

Johansson Jukka

SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄN TEHO- TASAPAINON YLLÄPITÄMISEN HAAS- TEET TULEVAISUUDESSA

Kandidaatintyö
2/2019

TIIVISTELMÄ

JOHANSSON JUKKA: Sähkövoimajärjestelmän tehotasapainon ylläpitämisen haasteet tulevaisuudessa
Engl. Future challenges on grid balancing
Kandidaatintyö, 32 sivua
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2019
Pääaine: Sähkövoimatekniikka
Tarkastaja: Pertti Järventausta

Sähkön rooli nykyajan yhteiskunnassa on todella suuri. Monen yrityksen ja ihmisen toimeentulo on riippuvainen sähköstä ja sen saantia pidetään itsestäänselvyytensä. Sähköverkon toiminnan täytyy olla luotettava eikä pitkäaikaisia häiriöitä saa ilmetä. Sähkön tuotannon ja kulutuksen on oltava joka hetki tasapainossa. Tätä tasapainoa kutsutaan tehotasapainoksi ja sen menettämisestä voi koitua vakavia seurauksia. Kulutuksen ollessa suurempaa kuin tuotanto, sähköverkon taajuus alkaa laskea ja pahimmassa tapauksessa tämä johtaa teollisuuden koneiden hajoamiseen tai laaja-alaiseen sähkökatkoon. Käänteisessä tilanteessa taajuus voi myös nousta liian suureksi, jolloin seuraukset ovat yhtä vakavat.

Suomen tuotanto ei riitä kattamaan omaa sähkönkulutusta ja tuotantovaje katetaan pääosin Ruotsin ja Venäjän tuontisähköllä. Tehotasapainon kannalta Suomen kuormitushuipputilanteet eivät ole olleet ongelma, sillä suuria vikoja ei ole esiintynyt samanaikaisesti ja sähköenergian riittävyys on varmistettu Energiaviraston määrittämällä tehoreservijärjestelmällä. Normaalin käyttötilanteen aikana kulutuksen vaihteluihin reagoidaan taajuuden vakautusreservillä, jonka tarkoituksena on pitää taajuus normaalialueella. Suurempien taajuuspoikkeamien aikana otetaan käyttöön taajuuden palautusreservi, jolla vapautetaan taajuuden vakautusreservi käytöstä ja palautetaan taajuus normaalialueelle. Kysynnän jouston avulla pyritään ohjaamaan asiakkaiden sähkönkulutusta älymittareiden avulla parantaen järjestelmän toimintaa sekä sähkömarkkinoita.

Ilmastonmuutos on yksi suurimmista syistä, minkä takia energiantuotantomuodot muuttuvat. Uusiutuvan energian osuus tulee kasvamaan ja se tuo haasteita tehotasapainon hallintaan. Tuuli- ja aurinkoenergia ovat todella sääriippuvaisia, joten niiden tuotanto saattaa vaihdella yllättäen. Perinteisten lämpövoimaloiden vähentyessä verkosta poistuu säätövoimaa, jota edellä mainitut uusiutuvan energian muodot tarvitsevat. Ydinvoimalat tulevat nostamaan Suomen omavaraisuutta sähköenergian tuotannossa, mutta vikaantuessaan suuren yksikön äkillisestä irtoamisesta syntyy valtava tehovaje, joka voi aiheuttaa verkkoon häiriöitä. Tulevaisuuden muutosten lisääminen sähkövoimajärjestelmään vaatii muutoksia myös siirtoyhteyksissä. Kehitteillä olevat älyverkot pyrkivät mahdollistamaan esimerkiksi automaattisen viankorjauksen sekä kaksisuuntaisen sähkönsiirron. Ne tulevat myös hyödyntämään kysyntäjoustoa tehotasapainon hallinnassa.

Avainsanat: tehotasapaino, tehoreservit, uusiutuva energia, älyverkot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	2
2.1 Sähkövoimajärjestelmä	2
2.2 Tehotasapaino	5
3. TEHOTASAPAINON HALLINTA SUOMESSA	7
3.1 Kuormitus.....	7
3.2 Käytävissä olevat reservit.....	8
3.2.1 Fingridin reservimarkkinoiden tuotteet.....	8
3.2.2 Tehoreservijärjestelmä.....	13
3.3 Kysyntäjousto.....	15
4. TULEVAISUUDEN MUUTOKSET	18
4.1 Tuotantomuodot.....	18
4.1.1 Uusiutuva energia	18
4.1.2 Ydinvoima	21
4.2 Siirtoyhteydet	23
4.2.1 Älykäs sähköverkko	23
4.2.2 Energiavarastot.....	26
5. YHTEENVETO.....	29
6. LÄHTEET	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Engl. Alternating current, vaihtovirta
DC	Engl. Direct current, tasavirta
Elbas	Sähkömarkkinapaikka saman päivän tunneille
Elspot	Sähkömarkkinapaikka seuraavan päivän tunneille
FCR	Taajuuden vakautusreservi
FRR	Taajuuden palautusreservi
RR	Korvaava reservi
<i>Hz</i>	Taajuuden yksikkö
<i>MW</i>	Sähkön siirrossa käytettävä tehon yksikkö
<i>MWh</i>	Sähköenergian siirrossa käytettävä yksikkö
V_{RMS}	Vaihtojännitteen tehollisarvo
V_{huippu}	Vaihtojännitteen huippuarvo
P_0	Ilmavirtauksen teho
ρ_i	Ilman tiheys

1. JOHDANTO

Sähköenergian merkitys kasvaa maailmanlaajuisesti. Samaan aikaan kiinnitetään yhä enemmän huomiota ilmastonmuutokseen ja sen hidastamiseen. Uusiutuvan energian ja ydinvoiman tuotantoa pyritään lisäämään, ja ilmastoa saastuttavien tuotantomuotojen käyttöä vähentämään. Uusiutuvaan energiaan siirtyminen ei ole enää imagokysymys.

Tuulivoiman osuus tulee kasvamaan Suomen sähköenergian tuotannossa merkittävästi. Aurinkoenergiaa lisätään myös, mutta sen osuus on verrattain pieni tuulivoimaan nähden. Tuuli- ja aurinkovoima ovat hyvin sääriippuvaisia, ja ongelmaksi tulee tuotannon ja kulutuksen tasoittaminen. Sähköä pitää tuottaa joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Tätä tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa kutsutaan tehotasapainoksi.

Tehotasapaino on tärkeä säilyttää, sillä ilman sitä taajuus sekä jännite vaihtelevat ja tämä voi johtaa pahimmassa tapauksessa koko sähkövoimajärjestelmän kaatumiseen. Tuotannon rakenteen muuttuessa syntyy haasteita tehotasapainon ylläpitämiseen. Ratkaisuja on useita, mutta huomioon tulee ottaa niin kustannustehokkuus kuin kestävä kehitys.

Työn tarkoituksena on esittää ongelmakohdat, jotka ilmaantuvat nimenomaan tulevaisuuden muutoksista. Työssä tarkastellaan Suomen haasteita, mutta kerrotaan lisäksi maailmanlaajuisesti esiintyviä ratkaisukeinoja.

Aluksi luvussa 2 kerrotaan mistä sähkövoimajärjestelmä koostuu. Tämän jälkeen käsitellään tehotasapainoa ilmiönä ja siitä millaisia vaikutuksia sillä on. Luvun lopussa perehdytään menetelmiin, joita Suomessa käytetään tehotilanteen kiristyessä. Luvussa 3 käydään läpi erilaisia kuormitustilanteita sekä kuormitushuippuja, ja sitä niissä ollaan toimittu tehotasapainon hallinnan kannalta. Kuormituksen jälkeen kuvataan reservijärjestelmän rakennetta ja eri reservien ominaisuuksia sekä käyttötarkoituksia. Luku 4 keskittyy Suomessa tapahtuviin muutoksiin tuotantomuotojen, erityisesti uusiutuvan energian ja ydinvoiman suhteen. Tämän lisäksi huomioidaan muutoksista johtuvat vaikutukset siirtoyhteyksiin. Työn lopuksi luvussa 5 käydään läpi esille nousseet asiat ja pohditaan ratkaisuja niihin. Mahdolliset ratkaisukeinot, jotka voitaisiin ottaa käyttöön myös Suomessa, kerrotaan niin ikään luvussa 5.

2. TEORIA

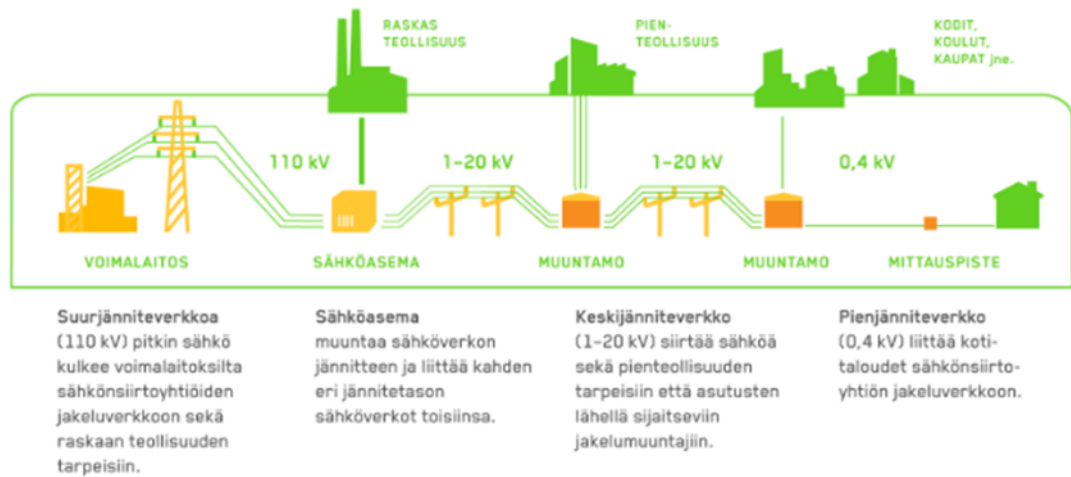
2.1 Sähkövoimajärjestelmä

Sähkövoimajärjestelmä koostuu sähkön tuotannosta, sähköverkoista ja sähkön kuluttajista. Sähköverkot tarkoittavat sähkön siirtoa tuotannosta loppukäyttäjille, ja siirrossa käytetään eri jännitetasoja riippuen etäisyyksistä. [1] Valtion mittakaavassa sähköä siirtää kantaverkko, jota Suomessa hallinnoi kantaverkkoyhtiö Fingrid. Kaikesta sähköstä, jota siirretään Suomessa, noin 77 prosenttia kulkee kantaverkon kautta. Fingridillä on käytössä 400 kV, 220 kV ja 110 kV:n jännitetasot, ja niiden yhteenlaskettu pituus on yli 14 000 kilometriä. [2]

Paikallisella tasolla sähkön siirto koostuu jakeluverkosta, joka vielä jakautuu keskijänniteverkkoon ja pienjännitteiseen jakeluverkkoon. Keskijänniteverkko (1-70 kV), on tarkoitettu siirtämään sähköä pienteollisuudelle ja lähemmäs asutusta. Keskijänniteverkkoa on Suomessa noin 140 000 kilometriä. Useimmiten keskijännite Suomessa on 20 kV, mutta joissain kaupungeissa on käytössä myös 10 kV:n jännite. Pienjännitteinen jakeluverkko (alle 1 kV) on selvästi laajin, yhteensä 240 000 kilometriä, ja yhdistää esimerkiksi kotitaloudet sähköverkkoon. [3]

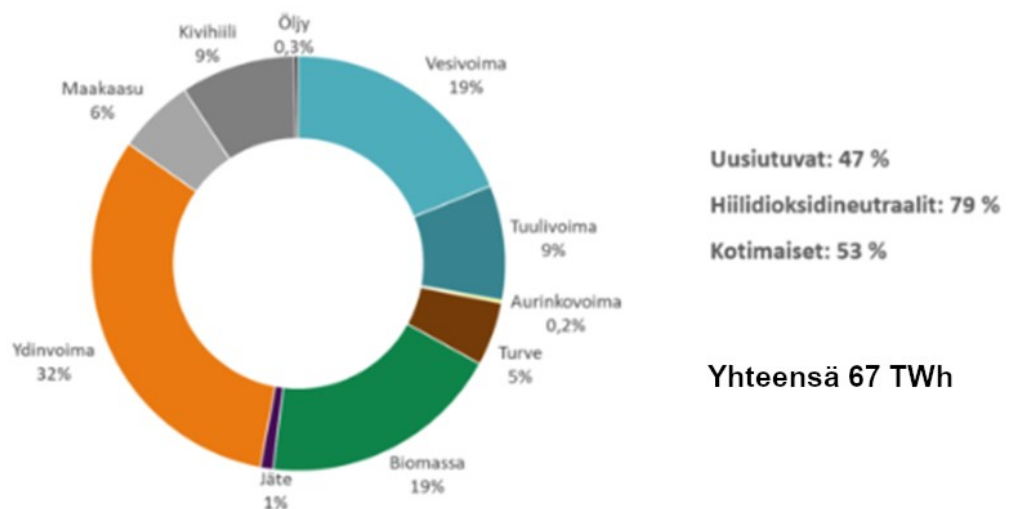
Verkkoihin tehdään jatkuvasti parannuksia, ja niitä pyritään silmukoimaan entistä enemmän. Silmukoinnilla tarjotaan sähkölle vaihtoehtoinen reitti, jos johonkin osaan verkosta tulee häiriö. Vaikka sähköverkko on pitkälti silmukoiduksi rakennettu, niin sähkönjakeluverkkoa käytetään säteittäisesti. Suomen lisäksi muissa Pohjoismaissa on käytössä kantaverkossa N-1-kriteeri, jonka mukaan tavanomaiset yksittäiset viat tai jonkin komponentin hajoaminen ei aiheuta kulutukselle tai tuotannolle keskeytyksiä. N-1-kriteeri on kantaverkon suunnittelukriteeri ja se nousee uudelleen esille vielä luvussa 4. [2]

Alla olevassa kuvassa on esitetty perinteisen sähkövoimajärjestelmän yksinkertaistettu rakenne. Joistain voimalaitoksista on 400 kV:n yhteydet suurjänniteverkkoon.



Kuva 1. Sähkövoimajärjestelmän rakenne. [4]

Suomen sähköntuotanto jakautuu monipuolisesti eri energianlähteisiin alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 2. Suomen sähköntuotanto energialähteiteittäin 2018. [3]

Tuotanto on hyvin hajautettua, mikä lisää monipuolisuuden ohella hankinnan varmuutta. Voimalaitoksia on yhteensä noin 400 ja sähköä tuottavia yrityksiä noin 120. Uusiutuvien energiatuotantomuotojen osuus on 47 %, mikä on jo enemmän kuin EU:n asettamat tavoitteet uusiutuville vuoteen 2030 mennessä. [3]

Sähkön kulutus vuonna 2018 oli 87 TWh. Se voidaan jakaa kolmeen sektoriin: Teollisuus ($\approx 40\%$ kokonaiskulutuksesta), asuminen ja maatalous ($\approx 30\%$) ja palvelut ($\approx 20\%$). Siirto- ja jakeluhäviöiden osuus on muutaman prosentin luokkaa. (Kulutuksen suhteet vuodelta 2017)

Huomataan, että kulutus on huomattavasti suurempi kuin tuotanto. Tuotannon alijäämä täytyy hankkia muista maista ja nettotuonnin osuus on hieman yli 20 prosenttia. [5] Merkittävimmät maat sähköntuonnille ovat Ruotsi ja Venäjä. Suomesta on myös sähköyhteydet Norjaan ja Viroon. [2] Suomi on siis hyvin riippuvainen tuontisähköstä.

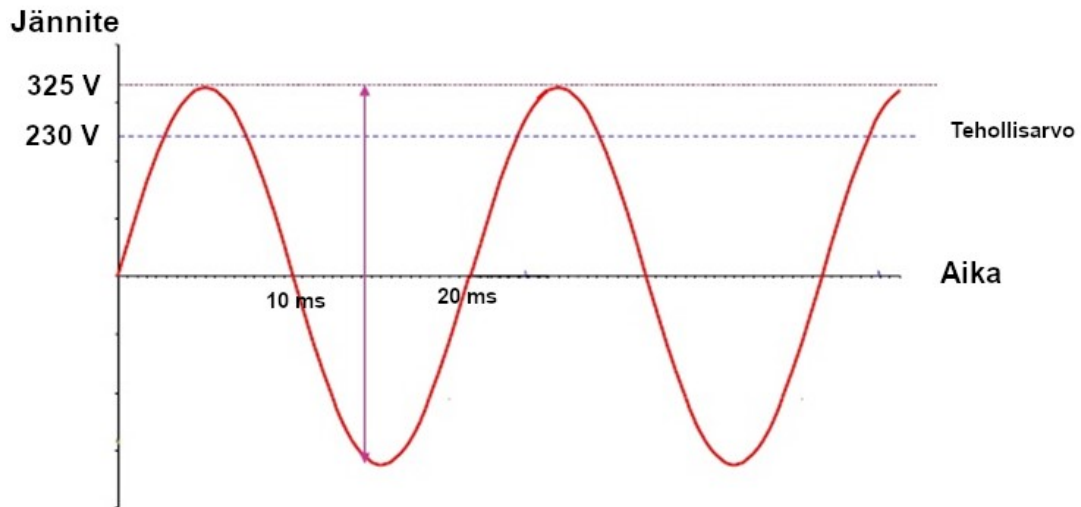
Kuten edellä mainittiin, sähkön siirrossa käytetään suuria jännitteitä. Suuret jännitteet nostavat energian siirron hyötysuhdetta pienentämällä häviöitä. Perinteiset muuntajat eivät toimi tasavirralla (DC-direct current), joten vaihtovirta (AC-alternating current) otettiin käyttöön. Nykyään on olemassa myös DC-konverttereita, mutta vaihtovirran käyttö ja siirto on joustavampaa. Tasasähköä käytetäänkin pääosin vain siirtämään tuotantoa kulutuksen luo pitkiä matkoja, sillä tasasähkön muuntoasemat ovat tyypillisesti valtavia. [6]

Vaihtovirran yksi ominaisuus on taajuus, joka kuvaa kuinka monta kertaa sähkövirta vaihtaa polariteettiaan sekunnissa. Yhden jakson aikana virta lähtee nollasta, saavuttaa huippuarvonsa, palaa nolnaan, saavuttaa huippuarvon negatiivisena ja palaa nolnaan. Jännitteen osalta tehollisarvoltaan 230 V vaihtojännite saa huippuarvon 325 V. Tehollisarvolla tarkoitetaan jännitteen neliöllistä keskiarvoa, joka lasketaan kaavalla 1. [7]

$$V_{RMS} = \frac{V_{huippu}}{\sqrt{2}} = \frac{325 V}{\sqrt{2}} = 230 V, \quad (1)$$

Jaksonaika on virralle ja jännitteelle sama 20 ms. [7]

Kuva 3 esittää 50 Hz:n vaihtojännitettä 230 V tehollisarvolla.



Kuva 3. 50 Hz:n vaihtojännite. [7]

Taajuus saadaan laskemalla, kuinka monta jaksoa mahtuu yhteen sekuntiin. Maailmassa käytetään suurimmalta osin 50 Hz:n taajuutta sähkövoimajärjestelmissä, mutta myös 60 Hz:n taajuus on monien maiden käytössä. Vain harva valtio käyttää molempia taajuuksia. [8]

2.2 Tehotasapaino

Järjestelmän toiminnan kannalta on todella tärkeää, että hetkellinen tuotanto ja kulutus vastaavat toisiaan eli järjestelmässä vallitsee tehotasapaino. Tehotasapainon järkkyyessä järjestelmä on epästabili ja tämän seurauksena saattaa syntyä radikaaleja taloudellisia sekä teknisiä vaikutuksia.

Kulutuksen ollessa suurempi kuin tuotanto, taajuus laskee. Taajuuden laskeminen johtaa kuormien poiskytkentään tai pahimmassa tapauksessa koko järjestelmän kaatumiseen tuotantolaitoksen irrotessa verkosta. Tuotanto voi olla vajaata silloin, kun kulutus kasvaa yllättäen, siirtoverkossa ilmenee häiriö tai tuotantolaitoksen lopettaessa sähkön-tuotannon. [9, s.5]

Sähkövoimajärjestelmän tuotantolaitoksissa on turbiineja ja generaattoreita, joiden pyörimisliikkeeseen on sitoutuneena liike-energiaa. Tämä liike-energia tunnetaan myös inertiana, joka vastustaa taajuuden muutosta. Riittävä inertia varmistaa tehotasapainon

säilymisen, jos suuri voimalaitos irtoaa verkosta. Inertian ollessa pieni, tehotasapaino järkkyy ja kulutusta saatetaan edellä mainitusti kytkeä irti automaattisesti häiriötilanteen seurauksena. [10]

Ylituotannon aikana verkon taajuus ja jännite kasvavat, mutta seuraukset ovat yhtä vakavat kuin käänteisessä tilanteessa. Ylimääräinen tuotanto täytyy poistaa lisäämällä verkkoon kulutuskohteita tai vähentämällä voimalaitosten tehoa. Eräs useita vuosia käytössä ollut ratkaisu on pumppuvoimalaitos, joka pumppaa vettä ylituotannon aikana korkeammalle tasolle. Tästä saatu veden potentiaalienergia saadaan muutettua nopeasti takaisin sähköenergiaksi, kun sille on tarvetta. [9, s.5] Puhuttaessa Suomen vuosittaisesta energiantuotannosta ja -kulutuksesta on hyvä muistaa tehotasapainon riippuvan enemmänkin hetkellisestä kuormituksesta. Tähän palataan luvussa 3.

Sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat tuotantonsa ja kulutuksensa etukäteen, jotta ne olisivat tasapainossa. Yksittäisten tuntien aikaiset poikkeamat pitää kuitenkin korjata reserveillä. Reservit voivat olla tuotantoyksiköitä tai kulutuskohteita riippuen siitä kumpaan suuntaan tarvitaan kompensointia. [11]

Kantaverkkoyhtiö Fingrid käyttää tehotilanteen kiristyessä kolmiportaista menetelyä riippuen tilanteen vakavuudesta. Sähköpulan ollessa mahdollinen, tilanne on lievä ja ennusteiden perusteella voidaan ennakoida tuotannon ja tuonnin riittämättömyys lähitunteina tai kuluvan vuorokauden aikana. Sähköpulan riski on suuri silloin, kun kaikki Suomessa oleva tuotanto on jo käytössä, eikä naapurimaista ole saatavilla sähköä. Tällaisessa tilanteessa Fingrid joutuu käynnistämään varavoimalaitoksia. Vakavin tilanne on sähköpula, jolloin tuotanto ja tuonti eivät riitä kattamaan sähkönkulutusta. Jakeluverkonhaltijat joutuvat kytkemään kulutusta irti, jottei tärkeitä kohteita joudu ilman sähköä. [12] Tärkeitä kohteita voivat olla esimerkiksi sairaalat ja teollisuuslaitokset.

Verkkoyhtiöt ovat valmiita maksamaan ylimääräistä pitääkseen taajuuden vakiona mahdollisten häiriöiden ehkäisemiseksi. Perinteisesti taajuuskorjaukset on hankittu kaasuvoimaloilta tai generaattoreilta, jotka pystyvät luotettavasti tuottamaan sähköä verkkoon minuuteissa. Vaikka suuret akkujärjestelmät ovat kalliita, korkean säätösähkön hinnan takia ne ovat eräs vaihtoehto nopeaan taajuuden korjaamiseen.

Tesla on asentanut Etelä-Australiaan 100 MW:n akkujärjestelmän, joka pystyy tuottamaan tehoa verkkoon lähes välittömästi. Jos verkossa on puolestaan liikaa tehoa, akku lataa itseään, ja pystyy näin tasapainoittamaan verkkoa molempiin suuntiin. Teslan akkujärjestelmä on vähentänyt tehotasapainon korjaamiseen vaadittuja kustannuksia Etelä-Australiassa jopa 90 %. Akku ei kuitenkaan korvaa suuria voimaloita täysin, vaan pidempiaikaisessa häiriössä (tunti tai enemmän), voimalat otetaan myös käyttöön. [13]

3. TEHOTASAPAINON HALLINTA SUOMESSA

Tässä luvussa kerrotaan aluksi Suomen erilaisista kuormitustilanteista, ja miten sähkön siirtovarmuus on toteutettu. Tämän jälkeen esitetään tehoreservijärjestelmän rakennetta ja tällä hetkellä käytettävissä olevia reservejä.

3.1 Kuormitus

Normaalitilanteessa viikkokeskitehot ovat kesäisin noin 8000 MW. Talvisin keskitehot vaihtelevat pääosin 11000 ja 12 000 MW:n välillä. Tuonnin määrä pysyy noin 2000 MW:ssa ympäri vuoden. [14] Voimakas tuontiriippuvuus voi olla uhka siirtovarmuudelle, mutta kansainvälisistä sähkömarkkinoista ja siirtoyhteyksistä ulkomaille on kuitenkin positiivinen vaikutus siihen [15]. Siirtovarmuudella tarkoitetaan sovitun energiamäärän toimittamista eikä Fingridillä ei ole oikeastaan ongelmaa tämän kanssa. Viime vuoden toimittamatta jäänyt energia oli noin 50 MWh ja siirtovarmuus yli 99,9999 %. Häiriöitä oli yhteensä hieman alle 250 ja luonnonilmiöiden aiheuttamia oli noin 100 kpl. [2]

Suomen kulutushuiput asettuvat yleensä tammi-helmikuulle, jolloin pelkästään kotitaloudet muodostavat noin kolmanneksen sähkönkulutuksesta [16]. Raporteista ja tilastoista voidaan huomata, että kulutushuiput ovat melko verrannollisia pakkasjaksoihin, mutta poikkeuksiakin löytyy. Taulukkoon 1 on kirjattu vuosien 2008-2016 kulutushuipputunteja, ja niitä vastaavia lämpötiloja.

Taulukko 1. Talvien 2008 – 2016 kulutushuipputunnit ja lämpötilat [17]

Päivä	Tunti	Kulutus (MWh/h)	Lämpötila (°C)
4.1.2008	17-18	13 288	-8
16.1.2009	8-9	13 045	-11
28.1.2010	8-9	14 320	-16
18.2.2011	9-10	14 804	-28
3.2.2012	18-19	14 304	-23
24.1.2014	8-9	14 288	-17
22.1.2015	8-9	13 494	-15
7.1.2016	17-18	15 105	-25

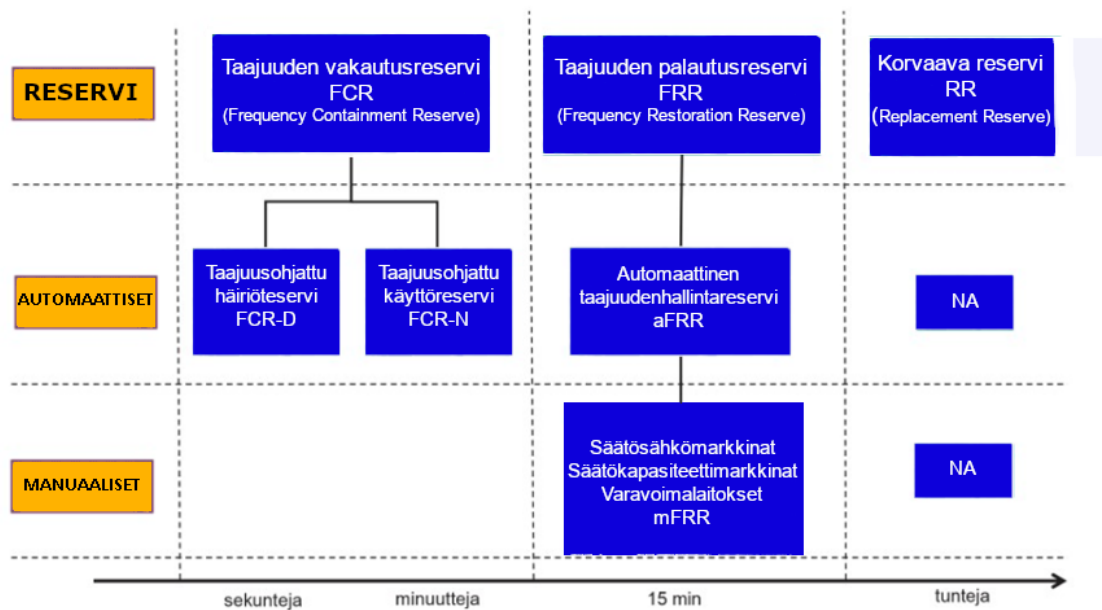
Kaikkien aikojen korkein kulutus Suomessa on ollut 7.1.2016 tunnilla 17-18, jolloin kulutus oli 15 105 MWh/h. Omaa tuotantoa oli tuolloin 10 874 MWh/h ja nettotuontia 4 231 MWh/h. Vaikka tuotantokapasiteetti oli lähes kokonaan käytössä, sähkön riittävyys ei ollut kuitenkaan vaarassa. Edellisten vuosien tapaan tuotantovaje katettiin tuonnilla. Kulutushuipun aikaan ei esiintynyt häiriöitä, ja käyttötilanne oli normaali. Tehoreservejä ei myöskään tilanteen johdosta täytynyt aktivoida. Fingridin käytettävissä oli kuitenkin yhteispuhjoismaisten velvoitteiden edellyttämä määrä nopeaa häiriöreserviä sekä taajuusohjattua käyttö- ja häiriöreserviä viikolla, jolla kulutus oli korkeimmillaan. [17]

3.2 Käytettävissä olevat reservit

Tehoreservijärjestelmä varmistaa sähkön toimitusvarmuuden, kun sähkön tarjonta ei riitä kattamaan sähkönkulutusta. Toimitusvarmuudella tarkoitetaan siirto- ja jakeluverkkojen luotettavaa toimintaa tai energian ja tehon riittävyyttä. Reservimarkkinoiden hallinnasta vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. [18] Reservejä ovat Fingridin ylläpitämät reservimarkkinat ja Energiaviraston valvoma erillinen tehoreservijärjestelmä [19].

3.2.1 Fingridin reservimarkkinoiden tuotteet

Reservituotteet jaotellaan käyttötarkoituksen perusteella kolmeen ryhmään: taajuuden vakausreserveihin (FCR), taajuuden palautusreserveihin (FRR) ja korvaaviin reserveihin (RR).



Kuva 4. Reservijärjestelmän rakenne. [11]

Taajuuden vakausreservi jakautuu vielä häiriö- ja käyttöreserviin. Ne ovat automaattisesti aktivoituvia ja niitä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Käyttöreservillä pyritään pitämään taajuus normaalialueella 49,9 – 50,1 Hz. Häiriöreservien tarkoitus on pitää taajuus vähintään 49,5 Hz:ssä taajuuden laskiessa normaalialueen alapuolelle. Niille asetetut tekniset vaatimukset löytyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. Käyttö- ja häiriöreservin tekniset vaatimukset [11].

	Säädön vähimmäiskoko	Aktivoitumisaika	Muuta
Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1 MW	3min ± 0,1 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella	Kuollut alue maksimissaan ± 0,05 Hz
Taajuusohjattu häiriöreservi, voimalaitokset	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 %, -0,50 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella	
Taajuusohjattu häiriöreservi, relekytketyt resurssit	1 MW	Vaihtoehto 1: 5 s / 50 % 30 s / 100 %, -0,50 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella Vaihtoehto 2: koko kohteen irtikytkentä välittömästi, kun taajuus 5 s ≤ 49,7 Hz TAI 3 s ≤ 49,6 Hz TAI 1 s ≤ 49,5 Hz	Kuorman saa kytkeä takaisin, kun verkon taajuus on ollut vähintään 49,9 Hz 3 min ajan

Ennen reservimarkkinoille osallistumista edellä olevien vaatimusten täytyminen täytyy osoittaa säätökokeilla. [11]

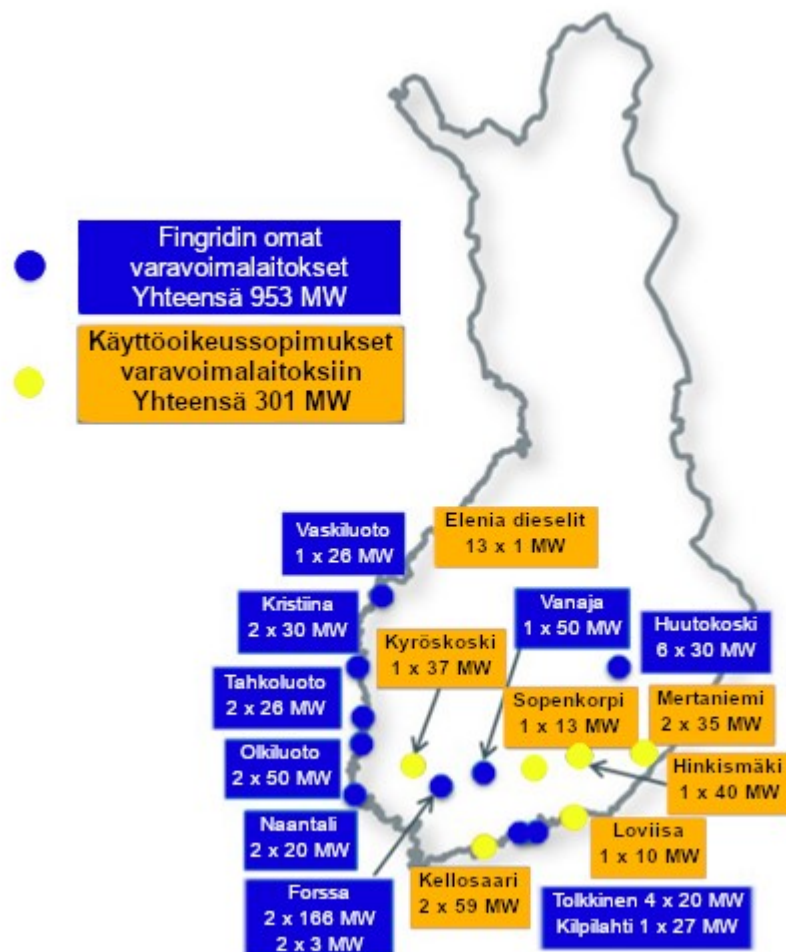
Taajuusohjattu käyttöreservi on käytössä jatkuvasti. Se säätää automaattisesti paikallista taajuutta parin minuutin viiveellä. Säädön tulee kyetä toimimaan tehonlisäyksenä tai tehonpudotuksena. Taajuusohjattu häiriöreservi otetaan käyttöön suuremmissa taajuuspoikkeamissa, mutta se toimii jo sekunneissa. Tämän reservin tarvitsee kyetä vain taajuuden ylössäätöön, mikä tarkoittaa voimaloiden tehonlisäystä tai kuormien tehonpudotusta. Myös taajuusohjattu häiriöreservi perustuu paikalliseen taajuusmittaukseen. [20]

Taajuuden palautusreservi koostuu automaattisesta taajuudenhallintareservistä, säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoista sekä varavoimalaitoksista. Taajuuden palautusreservien tehtävänä on palauttaa taajuus takaisin normaalialueelle (49,9 Hz – 50,1 Hz). Kun taajuus on palautettu normaalialueelle, aktivoituneet taajuuden vakautusreservit vapautetaan takaisin käyttöön. [11]

Automaattinen taajuudenhallintareservi säätää jatkuvasti voimalaitosten tai kulutuskohdeiden tehoa Fingridin lähettämän tehonpyyntisignaalin mukaan. Minimisäätö on 5 MW ja sen aktivoitumisaika 2 minuuttia [20]. Tehonpyyntisignaali lähetetään automaattisesti 10 sekunnin välein. Jos aktivointipyyntö on alassäätöä, lähetettävän signaalin etumerkki on negatiivinen. Fingrid hankkii automaattisen taajuudenhallintareservin muista Pohjoismaista ja tuntimarkkinoilta. Tarjoukset ylös- ja alassäätökykyisistä kapasiteeteista tehdään erikseen. Niitä ei kuitenkaan hankita kuin tietyillä aamu- ja iltatunneilla. [11]

Säätösähkömarkkinat ovat yhteiset pohjoismaissa, ja kantaverkkoyhtiöt aktivoivat säätösähkömarkkinoilta tarjouksia tehotasapainon hallitsemiseksi. Tarjoukset tehdään viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötuntia, ja säätöjen resurssien täytyy pystyä 10 MW:n tehonmuutokseen 15 minuutissa. Aktivointi tapahtuu manuaalisesti. Säätökapasiteettimarkkinoiden avulla Fingrid varmistaa ylössäätötarjousten riittävyyden seuraavalle päivälle. Säätökapasiteetti kilpailutetaan viikoksi kerrallaan ja kilpailutuksessa valitut reservinmyyjät ovat sitoutuneita jättämään ylössäätötarjouksia säätösähkömarkkinoille. Säätökapasiteettitarjoukset otetaan käyttöön säätösähkömarkkinoiden tarjousten jälkeen. [20]

Nopea häiriöreservi tarkoittaa 15 minuutissa aktivoituvaa ylössäätökapasiteettia, ja siihen kuuluu Fingridin omat varavoimalaitokset ja pitkäaikaiset käyttöoikeussopimuskäytökset. Käyttöoikeussopimukset voimaloihin pyritään tekemään vähintään 10 vuodeksi. Näitä voimalaitoksia ei käytetä kaupalliseen sähköntuotantoon, vaan niillä täytetään nopean häiriöreservin velvoitteet. Nopean häiriöreservin tarve vaihtelee sen mukaan, mikä on mitoittavan vian suuruus kussakin tilanteessa. Mitoittavalla vialla tarkoitetaan jonkin yksittäisen tärkeän komponentin menetyksestä johtuvaa vikaa. Esimerkiksi siirtoyhteet tai suuret tuotantolaitokset ovat tällaisia komponentteja. Suomessa nopeaa häiriöreserviä tarvitaan tyypillisesti 880 – 1100 MW. [11] [20] Kuvaan 5 on merkitty nopean häiriöreservin voimalaitokset Suomessa.



Kuva 5. Nopean häiriöreservin voimalaitokset. [11]

Korvaavat reservit eivät ole käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä, mutta niiden tarkoitus on palauttaa aiemmin aktivoidut taajuuden palautusreservit jälleen valmiuteen. [5]

Suomessa taajuus pysyy normaalialueella hyvin. Dataa taajuusmittauksista kerätään jatkuvasti ja taajuusnäytteitä otetaan sekunnin välein. Taulukosta 3 voidaan havaita, että yli 50,1 Hz:n taajuuksia on esiintynyt hieman enemmän, kun alle 49,9 Hz:n. Vuosittain taajuus on ollut noin 200 tuntia normaalialueen ulkopuolella ja se jakautuu melko tasaisesti jokaiselle kuukaudelle

Taulukko 3. 0,1 Hz taajuuspoikkeamat vuosina 2012-2017. [21]

Vuosi	> 50,1 Hz (min)	< 49,9 Hz (min)	Yhteensä (min)
2012	6965	4977	11941
2013	6750	5212	11963
2014	5755	4959	10714
2015	5844	5166	11010
2016	7586	6754	14160
2017	6185	5884	12069

Tilanteita, joissa taajuus poikkeaa 0,2 Hz, eikä se palaudu normaalialueelle 15 minuutin kuluessa esiintyy harvoin. Fingrid on käyttänyt kahta eri laskentatapaa laskemaan tapausten lukumäärän. Ensimmäinen vertaa esiintyykö yksittäisiä taajuusnäytteitä normaalialueen ulkopuolella 15 minuutin aikana. Tällä tavalla laskettuna tapauksia on ollut vuosittain 0 tai 1. Toinen tapa laskee taajuusnäytteiden kahden minuutin keskiarvoa, jolloin taajuus ei ehdi aina takaisin normaalialueelle 15 minuutissa. Tätä menetelmää käyttäen tilanteita on muutamia vuodessa.

Vuosien 2012-2017 aikana Suomessa ei ole ollut tapauksia, joissa taajuus olisi ylittänyt 51,0 Hz tai ollut alle 49,0 Hz. [21] Suuria verkkohäiriöitä ei siis taajuuden puolesta ole oikeastaan esiintynyt, joten reservijärjestelmän toimintaa voidaan pitää luotettavana.

Kuvaan 6 on merkitty kuinka usein Fingridin reservituotteet aktivoituvat ja siitäkin voidaan huomata reservijärjestelmän luotettavuus taajuusohjatun häiriöreservin ja nopean häiriöreservin vähäisestä käytöstä.

Markkinapaikka	Sopimustyyppi	Minimisäätö	Aktivoitumisvaade	Aktivoituu
Taajuusohjattu käyttöreservi	• Vuosimarkkinat • Tuntimarkkinat	0,1 MW	3 min, kun taajuus poikkeaa 49,95-50,05 Hz:stä	Useita kertoja tunnissa molempiin suuntiin
Taajuusohjattu häiriöreservi	• Vuosimarkkinat • Tuntimarkkinat	1 MW	5 s / 50 % ja 30 s / 100 %, kun taajuus on 30 s alle 49,7 Hz (kulutukselle)	Muutamia kertoja vuodessa
Taajuusohjattu häiriöreservi (on-off-malli)	• Pitkäaikainen sopimus	10 MW	Välittömästi, kun taajuus alle 49,5 Hz	Noin kerran vuodessa
Nopea häiriöreservi	• Pitkäaikainen sopimus	10 MW	15 min	Noin kerran vuodessa
Tehoreservi (EMV)	• Pitkäaikainen sopimus	10 MW	15 min kulutukselle 12 h tuotannolle	Harvoin (1-2 kertaa talvikaudella)
Säätösähkömarkkinat	• Tuntimarkkinat	10 MW	15 min	Tarjosten mukaan, useita kertoja vuorokaudessa

Kuva 6. Fingridin reservituotteiden aktivoinnit. [22]

3.2.2 Tehoreservijärjestelmä

Tehoreservijärjestelmä turvaa sähköenergian toimitusvarmuuden suunnitellun sähkön tuotannon ollessa riittämätön sähkönkulutukseen. Se perustuu lakiin sähkön tuotannon ja -kulutuksen välisestä tasapainosta ja on ollut käytössä vuoden 2007 alusta lähtien. Tehoreserviin voivat osallistua tuotantolaitokset tai sähkönkulutuksen joustoon kykenevät yksiköt. Energiavirasto määrittää tarvittavan tehoreservin määrän, kilpailuttaa voimalaitokset ja valvoo tehoreservijärjestelmän toimintaa sekä lain noudattamista. Järjestelmän hallinnoinnista ja päätöksistä käynnistää voimalaitokset vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid ja sen tytäryhtiö Finextra Oy.

Tehoreservi valitaan muutamaksi vuodeksi kerrallaan ja tämänhetkinen jakso loppuu kesäkuussa 2020. Energiavirasto määrittäi vuonna 2016 seuraavan tehoreservikapasiteetin tarpeeksi noin 600 MW ja kulutusjouston tavoitteeksi 60 MW. Se sai 16 tarjousta voimalaitosyksiköistä ja 2 kulutusjoustokohteesta. Tarjouksia vertailtiin kustannusten osalta ja niistä hyväksyttiin 4 voimalaitosyksikköä, joiden kokonaiskapasiteetti on yhteensä 707 MW. Kulutusjouston tarjosten kapasiteetti oli yhteensä 22 MW, joten tavoiteltua 60 MW:a ei saavutettu, mutta molemmat tarjoukset hyväksyttiin. Voimalaitosten kokonaiskustannukset tuotettua megawattia kohden ovat tällä tehoreservikaudella 53 –

$62 \frac{\text{k€}}{\text{MW}}$. Kokonaiskustannuksia järjestelmästä syntyy vuosittain noin 13,8 miljoonaa euroa ja ne koostuvat esimerkiksi ylläpito-, käyttö- ja käynnistyskustannuksista. Järjestelmä on ollut vuoden 2019 aikana käytössä vain 12.2. – 14.2. välisenä aikana (tarkistettu 11.4.2019) ja korkein hetkellinen tehontarve on ollut 210 MW. [23] [24]

Talviaikana (1.12.-28.2.) voimalaitosyksikön tulee käynnistyä viimeistään 12 tunnissa ja sen tulee kyetä tarjoamaan vähintään 200 tuntia käyttösopimuksen mukaista täyttä tehoa. Muina aikoina käynnistysaika on korkeintaan yksi kuukausi. Voimalaitokset voivat myydä tehoreservijärjestelmään osan tuotantokapasiteetistaan ja Fingridin luvalla tuottaja voi käyttää loppukapasiteettia omaan tarpeeseen. Ylläpitokorvauksia tuottajalle ei makseta niiltä päiviltä, joilta laitos on sen omassa käytössä. Voimalaitosyksiköille on asetettu vaatimuksia tehoreservilaissa. [25]

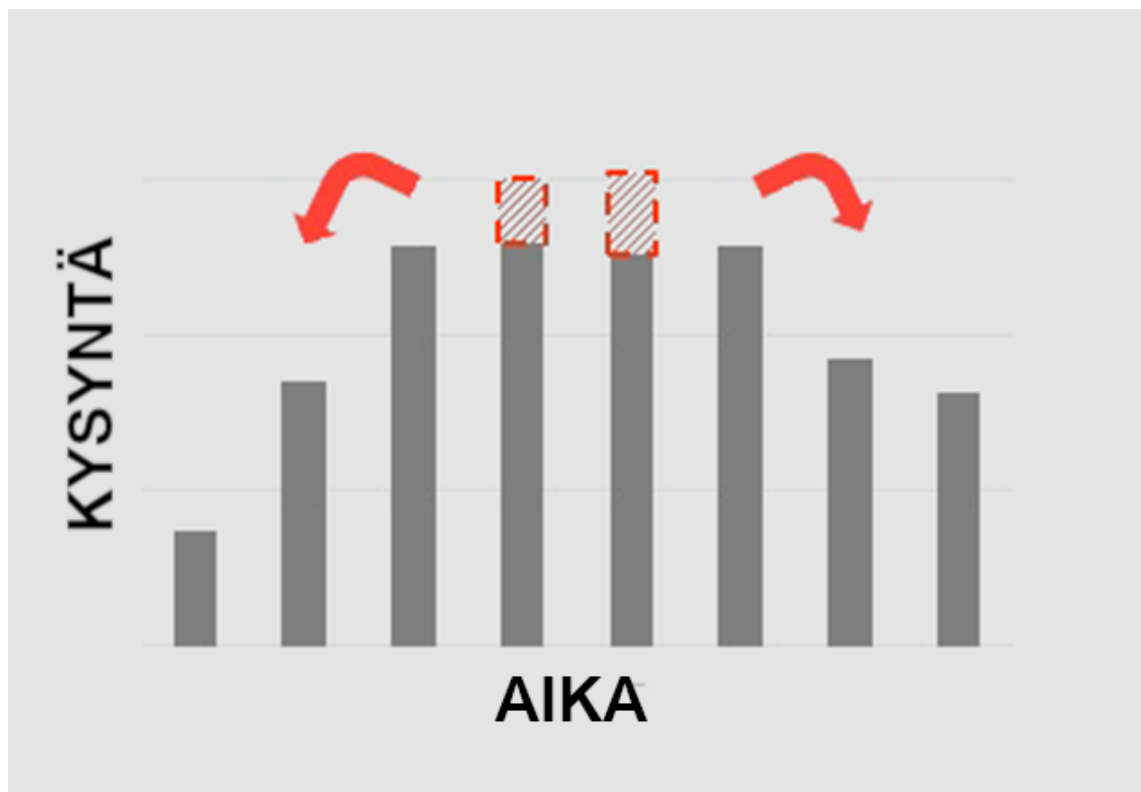
3.3 Kysyntäjousto

Tuotannon muuttuessa yhä enemmän sääriippuvaiseksi, se ei pysty mukautumaan niin hyvin kulutuksen vaihteluihin. Ajoittain sähköä tuotetaan paljon ja se on halpaa, joskus tuotanto on pientä ja sähkön hinta on kalliimpi. Saatavuus näkyy suoraan hinnassa, ja tästä syystä myös kulutuksen olisi syytä mukautua vaihteluihin sähköntuotannossa. [3]

Suomen kylmien säiden vuoksi sähkölämmityksen tehontarve on suuri, eikä edes Suomen oma ydinvoimakapasiteetti riitä kattamaan sitä. Sähkölämmitystä voidaan ohjata hetkeksi pois päältä muuttamatta merkittävästi asunnon lämpötilaa. Kysyntäjousto onkin jo ollut pitkään käytössä sähkölämmityksen yö sähköhousena. Kysyntäjousto voitaisiin hyödyntää myös muissa kohteissa sähkölämmityksen lisäksi, kuten ilmanvaihdossa, jäähdytyksessä ja kylmlaitteissa. Sähköautot tulevat olemaan myös hyvä joustoressurssi, ehkä jo lähitulevaisuudessa. Kuormien ja kulutuksen ohjaus toteutetaan pääosin automaatiolla, mutta varsinkin investointipäätöstä tehdessä tarvitaan kuluttajan aktiivisuutta. [26]

Kysyntäjoustolla pyritään ohjaamaan asiakkaiden sähkönkulutusta korkean kulutuksen tunneilta ajankohtiin, jolloin kulutus on pienempää [27]. Uusien sähkömittareiden avulla pystytään seuraamaan kulutusta jopa tuntitasolla, jolloin asiakkaat saavat parhaimman hyödyn sähkönkäytön ajoittamisesta [3]. Toimenpide vahvistaa sähkömarkkinoiden toimintaa, ja sen avulla kyetään vaikuttamaan sähkön markkinahintaan. Kulutuksen tasaaminen hyödyntää järjestelmän lisäksi myös asiakkaita, koska korkean kulutuksen aikaan sähkön hinta on paljon korkeampi. Sähkönkulutusta ajoittamalla asiakkaat pystyvät pienentämään sähkölaskuaan, ja järjestelmätasolla 2 MW:n kulutuksen siirto huipputunnilta voi aikaansaada 1,4 miljoonan euron säästöt. [27] [28]

Taloudellisten hyötyjen lisäksi kysyntäjoustolla voidaan varmistaa tehon riittävyys huippukuormitustilanteessa. Kulutuksen ohjaaminen normaalitilanteissa pienentää kapasiteettitarvetta tuotannossa ja sähköverkoissa. Näiden hyötyjen ansiosta sähkövoimajärjestelmän luotettavuus paranee ja kustannuksia saadaan laskettua. [26]



Kuva 7. Kulutuksen siirto kulutushuipputunneilta matalamman kulutuksen tunneille. [28]

Kysyntäjousto helpottaa uusiutuvan energian lisäystä sähkömarkkinoille. Normaalitylanteessakin uusiutuvan energian tuotanto saattaa vaihdella huomattavasti, jolloin kulutuksen siirto on tärkeää. [26]

Sähkönkauppaa käydään eri markkinoilla eri aikaan ennen, kun sähkö toimitetaan ja kysyntäjousto soveltuu niistä kaikille. Elspot-markkinoilla (day-ahead) sähkökauppaa käydään seuraavan päivän tunneille ja on sähköpörssin perusta. Kaupat tehdään vuorokausi ennen fyysistä sähkön toimitusta. Elbas-markkinat (Intra-day) ovat jälkimarkkinat Elspotille ja niiden avulla tasapainoitetaan Elspot-markkinoita. Kaupankäynti pyritään toteuttamaan lähellä sähkön toimitusta ja Elbas-markkinat sulkeutuvat tuntia ennen käyttötuntia. Tuntikohtaista kauppaa käydään säätösähkömarkkinoilla, jossa jätetään tarjouksia ylös- ja alassäädöstä 45 minuuttia ennen käyttötuntia. Viimeiset markkinat ennen sähkön toimitusta ovat taajuusohjatut reservit, joihin voi osallistua vuosi- tai tunti-markkinoilla. Tarvittaessa tarjottu kapasiteetti aktivoituu automaattisesti sekunteja tai minuutteja ennen sähkön toimitusta. Lisäksi huippukulutustilanteisiin on varauduttu energiaviraston ylläpitämällä tehoreservillä.

Kuvassa 8 näkyy miten kysyntäjousto jakautuu eri markkinoille. [29]



Kuva 8. Kysyntäjousto Suomessa. [29]

Kuten luvussa 2 mainittiin, sähkömarkkinaosapuolten tulee suunnitella tuotantonsa ja kulutuksensa tasapainoon. Käytännössä osapuolet eivät kuitenkaan pysty tähän ja ne tarvitsevat toimittajan, joka tasapainottaa tämän sähkötaseen. Nykyisessä sähkömarkkinamallissa taseselvitykset tehdään 60 minuutin välein, mutta säätökykyisen tuotannon vähetessä markkinoidenkin pitää kehittyä. Eurooppalaisiin verkkosäätöihin kuuluvan tasehallinnan suuntaviivan mukaan kaikkien EU-maiden tulee siirtyä 15 minuutin taseselvitysjaksoon ennen vuotta 2021. Pohjoismaiden tavoitteena on siirtyä varttitaseeseen samanaikaisesti. Joissain Keski-Euroopan maissa kaupankäynti alle tunnin tuotteilla on nykyään mahdollista, mutta yhteiseurooppalaisten 15 minuutin sähkömarkkinoiden käyttöönotto edellyttää varttitasetta. [30]

Varttitaseen hallinta edellyttää tehokkaita työkaluja ja käynnissä oleva Datahub-hanke tulee parantamaan nykyistä tiedonsiirtoa. Datahub on järjestelmä, johon tullaan tallentamaan tärkeää tietoa sähkön käytöstä. Se tulee nopeuttamaan ja parantamaan jokaisen sähkömarkkinaosapuolen toimintaa, kun kaikki tiedonvaihdon prosessit hoidetaan sillä. Datahub tulee hoitamaan myös jakeluverkonhaltijan taseselvityksen ja tasevirheiden korjauksen. Järjestelmän tietoturva on toteutettu hyvin, jotta tiedon saa vain siihen oikeutettu osapuoli. [31]

4. TULEVAISUUDEN MUUTOKSET

Tämä luku käsittelee tulevaisuuden muutoksia Suomen sähköntuotannossa uusiutuvan energian ja ydinvoiman osalta. Uusiutuvan energian lisääminen verkkoon ei ole myöskään itsestäänselvyys, joten luvun lopussa pohditaan miten inertian pienenemisestä ja sääriippuvuudesta aiheutuvista haasteista selvittäään. Siirtoyhteydet -osiossa perehdytään hieman älyverkkoihin ja energiavarastoihin, sekä niiden merkitykseen tehotasapainon hallinnassa.

4.1 Tuotantomuodot

Ilmastonmuutos on kiihtynyt viime vuosina ja maailman energiantuotannonmallia ollaan parantamassa kohti päästötöntä. Täten myös Suomen sähköntuotantoon on tulossa suuria muutoksia. Teknologian kehittyessä uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön hinta on jatkuvasti laskussa ja esimerkiksi tuulivoima voi olla hyvissä olosuhteissa jopa edullisin tuotantomuoto. Ilmastopimukset kuten Pariisin sopimus ja Kioton pöytäkirja velvoittavat niin ikään maita päästöjen vähentämiseen, joten Suomen tuotanto ei ole ainoa, johon on tulossa muutoksia.

4.1.1 Uusiutuva energia

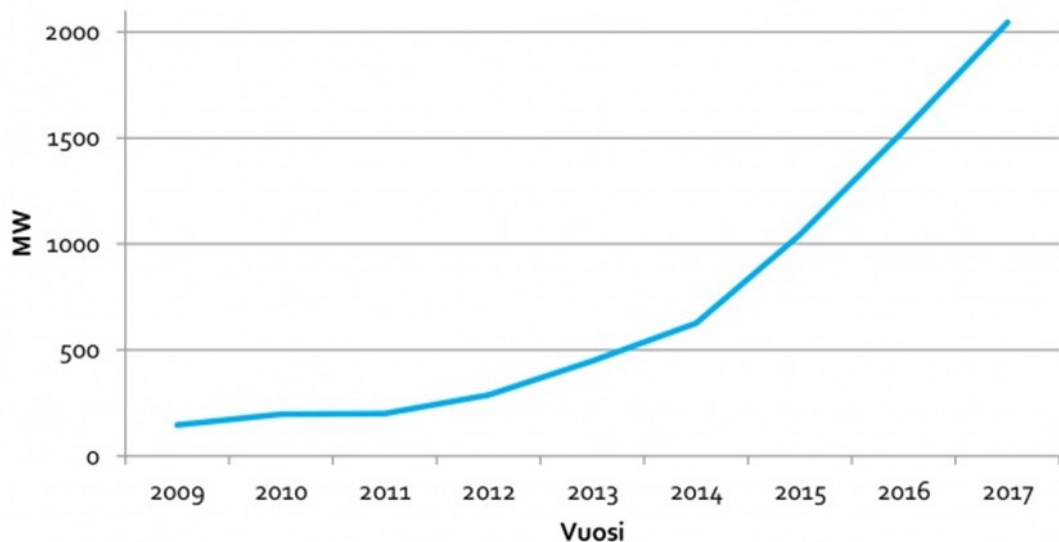
Vesivoima on Suomen tärkein uusiutuva sähköntuotantomuoto. Sen osuus vuosittaisesta tuotannosta vaihtelee 10-20 prosentin välillä riippuen vesitilanteesta. Vettä voidaan varastoida helposti ja vesivoiman hyvänä puolena on se, että sitä voidaan käyttää sähkönkulutuksen ollessa korkealla. Vähäsateisten vuosien aikaan ongelmaksi saattaa koitua varastoitavan veden vähyys, jolloin tuotanto voi jäädä huomattavasti pienemmäksi. Suomessa on yli 220 asennettua vesivoimalaitosta, ja niiden kokonaisteho on noin 3100 MW.

Vesivoimalla on todella merkittävä osa tehotasapainon hallinnassa. Pääosin nopeat muutokset tuotannon ja kulutuksen vaihteluissa hoidetaankin vesivoimalla. Sitä on nopea ja helppo säätää, mikä tekee vesivoimasta edullisinta ja teknisesti parasta säätövoimaa. Vesivoimalaitoksia pystytään käynnistämään, säätämään ja pysäyttämään nopeammin kuin muita voimalaitoksia. Investointikustannukset ovat suuret, mutta käyttökustannukset alhaiset.

Vesivoiman tulevaisuus on kuitenkin epävarma. Suomesta löytyy vielä hyödyntämättömiä vesivoimapotentiaalia, mutta usein taloudellinen kannattavuus tai työläs toteutus

hidastavat lisärakentamista. Osa potentiaalisista kohteista sijaitsee luonnonsuojelualueilla, joten rakentamismahdollisuudet ovat tältä osin rajalliset. Olemassa oleviin voimaloihin voidaan tehdä tehonkorotuksia, mutta suurin osa niistä on tehty jo peruskorjausten yhteydessä. [32]

Tuulivoimalla, biokaasulla ja puupolttoaineilla tuotettua sähköä tuettiin syöttötariffilla, jonka tarkoituksena oli lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja parantaa omavaraisuutta. Syöttötariffi otettiin käyttöön maaliskuussa 2011, ja lopetettiin tuulivoiman osalta vuoden 2017 marraskuussa. Nykyisin tukea myönnetään tuotantokustannuksiltaan edullisimmille uusiutuvien energiantuotantomuotojen hankkeille. Syöttötariffin vaikutus uuden tuulivoiman rakentamisessa oli merkittävä, ja alla olevasta kuvasta voidaan huomata, miten asennettu kapasiteetti lähti kasvuun vuoden 2011 jälkeen. [33]



Kuva 9. Asennetun tuulivoiman kokonaiskapasiteetti. [33]

Suomen hallituksen tavoitteena on tuottaa vähintään 8 TWh/a sähköä tuulivoimalla vuodesta 2030 eteenpäin. Tavoitteeseen päästään todennäköisesti melko helpolla, sillä viime vuonna tuotettiin jo 5,8 TWh/a, kokonaiskapasiteetin ollessa 2041 MW. [3] Muutama vuosi sitten hankkeita oli julkaistu noin 11 000 megawatin edestä, vaikka vuoden 2013 lopulla asennettua kapasiteettiä oli vain 448 MW [34]. Hankkeita esitetään koko ajan lisää, ja helmikuuhun 2019 mennessä niitä oli julkaistu yli 16 000 megawatin edestä [33].

Tekniikan kehittymisen myötä tuulivoiman kannattavuus on noussut, ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimuksen mukaan tietyillä olosuhteilla se voi olla jopa edullisin sähkön tuotantomuoto. Yksikkökokojen kasvaessa ja huoltokustannusten pienentyessä tuulivoiman kannattavuus paranee entisestään. Monin paikoin ydinvoima on kuitenkin vielä edullisin tuotantomuoto. [35]

Tuulivoiman lisäys aiheuttaa toisaalta uusia ongelmia. Luvussa 2 puhuttiin hieman inertiaista, joka on siis sähköverkon taajuudella pyöriviin koneisiin sitoutunutta liike-energiaa. Tuulivoimalassa on pyörivä roottori, mutta se ei pyöri verkon taajuudella. Tästä syystä liike-energia ei siirry automaattisesti sähköverkkoon. Aurinkoenergian lisääminen aiheuttaa inertian suhteen niin ikään hankaluuksia. Kun fossiilisia polttoaineita käyttävän lauhdevoimalaitosten osuutta vähennetään tuuli- ja aurinkoenergian lisääntyessä, inertia pienenee huomattavasti. Äkilliset tehotasapainon muutokset aiheuttavat tällöin suurempia ja nopeampia taajuuden muutoksia. [36]

Tuulivoiman tuottama teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin, eli jo 2-3 m/s muutokset tuulen nopeudessa aiheuttavat suuren eron voimalan tuottamaan sähkөөn. Voimalan teho saadaan laskemalla ensin ilmavirtauksen teho, ja siitä vähentämällä eri komponenteissa syntyvät häviöt. Ilmavirtauksen teho lasketaan kaavalla

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_i A v_0^3, \quad (2)$$

jossa A on tuulivoimalan lapojen pyyhkäisyypinta-ala, ja v_0 tuulen nopeus. Häviöitä ovat esimerkiksi ilmanvastuksen aiheuttama kitka pyöriville lavoille ja generaattorin sekä taajuusmuuntajan hyötysuhteet. [37] Tuulisuuden ja sitä myötä tuotannon ennustaminen on vaikeaa ja tämän takia tuotanto saattaa vaihdella muutaman tunnin sisällä maksimikapasiteetin lähistöltä melkein nolnaan eikä tuulivoima täten ole hyvää säätövoimaa.

4.1.2 Ydinvoima

Ydinvoimaa tullaan lisäämään Suomen lisäksi myös muualla maailmassa, sillä sen käyttäminen ei tuota suoranaisesti hiilidioksidipäästöjä. Luonnollisesti voimalan rakentaminen ja polttoaineen louhinta vievät energiaa, joten täysin hiilineutraali ratkaisu ei ydinvoimakaan ole. Osaa ihmisistä huolestuttaa ydinvoiman turvallisuus, mutta onnettomuuden riski on nykytekniikalla ja turvallisuusmääräyksillä hyvin pieni. [38] Kuvassa 10 on esitetty eri sähköntuotantomuotojen koko elinkaaren päästöt suhteutettuna yhteen gigawattituntiin ja siitä havaitaan, että ydinvoima on lähes hiilineutraalia.

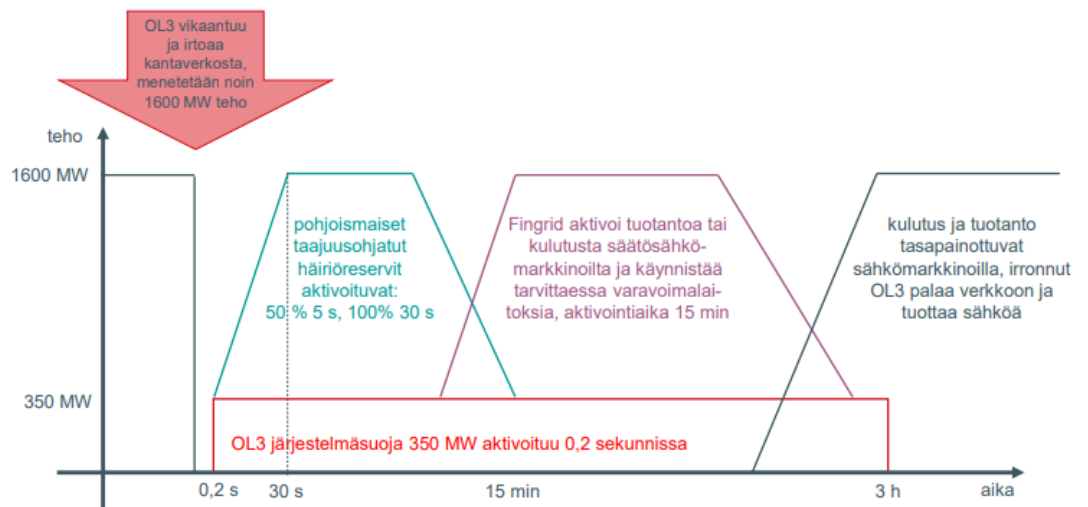


Kuva 10. Eri tuotantomuotojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt niiden elinkaaren aikana. [2]

Ydinvoiman lisäys tulee merkittävästi nostamaan Suomen omavaraisuutta sähköntuotannossa, mutta uudet voimalat suurilla yksikkökoilla tuovat mukanaan haasteita. Luvussa 2 mainittiin kantaverkon N-1-suunnittelukriteeristä, jossa järjestelmän tulee kestää tavanomaiset viat ilman keskeytyksiä tai seurannaisvikoja. Ydinvoimalaitosyksikön äkillinen irtoaminen verkosta lukeutuu näihin ja suurten yksiköiden tapauksissa vian aiheuttama tehovaje voi olla todella suuri.

Ajankohtaisin muutos ydinvoiman lisäämisen suhteen on Olkiluoto 3 (OL3), joka tulee tämänhetkisten arvioiden mukaan tuottamaan säännöllisesti sähköä verkkoon vuoden 2020 tammikuussa. Reaktorin nettoteho tulee olemaan 1600 MW ja vuotuinen sähköntuotanto 13 TWh, joka on noin 16 % Suomen vuosittaisesta sähkönkulutuksesta. [39] Jos nettotuonti pidetään likimain samana, OL3:n myötä voitaisiin luopua fossiilisten polttoaineiden käytöstä sähköntuotannossa. (ks. Kuva 2) Tuontisähkön ollessa kuitenkin osin hiilivoimaloilla tuotettua, voidaan kiistellä hiilineutraaliuden saavuttamisesta.

Olkiluoto 3 mittakaavan tuotantolaitoksen yllättävä irtoaminen verkosta aiheuttaa suuren tuotantovajeen, joka uhkaa koko pohjoismaisen sähköjärjestelmän toimintaa. Nykyään sähköjärjestelmä pystytään arvioiden mukaan pitämään stabiilina 1300 MW:n tehonmuutoksen jälkeen, mutta 1600 MW:n tehoista voimalaa käytettäessä täytyy varautua lisätoimenpitein. OL3:lle on tehty järjestelmäsuoja, joka rajoittaa vikatilanteen vaikutusta verkkoon. Järjestelmäsuoja kytkee välittömästi suuria teollisuuskuormia irti verkosta häiriötilanteessa. Kulutusta kytetään irti noin 350 MW, jotta taajuus ei laske liikaa, ja reservit ehtivät aktivoitua. Kuva 11 havainnollistaa toimintaa OL3:n irrottua verkosta. [40]



Kuva 11. Toiminta Olkiluoto 3 irrottua verkosta. [40]

Tuontikapasiteettia ulkomailta (pohjoiset siirtoyhteydet Ruotsista) pitää rajoittaa normaalitilanteessa, sillä Olkiluoto 3:n irrotessa verkosta siirtoyhteyksissä täytyy olla kapasiteettia sen tehon siirtämiseen. Ruotsiin on kuitenkin rakenteilla lisäyhteyksiä tuontikapasiteetin lisäämiseksi.

Järjestelmäsuoja voitaisiin kasvattaa, mutta jos OL3:n tehoa kasvatettaisiin, laitos ei olisi stabiili lähistöllä tapahtuvissa verkkovioissa. Toisaalta järjestelmäsuojan pienessä laitoksen tehoa on puolestaan rajoitettava sähköjärjestelmän 1300 MW:n kestokykyyn. [40]

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen ohella ydinvoima on melko joustamatonta energiantuotantoa, ja tämän takia ne eivät ole hyvää säätövoimaa. Tulevaisuudessa sähköntuotanto tulee koostumaan lähes pelkästään näistä, jolloin kysyntäjouston tärkeys kasvaa entisestään. [29]

Haasteista huolimatta ydinvoiman lisäämisestä on myös hyötyjä. Ydinvoimalaitosten suuret turbiinit ja generaattorit varastoivat paljon liike-energiaa, eli sähköverkon inertia kasvaa. Inertian lisäys on tärkeää, kun sääriippuvaiset tuotantomuodot kasvattavat osuuttaan.

4.2 Siirtoyhteydet

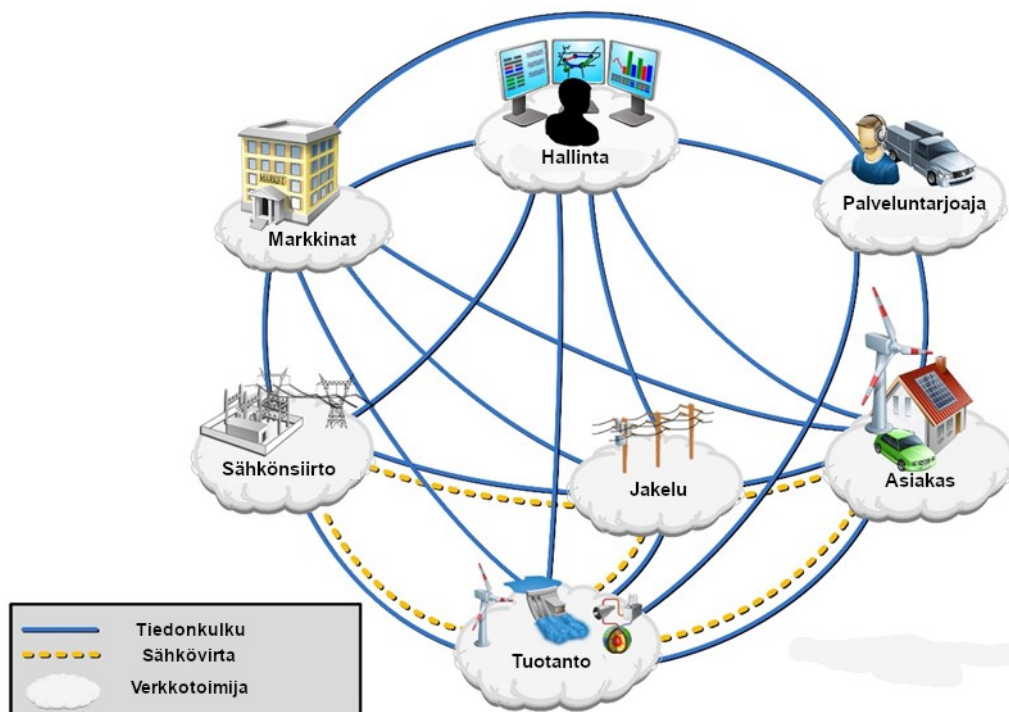
Sähköverkon rakenteeseen ei ole tehty isoja muutoksia kymmeneen vuosiin. Tulevaisuutta ajatellen sähköjärjestelmän monipuolisuuden täytyy kehittyä, sillä tuotantorakenne muuttuu ja energiatehokkuutta halutaan parantaa. Automaation merkitys kasvaa, jolloin järjestelmän luotettavuus ja kannattavuus paranee. Tässä luvussa perehdytään älykkääseen sähköverkkoon ja energiavarastoihin sekä niiden merkitykseen tehotasapainon hallinnassa.

4.2.1 Älykäs sähköverkko

Älykäs sähköverkko (Smart Grid) on monia eri teknologioita hyödyntävä kokonaisuus sähkönsiirrossa. Yhteiskunta on yhä riippuvaisempi sähköenergiasta, ja sen toiminta ilman sähköä alkaa olla lähes mahdotonta. Teknologioita yhdistämällä mahdollistetaan tuotannon ja kulutuksen joustava ohjaus, sekä uusiutuvan energian hyödyntäminen niin, että se tulee taloudellisesti kannattavaksi. Älykäs sähköverkko tarjoaa ratkaisuja myös tehotasapainon hallinnassa. [41]

Nykyinen malli sähkövoimajärjestelmästä on hyvin yksinkertainen. Tuotanto on keskitetty suuriin voimalaitoksiin, joista sähköä siirretään pitkiä matkoja kulutuksen tarpeisiin. Järjestelmän valvonta on osittain manuaalista ja häiriötilanteet ovat normaaleja. Loppukäyttäjän asema ei ole myöskään perinteisessä verkkomallissa niin tärkeä. [42] Suomen sähköntuotanto on moneen muuhun maahan verrattuna varsin hajautettua, mutta älykkäällä sähköverkolla pyritään myös pientuottajien kuten kotitalouksien tuotannon liittämistä sähköverkkoon.

Yksi älykkään sähköverkon suurista eroista on tiedonsiirto sähkösiirron ohella. Tiedonsiirron avulla älyverkko pystyy mukautumaan ja ennakoimaan laajasti verkon häiriöihin, esimerkiksi generaattorivikaan tai siirtolinjan katkeamiseen. Jos silmukoidussa verkossa ilmenee häiriö, älykäs sähköverkko osaa automaattisesti etsiä sähkölle toisen reitin pitäen keskeytyksen lyhyenä. Kaksisuuntainen tehonsiirto on älyverkon ominaisuus, joka mahdollistaa esimerkiksi loppukäyttäjien tuottaman aurinkosähkön siirtämisen verkkoon tai sähköautojen akkujen hyödyntämisen tehotasapainon hallinnassa. [42] Alla olevassa kuvassa nähdään miten tiedonsiirto ja kommunikointi tapahtuu eri sähkömarkkinaosapuolten välillä.



Kuva 12. Älykkään sähköverkon periaatekuva. [42]

Teknologioiden ja sovellutusten kehittyessä älyverkko pystyy oppimaan ja sen mukautumiskyky paranee. Tämä on hyödyksi myös tehotasapainon hallinnassa. Nykyisin kantaverkon järjestelmävastaavat pitävät huolen siitä, että kulutus sekä tuotanto ovat yhtä suuret, käyttövarmuus säilyy ja häiriötilanteet selvitetään nopeasti. Suomessa järjestelmävastaavana toimii lain määräämä Fingrid Oyj. [2] Loppukäyttäjien tehontarve on todella vaihtelevaa, ja vaatii paljon säätövoimaa. Tuotantokapasiteetista 10 % saattaa olla käytössä vain kymmeniä tunteja vuodessa. Tuotannon vastaaminen kulutukseen on

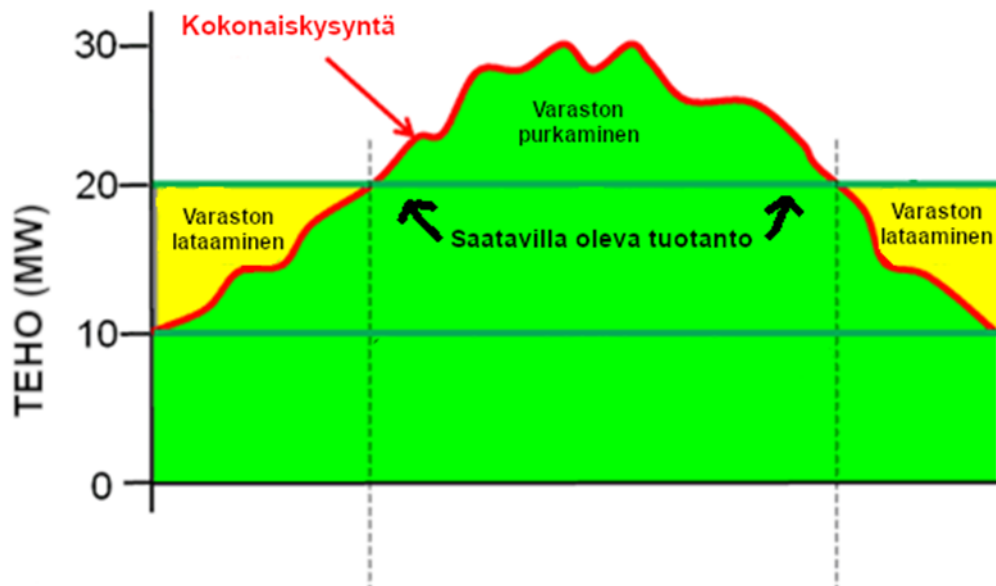
tällä tavoin tyypillisesti kallista ja epäkäytännöllistä. Järjestelmän epäonnistuessa generaattoreita saattaa hajota tai syntyä laajoja sähkökatkoja. Älykkään sähköverkon toimintamalli on oikeastaan päinvastainen. Se pyrkii muokkaamaan kysyntää saatavilla olevaan tuotantoon esimerkiksi automaatiolla tai hinnanohjauksella. Tämä voi käytännössä tarkoittaa älykkäiden sähkömittarien ohjaamien laitteiden hetkellistä sammuttamista ajankohtina, jolloin järjestelmän kokonaiskulutus on keskimääräistä suurempi. Älyverkko hyödyntää siis kysyntäjoustoa automaation avulla tehotasapainon hallinnassa. [42]

Mikroverkot ovat alueita, jotka voidaan kytkeä irti valtakunnallisesta sähköverkosta ja ne pystyvät toimimaan normaalisti. Ne sisältävät omaa tuotantoa kuten kotitalouksien aurinkosähköä, tuulivoimaa ja tyypillisesti jotain fossiilisella polttoaineella tuotettua energiaa. Esimerkiksi kaasuturbiineja on käytetty sääriippuvan tuotannon varana. Energiavarastoja käytetään fossiilisen energian ohella tehotasapainon hallinnassa. Mikroverkkojen etuja ovat paikallisen tuotannon hyödyntäminen ja itsenäinen toiminta muun verkon häiriöiden aikana. [43] Vikatilanteen ilmetessä mikroverkoilla voidaan varmistaa ainakin pienten alueiden sähkönsaanti, mutta ongelmaksi saattaa tulla mikroverkkojen hallinnointi niiden yleistyessä. Miten niitä käytetään tehotasapainon hallinnassa ja milloin ne ovat kiinni verkossa tai irti sähköverkosta ovat ajankohtaisia kysymyksiä mikroverkkojen kehittyessä. Äly- ja mikroverkot vaativat kuitenkin vielä paljon suunnittelua.

4.2.2 Energiavarastot

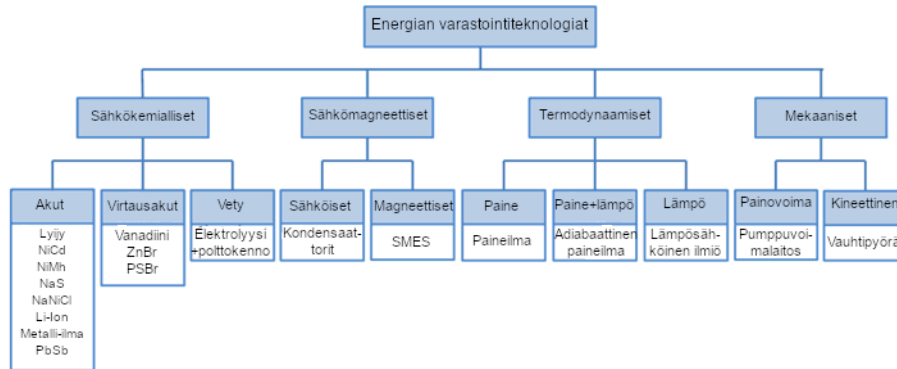
Säätövoiman tarpeen lisääntyessä ja sähkön suuren mittakaavan varastoinnin vaikeudessa myös erilaisten energiavarastojen mahdollisuuksia on otettu huomioon. Energiavarastot voivat mahdollistaa ratkaisun tulevaisuuden haasteisiin sähkövoimajärjestelmän muutoksissa. Varastojen täytyy olla päästöttömiä, jotta uusiutuvan energian integroinnista olisi hyötyä.

Erikokoisia energiavarastoja erilaisiin tarpeisiin tarvitaan tukemaan sääriippuvaista tuotantoa. Suurella mittakaavalla varastot ovat perinteisesti olleet pumppuvoimalaitoksia, joiden avulla on pystytty tarjoamaan tehotasapainon ja tehotasapainon hallintaa sekä reservejä. Muutamien tai kymmenien megawattien teholuokassa varastot voivat toimia samanlaisissa tehtävissä paikallisella tasolla sekä osallistua sähkömarkkinoille. Pieniä energiavarastoja voidaan hyödyntää loppukäyttäjien oman tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa. Tällä tavoin kotitaloudet voivat esimerkiksi käyttää päivällä tuotettua aurinkosähköä lämmittämään taloa yöaikaan, jolloin aurinko ei paista. [9, s.9] Kuvassa 13 on esitetty energiavarastojen periaatteellinen toiminta tehotasapainon hallinnassa.



Kuva 13. Energiavaraston toiminta tuotannon ja kulutuksen mukaan. [44]

Energiavarastojen tarkoitus tehotasapainon hallinnassa on kuvan mukaisesti siirtää sähköenergiaa verkosta ylituotannon aikana esimerkiksi sähköenergiaksi akkuihin tai liikeenergiaksi vauhtipyöriin. Tämä varastoitu energia muutetaan takaisin sähköenergiaksi tuotannon ollessa riittämätön. Varastointimahdollisuuksia on useita ja niiden kapasiteetit vaihtelevat suuresti. Alla olevassa kuvassa näkyy, miten varastointitekniikat jaotellaan toimintamenetelmän perusteella.



Kuva 14. Energiavarastot toimintamenetelmin jaoteltuina. [44]

Pienemmät energiavarastot pystyvät palauttamaan energiaa nimellisarvollaan verkkoon vain lyhyen ajan, jolloin niitä käytetään lähinnä taajuudenhallintaan. Akut ovat erinomainen vaihtoehto taajuudenhallinnassa, sillä ne kykenevät reagoimaan tehotasapainon muutoksiin sekunneissa ja pystyvät siten tuottamaan tehoa sähköverkkoon tai lataamaan itseään. Pidempiaikaiseen tuotantovajeeseen akut eivät ole ratkaisu, mutta niillä voidaan vakauttaa verkkoa, kunnes suuremmat energiavarastot kuten mekaaniset pumppuvoimalaitokset saadaan käyntiin. [44]

Kuvan 14 vasemmassa reunassa olevat sähkökemialliset ja sähkömagneettiset varastot toimivat lähes välittömästi. Yksi tulevaisuuden vaihtoehdoista voi olla kuvassa 14 esiintyvä SMES. SMES on suprajohtava sähkömagneetti, joka varastoi energiaa sen muodostamaan magneettikenttään. Suprajohtavuus tarkoittaa materiaalin tilaa, jolloin sen resistiivisyys katoaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos suljettuun virtapiiriin viety sähköenergia ei pienene ja energiaa voitaisiin varastoida ikuisesti. Suprajohtavuuteen liittyy monia haasteita, joista merkittävin on sen toimintalämpötila lähellä absoluuttista nolapistettä, ja tämän takia SMES ei ole nykyisin laajassa käytössä. Suprajohtavuutta on tutkittu kymmeniä vuosia, mutta todellista läpimurtoa ei ole tapahtunut.

Toinen tulevaisuuden teknologia on vety, johon sitoutunut energia on myös mahdollista varastoida pitkään. Vetyyn varastoitunut energia muutetaan sähköenergiaksi

polttokennoilla, joiden toimintaperiaate on tunnettu jo 1800-luvulla. Polttokennoon tuodaan vetyä sekä happea ja sähkövirta alkaa kulkea, kun kenno kytketään ulkoiseen kuormaan. Suurimmat ongelmat vedyn ja polttokennojen tapauksessa aiheutuvat vedyn tuotannosta ja varastoinnista. Teknologian kehittyessä vedyn käyttö energiavarastona on potentiaalinen ja kustannukset ovat laskussa jatkuvasti. [45]

5. YHTEENVETO

Sähköenergian kasvavan kulutuksen myötä sähkövoimajärjestelmän toiminnan täytyy olla varmaa. Normaalissa käyttötilanteessa kaikkien sähkökäyttäjien sähkön saanti tulisi turvata. N-1-kriteerin myötä sähköverkon yksittäisten komponenttien, kuten muuntajan tai siirtolinjan vikaantuminen ei saa estää sähkön toimitusta. Tästä syystä ei voida keskittyä vain siihen, että tuotanto riittää kattamaan kulutuksen. Järjestelmän toiminnan kannalta hetkellinen tehotasapaino paljon tärkeämpää, eikä sitä voida saavuttaa pelkästään sähköenergian omavaraisuudella. Tehotasapainon järkkyyessä taajuus kasvaa tai pienenee ja liiallisen taajuusmuutoksen seurauksena kuormia saatetaan kytkeä irti suuremman vahingon estämiseksi.

Suomen sähkönkulutus on suurimmillaan tammi-helmikuussa, jolloin kotitalouksien sähkölämmitykset muodostavat noin kolmasosan kokonaiskulutuksesta. Tehotasapainon kannalta kulutushuipputunnit eivät ole olleet ongelma, sillä tuontisähköllä on varmistettu sähköenergian riittävyys. Toisaalta suuren tuotantoyksikön irtoaminen tällaisella ajanhetkellä vaatisi enemmän tuontisähköä, jolloin siirtokapasiteetti voisi loppua kesken. Tehotasapainon hallinnassa käytetään laajasti erilaisia reservituotteita. Taajuusohjattu käyttöreservi on käytössä jatkuvasti ja sen avulla taajuus pyritään pitämään normaalialueella. Säätosähkömarkkinoiden avulla tehdään suurempia (yli 10 MW) tehonsäätöjä useita kertoja vuorokaudessa. Muut reservituotteen ovat harvemmin käytössä. Energiavirasto määrittää vielä tehoreservin turvaamaan sähköenergian riittävyyden suunnitelluissa tilanteissa.

Kysyntäjousto tulee olemaan suuremmassa roolissa tulevaisuudessa tuotannon muuttuessa joustamattommaksi. Tuotannon pienentyessä äkillisesti, asiakkaiden kulutusta voidaan siirtää ajankohdille, jolloin kulutus on pienempää. Kulutuskohteet, joita ohjataan, valitaan siten että ohjauksesta ei aiheudu asiakkaalle haittaa. Kysyntäjoustolla saavutetaan säästöjä ja parannetaan järjestelmän toimintaa. Tulevaisuuden muutoksiin vastaaminen edellyttää kysyntäjouston kehittymistä ja se on otettu huomioon varttitase- ja Datahub-hankkeilla.

Fossiilisten polttoaineiden rajallisuus ja toimenpiteet ilmastonmuutosta vastaan muokkaavat tuotantomalleja. Hiilidioksidipäästöjä aiheuttavista tuotantomuodoista yritetään päästä eroon ja uusiutuvaan energiaan tehdään yhä enemmän investointeja. Tehotasapainon kannalta sääriippuvaliset tuotantomuodot kuten tuuli- ja aurinkoenergia tuovat haasteita, joita pyritään ratkaista älykkään sähköverkon ja energiavarojen avulla. Inertian puuttuminen ei myöskään helpota näiden tuotantomuotojen lisäämistä

sähköverkkoon. Ratkaisuja täytyy kuitenkin löytyä, jos halutaan luopua fossiilisilla energialähteillä tuotetusta sähköstä. On mielenkiintoista seurata miten esimerkiksi aurinkosähkön teknologia tulee kehittymään lähivuosina ja onko läpimurtoa havaittavissa. Ydinvoima lisää tuotantokapasiteettia suuresti ja sen voisi helposti ajatella olevan ratkaisu kaikkiin ongelmiin. Ydinvoima on kuitenkin melko joustamatonta ja täten huonoa säätövoimaa. Sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä säätövoiman merkitys tulee olemaan suurempi, eikä ydinvoima kykene nykytekniikalla tarjoamaan ratkaisua siihen.

Älyverkon autonominen toiminta ja ominaisuus mukautua eri tilanteisiin nostavat sähkövoimajärjestelmän toimintavarmuutta. Älykäs sähköverkko muokkaa kulutuksen kysyntäjoustop avulla saatavilla olevaan tuotantoon, eikä jätä tuotantokapasiteettia käyttämättä reservitarkoituksessa. Mielestäni tämä toimintatapa on todella kiinnostava ja odotan innolla älyverkkohankkeiden etenemisiä.

6. LÄHTEET

- [1] The Structure of Electric Power System [WWW]. [Viitattu 17.2.2019]. Saatavissa: <https://electrical-engineering-portal.com/electric-power-systems>
- [2] Fingrid Oyj. Suomen sähköjärjestelmä [WWW]. [Viitattu 27.3.2019] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>
- [3] Energiateollisuus. Perustietoa energia-alasta [WWW]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkon-tuotanto
- [4] Caruna Oy. Sähköverkko [WWW]. [Viitattu 27.3.2019] Saatavissa: <https://www.caruna.fi/caruna/sahkoverkko>
- [5] Energiateollisuus. Sähkötilastot [WWW]. [Viitattu 27.3.2019] Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot
- [6] Elecric Light&Power. AC vs. DC [WWW]. [Viitattu 28.3.2019] Saatavissa: <https://www.elp.com/articles/print/volume-80/issue-6/power-pointers/primer-on-transmission-ac-vs-dc.html>
- [7] AC Theory [WWW]. [Viitattu 28.3.2019] Saatavissa: <https://www.slideshare.net/L3Electrical/ac-theory>
- [8] Britannica. Alternating current [WWW]. [Viitattu 28.3.2019] Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/alternating-current>
- [9] Patrick T. Moseley, Jürgen Garche and Peter Adelman. Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing
- [10] Fingrid Oyj. Sähköjärjestelmän inertia [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/4_sahkojarjestelman_inertia.pdf
- [11] Fingrid Oyj. Reservit ja säätösähkö [WWW]. [Viitattu 17.2.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>
- [12] Fingrid Oyj. Toiminta sähköpulassa [WWW]. [Viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/toiminta-tehopulassa/>
- [13] Arstechnica. Tesla's new battery in Belgium shows value in dispatch speed. [WWW]. [Viitattu 27.2.2019]. Saatavissa: <https://arstechnica.com/information-technology/2018/05/teslas-new-battery-in-belgium-shows-value-is-in-dispatch-speed/>
- [14] Fingrid Oyj. Kulutus ja tuotanto [WWW]. [Viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/>
- [15] Fingrid Oyj. Ilmastomuutoksen torjunta asettaa sähköjärjestelmän huoltovarmuuden uusien haasteiden eteen [WWW]. [Viitattu 1.4.2019]. Saatavissa:

- <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/ilmastonmuutoksen-torjunta-asettaa-sahkojarjestelman-huoltovarmuuden-uusien-haasteiden-eteen/>
- [16] Fingrid Oyj. Fingrid arvioi sähkön riittävän tulevana talvena. [WWW]. [Viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2017/fingrid-arvioi-sahkon-riittavan-tulevana-talvena/>
- [17] Fingrid Oyj. Sähköjärjestelmän toiminta talvella 2015 - 2016.pdf [Viitattu 2.3.2019] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/sahkon-siirtovarmuus/sahkojarjestelman-toiminta-talvella-2015-2016.pdf>
- [18] Laki sähköntuotannon ja -kulutuksen välistä tasapainoa varmistavasta tehoreservistä. [Viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110117>
- [19] Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti [Viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnän_jousto_loppuraportti.pdf
- [20] Fingrid Oyj. Reservituotteen ja reservien markkinapaikat [pdf]. [Viitattu 10.3.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- [21] Fingrid Oyj. Frequency quality analysis 2017 [pdf]. [Viitattu 10.4.2019]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/frequency_quality_analysis_2017.pdf
- [22] Fingrid Oyj. Sähkön kysyntäjoustopotentiaalin kartoitus Suomessa [pdf]. [Viitattu 20.4.2019]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/fingrid_julkinen_raportti_kysyntajousto_16062014.pdf
- [23] Energiavirasto. Toimitusvarmuus [WWW]. [Viitattu 11.4.2019]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/toimitusvarmuus>
- [24] Fingrid Oyj. Tehoreservipalvelu [WWW]. [Viitattu 11.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tehoreservi/>
- [25] Fingrid Oyj. Käytösäännöt tehoreservijärjestelmän voimalaitosyksiköille [pdf]. [Viitattu 13.4.2019] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tehoreservi/kolmivuotiskausi-72017---62020/tehoreservin-kayttosaannot---tuotanto-2017.pdf>
- [26] Smart Energy Transition. Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia sähkön käyttäjiä ja laskee sähkön hintaa [WWW]. [Viitattu 4.4.2019]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/kysyntajousto-hyodyttaa-kaikkia-sahkon-kayttajia-ja-laskee-sahkon-hintaa/>
- [27] Elfi ry. Sähkökäytön Kysyntäjousto [WWW]. [Viitattu 15.3.2019] Saatavissa: <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto/>
- [28] Energy Market Authority. Demand Side Management [WWW]. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavissa: https://www.ema.gov.sg/Demand_Side_Management.aspx

- [29] Fingrid Oyj. Kysyntäjousto [WWW]. [Viitattu 5.4.2019] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>
- [30] Fingrid Oyj. Sähkömarkkinoiden kehitys [WWW]. [Viitattu 21.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/>
- [31] Fingrid Oyj. Datahub [WWW]. [Viitattu 21.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/palvelut/vahittaismarkkinoiden-tiedonvaihto/datahub/>
- [32] Energiateollisuus. Vesivoima [WWW] [Viitattu 16.3.2019] Saatavissa: https://energia.fi/perustieto_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima
- [33] Tuulivoimayhdistys. Tuulivoima Suomessa [WWW]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>
- [34] Westerberg Mikael. Jännitestabiiliuteen vaikuttavat tekijät Suomen voimajärjestelmässä. Diplomityö. (Selvitä miten viitataan)
- [35] Tekniikan Maailma. Tuulivoiman edullisuus [WWW]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://tekniikanmaailma.fi/tutkimus-tuulivoima-edullisinta-paitsi-jos-otetaan-huomioon-todelliset-tuotantokustannukset-jolloin-ydinvoima-edullisinta/>
- [36] Fingrid Oyj. Mitä on inertia [WWW]. [Viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- [37] Tuulivoiman perusteet pruju
- [38] Energy Information Administration. Nuclear Explained [WWW]. [Viitattu 4.4.2019]. Saatavissa: https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=nuclear_environment
- [39] Teollisuuden Voima Oyj. Olkiluoto 3 [WWW]. [Viitattu 4.4.2019] Saatavissa: <https://www.tvo.fi/OI3>
- [40] Fingrid Oyj. Olkiluoto 3 järjestelmäsuoja [pdf]. [Viitattu 4.4.2019] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/olkiluoto-3-jarjestelmasuoja.pdf>
- [41] STEK. Älykäs sähköverkko [WWW]. [Viitattu 8.4.2019]. Saatavissa: <https://stek.fi/alykas-sahkon-kaytto/alykas-sahkoverkko/>
- [42] <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6099519>
- [43] Engie. Microgrids [WWW]. [Viitattu 23.4.2019]. Saatavissa: <https://www.engie.com/en/businesses/microgrids-decentralized-energy/>
- [44] MPower UK. Grid Scale Energy Storage Systems [WWW]. [Viitattu 18.4.2019]. Saatavissa: https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm
- [45] Energy Storage Sense. Energy Storage Technologies [WWW]. [Viitattu 27.4.2019]. Saatavissa: <http://energystoragesense.com/energy-storage-technologies/>