

Topi Koivujoki

SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄN RA- KENNE NYT JA TULEVAISUUDESSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lappalainen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Topi Koivujoki: Suomen sähköjärjestelmän rakenne nyt ja tulevaisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2023

Suomen sähköjärjestelmä on kokonaisuus, joka sisältää sähkön tuotannon, siirron sekä kulutuksen. Tässä työssä tutkitaan, miten sähköä tuotetaan, miten sähköä siirretään ja mihin sähköä kulutetaan Suomessa ottaen huomioon myös tulevaisuuden näkymiä.

Toimiva sähköjärjestelmä edellyttää, että tuotanto ja kulutus ovat tasapainossa joka hetki. Teollisuus kuluttaa noin puolet Suomessa kulutetusta sähköenergiasta, ja toinen puolisko jakautuu asumisen ja maatalouden sekä palveluiden ja rakentamisen tarvitsemaan sähköenergiaan. Sähkön kulutus tulee lisääntymään tulevaisuudessa johtuen muun muassa digitalisoitumisen edellyttästä datakeskuskapasiteetin kasvusta, liikenteen sähköistymisestä ja teollisuuden kasvihuonepäästöjä aiheuttavien prosessien sähköistämisestä, joten sähkön tuotanto on asetettava vastaamaan tätä lisääntynyttä kulutusta. Ilmastonmuutos on kuitenkin ongelma, joka on otettava huomioon Suomen sähköjärjestelmän kehittämistyössä.

Sähköä tuotetaan Suomessa vesivoimalla, lämpövoimalla, ydinvoimalla, tuulivoimalla sekä aurinkovoimalla. Vuonna 2022 Suomen sähköenergian kulutuksesta tuotettiin vesivoimalla noin viidennes, lämpövoimalla noin neljännes, ydinvoimalla vajaa kolmannes, tuulivoiman osuuden jäädessä hieman vesivoiman osuuden alle. Aurinkovoiman osuus oli vielä varsin marginaalisella tasolla Suomessa.

Vesivoimassa vesimassan potentiaalienergia muunnetaan sähköenergiaksi generaattorin avulla. Vesivoima ei aiheuta sähkön tuotantovaiheessa päästöjä. Vesivoimalla on erinomaiset säätöominaisuudet verrattuna muihin tuotantomuotoihin. Lämpövoimaksi kutsutaan sitä sähköenergian tuotantoa, joka tuotetaan lämmön avulla. Polttoaineita kuten kivihiiltä tai puuta polttamalla saadaan lämpöä, jolla saadaan vesi höyrystymään. Turbiini ja siihen kytketty generaattorin akseli saadaan pyörimään, kun aikaansaatu höyry johdetaan siitä läpi. Varsinkin fossiilisia polttoaineita polttoaineena käyttävä lämpövoima muodostaa massiivisen ilmasto-ongelman. Ydinvoima taas on tuotantovaiheessa päästötön sähkön tuotantotapa. Ydinvoimala on toiminnaltaan pitkälti kuin lämpövoimalaitos, ero on vain lämmön tuottamisessa. Ydinvoimalassa lämpö tuotetaan fysioreaktioiden kautta. Tuulivoima on tuulen eli ilman virtauksen liike-energian muuttamista tuuliturbiinin ja siihen kytketyn generaattorin akselin kautta sähköenergiaksi. Tuulivoimala ei aiheuta sähkön tuottamisvaiheessa päästöjä, kuten ei myöskään aurinkovoimala. Työssä käsiteltävä fotosähköiseen ilmiöön perustuva aurinkovoima on auringon maahan säteilemän energian (fotonien energia) muuntamista sähköenergiaksi aurinkokennon avulla.

Tulevaisuuden sähköjärjestelmässä päästöt tulee olla minimoituna, jotta ilmastonmuutoksen eteneminen saadaan hidastumaan. Tämä tarkoittaa päästöjä aiheuttavien fossiilisia polttoaineita polttoaineena käyttävien lämpövoimaloiden korvaamista uusiutuvilla sähköenergiamuodoilla, eli tuuli- ja aurinkovoimalla. Haasteena on Suomen sähköjärjestelmän luotettavuuden ja vakauden säilyminen, kun varmaa ja luotettavaa lämpövoimaa korvataan sään mukaan vaihtelevalla tuotannolla. Ratkaisu tähän löytyy esimerkiksi energiavarastoista sekä kulutusjoustosta.

Tuotetun sähköenergian siirrosta vastaa Suomessa sähkön siirtoverkko. Suomessa siirtoverkko jakautuu jännitetason mukaan suurjännite-, keskijännite- ja pienjänniteverkkoon. Suurjänniteverkolla tarkoitetaan siirtoverkon yli 110 kV:iin yltävää osaa. Siihen on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaat sekä alueelliset jakeluverkot. Sen avulla Suomi on myös osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää. Alueelliset jakeluverkot huolehtivat sähkön siirrosta kulutuksen luokse. Jakeluverkon 20 kV:n osuudet muodostavat keskijänniteverkon, ja lähellä kulutusta keskijänniteverkko haarautuu useiksi 400 V:n pienjännitejohdoiksi. Tämä on useimmiten kuluttajalle sopiva jännitetaso. Suomen tulevaisuuden yhä hajautuneempi sähkön tuotanto edellyttää investointeja myös siirtoverkkoon.

Avainsanat: Sähkön tuotanto, sähkön siirto, sähkön kulutus, uusiutuva energialähde

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖN TUOTANTO	2
2.1 Mekaanisen energian muuntaminen sähköenergiaksi	3
2.2 Vesivoima	6
2.3 Lämpövoima	7
2.4 Ydinvoima	9
2.5 Tuulivoima	11
2.6 Aurinkovoima	14
3. SÄHKÖN SIIRTO JA KULUTUS	19
3.1 Suurjänniteverkko	21
3.2 Keskijänniteverkko ja pienjänniteverkot	23
3.3 Sähkön kulutus	24
4. SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄN TULEVAISUUS	27
5. YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33

1. JOHDANTO

Sähkön saanti on jokaisen ihmisen oikeus asumispaikasta riippumatta. Sähkö on olennainen osa modernia elämää, sillä sähköä tarvitaan nykyään lähes kaikkeen. Paljon vaikeampi tehtävä olisi todeta sellaisia asioita, joihin ei sähköä tarvita lainkaan. Siksi tarvitaan mahdollisimman luotettava mutta kuitenkin ympäristöä mahdollisimman vähän rasittava sähköjärjestelmä, joka sisältää sähkön tuotannon, siirron sekä kulutuksen. Tällaisen järjestelmän mahdollistaminen ei ole kuitenkaan mikään helppo tehtävä, sillä sähkön tuottaminen ilmastoystävällisesti edellyttää siirtymistä uudenlaisiin tuotantomuotoihin.

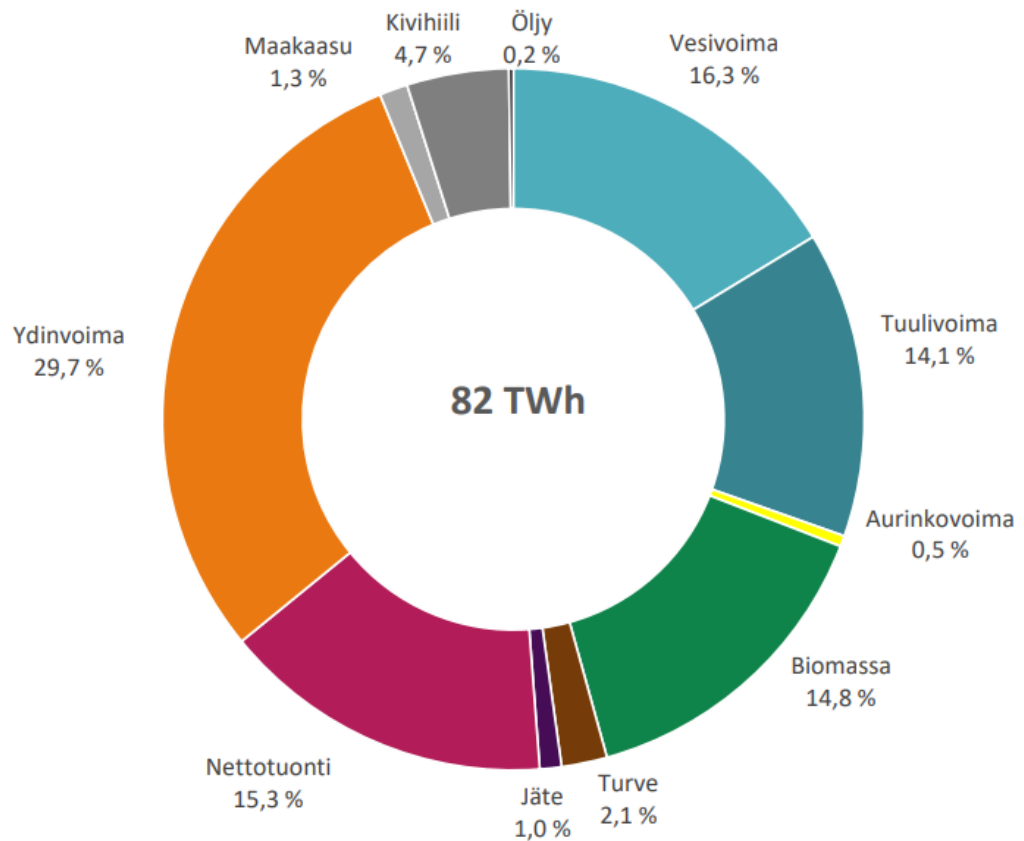
Tämän työn tavoitteena on tarkastella Suomen sähköjärjestelmän rakennetta. Sähköjärjestelmän rakenteen selvittäminen alkaa sähkön tuotannosta. Tavoitteena on sähkön tuotannon osalta selvittää, millä eri tavoilla sähköenergiaa tuotetaan Suomessa. Kustakin sähköntuotantomenetelmästä esitellään toimintaperiaate sekä selvitetään keskeisiä voimalaitoksia Suomessa. Tuotannon tarkastelusta edetään sähkön siirtoon. Tavoitteena on siis selvittää, miten sähköä siirretään tuotannosta kulutukselle. Sähkön siirron tarkastelun jälkeen siirrytään tarkastelemaan sähkön kulutusta Suomessa. Työn tavoitteena ei ole jättää Suomen sähköjärjestelmän rakenteen tarkastelua ainoastaan nykytilan tarkasteluun, vaan pyrkimyksenä on myös tutkia sitä, millainen on Suomen sähköjärjestelmän tulevaisuus.

Luvussa 2 käsitellään ensiksi sähkön tuotantoa Suomessa. Alaluvut 2.2–2.6 käsittelevät eri tuotantomenetelmiä. Koska suurimmassa osassa Suomen sähkön tuotantomenetelmistä sähkön tuotanto perustuu generaattorin pyörimiseen, on syytä käydä ensimmäisenä läpi generaattorin toimintaperiaate alaluvussa 2.1, ennen tuotantomenetelmien tarkastelua. Luvussa 3 käsitellään sähkön siirtoa ja kulutusta Suomessa. Tarkastelua ei jätetä työssä pelkästään sähkön siirtoon Suomen sisällä, vaan luvussa tarkastellaan myös Suomen rajasiirtoyhteyksiä muiden maiden kanssa. Luvussa 4 tarkastellaan Suomen sähköjärjestelmän tulevaisuutta.

2. SÄHKÖN TUOTANTO

Sähkö on sekundäärienergiaa. Tämä tarkoittaa sitä, että sähköä on tuotettava energiamuunnoksien kautta muista energialähteistä. Sähkön tuotanto voidaan jakaa primäärienergian lähteen mukaan muun muassa vesivoimaan, lämpövoimaan, ydinvoimaan, tuulivoimaan sekä aurinkovoimaan. Sähkön tuotanto perustuu suurelta osin siihen, että primäärienergia muunnetaan lämmöksi, sitten lämpö muunnetaan mekaaniseksi energiaksi ja lopulta tämä mekaaninen energia muunnetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. [1] Mainituista tuotantomuodoista lämpövoima ja ydinvoima perustuvatkin kyseiseen kolmen muunnosprosessin ketjuun. Vesi- ja tuulivoima tarvitsevat vain yhden energiamuunnoksen, koska ne muuttavat suoraan liike-energian sähköenergiaksi. Myös aurinkovoima tarvitsee vain yhden energiamuunnoksen, sillä fotonien energia muunnetaan suoraan sähköenergiaksi. Aurinkovoima mahdollistaa muista sähköntuotantomuodoista poikkeavimman sähköntuotannon, sillä kyseisessä tuotantomuodossa ei tarvita lainkaan generaattoria.

Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti vuonna 2022. Kuvan perusteella Suomi tuotti sähköenergiaa itse noin 70 TWh, ja hankki loput 12 TWh nettotuontina. Vesivoima on tällä hetkellä Suomen suurin uusiutuvan energian lähde sekä toiseksi suurin sähköenergian lähde ydinvoiman jälkeen. Uusiutuvista sähköenergianlähteistä myös tuulivoimalla sekä biomassalla on nykypäivänä merkittävä rooli Suomen sähkön tuotannossa. Vuonna 2022 hiilidioksidivapaan sähkön osuus oli jo 89 % Suomen sähkön tuotannosta. [2]



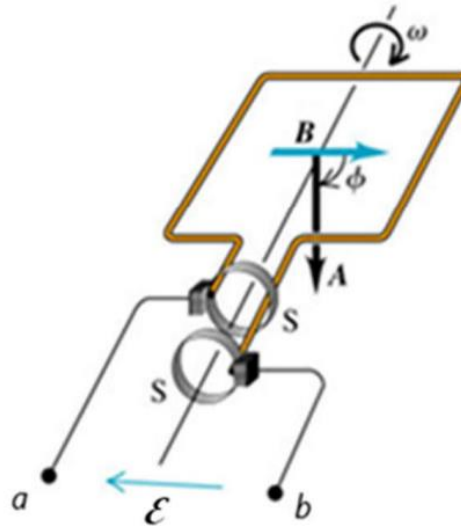
Kuva 1. Suomen sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti vuonna 2022 [2].

Aluvussa 2.1 käsitellään generaattorin toimintaperiaate: miten mekaaninen energia muuntuu sähköenergiaksi? Tämän jälkeisissä aluvuissa käsitellään eri sähköntuotantomenetelmiä.

2.1 Mekaanisen energian muuntaminen sähköenergiaksi

Mekaanista energiaa muutetaan sähköenergiaksi generaattorin avulla, yleisimmin tahtigeneraattorilla. Generaattori koostuu pyörivästä osasta eli roottorista sekä paikallaan pysyvistä osasta eli staattorista. Tahtigeneraattorissa sähköinen nopeus eli taajuus on aina tahdissa mekaanisen nopeuden kanssa [3].

Tarkastellaan generaattorin toimintaperiaatetta yksinkertaisen generaattorin avulla, joka koostuu virtasilmukasta sekä homogeenisestä magneettikentästä. Tilanne on siis kuvan 2 mukainen.



Kuva 2. Yksinkertainen vaihtovirtageneraattori [1].

Kuvassa magneettivuontiheys \mathbf{B} osoittaa oikealle. Kuvan tilanteesta huomataan, että magneettivuontiheys on kohtisuorassa silmukkaan \mathbf{A} nähden (silmukan normaalivektori osoittaa alaspäin). Näin ollen silmukan lävistävä magneettivuo on nolla. Kun silmukka käännetään pystyasentoon, on silmukan läpäisevä magneettivuo maksimissaan. Silmukan pyöriessä kokonaismagneettivuo ϕ vaihtelee siis ajan mukaan magneettivuontiheyden \mathbf{B} ja silmukan pinta-alaa kuvaavan vektorin \mathbf{A} pistetulon $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos(\varphi) = BA \cos(\omega t)$ mukaisesti eli

$$\phi = BA \cos(\omega t). \quad (1)$$

Faradayn induktiolaki sanoo, että derivoimalla silmukan läpi menevä magneettivuo ajan suhteen saadaan yhtälö

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

magneettikentän vuon muutosnopeuden ja sähkömotorisen voiman ε välille. Yhtälöstä nähdään, että sähkömotorinen voima on positiivinen magneettivuon pienentyessä ajan funktiona ja negatiivinen magneettivuon suurentuessa ajan funktiona. Yhtälöstä nähdään lisäksi, että sähkömotorisen voiman hetkellisarvo on sitä suurempi, mitä suurempi on magneettivuon muutosnopeus. Sijoittamalla magneettivuon lauseke (1) Faraday induktiolakiin (2) saadaan

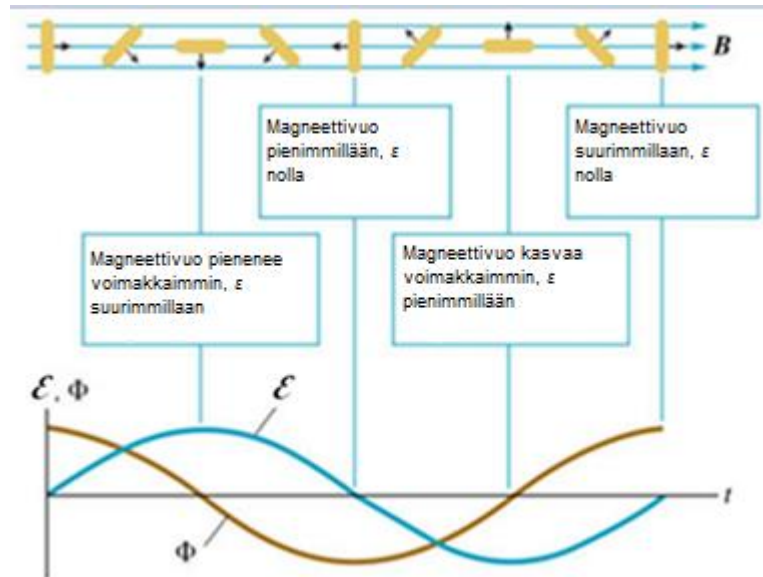
$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = \omega BA \sin(\omega t), \quad (3)$$

jossa kulmanopeus ω riippuu järjestelmän taajuudesta f yhtälön

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

mukaisesti. [1]

Indusoituva sähkömotorinen voima ε voidaan nyt johtaa kuvassa 2 näkyvien liittimien b ja a välille liukurenkailla, joita silmukan päissä olevat hiiliharjat pyyhkivät. Liittimien välille indusoituva sähkömotorinen voima on esitetty kuvassa 3,



Kuva 3. Virtasilmukan läpäisevä vuo sekä liittimien b ja a välille indusoituva sähkömotorinen voima ajan funktiona, muokattu lähteestä [1].

josta nähdään sähkömotorisen voiman vaihtelevan sinimuotoisesti virtasilmukan pyöriessä. Käytännön generaattoreissa virtasilmukoita on useampia, jolloin lopullinen koneesta ulos saatava jännite on yksittäisiin silmukoihin indusoiduvien jännitteiden summa.

Vastaava ilmiö tapahtuu, vaikka magneettivuon tiheys vaihtelisi ajan funktiona virtasilmukan pysyessä paikoillaan. Tähän perustuvatkin pääsääntöisesti nykyisessä sähköenergiajärjestelmässä olevat generaattorit. Generaattorin magnetoidun roottorin pyöriessä staattorikehällä olevan virtasilmukan näkökulmasta siihen vaikuttava magneettivuo ϕ vaihtelee sinimuotoisesti yhtälön

$$\phi = \phi^{\max} \sin(\omega t) \quad (5)$$

mukaisesti. Tällöin Faradayn induktiolain mukaan silmukan päiden välissä vaikuttava jännitteen hetkellisarvo on

$$u(t) = \frac{d\phi}{dt} = \omega \phi^{\max} \cos(\omega t), \quad (6)$$

eli jännite vaihtelee kosinimuotoisesti. Todellisessa generaattorissa silmukoita on staattorin kehällä useita sarjaan kytkettyinä, jolloin yhteen vaiheeseen indusoituva kokonaisjännite on eri silmukoihin indusoituvien jännitteiden summa. [1]

2.2 Vesivoima

Vajaa viidennes Suomen sähköstä tuotetaan vesivoimalla [2]. Vesivoima on vesimassan potentiaalienergiasta energiamuunnoksen kautta saatavaa, ja täten päästötöntä¹ sähköenergiaa [4]. Toimintaperiaate on yksinkertainen: virtaava vesi pyörittää turbiinia, joka pyörittää generaattorin akselia.

Suomessa on noin 250 vesivoimalaitosta. Niiden yhteenlaskettu teho on noin 3190 MW. [5] Vesivoimalat voidaan jakaa Suomessa tehon perusteella suurvesivoimaloihin (yli 10 MW), pienvesivoimaloihin (1–10 MW) sekä minivesivoimaloihin (alle 1 MW). Keskimääräinen vuosituotanto on noin 13 TWh, joka kuitenkin vaihtelee vuosittain paljon riippuen käytettävissä olevan veden määrästä. [6]

Vesivoimalan toiminta perustuu ylävesialtaassa olevan veden potentiaalienergian muuntamiseen turbiinin liike-energiaksi, joka saa generaattorin akselin pyörimään. Vesimassan potentiaalienergia on

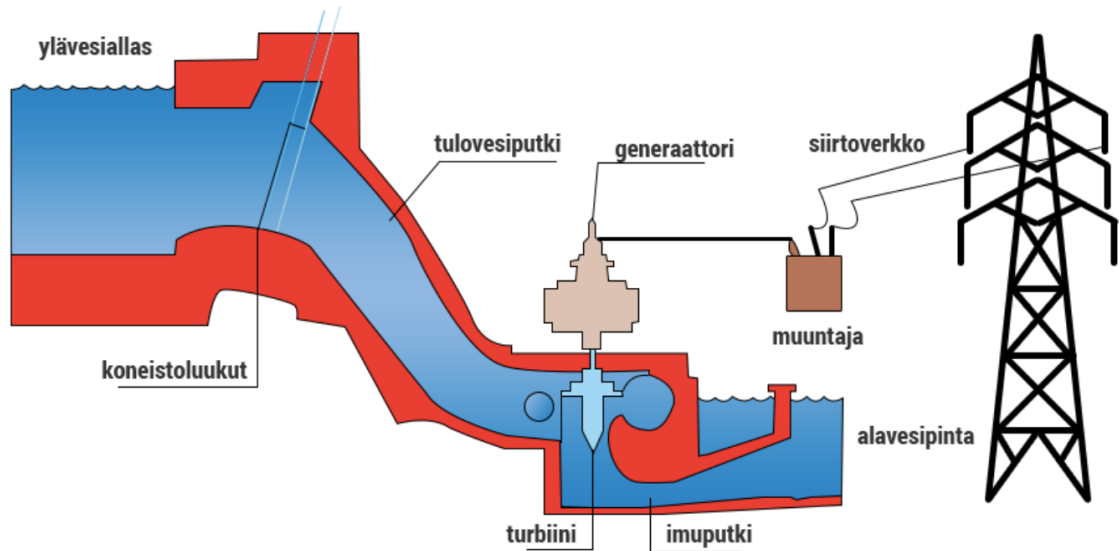
$$E_{\text{pot}} = mgh, \quad (7)$$

jossa m on veden massa, g on maan vetovoiman kiihtyvyys ja h hyödynnettävissä oleva putoamiskorkeus. Tällöin vesivoimalasta saatava teho on

$$P = \frac{dE_{\text{pot}}}{dt} \eta = \frac{d(mgh)}{dt} \eta = \rho qgh\eta, \quad (8)$$

jossa t on aika, η on voimalaitoksen hyötysuhde, ρ on veden tiheys ja q on veden virtaama. [1] Generaattorin tuottama sähköenergia siirretään sähkönsiirtoverkkoon. Vesivoimalan pääkomponentit ilmenevät kuvasta 4.

¹ Päästöttömyydellä tarkoitetaan tässä työssä sitä, että päästöjä ei synny sähköenergian tuotannossa.



Kuva 4. Vesivoimalan poikkileikkauskuva [7, katso 8].

Vesivoimalla on erinomaiset säätöominaisuudet verrattuna muihin tuotantomuotoihin. Vesivoima soveltuu nopean säädettävyytensä ansiosta parhaiten tuntitason ja sitä nopeampaan säätöön. Säätömahdollisuudet tunti- ja vuorokausitasolla vaihtelevat laitoskohtaisesti, ja niihin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa voimalaitoksen lupa, turbiinityyppi sekä vesistö. Vesivoimala kykenee käynnistymään nopeasti, sillä seisova vesivoimakoneisto saadaan täyteen tuotantotehoon yleisesti muutamassa minuutissa. Käynnissä olevan koneiston tuotantotehon kasvattaminen tapahtuu yleisesti sekunneissa. [6]

Suomessa on kymmenen kappaletta yli 100 MW:n tehoon yltäviä vesivoimalaitoksia. Suomen suurin vesivoimalaitos on Fortum Power and Heat Oy:n omistama Imatran vesivoimalaitos (187 MW). Toiseksi yltää Kemijoki Oy:n omistama Petäjäsoski (182 MW). Loput kahdeksan voimalaitosta ovat suuruusjärjestyksessä Kemijoki Oy:n omistama Pirttikoski (152 MW), Fortum Power and Heat Oy:n omistama Pyhäkoski (146 MW), Kemijoki Oy:n Seitakorva (144 MW), Taivalkoski (133 MW) sekä Ossauskoski (124 MW), UPM-Kymmene Oyj:n Isohaara (112 MW) sekä LSV Harjavallan vesivoimalaitos (110 MW) ja Kemijoki Oy:n Valajäsoski (101 MW). [9]

2.3 Lämpövoima

Noin neljännes Suomen sähköenergiasta tuotetaan lämpövoimalla [2]. Kun sähköenergiaa tuotetaan lämmön avulla, puhutaan lämpövoimasta. Lämpö synnytetään polttamalla polttoaineita kuten kivihiiltä, puuta sekä muita biopolttoaineita, turvetta, kierrätyspolttoaineita, öljyä tai maakaasua. Lämpövoimalan päästöt riippuvat käytettävästä polttoaineesta [10]. Suurimman päästöt aiheutuvat fossiilisista polttoaineista.

Lämpövoima voidaan jakaa lämmön ja sähkön yhteistuotantoon sekä lauhdevoimaan. Yhteistuotannossa otetaan talteen lämpönä se osa polttoaineen energiasta, jota ei voida hyödyntää sähkön tuotantoon. Käytännössä tällä tarkoitetaan generaattorin synnyttämää lämpöenergiaa. Yhteistuotanto mahdollistaa jopa 90 %:n hyötysuhteen, kun taas tuotettaessa sähkö ja lämpö erillisissä voimalaitoksissa on polttoaineen tarve jopa puolitakertainen yhteistuotantoon verrattuna [11]. Tuotettaessa sähköenergiaa erillisessä voimalaitoksessa puhutaan lauhdevoimasta [12]. Suomi on edelläkävijä lämmön ja sähkön yhteistuotannossa, sillä noin kolme neljäsosaa kaukolämmön tuotannosta perustuu yhteistuotantoon [13]. Yhteistuotannosta saadaan noin viidesosa Suomessa kulutetusta sähköenergiasta [2].

Lämpövoimalan toiminta voidaan selittää termodynamiikan oppien avulla. Termodynamiikan mukaan paine-erot, lämpötilaerot, tiheyserot, konsentraatioerot jne. pyrkivät tasoittumaan, toisin sanoen järjestelmän entropia eli systeemin epäjärjestyksen määrä pyrkii kasvamaan. Näin ollen myös lämpöenergia virtaa aina kuumasta kylmään. Lisäksi lämpöopin 1. laki sanoo, että järjestelmän sisäisen energian muutos on järjestelmään tuodun lämmön ja tehdyn työn summa. Lämpövoimakoneen hyötysuhde on

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \leq \frac{T_H - T_C}{T_H}, \quad (9)$$

jossa W tarkoittaa lämpövoimaprozessista hyödyksi saatavaa lämpö määrää eli työtä, Q_H kuumen lämpövaraston sisältämää lämpö määrää, Q_C lämpövoimaprozessin jälkeisen lämpövaraston eli lauhteen sisältämää lämpö määrää. T_H ja T_C ovat vastaavat lämpövaraston lämpötilat. Yhtälöstä nähdään, että lämpövoimakoneen hyötysuhde riippuu voimakkaasti lämpötilaerosta. [1]

Lämpövoimakoneessa käytetään yleisimmin turbiinia lämmön muuttamiseksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiini alkaa pyörimään, kun höyrystynyt vesi johdetaan sen läpi. Veden höyrystäminen ei ole lämpövoimalaitoksessa pakollista, sillä polttoaineen palamisessa syntyvä kuuma, korkeapaineinen palokaasu voidaan suoraan johtaa turbiinille. Tällöin puhutaan kaasuturbiinilaitoksesta. Parempi hyötysuhde saavutetaan kuitenkin kombivoimalaitoksessa, jossa hyödynnetään edelleen kaasuturbiinin läpi kulkeneen palokaasun jäännöslämpö lämmönvaihtimen avulla höyryturbiinissa. [1]

Suomessa yli 200 MW tehoon yltäviä lämpövoimalaitoksia on neljä kappaletta. Tehokkaimpia lämpövoimalaitoksia ovat Suomessa Metsä Fibre Oy:n Äänekosken biotuote-tehdas (280 MW), Pietarsaarella sijaitseva Oy Alholmens Kraft Ab:n omistama voimalaitos Alholmens Kraft 2 (240 MW) sekä Vaasassa sijaitseva Vaasan Voima Oy:n omistama Vaskiluoto 2 -voimalaitos (230 MW). Helsingissä sijaitseva Helen Oy:n Hanasaaren

B -voimalaitos (236 MW) suljettiin 1.4.2023 kivihiilen käytön vähentämisen vuoksi. [9]
[14]

2.4 Ydinvoima

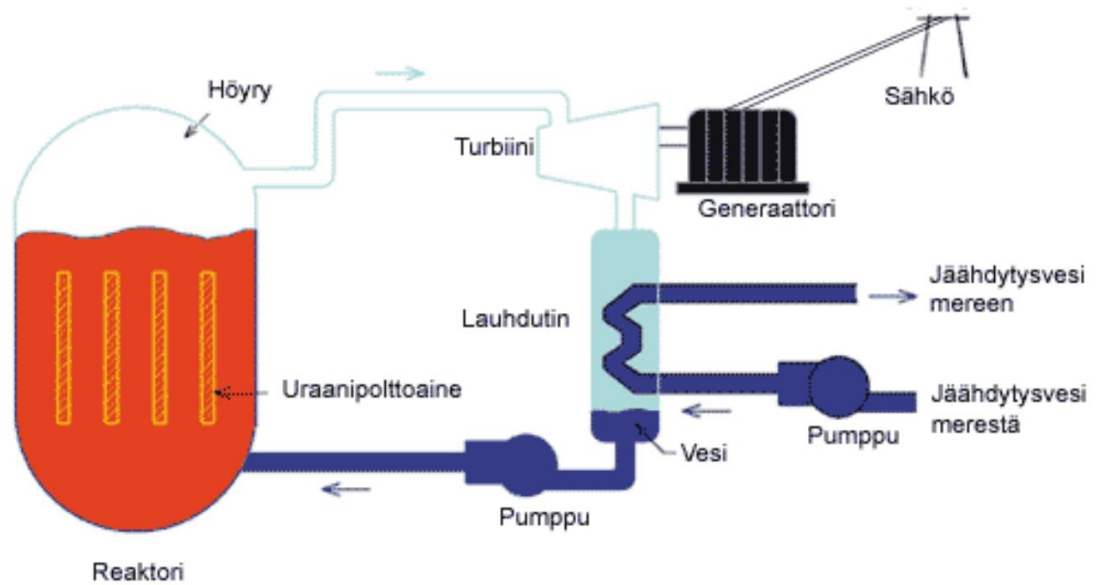
Suurin osa (vajaa kolmannes) Suomen sähköstä tuotetaan ydinvoimalla [2]. Ydinvoima on tiettyjen alkuaineiden atomien halkeamisesta vapautuvaa energiaa. Energia on muodoltaan lämpöenergiaa, joka saa höyrystymisen aikaiseksi. Kun höyry viedään turbiiniin, saadaan generaattorin akseli pyörimään ja sähkön tuotanto käyntiin. Peruspolttoaineena ydinvoimalassa käytetään uraania [15]. Ydinvoima on päästötön sähköntuotantomuoto [16].

Useimmissa reaktorityypeissä periaatteet ydinvoiman käyttämiseksi sähkön tuotannossa ovat samat [15]. Esimerkiksi uraanin fissioreaktiossa ensin neutroni indusoi uraanin isotooppiin U^{235} , jolloin syntyy isotooppi U^{236} on epästabili. Tämä epästabili isotooppi hajoaa bariumiksi (Ba) ja kryptoniksi (Kr) synnyttäen energiaa sekä vapauttaen uusia neutroneja. Näin syntyy ketjureaktio. [17] Reaktiosta vapautuu energiaa, sillä reaktiossa syntyvien atomien yhteenlaskettu massa on pienempi kuin alkutuotteiden massa. Osa massasta on siis muuttunut energiaksi Einsteinin erityiseen suhteellisuusteoriaan liitetävän yhtälön

$$E = mc^2 \tag{10}$$

mukaisesti, jossa E on syntyvä energia, m on alkutuotteiden ja reaktiotuotteiden massaero, ja c on valonnopeus tyhjiössä. Atomien fissiosta vapautuva energia hyödynnetään lämpönä joko kaasussa tai vedessä ja käytetään höyryn tuottamiseen [15].

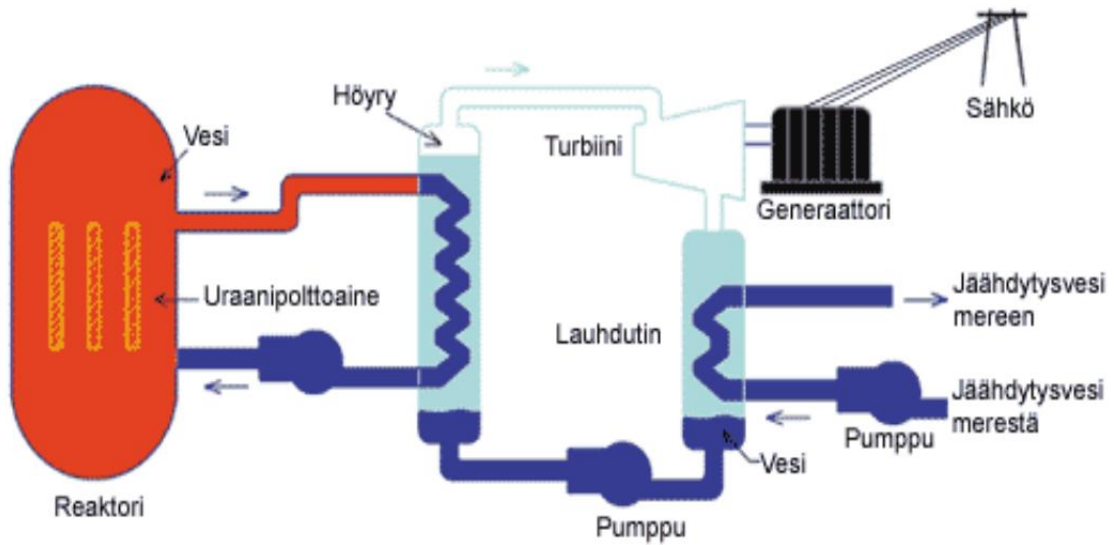
Suomessa on käytössä kahta eri reaktorityyppiä: kiehutusvesireaktoreita sekä painevesireaktoreita. Näitä reaktorityyppejä kutsutaan kevytvesireaktoreiksi. Kiehutusvesireaktorin periaatekuva on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kiehutusvesireaktorin periaatekuva [17].

Kiehutusvesireaktorissa lämpö siirtyy polttoainetasauvoista reaktorin sydämen läpi virtaavaan jäähdytysveteen (kuvassa oranssi alue). Jäähdytysvesi kuumenee, ja alkaa höyrystyä. Höyry muodostuu reaktorin yläosaan, josta se etenee kohti turbiinia. Kun höyry lävistää turbiinin, alkaa turbiini ja samalla myös generaattorin akseli pyörimään. Näin syntyy sähköä, joka voidaan siirtää sähköverkkoon. Turbiinissa jäähtynyt höyry tiivistyy lauhduttimessa vedeksi. Lopuksi vesi pumpataan takaisin reaktoripaineastiaan.

Painevesireaktorin periaatekuva on esitetty kuvassa 6. Painevesireaktorissa höyry synnytetään erillisessä höyrystymisessä, jonne reaktorissa kumentunut korkeapaineinen vesi virtaa. Höyry ei siis synny kiehutusvesireaktorin mukaisesti reaktorin yläosaan. [17]



Kuva 6. Painevesireaktorin periaatekuva [17].

Suomessa on toiminnassa tällä hetkellä kaksi ydinvoimalaitosta. Toinen laitos sijaitsee Loviisassa ja toinen Olkiluodossa. Loviisan laitoksessa reaktoreita on kaksi (Loviisa 1 ja 2) ja Olkiluodossa reaktoreita on kolme (Olkiluoto 1, 2 ja 3). [18] Olkiluoto 3 aloitti ydinteknisen koekäytön jälkeen säännöllisen sähkön tuotannon 16.4.2023. Samalla alkoi Olkiluoto 3:n kaupallinen käyttö. [19]

Loviisan laitoksessa olevat reaktorit ovat kaikki painevesireaktoreita, kun taas Olkiluodon reaktoreista 1 ja 2 ovat kiehumisvesireaktoreita ja 3 on Loviisan reaktoreiden kaltaisesti painevesireaktori. Loviisan molemmilla reaktoreilla on sama teho, nettona 507 MW. Myös Olkiluodon reaktoreilla 1 ja 2 on sama teho, nettona 890 MW. Olkiluoto 3 on Suomen reaktoreista suurin, sillä sen nettosähköteho on noin 1600 MW. [18]

2.5 Tuulivoima

Tuulivoima on tuulen eli ilman virtauksen liike-energiaa, joka voidaan muuttaa akselin pyörimisenergiaksi tuuliturbiineilla [20]. Näin ollen tuulivoimala ei aiheuta toimiessaan päästöjä. Akselin pyörimisenergia saadaan muutettua sähköenergiaksi generaattorilla. Suomessa tuulivoiman osuus sähköenergian tuotannossa on noussut melkein vesivoiman tasolle [2].

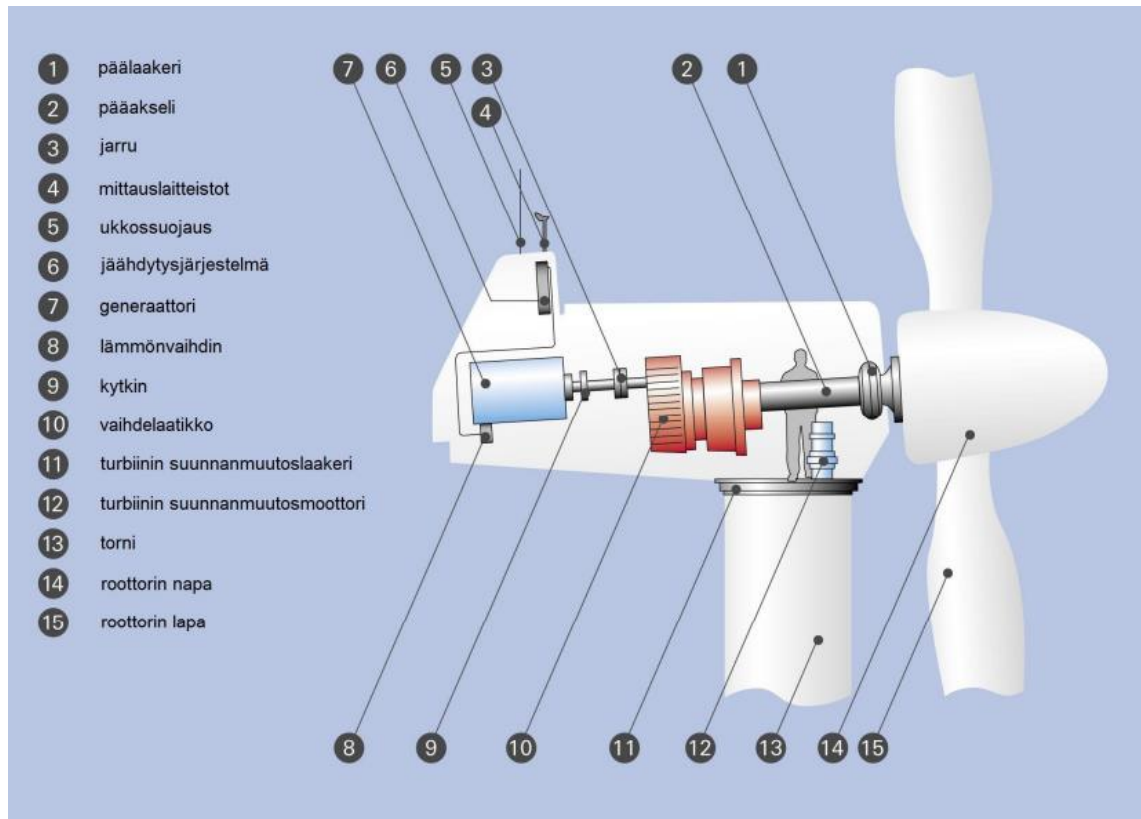
Tuulivoimalan siipien pyörähdyspinta-alan läpi menevän tuulen teho P_0 saadaan yhtälöstä

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_i A_s v_i^3, \quad (11)$$

jossa ρ_i on ilman tiheys, A_s tuulivoimalan siipien pyörähdyspinta-ala ja v_i on tuulen nopeus. Niin sanottu Betzin laki sanoo, että tuulesta saadaan otettua maksimiteho silloin kun tuulen nopeus on turbiinin jälkeen suuruudeltaan kolmasosa alkuperäisestä. [1] Tuulivoimalalle on kuitenkin ominaista sähköntuotannon vaihtelu sääolosuhteiden mukaan. Kapasiteettikerroin kertoo, kuinka paljon tuulivoimala tuottaa vuositason sähkösuhteessa teoreettiseen maksimiin. Suomen tuulivoimaloiden kapasiteettikerroin oli keskimäärin 33 % vuonna 2019, parhaan tuulivoimalan yltäessä 47 % kapasiteettikertoimeen. [21]

Tuulivoimalan pääkomponentit on esitetty kuvassa 7. Yleisesti tuulivoimala koostuu kolmesta osasta eli tornista, roottorista ja konehuoneesta eli nasellista. Roottori koostuu lavoista (15 kuvassa 7) ja navasta (14). Näin ollen naselli sisältää kuvan kohdat 1–12. Jotta tuulivoimala toimisi mahdollisimman tehokkaasti, on tuulivoimalan roottorin pyyhkäisynta-ala suunnattava kohtisuoraan maanpäälliseen tuuleen nähden. Tämä tapahtuu automaattisesti pienen kokoluokan tuulivoimaloilla peräsimen avulla, mutta suuren kokoluokan tuulivoimalassa tarvitaan erillinen suunnanmuutosmoottori (12) roottorin ja nasellin kääntämistä varten. Lisäksi vapaaseen kääntymiseen tarvitaan suunnanmuutoslaakeri (11). Tuulen suunta mitataan nasellin katolla sijaitsevassa mittauslaitteistossa (4). [22]

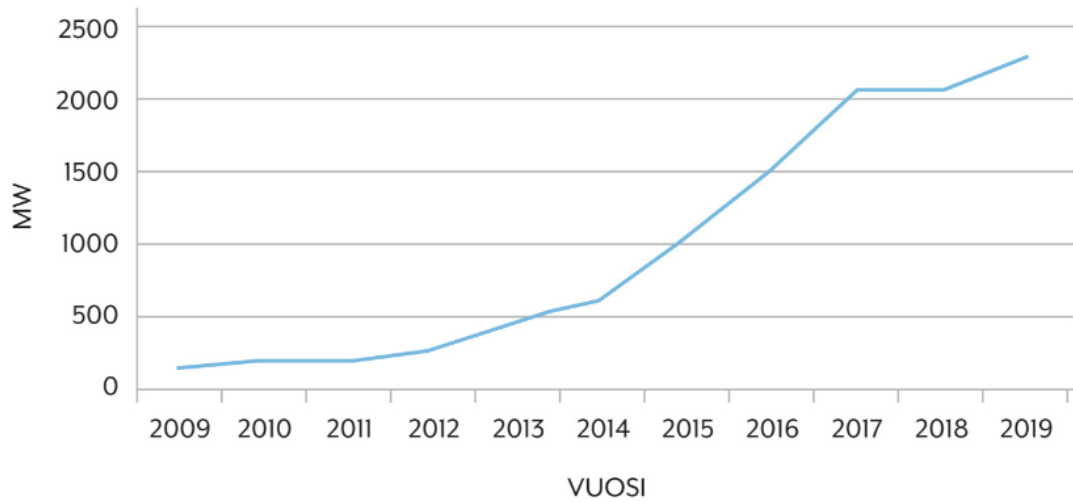
Nasellista löytyy myös vaihdelaatikko (10). Vaihdelaatikon avulla roottorin hidas pyörimisnopeus saadaan muutettua generaattorille sopivaksi mahdollistaen paremman hyötysuhteen. Vaihdelaatikon vikaantuminen on kuitenkin yleisin syy tuulivoimalan käyttökatkoille, joten tuulivoimalan luotettavuutta saadaan lisättyä poistamalla vaihdelaatikko pääakselin (2) ja generaattorin (7) akselin välistä. Tällöin puhutaan suoravetoisesta tuulivoimasta. Koska generaattorin akselin pyörimisnopeus on hidas, on tuulivoimalaan hyvän hyötysuhteen aikaansaamiseksi asetettava erityisesti tuulivoimalakäyttöön suunniteltu generaattori. Generaattorin lämpötila voi nousta korkeaksi, joten tuulivoimalasta löytyy myös jäähdytysjärjestelmä (6) sekä lämmönvaihdin (8). [22]



Kuva 7. Tuulivoimalan poikkileikkauskuva [22].

Suomessa tuulivoimarakentaminen pääsi vauhtiin vuosina 2012–2013. Tämä ilmenee kuvasta 8, jossa on esitetty asennettu kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti eri vuosina. Syöttötariffiryhmän työ (2008–2009), työryhmän loppuraportti ja sen pohjalta annettu hallituksen esitys syöttötariffilainsäädännöksi on ollut Suomen nykyisen tuulivoimakapasiteetin mahdollistaja. Vuonna 2018 rakentaminen alkoi taas hidastuneen rakentamisen jälkeen, kun ensimmäinen markkinaehtoinen, ilman valtion tukea rakennettava tuulivoimahanke julkaistiin. [23]

Asennettu kumulatiivinen kapasiteetti (MW)



Kuva 8. Suomeen asennettu kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti [23].

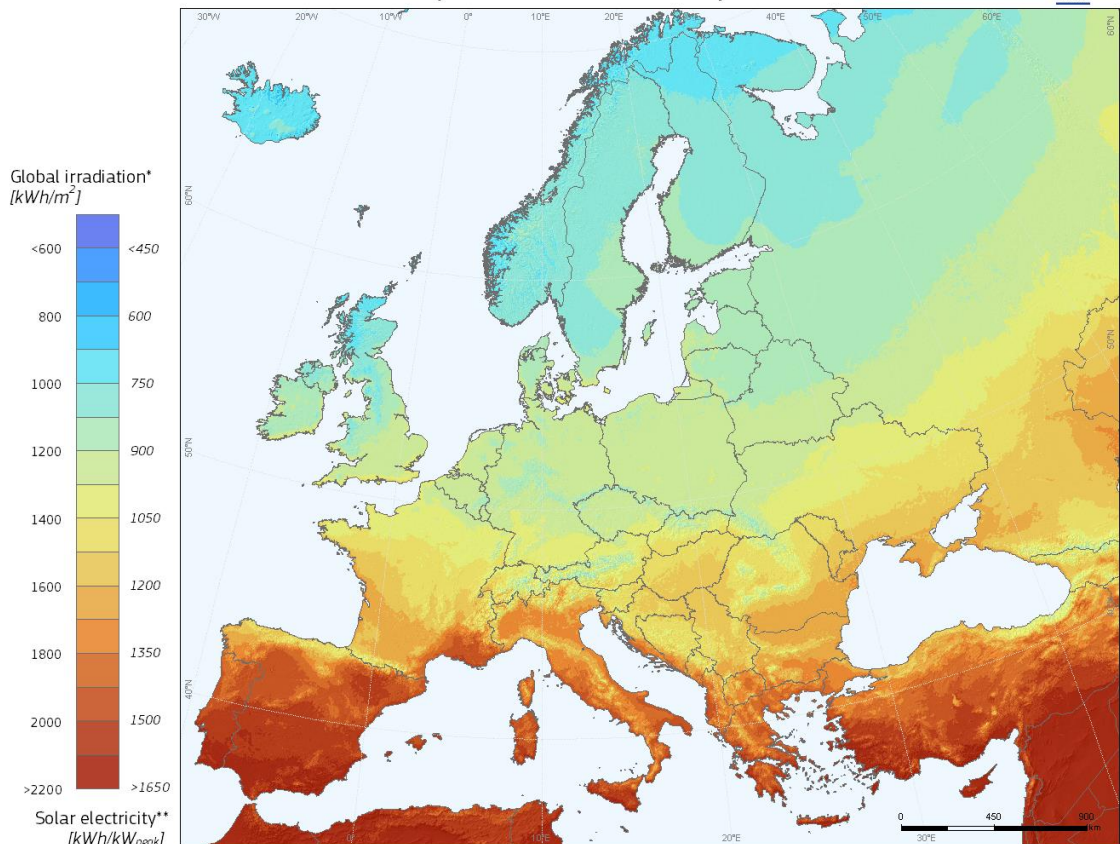
Suomeen on vuoden 2022 loppuun mennessä rakennettu yhteensä 1393 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu teho on 5677 MW. Suurin osa hankkeista on rakennettu Pohjois-Pohjanmaalle, jonne sijoittuu 37 % Suomen tuulivoimaloista. [23] Suomen suurin tuulipuisto onkin Keski- ja Pohjois-Pohjanmaalle sijoittuva Mutkalammin tuulipuisto 404 MW kokonaistehollaan, jonka rakennustyöt käynnistyivät vuonna 2021 ja sähköntuotanto käynnistyy kaksivaiheisesti vuosien 2022 ja 2023 aikana [24].

2.6 Aurinkovoima

Aurinkovoimalla tarkoitetaan auringon maahan säteilemän energian muuntamista sähköenergiaksi, joten kyseessä on päästötön tuotantomuoto. Aurinkovoiman osuus Suomen sähkön kokonaistuotannossa on vielä pieni, sillä sen osuus on vain 0,5 % [2]. Yhtenä merkittävänä syynä aurinkovoiman pienelle osuudelle voidaan pitää Suomen olosuhteita aurinkovoimalle, sillä ne ovat selkeästi heikommät kuin esimerkiksi Etelä-Euroopassa. Tämä ilmenee kuvasta 9, jossa on esitetty auringon säteilyteho neliometriä kohden Euroopan eri osissa. Kuvan perusteella Suomessa on parhaat olosuhteet aurinkovoimalle länsi- ja etelärannikoilla. [25] Toisena merkittävänä syynä aurinkovoiman pie-

nelle osuudelle Suomessa voidaan pitää auringon säteilytehon muuttumista eri vuodenaikoina.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



* Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

**Yearly sum of solar electricity generated by optimally-inclined 1kW_p system with a performance ratio of 0.75

© European Union, 2012
PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
EC - Joint Research Centre
In collaboration with: CM SAF, www.cmsaf.eu

Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication.

Kuva 9. Auringon säteilyteho neliömetriä kohden Euroopan eri osissa [25].

Auringon säteilyenergiaa voidaan muuttaa sähköenergiaksi kahdella eri tavalla: fotosähköiseen ilmiöön perustuvalla järjestelmällä sekä auringon säteilyn lämmöksi muuttavalla järjestelmällä. Fotosähköiseen ilmiöön perustuvassa sähköntuotannossa aurinkokenno muuttaa auringon säteilyn suoraan sähköenergiaksi, jolloin tarvitaan vain yksi energiamuunnos. Jos taas sähkö tuotetaan auringon säteilystä saatavalla lämmöllä, on tarvittavia energiamuunnoksia kolme kappaletta. Tämä johtuu siitä, että lämpö on muutettava ensin mekaaniseksi energiaksi, ja tämän jälkeen mekaaninen energia voidaan muuntaa sähköenergiaksi generaattorilla. [26] Tämä muistuttaakin pitkälti lämpövoimatekniikkaa, sillä erolla, että primäärienergian lähde on auringon säteilyenergia. Tässä työssä aurinkovoiman tarkastelu jätetään fotosähköiseen ilmiöön perustuvaan tekniikkaan, koska tämä on Suomessa käytössä oleva tekniikka johtuen auringon säteilyn luonteesta Suomessa: suuri osa auringon kokonaissäteilystä on Suomessa hajasäteilyä, eli ilmakehän

ja pilvien heijastamaa sekä maasta heijastuvaa säteilyä. Auringon säteilyn lämmöksi muuttavat järjestelmät ovat keskittäviä aurinkosähköjärjestelmiä, jotka perustuvat lähinnä auringosta suoraan tulevan säteilyn hyödyntämiseen. Koska suoran säteilyn osuus kokonaissäteilystä on Suomessa pieni, on taloudellisesti kannattamatonta rakentaa Suomeen keskittäviä aurinkosähköjärjestelmiä. [26] [27]

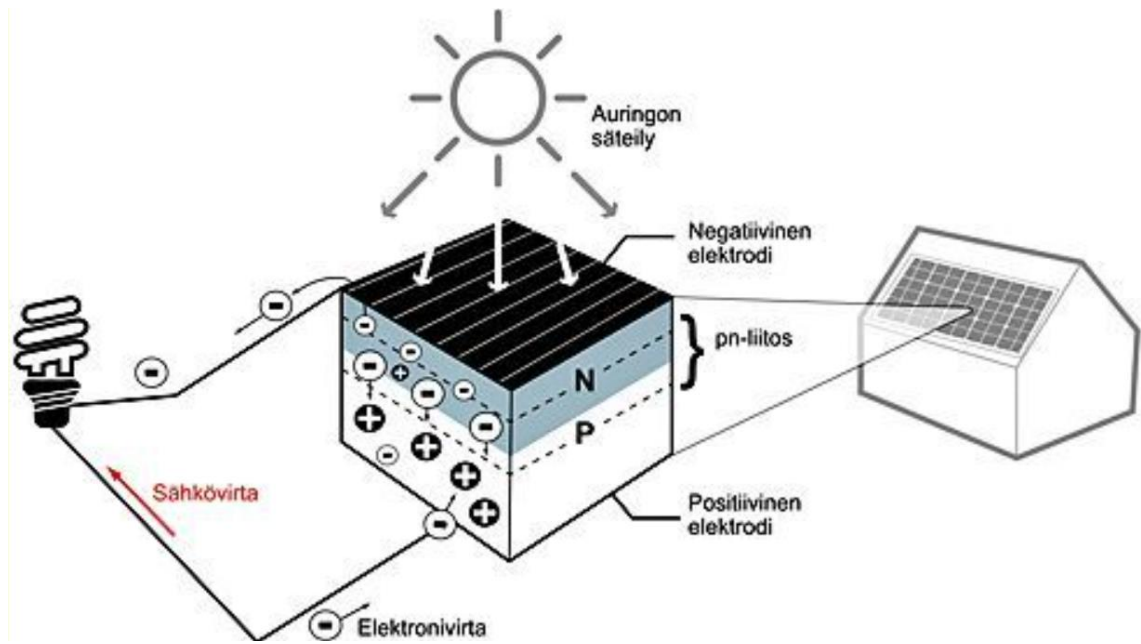
Komponentti, joka muuttaa auringon säteilyenergian suoraan sähköenergiaksi, on nimeltään aurinkokenno. Tämän päivän kaupalliset aurinkokennot (kiteiset piikennot ja ohutkalvokennot) koostuvat kahdesta eri puolijohdemateriaalista, eli p-tyyppin ja n-tyyppin puolijohdemateriaaleista. Puolijohteet johtavat sähköä paremmin kuin eristeet mutta huommin kuin metallit. Aurinkokennoissa n-tyyppin puolijohteisiin on saostettu alkuainetta, jolla on enemmän elektroneja kuin puolijohteen muilla atomeilla ja p-tyyppin puolijohteisiin puolestaan alkuainetta, jolla on vähemmän elektroneja kuin puolijohteen muilla atomeilla. Nämä erityyppiset puolijohdemateriaalit asetetaan aurinkokennossa vierekkäin. [28]

Kuvassa 10 on esitetty pn-liitokseen perustuvan aurinkokennon toimintaperiaate. Auringsäteily koostuu fotoneista, joiden energia voidaan laskea yhtälöllä

$$E_{\lambda} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (12)$$

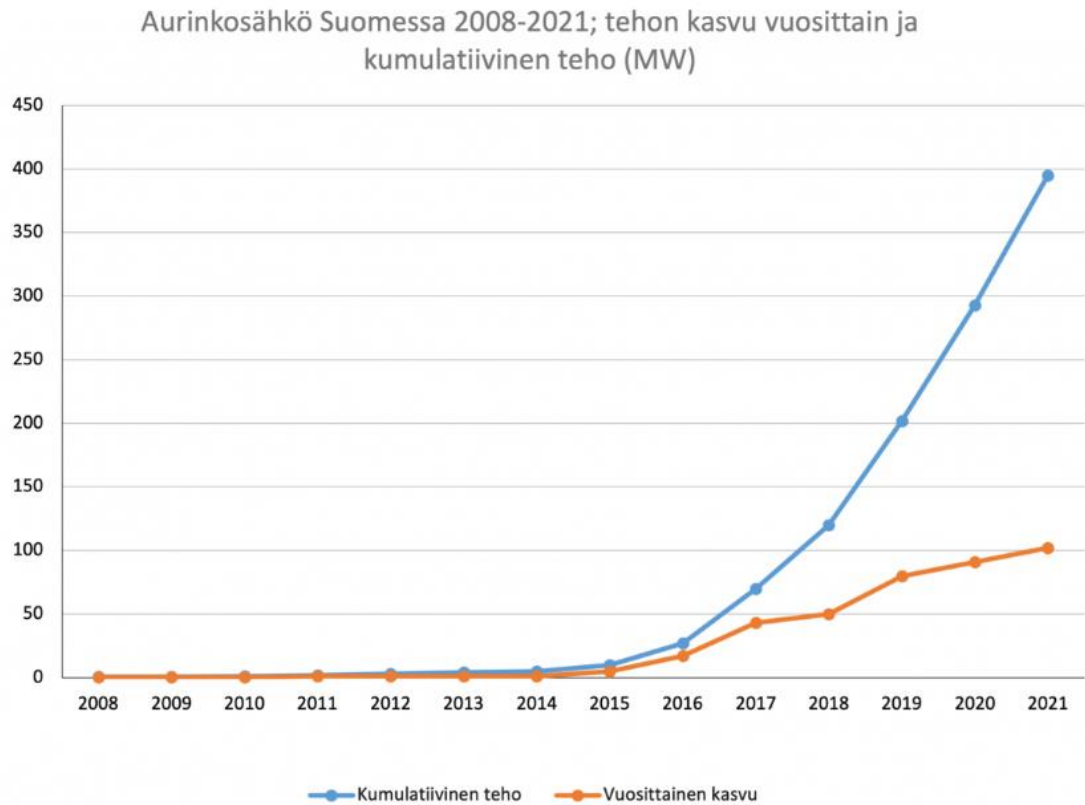
jossa h on Planckin vakio, ν on fotonin taajuus, c on valon nopeus tyhjiössä ja λ on fotonin aallonpituus [1]. Kun fotonit törmää aurinkokennon puolijohdemateriaaliin, elektronit siirtyvät valenssivyöltä johtavuusvyölle, mikäli fotonilla on tarpeeksi energiaa elektronin virittämiseen. Minimienergia, jolla virittyminen tapahtuu, on energia-aukon energia. Energia-aukko on valenssivyön yläosan ja johtavuusvyön alaosan välinen energiaero. Esimerkiksi piillä energia-aukon suuruus on 1.11 eV (elektronivolttia). Virittyminen voi tapahtua myös lämmön vaikutuksesta, jos fononi virittää elektronin johtavuusvyölle. [29]

Kun elektroneja siirtyy n-puolelta p-puolen aukkoihin, n-tyyppin puolijohteeseen syntyy positiivinen varaus ja p-tyyppin puolijohteeseen negatiivinen varaus. Elektronit ovat siis negatiivisen varauksen kuljettajia jättäen jälkeensä aukkoja, jotka toimivat positiivisen varauksen kuljettajina. Kennon sisällä syntyvässä sähkökentässä fotonilta energiaa saavat elektronit voivat kulkea vain p-tyyppin puolijohteesta n-tyyppin puolijohteeseen. Kun kennoon kytketään ulkoinen virtapiiri, saadaan syntynyt sähköenergia hyödynnettäväksi eri sähkölaitteisiin. Elektronit kulkevat ulkoisen virtapiirin kautta takaisin p-tyyppin puolijohteeseen. [28] Kytkemällä aurinkokennoja sarjaan tarpeellinen määrä, saadaan aikaan aurinkopaneeli, jolla on haluttu jännitetaso. Virta taas riippuu auringonsäteilyn voimakkuudesta. [30]



Kuva 10. Aurinkokennon toimintaperiaate [28].

Vaikka aurinkovoiman osuus Suomen kokonaistuotannossa on vielä pieni, on aurinkosähköjärjestelmiä asennettu Suomeen jo huomattava määrä. Kuvasta 11 huomataan, että Suomen aurinkovoimakapasiteetti on kokenut voimakasta kasvua vuosittain vuodesta 2015 lähtien. Vuosien 2017 ja 2019 erityisen suuret aurinkosähkötehon kasvut selittyvät noihin vuosiin ajoittuvista suurten hankkeiden tukipäätöksistä.



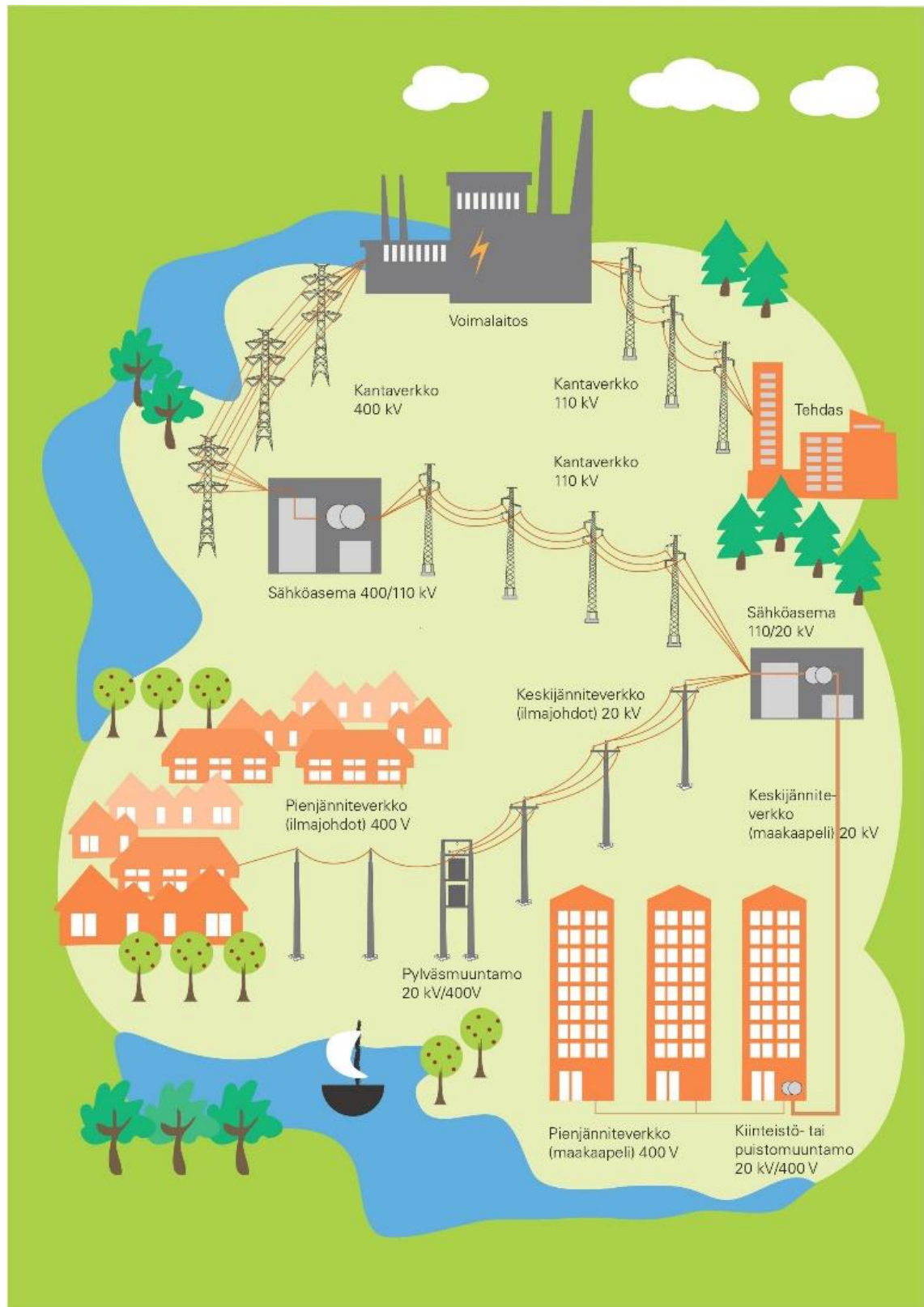
Kuva 11. Aurinkosähkön kumulatiivinen teho sekä vuosittainen kasvu Suomessa [31].

Suurinta kasvu oli vuonna 2021, kun vuosittainen kasvu oli 102 MW. Kasvu on kuitenkin tasaantunut vuosina 2020 ja 2021 johtuen esimerkiksi siitä, että aurinkosähköteknologiassa ei ole tapahtunut sellaista harppausta, joka kompensoisi järjestelmien väliaikaisen hintojen nousun. Vuonna 2020 alkanut koronapandemia on toinen merkittävä syy kasvun tasaantumiselle.

Vuoden 2021 loppuun mennessä oli verkkoon liitetty yhteensä noin 395 MW aurinkosähkön tuotantokapasiteettia. [31] Energiaviraston ylläpitämän voimalaitosrekisterin mukaan Suomessa on yli 1 MW:n laitoksia yhteensä noin 33,8 MW, joten suurin osa Suomen aurinkosähkötuotannosta koostuu alle 1 MW:n pientuotantolaitteistoista. Suomen suurin verkkoon kytketty aurinkovoimala on Kalajoella sijaitseva Juurakon aurinkovoimala (10 MW). Muita Suomen kapasiteetiltaan suuria aurinkovoimaloita ovat Seinäjoen Nurmassa sijaitseva Atrian aurinkopuisto (9 MW), Vihreäsaaren aurinkovoimala (4,9 MW), Sulkavan aurinkovoimala (4 MW), Lahdessa sijaitseva Iskun aurinkovoimala (2,31 MW), sekä Lempäälässä sijaitsevat Lemene Aurinko 1 ja 2 -voimalat (kummatkin 1,8 MW). [32]

3. SÄHKÖN SIIRTO JA KULUTUS

Kun sähkö on tuotettu, on se tavalla tai toisella siirrettävä kulutuksen luokse. Luvussa 3.1 käsitellään suurjänniteverkkoa, joka koostuu kantaverkosta sekä suurjännitteisestä jakeluverkosta (alueverkko). Jakeluverkkoon kuuluu luvussa 3.2 käsiteltävä keskijänniteverkko ja pienjänniteverkko. [33] Siirrettävän tehon ja siirtoetäisyyden kasvaessa on edullisempaa siirtyä suurempaan jännitetasoon, sillä siirtojohdolla tapahtuvat tehohäviöt ovat verrannollisia virran neliöön. Virta on sitä pienempi, mitä suurempi on jännite. [34] Tuotettu sähkö siirretään ensin voimalaitoksesta suurjänniteverkkoon. Suurjänniteverkosta sähkö siirretään keskijänniteverkkoon, jonka jännitetaso mahdollistaa verkon rakentamisen huomattavasti vapaammin suurjänniteverkkoihin verrattuna. Lopuksi sähkö siirretään pienjänniteverkkoon, joka vie sähköön kulutuksen luokse. Sähköön kulutusta käsitellään luvussa 3.3. Jännitetaso muuntaminen tapahtuu suurjänniteverkosta keskijänniteverkkoon sähköasemilla ja keskijänniteverkosta pienjänniteverkkoon jakelumuuuntauilla [33]. Kuva 12 havainnollistaa Suomen sähköjärjestelmän rakennetta.



Kuva 12. Suomen sähköjärjestelmän rakenne [33].

3.1 Suurjänniteverkko

Suomen suurjänniteverkko koostuu kahdesta osasta: kantaverkosta sekä kantaverkkoon kuulumattomasta osasta. Kantaverkko on kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämä. Kantaverkkoon on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot joko pylvällä ilmaan sijoitetuilla avojohdoilla tai maahan sijoitetuilla kaapeleilla. Tyypillisen avojohdon pääosat käyvät ilmi kuvasta 13.



Kuva 13. Suurjännitejohtopylvään pääosat [35].

Kuvasta 13 nähdään, että pylvään huipulla on yhteensä viisi johdinta. Kaksi päällimmäisintä johdinta ovat ukkosjohtimia (1), joiden tarkoitus on estää suorat salamaniskut vaihejohtimiin [1].

Suomen kantaverkkoon kuuluu 5100 km 400 kV:n voimajohtoja, 1300 km 220 kV:n voimajohtoja ja 7300 km 110 kV:n voimajohtoja. [36] Suomesta löytyy myös kantaverkkoon kuulumattomia paikallisten sähköyhtiöiden omistamia 110 kV:n johtoja, jotka muodostavat niin sanotun alueverkon. Alueverkon kokonaispituus on noin 7500 km [33]. Lisäksi

kantaverkkoon kuuluu 216 km 400–500 kV:n ja 53 km 150 kV:n HVDC-kaapeleita (HVDC = High Voltage Direct Current), joiden omistus ja hallinnointi tapahtuu yhdessä vastaapuolen kanssa. Suomen kantaverkkoon kuuluu näiden lisäksi 116 sähköasemaa. [36] Suomen kantaverkon kartta on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Suomen kantaverkko v. 2022 [37].

Suomi on kantaverkon avulla osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää, johon kuuluvat Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Yhteispohjoismainen järjestelmä on kytketty tasasähköyhteyksillä Venäjän ja Baltian sekä Keski-Euroopan voimajärjestelmiin. [38] Suomesta on siirtoyhteydet Ruotsiin, Viroon, Norjaan sekä Venäjälle. Ruotsiin Suomella on yhteensä neljä yhteyttä: Pohjois-Suomen ja Ruotsin välillä ovat kaksi 400 kV:n Aurora-vaihtosähköyhteyttä, joiden tuontikapasiteetti on nykyisin 1200 MW ja vientikapasiteetti 1100 MW. Kolmas Aurora-yhteys valmistuu Pohjois-Suomen ja -Ruotsin välille vuonna 2025. Li-

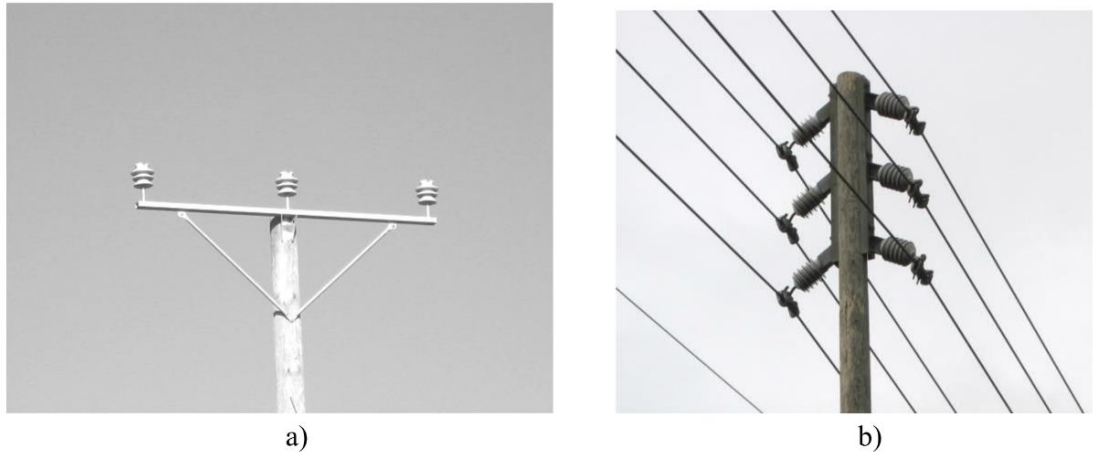
säksi Suomella on kaksi Fenno-Skan-tasasähköyhteyttä Rauman seudulta Keski-Ruotsiin, joiden yhteenlaskettu siirtokapasiteetti on 1200 MW. Norjaan Suomella on yksi 220 kV:n vaihtosähköyhteys, joka huomioidaan osana Pohjois-Ruotsin Aurora-yhteyksiä. Vaihtosähköyhteyden siirtokyky on noin 100 MW. Viron ja Suomen välillä ei ole vaihtosähköyhteyttä [38]. Suomi on Viroon yhteydessä kahdella Estlink-tasasähköyhteydellä, joiden yhteenlaskettu siirtokapasiteetti on 1000 MW. Suomella on myös kolmesta 400 kV:n ja kahdesta 110 kV:n voimajohdosta koostuva yhteys Venäjälle. 400 kV:n voimajohdot mahdollistavat 1300 MW:n tuontikapasiteetin ja 320 MW:n vientikapasiteetin. 110 kV:n yhteyksien yhteenlaskettu siirtokyky on noin 160 MW. [39] Suomen ja Venäjän välisten sähkönsiirtoyhteyksien käyttö on päätynyt toukokuussa 2022 Venäjän asettamien vientirajoitusten seurauksena Ukrainan sodan alkamisen jälkeen [38] [40].

3.2 Keskijänniteverkko ja pienjänniteverkot

Jakeluverkon 20 kV:n osuutta kutsutaan keskijänniteverkoksi ja 1 kV:n sekä 0,4 kV:n muodostamaa osuutta pienjänniteverkoksi. Keskijännitejohtoja on rakennettu Suomeen noin 140 000 km ja 0,4 kV:n pienjännitejohtoja noin 220 000 km [33]. 1 kV:n pienjänniteverkko on uutena kehityskohteena [34]. Keskijännitejohdot vievät sähkön kulutuksen lähelle, josta sähkö haarautuu moniin pienjännitejohtoihin. Sähkön tilaajat kuten kotitaloudet saavat sähkön pienjännitteenä. Tavalliset pienemmät sähkölaitteet kytketään vain yhteen vaiheeseen (vaihejännite on 230 V). Jakeluverkkoja ylläpitää yhteensä noin 80 sähköverkkoyhtiötä, joista suurimmat ovat Caruna Oy, Elenia Verkko Oyj ja Helen Sähköverkko Oy [41].

Jokaiselle jakeluverkonhaltijalle määrätään verkkoluvassa oma maantieteellinen vastuualue. Jakeluverkonhaltijoiden vastuualueet määrätään siten, että ne ovat yksiselitteisiä ja keskenään ei päällekkäisiä. Kantaverkon kanssa jakeluverkot voivat kuitenkin olla myös päällekkäin, sillä näillä molemmilla verkoilla on selkeät omat tehtävät. [42] Sähköjakelumarkkinoilla on siis paikallinen monopoli, mikä tarkoittaa sitä, että verkkoa ylläpitävällä yrityksellä on yksinoikeus jakaa sähköä sähköverkossaan. Kuluttaja ei siis voi valita itse haluamaansa sähköverkkoyhtiötä. Jos tätä paikallista monopolia ei olisi, syntyisi kilpailun takia rinnakkaisia sähköverkkoja. Tämä ei olisi järkevää, sillä sähköverkon rakentaminen ja ylläpito on kallista. [43]

Tyypillisin keskijänniteavojohdon pylväs on kuvan 15 a mukainen. Kuvassa 15 b on niin sanottu kaksois-PAS-johto-rakenne, jossa johtimet on päällystetty muovilla mahdollistaen johtimien sijoittamisen lähemmäs toisiaan. Kaupungeissa ja taajamissa rakennetaan myös tilan puutteen ja kaupunkikuvan vuoksi keskijännitejohtoja maahan maakaapeleina. [1]



Kuva 15. a) tyypillisin 20 kV:n pylväs rakenne ja b) 20 kV:n kaksois-PAS-johto [1].

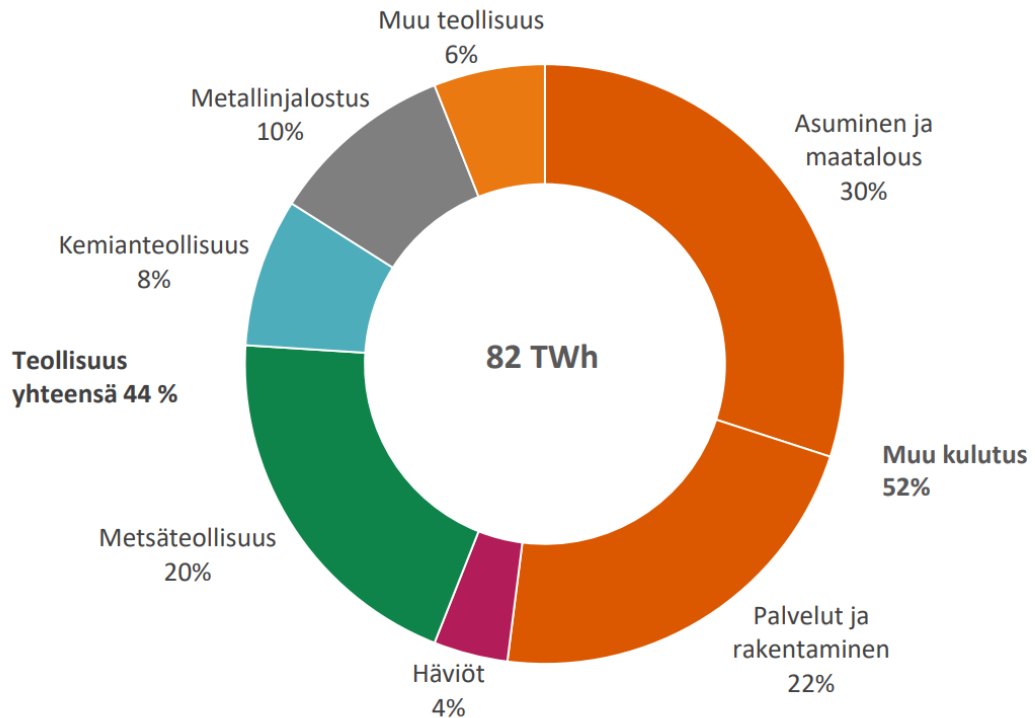
Pienjännitejohdot rakennetaan kaupungeissa pääasiassa maakaapelointina. Maaseudulla käytetään usein kuvan 16 mukaista AMKA-riippukierrejohtoa, jossa johtimet ovat alumiinia ja ne on eristetty polyeteenimuovilla. Vaihejohtimet on kierretty nollajohtimena toimivan kannatusköyden ympärille. [34]



Kuva 16. AMKA-riippukierrejohtin [44].

3.3 Sähkön kulutus

Sähkön tuotannon ja kulutuksen tulee olla aina tasapainossa, jotta verkon taajuus pysyisi heilailemattomana. Tämä tarkoittaa sitä, että koska vuonna 2022 Suomessa sähkön tuotanto ja nettotuonti olivat yhteensä 82 TWh, niin sähkön kulutuskin oli 82 TWh. Sähköä kuluu esimerkiksi erilaisten sähkömoottorien pyörittämiseen, lämmitykseen, datakeskusten ylläpitoon, liikenteeseen sekä valaistukseen. Sähkön kulutuksen jakautuminen eri kuluttajasektoreille on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Sähköenergian kulutus Suomessa vuonna 2022 [2].

Kuvasta huomataan, että noin puolet vuonna 2022 kulutetusta sähköenergiasta kului teollisuudessa (44 %). Suurin osuus teollisuuden kulutuksesta kulutetaan metsäteollisuudessa. [2] Teollisuudessa suurin osa kulutettavasta sähköenergiasta kuluu erilaisissa sähkökoneissa [3]. Toinen puolisko Suomen sähköenergian kulutuksesta menee muihin kulutukseen, johon sisältyy asumiseen sekä maatalouteen sekä palveluihin ja rakentamiseen kulutettu sähköenergia. Suomen suurin yksittäinen sähkökuluttaja on Outokummun Tornion terästehdas [45]. Ideaalisesti teollisuus ja muu kulutus muodostaisivat kaiken sähkön kulutuksen, mutta merkittävä osuus kulutuksesta menee kuitenkin myös häviöihin (4 %). [2] Esimerkiksi kantaverkossa häviöiden määrä on 1,2–1,4 TWh vuodessa, joka vastaa noin 1,5 prosenttia koko Suomen sähkökulutuksesta. Aiheutuneet häviösähkökustannukset ovat Fingridille noin 50 miljoonaa euroa vuodessa riippuen sähkön markkinahinnasta. [46]

Vaikka sähkön kulutus onkin jatkuvassa nousussa, on sähkön kulutuksessa ollut Suomessa myös romahduksia. Vuonna 2022 sähkön kulutus väheni vuoteen 2021 verrattuna 5,4 TWh, mikä tarkoittaa noin kuuden prosentin alenemaa vuoden 2021 kulutuksesta. Tämä alenema on ollut seurausta venäläisen energian tuonnin loppumisesta sekä energiakriisistä. Sähkön kuluttajat ovat siis joutuneet muokkaamaan sähkön kulutustaan vastaamaan tuotantoa erilaisilla energiansäästötoimilla. Vastaava romahdus tapahtui

sähkön kulutuksessa myös esimerkiksi vuonna 2020 koronan takia, jolloin sähkön kulutus väheni edellisvuoteen verrattuna yli 4 TWh. [2]

4. SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄN TULEVAISUUS

Ilmastonmuutos on ajanut Suomen niin kuin myös koko muun maailman sähköjärjestelmän murrokseen. Tämä tarkoittaa nykyisen sähköjärjestelmän muuttamista sellaiseksi, että päästöt saadaan minimoitua. Ilmastonmuutos on koko yhteiskuntaa uhkaava asia, jota ei voida enää estää, mutta sen vaikutuksia voidaan edelleen oikeilla toimilla hidastaa. Samalla kun ilmastonmuutos asettaa rajoitteita nykyiselle sähköjärjestelmälle, lisääntyä sähköön kulutus johtuen muun muassa digitalisoitumisen edellyttämästä datakeskuskapasiteetin kasvusta, liikenteen sähköistymisestä ja teollisuuden kasvihuonepäästöjä aiheuttavien prosessien sähköistämisestä [47].

Sanna Marinin hallitusohjelman (2019) tavoitteisiin lukeutuu Suomen hiilineutraaliustavoite vuoteen 2035 mennessä [48]. Tähän tavoitteeseen pääseminen edellyttää nopeita toimia: fossiilisista polttoaineista on päästävä sähköön tuotannossa eroon, ja tilalle on rakennettava uusiutuvaa sähköenergiaa, eli tuuli- ja aurinkovoimaa. Fossiilisista polttoaineista irtautuminen on tärkeää myös siksi, että ne vähenevät jatkuvasti. Fossiiliset polttoaineet muodostuivat miljoonia vuosia sitten, mutta niitä on käytetty vain noin 200 vuotta. Fossiilisten polttoaineiden loppumisajankohdasta on erilaisia arvioita, mutta yleisesti on arvioitu, että kaikki fossiiliset polttoaineet loppuvat vuoteen 2060 mennessä. Fossiilisten polttoaineiden loppumisajankohta riippuu niiden nykyisestä ja tulevasta käytöstä sekä siitä, löydetäänkö uusia polttoainevaroja. [49]

Merkittävä osa Suomen nykyisestä sähköntuotannosta perustuu suurien generaattorien pyörimiseen. Generaattoreiden suuret hitausmomentit mahdollistavat verkon jäykistämisen eli sen, että taajuus pysyy lähes heilahtelemattomana, vaikka kulutus ja tuotanto eivät olisikaan tasapainossa. Generaattoreita pyörittävien turbiinien nopeutta on myös mahdollista säätää kulutuksen mukaan. [50] Tämä jousto on mahdollistettu vesivoimalla sekä varastoitavia polttoaineita hyödyntävällä lämpövoimalla, sillä perinteisessä sähköjärjestelmässä sähköön kulutuksen vaihtelu on tasattu joustavalla sähköntuotannolla [51]. Kun generaattorin pyörimiseen perustuvaa tuotantoa korvataan sään mukaan vaihtelevalla tuotannolla, eli tuuli- ja aurinkovoimalla, on haasteena sähköverkon pysyminen vakaana ja luotettavana [50]. Hyvä asia on kuitenkin, että aurinko- ja tuulivoima tuottavat parhaiten eri aikoihin: aurinko paistaa eniten päivällä ja kesällä, kun taas yöllä ja talvella tuulee [52]. Tuulivoimalakin kyllä perustuu generaattorin pyörimiseen, mutta sen mahdollisuus verkon jäykistämiseen on riippuvainen tuulen nopeudesta [50].

Jotta Suomen sähköverkon taajuus pysyisi uusiutuvien energialähteiden merkittävän lisäämisen jälkeenkin vakiona, on Suomen sähköjärjestelmään lisättävä uudenlaista joustoa tuotannon säätökyvyn lisäksi. Sähköjärjestelmään saadaan lisää joustavuutta energian varastoinnin sekä kulutuksen jouston lisäämisellä. [51] Energiaa voidaan varastoida silloin, kun tuotanto ylittää kulutuksen. Kun taas kulutusta on tuotantoa enemmän, voidaan puuttuva sähköenergia ottaa varastosta. Esimerkkejä sähkön varastointimenetelmistä ovat varastoiminen veden potentiaalienergiaksi, litiumakut, vety sekä sähkön varastoiminen lämmöksi. Sähkön varastoiminen veden potentiaalienergiaksi soveltuu hyvin sähköenergian pitkäaikaiseen varastointiin, kun taas litiumakut ovat kannattava valinta sähkön lyhytaikaiseen varastointiin. Kun sähköenergian pitkäaikainen varastoiminen ei ole mahdollista veden potentiaalienergiaksi, voidaan pitkäaikainen varastoiminen tehdä myös vetyyn. Sähköenergian varastoiminen lämmöksi soveltuu sekä sähköenergian lyhyt- että pitkäaikaiseen varastointiin. [52] Joustavuutta sähköjärjestelmään saadaan myös kulutusjoustolla, sillä sen tavoitteena on jakaa sähkön kulutusta tasaisemmin vuorokauden ajalle älykkään sähköverkon teknologiaa hyödyntäen [53].

Fingridin vuoden 2023 sähköjärjestelmävisiosta ilmenee neljä erilaista skenaariota Suomen sähkön tuotannon, kulutuksen sekä varastoinnin kehityskulusta vuosiin 2035 ja 2045 mennessä. Nämä skenaariot ovat nimeltään Sähköä tuotteiksi, Tuulella vetyä, Merellä tuulee sekä Voimaa läheltä. Skenaarioiden mallinnus on toteutettu simuloimalla sähkömarkkinoita.

Sähköä tuotteiksi -skenaariota mukaan sähkön tuotanto kasvaa Suomessa voimakkaasti kulutuksen mukaan. Skenaariossa Suomi kehittyy sähköstä tuotettujen tuotteiden eli P2X-tuotteiden merkittäväksi viejämaaksi. P2X-kulutuksen jouston on oletettu olevan vähäistä skenaariossa, joten tarve sähköjärjestelmän muulle joustolle kasvaa. Joustoa lisää muun muassa se, että valtaosa sähköautoista ladataan älykkäästi, sekä kaksisuuntainen Vehicle-to-Grid-teknologia (V2G)² on yleisesti käytössä. Lisäksi muun teollisuuden sähkön kulutus kasvaa selvästi. Kulutusta lisää myös sähkön käytön kasvu kauko- ja erillislämmityksessä sekä liikenteessä. Skenaariossa maatuulivoimaa on vuonna 2035 rakennettuna 30 GW ja 50 GW vuonna 2045. Maatuulivoimaa sijoitetaan kasvavassa määrin myös Itä-Suomeen mahdollistaen hajautuneemman tuotannon. Myös Pohjois-Suomeen syntyy tuulivoimaa. Etelä-Suomeen tuulivoimaa sijoitetaan soveltuvien hankealueiden puutteen takia vähemmän. Skenaariossa tarvitaan siis verkkovahvistuksia Itä-

² Vehicle-to-Grid-teknologia tarkoittaa sitä, että sähköajoneuvojen akuista voidaan siirtää sähköenergiaa myös takaisin sähköverkkoon [54].

Suomeen sekä myös pohjois-eteläsuuntaisia verkkovahvistuksia. Skenaariossa rakennetaan myös merituulivoimaa ja muita skenaarioita enemmän aurinkotuotantoa. Vesivoima pysyy skenaariossa nykytasollaan, ja Loviisan sekä Olkiluodon vanhat ydinvoimalaitokset jatkavat toimintaansa vuoteen 2050 asti. Olkiluoto 3:n jälkeen Suomeen ei synny enää uutta ydinvoimaa. Biovoiman osuus tulee maltillisesti pienenemään. [51]

Tuulella vetyä -skenaariossa sähkön kulutuksen kasvuun vastataan pääasiassa maatuulivoimalla. Skenaarion mukaan maatuulivoimaa on Suomessa vuonna 2035 39 GW, jolloin vuosittainen kasvu vuosina 2025–2035 on keskimäärin 2,9 GW. Skenaariossa tuulivoimaa hajautetaan selvästi nykyistä enemmän. Myös Itä-Suomeen saadaan rakennettua tuulivoimaa, sillä sen rakentamista rajoittava tutkakysymys saadaan skenaariossa ratkaistua. Lisäksi tuulivoimakapasiteettia on määrä lisätä merkittävästi Etelä- ja Keski-Lappiin. Näin ollen skenaariossa tarvitaan pohjois-eteläsuuntaisia verkkovahvistuksia sekä 400 kV:n siirtoyhteys Itä-Suomeen. Vastaavasti kuten Sähköä tuotteiksi -skenaariossakin, tulee merituulivoiman ja aurinkosähkön määrä kasvamaan voimakkaasti. Tuulivoiman erittäin suuri osuus sähköjärjestelmässä mahdollistetaan sähkön varastoimisella vetynä. Suomesta kehitty skenaariossa lisäksi merkittävä vedyn vientimaa. Suomesta rakennetaan vetyputkiyhteydet Ruotsiin ja Keski-Eurooppaan. Suomen sisälle kehitty myös laaja vedyn siirtoinfrastruktuuri. Vedyn tuotannon ohella sähkön käyttö kasvaa Sähköä tuotteiksi -skenaarion tavoin kauko- ja erillislämmityksessä sekä liikenteessä. Vesivoiman määrän oletetaan supistuvan Pohjolan Voiman Euroopan vetyintegraatio -skenaarion perusteella noin 1 GW:lla, jolloin sähkön tuotanto vähenee noin 5 TWh. Vesivoiman supistuminen tarkoittaa sitä, että Suomen sähköjärjestelmä menettää samanaikaisesti huomattavasti uusiutuvaa sähköä, ohjattavaa tuotantokapasiteettia, energianvarastointikapasiteettia sekä säätöresursseja. Skenaariossa näihin menetyksiin vastataan vetykäyttöisellä sähköntuotantokapasiteetilla, vetyvarastoilla, akuilla ja tuulivoimalla. Vetykäyttöisellä sähköntuotantokapasiteetilla vastataan myös ydin- ja biovoiman määrän supistumiseen. [51]

Merellä tuulee -skenaariossa kasvatetaan merkittävästi merituulivoiman osuutta. Sähkön kulutuksen oletetaan kasvavan voimakkaasti teollisuudessa, lämmityksessä ja liikenteessä kuitenkin teollisuuden ja vedyntuotannon kasvun jäädessä pienemmiksi kuin Sähköä tuotteiksi -skenaariossa ja Tuulella vetyä -skenaariossa. Vuoteen 2035 mennessä merituulivoima nousee Suomen merkittävimmäksi sähköntuotantomuodoksi. Tällöin asennettu merituulikapasiteetti on 15 GW ja vuotuinen sähköntuotanto 71 TWh. Merituulipuistoja sijoitetaan noin 10–30 kilometrin päähän rannikosta, jolloin verkkoliityntä voidaan tehdä vielä vaihtosähköön perustuen. Jos merituulipuisto sijoitettaisiin kauem-

maksi merelle, niin liityntä pitäisi toteuttaa tasasähköyhteydellä, jolloin investointikustannuksiakin kertyisi enemmän. Maatuulivoima jää Suomessa noin 13 GW:n tasolle. Tässä skenaariossa tuotanto painottuu selkeästi maantieteellisesti, sillä skenaariossa suuri osa maatuulivoimasta, kaikki merituulivoima sekä Olkiluodon ydinvoimayksiköt sijoittuvat Länsi-Suomeen. Näin ollen myös skenaarion sähkön siirron vahvistustarpeet painottuvat länsirannikolle. Myös tässä skenaariossa Suomen sisälle on otettu käyttöön vedyn siirtoinfrastruktuuri, mutta pienemmässä mittakaavassa kuin Tuulella vetyä -skenaariossa. Skenaariossa rakennetaan vetyputkiyhteys Pohjois-Suomesta Pohjois-Ruotsiin, mutta Keski-Eurooppaan ei yhteyttä Suomesta rakenneta Tuulella vetyä -skenaarion tavoin. Aurinkosähkö kasvaa skenaariossa tasaisesti, ja vesivoima sekä ydinvoima pysyvät ennallaan. Biovoimaa vähennetään maltillisesti. [51]

Voimaa läheltä -skenaariossa sähkön kulutus kasvaa vähemmän kuin muissa skenaarioissa. Kulutuksen kasvu on maltillisempaa etenkin vihreän vedyn tuotannossa sekä uudessa sähköintensiivisessä teollisuudessa. Vetyverkkoa ei rakenneta ja vedyn varastointi on marginaalista. Sähköä tuotetaan pääasiassa maatuulivoimalla, perinteisellä ydinvoimalla, SMR-ydinvoimalla³ sekä aurinkovoimalla. Skenaariossa suurin osa tuotannosta sijoittuu etelään perustuen säädettäviin ja tahtikäyttöön kytkettyihin yksiköihin. Jouston määrä vety-, lämpö- ja liikennejärjestelmistä on muita skenaarioita vähäisempää. Skenaariossa Suomeen on rakennettu vuoteen 2035 mennessä 2 GW ja vuoteen 2045 mennessä 4 GW pienydinvoimaa. Perinteinen ydinvoima pysyy skenaariossa ennallaan, sillä Loviisan ydinvoimalan käyttöä jatketaan 20 vuodella myös Olkiluodon nykyisten yksiköiden ollessa käytössä vielä vuonna 2045. Aurinkovoima kasvaa voimakkaasti johtuen aurinkovoiman kustannusten muita skenaarioita nopeammasta laskemisesta, mutta aurinkovoimakapasiteetti koostuu lähinnä kiinteistökohtaisista järjestelmistä suurten aurinkopuistojen sijaan. Maltillisempi sähkön kulutuksen kasvu ja aurinko- ja ydinvoima saavat aikaan sen, että tuulivoiman kasvu hiipuu 2030-luvulla. Vesivoiman määrä pysyy ennallaan ja biovoima supistuu maltillisesti. Sähkön siirtotarve kasvaa erityisesti nykytilanteeseen nähden pohjois-eteläsuunnassa. Myös ylijäämäalueilta on skenaariossa siirtotarve, erityisesti Pohjanmaan eteläosista. Yleisesti ottaen siirtotarpeet ovat kuitenkin muita skenaarioita pienempiä maltillisemmän sähkön kulutuksen nousun, hajautuneemman tuotannon sekä lähelle kulutusta sijoitettavien SMR-ydinvoimaloiden takia. [51]

³ SMR-teknologialla tarkoitetaan kymmenistä joihinkin satoihin megawatteihin yltäviä ydinvoimaloita, joita käytetään kaupungeissa sekä sähkön että lämmön tuotantoon.

Kaikissa skenaarioissa maatuulivoiman määrä kasvaa merkittävästi tulevaisuudessa, kun taas merituulivoima tulee lisääntymään erityisesti vain yhdessä skenaariossa. Myös aurinkosähkön tuotanto kasvaa Suomessa kaikkien skenaarioiden mukaan, mutta kasvu on tuulivoimalla selkeästi voimakkaampaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö sähkön tuotannossa on hyvin marginaalista vuonna 2035 kaikissa skenaarioissa. [51] Näin ollen Fingridin skenaarioiden perusteella on mahdollista, että Suomi pääsee hiilineutraaliustavoitteeseensa. Suomen laki kieltää kivihiielen käytön sähkön ja lämmön tuotannossa vuonna 2029, mutta valtaosa maan energian tuottajista pyrkii eroon kivihiilestä jo vuoteen 2025 mennessä [55]. Suomen nykyinen sähköverkko ei pysty vastaamaan tulevaisuudessa yhä kasvavien sähkötehojen sekä toisaalta aurinko- ja tuulivoiman muodostaman hajautuneen tuotannon siirrosta, mikä edellyttää myös mittavia investointeja Suomen sähköverkkoon [51].

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin Suomen sähköjärjestelmän rakennetta. Suomen sähköjärjestelmä on kokonaisuus, joka sisältää sähkön tuotannon, siirron sekä kulutuksen. Jotta sähköenergiaa saadaan aikaiseksi, on sitä tuotettava energiamuunnosten kautta muista energialähteistä. Kun sähköenergia on tuotettu, voidaan se siirtää siirtoverkkoon, joka kuljettaa sähköenergian lopulta kulutuksen luokse.

Sähkön tuotannon käsittelyssä keskityttiin viiteen eri tuotantomenetelmään: vesivoimaan, lämpövoimaan, ydinvoimaan, tuulivoimaan sekä aurinkovoimaan. Vesivoima on hyvä sähkön tuotantomuoto sen nopean säädettävyytensä ansiosta. Vesivoima ei aiheuta toimiessaan myöskään päästöjä, kuten ei myöskään ydin-, tuuli eikä aurinkovoimakaan. Vaikka lämpövoima onkin varma sähkön tuotantomuoto ydinvoiman ohella, on se kuitenkin ongelmallinen tuotantomuoto sen aiheuttamien päästöjen takia.

Jotta ilmastonmuutosta saadaan hillittyä ja Suomen hiilineutraaliustavoite vuoteen 2035 mennessä saavutettua, on päästöjä aiheuttavasta lämpövoimasta päästävä eroon, ja tilalle on rakennettava uusiutuvaa tuotantoa, eli tuuli- ja aurinkovoimaa. Nämä tuotantomuodot riippuvat kuitenkin voimakkaasti säätekijöistä, joten kyseisten tuotantomuotojen ohelle tarvitaan tulevaisuudessakin perinteisiä päästöttömiä tuotantomuotoja säätövoimaksi turvaamaan sähkön tuotanto myös silloin, kun aurinko ei paista tai tuulisuus on vähäistä. Aurinko- ja tuulivoiman osuuden kasvaessa Suomen sähköjärjestelmässä tarvitaan myös sähköenergian varastointiteknologioita, jotta sähköjärjestelmä pystyy vastaamaan sähkön kulutuksen kasvuun. Lisäksi siirtoverkkoa on laajennettava, jotta uusi aurinko- ja tuulivoima saadaan kytkettyä verkkoon. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että panoksia on laitettava paljon samaan aikaan sekä ilmastoystävällisen että luotettavan sähköjärjestelmän saavuttamiseksi Suomessa.

LÄHTEET

- [1] K. Nousiainen, *Sähköenergiajärjestelmät*, luentomoniste, Tampereen yliopisto, 2019, 228 s.
- [2] Energiateollisuus, *Energiavuosi 2022*, saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf (viitattu 26.2.2023)
- [3] J. Bastman, *Sähkökoneet*, luentomoniste, Tampereen yliopisto, 2022, 176 s.
- [4] Energiateollisuus, *Miksi vesivoima?*, verkkosivu, saatavissa: https://energia.fi/energiasta/vastuullisuus/miksi_vesivoima (viitattu: 2.5.2023)
- [5] Motiva, *Vesivoima*, verkkosivu, saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima (viitattu 26.2.2023)
- [6] Motiva, *Vesivoiman merkitys Suomen energiajärjestelmille*, 2021, saatavissa: https://www.motiva.fi/files/18418/Vesivoiman_merkitys_Suomen_energiajarjestelmalle.pdf (viitattu 26.2.2023)
- [7] M. Örmälä, *Tasemalin muutoksen vaikutukset vesivoiman tuottajalle*, diplomityö, Tampereen yliopisto, 2020, saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/124466/OrmalMiska.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [8] A. Ampuja, *Ydinasiaa*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.energia.fi/energiantuotanto/muut-energiantuotantoprosessit> (viitattu 26.2.2023)
- [9] Fingrid, *Voimalaitokset*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/alkuperatakuun-tapahtumat/voimalaitokset/> (viitattu 30.3.2023)
- [10] Pohjolan voima, *Päästöt vielä vähemmäksi*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/vastuullisuus/paastot-viela-vahemmaksi/> (viitattu 2.5.2023)
- [11] Tampereen sähkölaitos, *Yhteistuotanto*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/footer-sivut/vastuullisuus/vastuumme-ymparistosta/energiatehokkuus/yhteistuotanto/> (viitattu 30.3.2023)
- [12] Energiateollisuus, *Lauhdevoima*, verkkosivu, saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/lauhdevoima> (viitattu 29.3.2023)
- [13] Energiateollisuus, *Yhteistuotanto*, verkkosivu, saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto> (viitattu 29.3.2023)
- [14] Helen, *Hanasaaren voimalaitos*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/hanasaari> (viitattu 3.5.2023)
- [15] World Nuclear Association, *Nuclear Power Reactors*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (viitattu 14.3.2023)

- [16] Vattenfall, *Ydinvoima*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/ydinvoima/> (viitattu 2.5.2023)
- [17] R. Mikkonen, *Johdatus uusiutuviin energialähteisiin*, luentovideo, Tampereen yliopisto, 2021
- [18] Säteilyturvakeskus, *Suomen ydinvoimalaitokset*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/suomen-ydinvoimalaitokset> (viitattu 14.3.2023)
- [19] Säteilyturvakeskus, *Olkiluoto 3*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinlaitoshankkeet/olkiluoto-3> (viitattu 3.5.2023)
- [20] Hyötytuuli, *Tuulivoima*, verkkosivu, saatavissa: <https://hyotytuuli.fi/tuulivoima/> (viitattu 30.3.2023)
- [21] Suomen tuulivoimayhdistys, *Tuulivoimaloiden rakenne*, verkkosivu, saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne> (viitattu 3.4.2023)
- [22] A. Korpela, *Tuulivoiman perusteet*, luentomoniste, Tampereen yliopisto, 2014, 85 s.
- [23] Suomen tuulivoimayhdistys, *Tuulivoima Suomessa*, verkkosivu, saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa> (viitattu 3.4.2023)
- [24] Mutkalampi, *Yleiskuva*, verkkosivu, saatavissa: <https://mutkalampi.fi/> (viitattu 10.4.2023)
- [25] European Commission, *Photovoltaic geographical information system*, verkkosivu, saatavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index_c.html#! (viitattu 10.4.2023)
- [26] S. Valkealahti, *Aurinkosähkön perusteet*, luentodiat, Tampereen yliopisto, 2022
- [27] Motiva, *Auringonsäteilyn määrä Suomessa*, verkkosivu, saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa (viitattu 16.5.2023)
- [28] Motiva, *Aurinkosähkötieteologiat*, verkkosivu, saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat (viitattu 10.4.2023)
- [29] Solarcellcentral, *P/N junctions & band gaps*, verkkosivu, saatavissa: http://solarcellcentral.com/junction_page.html (viitattu 28.4.2023)
- [30] Energiateollisuus, *Aurinkosähkö*, verkkosivu, saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima> (viitattu 10.4.2023)
- [31] Lähienergia, *Aurinkoenergiajärjestelmien lukumäärä 2021 lopussa selvitetty ja MW-luokan aurinkovoimalat yleistyvät*, verkkosivu, saatavissa: <https://lahienergia.org/aurinkoenergiajarjestelmien-lukumaara-2021-lopussa-selvitetty-ja-mw-luokan-aurinkovoimalat-yleistyvat/> (viitattu 14.4.2023)

- [32] Energiavirasto, *Energiaviraston voimalaitosrekisteri*, 2023, saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Energiaviraston+voimalaitosrekisteri/467811b9-c41a-5118-15bc-d4a93713474e> (viitattu 14.4.2023)
- [33] Säteilyturvakeskus, *Sähkönsiirto ja -jakelu*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu> (viitattu 20.4.2023)
- [34] J. Bastman, *Sähköverkkotekniikka*, luentodiat, Tampereen yliopisto, 2022
- [35] Fingrid, *Pylvään osat*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/voimajohdot/pylvaan-osat/> (viitattu 18.4.2023)
- [36] Fingrid, *Suomen sähköjärjestelmä*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/> (viitattu 18.4.2023)
- [37] Fingrid, *Fingrid Oyj:n sähkönsiirtoverkko*, 2022, saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/sahkonsiirto/a3_kartta_se-lite_22.pdf (viitattu 18.4.2023)
- [38] Fingrid, *Pohjoismainen sähköjärjestelmä ja liittynät muihin järjestelmiin*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liittynnat-muihin-jarjestelmiin/> (viitattu 18.4.2023)
- [39] Fingrid, *Venäjältä tuotu sähkö Suomessa*, 2022, saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/ajankoh-taista05042022_sahkontuonti.pdf (viitattu 18.4.2023)
- [40] Energiateollisuus, *Ukrainan sota*, verkkosivu, saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/ukrainan_sota (viitattu 21.4.2023)
- [41] Energiateollisuus, *Sähköverkkoyhtiöt*, verkkosivu, saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkovertkot/sahkovertkoyhtiot> (viitattu 18.4.2023)
- [42] Energiavirasto, *Verkkotoiminnan luvanvaraisuus*, saatavissa: <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus> (viitattu 18.4.2023)
- [43] Vattenfall, *Sähköverkko ja sähkönjakelu*, verkkosivu, saatavissa: <https://energyplaza.vattenfall.fi/sahkovertko-ja-sahkonjakelu> (viitattu 18.4.2023)
- [44] Onninen, *Riippukierrekaapeli AMKA 3x25+35*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.onninen.fi/hes-cable-riippukierrekaapeli-amka-3x25-35/p/COM653> (viitattu 18.4.2023)
- [45] Kaleva, *Outokummun terästehdas on Suomen suurin sähkönkuluttaja – laitos varautuu nyt jopa tuotantokatkoksiin sähkön hinnan kiivetessä*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.kaleva.fi/outokummun-terastehdas-on-suomen-suurin-sahkonkulu/4890070> (viitattu 27.4.2023)
- [46] Fingrid, *Häviösähkö*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/sahkon-siirtovarmuus/haviosahko/> (viitattu 19.4.2023)
- [47] Työ- ja elinkeinoministeriö, *Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050*, 2019, saatavissa: <https://tem.fi/docu->

- [ments/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf](https://www.vtt.fi/inf/pdf/tilastot/2023/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf) (viitattu 17.4.2023)
- [48] Ympäristöministeriö, *Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035*, verkkosivu, saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035> (viitattu 17.4.2023)
- [49] Octopus energy, *When will fossil fuels run out?*, verkkosivu, saatavissa: <https://octopus.energy/blog/when-will-fossil-fuels-run-out/> (viitattu 18.5.2023)
- [50] Tuomas Vanhanen, *Tulevaisuuden sähköverkot tarvitsevat akkuenergiavarastoja*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.tuomasvanhanen.fi/blogi/tulevaisuuden-sahkoverkot-tilavitsevat-akkuenergiavarastoja/> (viitattu 3.5.2023)
- [51] Fingrid, *Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023*, 2023, saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2023/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf (viitattu 27.4.2023)
- [52] Fortum, *Tulevaisuuden energiajärjestelmässä varastointi on avainasemassa*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/tulevaisuuden-energiajarjestelmassa-varastointi-avainasemassa> (viitattu 3.5.2023)
- [53] Elenia, *Kulutusjousto*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.elenia.fi/tulevaisuuden-energia/sahkontuotanto-ja-kulutus/kulutusjousto> (viitattu 3.5.2023)
- [54] Nordic plug, *Kaksisuuntainen lataus – mistä on kyse?*, verkkosivu, saatavissa: <https://nordicplug.fi/blogs/sahkoautot-ja-lataaminen-blogi/kaksisuuntainen-lataus-v2g> (viitattu 17.5.2023)
- [55] Vattenfall, *Sähköntuotanto vuonna 2035: tekoälyllä toimivaa lämmitystä ja joustavaa sähköä*, verkkosivu, saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/fokuksessa/fossilivapaa/sahkontuotanto-vuonna-2035/> (viitattu 3.5.2023)