

Lauri Pääkkilä

VESIVOIMAN MERKITYS SÄÄTÖVOIMANA SUOMESSA

VESIVOIMAN MERKITYS SÄÄTÖVOIMANA SUOMESSA

Lauri Päckilä
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Lauri Päckilä

Opinnäytetyön nimi: Vesivoiman merkitys säätövoimana Suomessa

Opinnäytetyön nimi englanniksi: The importance of hydropower as adjustable energy production

Työn ohjaaja: Timo Kiviahde

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2021

Sivumäärä: 54

Yhteiskunnan sähköjärjestelmä ja sen toimintakyvyn ylläpito on useimmille kansalaisille hyvin tuntematon kokonaisuus, eikä sen keskeisten elementtien merkitystä useinkaan ymmärretä. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda PVO-Vesivoima Oy:lle vesivoiman merkitystä sähköjärjestelmän ylläpidossa konkreettinen laite tai sovellus, jota voidaan hyödyntää esitellessä yhtiön toimintaa.

Työn pohjaksi tehtiin selvitys sähköjärjestelmän toiminnasta ja rakenteesta Suomessa, minkä perusteella lähdettiin miettimään sopivaa esitystapaa vesivoiman merkityksestä. Suomen sähköjärjestelmä on osa yhteispohjoismaista vaihtosähköverkkoa, johon kuuluu Suomen lisäksi Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan sähkönsiirtoverkot. Sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, jakeluverkoista, tuotantolaitoksista ja kuluttajista.

Sähkön tuotantoa pitää olla joka hetki yhtä paljon kuin kulutusta. Suomessa oleellimmat tuotantomuodot ovat ydinvoima, vesivoima, tuulivoima ja polttoon perustuvat lauhde- ja yhteistuotanto. Niistä yhteistuotanto ja ydinvoima ovat heikosti säätäviä tuotantomuotoja, ja tuulivoima sääriippuvaisena tuotantomuotona ei kykene säätöön juuri lainkaan. Ainoastaan vesivoima ja voimakkaasti vähentynyt lauhdevoima ovat hyvin säätäviä tuotantomuotoja.

Työssä tehtiin Excel-pohjainen laskuri, jossa voidaan luoda todellisia tilanteita vastaavia skenaarioita, joissa vesivoiman säätökyky korostuu erityisesti. Sähköjärjestelmän tasapainosta kertoo selkeimmin taajuus: jos tuotantoa on kulutukseen verrattuna liian vähän, taajuus alkaa laskea, kun taas liian paljon, taajuus vastaavasti kasvaa. Taajuuden liiallinen heilahtelu saattaa aiheuttaa vaurioita sähköverkossa olevissa laitteissa. Ensimmäisessä osiossa tulee esille vesivoiman nopea kyky reagoida äkillisiin muutoksiin verkon tasapainossa. Toisessa osassa esitetään yksistään lijojen voimalaitosten yhteistehonsäätökykyä. Kolmannessa osiossa havainnollistetaan Jumiskon säännöstelyjärvien energiavarastointikapasiteettia. Edellä mainituissa vertailuna käytetään akkuvarastoja sekä muutamia kuluttajille tuttuja sähköä käyttäviä laitteita.

Asiasanat: vesivoima, sähköjärjestelmä, säätövoima, sähkömarkkina

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	7
2.1	Sähkön historia.....	8
2.2	Sähkö saapuu Suomeen.....	8
2.3	Sähkön kuluttajat.....	9
2.4	Tuotantolaitokset.....	10
2.4.1	Ydinvoima.....	12
2.4.2	Tuulivoima.....	13
2.4.3	Yhteistuotantolaitokset.....	14
2.4.4	Lauhdevoima.....	16
2.4.5	Vesivoima.....	17
2.5	Sähkön siirto.....	17
3	SÄHKÖMARKKINA.....	19
4	TAAJUUSSÄÄTÖ.....	21
4.1	Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR).....	22
4.2	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N).....	22
4.3	Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D).....	22
4.4	Inertia.....	22
5	ENERGIAMURROS.....	24
5.1	Hiilidioksidipäästöt.....	25
5.2	Omavaraisuus.....	26
5.3	Siirtokapasiteetti naapurimaihin.....	27
6	PVO-VESIVOIMA OY.....	28
6.1	Yhtiö.....	28
6.2	Voimalat.....	28
7	VESIVOIMA.....	30
7.1	Vesivoima Suomessa.....	30
7.2	Vesivoimapotentiaali Suomessa.....	31
7.3	Vesivoimatekniikkaa.....	31
8	VESIVOIMAN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET.....	34
8.1	Ympäristövaikutukset.....	34

8.2	Vaelluskalat	34
9	HAVAINNOLLISTAVA TYÖKALU	36
9.1	Esitiedot	36
9.2	Suunnittelu	36
9.3	Toteutus	37
9.3.1	Vesivoima osana sähköjärjestelmää	37
9.3.2	Vesivoiman energiavarastointipotentiaali	42
10	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	49

1 JOHDANTO

Yhteiskunnan sähköjärjestelmä on kokonaisuus, jonka toimintaa tavallisen kuluttajan voi olla vaikea ymmärtää. Energia-ala on kuitenkin vaikuttamassa jokaisen modernin yhteiskunnan palveluiden piirissä elävien ihmisten elämään. Energiaan liittyvät asiat ovat keskeinen elementti myös poliittisessa keskustelussa.

Alati kiristyvien päästönormien ja ympäristöystävällisiä tuotantotapoja tukevien poliittisten päätösten myötä Suomessa on jo poistunut lähes täysin käytöstä kulutuksen mukaan helposti säädettävä lauhdetuotanto. Samaan aikaan tilalle on tullut runsaasti lisää tuuli- ja aurinkovoimaa, joiden tuotanto on täysin riippuvainen vallitsevista sääoloista. Tämän kehityksen seurauksena tarvitaan kulutusvaihteluita tasaamaan entistä enemmän säätövoimaa, jossa vesivoimalla on merkittävä rooli käytännössä viiveettömän tehonsäätömahdollisuutensa ja varastoaltaiden mahdollistaman energian yksinkertaisen varastoinnin ansiosta.

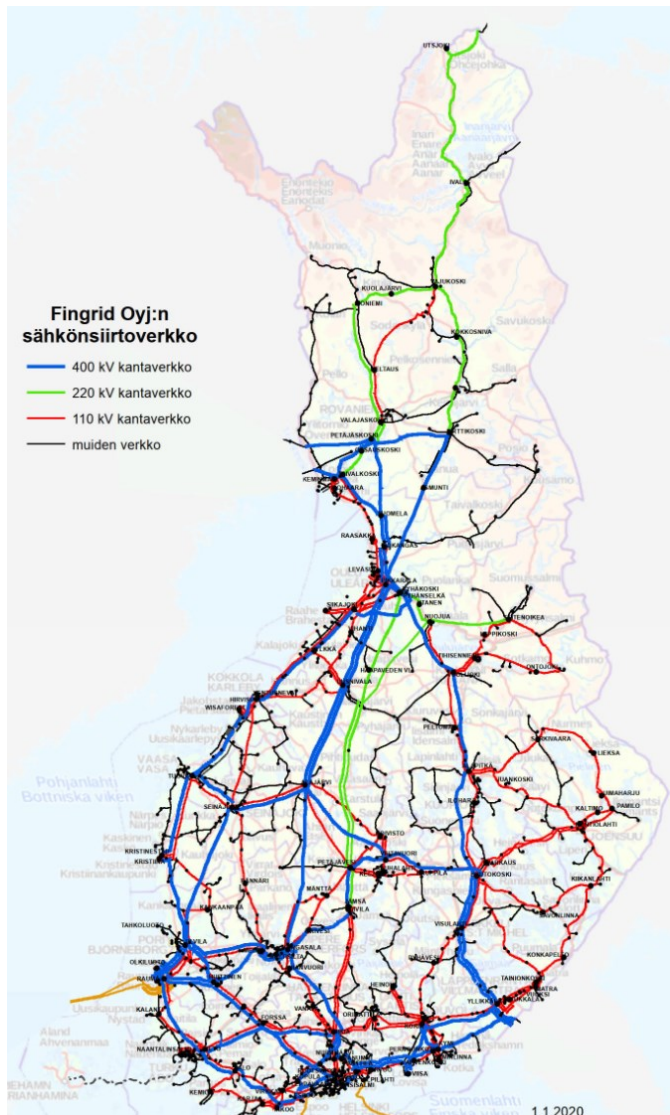
Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa animaatio tai laite, joka kuvaa vesivoiman merkitystä osana sähköverkkoa. Työn pohjaksi tehdään selvitys sähköjärjestelmän rakenteesta, toiminnasta ja sen hallintamekanismeista sekä vesivoiman roolista osana toimivaa sähköjärjestelmää.

Vesivoimatuotanto saa osakseen arvostelua ja kritiikkiä erityisesti sen aiheuttamien ympäristövaikeuksien vuoksi. Kritisoivien mielipiteiden esittäjillä puuttuu kuitenkin usein ymmärrys vesivoiman merkityksestä osana sähköjärjestelmää. Työn tilaaja on PVO-Vesivoima Oy, jonka tarkoitus on käyttää työstä saatavaa materiaalia apuna markkinoinnissaan esimerkiksi erilaisissa yleisötilaisuuksissa ja tapahtumissa.

2 SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Sähköjärjestelmä muodostuu erilaisista tuotantolaitoksista, siirto- ja jakeluverkosta sekä sähkönkuluttajista. Suomen sähköjärjestelmä kuuluu pohjoismaiseen vaihtosähköjärjestelmään, johon kuuluu kiinteästi Norjan, Ruotsin ja osa Tanskan sähköverkoista. Suomessa kantaverkkoyhtiönä toimii Fingrid Oyj, joka järjestelmävalvojana vastaa sähköverkon tasapainon ylläpitämisestä Suomessa

Fingridin kantaverkko koostuu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n voimajohdoista, jotka muodostavat sähkönsiirron päälinjat eri puolille Suomea sekä naapurimaihin (1) (Kuva 1).



KUVA 1. Suomen kantaverkko (2)

Sähköjärjestelmän toiminnan kannalta oleellisin asia on järjestelmän tasapaino, eli sähköä on joka hetki tuotettava saman verran kuin sitä kulutetaan. Järjestelmän tasapainosta kertoo parhaiten verkon taajuus, joka pyritään pitämään mahdollisimman lähellä 50:tä hertsiä (Hz). Mikäli tuotanto ylittää sähkön kulutuksen, taajuus nousee yli 50 Hz:iin. Vastaavasti jos kulutus nousee yli tuotannon, taajuus laskee alle 50 Hz:iin. (3.)

Taajuuden vaihtelua pyritään lähtökohtaisesti tasaamaan tuotannon tehoa säätämällä, jolloin käytetään niin sanottua säätövoimaa, joka on nykyisellään kotimaisen tuotannon osalta suurelta osin vesivoimaa. Jossain määrin voidaan myös leikata kulutusta, joka kehittyvien automaatiojärjestelmien myötä tulee tulevaisuudessa erityisesti kuluttaja-asiakkaiden keskuudessa lisääntymään. Myös jotkin suuret teollisuusyksiköt osallistuvat säätöön mahdollisuuksien mukaan kulutuksensa vähentäjinä tilanteen niin vaatiessa. (4.)

2.1 Sähkön historia

Toimiva sähköverkko on Suomessa kuluttajille normaali ja itsestään selvä asia, jonka olemassaoloa ei tavallisen ihmisen juuri tarvitse miettiä. Nykytilan saavuttaminen on vaatinut kuitenkin valtavien määrän erilaisia keksintöjä sekä määrätietoista kehitystyötä. Sähkön historia ulottuu ainoastaan reilun kahden vuosisadan päähän, kun Alessandro Volta keksi jatkuvaa sähkövirtaa kehittävän pariston vuonna 1800. (5, s. 8)

Vuonna 1879 yhdysvaltalainen keksijä Thomas Alva Edison sai valmiiksi kehittämänsä hehkulampun, jonka sarjatuotanto aloitettiin saman tien. Edisonin yhtiö, The Edison Electric Light Company sai hehkulampun myötä valmiiksi myös ensimmäisen sovelluksen sähkölaitoksesta. Ensimmäinen kaupallinen kohde rakennettiin New Yorkin Pearl Streetin alueelle, sisältäen höyrykonetta voimanlähteenään käyttävän dynamon, jakeluverkon ja käyttäjien hehkulamput. (5, s. 11.)

2.2 Sähkö saapuu Suomeen

Suomeen saatiin ensimmäisten joukossa käyttöön Edisonin keksimä sähkölaitos, kun Finlaysonin omistajaperheeseen kuuluva Carl von Nottbeck oli Edisonin palveluksessa työskenneltyään ehdotanut isälleen tehtaanpatruuna Wilhelm von Nottbeckille Edisonin valaistusjärjestelmän asennusta

puuvillatehtaan kutomosaliin Tampereella. Laitteisto otettiin käyttöön maaliskuussa 1882. Finlaysonin käytössä olleita dynamoita pyöritettiin aluksi vesivoimalla pyörivällä akselilla, jota oli jo aiemmin käytetty tehtaan mekaanisten koneiden pyörytykseen. Myöhemmin voimanlähteeksi vaihtui höyrykone. (5, s. 12.)

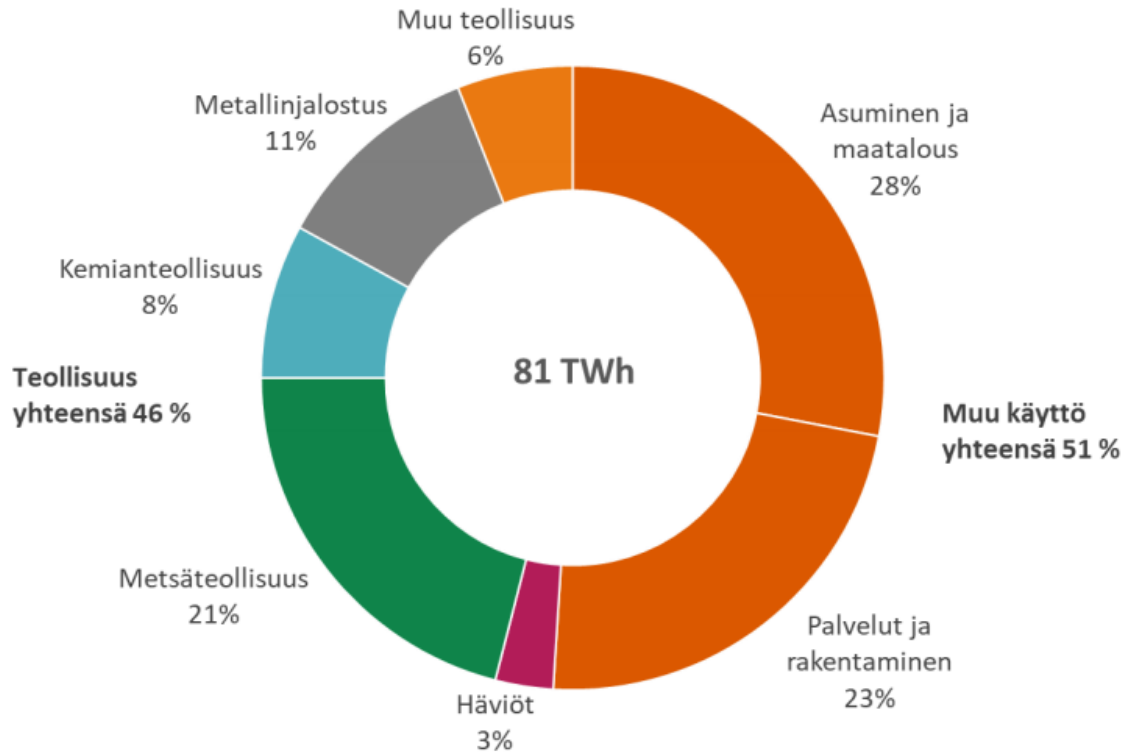
1800-luvun lopulla useimmat Suomen kaupungit olivat saaneet jonkinlaisen, lähinnä valaistukseen käytettävän sähköverkon. Suomen itsenäistyttyä vuonna 1917 alettiin sähköistää voimakkaasti myös maaseutua. Sotien jälkeen suuri osa suomalaistalouksista oli sähköverkon piirissä. (5, s.17 - 32.)

2.3 Sähkön kuluttajat

Suomessa sähkön kuluttajat jakaantuvat karkeasti kahteen osaan. Lähes puolet sähköenergiasta menee teollisuuden käyttöön, kun taas toinen puoli menee asumiseen ja maatalouteen sekä palvelu- ja rakentamissektoreille. (Kuva 2.)

Suomen elinkeinoelämän selkärangan muodostaa raskas teollisuus, erityisesti metsäteollisuuden tehtaat, joiden tuotantoprosessi vaatii runsaasti sähköenergiaa. Puuvaltaisena maana Suomen vienti on nojannut vahvasti metsäteollisuuden jalosteisiin. Metsäteollisuus ry:n ja Puusepänteollisuus ry:n jäsenyrityksillä on 169 tuotantolaitosta ympäri Suomea. (6.)

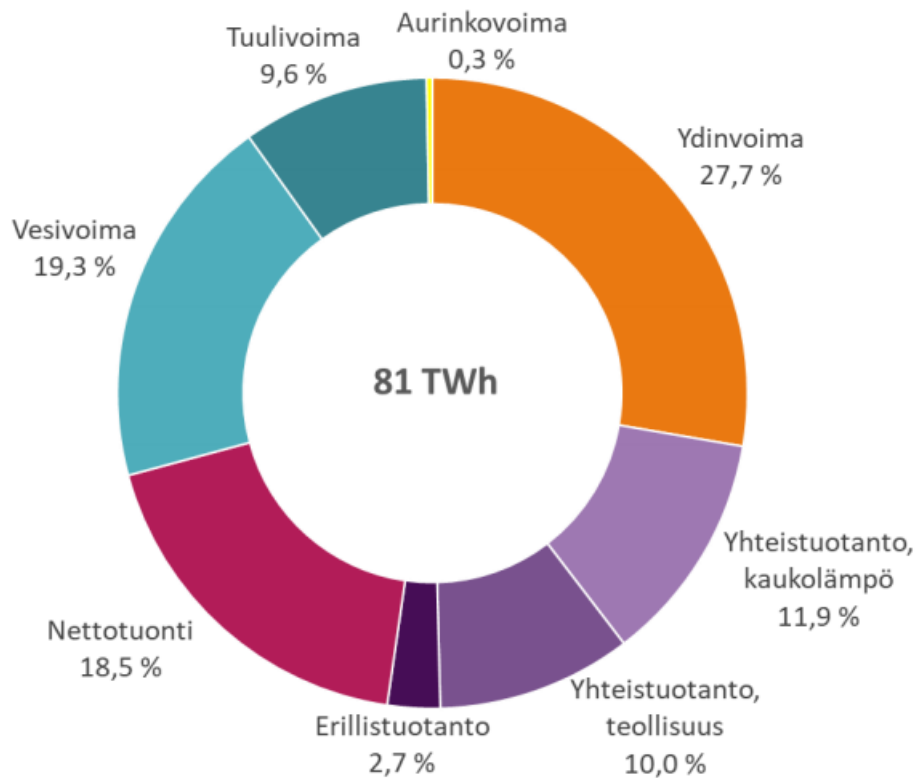
Metalliteollisuuden sektorilla yksittäiset tuotantolaitokset nousevat koko maan kuluttajista kärkipäähän. Suomen suurin yksittäinen sähkönkuluttaja on Outokummun Tornion terästehdas, jonka sähkönkulutus vuositasolla on noin 3 TWh, joka on lähes 4 % koko Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta. Boliden Kokkola Oy:n sinkkitehdas (n.1,2 TWh) ja SSAB:n Raahen terästehdas (n. 1 TWh) edustavat myös merkittävää osaa sähkön kokonaiskulutuksessa. (7, s. 25 - 34.)



KUVA 2. Sähkön kuluttajat Suomessa vuonna 2020. (8, s.20.)

2.4 Tuotantolaitokset

Sähköä tuotetaan Suomessa tuotantolaitoksissa, jotka voidaan jakaa tuotantomuodon mukaan eri luokkiin, joista selkeät pääryhmät muodostavat ydinvoima, vesivoima, lämmön ja sähkön yhteistuotanto (CHP) sekä tuulivoima. Aurinkosähkön osuus on toistaiseksi marginaalinen, mutta sen tuotantokapasiteetti lisääntyy kovaa vauhtia. (Kuva 3.) Talvella 2020 - 2021 arvioitu maksimisähkäteho Suomessa on 16 200 MW, mutta kulutushuippujen aikana siitä on käytössä vain noin 11 400 MW. (Taulukko 1.)



KUVA 3. Sähkön kulutus ja tuotanto vuonna 2020 (8, s. 6)

TAULUKKO 1. Voimalaitosten haltijoiden ilmoittama sähköntuotannon kokonaiskapasiteetti (9, s. 7)

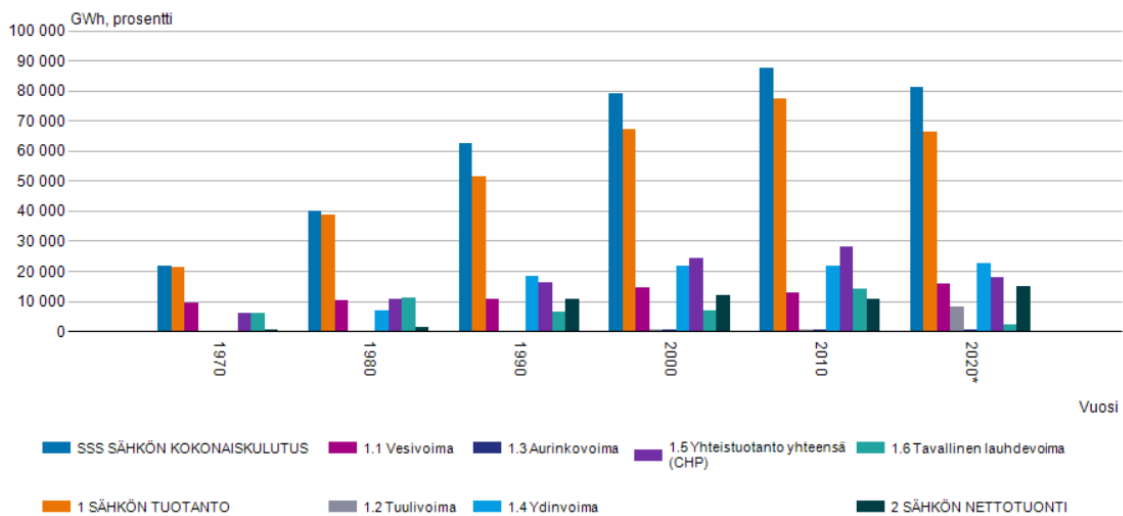
Sähköntuotantokapasiteetti Suomessa Talvikaudella 2020-2021	MW
Maksimisähköteho pakkaskaudella (netto)	16 200
Järjestelmäreservit yhteensä	-1 400
Arvioitu ei käytettävissä oleva kapasiteetti huippukulutushetkellä	-3 400
Arvioitu käytettävissä oleva tuntiteho kulutushuipun aikana (sis. tehoreservin)	11 400

Sähkön tuotantoa ohjaa omalta osaltaan yhteispohjomainen NordPool-sähöpörssi, jossa käydään kauppaa sähköenergiasta eri kauppatuotteiden avulla.

Poliittisin päätösin tehtävät verotus ja muut kustannukset, kuten päästökaupamaksut kohdistuvat suoraan tuotantolaitoksiin, joten raskaasti verotettava tuotanto ei pysty tarjoamaan markkinoille

sähköä niin edulliseen hintaan kuin esimerkiksi tuulivoimayhtiöt niiden tuntien aikana, kun tuulivoimaa on runsaasti saatavilla.

Tilastokeskuksen kuvaajasta huomataan (Kuva 3), kuinka vielä vuonna 1970 oltiin Suomessa lähes täysin omavaraisia sähkön suhteen. Sähkön kulutuksen lisääntyä tuotantovajetta on korvattu suurenevissa määrin tuontisähköllä. Aiempina vuosikymmeninä merkittävä osuus on ollut lauhdevoimalla, joka on poistunut lähes kokonaan tuotannosta tiukentuneiden päästönormien vuoksi. Lauhdevoimaa on nykyisin enää lähinnä tehoreservissä. (9.)



Kuva 4. Sähkön kulutus ja tuotanto Suomessa vuosina 1970-2020. (10.)

2.4.1 Ydinvoima

Suomessa on tällä hetkellä (5/2021) tuotannossa 4 ydinvoimalayksikköä: Fortumin reaktorit Loviisa 1 ja 2 sekä Eurajoella sijaitsevat Teollisuuden Voima Oyj:n Olkiluoto 1 ja 2. Suomen vuosittaisesta sähköntuotannosta suurin osuus tuotetaan ydinvoimalla. Ydinvoiman yhteisteho tulee rakenteilla olevien hankkeiden, Olkiluoto 3:n ja Hanhikivi 1:n valmistuttua yhä kasvamaan. Olkiluoto 3 -yksikön nettosähköteho tulee olemaan noin 1600 MW ja Hanhikivi 1:n 1200 MW. (11; 12.)

Ydinvoima on uraaniatomien halkeamisen aiheuttaman ketjureaktion eli fission seurauksena syntyvän lämpöenergian avulla saatavaa sähköenergiaa. Reaktoriastiasa hallitusti tapahtuva ketjureaktio lämmittää reaktoriastian läpi suljetussa kierrossa virtaavan veden, joka reaktoriyypistä riip-

puen ajetaan höyrystettynä suoraan turbiinin läpi, (kiehutusvesireaktori) tai korkeapaineisena lämmönsiirtimen primääripiiriin, joka höyrystää matalapaineisemmassa sekundääripiirissä virtaavan veden, joka ajetaan turbiinin läpi (painevesireaktori). (13.)

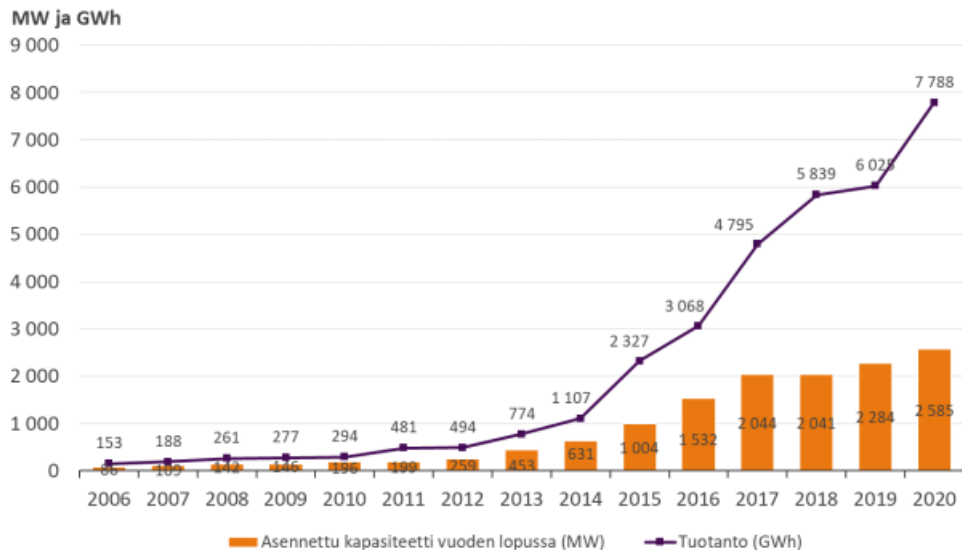
Ydinvoimalla voidaan tuottaa sähköenergiaa suurella yksikköteholla ilman tuotannosta syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Ongelman muodostaa ihmisen ja ympäristön terveydelle vaaralliset ydinjätteet. Käytetty polttoaine luokitellaan korkea-aktiiviseksi jätteeksi, joka tulee loppusijoittaa huolellisesti suojattuna puolen kilometrin syvyyteen. (14.)

Ydinvoimaloita pyritään ajamaan tasaisella, mahdollisimman suurella teholla, joten sen säätökyky etenkin ylöspäin on keho. Myös alassäätöä ydinvoimalla pyritään välttämään, jolloin polttoaine saadaan käytettyä optimaalisesti ja tuotannon heilahduksista aiheutuvat riskitekijät saadaan pidettyä vähäisinä. Tästä syystä myös ydinvoima tarvitsee rinnalleen säätävää sähköntuotantoa. (15, s. 20.)

2.4.2 Tuulivoima

Tuulivoiman tuotantokapasiteetti on kasvanut viime vuosikymmenen aikana voimakkaasti valtion syöttötariffijärjestelmän vauhdittamana. Syöttötariffi on vuonna 2011 voimaan tullut tuotantotukijärjestelmä, joka tuulivoiman osalta tarkoittaa vähintään 83,50 euron takuuhintaa tuotetulle megawattitunnille. Markkinahinnan jäädessä sen alle maksetaan tukijärjestelmään kuuluvalle tuulivoimayhtiölle takuuhinnan ja markkinahinnan erotus. Marraskuun 2017 jälkeen järjestelmään ei ole enää otettu uusia tuulivoimaloita, joten uudet voimalat toimivat täysin markkinaehtoisesti. Vuoteen 2017 mennessä tuotantokapasiteetti yli kaksinkertaistui reilusta 1004 megawattista yli 2041 megawattiin. Tariffijärjestelmän loputtua kasvu pysähtyi hetkeksi, mutta vuodesta 2019 lähtien kasvua on taas havaittavissa. (16; 10.)

Tuulivoima kattaa nykyisellään noin 10 % Suomessa käytettävästä vuotuisesta sähköenergiasta (Kuva 5). Tuulivoiman maanlaajuinen tuotantokapasiteetti lähenee jo ydinvoiman kokonaiskapasiteettia vuonna 2020 sen ollessa Energiateollisuuden tilaston mukaan 2585 MW.



KUVA 5. Tuulivoimakapasiteetin ja tuotannon kehitys 2000-luvulla. (8, s. 9)

Tuulivoiman on uusiutuvana energiamuotona ajateltu olevan merkittävä osa tulevaisuuden ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Joidenkin arvioiden mukaan vetytalous olisi merkittävä askel uuteen aikakauteen. Vetytalous perustuu ylimääräisellä sähköllä elektrolyysin avulla tuotetun vedyn varastointiin. Vedystä voidaan kaasuturbiinin tai polttokennon avulla tuottaa jälleen sähköä, kun tarve sitä vaatii. Nykyisin saatavilla oleviin akkuratkaisuihin verrattuna vedyn avulla voitaisiin varastoida huomattavasti suurempi määrä energiaa kannattavasti. Energiamuodon laaja käyttöönotto vaatisi kuitenkin valtavat investoinnit. (8, s. 9; 17.)

Tuulivoima on uusiutuvana energiamuotona saavuttanut paikkansa osana Suomen sähköntuotantoa, mutta sen suurin ongelma on tuotannon täydellinen riippuvuus vallitsevista sääoloista. Kovimpien pakkasien aikana, sähkönkulutuksen ollessa suurimmillaan tuulivoiman teho laskee yleensä lähelle nollaa, jolloin tuotantovaje on korvattava jollain muulla energialähteellä. Tuulivoiman tuotannon ennustettavuus on vaikeaa, mikä osaltaan lisää verkossa olevan säätötehon tarvetta. (18, s. 23.)

2.4.3 Yhteistuotantolaitokset

Noin neljännes Suomen vuotuisesta sähköenergiasta tuotetaan yhteistuotantolaitoksissa (Kuva 3). Tuotantotehoa ohjaa primäärituotannon eli kaukolämmön ja teollisuuden tarve, ja sähkön tuotanto

on laitoksissa hyötysuhdetta parantava sekundäärinen tuote. Tämän vuoksi vuotuisen sähköenergiamäärään vaikuttavat muun muassa vuoden keskilämpötila ja teollisuuden suhdanteet.

Yhteistuotanto- eli CHP-laitoksella (Combined Heat and Power) tarkoitetaan laitoksia, jotka toimivat samanaikaisesti sähkön- ja lämmöntuotannossa. Nämä voidaan jakaa vielä karkeasti kahteen osaan: teollisuus- ja kaukolämmön yhteistuotantolaitoksiin. Teollisuuden ylimääräinen lämpöenergia hyödynnetään tosin monissa kaupungeissa myös kaukolämmössä. (19, s. 10 - 13.)

Teollisuuden käyttöön prosessihöyryä tuottavien voimalaitosten hyötysuhdetta voidaan parantaa ajamalla höyry ensin turbiinin läpi. Sähköstä osa voidaan tehtaiden ja voimalaitoksen omistussuhteesta riippuen ottaa omaan käyttöön. Mahdollisesti ylijäävä energia myydään sähkömarkkinoille. Teollisuuden voimalaitosten tuotannossa pyritään mahdollisuuksien mukaan hyödyntämään oman tuotannon tarvitsemia raaka-aineita. Esimerkkinä metsäteollisuuden soodakattilat, joiden ensisijainen tehtävä on sellun valmistukseen kuuluva kemikaalien talteenotto. Prosessin raaka-aineesta, puusta peräisin oleva orgaaninen materiaali palaa, jolloin siitä vapautuu lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää sähköntuotantoon. Raahan Voima Oy taas käyttää polttoaineenaan SSAB:n terästehtaan prosessikaasuja. (20; 21.)

Suurempien asutuskeskittymien lämmitykseen energiaa tuottavien CHP-laitoksien höyryä hyödyntämällä myös sähköntuotantoon saadaan laitoksen kokonaishyötysuhde lähelle 90 %. Kaukolämpöä on tuotettu perinteisesti polttamalla kattilassa palavia materiaaleja, kuten kivihiltä, puuta ja turvetta. (19, s.11.)

Turpeella on ollut Suomessa vahva rooli kaukolämmön yhteistuotantolaitosten polttoaineena. Turve kotimaisena polttoaineena on ollut erinomainen ratkaisu laitosten tarpeisiin, mutta sen luokittelu hitaasti uusiutuvana aiheuttaa vero- ja päästöluokittelun fossiilisten polttoaineiden mukaisesti. Tämän seurauksena turpeen polton kokonaiskustannukset ovat nousseet niin korkeiksi, että sen käyttö on vähentynyt rajusti muutaman vuoden sisällä. (22.)

Kaukolämmön tuotantoon on kehitetty jatkuvasti uusia, puhtaampia tuotantomuotoja. Yhdyskuntajätettä käytetään nykyisin energiatuotantoon polttamalla sitä siihen soveltuvissa kattiloissa. Erilaisen hukkalämpöjen ja lämpöpumppujen hyödyntäminen on myös lisääntynyt huomattavasti. Niiden käyttö ei sovellu sähköntuotantoon lainkaan. (23.)

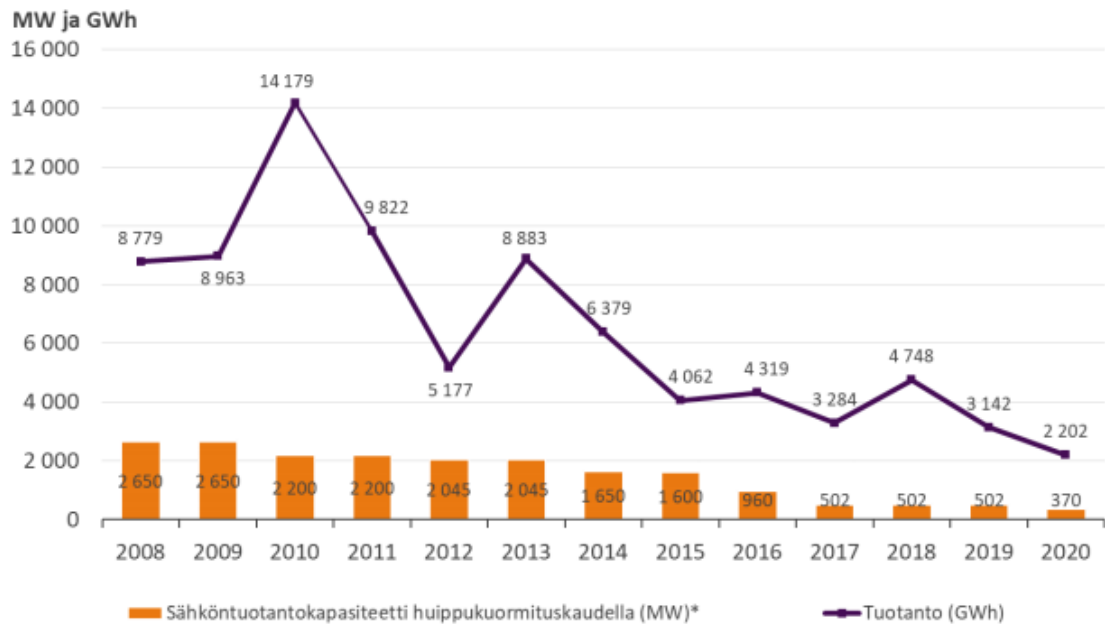
Nykyisellään CHP-laitokset osallistuvat vähäisessä määrin sähköverkon säätöön, mutta esimerkiksi Pohjolan Voima Oyj on selvittänyt CHP-laitosten mahdollisuutta osallistua nykyistä enemmän markkinaehtoiseen säätöön. (24.)

2.4.4 Lauhdevoima

Lauhdevoimalaitoksissa tuotetaan sähköenergiaa polttamalla. Useimmissa lauhdevoimalaitoksissa polttoaineena on kivihiili. Lauhdevoimalaitoksissa ei tuoteta ollenkaan lämpöä toisin kuin CHP-laitoksissa, vaan prosessi on optimoitu maksimaalisen sähköntuotannon saavuttamiseksi. Maksimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseksi höyry paisutetaan turbiinissa lähelle nollan baarin absoluuttista painetta, jolloin siitä saadaan lähes kaikki saatavissa oleva energia muutettua sähköksi. Lauhdevoimalaitosten kokonaishyötysuhde on parhaimmillaan noin 44 %. (19, s.14.)

Lauhdevoiman etuna on hyvä säätökyky tunti- ja vuorokausitasolla. Kivihiilen hyvä energiasisältö ja sen saatavuus sekä toimiva logistiikka rannikkoalueilla sijaitseviin laitoksiin ovat mahdollistaneet suuret yksikkökoot. Esimerkiksi jo puretun Inkoon hiilivoimalaitoksen neljän yksikön kokonaisteho oli yhteensä 1000 MW. (25.)

Aiemmin Suomessa oli runsaasti hiililauhdevoimalaitoksia, mutta 2010-luvulla kapasiteetti ja tuotanto on pudonnut marginaaliseksi huipputuotantovuosista (Kuva 6). Päästökauppa ja fossiilisen tuotannon raskas verotus on tehnyt lauhdevoimasta kannattamatonta. Lauhdevoimaa on Suomessa jäljellä enää lähinnä tehoreservissä. Fortum Power and Heat Oy:n 440 MW:n osuus Meri-Porin hiililauhdevoimalasta on Energiaviraston tehoreservijärjestelmässä vuoteen 2022 asti. (26, s. 10.)



KUVA 6. Lauhdetuotanto Suomessa vuosina 2008 - 2020 (8, s. 11)

2.4.5 Vesivoima

Vesivoima on kuulunut lähes alusta asti kotimaisen sähköntuotannon peruselementteihin. Vesivoiman osuus sähköenergian vuotuisesta kokonaiskulutuksesta on tilastokeskuksen keräämän vuositilaston mukaan noin 15 - 20 %. (10.) Kotimaisen vesivoiman merkitys sähköjärjestelmän ylläpidossa on kuitenkin huomattavasti vuosituotanto-osuuttaan suurempi erinomaisen säätökyvyn ansiosta. (27.)

2.5 Sähkön siirto

Sähköenergian siirto tuotantopaikasta kuluttajille tapahtuu siirto- ja jakelujohtojen välityksellä. Pitkemmällä siirtomatkoilla jännite nostetaan korkeammaksi, jolloin siirtohäviöt saadaan minimoitua. Suurjännitejohdot on toteutettu pääosin ilmaeristettyinä avojohtoina. Pitkillä siirtoyhteyksillä maakaapeloinnit tulisivat kohtuuttoman kalliiksi. Sen sijaan alueellisten siirto- ja jakeluverkkoja on säävarmuuden saavuttamiseksi toteutettu maakaapelointeina kuluneen vuosikymmenen aikana. Vuoden 2011 lopulla tapahtuneiden myrskyn aiheuttamien laajojen sähkökatkojen seurauksena sähkömarkkinalakiin lisättiin vaatimukset toimitusvarmuuden parantamiseksi: myrskyn tai lumikuorman vuoksi sähkönjakelu ei saa keskeytyä taajama-alueella yli 6 tunnin ajaksi eikä taajama-alueen ulkopuolella yli 36 tunnin ajaksi. (28;1)

Suomen sähköverkon järjestelmänvalvojana toimii Fingrid Oy, joka omistaa ja huolehtii sen keskeisimmän elementin, kantaverkon toiminnasta. Paikalliset siirto- ja jakeluyhtiöt vastaavat omista verkoistaan.

Suomen kantaverkon osat olivat aiemmin kahden eri toimijan: Pohjolan Voima Oy:n ja Imatran Voima Oy:n (nyk. Fortum Oyj.) omistuksessa. Suomen jäsenyys Euroopan unionissa ja EU:n asettama direktiivi sähkömarkkinoiden avaamisesta edellytti kantaverkon hallinnan eriyttämistä sähkön tuotannosta ja myynnistä. (29.)

Kantaverkon muodostavat ympäri Suomea ulottuvat sähkönsiirron päälinjat, ja niitä yhdistävät lähes 120 sähköasemaa. Kantaverkkoon kuuluvat 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n voimajohtoverkot sekä tasavirtayhteydet: Ruotsiin Pohjanlahden pohjassa kulkevat 400 kV:n Fenno-Skan 1 ja 500 kV:n Fenno-Skan 2 sekä Suomenlahden pohjassa Viroon kulkevat 110 kV Estlink 1 ja 450 kV Estlink 2. (2.)

Sähkön siirtoverkon rakenteessa on huomioitava siirtokapasiteetin riittävyys. Kantaverkon päälinjat on rakennettu kulkemaan suurimpien tuotanto- ja kulutuskohteiden kautta. Fingridillä on menossa 1,2 miljardin euron investointiohjelma vuosille 2015 - 2025 joiden aikana on tavoitteena rakentaa lähes 3000 kilometriä uutta voimajohtoa. Tässä on taustalla Suomen tulevaisuuden energia- ja ilmastostrategia, jonka seurauksena sähkön tuotantorakenne muuttuu uusiutuvien energiamuotojen, ydinvoiman ja tuulivoiman lisääntyessä huomattavasti. Erityisesti tuulivoiman lisääntyminen vaatii paljon uutta siirtokapasiteettia, kun tuotanto on hajautettuna paikkoihin, missä siirtoyhteyksiä ei valmiiksi ole olemassa. (1.)

3 SÄHKÖMARKKINA

Vuonna 1995 voimaan tulleen sähkömarkkinalain myötä Suomen sähkömarkkina avautui vapaalle kilpailulle. Suomi liittyi sen seurauksena pohjoismaiseen NordPool-sähköpörssiin vuonna 1998, jossa Ruotsin ja Norjan toimijat olivat jo aiemmin ryhtyneet käymään kauppaa sähköenergiasta keskenään. Nykyisin samaan markkinaan kuuluvat lisäksi myös Tanska ja Baltian maat. Suomi on sähköpörssissä koko maan kattavana omana markkina-alueenaan, kun taas Ruotsissa on neljä ja Norjassa peräti viisi eri markkina-aluetta (30) (Kuva 7). Sähkön tuotantoa ohjataan markkinaehtoisesti kysynnän ja tarjonnan määrätessä sähkön hinnan. Kauppaa käydään erilaisilla markkinapaikoilla ja tuotteilla. (31.)

Vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa seuraavan päivän jokaiselle tunnille, joille markkinatoimijat antavat oman tarjouksensa edellisenä päivänä kello 13 mennessä käytävää huutokauppaa varten. Osto- ja myyntitarjousten sekä saatavilla olevan siirtokapasiteetin perusteella lasketaan hinta jokaiselle tunnille. Hinta on kaikilla alueilla sama, jos saatavilla on riittävästi siirtokapasiteettia. Mikäli tarjousalueiden välillä tulee siirtokapasiteetin raja vastaan, hinta muodostuu suhteessa pulonkautan suuruuteen. Kuvassa 7 näkyy tarjousalueet, aluehinnat ja niiden välillä siirrettävä hetkellinen sähköteho. (31.)



KUVA 7. Pohjoismaisen sähkömarkkinan tarjousalueet. (32.)

Päivänsisäisillä markkinoilla tehdään tuntitason kauppaa jatkuvalla tarjouskaupalla vuorokausikauden sulkeutumisen jälkeen. Päivänsisäinen kauppa sulkeutuu puoli tuntia ennen toimitustuntia. Esi-merkiksi tuulitilanteen yllättävän muutoksen seurauksena voi syntyä tuulivoiman ali- tai ylitarjontatilan-tilanne, joka aiheuttaa päivänsisäisen kaupan käyntiä. (31.)

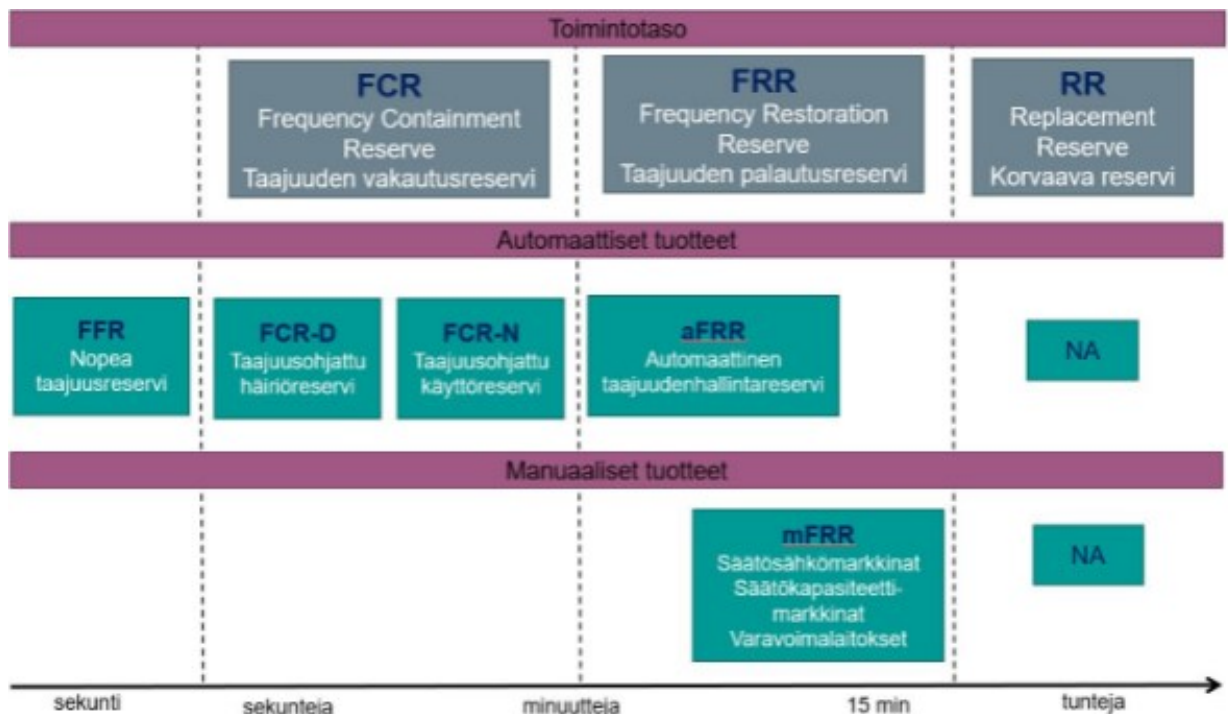
Pohjoismaiset säätösähkömarkkinat ovat suunnitelmien mukaan laajenemassa yhteiseurooppalaiseksi, jonka myötä pohjoismaissa on tarkoitus ottaa käyttöön toukokuussa 2023 varttitasejärjestelmä. Samaan aikaan siirrytään 15 minuutin kaupankäyntijaksoihin päivänsisäisillä markkinoilla. Näin saadaan aikaisiksi tarkempi kulutus- ja tuotantoennuste, jonka avulla päästään parempaan tasapainoon verkossa. (33.)

4 TAAJUUSSÄÄTÖ

Sähköverkon toiminnan ylläpidossa oleellisinta on pitää taajuus mahdollisimman lähellä 50,0 Hz:ä. Taajuus kertoo tuotannon ja kulutuksen hetkellisestä tasapainosta: jos kulutus nousee yli sen hetken tuotannon, taajuus alkaa laskea, ja vastaavasti jos tuotantoteho nousee yli kulutuksen, taajuus nousee. Normaalitilanteessa taajuuden sallitaan vaihdella välillä 49,9 Hz - 50,1 Hz. (34; 35.)

Taajuuden säädön perustana on toimivat vuorokausi- ja päivänsisäiset markkinat, jolloin tuotanto ja kulutus saadaan suunniteltua jo valmiiksi mahdollisimman tasapainoon. Näiden lisäksi on pohjoismaisessa sähköverkossa olemassa reservimarkkinat, joilla käydään kauppaa nopeaan säätöön kykenevästä kulutus- ja tuotantotehosta. Reservien ylläpidosta vastaavat kunkin maan kantaverkkoyhtiöt. (34.)

Reservituotteet voidaan jakaa käyttötarkoituksensa perusteella kolmeen ryhmään. Reservituotteet on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Reservituotteet pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä (34)

4.1 Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFFR)

Pohjoismaiden sähköjärjestelmässä on vuonna 2013 käyttöön otettu automaattinen taajuudenhallintareservi, jonka on tarkoitus palauttaa taajuus 50 Hz:iin. Reservi on aktiivisena vain tietyillä aamun ja illan tunneilla. Reservi hankitaan tuntimarkkinoilta, johon toimijat voivat antaa erikseen ylös- ja alassäätötarjouksia. (36.)

4.2 Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)

Taajuusohjatun käyttöreservin tehtävänä on pitää taajuus normaalialueella. Kun taajuus poikkeaa normaalitaajuusalueelta, taajuusohjatut käyttöreservit aktivoituvat. Käyttöreserviä tarjoavan yksikön on kyettävä symmetrisesti sekä ylös- että alassäätöön reserviin myydyn tehon verran. Taajuusohjattua käyttöreserviä pidetään pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä koko ajan yhteensä 600 MW, josta Fingridin velvoite on 123 MW. (35.)

4.3 Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)

Taajuusohjattu häiriöreservi aktivoituu taajuuden poiketessa 0,5 Hz:n normaalitaajuudesta. Tällä hetkellä (6/2021) Fingrid hankkii vain ylösäätötuotetta häiriöreserviin. Alassäätötuotteen hankinnan on tarkoitus alkaa vuoden 2022 alussa. Taajuusohjatun häiriöreservin määrä vastaa suurimman mahdollisen yksittäisen vian yhteydessä irtoavaa tuotantoa, joka on normaalitilanteessa noin 1450 MW. (35.)

4.4 Inertia

Sähköverkon taajuuden muutoksia vastustaa osaltaan inertia, joka on käytännössä verkon laitteiden sisältämää liike-energiaa. Sähkön tuotantolaitoksien turbiini-generaattoriyhdistelmien sekä sähköllä pyörivien koneiden massat pyörivät verkon taajuudella, jolloin tehotasapainon muuttuessa niihin varastoitunut liike-energia vastustaa taajuuden äkillisiä muutoksia. (37.)

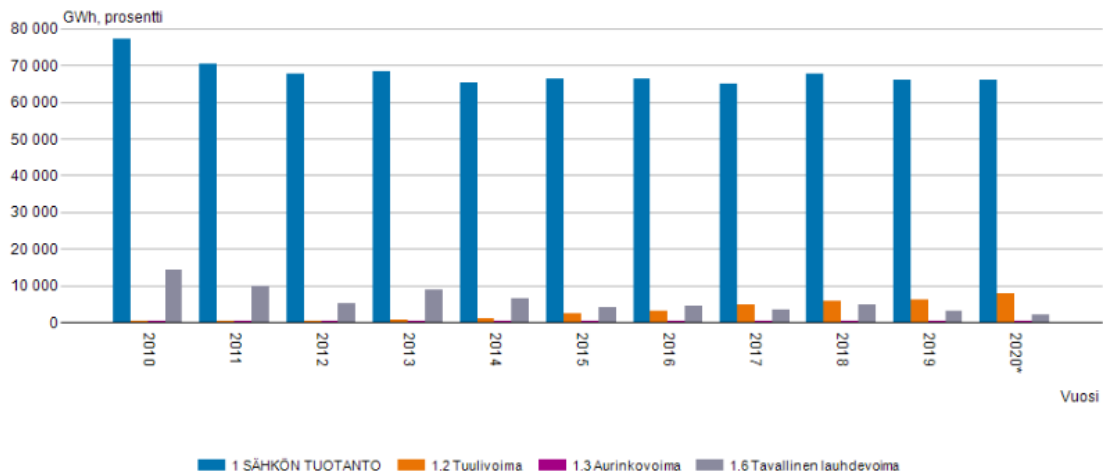
Fysiikassa inertia tarkoittaa muutoksen vastustamista ja hitautta. Sähköverkon inertian määrä on riippuvainen massasta, mikä on sidoksissa sähköverkossa pyöriviin laitteisiin. Aurinko- ja tuulivoimat eivät tuota sähköverkkoon lainkaan inertiaa, toisin kuin perinteiset, pyörivän turbiinin avulla

sähköä tuottavat voimalat. Tuulivoimalassa teho kyllä tuotetaan turbiinin avulla, mutta teknisen toteutettavuuden vuoksi tuulivoimalan ja sähköverkon välillä on taajuusmuuttaja, jonka kautta pyörivän roottorin sisältämä inertia ei välity suoraan sähköverkkoon. (37.)

Pienen inertian omaavan tuotannon lisääntymisen myötä tarvitaan nopeaan säätöön kykenevää tehoa, jota varten on otettu toukokuussa 2020 käyttöön nopea taajuusreservituote (FFR), johon tarvittava määrä riippuu verkon sisältämän inertian määrästä. Käytännössä mitä enemmän verkossa on tuuli- ja aurinkovoiman tuottamaa tehoa, sitä enemmän tarvitaan nopeaan säätöön kykenevää tehoreservyä. (38.)

5 ENERGIAMURROS

Ympäristöystävällisiä energiamuotoja suosivan politiikan seurauksena energiasektorilla on käynnissä voimakas rakenteellinen muutos, minkä vuoksi uusiutuvien sähköntuotantomuotojen osuus on ottamassa osuutta. Kuvassa 9 on esitettyä sähkön kokonaistuotanto Suomessa ja tuulivoiman, aurinkovoiman ja tuulivoiman osuudet tuotannosta. Kuvaajasta nähdään selkeästi 2010-luvulla tapahtuneen muutoksen: Vuonna 2010 lauhdevoiman osuus oli vielä merkittävä, mutta tuuli- ja aurinkovoimalla tuotettu tuotanto on todella vähäistä. Vuoteen 2020 tultaessa lauhde- ja tuulivoiman osuudet on kääntyneet päinvastaiseksi; tuulivoimalla tuotetun sähköenergian määrä on jo selkeästi lisääntynyt ja lauhdevoiman energia on vähentynyt reilusti alle tuulivoiman. Aurinkoenergialla tuotetun sähkön osuus on edelleen marginaalinen verrattaessa kokonaiskulutukseen.



KUVA 9. Sähkön kulutus ja lauhdevoiman, tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotanto vuositasolla 2010-luvulla Suomessa (10)

Ei-säätävän tuotannon osuuden lisääntymisen myötä on ryhdytty kehittämään uusia ratkaisuja säästökyvyn parantamiseksi. Pohjolan Voima Oyj on käynnistänyt vuoden 2021 aikana mahdollisesti toteutuvan 35 MW:n akkuinvestoinnin suunnittelun. Tällä hetkellä vesivoima on merkittävä säätötehon tarjoaja, mutta nopeat, toistuvat tehonsäädöt rasittavat vesivoimaloiden koneistoa. Akkuteknologia olisi parhaimmillaan tuottamassa nopeaa, sekuntitason tehonsäätöä, mutta vesivoiman energian varastointikyky on edelleen ylivoimainen verrattuna mihinkään tunnettuun teknologiaan. (39.)

5.1 Hiilidioksidipäästöt

Sanna Marinin hallituksen ilmasto- ja energiastrategian tavoitteiden mukaan Suomen on tarkoitus olla hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2035 mennessä. Strategian toteuttamisessa on energiasektorilla merkittävä rooli. (40.)

Kivihiiilen käytöstä energiantuotannossa aiotaan luopua valtioneuvoston esityksen mukaan kokonaan vuonna 2029 (41) Päästökauppa, verotus ja sähkömarkkinat ovat aiheuttaneet kivihiilestä luopumisen lauhdesähkötuotannossa jo 2010-luvun aikana, kuten yllä olevasta kuvaajasta huomattiin. (Kuva 9.) Myös turpeen käyttö aiottiin puolittaa vuoteen 2030 mennessä, mutta puolittuminen ehti tapahtua jo käytännössä talvella 2021 päästökauppa- ja veromaksujen voimakkaan nousun myötä. Taulukoissa 1 ja 2 on energiaviraston ylläpitämän laitoskohtaisen päästötaulukon pohjalta kerättyjen tietojen pohjalta taulukoitu 10 suurinta hiilidioksidipäästöjen aiheuttajaa vuosina 2013 ja 2020. Vuoden 2013 taulukossa on lihavoituna ennen vuotta 2020 käytöstä poistuneet laitokset. (42.)

TAULUKKO 3. Suurimmat hiilidioksidipäästöjen aiheuttajat Suomessa vuonna 2013

	Yritys	Yksikkö	CO ₂ (t/v)	Tyyppi	Sähköteho
1	SSAB Europe Oy	Raahen terästehtas	3 670 006	Terästehtas	
2	Neste Oyj	Porvoon jalostamo	2 882 486	Öljyjalostamo	
3	Fortum Power and Heat Oy	Meri-Porin voimalaitos	1 368 183	Hiililauhde	565 MW
4	Turun Seudun Energiantuotanto Oy	Naantalın voimalaitos	1 343 107	Hiili/monipolttoaine-CHP	350 MW
5	Helen Oy	Vuosaaren B-voimalaitos	1 266 786	Kaasu-kombilaitos	487 MW
6	Vaskiluodon Voima Oy	Vaskiluoto 2 - voimalaitos	1 087 164	Hiili-CHP	230 MW
7	Helen Oy	Hanasaari B - voimalaitos	912 810	Hiili-CHP	220 MW
8	Fortum Power and Heat Oy	Suomenojan voimalaitos	907 479	Hiili-maakaasu-CHP	350 MW
9	Fortum Power and Heat Oy	Inkoon voimalaitos	827 784	Hiililauhde	1000 MW
10	PVO-Lämpövoima Oy	Kristiinan voimalaitos	814 561	Hiili-öljylauhde	452 MW
		Summa	15 080 366		

TAULUKKO 4. Suurimmat hiilidioksidipäästöjen aiheuttajat Suomessa vuonna 2020

	Yritys	Yksikkö	CO ₂ (t/v)	Tyyppi	Sähköteho
1	SSAB Europe Oy	Raahen terästehtas	3 349 868	Terästehtas	
2	Neste Oyj	Porvoon jalostamo	2 665 187	Öljyjalostamo	
3	Helen Oy	Hanasaari B - voimalaitos	973 419	Hiili-CHP	565 MW
4	Helen Oy	Vuosaaren B-voimalaitos	932 538	Kaasu-kombilaitos	350 MW
5	Outokumpu Stainless Oy	Outokumpu Tornion tehta	646 056	Terästehtas	
6	Helen Oy	Salmisaaren B - voimalaitos	630 654	Hiili-puupelletti-CHP	160 MW
7	Borealis Polymers Oy	Kilpilahden tuotantolaitokset	559 227	Muovituotetehtas	
8	Fortum Power and Heat Oy	Suomenojan voimalaitos	540 404	Hiili-maakaasu-CHP	350 MW
9	Finnsementti Oy	Paraisten sementtitehtas	531 300	Sementtitehtas	
10	Vaskiluodon Voima Oy	Vaskiluoto 2 - voimalaitos	376 167	Hiili/bio-CHP	230 MW
		Summa	11 204 820		

5.2 Omavaraisuus

Erityisesti kovien pakkasien aikaan sähkönkulutus nousee helposti yli kotimaan tuotantokapasiteetin. Tuontisähköä on näissä tilanteissa pahimmillaan yli neljäsosa. Iso osa Suomeen tuotavasta sähköstä on ruotsalaista ja norjalaista vesivoimaa. Lisäksi tuontia on merkittävässä määrin myös Venäjältä, joka ei kuulu eurooppalaisen päästökaupan piiriin. Markkinaehtoisuus on aiheuttanut tuotannon kohdistumisen pohjoismaisen markkinan alueella sinne, missä sitä on halvinta tuottaa. Tämä on johtanut kotimaisen lauhdevoiman alasajoon lähes kokonaan, minkä seurauksena vesivoiman merkitys säätövoiman tuottajana kasvaa entisestään. Myös CHP-tuotannon kapasiteettiin on odotettavissa laskua. (18, s. 36 - 38)

Norja on vesivoiman osalta suurien korkeuserojen ansiosta lähes omavarainen: normaalivuonna vesivoimalla katetaan Norjassa noin 96 % sähkön kokonaiskulutuksesta. Ruotsissa on myös runsaasti edullista vesi- ja tuulivoimakapasiteettia. Yhteispohjoismainen sähkömarkkina on tämän vuoksi myös suomalaiselle sähkön kuluttajalle edullinen järjestelmä. Naapurimaissa tuotettavaa edullista sähkötehoa voi ostaa myös suomalainen kuluttaja. Asian käänttöpuolena on, että sen myötä Suomesta on poistunut tuotantokapasiteettia kannattamattomana, mikä huonontaa Suomen tehotasetta. (18, s. 36.)

Sähköjärjestelmän kestävyys kannalta jonkinlainen suuren yksikön tai merkittävän siirtoyhteyden vikatilanne voisi vaarantaa sähkön saatavuuden, mutta pidempiaikainen kantaverkkolaajuinen sähköpula on epätodennäköinen. Kotimaisen vesivoiman merkitys on kuitenkin järjestelmän kestävyys kannalta kriittisen tärkeä. (43.)

5.3 Siirtokapasiteetti naapurimaihin

Nykyisellään tuotantovajetta katetaan suurelta osin tuontisähköllä. Tällä hetkellä siirtokapasiteetti Suomeen on yhteensä noin 5000 MW. Kovilla pakkasilla siirtoyhteydet ovat usein lähes maksimikuormalla. Sähkömarkkinoiden vuoksi kuitenkin pyritään siirtokapasiteettia käyttämään mahdollisimman tehokkaasti, joten useimmiten kotimaassa on reservissä tehoa, vaikka näennäisesti siirtokapasiteetti onkin ”täynnä”. (43.)

Suuren siirtoyhteyden vikatilanne suuren kuorman aikana voisi kuitenkin aiheuttaa pahimmillaan vakavan sähköpulan Suomen puolella. Fingridin ja Svenska Kraftnätin vuonna 2016 tekemän selvityksen mukaan myös sähkömarkkinoilla tapahtuvat pullonkaulatilanteet ovat tulevaisuudessa todennäköisiä. Selvityksen pohjalta alettiin suunnitella Aurora Line-nimistä 400 kV:n voimajohtoa Pohjois-Ruotsin ja Muhoksen Pyhäselän sähköaseman välille. Hankkeen on määrä valmistua vuonna 2025. (44.)

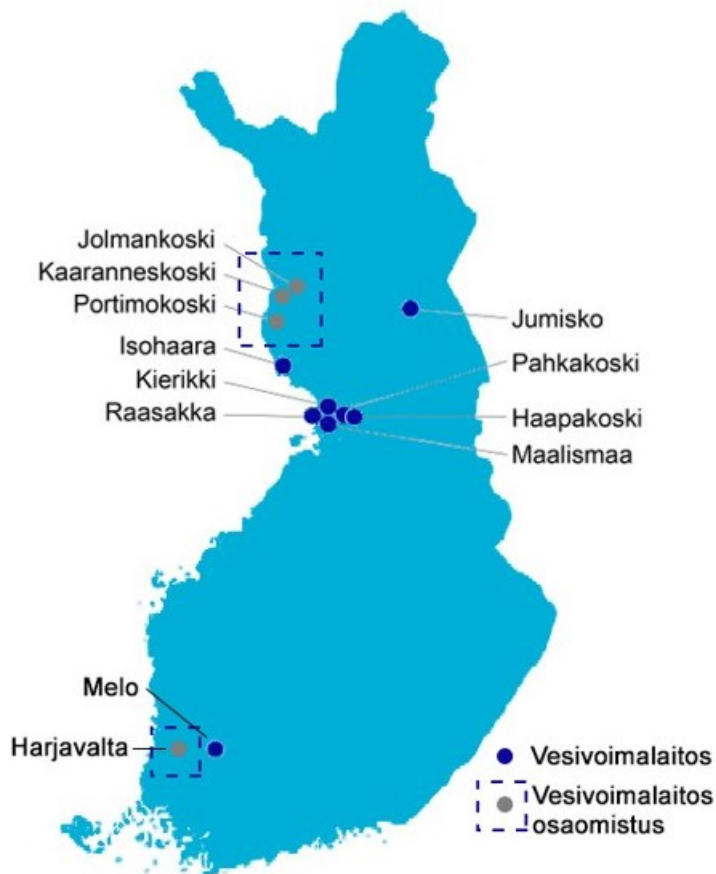
6 PVO-VESIVOIMA OY

6.1 Yhtiö

Pohjolan Voima-konsernin historia alkaa vesivoiman rakentamisesta. Yhtiö on perustettu vuonna 1943, jolloin elettiin sotavuosia. Joukko teollisuuden yrityksiä halusi välttää riippuvuutta valtio-omisteisesta Imatran Voimasta. PVO-Vesivoima Oy eriytettiin omaksi yhtiökseen vuonna 1992. Pohjolan Voima Oyj tuottaa sähköä omakustannehintaan omistajilleen. Yhtiön suurimmat omistajat ovat UPM Energy Oy 47,73 %:n osuudellaan ja Stora Enso Oyj 15,61 %:n osuudella (vuoden 2020 lopussa). (45, s 8; 46.)

6.2 Voimalat

PVO-Vesivoima Oy:llä on yhteensä 12 vesivoimalaitosta, joista muutama on osaomistuksessa. Voimalat sijaitsevat Ii-, Kemi-, Kokemäen- ja Tengeliönjoella (Kuva 10). PVO-Vesivoima Oy:n vesivoimalaitoksia ohjataan keskitetysti UPM Energyn Oy:n Tampereen valvomosta. (47.)



KUVA 10. PVO-Vesivoima Oy:n voimalaitokset (47)

PVO-Vesivoima Oy:n vesivoimasta merkittävin osuus on Ijoella, jossa koko joen vesivoimakapasiteetti on PVO-Vesivoima Oy:n hallinnassa. Ijoen viisi voimalaitosta sijaitsevat joen alajuoksulla 60 kilometrin matkalla jokisuulta lähtien. Voimaloiden yhteenlaskettu koneteho on 215,4 MW. Joen yläjuoksulla on Irni- ja Kostonjärvet, joita säännöstellään luparajojen sisällä vesivirtaamien kausivaihteluiden tasaamiseksi. (48, s.3)

Kemijoen voimalaitoksista on PVO-Vesivoima Oy:n hallinnassa alimpana jokisuulla sijaitseva Isohaara sekä vesistön pohjoispäässä Kemijärveen laskeva Jumiskon tunnelivoimalaitos. Valtaosan Kemijoen voimalaitoksista omistaa Kemijoki Oy. Kemijoki Oy:n ja PVO-Vesivoima Oy:n Kemijoen vesistöalueella omistamien voimalaitosten kokonaisteho on lähes 1250 MW. (49, s. 3.)

Kokemäenjoella on PVO-Vesivoima Oy:n kokonaan omistama Nokiella sijaitseva Melon voimalaitos. Harjavallan voimalaitoksen 105 megawatin tehosta Pohjolan Voima Oyj:n osuus on 19,9 %. (50.)

7 VESIVOIMA

Vesivoima on veden virtauksesta eli sen sisältämästä liike-energiasta otettavaa energiaa, joka muutetaan generaattorin avulla sähköksi. Voimalapadon avulla saadaan kasvatettua voimalan ylä- ja alapuolisten vesipintojen välistä korkeuseroa, joka yhdessä veden virtaaman kanssa vaikuttaa voimalasta saatavaan tehoon. (43.)

Vesivoimalan teho lasketaan kaavalla 1.

$$P = QH\rho g\eta$$

KAAVA 1.

Q= Turbiinin läpi virtaava vesimäärä (m³/s)

H= Putouskorkeus (m)

ρ = Veden tiheys (kg/m³)

g= Maan vetovoiman kiihtyvyys (m/s²)

η = Turbiinin hyötysuhde

7.1 Vesivoima Suomessa

Vesivoima kattoi vielä 1960-luvulle tultaessa valtaosan sähköenergian kulutuksesta Suomessa. 1960-luvulla alkanut voimakas sähkönkulutuksen lisäys katettiin muilla tuotantomuodoilla, ja vesivoiman osuus vuosituotannosta tultaessa 1980-luvulle oli enää noin neljännes. Nykyisin sen vuotuisen energian osuus on vakiintunut noin 20 %:n paikkeille. (5, s. 83.)

Ensimmäiset vesivoimalat rakennettiin Laatokan Karjalan Uuksuanjokeen 1890-luvulla. 1920-luvulla valmistui useita suuria voimalaitoksia Etelä-Suomeen, nykyisinkin nimellisteholtaan Suomen suurin vesivoimalaitos Imatran voimalaitos otettiin käyttöön 1929. Oulujoen voimaloiden rakentaminen alkoi toisen maailmansodan aikana ja Kemijoen suurimmat laitokset valmistuivat 1960-luvulla. (27, s. 14-16.)

7.2 Vesivoimapotentiaali Suomessa

Suomessa korkeusvaihtelut ovat kohtalaisen pieniä, joten laitostehot jäävät suhteellisen pieniksi verrattuna suurempia korkeuseroja omaaviin maihin, kuten Norjaan. Suomen suurista joista on kuitenkin Tornionjokea lukuun ottamatta valjastettu vesivoiman käyttöön lähes kaikki, joten tehokapasiteettia on kuitenkin etenkin säätökäyttöön olemassa reilusti. (18, s. 21 - 23.)

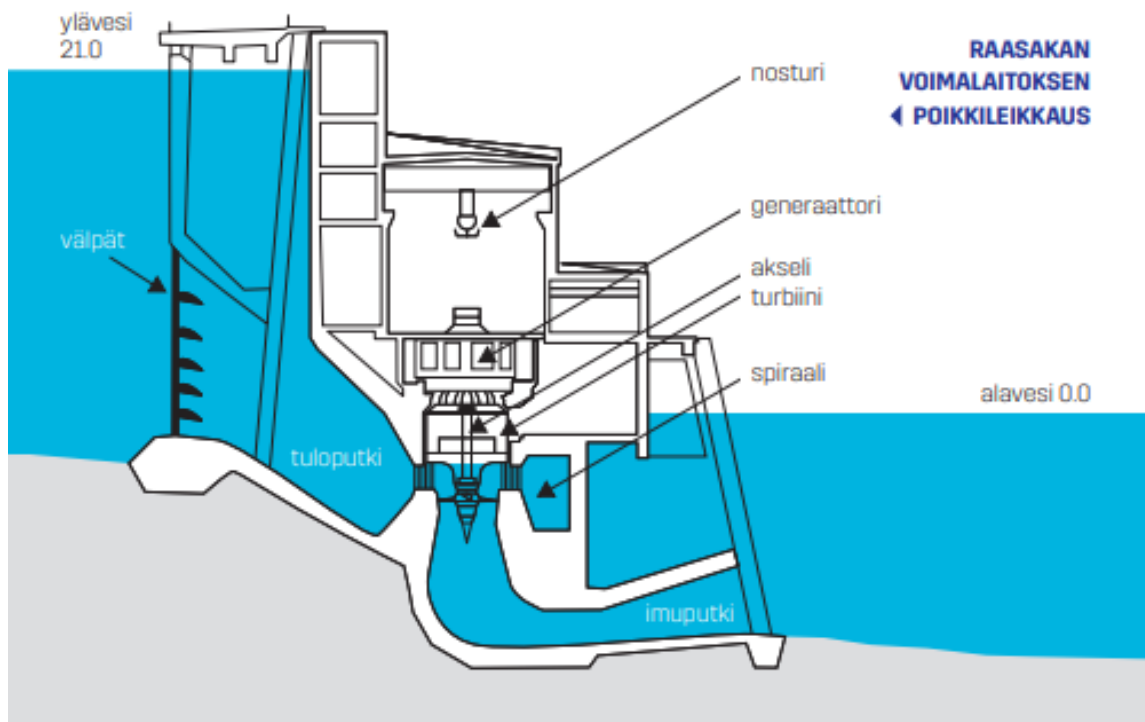
Suomessa vesivoimapotentiaali on pääasiassa jo käytössä. Nykyisen lainsäädännön puitteissa vesivoiman lisärakentamista ei merkittävässä määrin ole odotettavissa (18, s. 22). Vesivoimaloiden vuosienenergiantuotantoa voitaisiin lisätä runsaasti rakentamalla suurempia varastoaltaita. Lijoella sijaitsevat viisi PVO-Vesivoima Oy:n omistamaa voimalaitosta ovat jokivoimalaitoksia, joiden yläaltaiden varastointikapasiteetti on verrattain pieni. Joen alajuoksulla ei ole juurikaan pidemmän aikavälin säännöstelymahdollisuuksia, joten jopa kolmasosa joudutaan juoksuttamaan voimalaitosten ohi, koska tulvavesille ei löydy riittävästi varastotilaa. Lijoen voimalaitosten yläpuolelle sijoitettava Kollajan allasta on ensimmäisen kerran suunniteltu jo 1980-luvulla, mutta 1987 voimaan tullut koskiensuojelulaki esti vesivoiman lisärakentamisen lijoella. Kollajan allas mahdollistaisi paitsi tulvavesien tehokkaamman hyödyntämisen energiantuotantoon, mutta myös merkittävän parannuksen lijoen säätösähkökapasiteettiin. Hanke on ollut 2000-luvulla esillä useampaan kertaan, mutta hankkeen toteutumien on kerta toisensa jälkeen kaatunut Suomen hallituksen päätökseen olla avaamatta koskiensuojelulakia. (51, s. 8; 52.)

7.3 Vesivoimatekniikkaa

Vesivoimalassa tuotetaan sähköä hyödyntämällä veden liike-energiaa. Patorakenteella saadaan kerättyä voimalan ylä- ja alavesipinnan välille korkeuseroa, joka lisää vesimassan potentiaalienergiaa. Johtosiivekkeiden lävitse turbiinin juoksupyörälle virtaava vesi saa aikaan pyörimisliikkeen, jonka generaattori muuttaa sähköenergiaksi.

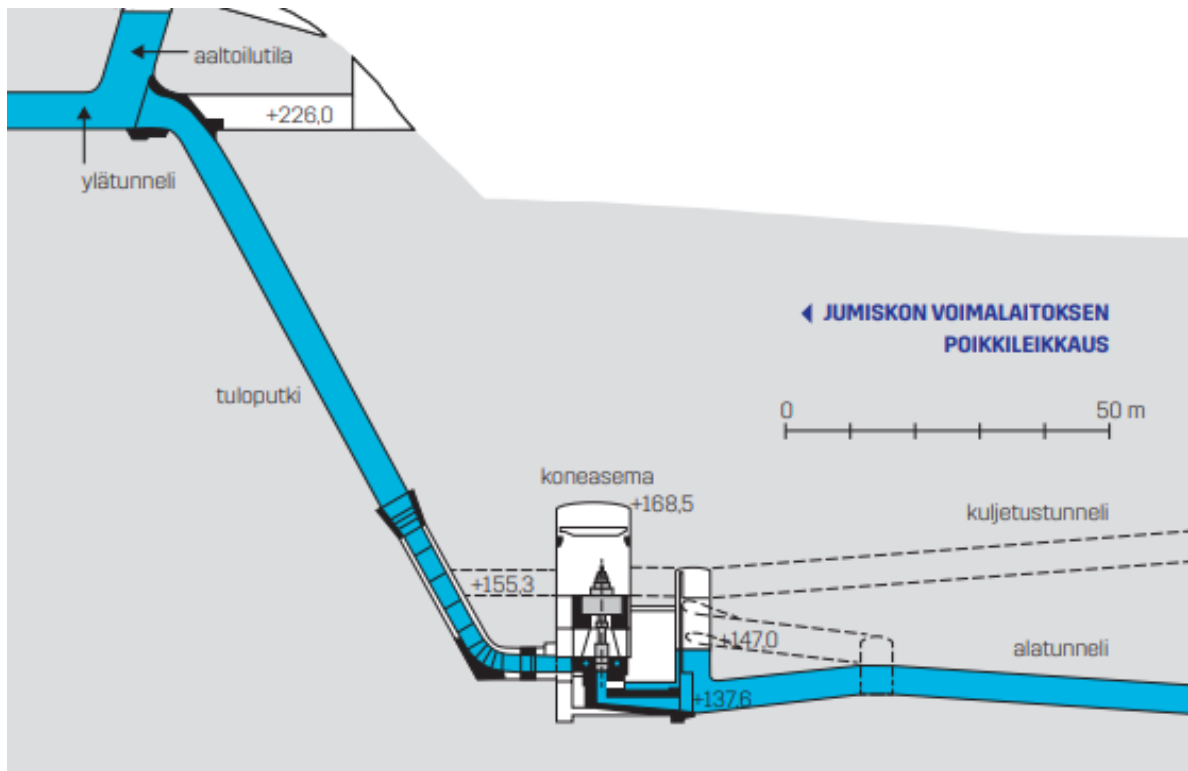
Valtaosa Suomen vesivoimalaitoksien turbiineista on Kaplan-turbiineita. Kaplan-turbiini on aksiaaliturbiini, eli vesi virtaa siinä turbiinin lävitse akselin suuntaisesti. Tämä mahdollistaa suuren virtaaman käytön turbiinin kokoon nähden. Suomen voimaloilla on tyypillisesti pieni putouskorkeus ja

suuri virtaama, joten Kaplan-turbiini on ollut Suomen olosuhteissa yleensä toimiva ratkaisu. Perinteisen tyyppinen Kaplan-turbiini on asennettu vesikanavaan pystyasentoon, mutta se voidaan asentaa putkeen myös vaaka-asentoon, jolloin siitä käytetään nimitystä putkiturbiini tai bulb-turbiini. Kaikilla PVO-Vesivoima Oy:n lijoen ja molemmilla Kokemäenjoen voimalaitoksilla on Kaplan-tyyppiset turbiinit, kuten oheisessa poikkileikkauksessa olevalla Raasakan voimalaitoksella. Kemijoen Isohaarassa on kaksi perinteistä pystymallista Kaplan-turbiinia ja kaksi putkiturbiinia. (53;43.) (Kuva 12.)



KUVA 11. Raasakan voimalaitoksen poikkileikkauksikuva (48, s. 4)

PVO-Vesivoima Oy:n Jumiskon voimalaitoksen erikoisuutena on sen tunnelirakenne, jonka ansiosta maksimiputoukorkorkeudeksi on saatu 96 metriä, joka on suurin Suomen vesivoimalaitoksista (Kuva 12). Sen turbiinityyppi on Francis-turbiini, joka kuuluu tyypiltään reaktiiturbiineihin. Francis-turbiinien tyypilliset putoukorkorkeudet ovat välillä 25 m – 400 m. (49, s. 3; 53.)



KUVA 12. Jumiskon voimalaitoksen poikkileikkauskuva. (49, s. 4)

8 VESIVOIMAN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Vesivoimayhtiöt saavat jonkin verran osakseen niiden toimintaa kritisoivia kannanottoja. Niitä esittävät erityisesti vapaa-ajan kalastajat ja luonnonsuojelun puolestapuhujat. Vesivoimaa vastaan argumentoidaan usein virheellisiä väittämillä; usein vedotaan vesivoiman olevan merkityksetöntä nykypäivän energiantuotannossa. Ongelmallista tästä tekee se, että yleinen mielipideilmasto vaikuttaa usein myös poliittiseen päätöksentekoon, joka voi aiheuttaa vesivoimayhtiöiden toiminnalle suuriakin rajoitteita. (43.)

8.1 Ympäristövaikutukset

Vesivoimalat on pyritty rakentamaan niin, että saadaan aikaiseksi mahdollisimman suuri pudotuskorkeus voimalan ylä- ja alavedenpinnan välillä. Tämän seurauksena jokien profiiliin on tullut huomattavia muutoksia. Esimerkiksi useimmat jyrkkäpiirteiset kosket ovat poistuneet näkyvistä, kun jokien korkeusero on pyritty saamaan mahdollisimman tehokkaasti kerättyä voimalaitospatojen kohdalle.

Vesivoimaloiden virtaamien vuorokaudensisäisen vaihtelun takia veden virtauksessa ja veden korkeudessa tapahtuu muutoksia, jotka voivat aiheuttaa väliaikaista haittaa rantojen asukkaille ja veneilijöille. Toisaalta vesien säännöstely todellisuudessa tasaa jokien virtaamia tarkasteltaessa pidemmällä aikavälillä. Kevättulvat ovat luonnontilassa olevilla joilla täysin hallitsemattomia, jolloin riski veden noususta aiheutuvien vahinkojen syntymiselle on huomattavasti suurempi, kuin säännöstelyillä joilla. Vesivoiman yhteydessä tehtävällä vesistöjen säännöstelyllä saadaan tulvavahinkoja vähennettyä merkittävästi. (43.)

8.2 Vaelluskalat

Vesivoimaloiden rakentaminen on aiheuttanut esteen vaelluskalojen nousulle niiden luontaisille lisääntymisalueilleen jokien latvavesiin. Sotien jälkeen vesivoimaloita rakennettiin kovalla tahdilla, ja vaelluskalojen nousureittejä ei ehditty suunnitella samaa tahtia. Kalatalousvelvoitetta on hoidettu pääasiassa ylisiirroilla ja istutuksilla. Kalaviljelystä vastaa Pohjolan Voima Oyj:n ja Kemijoki Oy:n yhteisyritys Voimalohi Oy. PVO-Vesivoima Oy on sitoutunut tekemään yhteistyötä vaelluskalojen

luontaisen lisääntymiskierron palauttamiseksi. Iijoen alueella on käynnissä useita hankkeita kalatalouden edistämiseksi jokialueella. (54.)

Vesivoima ei ole kuitenkaan ainoa vaelluskalojen nousun esteiden aiheuttaja. Myös muu vesirakentaminen, kuten maisemointitarkoitukseen rakennetut pohjapadot aiheuttavat esteitä vaelluskalojen nousuun. (43.)

9 HAVAINNOLLISTAVA TYÖKALU

9.1 Esitiedot

Tilaaajan toiveena oli saada luotua havainnollistava laite, videoanimaatio tai jokin vastaava, jolla saadaan konkreettisesti esitettyä maallikolle vesivoiman merkitystä sähköntuotannossa. Toimeksiantajan tarkoitus on käyttää sitä yleisötilaisuuksissa ja tapahtumissa, kuten lin Ilmastoareenassa. Sähköjärjestelmän toiminta on kokonaisuudessaan niin monimutkainen kokonaisuus, että sen esittäminen maallikolle on todella haastavaa. Sähköverkon toimintaan liittyy niin monta liikkuvaa elementtiä, että tekniikkaa tuntemattomalle ihmiselle sanallinen selitys on jopa mahdotonta. Erilaisia teho- ja energiakäyriä apuna käyttäen voidaan asiaa hieman selventää, mutta parhaiten asia saataisiin perusteltua konkreettisilla esimerkeillä.

Tietämätön maallikko saattaa esimerkiksi todeta sähkön vuosituotantotilastosta, että vesivoiman osuus tuotannosta on vain noin 20 prosenttia ja että se määrä voitaisiin korvata helposti jollakin muulla uusiutuvalla. Vuosituotantotilastosta ei kuitenkaan selviä vesivoiman tärkein ominaisuus: kyky joustaa tarpeen mukaan.

Myös tuotantoteho eli watit (W) saattavat mennä sekaisin energian eli wattituntien (Wh) kanssa. Sähkötehosta tai energiasta puhuttaessa on kyse usein niin suurista lukemista, että selkeyden vuoksi käytetään kerrannaisia eli puhutaan esimerkiksi megawateista (MW) tai terawattitunneista (TW), jolloin mittakaava saattaa mennä hieman sekaisin.

Näillä lähtötiedoilla lähdettiin suunnittelemaan, millä keinolla monimutkainen asia voitaisiin esittää mahdollisimman yksinkertaisesti.

9.2 Suunnittelu

Aluksi ajatuksena oli suunnitella jonkinlainen fyysinen laite, joka kuvaa vesivoimaa osana sähköverkkoa. Ideana oli esimerkiksi verkon nopeutta kuvaava pyörivä vauhtipyörä, jonka nopeus ja momentti muuttuu tuotantotilanteen mukaan. Tämä koettiin kuitenkin hankalasti toteutettavaksi. Toi-

nen idea oli sähköverkkoa kuvaava pienoismalli, johon rakennettaisiin erilaisia visuaalisia elementtejä, jotka toimisivat todellisen tilanteen mukaisesti, kuten pyörivät voimalat ja toimivat valot rakennuksissa. Tämänkin todettiin olevan hieman hankala toteuttaa mutta myös työläs liikutettavaksi paikasta toiseen

Lopulliseksi ideaksi muodostui suunnitella sähköjärjestelmää kuvaavalle kuvapohjalle tietokonekäyttöliittymäratkaisu, jossa olisi interaktiivisesti liikkuvia elementtejä. Ajatuksena oli kuvata kaikki keskeisimmät sähköntuotantomuodot ja kuluttajat sisältävä kokonaisuus, jolla pystyisi esittämään erilaisia verkossa tapahtuvia muutoksia: esimerkiksi yhtäkkinen vikatilanne, johon vesivoima reagoi nopeasti.

9.3 Toteutus

Nopeasti osoittautui, että tässä vaiheessa on järkevämpää lähteä toteuttamaan idean pohjalta laskentapohjaa Excelin avulla, jota hyödyntämällä mahdollisesti teetetään valmis tuote myöhemmin ohjelmointiammattilaisella.

Exceliin päädyttiin tekemään kolme vesivoiman ominaisuuksia kuvaavaa laskentamallia: vesivoiman nopea säätökyky ja sen merkitys osana sähköjärjestelmää, vesivoiman päivänsisäinen tehonsäätökyky ja energian varastointikyky. Kahdella viimeksi mainituille otettiin vertailukohteeksi sähkön akkuvarasto, koska se on helposti ymmärrettävä sähköenergian varastointimuoto.

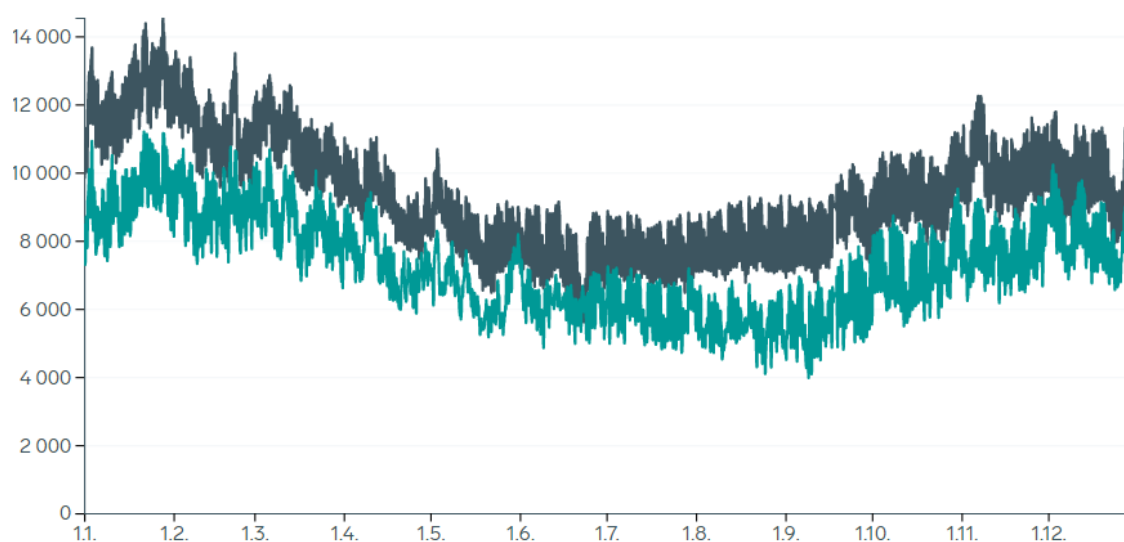
9.3.1 Vesivoima osana sähköjärjestelmää

Kuten aiemmin todettua, verkon tilasta parhaiten kertova indikaattori on taajuus, jonka tulisi olla mahdollisimman lähellä 50 Hz:ä. Taajuuden muutoksen aiheuttaa muutos tehotaseessa, joten Exceliin alettiin tekemään pohjalle eri tuotantomuotojen tehot. Eri tuotantomuodoista otettiin mukaan vesivoiman lisäksi aurinkovoima, ydinvoima, tuulivoima sekä CHP ja lauhdevoima yhteisenä kokonaisuutena. Edellä mainitut ovat heikosti säätöön kykeneviä tuotantomuotoja. Näiden lisäksi säätävänä tehona on tuontisähkö. Työssä otettiin huomioon ajankohdan ja vallitsevan säätötilan vaikutukset kulutus-, ja tuotantotilanteeseen. Kulutusarvot sekä keskimääräinen CHP-laitosten tuotanto

otettiin historiatietojen perusteella. Tuuli- ja aurinkoenergialle luotiin säätilan perusteella käsin valittavat muuttajat.

Sähkön kulutus noudattaa tietynlaista trendiä vuoden-, viikon- ja vuorokaudenaikojen mukaan, kuten huomataan Fingridin avoimen datan palvelusta saaduista käyristä kuvissa 13 ja 14. Talvikuu-kausina kulutus on suurinta ja kesäkuukausina pienintä. Talvella kulutus elää voimakkaammin lämpötilojen vaihtelun mukaan, mikä ilmenee rosoisempana käyränä kesään verrattuna. (55.)

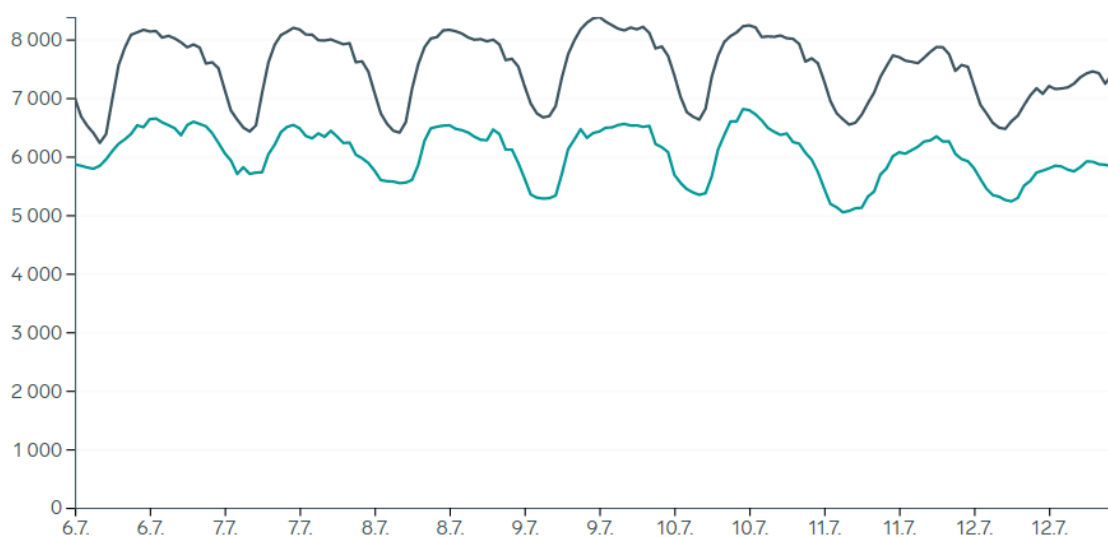
Kulutuskäyrässä näkyy vesivoiman vaikutus laskevana tuotantokäyrän trendinä kesäaikana, kun kevättulvien täyttämät varastoaltaat tyhjenevät ennen syksyn sateita. Koska Suomen vesivoimalaitoksista suuri osa on niin kutsuttuja jokivoimalaitoksia, vesivoiman kokonaistuotantoon vaikuttavat sademäärät varastointikapasiteetin pienuuden vuoksi.



Kuvaaja	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
● Sähkön kulutus	5455	14542	9483 MWh/h
● Sähkön tuotanto	3970	11195	7284 MWh/h

KUVA 13. Sähkön tuotanto ja kulutuskäyrät vuonna 2019 (55)

Päivän sisällä kulutus on pienintä aamuyön tunteina, josta se nousee klo 6–8 välillä korkeimmilleen, kunnes lähtee taas laskuun iltapäivällä. Viikonloppuna kulutus jää keskimäärin pienemmäksi arkipäiviin verrattuna.



KUVA 14. Tyypillinen sähkön kulutus- ja tuotantokäyrä kesäviikolla. (55.)

Fingridin verkkosivuilla on saatavilla tuntitason dataa kulutuksen ja tuotannon historiatiedoista. Niitä hyödyntämällä saatiin luotua neljälle vuodenajalle, neljälle vuorokauden ajalle sekä viikonlopulle kulutus- ja tuotantoprofiilit. Tarkasteltaessa sähkön kulutuslukemia viimeisen kymmenen vuoden ajalta, kulutus on ollut korkeimmillaan 15 105 MW ja matalimmillaan 5020 MW. Näiden perusteella asetetaan kulutuksen raja-arvoiksi 5000 MW -15 100 MW. (55.)

Fingridin sähkön kulutus ja tuotantohistoriasta kerättiin ensiksi keskiarvot neljälle eri vuodenajalle vuosilta 2010, 2013, 2016 ja 2020. Tämän perusteella joka vuodenajalle saatiin kerroin, joka korjaa keskimääräisen kulutuslukeman vuodenaikaa vastaavaksi. (55.) (Taulukko 5.)

TAULUKKO 5. Keskimääräiset sähkön kokonaistuotanto- ja kulutusenergiat vuodenajoittain.

Keskiarvot vuodenajoittain (MWh/h)									
Vuosi	Talvi		Kevät		Kesä		Syksy		Kulutus
	Kulutus	Tuotanto	Kulutus	Tuotanto	Kulutus	Tuotanto	Kulutus	Kulutus	
2010	11694	10535	9484	8825	7922	6247	9516	8263	
2013	11202	9341	9545	8310	7823	5801	9129	7167	
2016	11097	8802	9295	7404	8040	6049	9629	7516	
2020	10052	8324	9163	7572	7554	5923	8859	7216	
Keskiarvo	11011,25	9250,5	9371,75	8027,75	7834,75	6005	9283,25	7540,5	
Vuoden KA	9375,25	7705,9375							
Tuonnin osuus tuotannosta		18 %							
Kerroin	1,174502	1,20043797	0,999626677	1,04176	0,8356844	0,779269	0,990187	0,9785312	

Jokaiselle vuodenajalle otettiin lisäksi kolmen eri päivän satunnaisotannalla yön, aamun, keskipäivän ja illan lukemat niin, että jokainen päivä edustaa eri vuotta, kuukautta ja viikonpäivää. Näin katsotaan saavutettavan tähän työhön riittävä tarkkuus, vaikka jonkinasteista virhettä pienehkön otannan vuoksi väkisinkin tulee. Tässä ei kuitenkaan liene tarkoituksenmukaista tehdä tarkempaa analyysiä. Lisäksi loppuviikon lukemia verrataan saman viikon molempiin viikonloppupäiviin, jolloin saadaan viikonloppulukemia kompensoiva kerroin. (Taulukko 6.)

Vuorokausilukemat ovat kellonajoilta seuraavat:

- yö = 3.00, jolloin kulutus on pienimmillään
- aamu = 8.00, jolloin kulutus on noussut muutaman tunnin aikana voimakkaasti huippuunsa.
- keskipäivä = 12.00, jolloin kulutus on hieman tasaantunut huipustaan.
- ilta= 20-00, jolloin kulutus on vielä korkealla, viikonloppuisin jopa päivän huippulukemissa.

TAULUKKO 6. Vuorokauden aikojen ja viikonlopun kulutuskertoimet

kertoimet						
Kulutus	Ka	Yö	Aamu	Keskipäivä	Ilta	Viikonloppu
Talvi	1,17450	0,87605	1,04929	1,03514	1,03953	0,88559
Kevät	0,99963	0,89862	1,04708	1,02926	1,02503	0,86394
Kesä	0,83568	0,85992	1,04367	1,06794	1,02847	0,89920
Syksy	0,99019	0,85877	1,04507	1,03330	1,06285	0,97726
Tuotanto	Ka	Yö	Aamu	Keskipäivä	Ilta	Viikonloppu
Talvi	1,20044	0,90934	1,04785	1,02332	1,01949	0,84042
Kevät	1,04176	0,91359	1,03348	1,03280	1,02014	0,85736
Kesä	0,77927	0,84081	1,04397	1,09718	1,01803	0,84660
Syksy	0,97853	0,87057	1,04644	1,03303	1,04996	0,96931

Edellä mainittujen lisäksi luotiin huippukulutusta kuvaamaan pakkaneen-kerroin. Siinä asetettiin kulutuksen maksimilukema, 15100 MW aamun kulutukseksi ja muutoin käytettiin talviajan kertoimia huippulukemaan verrattuna.

Vuoden- ja vuorokaudenaika vaikuttaa myös erityisesti CHP-tuotannon tehoon. CHP-voimaloiden primäärituote on yleensä prosessihöyry tai kaukolämpö, joten niiden tuottama sähköteho riippuu primäärienergian tarpeesta. Näin ollen kovilla pakkasilla CHP-tuotannon osuus on suuri, jopa lähes

5000 MW ja vastaavasti lämpimällä säällä pienempi. Toisin sanoen yhteistuotantolaitokset seuraavat lämmön ja sähkön tarpeen hyvin sähkön kulutuskäyrää normaalitilanteessa, joten sillä saadaan tuotettua hyvin kausivaihteluihin vastaavaa perustehoa sähköverkkoon.

Tuuli- ja aurinkovoima ovat täysin sääriippuvaisia tuotantomuotoja, joten laskuriin tehtiin käsin valittavat arvot tuulisuudelle ja pilvisyydelle. Tuulivoiman kokonaistuotannon voidaan olettaa olevan täysin riippuvainen tuulisuudesta, joten tuulituotantoon vaikuttaa laskurissa kokonaiskapasiteetin ja historiatietojen perusteella arvioitu tuulisuuskerroin. Aurinkovoiman tuotantoon taas vaikuttaa vuodenaikojen vaihtelun lisäksi pilvisuus. Nämä on työssä otettu huomioon historiatietojen ja Solar Power -kurssilla saatujen oppien perusteella. (56.)

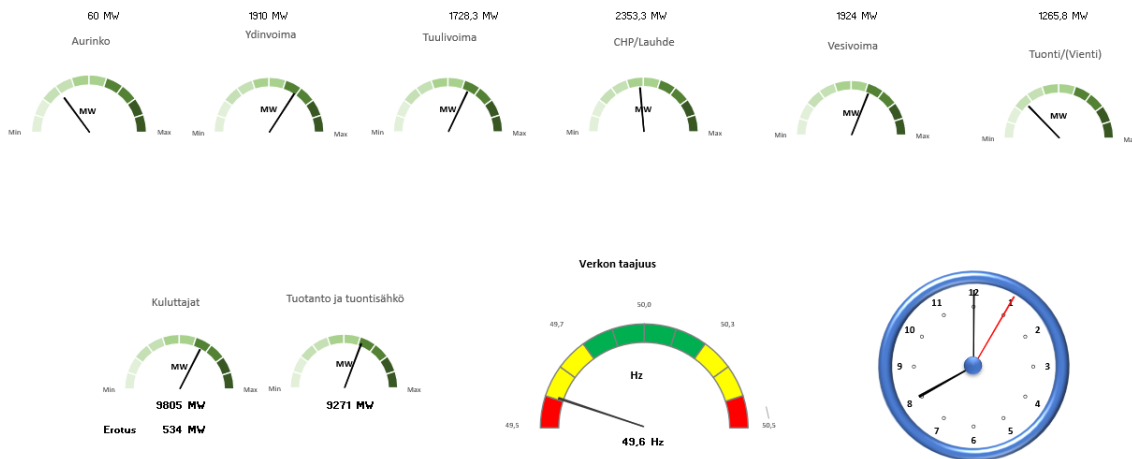
Edellä kerrottujen muuttujien perusteella luotiin Exceliin makroja hyödyntävä laskuri, joka painikkeista valittujen ajankohtien ja säätilatietojen perusteella laskee todellista tilannetta mukailevan kulutus- ja tuotantotilanteen. (Kuva 15.)

Alkutilanne:					
	Vuodenaika	Päiväaika	Arki/Viikonloppu	Tuuli	Aurinko
Pakkanen	Talvi	03:00	Arkipäivä	Tyyntä	Selkeää
	Kevät	08:00	Viikonloppu	Kevyttä	Puolipilvistä
	Kesä	12:00		Kohtalaista	Pilvistä
	Syksy	20:00		Navakkaa	
				Kovaa	
Aktiivisena:	1	2	1	2	1
	Talvi	Aamu	Arkipäivä	Kevyt	Selkeää

KUVA 15. Excel-taulukkoon tehty makroja hyödyntävä valintanäppäimistö.

Vesivoiman nopeaa säätökykyä voidaan havainnoida kulloiseenkin tilanteeseen tehtävällä äkillisellä muutoksella, joka aiheuttaa taajuuden muutoksen ylös-, tai alaspäin. Tämän työn osalta muutos esitetään aika-askelissa tapahtuvassa tilamuutoksessa, jonka aikana vesivoima reagoi tapahtuneeseen muutokseen sekunneissa. Tässä työssä eri suureita kuvaamaan luotiin Excelin ominaisuuksia hyödyntäen ”mittareita”, joiden viisari kertoo suureiden tilasta ymmärrettävästi. Kun mittarit asetetaan tilanteiden mukaan realistisen taustakuvan päälle, joka sisältää liikkuvia visuaalisia elementtejä, kuten pyörivät tuulivoimalan roottorit, kokonaisuus saadaan vielä enemmän havainnolliseksi. Tämä työ jätetään kuitenkin tässä vaiheessa myöhemmin ammattilaisen tehtäväksi.

Olkiluodon toisen reaktorin irrottua verkosta syntyy äkillinen 890 megawatin tuotantovaje, johon vesivoima kykenee reagoimaan nopeasti. Esimerkkikuvassa (kuva 16) häiriön syntymisestä on kulunut 5 sekuntia, jolloin taajuus on pudonnut 49,6 Hz:iin mutta vesivoiman yhteisteho on ehtinyt reagoida 356 megawatin teholla. Jo noin 15 sekunnin kuluttua tuotantovaje saadaan kurottua umpeen, jolloin taajuus lähtee palautumaan normaalitasolle.



KUVA 16. Verkon tasapainoa kuvaava yksinkertaistettu näkymä

9.3.2 Vesivoiman energiavarastointipotentiaali

Viime vuosina on selvitetty akkuteknologian hyödyntämistä sähköjärjestelmän säädössä. Tässä työssä tehtiin Excel-pohjalle vertailu vesivoiman säätökyvystä verrattuna akkuratkaisuun. Akkua vertailtiin lijoen viiden voimalan yhteenlaskettuun kokonaistuotantotehoon ja Jumiskon voimalaitoksen yläpuolisten järvien energiasisältöön. Lisäksi Jumiskon energiasisältöä verrataan myös muutamiin maallikolle tuttuihin energiankuluttajiin, minkä myötä mittasuhteet tulevat paremmin ymmärrettäviksi.

Akkuvaraston referenssinä käytetään tässä Fortumin olemassa olevaa litium-ioniakkua, joka on sijoitettu merikonttiin (57). Akkuvaraston hinnaksi oletetaan 500 000 €/MWh, joka on hieman nykyistä hintatasoa alempi mutta teknologian kehittyessä ja yleistyessä lähitulevaisuudessa realistisesti odotettavissa oleva hinta. (58.)

Verrattaessa lijoen voimaloita akkuvarastoon oletetaan alkutilanteessa veden virtaamaksi keskivirtaaman ja veden korkeuden olevan luparajojen puolivälissä, jolloin säätökykyä löytyy molempiin

suuntiin yhtä paljon. (Taulukko 7.) Todellisuudessa vesitilanne riippuu aina joen yläjuoksulta valuvasta vesimäärästä ja vallitsevasta ajotilanteesta, mutta esityksen selkeyden vuoksi valitaan näin.

TAULUKKO 7. PVO-Vesivoiman lijoen voimalaitosten teknisiä tietoja. (47.)

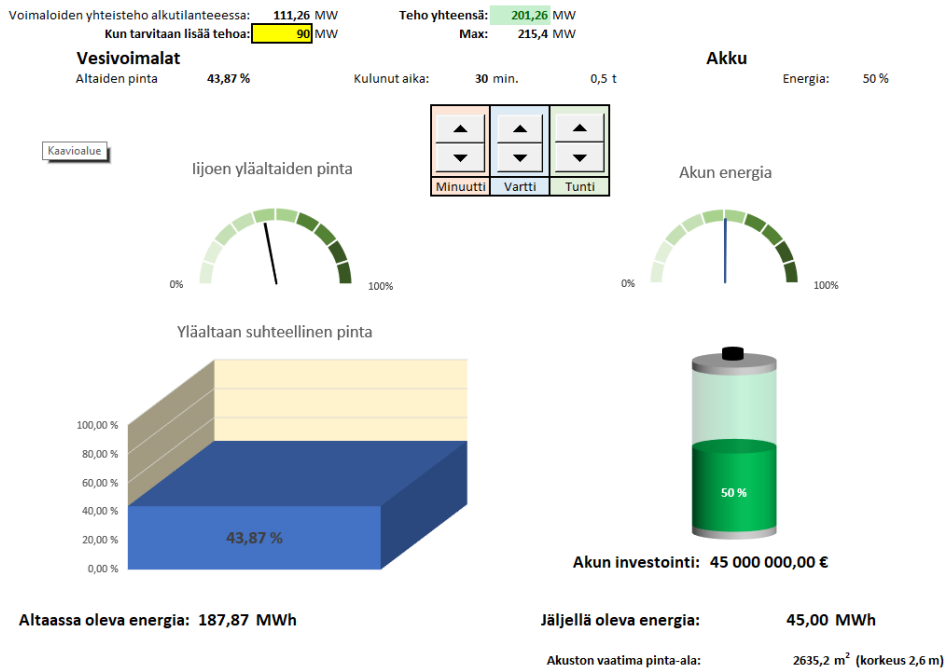
IIJOKI	Nimellisteho (MW)	Rakennusvirtaama (m ³ /s)	Keskivirtaama (m ³ /s)	Korkeusero (m)
Raasakka	64,3	375	173	21
Maalismaa	38,6	250	135	18,6
Kierikki	37,5	250	135	18
Pahkakoski	42,4	250	135	20,5
Haapakoski	32,6	250	135	16
Iijoki yht.	215,4			94,1

Jotta vältetään sekaannukset tehon ja energian välillä, oletetaan akun purkuajaksi aina 1 tunti, jolloin 1 MWh:n energia vastaa 1 MW:n purkutehoa. Muuttujana käytetään tehoa, jolloin saadaan vertailukohteeksi vesivoimalan tehonmuutosta vastaavan akkukapasiteetin tarve ja sen vaatima pinta-ala ja investoinnin hinta.

Ijoen voimaloista ylimpänä sijaitsevan Haapakosken voimalaitoksen yläaltaan pinta-ala on noin 64,6 hehtaaria, joten yksinkertaistettuna voidaan olettaa sen luparajojen sisällä olevan veden tilavuudeksi 1 938 000 m³. Kun voimaloiden tehoa lisätään samanaikaisesti, oletetaan alempien voimaloiden veden yläpinnan pysyvän vakiona. Yläaltaan laskennallinen pinnanmuutos suhteessa virtaaman muutokseen on otettu laskurissa huomioon.

Soveltaen kaavaa 1 käyttämällä saadaan laskettua Haapakosken yläaltaan sisältämä energiamäärä, joka on alkutilanteessa noin 214 MWh. Alkutilanteessa voimaloiden kokonaisteho on 111,26 MW, jolloin varaa ylös- ja alassäätöön on noin 110 MW.

Esimerkkikuvassa on valittu tuntiseksi tehontarpeeksi 90 MW, jolloin akun investoinnin laskennallisesi hinnaksi tulee 45 miljoonaa euroa ja akustojen vaatima pinta-ala on 2635 m² eli reilu 10 tenniskenttää. Puolen tunnin kuluttua ylössäädöstä akun kapasiteetista on kulunut puolet, kun Haapakosken yläaltaan kapasiteetista on kulunut vain reilu 6 %. Muiden voimaloiden yläpinnat pysyvät vakiona niin kauan kuin ylempiä laitoksia voidaan juoksuttaa samalla teholla, eli koko joen energiakapasiteettia on vielä runsaasti jäljellä, vaikka Haapakosken yläallas vajoaakin alarajalle.



KUVA 17. Lijoen voimaloiden säätökapasiteetti verrattuna Litium-ioniakustoon.

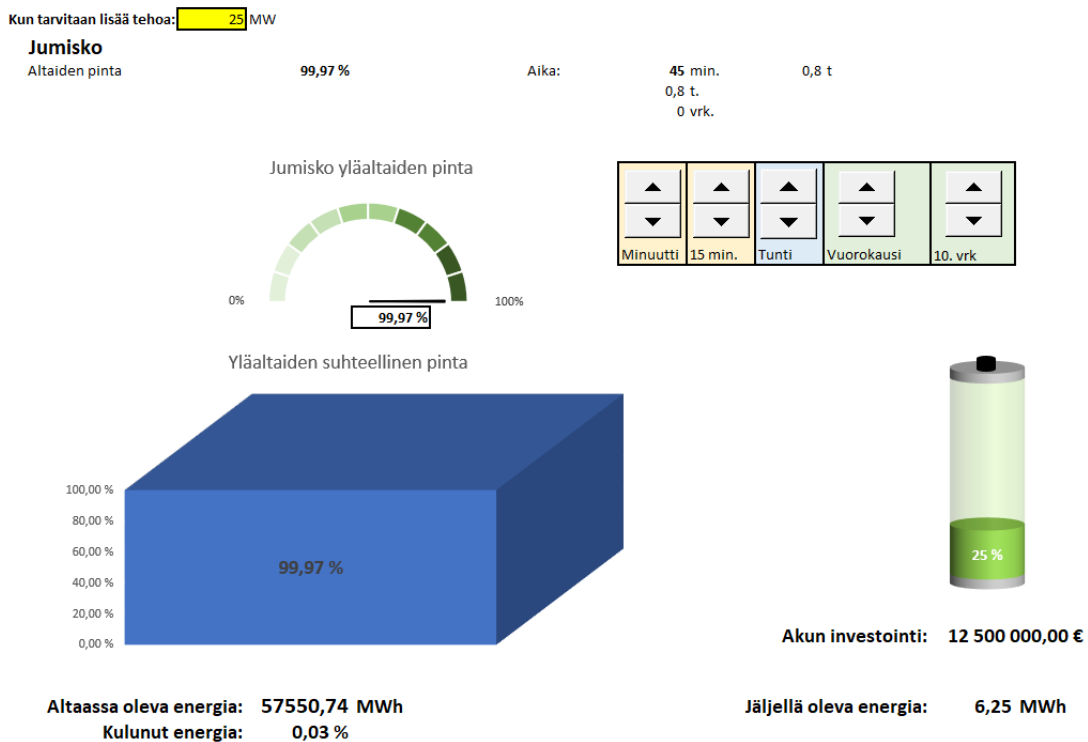
Kemijärveen laskevan Jumiskon voimalaitos on niin sanottu säännöstelyvoimalaitos, jonka yläpuolisten säännöstelyjärvien potentiaalienergia on huomattava (Kuva 18). Sen energiavarastoa verrataan samoin kuin lijoen tapauksessakin: Litium-ioniakustoon.



KUVA 18. Jumiskon voimalaitoksen säännöstelyjärvet (49, s. 3)

Jumiskon säännöstelyjärvien lupaehtojen sisään mahtuva vesimäärä on noin 248,5 milj. m³. Suurin sallittu vesipintojen korkeusero voimalaitoksella on 96 m. Yläaltaiden kokonaisenergiasisällöksi tulee siten 57,57 GWh. 25 MWh:n akuston energiasisältö on siis 0,043 % Jumiskon säännöstelyjärvien varastointikapasiteetista. 25 MWh:n akuston hinnaksi tulee arviolta noin 12,5 miljoonaa euroa. Voimalaitoksen nimellisteho ennen vuonna 2021 tehtävää peruskunnostusta on 25,8 MW, joten 25 MWh:n akku tunnin purkausajalla on tässä tapauksessa hyvin verrattavissa voimalan kanssa.

Kuvassa 19 on kuvakaappaus näkymästä, jossa akkua puretaan ja Jumiskon voimalaitosta ajetaan 25 MW:n teholla. 45 minuutin kuluttua akusta on jäljellä enää 25 %, kun yläaltaiden kokonaisenergiasta on käytetty vain 0,03 %.



KUVA 19. Jumiskon varastoaltaiden energiakapasiteetti verrattuna 25 MWh:n akkuun

Kun Jumiskon yläaltaiden kokonaisenergiasisältöä verrataan maallikoille tuttuun käyttöesineiden sähköenergian kulutukseen, voidaan ymmärtää vesivoiman säännöstelyaltaiden tarjoama energia-varastoinnin kapasiteetti: Jumiskon yläaltaiden energiamäärällä lataisi

- iPhone 12 -puhelimien akun 5,34 miljardia kertaa
- Tesla Model S -auton akun 767 593 kertaa, millä ajaa 9 211 kertaa maailman ympäri

sekä kattaisi vuoden sähkönkulutuksen

- 2922 neljän hengen sähkölämmitteisessä 120 m²:n omakotitalossa (59)
- 7886 edellistä vastaavassa kaukolämmitteisessä talossa (59)
- 41 121 yhden hengen yksiössä

Jumiskon voimalaitoksen vuosienenergiaantuotanto on noin 90 GWh/a, joten altaiden kapasiteetti käytetään vuoden aikana vajaa 1,6 kertaa.

10 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella ja kehittää vesivoiman merkitystä sähköjärjestelmässä havainnollistava laite tai sovellus. Työn loppuun saattaminen edellytti tutustumista sähköjärjestelmän toimintaan, jonka perustana on toimiva sähkömarkkina.

Sähkömarkkina on erinomainen mekanismi ohjaamaan sähkön tuotantoa ja kulutusta. Sähkömarkkinan tehtävänä on ohjata tuotantoa sinne, missä sitä milloinkin on halvimmalla saatavissa. Pohjoismaisen sähkömarkkinan etuna on kuluttajan kannalta edullisempi sähkön hinta puhtaasti kotimaiseen tuotantoon verrattuna. Toisaalta sähkömarkkina yhdessä tiukentuneen päästöpolitiikan kanssa on aiheuttanut kotimaisen sähköntuotantokapasiteetin pientymisen ennen uusien ydinvoimahankkeiden valmistumista. Erityisesti kotimaisen lauhdevoiman kapasiteetti on vähentynyt kuluneen vuosikymmenen aikana merkittävästi, kun taas tuuli- ja aurinkovoiman osuus on lisääntynyt samaan aikaan runsaasti. Tämän vuoksi vesivoima alkaa olla ainoita erinomaisesti säätävään sähköntuotantoon kykenevistä tuotantomuodoista.

Suomen rajojen sisällä korkeuserot ovat kohtalaisen pieniä, joten nykyisen vesivoimakapasiteetin saavuttaminen on edellyttänyt suurien jokien valjastamista energiantuotantokäyttöön, jolloin suurella virtaamalla saadaan korvattua puuttuvaa korkeuseroa. Naapurimaistamme Norja kattaa lähes kaiken sähköntuotantonsa vesivoimalla vuoristoon rakennettujen, suuret korkeuserot ja varastokapasiteetin omaavien laitosten ansiosta. Ruotsissakin lähes puolet maan sähköntuotannosta tuotetaan vesivoimalla. Tämä palvelee myös Suomea siltä osin, että hyvin säätökykyistä ja edullista sähköenergiaa on naapurimailta yleensä saatavilla. Kovan kulutuksen aikaan voisi kuitenkin aiheuttaa vaaratilanteen yllättävä suurempi häiriö suuressa tuotantoyksikössä tai merkittävän siirtöyhteyden katkeaminen.

Vesivoiman tuotanto ei aiheuta ollenkaan hiilidioksidipäästöjä, joten sitä voidaan pitää ympäristöystävällisenä energiantuotantomuotona. Kuitenkin erityisesti jokien patoamisen aiheuttamat haitat vaelluskalojen nousulle aiheuttavat vesivoimaa kyseenalaistavia mielipiteitä. Myös säännöstelyn aiheuttamat muutokset vesistöjen tilaan herättää jonkin verran arvostelua. Vesivoimalla tuotetaan vuosittain noin 20 % käytettävästä sähköenergiasta Suomessa, joten osuus on merkittävä. Vesivoiman tarjoamat säätökykyominaisuudet tekevät siitä kuitenkin nykyisellään korvaamattoman sähköjärjestelmän toiminnalle.

Työssä haastavinta oli saada esitettyä todella monimutkaisen järjestelmän toiminta mahdollisimman yksinkertaisesti. Yksinkertaisten ja tuttujen esimerkkien kautta kuitenkin saadaan asia perehtymättömällekin henkilölle esitettyä ymmärrettävästi. Tämän opinnäytetyön yhteydessä tehty työkalu ei ole visuaaliselta ilmeeltään kovinkaan näyttävä, mutta työ rajattiin niin, että onnistunutta tuotetta voitaisiin jatkojalostaa ilmeen ja käyttöliittymän osalta ammattilaisen toimesta myöhemmin.

Työssä verrataan vesivoimaa akkuvarastoon paitsi siksi, että se on lähes kaikille tuttu energian varastointimuoto, myös sen vuoksi, että sitä on esitetty korvaamaan nykyistä säätövoimakapasiteettia. Akkujen tarjoamat ominaisuuden häviävät kuitenkin tehossa ja energianvarastoinnissa paljon vesivoimalle. Toisaalta akkuihin varastoitava energia on tuotettava jollakin, eikä akkuihin tarvittavat mineraalitkaan ole edullisia paitsi rahallisesti, eivät myöskään luonnon kannalta. Teollisuuskokoluokan akuilla on kuitenkin paikkansa niiden tarjoaman viiveettömän tehonpurkauksen ansiosta, mikä osaltaan keventää vesivoimaloiden turbiinien voimakkaita tehonsäädöissä kokemaa rasitusta.

Voidaan siis todeta, että niin vesivoimalla, tuulivoimalla kuin myös akuilla on paikkansa tulevaisuuden energiantuotannossa, mutta vesivoimaa ei toistaiseksi voida täysin korvata millään muulla tuotannolla.

LÄHTEET

1. Suomen sähköjärjestelmä. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>. Hakupäivä: 4.6.2021.
2. Fingridin sähkönsiirtoverkko. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>. Hakupäivä: 4.6.2021.
3. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>. Hakupäivä: 4.6.2021.
4. Kysyntäjousto. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pilottihankkeita/kysyntajousto/#tuntihinta>. Hakupäivä: 4.6.2021.
5. Simola, Osmo 1982. Vuosisata sähköä Suomessa. Espoo: Suomen sähkölaitosyhdistys r.y. tutkimus ja sisällönanalyysi. Uudistettu laitos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.
6. Metsäteollisuus ry:n jäsenyritysten tuotantolaitokset kartalla. 2021. Metsäteollisuus ry. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/tuotantolaitoskartta> Hakupäivä: 4.6.2021.
7. Energian kulutus ja sähkön hinta metallinjalostusteollisuudessa. 2017. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: http://copperalliance.fi/uploads/2017/03/tem_15_2017.pdf. Hakupäivä: 4.6.2021.
8. Energiavuosi 2020 Sähkö. 2021. Energiateollisuus ry. Saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2020_nettti.pdf. Hakupäivä: 4.6.2021.
9. Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2020. Energiavirasto,2020 Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/markkinoiden-julkaisut>. Hakupäivä: 4.6.2021.
10. Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat: Sähkön hankinta ja kokonasikulutus, 1960-2020. Tilastokeskus. Saatavissa: https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehk/statfin_ehk_pxt_12sv.px/. Hakupäivä: 4.6.2021.
11. Suomen ydinvoimalaitokset. 2021. Säteilyturvakeskus. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/suomen-ydinvoimalaitokset>. Hakupäivä: 4.6.2021.

12. Laitosmalli VVER-1200. Fennovoima. Saatavissa: <https://www.fennovoima.fi/hanhikivi-1/tieto-hanhikivi-1-hankkeesta/laitosmalli-vver-1200>. Hakupäivä: 4.6.2021.
13. Miten ydinvoimalaitos toimii. Säteilyturvakeskus. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/miten-ydinvoimalaitos-toimii>. Hakupäivä: 4.6.2021.
14. Radioaktiivisten jätteiden ja päästöjen ryhmittely. 2020. Säteilyturvakeskus. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteen/radioaktiivisten-jatteiden-ja-paastojen-ryhmittely>. Hakupäivä: 7.6.2021.
15. Loppuraportti: Mistä lisäjousta sähköjärjestelmään? 2012. Energiategollisuus ry, Fingrid Oyj. Saatavissa: https://energia.fi/files/694/Mista_lisajousta_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf. Hakupäivä: 7.6.2021.
16. Tuet tuulivoiman rakentamiselle. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuet_tuulivoiman_rakentamiselle. Hakupäivä: 7.6.2021.
17. Parviala, Antti. 2021. Suomesta uusiutuvan energian mallimaa. Kokonainen vetytalous aiotaan herättää henkiin EU:n elvytysmiljardeilla. Yle Uutiset. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-11838445>. Hakupäivä: 7.6.2021.
18. Zetvesf loppuraportti: Vesivoiman merkitys Suomen energijärjestelmälle. 2019. Åf-Consult Oy. Saatavissa: https://energia.fi/files/3427/Vesivoimaselvitys_FINALrev1_20190206.pdf. Hakupäivä: 7.6.2021.
19. Huhtinen, Markku – Kettunen, Marko – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. 5.Painos. Helsinki: Edita
20. Soodakattila – tiivistelmä. 2021. Knowpulp. Saatavissa: https://www.knowpulp.com/www_demo_version/suomi/pulping/general/9_recovery_boiler/frame.htm. Hakupäivä: 7.6.2021.
21. Raahen Voima Oy on käynnistänyt uuden voimalaitoksen. 2016. EPV Energia Oy. Saatavissa: <https://www.epv.fi/ajankohtaista/raahen-voima-oy-on-kaynnistanyt-uuden-voimalaitoksen>. Hakupäivä: 7.6.2021.

22. Kyytsönen, Jouko 2021. Analyysi: Vero ja kalliit päästöoikeudet polkevat turpeen syvälle suohon – tositilanne on edessä parin vuoden kuluttua, kun turve loppuu lämpölaitosten varastoista. Maaseudun Tulevaisuus. Saatavilla: <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/talous/artikkeli-1.1334402>. Hakupäivä: 7.6.2021.
23. Jätevoimala antaa roskalle uuden elämän. Vantaan Energia. Saatavissa: <https://www.vantaan-energia.fi/jatevoimala-antaa-roskalle-uuden-elaman/>. Hakupäivä: 7.6.2021.
24. Pulli, Jani 2020. Yhteistuotantolaitokset mukana tasapainottamassa sähköjärjestelmää. Pohjolan Voima Oyj. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/blogi/yhteistuotantolaitokset-mukana-tasapainottamassa-sahkojarjestelmaa/>. Hakupäivä: 7.6.2021.
25. Lehdistötiedote: Inkoon hiilivoimalaitoksen kaikki kattilarakennukset purettu ja 92 % materiaaleista kierrätetty. 2019. Fortum Oyj. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2019/11/inkoon-hiilivoimalaitoksen-kaikki-kattilarakennukset-purettu-ja-92-materiaaleista-kierratetty>. Hakupäivä: 7.6.2021.
26. Tehoreservikapasiteetin hankinta. 2019. Energiavirasto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Hankintap%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-tehoreservikapasiteetin-hankintap%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s.pdf/7d620fcf-84d9-570c-5868-8373e3c83200/Hankintap%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-tehoreservikapasiteetin-hankintap%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s.pdf>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
27. Salokangas, Raimo – Manninen, Juhani – Pallasmaa, Juhani – Riikonen, Olli 1970. Suomen vesivoima. Suomen vesivoimayhdistys ry. Tampere: Tampereen kirjapaino-osakeyhtiö Aamulehti, Offsetpaino.
28. Usein kysyttyä: Sähkön verkkopalvelumaksut, Mitä verkkoyhtiöiltä vaaditaan toimitusvarmuuden parantamiseksi?. Energiavirasto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/kuluttajainfo>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
29. Tähtinen, Matti 2016. Fingrid Oyj-kaksi vuosikymmentä. Fingrid-lehti. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/historia-kaksi-vuosikymmenta/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
30. History. Nord Pool AS. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/About-us/History/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.

31. Johdanto sähkömarkkinoihin. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
32. Kontrollrummet. 2021. Svenska Kraftnät. Saatavissa: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kontrollrummet/>. Hakupäivä: 28.5. 2021.
33. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/#taustaa>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
34. Reservimarkkinat. 2021. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivoitteet-ja-hankintakanavat>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
35. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Fingrid Oyj. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
36. Automaattinen taajuudenhallintareservi. 2021. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>. Hakupäivä: 7.6.2021.
37. Leinonen, Päivi 2017. Mitä on inertia? Fingrid-lehti. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>. Hakupäivä: 7.6.2021.
38. Nopea taajuusreservi. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
39. Tiedote: Pohjolan Voima suunnittelee Euroopan suurimpiin kuuluvaa akkuratkaisua. 2021. Pohjolan Voima Oyj. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/pohjolan-voima-suunnittelee-euroopan-suurimpiin-kuuluvaa-akkuratkaisua/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
40. Ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: <https://tem.fi/ilmasto-ja-energiastrategia> Hakupäivä: 7.6. 2021.
41. Työ- ja elinkeinoministeriö. 2019. Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa. Valtioneuvosto. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa>. Hakupäivä: 7.6. 2021.

42. Päästökaupan julkaisut: Laitoskohtaiset päästötiedot 2013-2020. 2021. Energiavirasto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/paastokaupan-julkaisut>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
43. Pulli, Jani. Toimitusjohtaja – Sipola, Antti-Pekka. Käyttöpäällikkö – Hämäläinen Veli-Matti. Asiantuntija. PVO-Vesivoima Oy. Palaverikeskustelut keväällä 2021.
44. Aurora Line- Kolmas yhdysjohto Pohjois-Ruotsiin. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suunnittelu-ja-rakentaminen/rajayhteydet/Aurora-Line-kolmas-400-kv-ac-yhdysjohto-ruotsiin/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
45. Kuusela, Antti – Relander, Kauko – Ylisaukko-oja, Birger 2003. Pohjoisen vesiltä monipuoliseksi energiayhtiöksi: Pohjolan Voima 60 vuotta. Pohjolan Voima Oyj. Helsinki: Edita.
46. Omistajat. 2020. Pohjolan Voima Oyj. Saatavilla: <https://www.pohjolanvoima.fi/tietoa-meista/hallinnointi/omistajat/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
47. Vesivoimalaitoksemme. 2021. Pohjolan Voima Oyj. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/tuotamme-sahkoa-ja-lampoa/vesivoima/vesivoimalaitoksemme/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
48. Esite: Raasakan voimalaitos. PVO-Vesivoima Oy. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/wp-content/uploads/2020/09/Raasakan-vesivoimalaitos-2020.pdf>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
49. Esite: Jumiskon voimalaitos. PVO-Vesivoima Oy. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/wp-content/uploads/2020/09/Jumiskon-vesivoimalaitos-2020.pdf>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
50. Harjavalta. PVO-Vesivoima Oy. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/voimalaitokset/harjavalta/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
51. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma: Kollaja-hanke. 2017. PVO-Vesivoima Oy.
52. Loukkola, Pekka 2016. Pitkään suunnitellulle Kollajalle hyvästit- hallitus ei avaa koskiensuojelulakia. Yle Uutiset. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-9171084>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
53. Ylikunnari, Jukka 2019. T350503 Koneoppi 2 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2019. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

54. Kalat ja vesiluonto. PVO-Vesivoima Oy. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/vastuullisuus/kalat-ja-vesiluonto/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
55. Avoin sähkömarkkinadata: Sähkön kulutus ja tuotanto. 2021. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>. Hakupäivä: 7.6. 2021.
56. Avoin sähkömarkkinadata: Aurinkovoima. 2021. Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>. Hakupäivä: 7.6. 2021
57. . Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä. 2017. Lehdistötiedote. Fortum Oyj. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>. Hakupäivä: 7.6. 2021
58. ForTheDoers-blogi: Sähköjärjestelmän perusasioiden äärellä, osa 2: Voiko akuilla korvata vesivoimaa säätövoimana? 2018. Kulla, Tatu. Kehitysjohtaja, Fortum Oyj. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/voiko-akuilla-korvata-vesivoimaa-saatovoimana>. Hakupäivä: 7.6. 2021
59. Sähkönkulutus yksiössä, kolmiossa ja omakotitalossa. 2019. Fortum Oyj. Saatavissa: <https://yhdedssa.fortum.fi/sahkonkulutus>. Hakupäivä: 7.6. 2021