



Sähkömarkkinat Suomessa

Nykytila ja tulevaisuus

Janne Koivisto

OPINNÄYTETYÖ
Helmikuu 2020

Sähköinsinöörikoulutus
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka

KOIVISTO, JANNE:
Sähkömarkkinat Suomessa
Nykytila ja tulevaisuus

Opinnäytetyö 52 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Helmikuu 2020

Opinnäytetyön tarkoitus oli perehtyä sähkömarkkinoiden nykytilaan ja arvioida tulevaisuutta ensisijaisesti verkonhaltijan ja sähkön loppukäyttäjän näkökulmasta. Tavoitteena oli antaa lukijalle käsitys sähkömarkkinoiden toiminnasta tällä hetkellä ja esittää perusteltuja arvioita siitä, miten sähkömarkkinat tulevaisuudessa muuttuvat. Näiden pohjalta lukija voi yrittää miettiä esimerkiksi saneeraus- tai uudiskohteen sähköistykseen ja automaation ratkaisuja tulevaisuuden sähkömarkkinoita ajatellen.

Yksittäisenä isona teemana esiin nostettiin kotitalouksien mikrotuotanto aurinkosähköjärjestelmällä. Tietoisuus oman mikrotuotannon mahdollisuudesta on kasvanut, ja se on näkynytkin aurinkosähköjärjestelmien nopeana kasvuna. Aurinkovoima tulee olemaan tärkeä energiamuoto, ja isojen keskitettyjen sähkön tuotantolaitosten rinnalle tuleekin mittava määrä hajautettua mikrotuotantoa. Tämä aiheuttaa siirtoyhtiöille haasteita, koska perinteinen verkko ei ominaisuuksiltaan enää välttämättä riitä.

Pienempiä sähkönjakeluun ja sähkömarkkinoihin vaikuttavia teemoja on useampia. Teemat pyritään yhdistämään kokonaisuuteen erityisesti niiden jakeluverkolle asettamien vaatimusten pohjalta.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical- and Automation Engineering
Electric power engineering

KOIVISTO, JANNE:
Electrical energy markets in Finland
Present day and the future

Bachelor's thesis 52 pages, appendices 0 pages
February 2020

The purpose of this thesis was to take a look on the electricity market of today, and to evaluate the future primarily from the viewpoints of the network operator and the end user of electricity. Objective was to give the reader an insight into the workings of electricity market today and to provide reasoned valuations of how the electricity market will change in the future. The results provide the reader with necessary information required to make decisions on electrification and automation.

A single big theme was highlighted, micro-generation of households with solar photovoltaic system. Awareness on the possibility of own micro-production has grown, and this has been manifested as rapid growth of photovoltaic systems. In the future, solar power will be an important form of energy source, and there will be an enormous amount of decentralized micro-generation alongside large centralized power plants. This will pose some challenges to electric distribution companies.

Key words: electricity markets, micro-generation, solar power, energy transition

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖMARKKINAT	8
2.1	Sähkönjakeluverkko	9
2.1.1	Kantaverkko	11
2.1.2	Alueverkko.....	12
2.1.3	Jakeluverkko	13
2.1.4	Sähköverkkojen rakenne	14
2.2	Sähkön tuotanto	15
2.3	Sähkön myynti.....	17
2.4	Sähkön hinnan muodostuminen.....	18
2.5	Energiavirasto ja sähkömarkkinoiden valvonta	21
3	TULEVAISUUDEN SÄHKÖMARKKINOITA OHJAAVAT RATKAISUT	22
3.1	Kulutusjousto ja sähkön varastointi.....	22
3.2	Kulutuksen ohjaus ja tehonhallinta.....	24
3.3	Älykkäät sähköverkot	25
3.4	Mitä nämä tarkoittavat kuluttajille ja verkkoyhtiöille?	26
4	HAJAUTETTU MIKROTUOTANTO AURINKOPANEELEILLA	29
4.1	Aurinkosähkön tuotanto Suomessa.....	30
4.2	Aurinkopaneelin toiminta lyhyesti	32
4.3	Aurinkosähköjärjestelmä	35
4.4	Tuotantoarviot ja sääolosuhteiden vaikutus	37
4.4.1	Olosuhteiden vaikutus tuotantoon	37
4.4.2	Aurinkovoimalan tuotantoarviot	38
4.5	Muut aurinkopaneelityypit	39
5	SÄHKÖMARKKINAT JA JAKELU TULEVAISUUDESSA	41
5.1	Tehomaksu	41
5.2	Uuden sukupolven älymittarit	43
5.3	Älykkäät sähköverkot ja sähkövarastot	45
5.4	Yhteiskunnalliset vaikutukset	45
5.5	Kotitalouksien hajautettu mikrotuotanto ja sähkövarastot	46
5.6	Sähkön hinta	48
6	YHTEENVETO	50
	LÄHTEET.....	51

LYHENTEET JA TERMIT

A	Ampeeri, virran yksikkö
Akusto	Useasta akusta koostuva tasajännitelähde
CSP	Concentrated solar power, keskittävä aurinkovoima
Hyötysuhde	Kertoo, miten paljon otetusta energiasta voidaan hyödyntää muuttaessa energia toiseen, haluttuun muotoon
kV	Kilovoltti, eli 1000 voltia, jännitteen yksikkö
kVA	Kilovolttiampeeri, eli 1000 kilovolttiampeeria, näennäistehon yksikkö
kW	Kilowatti, eli 1000 wattia, pätötehon yksikkö
kWh	Kilowattitunti, eli 1000 kilowattituntia, energian yksikkö
nZEB	Nearly zero energy-building, lähes nollaenergiatalo. Rakennus, joka tuottaa lähes yhtä paljon energiaa kuin kuluttaa
Saarekekäyttö	Tuotantolaitteisto, jota ei ole kytketty jakeluverkkoon, vaan sitä käytetään omassa erillisessä verkossa
STE	Solar thermal energy, aurinkolämpö

1 JOHDANTO

Vuonna 1995 Suomen sähkömarkkinoita alettiin asteittain avata vapaalle kilpailulle. Alkuun sähkön vapaa kilpailuttaminen oli mahdollista vain suurimmille yrityksille. Markkinat kuitenkin avautuivat asteittain enemmän ja enemmän, ja käytännössä syksystä 1998 kaikki pieniä kotitalouksia myöten ovat voineet ostaa sähköenergiansa vapaavalintaiselta myyjältä.

Reilun 25 vuoden taipaleelle mahtuu muutoksia tietysti enemmänkin, mutta mainitsemisen arvoinen – ja mahdollisesti näkyvin ja tuntuvin – lienee vuoden 2011 myrskyjen jäljiltä säädetty sähkömarkkinalaki. Uusi sähkömarkkinalaki astui voimaan syyskuussa 2013. Päätaavoite lakiuudistuksessa oli toimitusvarmuuden takaamisessa erityisesti maakaapeloinnin keinoin.

Lähitulevaisuudessa on näkyvissä jälleen uusi, iso murros. Tälläkin kertaa suurimmat syyt murrokselle löytyvät sosiaalisista syistä, mutta siinä kun edellisen kerran sähkömarkkinalakia uudistettiin pitkäaikaisten sähkökatkojen takia, on tällä kertaa pelissä kotiplaneettamme Maa. Ilmastonmuutoksen estäminen tai vähintään hidastaminen pakottaa luopumaan fossiilista polttoaineista ja suosimaan uusiutuvia energiamuotoja. Sähköverkolle tämä asettaa uudenlaisia vaatimuksia, koska tehotasapainon ylläpitäminen pitää tehdä ilman perinteistä säätövoimaa, eli fossiilisin polttoainein tuotettua energiaa. Omat haasteensa jakeluverkolle tuovat myös hajautettu mikrotuotanto, sähköautojen latauspisteet ja sähköenergian kulutushuipun leikkaaminen.

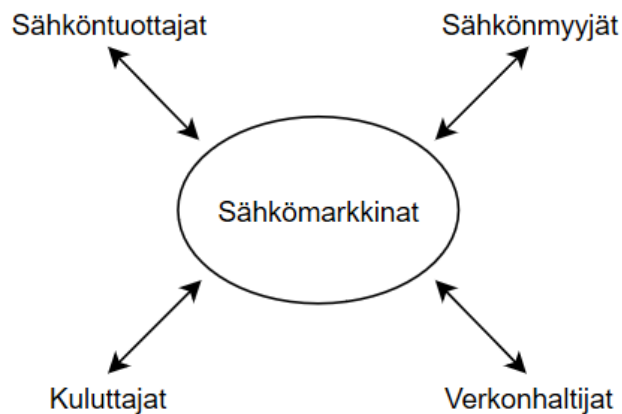
Opinnäytetyössä pyritään esittelemään sähkömarkkinoilla toimivien tahojen rooli, ja arvioimaan, miten rooli tulee tulevaisuudessa muuttumaan. Pääpaino tulee olemaan jakeluverkonhaltijoiden ja sähkönkuluttajien näkökulmassa. Näiden kahden välillä pyritään esittämään syy-yhteyttä erityisesti hinnanmuodostumisen kannalta: jakeluverkonhaltijoiden on löydettävä ratkaisut verkon ylläpitämiseksi, jotka vaikuttavat jollain tavalla sähkön hintakehitykseen.

Opinnäytetyö tehtiin hieman soveltaen osana Tampereen ammattikorkeakoulun SMART CASE NZEB -projektia (nZEB, katso ”Lyhenteet ja termit”). Projektin tavoitteena on, että alan toimijat osaavat tunnistaa nZEB-rakennusten haasteet ja tarjota yhteistoiminnallisesti pientalorakentajaperheille aidosti vähän energiaa käyttäviä kokonaisratkaisuja.

Työssä kuvataan sähkömarkkinoiden toimintaa, ja pyritään arvioimaan, miten ja miksi markkinat tulevat muuttumaan. Toisessa luvussa esitellään lyhyesti sidosryhmät ja heidät yhdistävä jakeluverkko, ja mikä rooli ryhmillä nykypäivän sähkömarkkinoilla on. Kolmannessa luvussa arvioidaan, minkälaiset asiat sähkömarkkinoita tulevaisuudessa muokkaavat. Omana lukunaan nostetaan esiin kotitalouksien oma mikrotuotanto. Lopuksi viidennessä luvussa pyritään arvioimaan, miten aiemmin esitellyt asiat sähkömarkkinoita muuttavat. Arviot pyrittiin tekemään sähkökäyttäjän ja jakeluverkonhaltijoiden näkökulmasta.

2 SÄHKÖMARKKINAT

Sähkömarkkinat on alusta, joka yhdistää toisiinsa sähköntuottajat, sähkömyyjät ja sähkökäyttäjät. Toisiinsa ne yhdistää Suomen sähköverkko, jonka omistavat paikalliset sähköverkon haltijat. Sähköverkon haltijat laskuttavat sähkön loppukäyttäjiä sähköverkon käytöstä. Näillä varoilla verkonhaltijat kehittävät, rakentavat ja korjaavat sähköverkkoa.



Kuva 1. Sähkömarkkinoiden pääasialliset sidosryhmät.

Taloudellisesti ja maankäytöllisesti ei ole järkevää rakentaa toista, rinnakkaista koko maan kattavaa sähköverkkoa. Tämän takia verkonhaltijoilla on luonnollinen monopoli. Monopoliaseman takia toiminta on säädeltyä, ja siihen liittyy useita velvollisuuksia. Toimintaa valvoo Energiavirasto.

Tuotanto ja myynti sitä vastoin ovat avoimena vapaalle kilpailulle. Sähköä tuotetaan tuotantolaitoksissa. Tuotettu energia asetetaan myytäväksi tukkumyyjille sähköpörssiin, josta se myydään edelleen eteenpäin joko vähittäismyyjille tai suoraan kuluttajille. Kilpailu alalla on kovaa, eikä kuluttajan päätökseen välttämättä riitä yksin enää sähkön hinta, vaan yksilöt pohtivat myös tuotannon eettisyyttä.

Sähkön kokonaishinta muodostuu kolmesta osasta: sähköenergian hinnasta (myynti), sähkönsiirron kustannuksista (siirtomaksut), ja sähkö- sekä arvonlisäverosta. Kuluttaja voi vaikuttaa laskussaan sähköenergian hintaan, koska sähkön-

myynti on vapaan kilpailun piirissä. Pieniltä osin voi vaikuttaa myös siirtomaksuihin valitsemalla edullisimman siirtotuotteen oman kulutusprofiilinsa pohjalta. Siirtotuotteita ovat yleissiirto, yösiirto ja vuodenaikasiirto. Alla esimerkkihinnat verkoyhtiö Elenian hinnastosta.

Taulukko 1. Elenian siirtotuotteiden hinnat.

Siirtotuote	Perusmaksu / kk [€]	Siirto /kWh [€]	
Yleissiirto	19,67	0,0521	
Siirtotuote	Perusmaksu / kk [€]	Siirto /kWh [€] - Päivä 07-22	Siirto /kWh [€] - Yö 22-07
Yösiirto	34,17	0,0401	0,0245
Siirtotuote	Perusmaksu / kk [€]	Siirto /kWh [€] - Talviarkipäivä 1.11.-31.3. ma-la 07-22	Siirto /kWh [€] - muu aika
Vuodenaikasiirto	40,65	0,0492	0,0245

Siirtohinnat määräytyvät verkonhaltijan hinnastosta ja verot Arkadianmäeltä.

2.1 Sähkönjakeluverkko

Tuotanto voi olla hyvin rakennetun verkon ansiosta kaukana sähkön käyttöpaikoista, jolloin edellytykset sähköntuotannolle liiketoimintana tietysti paranevat. Pääasiallinen sähköverkon tehtävä onkin siirtää tuotantolaitoksissa tuotettu sähkö kuluttajille. Sähkö on siirrettävä turvallisesti, luotettavasti ja taloudellisesti. Aiemmin todettiin myös, että sähköverkko yhdistää eri sidosryhmät toisiinsa, eli sähköverkko luo olosuhteet sähkömarkkinoille. Sähköverkko koostuu kantaverkosta, alueverkosta ja jakeluverkosta.

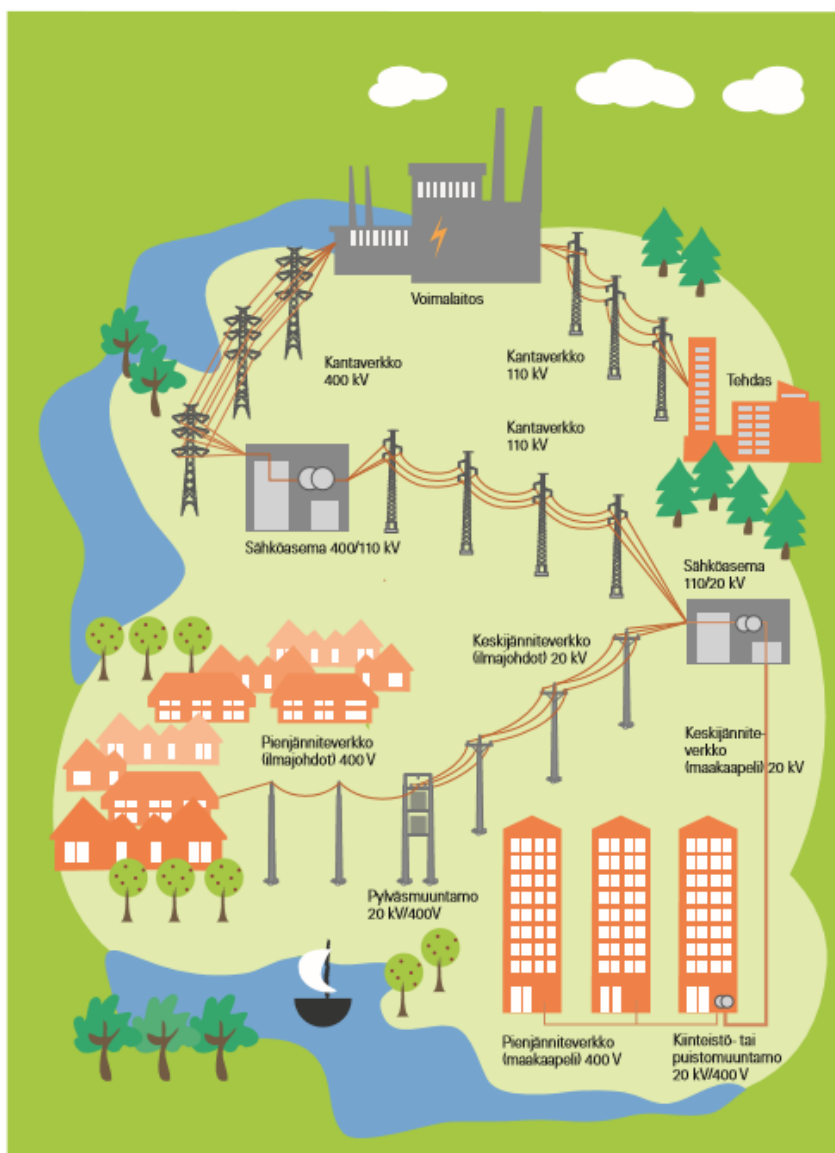
Sähkön pitkien matkojen siirto pyritään tekemään korkealla jännitetasolla. Tämä on edullisempaa sen takia, koska korkealla jännitetasolla saadaan sähkövirta vastaavasti pienemmäksi. Nimenomaan sähkövirta aiheuttaa sähköverkon tehohäviöt kulkiessaan johtimissa: mitä suurempi virta, sitä suuremmat häviöt. Tehohäviöillä on virran kanssa neliöllinen riippuvuus, eli tehohäviöt kasvavat virran tehollisarvon neliössä. Verkon eri osissa on jännitetasoa kuitenkin laskettava, jolloin virrat vastaavasti jälleen kasvavat ja sitä myöten myös tehohäviöt. Pienemmillä jännitetasoilla on kuitenkin lyhyemmät siirtomatkat, jolloin häviöt eivät ehdi kasvaa liian suuriksi.

Sähköverkon jännitetasoista puhuttaessa puhutaan yleensä nimenomaan pääjännitteistä, joilla tarkoitetaan vaihejohtimien välisiä jännitteitä. Esimerkiksi kotitaloudet liittyvät verkkoon 400 voltin jännitetasolla. Kotitalouksien pistorasioissa vaikuttaa kuitenkin 230 voltin jännite. Tällöin puhutaan vaihejännitteestä. Pääjännite on $\sqrt{3}$ x vaihejännite. Tässä tapauksessa

$$\sqrt{3} * 230 V \approx 400 V$$

Yksinkertaisesti sanottuna siis: 400 voltin pääjännitetaso tarkoittaa 230 voltin vaihejännitettä pistorasiasta.

Periaatekuva jakeluverkosta on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Periaatekuva sähköverkosta. (Säteilyturvakeskus, 27.12.2017)

2.1.1 Kantaverkko

Kantaverkko on Suomen sähköverkon runko, johon yhdistyvät alueverkot ja suuret voimalaitokset. Kantaverkosta on myös yhteydet ulkomaille: Venäjälle, Viroon, Ruotsiin ja Norjaan. Pohjoismaiden kantaverkot ja niiden väliset yhteydet muodostavat yhtenäisen siirtoverkon, joka toimii pohjana pohjoismaiselle sähkömarkkinalle. Valtakunnan rajat ylittävä verkko mahdollistaa sähkön tuonnin ja viennin. Suomi ei ole sähköenergian suhteen omavarainen, joten ulkomaan yhteydet ovat tärkeitä. (Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä; Fingrid, Yleisesite: Kohti puhdasta sähköjärjestelmää)

Suomen kantaverkosta vastaa Fingrid. Kantaverkko on esitelty kuvassa 3. Kantaverkkoon kuuluu

- 4600 km 400 kV voimajohtoja
- 2200 km 220 kV voimajohtoja
- 7600 km 110 kV voimajohtoja
- 116 sähköasemaa

(Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä)

Fingridin velvollisuuksiin kuuluvat kantaverkon suunnittelu, rakentaminen ja huolehtiminen sen toimivuudesta ja kunnossapidosta. Tehtäviin kuuluvat lisäksi myös käytön suunnittelu ja järjestelmävastaavana toimiminen. Järjestelmävas- taava ylläpitää sähköjärjestelmää jatkuvasti toimintakykyisenä. Sähköjärjestelmä säilyy toimintakykyisenä kun

- sähköjärjestelmää käytetään joka hetki niin, että sen käyttövarmuus säilyy suunnitelulla ja sovitulla tasolla
- tuotanto ja kulutus ovat yhtä suuret
- häiriötilanteet selvitetään nopeasti

(Fingrid, Sähköjärjestelmän hallinta)

Järjestelmävastaavan määrää Energiavirasto.



Kuva 3. Suomen kantaverkko. (Energiateollisuus – Sähköverkkojen rakenne)

2.1.2 Alueverkko

110 kV johdot, jotka eivät kuulu kantaverkkoon, muodostavat alueverkon. Alueverkkoa kutsutaan myös suurjännitteiseksi jakeluverkoksi. Sähkömarkkina-alaissa-kin puhutaan nimenomaan suurjännitteisestä jakeluverkosta (Säteilyturvakeskus, 21.11.2019): *”suurjännitteisellä jakeluverkolla tarkoitetaan nimellisjännitteeltään*

110 kilovoltin paikallista tai alueellista sähköverkkoa tai -johtoa, joka ei ole liittymisjohto ja joka ei ylitä valtakunnan rajaa.” (Finlex Sähkömarkkinalaki 3§, 9.8.2013)

Puhtaita alueverkkoyhtiöitä (eli vain 110 kilovoltin johtoja omistavia) on 10 kappaletta. Myös monet muut yhtiöt omistavat 110 kV siirtolinjaa, mutta niiden lisäksi ne omistavat myös pienempijännitteisiä linjoja. Riippuen siitä onko verkonhaltija puhtaasti alueverkkoyhtiö vai jakeluverkonhaltija, on verkkotoiminnan luonne ja valvontamenetelmät hieman eri tavoin järjestetty. (Energiavirasto, verkkotoiminnan luvanvaraisuus)

2.1.3 Jakeluverkko

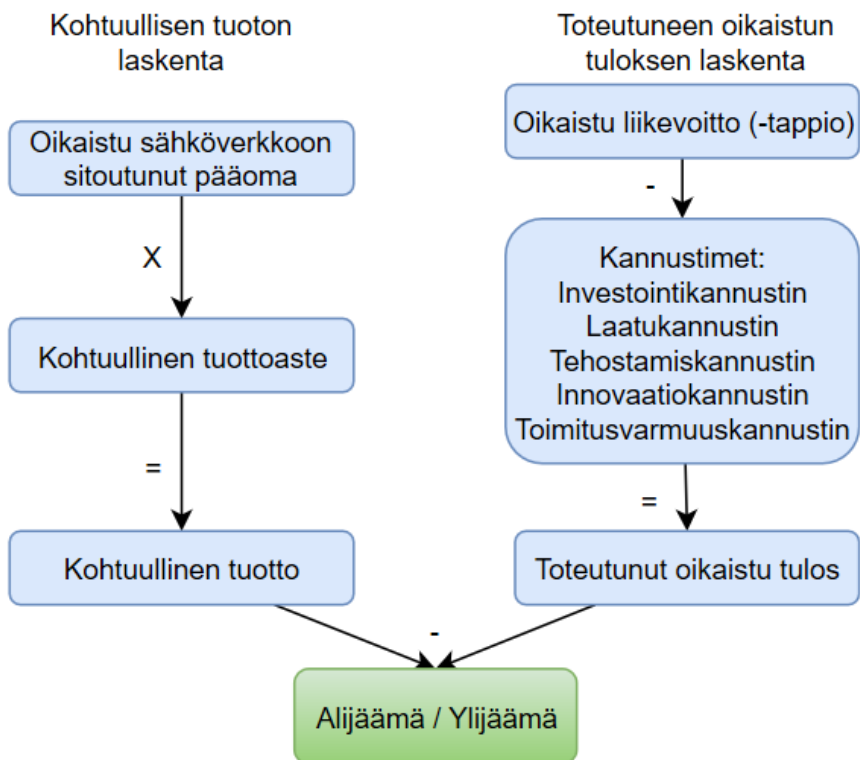
Jakeluverkolla tarkoitetaan sähköverkkoa, jonka nimellisjännite on pienempi kuin 110 kV. Jännitetasot liikkuvat 0,4-70 kilovoltin välillä. Pääasiallisesti linjat ovat 20 kilovoltin ja 400 voltin jännitetasolla. Kuten kantaverkolla, on myös jakeluverkolla oma verkonhaltijansa, jolla on velvollisuus ylläpitää ja kehittää verkostoa. Tätä kirjoitettaessa jakeluverkonhaltijoita on 77 kappaletta. (Energiavirasto, verkkotoiminnan luvanvaraisuus)

Jakeluverkko toimii siirtoyhteytenä pienitehoisempien kuluttajien ja alueverkon/kantaverkon välillä. Pienitehoisempia sähkönkäyttäjiä ovat esimerkiksi kotitaloudet, päivittäistavarakaupat, pienimuotoista maataloutta harjoittavat maatilat ja pienet tuotantolaitokset. Suuret kaupat ja kauppakeskukset, raskas teollisuus ja muu suuritehoisempi toiminta liitetään suoraan alue- tai kantaverkkoon.

Kuten aiemmin todettua, niin verkonhaltijoiden toiminta on luonnollisen monopoliaseman takia säädeltyä. Toiminnalle sallitaan kohtuullinen tuotto, jonka turvin verkonhaltija voi suorittaa velvollisuutensa verkon kehittämisessä ja ylläpidossa. Kohtuullisuutta valvoo Energiavirasto. Valvontamenetelmiin kuuluvat sähköverkkotoimintaan sitoutuneen pääoman arvostusperiaatteet, sitoutuneen pääoman kohtuullisen tuoton ja verkkotoiminnan tuloksen määrittävät sekä verkkotoiminnan kannustimet, joita ovat investointikannustin, laatukannustin, tehostamiskannustin, ja innovaatiokannustin sekä toimitusvarmuuskannustin. (Energiavirasto –

Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus 2017)

Keskeisimmät valvontamenetelmien elementit ovat esitelty kuvassa 4.

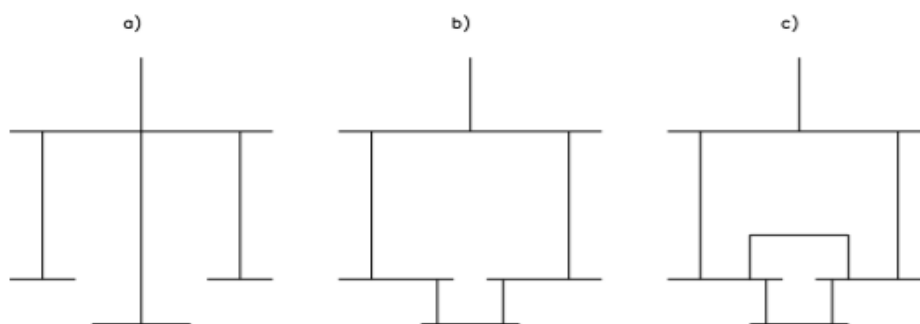


Kuva 4. Keskeisimmät valvontamenetelmien elementit. Vuonna 2018 kohtuullinen tuottoaste (WACC) oli 6,62 %. (Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu, Energia – Sähkönsiirtohinnot ja toimitusvarmuus, 43/2018, s. 38)

2.1.4 Sähköverkkojen rakenne

Sähköverkko voidaan jakaa kolmeen eri verkkorakenteeseen: säteittäiseen verkkoon, rengasverkkoon ja silmukkaverkkoon. Jokaisella rakennetyypillä on hyvät ja huonot puolensa, ja käyttökohteensa. Karkeasti voisi sanoa, että rakennetta valittaessa omista vaakakupeista painavat jakelun luotettavuus ja rakentamisen kustannukset.

Verkkojen rakennetta on kuvattu kuvassa 5.



Kuva 5. Verkkotyypit: a) säteittäinen verkko b) rengasverkko c) silmukkaverkko

Säteittäinen verkko on helppo rakentaa ja suojata. Teknitaloudellisesta näkökulmasta katsottuna tämä on hyvä ratkaisu, mutta kuten kuvasta kuitenkin nähdään, on sähkölle olemassa vain yksi reitti. Vikatilanteet aiheuttavat sähkönjakelun keskeytyksen, ja huoltotyöt monesti vaativat jakelun keskeytystä. Tämä rajoittaa käyttökohteita, koska sähkön saantia ei voida verkonhaltijan puolesta varmistaa.

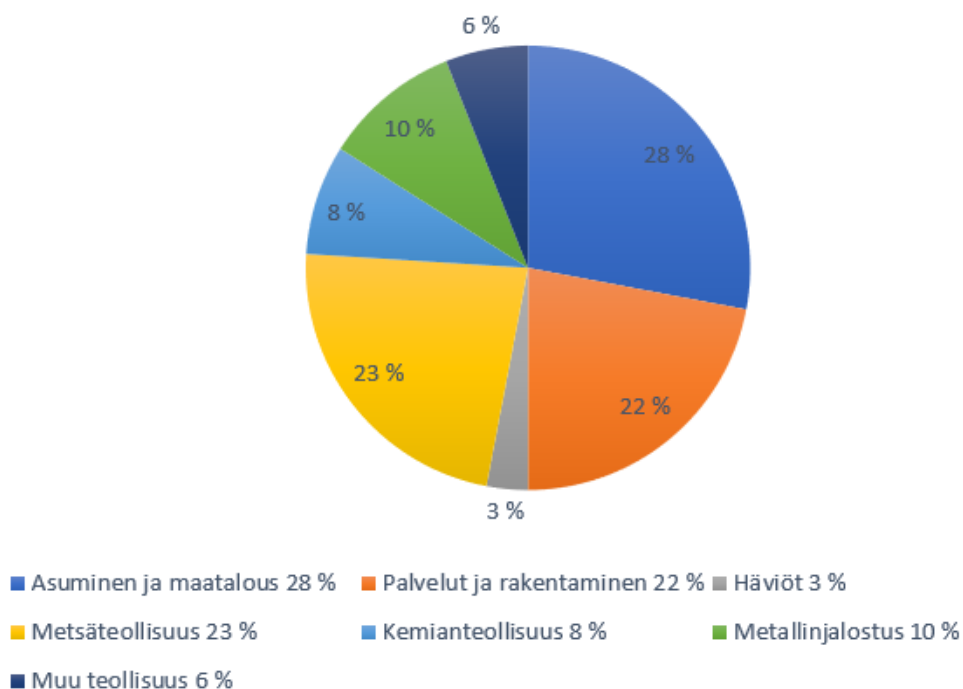
Rengasverkossa sähköä voidaan syöttää kahdesta suunnasta, ja silmukkaverkossa jopa useammasta. Rengas- ja silmukkaverkkoja käytetään suuremmilla jännitetasoilla, ja verkoissa, joille on taattava keskeytyksetön sähköjakelu. Näiden verkkorakenteiden etuina ovat pienemmät jännitetason vaihtelut ja tehohäviöiden pieneneminen. Säteittäiseen verkkoon verrattuna on näiden rakentaminen kuitenkin kallista ja suojaus vaikeaa.

2.2 Sähkön tuotanto

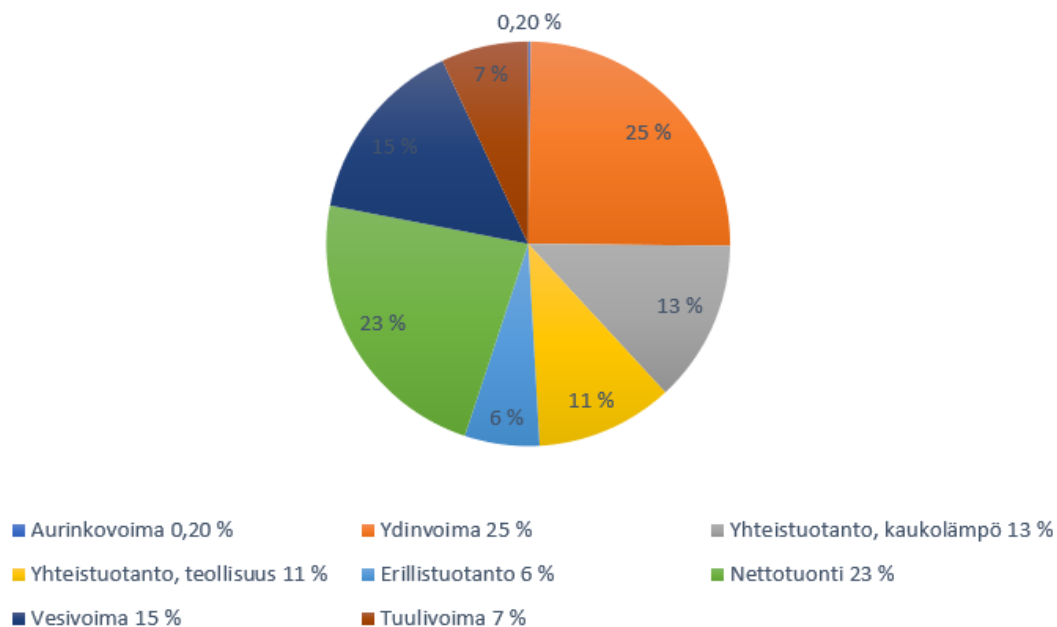
Suomen sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2018 n. 87 TWh. Omaa energiantuotantoa Suomella oli 67 TWh, ja loput 20 TWh – eli lähes tulkoon neljäsnes – tuotiin ulkomailta. Noin 14 TWh tuotiin muista Pohjoismaista. (Energiateollisuus – Sähkötilastot, 4.1.2019)

Sähkön kokonaiskäyttö sekä kokonaistuotanto ja tuonti on esitelty kuvassa 6.

Sähkön kokonaiskäyttö 2018 - 87 TWh



Sähkön kokonaistuotanto ja tuonti 2018 - 87 TWh



Kuva 6. Sähkön kokonaiskulutuksen, sekä tuotannon ja tuonnin jakautuminen 2018. (Energiateollisuus – Sähkötilastot, 4.1.2019)

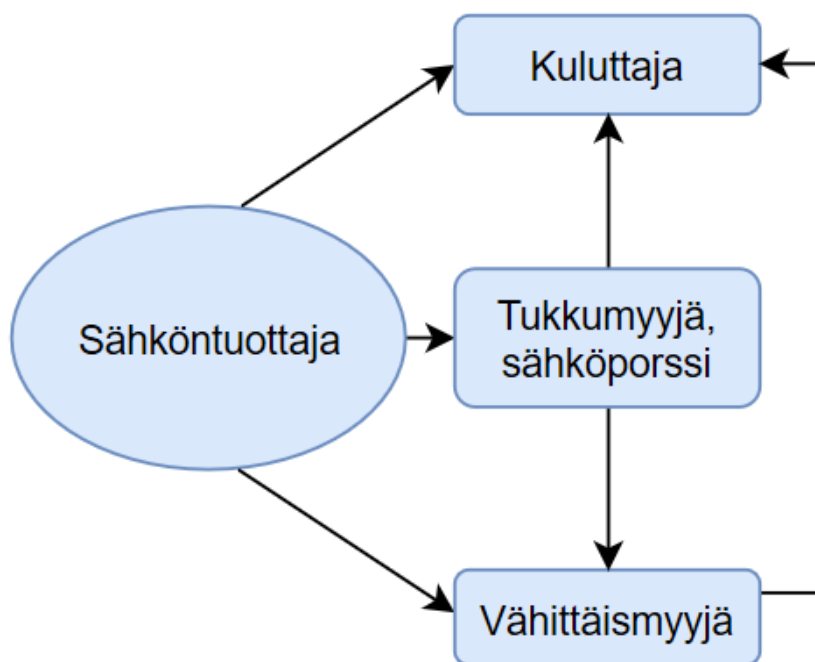
Tuotannon ja kulutuksen on kohdattava joka hetki. Mikäli nämä eivät kohtaa, niin verkon taajuus alkaa poiketa normaalista 50 hertsistä.

2.3 Sähkön myynti

Aiemmin todettiin, että kilpailu tuotannon alalla on kovaa. Kilpailun myötä toimittussopimukset ovat lyhentyneet ja toiminnan riskit kasvaneet. Ympäristöverojen ja päästörajoitusten taakka sähköntuotannossa on myös jatkuvasti lisääntynyt. Tämän lisäksi vähittäiskaupan katteet ovat pieniä. (Sähkömarkkinat – Opetusmoniste 2018, s. 5)

Sähköntuottajat myyvät tuotantonsa eteenpäin. Energia voidaan myydä OTC-markkinoilla (OTC, Over The Counter) suoraan sähkökäyttäjälle, vähittäismyyjälle tai pohjoismaiseen energiapörssiin Nord Pooliin. Sähkönmyynti ei ole sähkömarkkinaudistuksen myötä enää luvanvaraista toimintaa, vaan sitä voi harjoittaa kuka tahansa yrittäjä. (Sähkömarkkinat – Opetusmoniste 2018, s. 6)

Sähkökaupan rakennetta on havainnollistettu kuvassa 7.



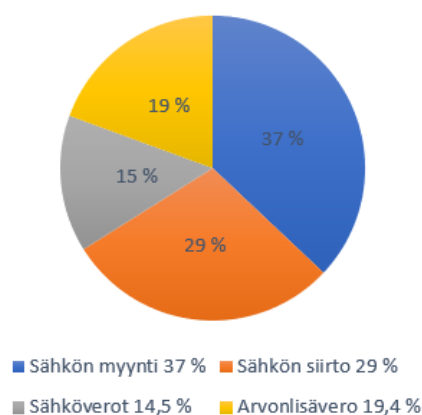
Kuva 7. Sähkökaupan rakenne.

Suora energian myynti kahdenkeskisellä sopimuksella maksaa vaivaa vain suurasiakkaiden ja vähittäismyyjien kanssa. Vähittäismyymiä oli viime vuoden lopulla 73 (Energiauutiset – keskittymisen kynnyksellä, 14.6.2019), joista suurin osa toimii koko valtakunnan tasolla. Joukossa on kuitenkin myös pieniä, paikallisesti toimivia yhtiöitä.

2.4 Sähkön hinnan muodostuminen

Kuluttajan kokonaissähkölasku koostuu karkeasti kolmesta osasta: sähköenergian hinnasta (eli sähkönmyynti), sähkön siirtohinnasta ja veroista. Osien suhteet ovat hieman vaihdelleet vuosien mittaan, mutta näistä jokainen muodostaa suurin piirtein kolmasosan loppusummasta. Kuvassa 8 on esitetty Vattenfallin näkemys keskimääräisestä kotitalousasiakkaan laskusta. Liittymän koko on 3x25 A ja siirtotuotteena yleissiirto.

Keskimääräinen hinnanmuodostus



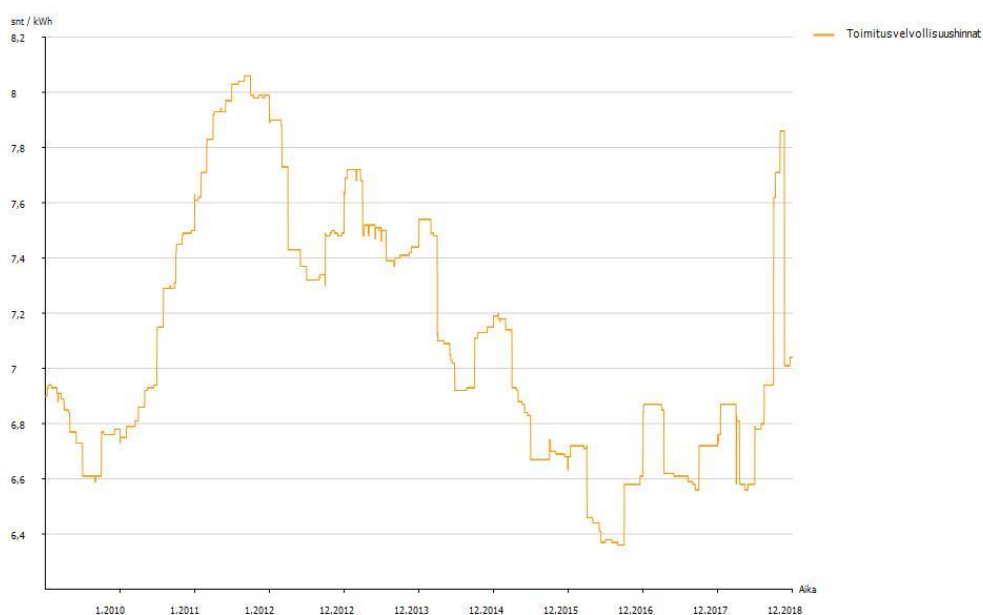
Kuva 8. Hinnanmuodostuminen kotitalousasiakkaalle (siirtotuotteena yleissiirto ja vuosikulutus 5000 kWh).

Sähkön tukkuhinta määräytyy klassisen taloustieteen mukaan, kysynnän ja tarjonnan pohjalta. Tukkukauppaa käydään sähköpörssissä, joka on Pohjoismaiden tapauksessa Nord Pool. Nord Poolissa on kolme keskeistä markkinaa: Spot-markkinat, johdannaismarkkinat ja Elbas-markkinat. Sähkön tukkuhinta määritetään Spot-markkinoilla seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille tehtyjen ostaja- ja myyntitarjouksen perusteella. Tuntitason tarjouksien pohjalta piirretään kysyntä- ja tarjontakuvaajat. Käyrien leikkauskohta määrää sähkön tukkuhinnan. Vähittäismarkkinoiden hintatasoon – ja samalla normaalin kotitalouden ostaman sähkön hintaan – ei tuntitason heilahduksilla ole välitöntä vaikutusta. Tämä johtuu sopimustyypeistä. Tyypillisesti kuluttaja solmii joko määräaikaisen tai toistaiseksi voimassaolevan sopimuksen. Määräaikaisessa sopimuksessa on tietylle ajanjaksolle määrätty tietty kiinteä hinta. Toistaiseksi voimassaolevassa sopimuksessa hinnanmuutoksista tulee asiakkaalle ilmoittaa vähintään kuukausi ennen hinnanmuutosta.

On olemassa toki myös suoraan pörssihintaan sidottuja sopimuksia.

Sähköenergian hinta on viimeisen 10 vuoden aikana liikkunut 6,4 sentin ja 8 sentin kilowattituntihinnan välillä. Suurin osa hinnannousuista on johtunut Norjan vesivarantojen tilanteesta: n. 96 % Norjan sähköenergiasta tuotetaan vesivoimalla. Yksi hinnoille nousupainetta aiheuttanut tekijä on ollut verojen kiristyminen.

Sähköenergian hinnan kehitys 10 vuoden skaalalla on nähtävissä kuvasta 9.



Kuva 9. Verolliset nimelliset energiahinnat: Toimitusvelvollisuushinnat. Pientalo 5 000 kWh/v, koko maan keskihinta 01.01.2009 - 31.12.2018.

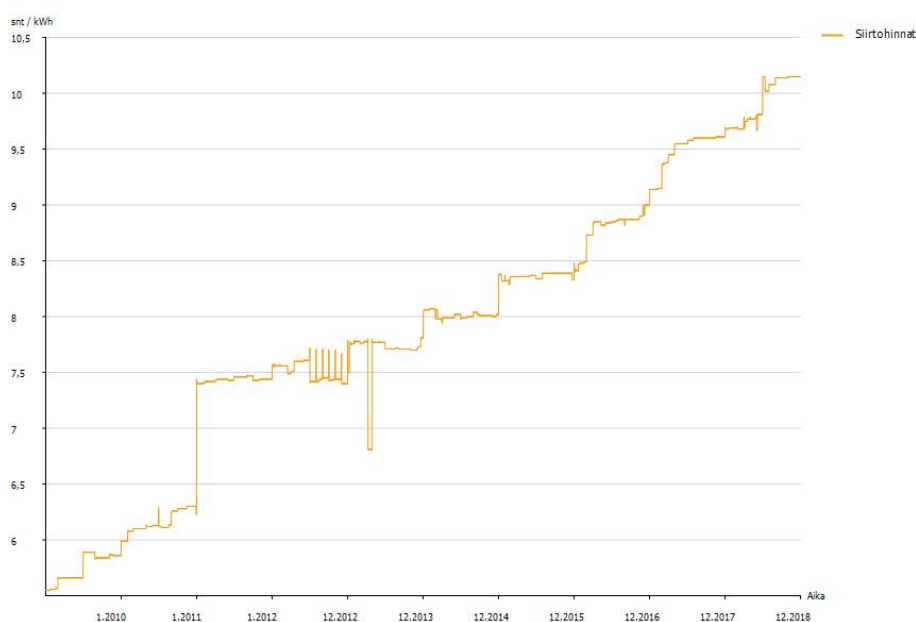
Kuten kuvasta näkyy, ei hintakehitys ole ollut pelkkää nousua. Yksi sähköenergian hintaa laskeva tekijä viime vuosina on ollut yleistynyt tuulivoima. Lappeenrannan teknillisen yliopiston (Esa Vakkilaisen ja Aija Kivistön) vuonna 2017 tekemässä tutkimuksessa ”Sähkön tuotantokustannusvertailu” vertailtiin eri tuotantomuotoja. Tutkimuksen mukaan maalle rakennettavan tuulivoimalan energiantuotanto on halvempaa kuin muilla muodoilla, 41,44 € / MWh. Tuulivoimalan pystyttäminen on vahvasti alkuinvestointipainotteista, mutta käyttökustannukset ovat maltilliset ja primäärienergia on ilmaista. Energiaa on saatavilla halvalla aina kun tuulee. Tämä on osaltaan kuitenkin ongelma, koska aina ei tuule tai tuulee silloin, kun sähköenergian kulutusta ei ole. Tämän takia voimalan tuotantokustannuksiin

olisi tarkoituksenmukaista ottaa mukaan myös varastoinnista koituvat kustannukset, joita ei taulukossa 2 ole huomioitu. (Sähkön tuotantokustannusvertailu, 2017)

Taulukko 2. Voimalaitosten sähköntuotantokustannukset (€/MWh) päästökaupan hinnalla 15 € / tCO₂. Reaalikorko on 5 prosenttia.

Kustannuskomponentti	Tuuli	Ydin	Kaasu	Turve	Hiili	Puu	Aurinko
Pääomakustannukset	33,74	26,27	8,73	17,44	23,95	18,33	84,71
Käyttö ja kunnossapito	7,70	10,41	7,03	10,49	16,62	6,89	14,85
Polttoaine	0,00	5,68	48,03	33,50	33,78	51,00	0,00
Päästökauppa	0,00	0,00	5,09	14,30	1,59	0,00	0,00
Yhteensä	41,44	42,36	68,88	75,73	75,94	76,22	99,56

Siirtohinnot, ja etenkin niiden hintakehitys, on ollut viime aikoina usein julkisen keskustelun aiheena. Suurimmat syyt siirtohintojen nousuun löytyvät hallituksen toimista. Verot ovat nousseet viimeisen 20 vuoden aikana 265 prosenttia, kun siirtohinnot itsessään ovat vastaavassa ajassa nousseet 55 prosenttia. Lisäksi vuonna 2013 voimaan astunut uudistunut sähkömarkkinalaki on pakottanut sähköverkkoyhtiöt investoimaan verkon rakentamiseen, että ne voivat vastata kiristyneisiin toimitusvarmuusvaatimuksiin. Toimitusvarmuutta parannetaan enimmäkseen maakaapeloinnin keinoin. (Energiateollisuus – sähkönsiirron hinnoittelu, 15.2.2017)



Kuva 10. Verolliset nimelliset siirtohinnot. Pientalo 5 000 kWh/v, koko maan keskihinta 01.01.2009 - 31.12.2018.

2.5 Energiavirasto ja sähkömarkkinoiden valvonta

”Energiavirasto on lupa- ja valvontaviranomainen, joka valvoo ja edistää sähkö- ja kaasumarkkinoiden toimintaa, päästöjen vähentämistä, energiatehokkuutta sekä uusiutuvan energian käyttöä.” (Energiavirasto) Sähköverkkoliiketoiminnan valvonnan periaatteet julkaistaan kyllä etukäteen, mutta moni päätös tehdään kuitenkin vasta tilikauden jälkeen, kun verkkoyhtiöiden tilinpäätökset ovat saatavilla. Energiaviraston päätöksistä on valitusoikeus, ja ne käsitellään hallinto-oikeudessa.

Energiaviraston tärkeimpiin tehtäviin kuuluvat

- sähkömarkkinalain noudattamisen valvominen
- sähkönsiirtohinnoittelun valvonta
- vapaan kilpailun piirissä olevan toiminnan edistäminen
- sähkön alkuperätakuun toteutumisen valvonta
- päästökaupparekisterin ylläpito ja päästökaupan valvonta

(Wikipedia – Energiavirasto)

3 TULEVAISUUDEN SÄHKÖMARKKINOITA OHJAAVAT RATKAISUT

Sähköntuotanto pelkäästään fossiilisilla polttoaineilla on kestävämmällä tasolla kahdestakin syystä: fossiilisten polttoaineiden määrä on rajallinen, ja vaikka niitä olisi loputtomasti, niin fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöt aiheuttavat ilmaston lämpenemistä muokaten elinympäristöä ihmiselle sietämättömäksi. Vaikka energiantuottaminen tuuli- ja aurinkovoiman avulla onkin kasvanut, niin sähköntuotanto on – ainakin vielä toistaiseksi - maailmanlaajuisesti suurin yksittäinen CO₂-päästöjen aiheuttaja (CO₂-päästöt 13,41 miljardia tonnia). (Tieteen kuvalehti – Mistä vapautuu eniten hiilidioksidia?)

Luvussa 2.2 ”Sähkön tuotanto” todettiin, että sähkön tuotannon ja kulutuksen on kohdattava joka hetki. Yksi hyvin triviaali keino tuotannon päästöjen suitsemiseen onkin vähentää kulutusta. Toinen tapa on korvata nykyisiä energian tuotantomuotoja uusiutuvien energialähteiden avulla.

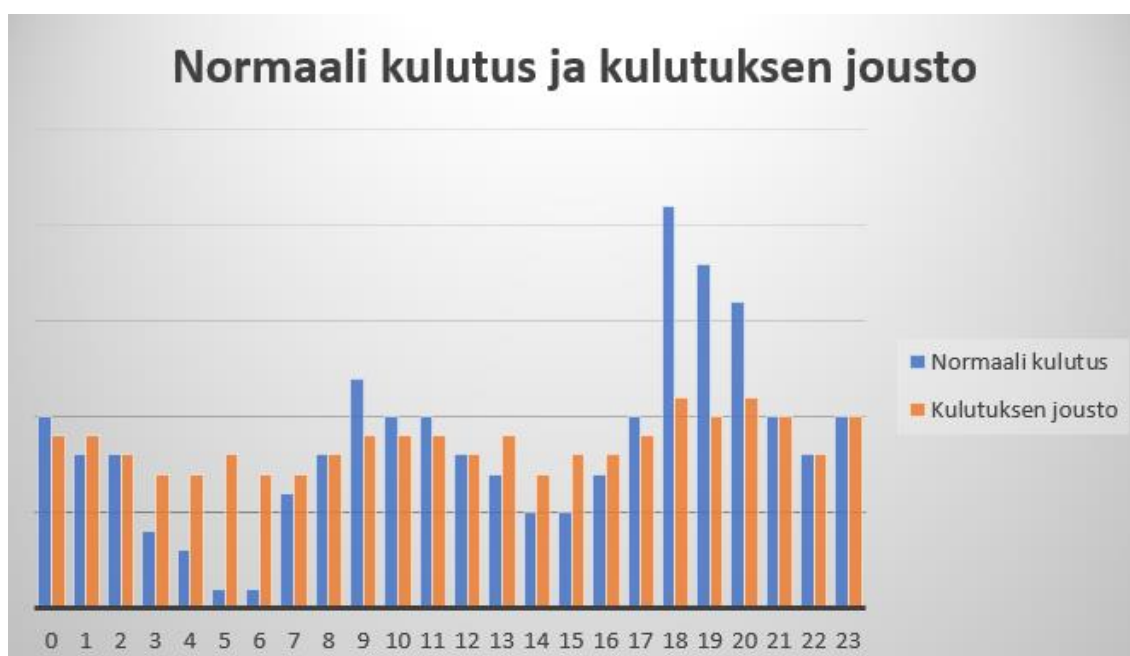
Tässä luvussa esitetään väitteitä ja arvioita siitä, minkälaisin keinoin kulutusta voitaisiin ohjata, miten tuotanto tulevaisuudessa jakautuu, ja miten tehon ja energian suhde muuttuu tulevaisuudessa. Kotitalouksien oma mikrotuotanto aurinkopaneeleilla käsitellään tarkemmin omana lukunaan, koska se on yksi haastavimpia – ellei peräti haastavin – kysymys, johon verkkoyhtiöiden tulee vastata. Vaikka asennettujen aurinkosähköjärjestelmien kasvuvauhti on hieman taittumaan päin, on se kuitenkin edelleen voimakasta.

Arviot siitä, mitä nämä tarkoittavat verkonhaltijoiden ja sähkökäyttäjien näkökulmasta, esitellään luvussa 5.

3.1 Kulutusjousto ja sähkön varastointi

Nykyisessä sähköjärjestelmässä tuotantoa sopeutetaan kulutuksen tarpeisiin. Tulevaisuuden järjestelmä vaatii kuitenkin lisää joustavuutta: pelkkä tuotannon ohjaaminen ei riitä, vaan myös kulutusta on saatava joustavammaksi.

Kulutuksen joustoa on lisättävä, koska verkkoon kytketyn joustamattoman, vaikeasti ennustettavissa olevan tuotannon määrä kasvaa. Tällaista tuotantoa on esimerkiksi tasaisesti ajettava ydinvoima ja säästä riippuvaiset uusiutuvat energiamuodot. Soveltaen aiemmin mainittua ”tuotannon ja kulutuksen on kohdattava”-oppia, niin tasainen tuotanto tarkoittaa, että myös kulutusta on tasattava. Tällä hetkellä sähkökäyttäjien kulutustottumukset kuitenkin tuottavat verkkoon selviä kulutuspiikkejä ja -kuoppia, joskin näiden ennustaminen on verrattain helppoa. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan näiden kuoppien täyttämistä ja piikkien tasaamista, eli kulutusta pyritään joko siirtämään korkean kulutuksen ajankohdilta matalamman kulutuksen aikajaksoille tai käyttöä sopeutetaan hetkellisesti teho-
tasapainon hallinnan tarpeisiin. Kuvassa 11 on pyritty havainnollistamaan asiaa.



Kuva 11. Kuvitteellinen vuorokausikulutus tunneittain, sekä kulutuksen tasaaminen tunneittain (kysyntäjousto).

Yksi tapa on tietysti ohjata sähkökäyttäjien kulutuskäyttäytymistä, ja kannustaa heitä käyttämään sähköä tasaisemmin. Se on kuitenkin vaikeaa, koska harva toimistoaikoihin työssä käyvä haluaa esimerkiksi nousta saunaan kolmelta yöllä. Tehokkaammin joustoa saataisiin aikaan sähköä varastoimalla. Akkuvarastoinnin tuoma joustomahdollisuus mahdollistaisi esimerkiksi juuri edellä mainittujen tuotantotapojen kasvun, koska tuotantoa voitaisiin ajaa koko ajan ilman että sitä

tarvitsisi sopeuttaa kulutukseen suoraan. Tuotannon ja kulutuksen suhteen ylläpito tapahtuisi välillisesti sähkövarastojen kautta, jolloin se olisi helpompaa, tehokkaampaa ja tarkempaa.

3.2 Kulutuksen ohjaus ja tehonhallinta

Sivulla 17, kuvassa 6, todetaan Suomen sähköenergian kokonaiskulutuksen olevan 87 TWh. Tästä 28 %, eli 24,4 TWh, on koti- ja maatalouksien osuus. Vaikka laitteiden, koneiden ja valaistusten tehot itsessään ovat joiltain osin pienentyneet, on laitteiden määrä kuitenkin kasvanut. Kotitalouksissa on usein useampi kuin yksi TV ja/tai tietokone. Tämän lisäksi uusien kotitalouksien lämmitysjärjestelmiä mietittäessä suositaan monesti lämpöpumppuja, jotka ovat huipputeholtaan isompia kuin esimerkiksi lämpöpatteri. Kun tähän lisätään vielä ruoanlaitto liedellä ja samaan aikaan lämpiävä sähkökiuas, niin hetkelliset huipputehot voivat kohota keskivertokotitaloudessa helposti yli 10 kilowattiin.

Nykyiset siirtotariffit ”vuodenaikasiirto” ja ”yösiirto” ohjaavat kulutusta enemmän yön puolelle, mutta tämän kaltainen kulutuskäyttäytyminen suosii enemmänkin varaavia käyttöjä, kuten varaava sähkölämmitys, lämminvesivaraaja ja sähköauton lataus. Tämä vähentää tehontarvetta päivätunneilta, mutta ei kuitenkaan kokonaan poista sitä. Päivätuntien huipputehoja voitaisiin rajoittaa kodin automatiikalla. Esimerkiksi, jos palaamme vielä luvun 3.1 skenaarioon, niin lieden ja saunan ollessa päällä voisi automaatio esimerkiksi laskea rakennuksen lämmitysjärjestelmän tehoa tai katkaista sen hetkeksi kokonaan. Sekä liesi että kiuas itsessään ovat lämmönlähteitä, jolloin ei lämmitysjärjestelmää välttämättä tarvita ollenkaan.

Automatiikka voisi myös optimoida kiinteistön energiankäyttöä esimerkiksi sähkön hintatietojen, asukkaiden läsnäolon ja kulutusprofiilien pohjalta.

Omana kuormanaan tulevaisuudessa tulevat toimimaan myös sähkö- ja hybridi-autot. Autojen lataus kuormittaa sähköverkkoa pitkäaikaisesti. Latausprosessia onkin järkevä jaksottaa tehoristeilyllä. Sähkö- ja hybridiautojen akut toimivat sähkövarastoina, ja onkin esitetty, että myös näitä varastoja voitaisiin hyödyntää kulutuksen tasaamisessa. Akku voitaisiin ladata esimerkiksi yöllä, kun tehontarve ja

energiankulutus ovat pienimmillään. Mikäli autolla ei seuraavana päivänä ajeta, voisi se toimia tehoreservinä: auton sähkövarastosta voitaisiin purkaa energiaa rakennuksen käyttöön silloin, kun tehon tarve on suurimmillaan.

3.3 Älykkäät sähköverkot

Perinteisessä sähköverkossa teho kulkee yleensä ottaen vain yhteen suuntaan: voimalaitokselta sähkön käyttöpaikoille. Kun perinteiseen sähköverkkoon tuodaan ICT-järjestelmiä, voidaan alkaa puhua älykkäästä sähköverkosta. Älykkään sähköverkon avulla energiaa voidaan tuottaa, kuluttaa ja varastoida entistä joustavammin. Tämän kaltainen sähköverkon käyttö mahdollistaa uudenlaisten palveluiden tarjoamisen sähkönkäyttäjille.

Perinteiseen verrattuna älykäs sähköverkko on luotettavampi. Älyverkko kykenee ennakoimaan tehontarvetta ja sen myötä mukautumaan vaihteleviin kuormiin automaation avulla. Vikatilanteissa älykäs sähköverkko osaa myös erottaa tietyn verkon osan vikaantuneesta verkosta ja erotettu verkon osa toimisi omana yksikönään saarekekäytöllä. Energian saanti saarekkeessa oleville asiakkaille olisi turvattu energiavarastojen ja paikallisen, hajautetun mikrotuotannon avulla.

Yksi tärkeä sovellus älykkäille sähköverkoille on tuotannon ja kulutuksen tasaiminen. Yksi tapa tälle on niin sanottu virtuaalivoimalaitostoiminta. Virtuaalivoimalaitoksia ovat kohteet, joiden kulutusta voidaan säädellä automatiikan avulla niin, että teho olisi valjastettavissa muualle. Toisin sanoen siis, yhden tai useamman kiinteistön sähköliittymän tehoa rajoitettaisiin esimerkiksi 20 %, jolloin tämä teho olisi käytettävissä muualla. Verkon huipputeho olisi tällä tavoin helpommin hallittavissa.

Älykkään sähköverkon tehonhallintaominaisuudet ovat edellytys myös mikrotuotantolaitteistojen määrän kasvulle. Kotitalouksien laitteiden tuotanto on vaikeampi ennustaa, eikä niistä toimiteta tuotantoennustuksia Fingridille, joten tehotasapainoa on ylläpidettävä älykkäiden järjestelmien automatiikalla. Pelkkä älykäs automaatio ei yksin vielä riitä, vaan asian keskiössä tulee olemaan sähkön varastointi.

3.4 Mitä nämä tarkoittavat kuluttajille ja verkkoyhtiöille?

Kuten luvussa 3.1 annettiin ymmärtää, ei sähkönkäyttäjien kulutuksen tasaaminen todennäköisesti onnistu ainoastaan kulutustottumuksia muuttamalla. Varaavien lämmityskuormien siirtäminen edullisemmille jaksoille onnistuu helposti alkeellisellakin ohjaustekniikalla, mutta esimerkiksi suoran sähkölämmityksen ja oman viihdekäytön tasaaminen vaatii erilaisia ratkaisuja. Asuin- ja muihin rakennuksiin on olemassa tietysti automaattioratkaisuja, mutta näitä ei lainsäädännön puolesta esimerkiksi uudisrakennuksilta tai perusteellisen saneerauksen alla olevilta kohteilta vaadita. Mikäli kulutuksen ohjausta halutaan nimenomaan lainsäädännön keinoin velvoittaa, niin velvollisuudet kohdistunevat verkonhaltijaan. Verkonhaltija on asemassa, jossa tuottoa voidaan turvata lainsäädännön keinoin. Lisäksi kulutusohjauksen piiriin voidaan saattaa kerralla isompi alue. Toisin sanoen siis, on helpompi yrittää ohjata isoa esimerkiksi 1700 kilowatin kuormaa ison peulaajan resursseilla kuin yrittää velvoittaa pieniä, huipputeholtaan 17 kilowatin asuinrakennuksia ratkaisemaan asia omilla resursseilla. Verkonhaltijan tuotto kuitenkin tarkoittaa sitä, että kustannukset jaetaan myös sellaisten sähkönkäyttäjien kesken, joita palvelu ei hyödytä.

Huipputehon ohjaaminen verkonhaltijan toimesta on perusteltua myös siltä kantilta, että jakeluverkon johtimet ja komponentit mitoitetaan huipputehon perusteella. Huipputehon ennustettavampi hallinta toisi hieman liikkumavaraa suunnittelupuolelle, joka voisi näkyä alhaisempina verkkoinvestointeina. Lisäksi vikatilanteissa tehoa voitaisiin jakaa tarkemmin. Tämän kaltainen huipputehon hallitsemiseen perustuva järjestelmä antaa myös mahdollisuuden uudentyyppiselle siirtotarifille, niin sanotulle tehomaksulle.

Lyhyesti sanottuna, tehomaksu määräytyy sähkönkäyttäjän vaatiman huipputehon mukaan. Se on siis laskutusperuste, jolloin laskun summa muodostuu perusmaksun ja siirretyn energian lisäksi myös tehomaksun osuudesta. Tehomaksulla pyritään lisäämään vaikuttamismahdollisuuksia siirtolaskuun kannustamalla tasaaisempaan kulutusvaihteluun, koska hetkellinenkin kulutuspiikki voi tuoda usean kymmenen euron lisämaksun vuositasolla. Yksi tehomaksun tarkoitus on, että se

osittain eliminoisi aiemmin mainitun automatiikkaan investoimisen tarpeen: teknisen toteutuksen sijaan säästöön kannustettaisiin kulutuskäyttäytymistä ohjaamalla. Kulutuskäyttäytymisen ohjaaminen on kuitenkin vaikeaa.

Tasaisuutta voi hakea myös omalla mikrotuotannolla ja sähkövarastoilla. Nämä vaativat tietysti kovat investoinnit, kuten automatiikkakin, mutta esimerkiksi aurinkopaneelit maksavat itsensä varmemmin takaisin elinkaarensa aikana. Nämä ovat lisäksi verrattain helppo asentuttaa. Tulevaisuudessa mikrotuotannon tuksi asennetaan todennäköisesti myös sähkövarastoja, mutta tällä hetkellä – teknistaloudellisesta näkökulmasta katsottuna – akustot ovat hintaansa ja energianvarastointikykyynsä nähden melko hintavia. Teslan Powerwall-akusto kykenee varastoimaan 14 kWh energiaa, ja sen hinta on 7650 € (pelkkä akusto) (Tesla.com – Powerwall). Lämmitysmuodosta riippumatta sen varastointikyky kesäisin on varmasti riittävä, mutta lokakuusta maaliskuun loppuun se on miltei hyödytön. Tyypillisinä kesäpäivinä omakotitalojen sähkönkulutus on 20 kilowattitunnin luokkaa. Lämpötilan pudottua nollan tuntumaan alkaa energiantarve olla jo 50 kilowattitunnin luokkaa. Kylmemmillä ilmoilla energiantarve kasvaa tietysti entisestään. Lämpötilan lasku tarkoittaa yleensä myös auringonpaisteen vähentymistä, jolloin aurinkovoimalankin käyttöaika laskee. On helppo huomata, että 14 kilowattitunnin akusto on energianvarastointikyvyltään aivan liian pieni, mutta toisaalta auringonpaisteen vähentyessä ei isompaa akkua voi ladata täyteen lyhyessä ajassa, ellei tuotantolaitteisto ole riittävän tehokas.

YLE uutisoi 31.10.2019 miehestä, joka on päättänyt irrottautua valtakunnan verkosta. Aikomuksenaan kuluttajalla on ryhtyä sähkön suhteen omavaraiseksi. Laitteistoksi ilmoitettiin 4,8 kW:n aurinkovoimala, 50 kilowattitunnin akusto ja varavoimalähde, 30 kW:n aggregaatti. Artikkelissa haastatellun sähköurakoitsijan arvio oli, että aggregaattia tarvitaan joulukuusta tammikuuhun. Projektin arvioitiin maksavan noin 30 000 euroa. Irrottautuminen on tarkoitus tehdä tulevan talven jälkeen. (YLE Uutiset)

Sähkö-/hybridiautot voivat periaatteessa olla hyväkin vaihtoehto akustoksi. Sähköauton akuston hinnan ennustetaan laskevan vuoteen 2020 mennessä noin 100 euroon kilowattitunnilta (vrt. Powerwall nyt, 546 euroa / kWh) (Wikipedia – Säh-

köauto). Huono puoli autossa kuitenkin on, että se ei ole aina paikalla. Tällä hetkellä sähkö- ja hybridautot ovat myös selvästi polttomoottoriautoja kalliimpia, joten autokanta tuskin vaihtuu kovin äkkiä.

Virtuaalivoimalaitos lienee sähkökäyttäjän kannalta hyvin yksinkertainen konsepti. Sähkökäyttäjä antaa korvausta vastaan luvan rajoittaa kiinteistönsä sähkötehoa sähköverkon tuotannon ja kulutuksen tasapainon säilyttämiseksi. Verkonhaltijan rooli tässä on kuitenkin selvästi vaikeampi hahmottaa. Energiaviraston olettaisi avaavan virtuaalivoimalaitostoiminnan vapaalle kilpailulle, jolloin verkonhaltija ei voi toimintaa ajaa. Verkonhaltijan rooliksi jäänee mittaustietojen välittäminen sille taholle, joka virtuaalivoimalaitostoimintaan ryhtyy, sekä sähkövarastojen liittäminen jakeluverkkoon.

4 HAJAUTETTU MIKROTUOTANTO AURINKOPANEELEILLA

Jakeluverkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien määrä Suomessa on kasvanut vauhdilla. Kun vuonna 2015 verkkoon kytkettyjen tuotantolaitteistojen yhteenlaskettu teho oli n. 10 MW, niin vuoden 2018 lopussa kapasiteetti oli jo hie- man yli 120 MW. Saarekekäytössä on arvioitu olevan n. 10 MW edestä aurin- kosähköjärjestelmiä. (International Energy Agency -National Survey Report of PV Power Applications in Finland - 2018 , s. 6)

Maailmanlaajuisesti aurinkosähköjärjestelmien kapasiteetti on kasvanut jo kauan eksponentiaalisesti. Alkuun kasvu oli myös Suomessa eksponentiaalista, mutta kasvuvauhti on pikkuhiljaa taittumaan päin. Kuvassa 12 on esitetty verkkoon kyt- kettyjen aurinkosähköjärjestelmien kapasiteetti vuodesta 2015 lähtien. Datan pohjalta on tehty myös arvio vuoden 2019 loppuun mennessä asennetun kapa- siteetin määrästä. (International Energy Agency -National Survey Report of PV Power Applications in Finland - 2018, s. 6) Tulevaisuutta arvioidaan tarkemmin luvussa 5.



Kuva 12. Suomen jakeluverkkoon liitettyjen aurinkosähköjärjestelmien kapasiteetti.

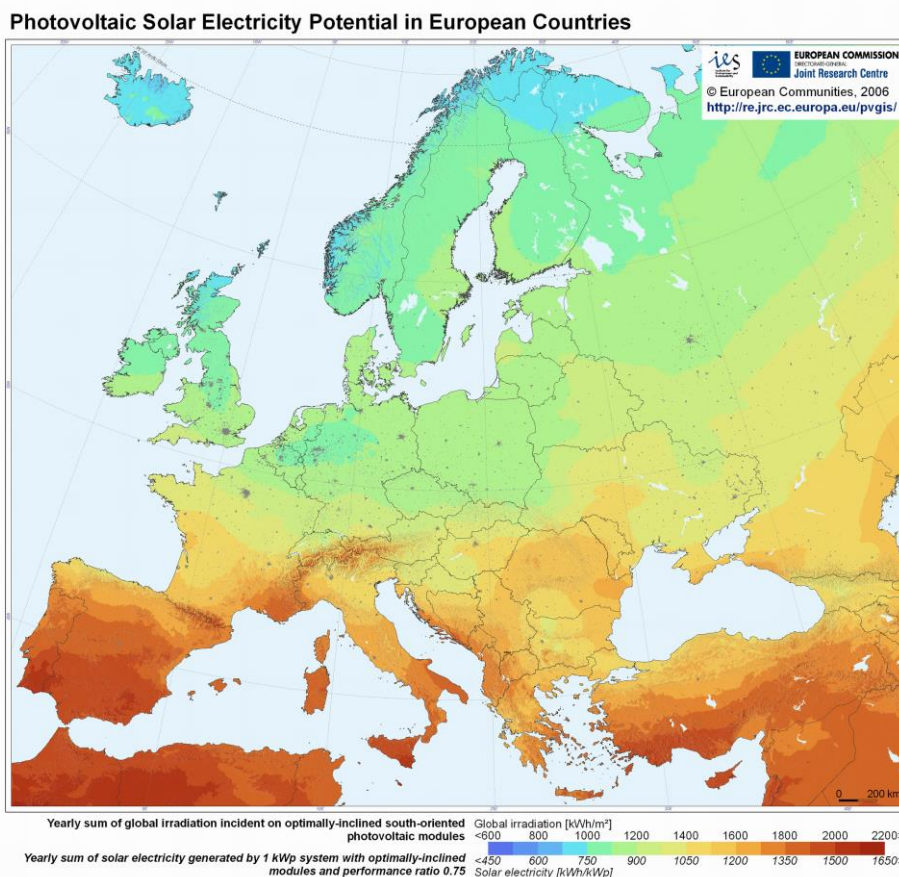
Tätä kirjoittaessa Suomen suurin verkkoon kytketty aurinkovoimala on K-City-market Kupittaaan aurinkovoimala Turussa, teholtaan 0,9 MW. Kauppakeskus

Elon katolle Ylöjärvellä on kuitenkin rakentumassa Suomen ensimmäinen yli megawatin aurinkovoimala, jonka pitäisi valmistua aivan lähiaikoina. Voimalaitoksen rakentamisesta vastaa Helen Oy. (Sponda)

Ilmastonmuutoskeskustelu on tuonut uusiutuvat energiamuodot julkiseen keskusteluun, minkä seurauksena tavallinen sähkökäyttäjänkin on aktivoitunut harjoittamaan omaa mikrotuotantoa. Aurinkopaneelien asentaminen on perusteltua ekologisista syistä, minkä lisäksi omaa tuotantoa voi perustella myös taloudellisesta näkökulmasta.

4.1 Aurinkosähkön tuotanto Suomessa

Tietoisuus aurinkosähköstä on viime vuosina kasvanut valtavasti. Edelleen kuitenkin vallitsee melko yleinen harhaluulo, että Suomen oloissa aurinkosähkö ei kannata. Suomi on aurinkoenergiapotentiaailtaan kuitenkin Keski-Euroopan maiden tasolla. Suomen olosuhteissa on myös etunsa, koska aurinkopaneelien hyötysuhde on parempi viileämmällä kuin lämpimällä ilmalla.

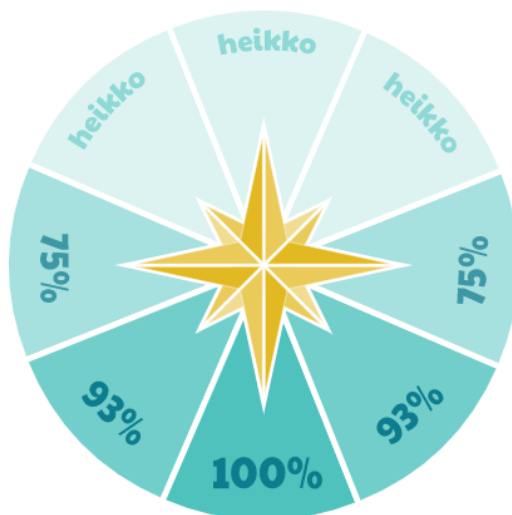


Kuva 13. Epäsuoran säteilyn määrä Euroopassa. (Wikimedia Commons)

Maanpinnalle saapuva auringonsäteily voi saapua suorana säteilyinä tai hajasäteilyinä. Suora säteily saavuttaa maanpinnan nimensä mukaisesti muuttamatta suuntaansa. Hajasäteily sitä vastoin saavuttaa maanpinnan eri suunnasta kuin suoraan auringosta. Hajasäteilyä syntyy, kun säteily siroaa pilvistä tai ilman epäpuhtauksista. Tämän lisäksi säteily voi heijastua esimerkiksi lumesta, vesistöjen pinnasta, rakennuksien ikkunoista ja katoista, tai vastaavista kohteista. Kokonaissäteily koostuu siis suorasta säteilystä, hajasäteilystä ja heijastuneesta säteilystä. Hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on Suomessa n. 40-50 %. (Motiva)

Vaikka suoraa säteilyä on Suomessa vähemmän, niin juuri kokonaissäteily on Suomessa Keski-Euroopan luokkaa vuositasolla. Suomessa tuotanto kuitenkin tapahtuu enimmäkseen kesäkuukausina toisin kuin Keski-Euroopassa, jossa se jakautuu pidemmälle ajanjaksolle. Vähäisen suoran säteilyn vuoksi eivät aurinkoa seuraavat järjestelmät (solar tracking systems) ole näillä leveysasteilla taloudellisesti kannattavia. Tämän takia aurinkopaneelien suuntauksen tärkeys korostuu.

**Ilmansuuntien vaikutus
aurinkopaneelien vuotuisen
tuottoon**



Kuva 14. Havainnekuva suhteellisista tuotto-odotuksista eri suuntauksilla. (aurinkosahkoakotiin.fi)

Kesäkuukausille keskittynyt tuotanto on omalla tavallaan kuitenkin ongelma, koska juuri pimeinä kylminä talvipäivinä sähkön tarve ja kulutuspiikit ovat suurimmillaan. Kulutuspiikkien välttämiseksi tarvittaisiin tarpeeksi tehokas laitteisto kattamaan sekä oman kulutuksen että akuston latauksen. Tällä hetkellä aurinkosähkön hyödyntäminen onkin kannattavinta kohteissa, joissa sähkönkulutus tapahtuu enimmäkseen kesän aikana.

4.2 Aurinkopaneelin toiminta lyhyesti

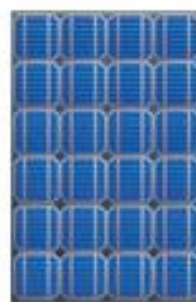
Paneelien toiminta ei tietenkään sähkömarkkinoihin vaikuta, mutta tarkastellaan kuitenkin lyhyesti niiden toimintaa. Tarkastelussa tyydytään monesti vain toteamaan ilmiön olemassaolo perustelematta sitä. Tarkoitus on enemmänkin antaa asiasta yleistietoa kuin täsmällistä kuvausta.

Tässä tapauksessa aurinkopaneeleilla tarkoitetaan nimenomaan piipohjaisia paneeleita. Muitakin paneelityyppejä on ja niitä tarkastellaan myöhemmin lyhyesti oman otsikkonsa alla. Piipohjaiset paneelit ovat tätä kirjoittaessa kuitenkin ylivoimaisesti yleisin paneelityyppi, ja sen vuoksi myös kuluttajan todennäköisin valinta.

Aurinkopaneelit koostuvat sarjaan kytketyistä aurinkokennoista, joten tarkalleen ottaen, aurinkopaneelien toimintaa kuvattaessa kuvataan aurinkokennon toimintaa. Paneelitasolla on toki omat lainalaisuutensa, mutta toimintaperiaatteen tarkastelun yksinkertaistamiseksi tarkastellaan toimintaa lähinnä kennon näkökulmasta. Kenno ja paneelit ovat kuvattuna kuvassa 15.



1 aurinkokenno

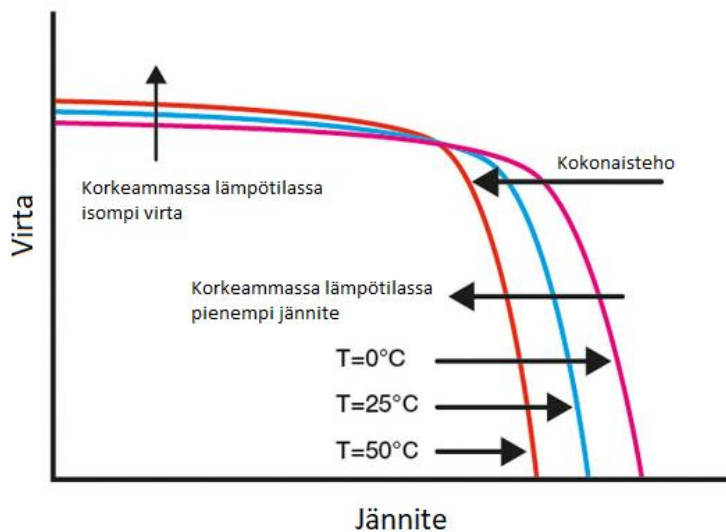


Useita aurinkokennoja
= aurinkopaneeli

Kuva 15. Aurinkokenno ja -paneeli.

Aurinkopaneeleja voidaan edelleen ketjuttaa toisiinsa, jolloin päästään suurempiin tehoihin. Näin toimitaan esimerkiksi juurikin isompien aurinkovoimaloiden kohdalla. Paneelien sarjaan kytkemisellä saadaan nostettua jännitettä ja rinnan kytkemisellä virtaa.

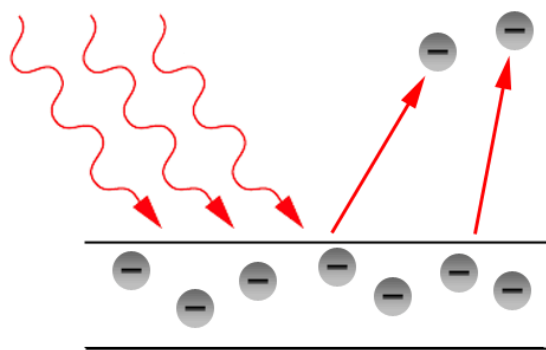
Aiemmin todettiin, että aurinkopaneelin hyötysuhde on parempi kylmällä ilmalla. Jos aivan tarkkoja ollaan, niin itse asiassa hyötysuhde ei kasva, vaan paneelien tuottama teho. Tämä johtuu siitä, että korkeammassa lämpötilassa elektronien energia kasvaa, jonka myötä myös virta kasvaa. Tällä on kuitenkin käänköpuolelana se, että korkeammassa lämpötilassa jännite alenee, ja se alenee suhteessa enemmän kuin virta kasvaa. Kennon sähköteho P saadaan virran ja jännitteen tulosta, eli toisen suureen kasvaessa vähemmän mitä toinen suure kasvaa, kokonaisteho pienenee. Kylmällä ilmalla ilmiö on tietysti toisinpäin: vaikka virta pienenee, niin jännite kasvaa suhteessa enemmän, jolloin teho kasvaa. Ilmiötä esitellään kuvassa 16, johon on piirretty tehokäyrät kolmella eri lämpötilalla.



Kuva 16. Aurinkokennon tuottama kokonaisteho eri lämpötiloilla (vakiosäteilyintensiteetillä).

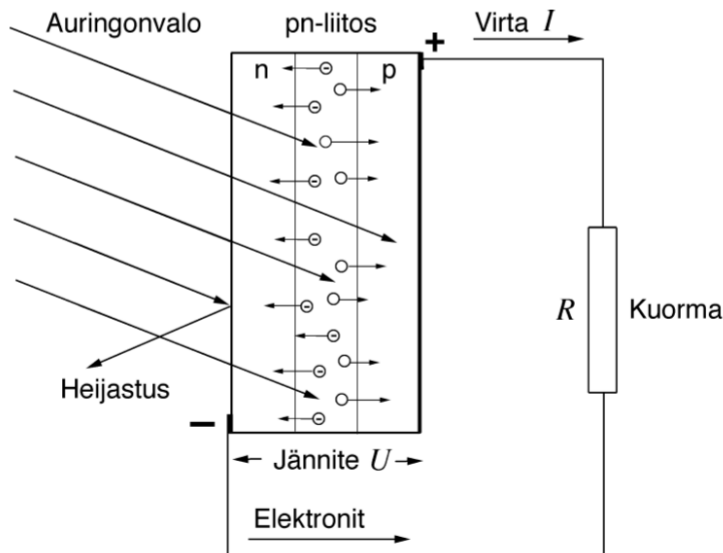
Hieman ehkä intuition vastaisesti, piipohjaiset aurinkopaneelit eivät tuota sähköenergiaa auringon säteilemästä lämmöstä, vaan suoraan auringon säteilystä valosähköisen ilmiön avulla. Auringon lämpöenergian talteenotollakin on oma sovelluksensa sähköenergian tuotantoon (CSP, STE), mutta tässä työssä ei aihetta käsitellä.

Auringon säteily on sähkömagneettista säteilyä, joka taas on energian aaltoina etenevää virtausta tietyn suuruisina pulsseina. Näitä pulsseja kutsutaan fotoneiksi. Fotoni kantaa tietyn määrän energiaa, joka riippuu sen aallonpituudesta. Mikäli fotoni kantaa riittävästi energiaa, voi se saada kappaleessa aikaan valosähköisen ilmiön. Ilmiöllä tarkoitetaan sähköisen tilan muutosta, joka aiheutuu, kun valo osuu kappaleeseen – tässä tapauksessa aurinkopaneeliin. Kuvassa 17 on havainnollistettu tapahtumaa. Fotonin (kuvattu punaisella aaltoviivalla) kantama energia aiheuttaa sen, että atomia kiertävä elektroni (miinusmerkillä merkitty ympyrä) irtoaa orbitaaliltaan ja etsii uuden paikan mihin asettua.



Kuva 17. Valosähköinen ilmiö – elektronin irrotustyö. (Wikipedia – Valosähköinen ilmiö)

Koska elektronilla on sähkövaraus, niin liikuessaan se toimii virrankuljettajana. Virrankuljetus, eli elektronin reitti, ohjataan johtimia käyttäen kuorman – esimerkiksi omakotitalon sähköverkon – kautta ja tällä tavalla valosähköisen ilmiön aiheuttama elektronin liike saadaan hyötykäyttöön. Sanalla sanoen, saadaan siis sähköä. Toiminnan periaatteita on esitelty kuvassa 18.



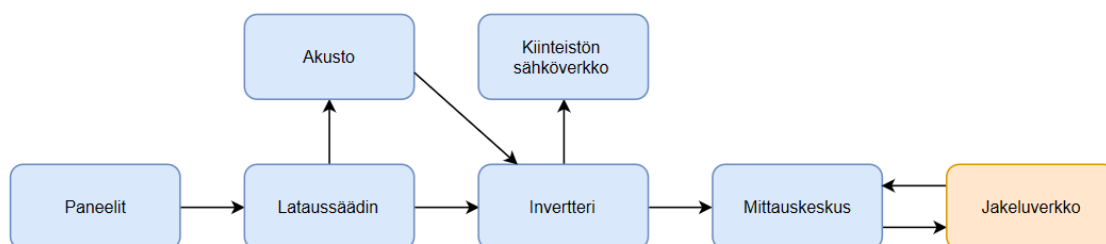
Kuva 18. Havainnekuva aurinkopaneelin toiminnasta. (Suntekno – Aurinkopaneelin toimintaperiaate)

4.3 Aurinkosähköjärjestelmä

Vähimmillään aurinkosähköjärjestelmään kuuluvat paneelit ja kaapelit. Mikäli aurinkosähköjärjestelmällä halutaan syöttää tehoa valtakunnan verkkoon, tarvitaan myös invertteri. Sähkön varastointia varten tarvitaan akusto ja lataussäädin, mutta itse tuotannon kannalta ne eivät ole olennaisia. Laitteisto voi siis vaihdella sen mukaan, onko käyttökohde esimerkiksi saarella oleva jakeluverkon ulkopuolella oleva mökki vai jakeluverkkoon liitetty voimala. Tässä esitelty aurinkosähköjärjestelmä on kuitenkin nimenomaan jakeluverkkoon liitetty voimala, missä sähköä varastoidaan. Aurinkosähköjärjestelmän toiminnallisuutta on esitelty kuvassa 19.

Paneelit keräävät auringonsäteilyn energian ja muuttavat sen sähköenergiaksi. Tuotettu sähkö on tasasähköä, eli se kulkee vain yhteen suuntaan. Kaapeleita pitkin tasasähkö johdetaan lataussäätimelle, minkä tarkoitus on säädellä virta ja

jännite akustolle sopivaksi. Lisäksi lataussäädin estää vuotovirran pääsyn takaisin paneeleille. Lataussäätimeltä sähkö johdetaan joko akustoon tai invertterille. Akusto toimii sähkövarastona, josta se voidaan purkaa invertterille. Invertterin tehtävä on muuntaa tasasähkö jakeluverkolle sopivaksi vaihtosähköksi. Myös kiinteistön sähköverkon laitteet ovat todennäköisesti mitoitettu juuri jakeluverkon arvoille, jolloin omankin kiinteistön syöttäminen invertterin kautta on perusteltua. Sähkö, mitä ei käyttöpaikalle itse voida käyttää, syötetään jakeluverkkoon mittauskeskuksen läpi.



Kuva 19. Aurinkosähköjärjestelmän periaatekuva.

Aurinkovoimalan käyttökustannukset ovat pienet ja laitteisto on lähes huoltovapaa. Se maksaakin itsensä takaisin lähes poikkeuksetta ennen elinkaarensa päättymistä.

Aurinkosähköjärjestelmän liittämisestä verkkoon on tehtävä aina ilmoitus verkonhaltijalle. Verkonhaltijalla tulee olla tieto siitä, mistä kaikkialta verkkoon saattaa virtaa tulla. Ilman tätä tietoa voi tulla tilanne, missä verkkoyhtiö luulee tehneensä verkon vikaantuneen osan jännitteettömäksi erottamalla sen terveestä verkosta, mutta vikapaikkaan kohdistuu jatkuva takasyötön vaara. Lisäksi, jos jakeluverkko ei ole sähköisiltä arvoiltaan tarpeeksi vahva aurinkovoimalan liittämistä varten, niin vikatilanteissa voi ilmoittamattoman laitteiston haltija joutua korvausvelvolliseksi esimerkiksi naapureiden rikkoutuneiden laitteiden takia.

Toimitetun sähkön laatu on verkkoyhtiön vastuulla, ja mikäli mikrotuotantolaitteistot aiheuttavat liiallista häiriötä sähkönjakeluverkossa, on haitan poistaminen verkonhaltijan vastuulla. Tämä on toinen syy, miksi verkonhaltijalle tulee tehdä ilmoitus mikrotuotannon liittämisestä verkkoon. Loppukäyttäjä ei saa käyttää sähkölaitteistoa niin, että siitä aiheutuu vahinkoa tai häiriötä jakeluverkolle tai toisille käyttäjille.

Laitteiston liitettävyyden arviointiin käytetään kaavaa 1

$$S_k \geq \frac{100}{\Delta U\%} * i_{suhde} * S_N \quad (1)$$

jossa S_k = liittämiskohdan oikosulkuteho [kVA]
 $\Delta U\%$ = haluttu jännitteenalenema prosentteina
 i_{suhde} = suhdekerroin liitännätavan mukaan: invertterillä 1, tahti-
generaattorilla 4, oikosulkugeneraattorilla 8
 S_N = liitettävän laitoksen huippupiikkiteho [kVA]

Itse oikosulkutehon voi laskea kaavalla 2

$$S_K = 3 * I_k * U_V \quad (2)$$

jossa I_k = liittämiskohdan yksivaiheinen oikosulkuvirta [A]
 U_V = vaihejännite [V]

4.4 Tuotantoarviot ja sääolosuhteiden vaikutus

4.4.1 Olosuhteiden vaikutus tuotantoon

Kuten aiemmin kävi ilmi, niin aurinkopaneelien tuotanto riippuu hyvin pitkälti säteilyintensiteetistä ja lämpötilasta.

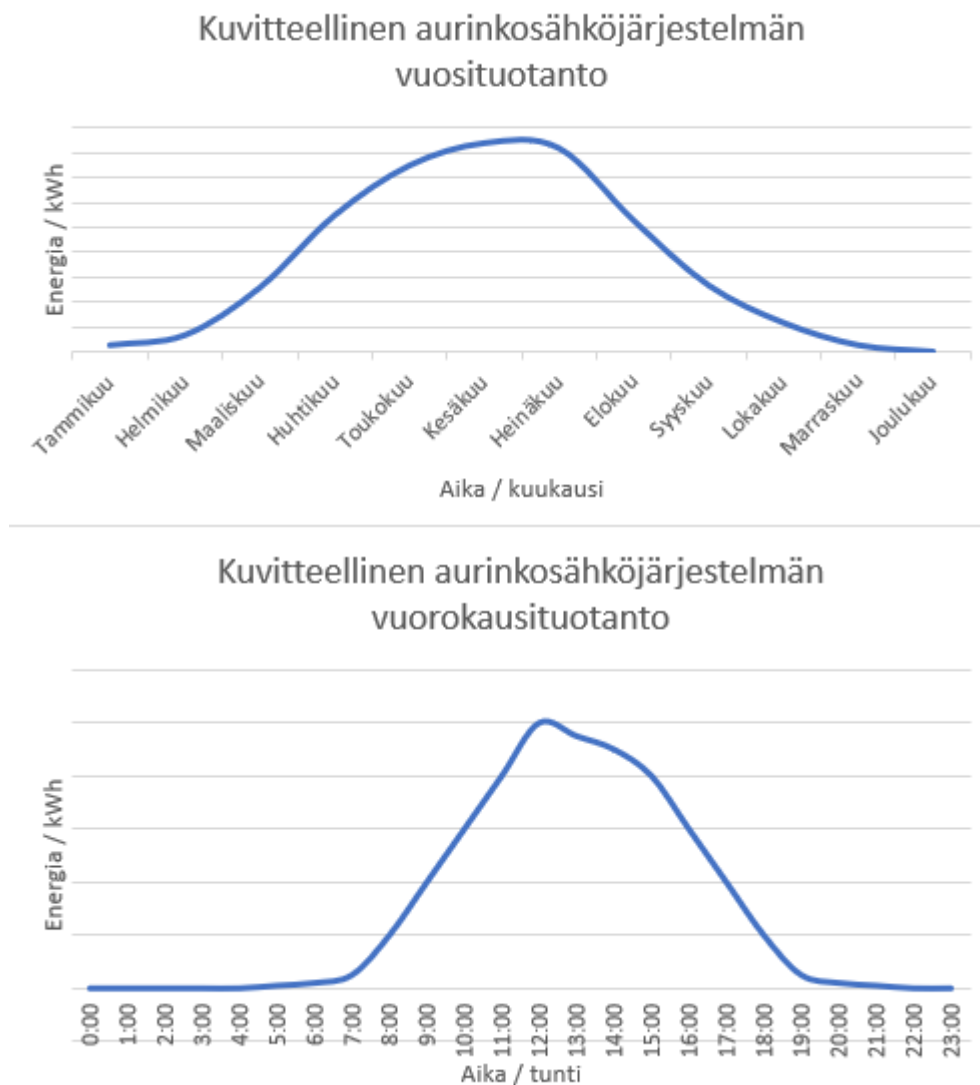
Säteilyintensiteetillä tarkoitetaan auringonsäteilyn antamaa tehoa pinta-alan yksikköä kohden. Tyypillisesti säteilyintensiteetin arvo ilmoitetaan wattia per neliömetri, W / m². Leveysasteesta, ja vuorokauden ja vuoden ajasta riippuen Suomessa intensiteetti saa arvoja nollan ja hieman yli 1000 W / m²:n väliltä. Mitä suurempi säteilyintensiteetti on, sitä suurempi on absorboituvien fotonien määrä. Tämä näkyy edelleen suurempana virtana. Jännitteeseen säteilyintensiteetin määrällä ei ole niin suurta vaikutusta kuin virtaan: säteilyintensiteetillä ja jännitteellä on logaritminen riippuvuus. Jännite kasvaa säteilyintensiteetin kasvaessa, mutta heikosti. (Aurinkosähkön perusteet, s. 52-55)

Lämpötilan vaikutusta kuvattiinkin jo luvussa 4.2.

4.4.2 Aurinkovoimalan tuotantoarviot

Huipunkäyttöaika kuvaa eri voimalaitoksien osalta sitä, kuinka kauan voimalan tulisi vuodessa toimia nimellistehollaan, että vuoden energiantuotanto olisi toteutunut. Esimerkiksi ydinvoimala tuottaa energiaa nimellistehollaan vuoden 8760 tunnista vähintään 8000 tuntia. Aurinkovoimalan huipunkäyttöaika Suomessa on 700-900 tuntia.

Vuosi- ja päivätasolla aurinkosähköjärjestelmän tuotantokäyrä muistuttaa karkeasti arvioiden alapäin aukeavaa paraabelia (kuva 20).



Kuva 20. Kuvitteelliset aurinkosähköjärjestelmän tuotannot eri skaaloilla.

Vaikka y-akseli molemmissa kuvaajissa kuvaakin energiantuotantoa, voisi se yhtä hyvin olla myös säteilyintensiteetti, W / m^2 , koska energiantuotannon ja säteilyintensiteetin välinen riippuvuus on niin selvä. Vuorokausituotannon kuvaajan ei ole tässä tarkoitus ottaa kantaa siihen onko kyseessä talvi- vai kesäpäivä. Jos sen oletetaan olevan esimerkiksi kesäpäivän tuotanto, niin talvipäivän tuotantokäyrä olisi hyvin pitkälti saman muotoinen, mutta tuotannon taso olisi selvästi alempana ja hieman lyhyemmällä aikavälillä. Mainitsemisen arvoista lienee myös, etteivät käyrät tietenkään joka vuosi ja vuorokausi ole samanlaisia eivätkä ne olisi näin ehyitä. Oikein sateisina vuosina koko vuoden tuotanto jää normaalia pienemmäksi, joka näkyy tietysti myös päivätuotannon tasossa.

Kuten todettua, niin todellisuudessa käyrä ei ainakaan vuorokausitasolla olisi näin ehyt, vaan siinä olisi selviä piikkimäisiä notkahduksia. Tuotantoa rikkoo paneelille saapuvan säteilyn määrän putoaminen, joka voi johtua esimerkiksi pilvistä tai huonosti sijoitettujen paneelien kohdalla puiden varjoista. Lyhytaikaisia piikkejä saattaa olla myös korkeammille energiantuotantotasolle. Nämä piikit johtuvat siitä, että suoran auringonsäteilyn lisäksi paneeliin kohdistuu myös pilvien taittamaa auringonsäteilyä. Tällöin paneeleille saapuva auringonsäteilyn määrä nousee hetkellisesti keskimääräistä suuremmaksi, mutta kokonaistuotannon kannalta näillä ei kuitenkaan ole mainittavaa vaikutusta.

Tuotanto on siis vahvasti olosuhteista riippuvainen. Suurin rooli asiassa on säteilyintensiteetillä. Paneelien lämpötilalla on tuotantoon oma vaikutuksensa, ja kuten todettua, niin paneelit toimivat paremmin kylmässä. On kuitenkin huomattava, että kylmällä ilmalla korkea säteilyintensiteetin taso ei ole kovin pitkäaikaista.

4.5 Muut aurinkopaneelityypit

Aurinkopaneelien yleistymisen suurin kynnyskysymys yleisesti ottaen on hinta, ja nimenomaan hinta per tuotettu kilowattitunti. Hintaa voidaan alentaa joko parantamalla hyötysuhdetta säilyttäen nykyiset valmistuskustannukset, laskemalla nykyisiä valmistuskustannuksia tai kehittämällä uusia teknologioita. Piikkenojen kohdalla näyttäisi siltä, että nimenomaan valmistuskustannusten alentaminen on isommassa roolissa.

Muunkinlaisia kennotyyppejä kuitenkin on. Yksi kennotyyppi on väriainekenno, jonka etuna tuntuisi olevan nimenomaan halvat valmistuskustannukset. Hyötysuhteeltaan väriainekennot eivät toistaiseksi pääse lähellekään piipohjaisia kennoja, mutta hinta tulee todennäköisesti olemaan valtti piipohjaisten aurinkopaneelien kanssa. Tätä kirjoittaessa ei väriainekkenoja ole juurikaan kaupallisesti hyödynnetty, vaan niiden kehittäminen on edelleen kesken.

On varmasti helppo ymmärtää, että huonon hyötysuhteen kennot vaativat paljon pinta-alaa siihen nähden mitä paremman hyötysuhteen kennoilla voidaan tuottaa. Parhaimman hyötysuhteen – ja sitä myöten vähiten tilaa vievät - kennot ovat moniliitoskennoja. Piipohjaisten kennojen energia-aukko on aina saman suuruinen. Käytännössä tämä tarkoittaa siis, että energiaa vapautuu ainoastaan tietyn aallonpituuden omaavista fotoneista. Moniliitoskennoissa energia-aukon suuruus kuitenkin vaihtelee, jolloin kenno absorboimaan fotoneita tehokkaammin (määrältään enemmän). Päinvastoin kuin väriainekkennoissa, näiden valmistaminen on kuitenkin huomattavan paljon kalliimpaa, ja sovelluskohteet yleensä liittyvätkin nimenomaan laitteisiin ja koneisiin, joiden koko on rajoitettu. Tällaisia laitteita ja koneita ovat esimerkiksi avaruussukkulat ja satelliitit.

Yksi tällä hetkellä lupaavimmista kennotyypeistä on perovskiitti-kennot. Perovskiitti-kennot ovat nopeimmin kehittynyt aurinkokennoteknologia. Tällä hetkellä perovskiitti-kennot ovat hyötysuhteeltaan hyvin lähellä piipohjaisia aurinkokennoja (laboratorio-olosuhteissa piipohjaisten aurinkokennojen hyötysuhde-ennätys on 26,7 % ja perovskiitti-kennojen 25,2 %) (Scitech Daily). Hyötysuhteet ovat siis hyvin lähellä toisiaan, ja selvästi halvempien valmistuskustannusten takia perovskiitti-kennoilla voisi helposti kuvitella olevan etulyöntiasema piipohjaisiin kennoihin verrattuna. Teknologiasta ei voi vielä kuitenkaan puhua muuta kuin kesken-eräisenä. Perovskiitti-kennojen elinikä saattaa olla sen verran lyhyt, ettei laitteisto maksaisi itseään koskaan takaisin.

5 SÄHKÖMARKKINAT JA JAKELU TULEVAISUUDESSA

Tulevaisuuden sähkömarkkinoita muokkaavat vahvasti luvussa 3 esitetyt reunaehdot, tekniikat ja sosiaaliset kysymykset. Verkonhaltijoiden on pakko lisätä automatiikkaa jakeluverkossa, että kysyntäjousto, kotitalouksien mikrotuotanto ja tehojen hallinta sähkövarastojen avulla saadaan osaksi arkea. Älykkäiden sähköverkkojen rakentaminen on edellytys tulevaisuuden sähkönjakelulle. Erityisesti tehotasapainon säilyttäminen tulevaisuudessa tulee olemaan totuttua vaikeampaa, koska säätövoimana käytettyjen fossiilisten polttoaineiden tuotanto vähenee. Tämä on toki enemmänkin kantaverkon haltijan, Fingridin, ongelma kuin jakeluverkon haltijoiden.

Seuraavaksi käsitellään omien otsikkojensa alla todennäköisiä seuraamuksia siitä, mitä tulevaisuuden asettamat haasteet tarkoittavat sähkökäyttäjille ja verkonhaltijoille. Asioita on vaikea käsitellä missään tietyssä järjestyksessä, koska jokaisella asialla on olemassa toisiinsa jonkinasteinen syy-yhteys.

5.1 Tehomaksu

Helpoin väite aiheesta on, että tulevaisuudessa tehomaksu tulee olemaan yksi laskutusperusteista jokaisella siirtoyhtiöllä. Vaikka jakeluverkossa siirretyn energian määrä tulee todennäköisesti laskemaan, niin kiinteistöjen kuormat tulevat kuitenkin olemaan sen luonteisia, että ne tarvitsevat suuremman huipputehon (lämpöpumput, sähkö-/hybridiautojen pikalatauspisteet). Tällöin joudutaan siirtoyhtiöiden kannalta epäedulliseen asemaan: verkot mitoitetaan aina huipputehon mukaan – oli tehopiikin kesto kuinka lyhyt tahansa – mutta investoinnit vahvaan verkkoon eivät enää korreloikaan siirretyn energian määrän kanssa. Investointeja ei voi enää kattaa pelkillä siirtomaksuilla, ainakaan nostamatta perusmaksua merkittävästi.

Tehomaksua puoltaa myös hajautetun mikrotuotannon kasvu. Hajautettu mikrotuotanto ei pienennä tarvittavia huipputehoja, mutta verkossa siirretyn energian määrä laskee, koska sille ei ole oman tuotannon takia tarvetta. Verkon vahvista-

minen laitteiston liitettävyyden varmistamiseksi on siirtoyhtiön vastuulla. Siirtoyhtiön kannalta tämä voi pahimmillaan tarkoittaa sitä, että verkkoon pitää kohdistaa kalliita saneeraustoimenpiteitä, joiden tuloksena saadut siirtomaksut putoavat.

Tehomaksu on lähtökohtaisesti ajatukseltaan hyvä. Se antaa kuluttajille aiempaa paremman mahdollisuuden vaikuttaa omaan sähkölaskuunsa kannustaen samalla tasaisempaan kulutukseen. Siirtomaksuilla pitää kuitenkin kattaa jakeluverkon ylläpitokustannukset. Nämä kaksi asiaa ovat hieman ristiriidassa toistensa kanssa, joten tehomaksun tasapuolinen ja tasapainoinen toteutus on vaikeaa.

Tällä hetkellä kaksi siirtoyhtiötä on ottanut tehomaksun laskutusperusteeksi, Hellen Sähköverkko ja LE-Sähköverkko Oy. Tehomaksu on laskulla nimenomaan kolmantena rivinä. Tehomaksun kanssa on siirretyn energian hinta hieman pienempi, mutta perusmaksuun sillä ei ole vaikutusta. Maksu määräytyy edellisen 12 kuukauden suurimman huipputehon perusteella. Tämä on ongelma, koska huipputeho ei aina ole välttämättä kuluttajan hallittavissa. Jokin suuritehoinen laite voi yksinkertaisesti vikaantua tai kylmä talvipäivä voi aiheuttaa hetkellisen piikin, jonka kustannukset näkyisivät vielä seuraavana kesänä ja edelleen myös seuraavana talvena, jolloin on jälleen uhka yhdelle kylmälle talvipäivälle.

Yllä esitetty toteutus on huono kuluttajan ja energianhallinnan kannalta, koska 12 kuukautta on liian pitkä aika odotettavaksi. Kuten sanottu, niin yksikin kylmä talvipäivä tai vikaantunut laite tuomitsee kuluttajan maksamaan korotettua sähkölaskua seuraavat 12 kuukautta. On tietysti muistettava, että vikaantunut laite on aina laitteen käyttäjän vastuulla. Kuitenkin, koska vahinko on jo tapahtunut, niin suurin osa kuluttajista ei edes yritä enää kulutustottumuksiaan hallita. Kaiken lisäksi, vaikka kuluttaja hoitaisi laitteensa ja seuraavat 12 kuukautta pienillä tehoilla, niin vikatilanteita on vaikea ennakoida, ja uusi kylmä talvipäivä voi tehdä ponnisteluista hukkatyötä. Lyhyesti sanottuna siis: tehomaksu tällaisenaan ei ole riittävä kannustin tehohuippujen leikkaamiseksi. Tehomaksu on lisäksi asiakas-kohtainen, eli jos sähkönkäyttöpaikan asiakas aiheuttaa huomattavan ison teho-
piikin, on mahdollista, että asukas lopettaa myyntisopimuksensa ja käyttöpaikalle otetaan uusi sopimus uuden asiakkaan nimissä. Tämä tulee johtamaan kikkailuun sopimusasioissa, jota yksikään verkkoyhtiö ei varmastikaan halua.

Yksi tehomaksun tarkoitus on siis ohjata kulutusta tasaisemmaksi ja leikata tehohuippuja, mutta aiemmin esitellyllä tavalla sen vaikutukseen on vaikea uskoa. Tehomaksu tulisi sitoa lyhyempään ajanjaksoon, esimerkiksi 3 kuukauden liukuvaan keskiarvoon, tai vähintäänkin jakaa tehomaksut talvi- ja kesäaikaan vuodenaika-siirtotuotteen tapaan. Tehomaksu kolmantena laskurivinä ei sinänsä haittaa, mutta tässä tapauksessa perusmaksua tulisi joidenkin verkonhaltijoiden osalta kuitenkin kohtuullistaa. Verkon rakenteiden (haja-asutusalueiden verkko vs. taajamat) takia siirtomaksujen rakennetta ei voi yhtenäistää, vaan niiden määrittely on jätettävä siirtoyhtiöille.

5.2 Uuden sukupolven älymittarit

Hajautetun mikrotuotannon takia tehoa on kyettävä siirtämään kulutuskohteista takaisin verkkoon. Samaan aikaan on kyettävä tasaamaan sähkönkäyttäjien kulutusta ja parantamaan toimitusvarmuutta. Kaiken lisäksi, koska Suomi on matkalla kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa, pitää tämä kaikki tehdä puhtaampien energiamuotojen asettamien reunaehtojen sisällä.

Toteutuksen keskiössä tulevat olemaan älymittarit. Mittarit tulevat olemaan nettottavia mittareita. Joillain verkkoyhtiöillä netotus on jo käytössä, mutta tulevaisuudessa ne ovat käytössä kaikilla. Tällä hetkellä sähkönkäyttöpaikalla voi tulla esimerkiksi sellainen tilanne, että päivällä käyttöpaikka on omavarainen, koska omat paneelit tuottavat 20 kWh ja kulutus on 10 kWh. Mikäli mittari ei netota, niin oma mikrotuotanto on syötettävä takaisin verkkoon myytäväksi (mikäli oman tuotannon myymisestä on tehty sopimus). Yöllä jos käyttöpaikan energiankulutus on toiset 10 kWh, niin se on ostettava verkosta. Netottavalla mittarilla omaa tuotantoa voi hyödyntää paremmin, koska kulutukset 10 kWh + 10 kWh voidaan kuitata omalla mikrotuotannolla. Eli: jos vaiheiden välillä tulee pieniäkin ajankohtia (millisekunteja), jolloin tuotantoa on liikaa tai liian vähän, niin normaalilla mittarilla energia syötetään verkkoon tai otetaan verkosta. Netottava mittari osaa kuitenkin sananmukaisesti netottaa tuotannon ja kulutuksen pidemmältäkin aikaväliltä.

Hajautetun mikrotuotannon myötä muodostuu omia pieniä alueitaan, joissa energia on jaettava mahdollisimman tehokkaasti. Todennäköisesti mittarit tulevatkin keskustelemaan toistensa kanssa, jolloin energianjako tehokkaimmin onnistuu.

Kaikki ominaisuudet eivät tietenkään liity pelkästään tuotannon ohjaamiseen. Mittareihin tulee jonkinasteista kuormanohjauskykyä, jonka avulla esimerkiksi kulutusjousto voidaan toteuttaa. Huipputehopiikkien leikkaaminen ja sitä myöten kulutuksen tasaamisen mahdollistaminen tulee olemaan mittareiden ylläpitäjillä, eli verkonhaltijoilla. Mittareiden kehitys voi olla alkuun hyvinkin rajallista, koska sitä ei tehdä markkinoiden ehdoilla vaan Energiaviraston ohjauksesta. Asian ympärille kuitenkin muodostunee uutta liiketoimintaa, ns. aggregaattoritoimintaa, joka saattaa kiihdyttää mittarien kehitystä. Aggregaattoritoiminnasta kerrotaan lisää luvussa ”5.4 – Yhteiskunnalliset vaikutukset”.

Edellisessä luvussa spekuloitu tehomaksukin vaatii uudenlaista mittausta. Nykyiset mittarit tallentavat kulutusta tunnin välein niin sanottuina tuntisarjoina. Huipputehon määrittäminen tuntisarjojen perusteella ei kuitenkaan anna oikeaa kuvaa kuormasta. Jos 5 kilowatin laitetta käytetään tasaisesti tunnin, niin mittari mittaa energiaksi 5 kilowattituntia ja määrittää huipputehon sen mukaan 5 kilowattiin. Tässä tapauksessa se on tietysti oikein, mutta ongelmat liian harvasta mittauksesta tulevat esiin siinä tapauksessa, jos esimerkiksi 10 kilowatin laitetta käytetään 30 minuuttia: käytetty energia on edelleen 5 kWh, mutta huipputeho on 10 kW. Nykyinen mittari antaisi kuitenkin tulokseksi 5 kW. Tämän takia tulevaisuudessa uudet mittarit tallentavat kulutustietoja 15 minuutin välein, eli keräävät ns. varttisarjoja. Aikaisimmillaan varttisarjoja aletaan kuitenkin tallentamaan vasta vuoden 2021 loppupuolella (Fingrid).

Riippuen tietysti uusien mittarien kuormanohjausominaisuuksista, sähkön loppukäyttäjällä on mahdollisuus saada kuormanohjaus panostamatta kodin automaatiikkaan. Omakotiliiton viittaaman, Gaia Consulting Oy:n ja Pöyry Oy:n tekemän tutkimuksen mukaan älymittareilla tehty kuormanohjaus maksaisi 22 miljoonaa euroa, josta kustannus yhdelle kotitaloudelle olisi noin 16 euroa. Jos kuormanohjaus toteutettaisiin joka kohteessa automaatiolla, maksaisi se yhteensä 1,4 miljardia euroa. (Omakotiliitto, 24.10.2018)

5.3 Älykkäät sähköverkot ja sähkövarastot

Älykkäät sähköverkot itsessään eivät ole ehkä jotain mihin pyritään, vaan se on enemmänkin abstrakti päämäärä, joka syntyy ja muovautuu sitä mukaa, kun perinteiseen sähköverkkoon sisällytetään jotain älyä – kuten edellä mainitut älymitarit. Visiot siitä, mitä älykäs sähköverkko oikeasti tarkoittaa, tietysti auttavat.

Yksi visioista on toimitusvarmuuden parantaminen. Toimitusvarmuuden parantamisessa auttavat tulevaisuudessa sähkövarastot, jotka tulevat olemaan olennainen osa jakeluverkkoa. Vikatilanteiden sattuessa voidaan muusta verkosta erotettua saareketta syöttää sähkövarastojen energialla.

Toinen asia, missä sähkövarastoista on hyötyä, on tehotasapainon ylläpitämisen helpottaminen. Tehotasapainon säilyttäminen tulevaisuudessa on entistä vaikeampaa, koska sääriippuvaisten energiamuotojen tuotanto on vaikeampi ennustaa. Lisäksi säätövoimana käytetty fossiilisin polttoainein tuotettu energia poistuu. Tällöin, kun tuotantoa on liikaa niin energia voidaan ohjata sähkövarastoihin. Kun kulutus ylittää tuotannon voidaan energia jälleen syöttää verkkoon. Kuten jo aiemmin luvussa 3.2 pohdittiin, niin myös sähkö- ja hybridautojen akut auttavat kulutusjouston ja tehotasapainon toteuttamisessa toimimalla osana jakeluverkkoa sähkövarastona. Ladattavien ajoneuvojen hyödyntäminen osana jakeluverkkoa vaatinee kuormanohjausominaisuuksia uusilta älymittareilta.

5.4 Yhteiskunnalliset vaikutukset

Asia on moneen kertaan työssä jo käynytkin ilmi, mutta ilmeisin vaikutus sähkömarkkinoiden uudistumiseen on pyrkimyksillä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Suomen tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tämä on selvästi nopeampi tavoite kuin Euroopan Unionin asettama vuosi 2050. Suomen tavoite onkin olla maailman ensimmäinen hiilineutraali yhteiskunta.

Hiilineutraaliutta kohti pyritään uusiutuvilla energiamuodoilla. Kotitalouksien oma mikrotuotanto on kasvanut viime vuosina voimakkaasti, ja vaikka kasvukäyrä onkin hieman taittumaan päin, on se silti edelleen vahvassa kasvussa. Useiden eri mikrotuotantolaitosten osallistuminen sähkömarkkinoille erikseen ei ole erityisen

tehokasta, ja voikin olla, etteivät sähkönmyyjät tulevaisuudessa enää tee sähkönostosopimuksia yksityisten kotitalouksien kanssa. Tällöin useat pienkulutus- ja mikrotuotantokohteet on koottava yhdeksi isommaksi kokonaisuudeksi. Tämän ympärille tulee muodostumaan uutta liiketoimintaa. Tätä liiketoimintaa toteuttavasta tahosta käytetään nimitystä aggregaattori.

Aggregaattori on siis se toimija, joka muodostaa useasta pienkulutus- ja/tai mikrotuotantokohteesta isomman kokonaisuuden. Tämä kokonaisuus osallistuu sähkömarkkinoille joko toimien tehoreservinä pienentämällä kulutusta tai myymällä omaa mikrotuotantoa ulos. Tällä tulee olemaan oma roolinsa tehotasapainon säilyttämisessä – aiheesta kerrottiin hieman luvussa 3.3. Aggregaattori hoitaa siis virtuaalivoimalaitostoiminnan. Kuvassa 1 esiteltiin sähkömarkkinoilla toimiviin tahoihin voisikin lisätä aggregaattorin. Monella voisi ensimmäinen arvaus olla, että sähkönmyyjät ottaisivat virtuaalivoimalaitostoiminnan omaksi myyntiartikkeliksi sähkön rinnalle, eikä se huono arvaus olisikaan. Myyjille askel olisi varmasti luonteva ottaa, mutta luonteeltaan virtuaalivoimalaitostoiminta tulee olemaan enemmän datan hallintaa kuin sähköteknistä suorittamista, koska vaadittavat sähkötekniset ominaisuudet löytyisivät verkonhaltijoiden älymittareista. Tämän takia aggregaattorina voi toimia käytännössä mikä tahansa taho.

Yksi tehoreservin sovellus voisi tulla kyseeseen myös maksamattomien sähkölaskujen kanssa. Tällä hetkellä sähkö voidaan katkaista, mikäli asiakkaan maksuvelvollisuudet sähkön toimituksen suhteen jäävät hoitamatta. Jokaisella alueella on kuitenkin sähkönmyyjäyhtiö, jolla on sähkön toimitusvelvollisuus asiakkaille. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkö katkaistaan, ja paperitöiden jälkeen ne palautetaan. Turhaa työtä voidaan välttää sähkön katkaisujen sijaan rajoittamalla tehoa niin, että elämiselle välttämättömimmät suuritehoiset laitteet, kuten esimerkiksi uuni tai liesi, toimivat. Tämä ei todennäköisesti kuitenkaan ole aggregaattorin tehtävä, vaan verkonhaltijan.

5.5 Kotitalouksien hajautettu mikrotuotanto ja sähkövarastot

Kotitalouksien mikrotuotannolla tulee olemaan iso rooli murroksessa. Verkonhaltijoille hajautettu mikrotuotanto on kaksiteräinen miekka: se vaatii isoja investointeja jakeluverkkoon ja mittareilta uudenlaisia ominaisuuksia, vähentäen kuitenkin

verkossa siirrettyä energiaa ja sitä myöten saatuja siirtomaksuja. Kaiken lisäksi mikrotuotantoon kannustetaan myös poliittisin toimin tarjoamalla erilaisia tukia ja kannustimia hankkia mikrotuotantolaitteisto. Sähkön loppukäyttäjän kannalta tämä on tietysti hyvä asia, koska se tarjoaa energiaomavaraisuutta puhtaalla helppohoitoisella energiantuotantomuodolla.

Oman energiantuotantolaitteiston pääasiallinen tarkoitus on siis vähentää tarvetta ostaa sähköenergiaa verkosta. Tarkoitus voi olla myös tuotetun energian myyminen sähkömyyjille. Tällä hetkellä omalla laitteistolla tuotetun sähkön myymisestä saa kuitenkin niin heikon korvauksen, että laitteisto kannattaa mitoitaa oman kulutuksen mukaan, jolloin verkkoon siirretty energian määrä on mahdollisimman pieni.

Tulevaisuudessa ylimitoittaminen saattaa kuitenkin olla taloudellisesti kannattavampaa – etenkin jos ylimitoitettuun laitteistoon yhdistää akuston. Tällä hetkellä akustojen hankkiminen ei ole erityisen järkevää taloudellisesta näkökulmasta, mutta akkuteknologia menee jatkuvasti eteenpäin, ja jossain vaiheessa se saavuttanee tason, jolla akustojen hankinta kannattaa. Ylimitoitettujen laitteistojen avulla on sähkökäyttäjällä paremmat edellytykset osallistua joustomarkkinoille tehoreservinä. Tehoreservinä toimimisesta maksetaan käyttöpaikkakohtaisesti jotain korvausta.

Kun akustojen hinnat laskevat sille tasolle, että niiden hankkiminen on taloudellisesti järkevää, niin sähkön omavaraisuusastetta on mahdollisuus nostaa niin, että suurimman osan vuotuisesta energiantarpeesta voi tuottaa itse. Kotitalouksien sähkövarastot yhdistettynä huipputeholtaan isoon mikrotuotantolaitteistoon antavat paremmat mahdollisuudet osallistua aiemmin esitellyille joustomarkkinoille.

On olemassa yrityksiä, esimerkiksi suomalainen Polar Night Energy Oy, jotka kehittävät kesällä, aurinkopaneelein ja tuulivoimaloin, kerätyn energian varastointia talvikuukausille. Konsepti on hyvin yksinkertainen: aurinkopaneelein ja/tai tuulivoimalla kerätyn energian avulla lämmitetään maan alla oleva säiliö 300-500 celsiusasteiseksi. Säiliössä lämpövarastona toimii hiekka. Säiliön hiekasta energiaa

jaettaisiin kiinteistölle lämpönä. Tällä tavalla sähköenergian tarve lämmitystä varten vähenee, ja sähkönkulutus painottuu enemmän. Tuotantolaitteistolla kerätty energia ei kuitenkaan mene kokonaan säiliön lämmittämiseen, vaan osa ohjataan normaalisti sähköenergiana kiinteistön käyttöön. Polar Night Energyn järjestelmässä kerätystä energiasta 30 % käytetään sähköistykseen ja 70 % lämpöenergian varastointiin. (Polar Night Energy)

5.6 Sähkön hinta

Arvioidaan vielä lopuksi, millä tavalla tulevaisuuden sähkömarkkinoilla sähkön kokonaishinta muodostuu.

Luvussa 2.4 todettiin sähkön kokonaishinnan muodostuvan kolmesta osasta: sähköenergian hinta (myynti), sähkön siirtomaksut ja verot. Tämä karkea jako pitänee tulevaisuudessakin paikkaansa, mutta suhteet saattavat hieman heilailtaa.

Tällä hetkellä sähkövero on kiinteä maksu (sähköveroluokka I 2,253 snt / kWh ja sähköveroluokka II 0,703 snt / kWh) (Vero.fi). Yksi ajatus verouudistukseksi on ollut suhteellinen, sähkön markkinahinnasta riippuvainen vero. Kuten luvussa 2.4 todettiin, niin korkeamman kulutuksen tunneilla sähkön hinta on korkeampi. Hinta määräytyi kysynnän ja tarjonnan mukaan. Sähkön kulutuksen siirtäminen halvoille, vähäisemmän kysynnän tunneille olisi siis suhteellisella verotuksella taloudellisesti kannattava. Tämä antaisi sähkönkäyttäjille myös paremmat mahdollisuudet vaikuttaa omaan sähkölaskuunsa. Haasteet tulevat siitä, että yksilötasolla ei sähkön markkinahintaan voi juurikaan vaikuttaa. Sähkön markkinahinnan heilautus vaatisi kollektiivista toimintaa, johon pyritään kannustamaan työssä aiemmin esitellyillä keinoilla.

Tuotantotapoihinkin tullaan tulevaisuudessa varmasti puuttumaan myös verotuksen keinoin. Verotus lienee tulevaisuudessa hieman ajoneuvoveron tyyppinen, eli verot ovat sitä isommat mitä enemmän päästöjä tuotantomuoto aiheuttaa.

Siirtohinnan rakenne muuttunee viimeistään uusien älymittarien tulon myötä. Varttisarjojen myötä tehomaksun käyttöönotto lienee väistämättä edessä, jonka

seurauksena siirretyn energian ja perusmaksunkin suhteet muuttuvat. Siirtoyhtiöt määrittelevät itse maksujen suuruudet. Luultavasti maksun käyttöönotossa, ja ylipäätään siirtomaksun hinnoittelun muutoksessa, on pieni siirtymäaika. Kertamuu-
tosta ei voida tehdä senkään takia, että verkon säävarmaksi saattaminen (lähinnä maakaapeloinnin keinoin) on suurelta osin vielä kesken. Verkko on saatettava säävarmaksi vuoteen 2029 mennessä, eikä tämä ole kaikille siirtoyhtiöille mahdollista. Sähkönkäyttäjälle tehomaksun ottaminen laskutusperusteeksi antaa toivottavasti aiempaa paremmat mahdollisuudet vaikuttaa sähkömaksuihin.

Jollain aikataululla siirtohintaan saattaa vaikuttaa myös maaseutujen ja syrjäisempien haja-asutusalueiden autioituminen. Näillä seuduilla sähköverkkoa lähinnä puretaan, jolla on vaikutusta sallittuun kohtuulliseen tuottoon. On kuitenkin vaikea arvioida kuinka nopeasti ja vahvasti tällä on vaikutusta. Siirtoyhtiöille voisi lisäksi olla tarkoituksenmukaista jättää kaapeloimatta sellaiset alueet, joiden asukasmäärän arvioidaan laskevan selvästi tulevaisuudessa, jos verkko vain on muulla tavalla saatettavissa säävarmaksi.

Aiemmin arvioitiin, että kasvavat tehot eivät välttämättä tarkoita kasvavaa energian tarvetta. Tällä on oma vaikutuksensa sähköenergian kysyntään, kuten on myös hajautetulla mikrotuotannolla. Fossiilisia polttoaineita käyttäviä tuotantolaitoksia ajetaan ajan myötä alas, mutta tilalle rakennetaan uusiutuvia energiamuotoja käyttäviä voimaloita. Kysyntään vastataan varmasti jatkossakin hyvin pitkälti samalla tasolla kuin nyt, eli sähkön myyntihinnan kohdalla historia saattaa hyvinkin toistaa itseään (kuva 9, s. 20). Mikäli Suomi ei tulevaisuudessa ole tuontisähköstä – ja erityisesti Norjasta tuotavasta sähköstä – riippuvainen, niin sähköenergian hinnan vaihteluväli saattaa olla hieman pienempi. Sähkövarastojen kehitymisellä saattaa olla myyntihintaan isokin vaikutus, mutta niiden nykyisellä kehitysvauhdilla ei vaikutusta ole kovin nopeasti odotettavissa.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä pyrittiin esittelemään lyhyesti nykypäivän sähkömarkkinat, arviomaan mitkä asiat siihen tulevaisuudessa ja miten mainitut asiat sähkömarkkinoihin vaikuttavat. Tulevaisuuden ennustaminen on aina vaikeaa, mutta arvaukset ovat pyritti perustelemaan riittävän hyvin.

Yksi aihe, mille oli tarkoitus antaa painoarvoa, oli sähkömaksujen hintakehitys. Siirtohinnan spekulointi sai selvästi eniten huomiota ja sen käsittelyn seikkaperäisyys oli tyydyttävä. Asiasta olisi kuitenkin saanut kattavamman katsannon kysymällä verkkoyhtiöidenkin näkemystä asiasta. Verotuksen käsittely ei erityisen laajaa ollut, mutta toisaalta esille tuotiin olennainen ajatus aiheesta: tulevaisuudessa myös verotuksen keinoin saatetaan kulutusjousto ja pienempään kulu- tukseen kannustaa. Myyntihinnan käsittely jäi näistä kolmesta selvästi ohkaisimaksi.

Lukijalle oli tarkoitus antaa eväät arvioida sähkömarkkinoiden toimintaa, ja sitä myöten arvioida omien ratkaisujensa vaikutuksia sähkömaksuihin. Tämä onnistui melko hyvin. Lisäarvoa työlle saisi selvittämällä tarkemmin älymittareiden kuormanohjausominaisuuksia. Myös kotitalouksien sähkövarastoille olisi voinut antaa isomman roolin.

Kotitalouksien mikrotuotanto nostettiin esille omana isona kokonaisuutenaan, mutta kannattavuustarkastelun sijaan tyydyttiin toteamaan, että laitteisto maksaa itsensä takaisin lähes poikkeuksetta. Kannattavuustarkastelua olisi tarkoituksenmukaista tehdä sekä nykypäivän että tulevaisuuden kannalta. Korvaukset teho- reservinä toimimisesta ovat tässä vaiheessa kuitenkin vaikea arvioida, aggregaattorit eivät ole vielä murtautuneet sähkömarkkinoille eivätkä sähkövarastot ole vielä hinnan ja energianvarastointikyvyn suhteeltaan järkevä hankinta, joten tulevaisuuden kannattavuusarvioimisessa oli liikaa kysymysmerkkejä. Epävarmuuk- sien väistyttyä saisi työtä laajennettua kannattavuuslaskelmien myötä.

Työ onnistui hyvin, eikä yllä mainittujen asioiden lisäksi mitään olennaista jäänyt mainitsematta.

LÄHTEET

1. Säteilyturvakeskus. 27.12.2017. Luettu 4.9.2019. https://www.stuk.fi/documents/12547/103407/Sahkonsiirto_piiirros.pdf/1216a642-2cba-4543-9aa4-838871405c87
2. Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä. Luettu 1.9.2019. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>
3. Fingrid, Yleisesite: Kohti puhdasta sähköjärjestelmää. Luettu 1.9.2019. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid_yleisesite_fi.pdf
4. Fingrid, Sähköjärjestelmän hallinta. Luettu 1.9.2019. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/sahkojarjestelman-hallinta/>
5. Säteilyturvakeskus, sähkönsiirto ja jakelu. Luettu 28.11.2019. <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>
6. Finlex Sähkömarkkinalaki. Luettu 3.9.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>
7. Energiavirasto, Verkkotoiminnan luvanvaraisuus. Luettu 3.9.2019. <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus>
8. Energiateollisuus – Sähköverkkojen rakenne. Luettu 3.9.2019. <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot>
9. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia – Sähkönsiirtohinnot ja toimitusvarmuus. Luettu 21.9.2019. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43_18_Sahkonsiirtohinnot_ja_toimintavarmuus.pdf
10. Energiateollisuus – Sähkötalastot. Luettu 6.9.2019. https://energia.fi/ajan-kohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot
11. Jarmo Markkanen, Satu Viljainen, Jukka Lassila, Samuli Honkapuro, Kaisa Salovaara, Salla Annala & Mari Makkonen. 2018. Sähkömarkkinat – Opetusmoniste.
12. Energiuutiset. Luettu 6.9.2019. <https://www.energiuutiset.fi/etusivu/keskittymisen-kynnyksella.html>
13. Esa Vakkilainen ja Aija Kivistö. 2017. Sähkön tuotantokustannusvertailu. Luettu 21.9.2019. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/Sähkön%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y
14. Energiateollisuus – sähkönsiirron hinnoittelu. Luettu 21.9.2019. https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkonsiirron_hinnoittelu.html
15. Energiavirasto – tietoa meistä. Luettu 9.9.2019. <https://energiavirasto.fi/energiavirasto>
16. Wikipedia – Energiavirasto. Luettu 11.9.2019. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Energiavirasto>
17. Tieteen kuvalehti. Luettu 17.8.2019. <https://tieku.fi/luonto/ilmastonmuutos/mista-vapautuu-eniten-hiilidioksidia>
18. Tesla.com – Powerwall. Luettu 30.10.2019. https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall
19. Yle Uutiset: Sähkölasku pian nolla euroa. Luettu 6.11.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-11041311>
20. Wikipedia – Sähköauto. Luettu 30.10.2019. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Sähköauto>

21. International Energy Agency -National Survey Report of PV Power Applications in Finland – 2018. Luettu 17.8.2019. http://www.iea-pvps.org/index.php?id=93&elD=dam_frontend_push&docID=4852
22. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pvgis_Europe-solar_opt_publication.png
23. Sponda.fi – <https://www.sponda.fi/uutishuone/tiedotteet/kauppakeskus-eroon-valmistuu-suomen-ensimmainen-yli-megawatin-kattorakenteinen-aurinkovoimala>. Luettu 23.1.2020. <https://www.sponda.fi/uutishuone/tiedotteet/kauppakeskus-eroon-valmistuu-suomen-ensimmainen-yli-megawatin-kattorakenteinen-aurinkovoimala>
24. Motiva – Aurinkolämpösanasto. Luettu 17.8.2019. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolamposanasto
25. Aurinkosähköä kotiin – Aurinkopaneelien sijoitus ja suuntaus. Luettu 18.8.2019. <https://aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkopaneelien-sijoitus-ja-suuntaus/>
26. Wikipedia – Valosähköinen ilmiö. Luettu 18.8.2019. https://fi.wikipedia.org/wiki/Valosahkoinen_ilmiö
27. Suntekno – Aurinkopaneelin toimintaperiaate. Luettu 7.11.2019. <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>
28. Aki Korpela. 2014. Aurinkosähkön perusteet.
29. Scitech Daily. Luettu 28.12.2019. <https://scitechdaily.com/solar-cell-efficiency-increased-with-innovative-two-dimensional-materials/>
30. Fingrid – Fingridin edustajan suullinen lausunto.
31. Omakotiliitto: Kuluttajien tulee paremmin pystyä vaikuttamaan sähkölas-kuunsa. Luettu 24.11.2019. https://www.omakotiliitto.fi/vaikuttaminen/valtakunnallinen_vaikuttaminen/teemat/alyverkko
32. Polar Night Energy Oy. Luettu 24.1.2020. <https://polarnightenergy.fi/>
33. Vero.fi - Sähkön ja eräiden polttoaineiden verotaulukot. Luettu 19.1.2020. https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmiste-verotus/sahko_ja_eraat_polttoaineet/sahkon_ja_eraiden_polttoaineiden_verota/