasvattamaan. Vesivoiman kapasiteettia voidaan kasvattaa monin paikoin ainoastaan tehonkorotuksin, joita on viime vuosina tehtykin. Kovin pieniä voimaloita tuskin tullaan rakentamaan, vaikka niitä voitaisiinkin rakentaa. Sierilän uusi voimalaitos on ainoa rakennusprojekti, jota ollaan toteuttamassa. Vesivoimaan panostamista ei kannateta kansalaisten ja ympäristöjärjestöjen keskuudessa, niiden ympäristövaikutusten takia. Ympäristövaikutuksilla tarkoitetaan mm. vaikutuksia maisemaan, maaperään ja kalatalouteen.

Tuulivoimaa on Suomessa tällä hetkellä 1880 MW ja sen määrää ollaan kasvattamassa vuoden 2020 mennessä noin 2500 MW:iin, tällä sitovalla tuulivoimatavoitteella pystyttäisiin tuottamaan 6 TWh sähköä (Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2014). VTT:n vuonna 2008 julkaiseman selvityksen mukaan 2500 MW:n tuulivoimakapasiteetti ei aiheuttaisi säätövoimakapasiteettitarpeen lisäystä, säätö voitaisiin hoitaa säätösähkömarkkinoiden kautta. Nykyisen tuulivoiman syöttötariffijärjestelmän katto on tuo kyseinen 2500 MW, joka toimii myös lupauksena, ettei tuulivoimakapasiteettia olisi vuonna 2020 tämän enempää. Tämän voidaan

katsoa konventionaalisen energian tuotannon, kuten ydinvoiman, investointiympäristön suojana. (Salo, 2015). Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisussa syöttötariffijärjestelmää jatketaisiin niin, että vuosina 2021–24 saataisiin 2 TWh uutta kapasiteettia (TEM, 2017 s.88). Aurinkoenergian hyödyntäminen on Suomessa alkanut kasvaa ja vuoden 2016 lopussa pientuotantoa eli alle 1 MW yksiköiden tuotantokapasiteetti oli 27 MW (Energiavirasto, 2017a). Määrä oli yli kolminkertaistunut vuoden 2015 tasoon, joka oli 8 MW. Vuoden 2019 lopussa aurinkosähkön pientuotannon kapasiteetti oli jo 197 MW, kokonaispientuotannon ollessa noin 278 MW (Energiavirasto, 2020). Lisäksi sähköverkkoon kytkemätöntä aurinkosähkökapasiteettia arvioidaan olevan reilu 20 MW asennettuna esim. vapaa-ajan asuntoihin. Aurinkosähkөөn voisi myös sopia syöttötariffijärjestelmä, koska tuotantopotentiaali on täysin vertailukelpoinen Saksaan. Saksassa aurinkoenergiaan on panostettu huomattavasti enemmän, aurinkosähkökapasiteetti oli 41,2 GW vuonna 2016 (IEA, 2017).

Jätteitä hyödynnetään nykyään enemmän energiantuotannossa, suurin syy tähän on vuonna 2016 voimaan astunut kaatopaikkakielto. Kaatopaikkakiellon seurauksena Suomeen on otettu käyttöön 2010-luvulla seitsemän uutta jätteenpolttolaitosta, näiden lisäksi Suomessa on kaksi muutakin jätteenpolttolaitosta. Suomessa on siis yhteensä yhdeksän jätevoimalaa, joiden kapasiteetti on noin 1,7 miljoonaa tonnia. (Pöyry, 2015). Salon jätteenpolttolaitoshankkeen (Lounavoima, 2020) valmistuttua, Suomessa on noin 10 isoa jätevoimalaa sekä useita pienempiä rinnakkaispolttolaitoksia. Jätteillä ja biomassalla voidaan korvata osa fossiilisten polttoaineista, mutta se ei yksistään riitä takaamaan riittävää säätösähköä. Seuraavaksi esitellään muutamia energian varastointiin potentiaalisia menetelmiä, joiden avulla mm. tuuli- ja aurinkoenergiasta saataisiin säädettäväksi.

Fossiilisten polttoaineiden päästöjä olisi mahdollista vähentää merkittävästi hyödyntäen hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, CCS, tekniikkaa. Muiden päästöllisten polttotekniikalla käytettävien energiamuotojen, esim. biomassan käyttökään ei olisi tällöin niin suuressa keskustelussa hiilidioksidipäästöjen laskentatavan osalta kuin mitä se on tällä hetkellä. Suomen voimaloissa ei ole käytössä tällä tekniikalla varustettuja voimalaitoksia, joilla voitaisiin merkittävästi vähentää hiilidioksidipäästöjä. CCS-tekniikan hyödyntämistä suunniteltiin Meri-Porin voimalaitokseen, mutta siitä luovuttiin. CCS-tekniikka huonontaa laitoksen hyötysuhdetta ja on kallis niin investointina kuin tuotanto käytössä, mutta sillä voitaisiin saada pienennettyä hiilidioksidipäästöjä noin 90 %. (VTT, 2011).

4.2 Energian varastointi osana säätövoimaa

Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi erilaisia energian varastointimenetelmiä ja niiden käytettävyyttä. Energian varastointi on kysyntäjouston kanssa tulevaisuuden älykästä smart grid -energiajärjestelmää.

Lämpövarasto

Lämpöenergiaa voidaan varastoida ja myöhemmin hyödyntää kaukolämmön tarpeisiin lämpövarastoissa, joista esimerkkinä toimii Helen Oy:n Mustikkamaalle rakennettava luolalämpövarasto (320 000 m³), jonka pitäisi valmistua vuonna 2021 (Helen, 2019b). Lämpövaraston pystyy Helenin mukaan täyttämään ja purkamaan lämmöstä neljässä päivässä ja sen viiden lämmönsiirtimen yhteisteho on 120 MW. Lämpövarastoja voidaan hyödyntää myös teollisuusprosesseissa pienemmässä kokoluokassa, esimerkkeinä Salmisaaren (20 000 m³) ja Vuosaaren (25 000 m³) kaukolämpöakkuja (Helen, 2019a). Lämmön varastoinnilla voidaan tasata lämmön kulutuksen vaihtelua ja vähentää lämmön erillistuotantoa, jolloin öljyn tai

maakaasun käyttö vähenee. Näiden lisäksi Helsingin Kruunuvuoreen ollaan suunnittelemassa kausienergiavarastoa, jossa lämmin merivesi varastoitaisiin luoliin (300 000 m³) ja hyödynnettäisiin talvella lämpöpumppujen lämmönlähteenä (Helen, 2018). Samoilla lämpöpumpuilla voitaisiin tuottaa myös alueen jäähdytys. Projektin tulisi valmistumaan vuonna 2030 mennessä samalla, kun sinne rakennetaan asuinalue.

Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalaitoksella tarkoitetaan veden potentiaalienergian varastoimista ja sittemmin tarpeen mukaista hyödyntämistä. Ideana on, että vesi varastoidaan sähkön kysynnän ollessa vähäistä isoon vesialtaaseen, joka on korkeammalla kuin virtaava joki. Kysynnän ollessa korkeaa ja/tai säätösähkön tarve kasvaa, voidaan vesi vapauttaa altaasta tuottamaan lisää sähköä. Tätä menetelmää voidaan pitää yhtenä tehokkaimpana tapana varastoida energiaa. (El-Sharkawi, 2012). Suomessa ei ole pumppuvoimalaitoksia toisin kuin Ruotsissa ja Norjassa. Suomeen ollaan rakentamassa melko isoa pumppuvoimalaitosta Pyhäsalmen vanhaan kaivokseen, jonka laskettu teho on 75 MW ja jonka kapasiteetti on 530 MWh (Kestävä Energiatalous, 2018). Voimalan säädettävyyden suunnitelmien mukaan myös hyvä, sillä voimalan käynnistäminen täyteen tehoon onnistuisi 30–40 sekunnissa. Sekuntitasoinen säätöön pumppuvoimalasta vesivoiman tavoin on, koska vedenvirtaus aiheuttaa luontaista hitautta.

Paineilmavarasto

Tässä menetelmässä moottorin pyörittämällä kompressorilla ilma voidaan varastoida esimerkiksi luolaan tai painetankkiin. Kun halutaan tuottaa sähköä verkkoon, ilma ohjataan rekuperaattorille lämmitettäväksi, jonka jälkeen siihen sekoitetaan polttoainetta, esimerkiksi maakaasua. Seos sytytetään kaasuturbiinissa, joka puolestaan pyörittää generaattoria tuottamaan sähköä. Ilman varastointi hyödyntää isotermistä prosessia, jossa lämpötila pysyy siis muuttumattomana. (CTCN, 2020; El-Sharkawi, 2012).

Akkuvarastot

Akkuvarastot ovat tulevaisuudessa erittäin potentiaalinen energian varastointikeino, koska niiden valmistuskulut ovat laskussa ja varauskyky puolestaan kasvussa. Akkuvarastoja voi sijoittaa niin sähköverkoissa, sähköautoissa kuin kotitalouksissakin, josta esimerkkinä voidaan pitää Teslan energiaseinää (powerwall). Tesla toimitti Australian tuulipuistolle ison akuston (Tesla powerback), johon voidaan varastoida tuulivoimaloiden tuottama sähkö ja purkaa varaus tarvittaessa. Kotimainen esimerkki akkuvarastoista on Fortumin Järvenpäässä sijaitseva 2 MW ja 1 MWh Batcave -akku, joka kykenee sekunti-minuuttitasolla nopeaan sähköjärjestelmän taajuussäätöön (Fortum, 2017). Fingrid on puolestaan rakentamassa Pohjoismaiden suurinta akkuvarastoa Etelä-Karjalan Yllikkälään, joka on kooltaan 30 MW ja 30 MWh (Fingrid, 2020d). Akkuvaraston avulla vaihtelevan tuotannon tuuli- ja aurinkoenergia voitaisiin valjastaa säätösähkön piiriin, tämä poistaisi järjestelmästä epätasaisuuden.

Akkuvarastojen ominaisuuksia ovat: korkea energiatiheys, hintatehokkuus, hyvä latauksen ja purkauksen tehokkuus, hidas varauksen häviäminen, pitkä käyttöikä, turvallinen käyttö sekä muistivaikutuksen puuttuminen eli osittainen lataus ei heikennä akustosta saatavaa tehoa. (El-Sharkawi, 2012).

Akkuvarastojen ja muiden elektronisten laitteiden tulevaisuudesta puhuttaessa on huomiotava niiden valmistukseen tarvittavat raaka-aineet. Energia- ja elektroniikkateollisuus käyttää monia harvinaisiakin metalleja, joiden riittävyydestä ollaan jo nyt huolissaan ja tarkoituksena olisi entisestään kasvattaa kyseisten metallien käyttöä. Tällaisia metalleja ovat mm.

indium, litium ja koboltti (VTT, 2014). Materiaalien vähentyminen voi johtaa hintojen nousuun. Materiaaleja ei saada myöskään enää kerättyä helposti, joka johtaa korkeampiin tuotantokustannuksiin ja hiilijalanjäljen kasvuun. Akkujen, kondensaattoreiden yms. valmistukseen tarvitaan lisäksi suurempia energiamääriä, joista syntyy runsaasti hiilidioksidia.

Energian varastointi vetyyn

Kysynnän ollessa vähäistä voidaan tuotettu energia varastoida vetyyn, ylituotettavalla sähköllä voidaan vesi elektrolyysillä erotella hapeksi ja vedyksi. Vety voidaan myöhemmin hyödyntää esimerkiksi polttokennoautoissa tai käyttää kaasuturbiinivoimalaitoksissa. Sähköä voidaan myöhemmin tuottaa sähkökemiallisen prosessin avulla suoraan vedystä tai hiilivetyjä sisältävistä polttoaineista. Vedyn energiasisältö verrattuna painoon on erittäin korkea. Lämpöarvoa voidaan puolestaan katsoa kahdesta näkökulmasta, paino ja tilavuus perusteisena, painon mukaan lämpöarvo on vain 30 % maakaasusta, kun taas tilavuusperusteisesti lämpöarvo on kaksinkertainen. Vety varastoidaan yleensä joko paineistettuna kaasuna tai nesteytettynä. (Kara, 2004).

Muut vaihtoehdot

Muita energian varastointi menetelmiä ovat kondensaattorit, suprajohtavat magneettiset energiavarastot (SMES) sekä erilaiset vauhtipyörät. Kondensaattoreilla voidaan tuottaa suuria tehomääriä hyvin nopeasti, mutta niiden energiamäärä akkuja heikompi ja pitkäaikainen varastointi on vaikeaa (Kara, 2004). Liike-energiaan perustuvaa sähkövarastoa kutsutaan vauhtipyöräksi, jonka toiminta perustuu hitausmomenttiin ja liike-energian muutoksen vastustamiseen (El-Sharkawi, 2012). Mitä isompi hitausmomentti, sitä isompi liike-energian vastustus ja sitä enemmän energiaa voidaan varastoida liikkeeseen. Ongelmaksi koituu sen taloudellisesti kannattava koko, jonka pitäisi olla 500 metriä halkaisijaltaan ja energialtaan 10–100 MWh. (VTT, 2003).

Suprajohteet ovat sähköä johtavat materiaalit, joilla ei joko ole resistiivistä vastusta tai sitten se äärimmäisen pieni, jolloin ei myöskään synny energiahäviöitä. Suprajohteisiin voidaan varastoida sähkömagneettista energiaa, joka vaatii hyvän jäähdytyksen, kuten nestemäisen heliumin tai typen avulla. Suprajohdevarastojen etuina ovat korkea hyötysuhde, erittäin lyhyt vasteaika sekä korkea virtatiheys. (Kara, 2004).

4.3 Voimalaitokset tulevaisuudessa

Fossiilisista polttoaineista ja turpeesta luopuminen toimii pakotteena ja ajurina rakentaa ja kehittää energian tuotantoa kestävään suuntaan. Fossiilisten polttoaineiden poistuminen vaikuttaa merkittävästi kauko- ja teollisuus CHP-laitoksiin, monissa näistä käytetään primääri tai sekundääri polttoaineena jotain fossiilisista polttoaineista. Suomen erillistuotantolaitokset toimivat niin ikään fossiililla polttoaineilla. Monia laitoksia pystytään muuttamaan biovoimaloiksi, mutta se puolestaan lisääsi puupolttoaineiden käyttöä merkittävästi. Kapasiteetin korvaaminen ei yksin onnistu biokattiloiden avulla, vaan sen rinnalle tarvitaan muita energian tuotantomuotoja.

Suomen geologisesta sijainnista ja ilmastosta johtuen lämmityksen tarve on suuri. Maalämpöä on helpompi asentaa esim. omakotitalo alueelle, jossa on enemmän tilaa kuin kaupun-

gissa. Kaupunkialueella kerrostalo vaatisi useita pienempiä 300 metriä syviä maalämpökaivoja täyttämään lämmöntarpeen. Vaihtoehtona on rakentaa reilun kilometrin syvä geolämpölaite, josta saataisiin lämpöä 4–6 isoon kerrostaloon. Tällaisesta laitoksesta toimii esimerkkinä Espoon Koskelossa sijaitseva geolämpölaite. Vantaan Varistoon puolestaan rakennetaan geolämpölaite, joka on noin kaksi kilometriä syvä ja se on tarkoitettu liittämään kaukolämpöverkkoon sen valmistuttua vuonna 2021 (Vantaan Energia, 2020). Yksi laite ei korvaa polttokattilalla toimivaa lämmön lähdettä, mutta teknologian monistamisella ja sarjatuotannolla geolämmöstä voidaan tulevaisuudessa saada merkittävä kokonaisuus energiapalettiin.

Lämmitystarpeisiin tarvittavaa lämpöä voidaan tuottaa muillakin tuotantomuodoilla. Hukkalämmön hyödyntäminen esimerkiksi datakeskuksista on erittäin mielenkiintoinen ja kannattavakin vaihtoehto. Oma haasteensa on se, että sijaitseeko datakeskus riittävän lähellä, jotta sen tuottamaa lämpöä voitaisiin käyttää kaukolämpöverkossa. Polttovoimalaitoksiin on mahdollista asentaa savukaasupesuri, jolla voidaan tuottaa jopa 20 % kaukolämmön kokonaisuudesta. Samalla se pienentää rikki- ja pienhiukkaspäästöjä merkittävästi. Myös pienydinreaktoreita on suunniteltu erityisesti lämmön tuotantoa ajatellen. Yhdellä modulaarisella reaktorilla, 10–300 MW, voitaisiin tuottaa riittävä lämpö keskisuureen kaupunkiin, kuten esimerkiksi Lappeenrantaan. Modulaarisen reaktorin rakentaminen on nopeaa ja halvempaa kuin isojen reaktoreiden valmistus. Toistaiseksi tutkimuksen alla ovat sen turvallisuus ja siihen liittyvän suojavyöhykkeen laajuus, jolla ei saa olla tiheää asutusta.

Kestävään energian tuotantoon säätövoiman kannalta on nopea säädettävyyttä, joka voidaan tuki saavuttaa erilaisilla teknologioilla, joita esiteltiin kappaleessa 4.2. Akustoilla voidaan saavuttaa sekä vaadittavat säätö- ja varavoimaominaisuudet, joille on tarvetta esimerkiksi harvaan asutulla jakeluverkon puolella. Myös biokaasulla, jolla voitaisiin helposti korvata maakaasu kaasuturbiineissa. Hyvin laajassa käytössä haasteena on biokaasun riittävyys, jonka on arvioitu olevan teknis-taloudellisesti noin 10 TWh ja teoreettinen tuotantopotentiaali jopa 24,4 TWh 2020-luvulla, joka olisi kuitenkin korkeintaan puolet maakaasun käytöstä (Ramboll, 2020; Pöyry, 2019). Energian tuotannon kannalta biokaasun ohjautuminen autoiluun on harmillista, mutta toisaalta liikenteen päästöjä on saatava laskettua alemmas, joka onnistuu biokaasulla hyvin.

4.4 Energiahuoltovarmuus

Energialähteiden käytön keskeiset muutokset 2030 mennessä verrattuna nykyiseen ovat mm. ydin- ja tuulivoimakapasiteetin lisääntyminen, fossiilisten tuontipolttoaineiden ja turpeen käytön vähentyminen sekä puuperäisten polttoaineiden käytön kasvu ja vähenevä CHP-kapasiteetti. Mikäli fossiiliset polttoaineet saadaan korvattua kotimaisilla energialähteillä, vaikutus huoltovarmuuteen paranee energiaomavaraisuuden kasvaessa. Biomassan käytön lisääntymisellä on omat haasteensa huoltovarmuuden näkökulmasta. Pitkäaikainen varastointi on haastavaa ja varastoinnin aikana ennestään matala lämpöarvo laskee eikä matalan lämpöarvon lähdettä kannata kuljettaa pitkiä matkoja (Pöyry, 2019). Biomassan saatavuus riippuu myös metsäteollisuuden tuotannosta ja sen vakaudesta sekä energiakäytön viiveestä eli vuoden kestävästä kuivatuksesta ennen käyttöä.

Kaikista vaihtoehtoisista energiamuodoista huolimatta kivihili, turve ja maakaasu tuskin poistuvat täysin Suomen energiapaletista. Ne tulevat todennäköisemmin jäämään reserviin huoltovarmuussyistä. Niitä tulnaisiin käyttämään ainoastaan, jos muiden polttoaineiden saa-

tavuus häiriintyisi merkittävästi. Suurin osa kivihiilestä todennäköisesti käytettäisiin pääkaupunkiseudulla CHP-laitoksissa. Varastointivelvoitteet, maahantuojalle sekä voimalaitokselle tai jälleenmyyjälle, ovat maakaasun ja kivihiilen kohdalla 3 kuukauden kulutusta vastaavat määrät, öljyn kohdalla maahantuojan varastointivelvoite on 2 kuukauden kulutusta vastaava määrä (Pöyry, 2019). Varmuusvarastojen kokoa tuskin merkittävästi muutettaisiin.

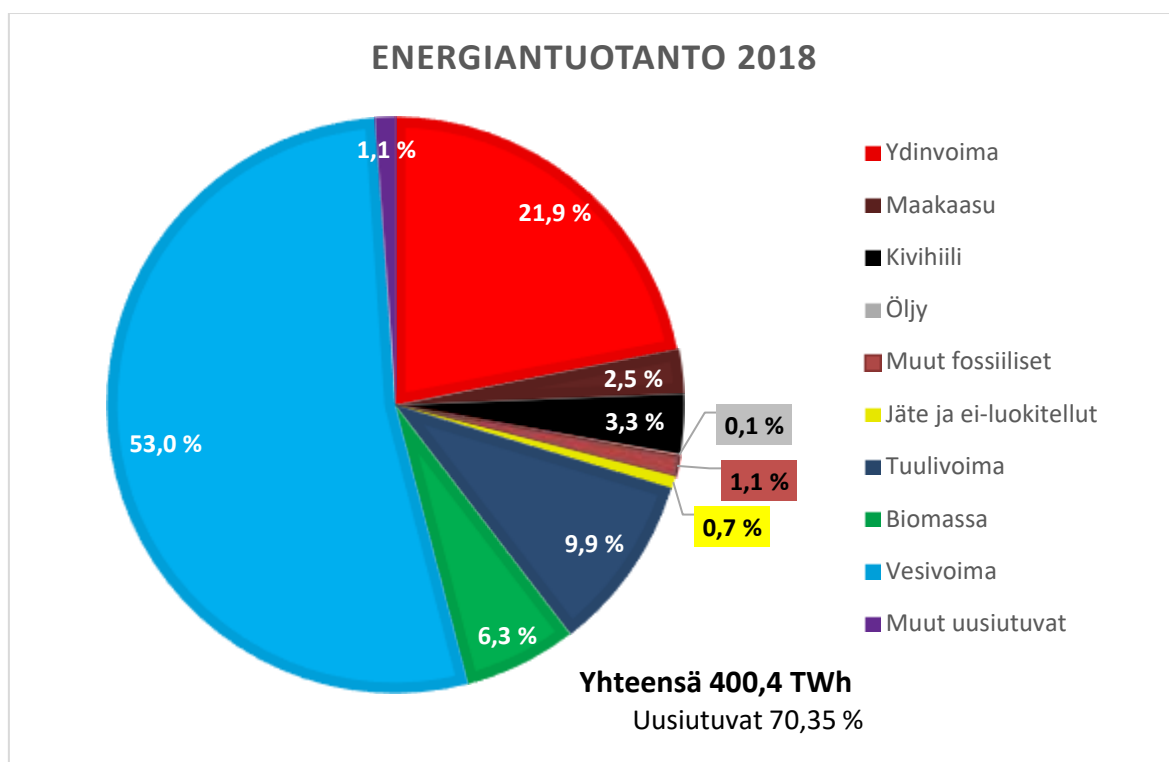
Esimerkiksi öljyä on EU direktiivin ja OECD:n IEP-sopimuksen mukaisesti varastoitava 90 päivän tarpeisiin (Huoltovarmuuskeskus, 2015). Turve ja biomassa ovat varastoitavuudeltaan heikkoja, joten niitä ei voi vuosiksi sulkea varastoon. Biomassan käytön kasvaessa varastoa voidaan säännöllisesti uudistaa korvaamalla vanha massa uudella ja vanha hyödyntää energiatuotannossa (Sitra, 2020).

5. POHJOISMAINEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Tässä kappaleessa perehdytään lyhyesti Pohjoismaiseen sähköjärjestelmään ja sen voimalaitoskapasiteetteihin. Tiedot on kerätty pääasiallisesti ENTSO-E:n factsheet tiedostoista (ENTSO-E, 2019), mutta myös heidän ylläpitämästään avoimesta datasta (ENTSO-E, 2020).

5.1 Sähkön tuotanto

Pohjoismaiseen sähköjärjestelmään kuuluvat Suomen, Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanska (Fingrid, 2020b). Vuonna 2018, tällä alueella tuotettiin sähköä 400,4 TWh, josta noin 53 % tuotettiin vesivoimalla. Kuvasta 7 nähdään, että ydinvoimalla tuotettiin noin 22 % ja fossiilisilla vain noin 7,5 %. Vuoden 2018 sähkön tuotannosta 70,35 % tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä. Suurimmat sähkön tuottajamaat ovat Ruotsi ja Norja noin 150 TWh tuotannolla.



Kuva 7. Energiantuotanto Pohjoismaissa energialähteittäin vuonna 2018.

Norjassa sähkö tuotetaan 95 prosenttisesti vesivoimalla ja loput maakaasulla ja tuulivoimalla, joten Norjalla riittää säätövoimaa. Ruotsissa sähkön tuotanto perustuu vahvasti vesija ydinvoimaan, molemmilla on noin 40 % osuus. Pääasiassa loput tuotetaan muilla uusiutuvilla. Ruotsin säätövoiman tilanne vaikuttaa myös hyvältä. Suomessa sähkö tuotetaan hyvin laaja-alaisella energiapaletilla. Kolmasosa tuotetaan ydinvoimalla, noin 47 % uusiutuvilla ja loput noin 20 % fossiilisilla. Tanskassa on hyvin paljon tuulivoimaa (48 %) ja muita uusiutuvia (20 %), mutta Tanskassa on myös merkittävä määrä fossiilisia tuotantolaitoksia. 31,5 % Tanskan tuottamasta sähköstä tuotetaan fossiilisilla, koska suuri tuulivoiman määrä vaatii myös paljon säätövoimaa rinnalleen.

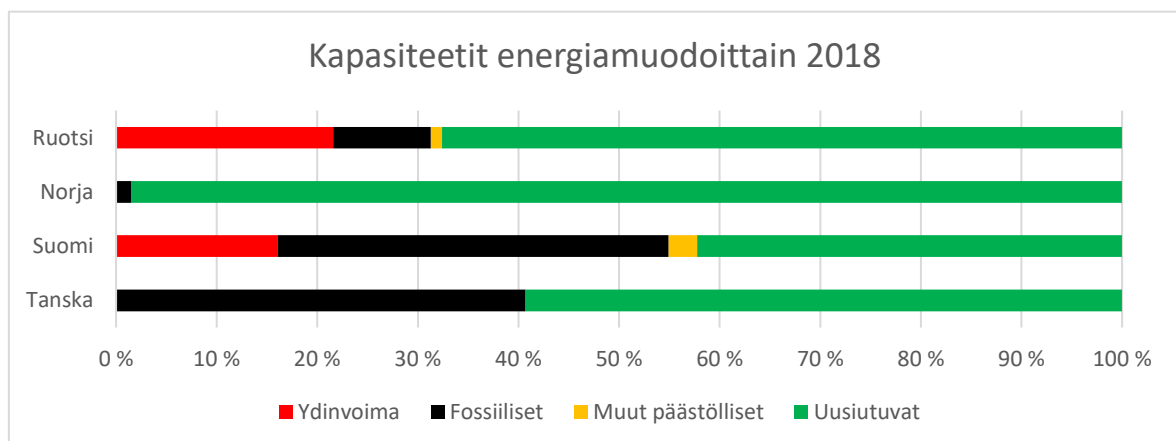
Pohjoismaista Norja ja Ruotsi ovat selkeästi yliomavaraisia, sillä näistä maista viedään merkittävästi sähköä muihin maihin kuin niihin tuodaan. Norjasta vietiin vuonna 2018 noin 10 TWh ja Ruotsista puolestaan vähän reilu 17 TWh (tuonnin ja viennin tasapaino). Suomi ja

Tanska puolestaan ovat riippuvaisia sähkön tuonnista. Suomeen tuotiin 20 TWh, joka vastaa noin 22,8 % kokonaissähkön käytöstä. Tanskassa vastaava luku oli reilu 5,2 TWh.

5.2 Pohjoismaiden voimalaitoskapasiteetit

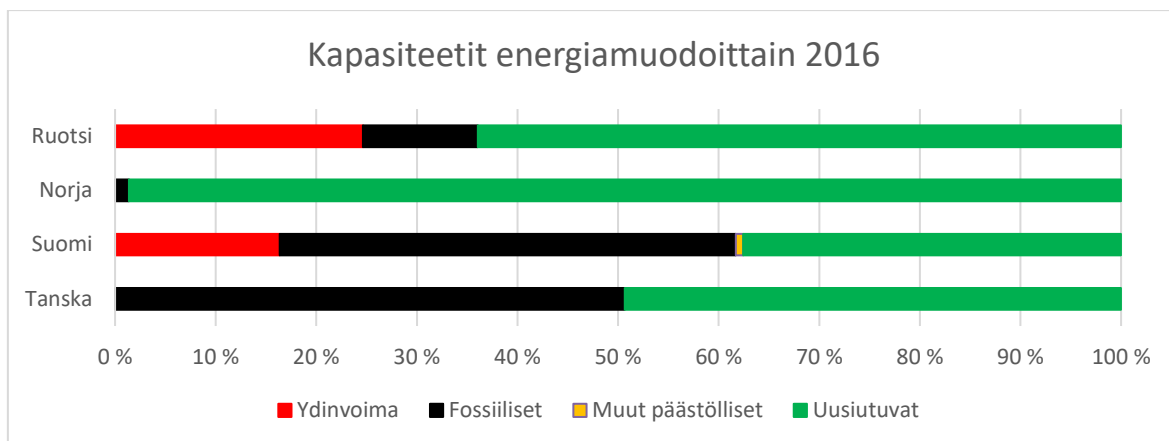
Pohjoismaissa ydinvoimaa on vain Suomessa ja Ruotsissa, yhteensä noin 11 400 MW. Suomen osuus tästä määrästä on noin 2800 MW ja Ruotsilla on näin ollen noin 8600 MW. Fossiilisia polttoaineita käyttäviä voimaloita on vähän reilun 17 700 MW edestä, Suomessa on noin 6760 MW ja Tanskassa puolestaan noin 6540 MW. Norjassa fossiilisia voimaloita on selvästi vähiten, vain 542 MW. Uusiutuvia polttoaineita on Pohjoismaisen sähköjärjestelmän alueella noin 78 310 MW, josta vesivoiman osuus on noin 52 360 MW. Pohjoismaisella alueella on siis muuta uusiutuvaa noin 26 000 MW. Muista ei-uusiutuvista polttoaineita, kuten jätteistä, käyttäviä voimalaitoksia on noin 940 MW edestä, joista 490 MW on Suomessa.

Kuvassa 8 on esitetty Pohjoismaiden sähkön tuotantokapasiteetit eri energiamuotojen suhteena. Kuvassa on yksinkertaistettuna jaoteltu energiamuodot uusiutuviin, fossiilisiin, ydinvoimaan ja muihin päästöllisiin.



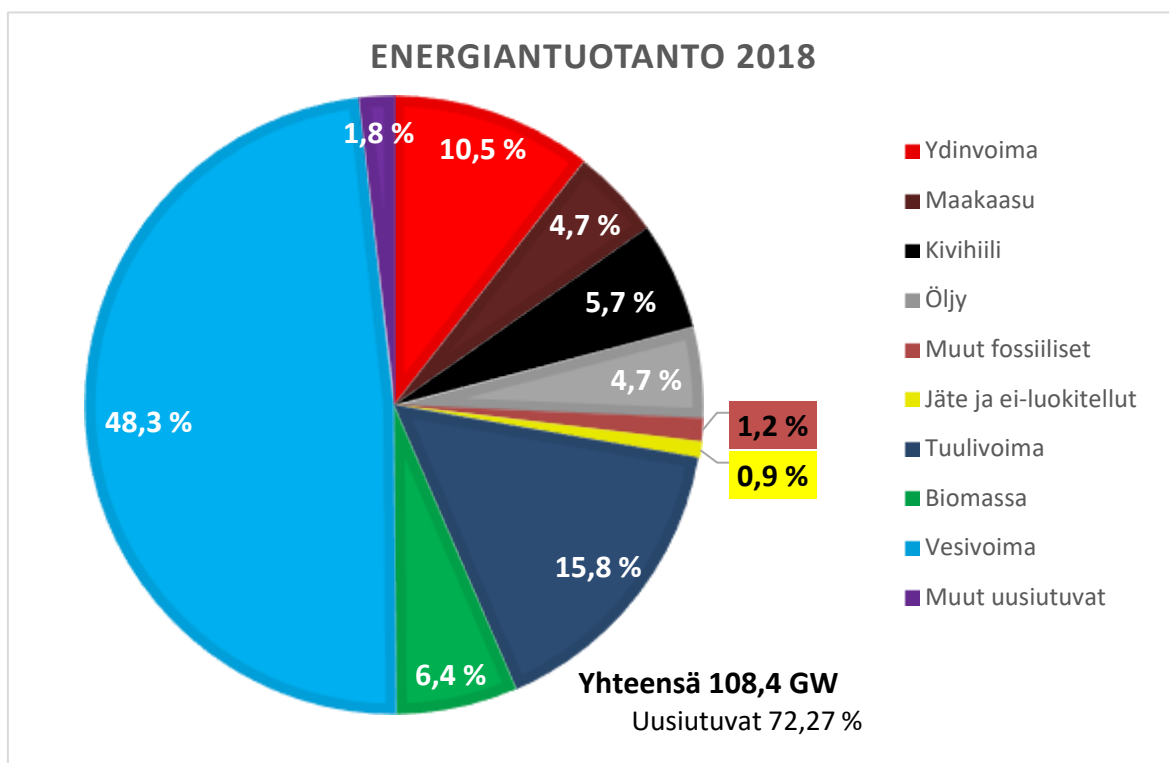
Kuva 8. Kapasiteettien suhteet energiamuodoittain vuonna 2018.

Kuvan 8 muihin päästöllisiin ENTSO-E on sisällyttänyt muiden ei-uusiutuvien energialähteiden ja ”ei-uusiutuvien” jätteiden käytön sekä vesipumppuvarastot, joita ei tilastoinnin mukaan Pohjoismaissa ole. Uusiutuvat jätteet on puolestaan sisällytetty uusiutuviin energialähteisiin. Vertaamalla 2018 dataa vuoteen 2016 (kuva 9) voidaan nähdä uusiutuvan kapasiteetin kasvaneen selkeästi erityisesti Tanskassa lähes 10 %-yksiköllä. Vastaavasti fossiilista kapasiteettia on poistunut esimerkiksi Suomessa, ei pelkästään suhteellisesti vaan myös fyysisesti.



Kuva 9. Tuotantokapasiteettien suhteet vuonna 2016.

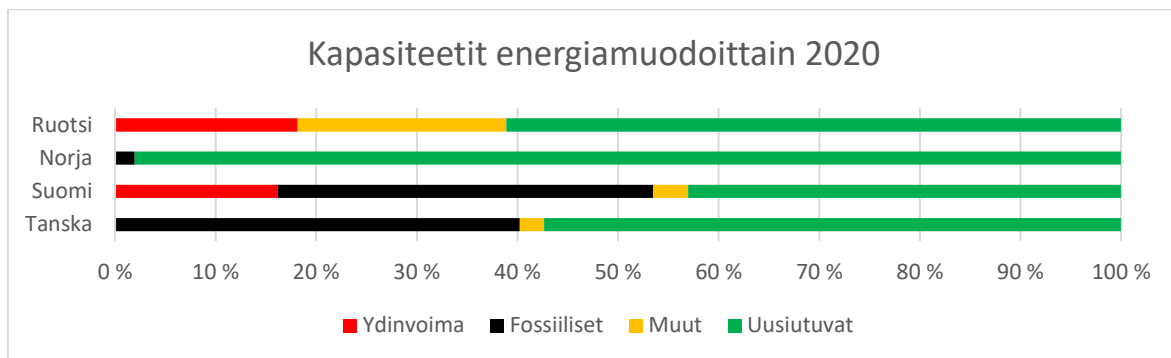
Kuvassa 10 esitetään Pohjoismaiden tuotantokapasiteetit energialähteittäin. Tarkastelussa ovat ydinvoiman lisäksi merkittävimmät fossiiliset ja uusiutuvat energialähteet.



Kuva 10. Pohjoismainen sähkön tuotantokapasiteetit energialähteittäin vuonna 2018.

Verrattaessa kuvia 7 ja 10, voidaan havaita, että merkittävimmät energiamuodot ovat vesi-, tuuli- ja ydinvoima. Fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön osuus on todella pieni Pohjoismaissa, vaikka niiden kapasiteettia on yhteensä enemmän kuin ydinvoimaa tai tuulivoimaa. Tällä hetkellä säätövoiman tilanne on pohjoismaisen sähköjärjestelmän alueella hyvä. Tilastot ovat parin vuoden takaisia, koska ENTSO-E ei ole tuottanut tuorempia factsheet -vuositilastoja vuoden 2018 jälkeen. Heidän ylläpitämä avoin data tarjoaa vuoden 2020 tietojakin, mutta vertailuvuosiinkin siinä on havaittavissa pieniä eroavaisuuksia factsheet -tietojen kanssa. Esimerkiksi Ruotsin tietoja tarkastellessa kaikki tieto fossiilisista polttoaineista

ja biomassasta on sijoitettu ”Muihin” energialähteisiin useiden vuosien ajalta, jolloin kapasiteetin jaottelu esim. kivihiileen ja maakaasuun on mahdotonta. Kuvassa 1 on esitetty vuoden 2020 kapasiteetit ENTSO-E:n avoimen datan luvuilla.



Kuva 11. Tuotantokapasiteettien suhteet vuonna 2020.

5.3 Pohjoismaisen sähköjärjestelmän tulevaisuus

Pohjoismaisen sähkön tuotantokapasiteetti tulee muuttumaan jonkin verran vuoteen 2030 mennessä. Ruotsissa ydinvoiman tilanne on tulevaisuuden kannalta mielenkiintoinen. Ruotsissa ydinvoimaa on pidetty kannattamattomana ja seurauksena voi olla useiden voimaloiden lakkauttaminen. Mahdollisuutena on myös useiden vanhojen voimaloiden korvaaminen muutamilla uusilla ja isommilla voimaloilla. Suomessa ydinvoiman määrän tulisi nykyisten aikataulujen mukaan nousta merkittävästi OL3 ja FH1 ansiosta. Nykyiset Loviisan ja Olkiluodon voimat tulevat näillä näkymin jatkamaan tuotantokäytössä 2030-luvullakin.

Kivihiilen käyttö loppuu Suomessa vuoteen 2029 mennessä ja muissa EU-maissa sen tulisi loppua vuoteen 2030 mennessä. Samoin voi käydä myös öljylle. Kivihiilen voi korvata puulla ja biomassalla, joten niiden käyttö tulee varmasti nousemaan tulevaisuudessa. Suomessa biomassaa käytettäisiin CHP-laitoksissa. Oman haasteensa puupohjaisten polttoaineiden käyttöön tuo EU:n päästölaskenta sekä siitä johtuvat päästömaksut. Puupohjaisten polttoaineiden käytön on tähän asti katsottu olevan päästötöntä, mutta tilanne voi muuttua tulevaisuudessa. Maakaasun käyttö saattaa myös vähentyä, vaikka sen käyttö olisikin sopivaa uusiutuvien energiamuotojen tueksi kaasuturbiinien nopean aktivoinnin takia.

Tuulivoiman määrä on kasvanut 2010-luvulla huomasti tekniikan kehittyessä. Tuulivoiman kasvu tuskin tulee pysähtymään, vaikka niille ei enää myönnettäisikään syöttötariffia. Aurinkoenergia on kovassa nousujohteessa, jonka osuus voi nousta merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Aurinkoenergian hinta on laskenut todella paljon tekniikan kehittyessä, joten voisi olla kannattavaa perustaa pieni syöttötariffi varta vasten aurinkovoimalle. Tulevaisuudessa voidaan lisäksi saada myös uusia energian tuotantomuotoja, esimerkiksi aaltovoima, osaksi energian tuotantoa. Tulevaisuudessa energian varastoinnilla saattaa olla merkittävä vaikutus. Uusiutuvien energiamuotojen tuottama energia tulisi voida käyttää silloinkin, kun sähköä kulutetaan paljon. Tekniikoista energian varastointiin on kerrottu enemmän kappaleessa 4.2.

Pohjoismaisessa verkossa maiden välillä on siirtolinjoja, joiden avulla voidaan tarvittaessa tasapainottaa maiden tehotasapainoa. Suomella on siirtoyhteydet Ruotsiin, Venäjälle sekä

Viroon ja Pohjois-Norjaan. Suomen kannalta erityisen tärkeä on Ruotsin siirtoyhteydet; Pohjois-Ruotsista Pohjois-Suomeen 2x400 kV yhdysjohdot ja Tukholman lähistöltä Forsmarkista Olkiluotoon (FI-SE3) kytketty suurjännitetasavirta-kaapelit (HVDC, yhteisteho 1200 MW). Pohjoista yhteyttä (FI-SE1) ollaan vahvistamassa 800 MW:lla nykyisestä 1500 MW:sta. (Fingrid, 2017a). Toinen HVDC-kaapeleista (Fenno-Skan 1, 400 MW) on tulossa käyttöikänsä päähän 2030-luvulla ja sen korvaamista 800 MW yhteydellä suunnitellaan Merenkurkkuun (Fingrid, 2019b) Vaasan ja Uumajan välille (FI-SE2). OL3 valmistuminen puolestaan pienentää markkinoilla olevaa kapasiteettia 300 MW pohjoisella yhteydellä. Nettotuonnin pitäisi vähentyä tuotantokapasiteetin kasvaessa ja yhdessä lisääntyvän siirtokapasiteetin kanssa parantaa huoltovarmuutta. Norja on myös rakentamassa uusia siirtoyhteyksiä esimerkiksi Saksaan ja Britteihin saarille 2020-luvun alussa (TEM, 2019). Tämän takia Norjasta saatavat vesivoimatehot voivat jatkossa suuntautua enemmän Pohjoismaisen verkon ulkopuolelle. Toisaalta Norjan ja Ruotsin välillä on jo nyt siirtoyhteyksissä pullonkauloja, jotka vaikuttavat siirrettäviin kapasiteetteihin.

Fingrid ja muut kantaverkkoyhtiöt ylläpitävät kysyntäjoustoon liittyviä markkinoita, joihin yritykset ja kotitaloudet voivat halujensa ja kykyjensä mukaan osallistua. Kysyntäjousto vaikuttaa kantaverkkoyhtiön näkökulmasta säätö- ja reservimarkkinoiden käyttöön niin normaaleissa säätötilanteissa kuin häiriötilanteissakin. Energiavarastot, kuten akkuvarastot ja pumppuvoimalat, tarjoavat myös oman joustopotentialinsa tulevaisuudessa. Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä on olemassa kysyntäjoustopotentialia. Suurin potentiaali niin teollisuuden kuin kotitalouksienkin osalta löytyy Norjasta ja pienin Tanskassa. Teollisuuden kokonaispotentialia on arvioitu olevan noin 5200 MWh/h ja kotitalouksissa noin 4200–6900 MWh/h (Thema, 2014).

Tulevaisuudessa säätövoiman tilanne voi olla vähän erilainen kuin tänä päivänä. Lisääntyvä uusiutuvien energialähteiden käyttö ja tuotannosta poistuvat fossiiliset laitokset saattavat tuoda jatkossa haasteita. Tähän voidaan pyrkiä vastaamaan energian varastoinnilla, jätteiden sekä biokaasun ja -massan lisääntyvällä käytöllä. Biomassaa ei tosin saa käyttää liikaa, ettei se vaikuta negatiivisesti luonnon uusiutumiseen. Biokaasulla pystyttäisiin korvaamaan maa-kaasu ja säilyttämään kaasuturbiinit energian tuotannossa.

6. YHTEENVETO

Energiamurroksen takia fossiilisista polttoaineista ja erityisesti kivihielestä on haluttu eroon. Voimalaitoskapasiteettia on poistunut yhteensä 3409 MW, jonka lisäksi ainakin 1687 MW on poistumassa 2020-luvun aikana eli yhteensä 5096 MW alentumaa. Noin 3070 MW tästä on säätövoimaan kykenevää erillistuotantoa ja lähes 1780 MW kaukolämpöä.

Suomeen rakennettujen voimalaitosten kapasiteetit ovat yhteensä 3305 MW, josta noin 2/3-osaa on tuulivoimaa. Investointien ansiosta kokonaisluku nousee noin 3890 MW, jossa ei huomioida tuulivoiman kasvamista. Suurin lisäys tulee kaukolämpöön, johon on tulossa 584 MW lisäys jo rakennettujen noin 380 MW rinnalle. Forssan erillistuotantolaitos kuuluu varavoimaan eli sitä ei käytetä muutoin kuin Fingridin käskystä.

Voimalaitosprojektien yhteenlaskettu kapasiteetti on pienempi kuin Suomesta poistunut kapasiteetti. Jo toteutuneilla investoinneilla ja poistumisilla kaukolämpökapasiteetti on alentunut 281,9 MW ja erillistuotannon kapasiteetti on laskenut 2048 MW, teollisuuskapasiteetti on puolestaan kasvanut noin 75 MW. Tulevien investointien ja poistumien takia luvut näyttävät vieläkin synkemmiltä, erillistuotannosta ja kaukolämmöstä olisi molemmista häviämässä vielä noin 550 MW. Poistuvaa kapasiteettia on noin 1207 MW enemmän kuin niitä korvaavaa kapasiteettia. Poistuvan kapasiteetin ja korvaavan uuden kapasiteetin suhde taasoittuu, jos tarkasteluun otetaan mukaan Suomen ydinvoimalaitosprojektit OL3 ja FH1, joiden yhteenlaskettu teho on 2800 MW.

Säätövoiman kannalta luvut eivät vaikuta kovin hyviltä. Tuulivoiman vaihteleva tuotanto ja ydinvoiman perustuotanto kasvavat, mutta eivät sovellu säätövoiman tarpeisiin. Luvuissa voi olla todellisuuteen heittoa, jos kaikkia uusia voimalaitosinvestointeja tai poistumisia ei ole otettu huomioon. Näitä tietoja ei löydy yhdestä tietystä paikasta, ja laitosinvestoinneista on muutenkin vaikea etsiä tarkkoja tietoja.

Pohjoismaisen sähköjärjestelmän kannalta tilanne ei ole aivan näin synkkä säätövoiman kannalta, kiitos Norjan ja Ruotsin mittavan vesivoiman, jolla tuotetaan 53 % alueen sähköstä. Oma haasteensa luo Ruotsi, joka on luopunut jo useammasta ydinvoimalasta 2010–2020 välisenä aikana, joiden teho vastaa Suomen nykyisten voimaloiden kapasiteettia. Vesivoima on hyvä korvaaja ydinvoimalle, kunhan se ei vaaranna säätövoiman tarpeita. Siirtoyhteyksien vahvistaminen alueilla toimii myös turvana mahdollisten energiavajeiden sattuessa.

Energiamurroksella ja hiilineutraalin energijärjestelmän luomisella on ollut selkeä positiivinen vaikutus uusiutuvien energiamuotojen ja perusvoimana toimivan ydinvoiman kapasiteetin kasvulle uusien laitosinvestoinnein. Lisäksi nykyisten ydinvoimaloiden ja vesivoimaloiden tehoja on saatu kasvatettua jonkin verran tehonkorotuksin. Energiamurroksella on ollut negatiivinen vaikutus säätövoimaan, sillä sen kapasiteetti on vähentynyt merkittävästi. Syynä tähän on fossiilinen erillistuotanto ja sen haittavaikutukset ympäristölle. Vaihtelevan tuotannon lisääntyminen ja isompien voimalaitosten toimiminen yhteistuotantolaitoksina, joissa lämmön tarve määrittää sähkön tuotannon määrän, eivät myöskään helpota säätövoiman tilannetta. Säätövoiman monipuolinen tuotantopaletti on kutistumassa harvoihin energialähteisiin, joka voi aiheuttaa riippuvuutta kyseisistä energialähteistä.

Energiapaletin kaventuminen lisää smart grid -ratkaisuiden merkitystä tulevaisuudessa, esimerkiksi energiavarastojen ja kysyntäjouston hyödyntämistä. Kysyntäjouston ja energiava-

rastoinnin hyödyntämistä tulee lisätä niin teollisuudessa kuin pienkuluttajien kohdalla. Fossiilisia polttoaineita käyttävien erillistuotantolaitosten muuntaminen esimerkiksi biopohjaisella polttoaineella toimiviksi ei välttämättä aina ole teknis-taloudellisesti järkevää. Kaasuturbiinien käytössä voisi hyödyntää biokaasua, mutta sen saatavuus voi olla ongelma, sillä biokaasulla on kysyntää esimerkiksi myös tieliikenteen polttoaineena eikä sitä ole rajoittomasti saatavilla.

LÄHDELUETTELO

CTCN. 2020. Compressed air energy storage (CAES). [verkkodokumentti]. [viitattu 9.9.2020]. Saatavissa: <https://www.ctc-n.org/technologies/compressed-air-energy-storage-caes>

El-Sharkawi, M. 2012. Electric energy: an introduction. 3.painos. CRC Press. s. 594. ISBN: 978-1-4665-0303-8.

Energiateollisuus ry. 2017a. Säättövoima – säädettävää sähköntuotantoa [verkkodokumentti]. [viitattu 20.11.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima

Energiateollisuus ry. 2017b. EU:n energia- ja ilmastopolitiikka vuoteen 2030 [verkkodokumentti]. [viitattu 22.11.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/energiateollisuuden_edunvalvonta/energiapolitiikka/eu_n_2030-tavoitteet

Aalto, A., Honkasalo, N., Järvinen, P., Jääskeläinen, J., Raiko, M., Sarvaranta, A. 2012. Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään? Loppuraportti [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf

Energiavirasto. 2017a. Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertais-
tui vuodessa [verkkodokumentti]. [viitattu 31.1.2018]. Saatavilla: http://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaisui-vuodessa?redirect=http%3A%2F%2Fwww.energiavirasto.fi%2Fuusiutuva-energia%3Fp_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_3_keywords%3Daurinko%26_3_struts_action%3D%252Fsearch%252Fsearch%26_3_redirect%3D%252Fuusiutuva-energia

Energiavirasto. 2017b. Tehoreservijärjestelmä [verkkodokumentti]. [viitattu 28.5.2018]. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/tehoreservijarjestelma>

Energiavirasto. 2017c. Voimalaitosrekisteri [verkkodokumentti]. [viitattu 11.10.2017]. Saatavissa aiemmin: <https://www.energiavirasto.fi/voimalaitosrekisteri>

Energiavirasto. 2020. Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti jatkoi kasvuaan vuonna 2019 – vuosikasvua 64 prosenttia. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.10.2020]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-jatkoi-kasvuaan-vuonna-2019-vuosikasvua-64-prosenttia>

ENTSO-E. 2019. Statistical Factsheet -tiedostot vuosilta 2015–2018. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2019]. Saatavilla: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics-and-data/>

ENTSO-E. 2020. Transparency platform - Installed capacity per production type. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.9.2020]. Saatavilla: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/installedGenerationCapacityAggregation/show>

Fennovoima Oy. 2017. Hanhikivi 1 [verkkodokumentti]. [viitattu 19.11.2017]. Saatavissa: <https://www.fennovoima.fi/hanhikivi-1>

Fingrid Oyj. 2013. Häätäkäyttöön tarkoitetut varavoimalaitokset [verkkodokumentti]. [viitattu 19.11.2017]. Saatavissa:

http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4n%20hallinta/K%C3%A4ytt%C3%B6varmuuden%20yll%C3%A4pito/varavoimalaitokset_2013.pdf

Fingrid Oyj. 2017a. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017–2027. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.9.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2017-2027.pdf>

Fingrid Oyj. 2017b. Kysyntäjousto [verkkodokumentti]. [viitattu 11.11.2017]. Saatavilla: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Sivut/default.aspx>

Fingrid Oyj. 2017c. Reservilajit [verkkodokumentti]. [viitattu 8.10.2017]. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx>

Fingrid Oyj. 2018. Varavoimalaitokset. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimalaitokset/>

Fingrid Oyj. 2019a. Fast frequency reserve – Solution to the Nordic inertia challenge. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fast-frequency-reserve-solution-to-the-nordic-inertia-challenge.pdf>

Fingrid Oyj. 2019b. Selvitys uudesta merikaapeliyhteydestä Suomen ja Ruotsin välille valmistunut. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.9.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2019/selvitys-uudesta-merikaapeliyhteydesta-suomen-ja-ruotsin-valille-valmistunut/>

Fingrid Oyj. 2020a. Olkiluoto 3:n järjestelmäsuoja. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/olkiluoto-3n-jarjestelmasuoja/>

Fingrid Oyj. 2020b. Pohjoismainen sähköjärjestelmä ja liitynnät muihin järjestelmiin. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkon-siirto/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/>

Fingrid Oyj. 2020c. Tehoreservi kaudet. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/tehoreservi/kaudet/>

Fingrid Oyj. 2020d. Pohjoismaiden suurin akkuvarasto nousee Yllikkälään. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.1.2021]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/pohjoismaiden-suurin-akkuvarasto-nousee-yllikkalaan/>

Fortum Oyj. 2017. Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2020]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>

Helen Oy. 2018. Kruunuvuorenrannan kallioluoliin suunnitellaan lajissaan maailman ensimmäistä energian kausivarastoa. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2020]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2018/kruunuvuorenranta>

Helen Oy. 2019a. Lämmön varastointi, case Helen. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.9.2020]. Saatavissa: https://energia.fi/files/3993/Tiittanen_Lammon_varastointi_Case_Helen_Kaukolampopaivat_2019_Vaasa.pdf

Helen Oy. 2019b. Mustikkamaan luolalämpövaraston rakentaminen vauhdissa. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.9.2020]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/mustikkamaa>

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus. s. 342. ISBN: 978-952-13-3476-4.

Huoltovarmuuskeskus. 2015. Polttoainekin on tuoretuote. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.10.2020]. Saatavilla: https://www.varmuudenvuoksi.fi/aihe/energiahuolto/268/polttoainekin_on_tuoretuote

IEA. 2017. Snapshot of global photovoltaic markets 2016 [verkkodokumentti]. [viitattu 31.1.2018]. Saatavilla: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2016__1_.pdf

IEA. 2018. Russia – Key energy statistics, 2018. Electricity generation by source. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.9.2020]. Saatavissa: <https://www.iea.org/countries/russia>

Kara, M. 2004. Energia Suomessa. 3. täysin uudistettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy. s. 396. ISBN: 951-37-4256-3.

Kemijoki Oy. 2018. Sierilän voimalaitoshankeen esite [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2018]. Saatavilla: <https://www.kemijoki.fi/media/sierila-nykyaikaista-ja-vastuullista-vesivoimaa.pdf>

Kestävä Energiatalous. 2018. Pumppuvoimala on hyvä ja tehokas sähkövarasto. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2020]. Saatavilla: <https://www.energiatalous.fi/?p=2210>

Langston L.S. 2014. Gas turbine cycles. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.11.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/brayton-cycle>

Lounavoima Oy. 2020. Salon Korvenmäen ekovoimalaitoksen projektin eteneminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.9.2020]. Saatavissa: <https://www.lounavoima.fi/laitos/aikajana/>

Marttila, T., Rask, M., Savolainen, K. 2017. Smart Energy Transition 2030 - Energiamurrosareena, sähkön kysyntäjousto. [viitattu 14.1.2021]. Saatavissa: <http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku2-sahkon-kysyntajousto.pdf>

NeroWatt Oy, Suomen suurimmat aurinkovoimalat [verkkodokumentti]. 2018. [viitattu 13.3.2018]. Saatavissa: <http://www.aurinkoenergiaa.fi/aurinkoenergiaa.html>

Pöyry Management Consulting Oy. 2015. Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa, loppuraportti [verkkodokumentti]. [viitattu 30.1.2018]. Saatavissa: https://energia.fi/files/405/ET_Jatteiden_energiakaytto_Loppuraportti_161015.pdf

Pöyry Management Consulting Oy. 30.5.2016. EU:n 2030 ilmasto- ja energiapolitiikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastotavoitteiden toteutuminen [verkkodokumentti]. [viitattu 22.11.2017]. Saatavissa: <http://tem.fi/documents/1410877/2772829/EUn+2030+ilmasto-+ja+energiapolitiikan+linjausten+toteutusvaihtoehdot+ja+Suomen+omien+energia-+ja+ilmastotavoitteiden+toteutuminen.pdf/12eba82a-c044-47df-9325-e5d6c39ff1e9>

Pöyry Management Consulting Oy. 2019. Huoltovarmuus energiamurroksessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.9.2020]. Saatavissa: https://cdn.huoltovarmuuskeskus.fi/app/uploads/2019/06/04101238/Huoltovarmuus_energiamurroksessa.pdf

Ramboll Finland. 2020. Biokaasun tuotannosta liikennekäyttöön. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.9.2020]. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/16249680/Biokaasu-tuotannosta-liikennek%C3%A4ytt%C3%B6n-Mutikainen-Mirja.pdf/9b75a422-3831-74a6-91c0-131455a20bf6/Biokaasu-tuotannosta-liikennek%C3%A4ytt%C3%B6n-Mutikainen-Mirja.pdf>

Salo, M. 2015. Energiäkäänne: Saksan ja Suomen energiapolitiittiset valinnat. Helsinki: Visio 2015. s. 147. ISBN: 978-952-5078-45-9.

Sitra. 2020. Työpaperi – Turpeen käytöstä luopuminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.9.2020]. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2020/06/22121621/turpeen-kaytosta-luopuminen.pdf>

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2014. Tuulivoima Suomessa [verkkodokumentti]. [viitattu 31.1.2018]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/9217/Tuulivoima-alan_tilanne_Suomessa.pdf

Thema Consulting Group. 2014. Demand response in the Nordic electricity market. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.1.2021]. s. 96. ISBN: 978-92-893-3771-7.

Tilastokeskus. 2019a. Liitetaulukko 1. Sähkön ja lämmöntuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain 2018. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.10.2020]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatu0/2018/salatu0_2018_2019-11-01_tau_001_fi.html

Tilastokeskus. 2019b. Polttoaineluokitus 2020. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.10.2020]. Saatavissa: https://www.stat.fi/static/media/uploads/khkaasut_polttoaineluokitus_2020_v3.xlsx

Työ- ja elinkeinoministeriö, TEM. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, julkaisu 4/2017 [verkkodokumentti]. [viitattu 24.1.2018]. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Työ- ja elinkeinoministeriö, TEM. 2019. Sähkötuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.9.2020]. Saatavilla: <https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf>

Vantaan Energia Oy. 2020. Vantaan Energia rakentaa geotermisen maalämpölaitoksen. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.9.2020]. Saatavilla: <https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energia-rakentaa-geotermisen-maalampolaitoksen/>

VTT. 2003. Energian varastoinnin nykytila. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2020]. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

VTT. 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). [verkkodokumentti]. [viitattu 18.3.2018]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf>

VTT. 2014. Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa [verkkodokumentti]. [viitattu 4.4.2018]. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T162.pdf>

Zohuri, B. 2015. Gas turbine working principles. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.11.2020]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/300857212_Gas_Turbine_Working_Principles/download