

Mikko Wikstedt

Sähkövarastot osana virtuaalivoimalaitosta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

8.5.2018

Tekijä Otsikko	Mikko Wikstedt Sähkövarastot osana virtuaalivoimalaitosta
Sivumäärä Aika	39 sivua 8.5.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Tuomo Heikkinen
<p>Opinnäytetyö toteutettiin sähkövarastoja maahantuovalle yritykselle. Tavoitteena oli selvittää sähkövarastojen merkitystä osana virtuaalivoimalaitoksia ja sähkömarkkinoiden murrosta. Olennaisena osana tähän markkinalähtöiseen kokonaisuuteen kuului sähkömarkkinoiden toiminnan selvitys ja erityisesti kysyntäjoustopuolteen osuus siinä. Nykyisen ja tulevan lainsäädännön merkitystä tarkasteltiin sähkövarastojen osalta. Työssä arvioitiin sähkövarastojen taloudellista kannattavuutta nyt ja tulevaisuudessa.</p> <p>Työ tehtiin tutustumalla alan tieteellisiin julkaisuihin ja asiantuntijoiden seminaarimateriaaleihin. Markkinatoimijoiden ja viranomaisten verkkojulkaisut olivat myös merkittävässä roolissa kokonaisuuden muodostamisessa.</p> <p>Selvitystyön perusteella olemme selkeästi menossa kohti vihreää energiantuotantoa, jossa suurteollisuuden lisäksi yhä useamman kuluttajan on mukautettava sähkökäyttöään sään mukaan vaihtelevaan uusiutuvan energian tuotantoon. Sähköä kun pitää tuottaa ja kuluttaa joka hetki yhtä paljon. Tehopohjaiseen hinnoitteluun siirtyminen ohjaa kuluttajia leikkaamaan omia kulutushuippujaan. Joustava sähkökäyttäjä pääsee hyötymään näistä muutoksista. Yksin tai palveluntarjoajan avustuksella sähkövaraston omistavat yritykset ja kuluttajat voivat myydä kalliilla ja ostaa tuulisena ja aurinkoisena päivinä akut täyteen halpaa energiaa. Myös tehopiikkien leikkaaminen on sähkövarastojen omistajille vaivatonta. Joustamattomat sähköntuottajat ja –kuluttajat joutuvat taas maksamaan nykyistä suuremman osan sähköjärjestelmän tasapainottamisen kuluista.</p> <p>Virtuaalivoimalaitospilotteja on käynnissä ympäri Suomea. Sähkölaitokset kokoavat omien tuotantolaitoksiensa ja teollisten yhteistyökumppaneiden lisäksi pientuottajia ja –kuluttajia yhteen ja hyödyntävät saavutettavan kysyntäjoustopuolteen sähkömarkkinoilla. Palvelun tarjoajina eli aggregaattoreina toimii myös muita yhtiöitä kuin sähkölaitoksia. Sähkövarastot ovat merkittävä osa näitä projekteja. Lakien ja määräysten muutokset 2020-luvun alkupuolella tulevat laajentamaan sähkövarastojen käyttöä samalla kuin hintakehitys on alaspäin. Tällä hetkellä luodaan valmiuksia toimia ja jaetaan markkinaosuuksia tulevaisuuden sähkömarkkinoilla.</p>	
Avainsanat	sähkövarasto, virtuaalivoimalaitos, kysyntäjoustopuoli, sähkömarkkinat, aggregaattori

Author Title	Mikko Wikstedt Electrical Energy Storages as part of Virtual Power Plant
Number of Pages Date	39 pages 8 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Lecturer Tuomo Heikkinen
<p>This study was made for a distributor of electrical energy storages. The aim was to provide an overview on how important electrical energy storages are and will be as a part of virtual power plants and in the energy change. Essential part of this market driven research was to find out how electricity market and demand-side management are working.</p> <p>The thesis was implemented by examining literature and seminar materials, as well as internet material.</p> <p>Based on the study, it can be said that switching to green electricity system is a reality. Big industry has been active in the electricity market and adapted its consumption. In the future this is not enough. Electricity consumers also need to adapt their consumption to weather-dependent production. Electricity must be generated and consumed in precisely the same amount at every moment. Since the cost of electricity reflects the need to adapt consumption, active and flexible consumers benefit financially, if they participate in the electricity market. As an owner of electrical energy storage you can sell electricity either direct or through service provider when the price is high, and fill your storage when the price is low. It will also mean that inflexible electrical consumers and producers will have to pay a larger share of the total costs to balance the power system.</p> <p>Virtual power plant pilots are ongoing all over Finland. Electrical utilities are putting together also consumers on the top of industrial partners and their own manufacturing units to be able to make benefits of demand-side management at energy market. An aggregator, as these service providers are called, can be also other companies than electrical utility. Electrical energy storages are big part of these projects. In couple of years there will be legal changes which help to use these storages. Prices are also going down. At this moment companies are working hard to find the best possible way to gain market share at the future electricity market.</p>	
Keywords	electrical energy storage, virtual power plant, demand-side management, electricity market, aggregator

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Virtuaalivoimalaitos	2
2.1	Kysyntäjousto	4
2.2	Reservit ja säätösähkö	5
2.3	Tasesähkö ja Spot-markkinat	8
3	Sähkövarastot	10
3.1	Yleiskatsaus sähkövarastoihin	11
3.2	SonnenBatterie	15
3.3	Tesvolt	17
4	Sähkövarastot markkinalähtöisestä näkökulmasta	18
4.1	Nykyinen lainsäädäntö	19
4.2	Euroopan komission puhtaan energian paketti	21
5	Tuet ja takaisinmaksuaika	22
5.1	Energiatuki	22
5.2	Tuki maatalouksille	23
5.3	Esimerkki	23
6	Aggregointi	25
6.1	Fingridin aggregointipilotit	26
7	Tulevaisuudennäkymiä	31
7.1	Kuluttajan rooli	32
7.2	Sähkömarkkinat	32
8	Yhteenveto	34
	Lähteet	37

1 Johdanto

Insinööriyössä käsitellään sähkövarastojen osuutta kysyntäjoustossa markkinalähtöisestä lähtökohdasta: mihin suuntaan sähkömarkkinat ovat menossa ja miten lainsäädäntö ja viranomaiset ohjaavat kehitystä. Työ on tehty Solar Factory Oy:lle, joka on Suomen johtava akkupohjaisten sähkövarastojen maahantuojana. Tavoitteena on selvittää, kuinka merkittävä rooli sähkövarastoilla on tulevaisuuden älykkäässä ja puhtaassa sähköjärjestelmässä. Työssä esitellään myös erilaisia sähkön varastoinnin teknologioita.

Sähköä pitää tuottaa kaiken aikaa yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Tuotannon ja kulutuksen tasapainon kertoo sähköverkon taajuus, joka on tasapainotilassa 50,0 Hz. Ilmastonmuutos on lisännyt painetta siirtyä uusiutuvaan, päästöttömään energiantuotantoon. Uusiutuvista energiamuodoista aurinko- ja tuulienergia ovat olosuhderiippuvaisia ja vaativat sähköverkolta joustavuutta. Sähkön varastointi mahdollistaa olosuhderiippuvien energiamuotojen käytön lisääntymisen. Kuva 1 näyttää tämänhetkisen haasteen kokoluokan. Tuulisena päivänä 3.10.2017 tuulivoimalla tuotettiin Suomessa lähes kolme kertaa Loviisa 1 -ydinvoimalan tehon verran sähköä eli n. 1 400 MW. Toisaalta kaksi päivää aikaisemmin tuulisähkön tuotanto oli alle 100 MW. On selvää, että näin suuret vaihtelut vaikuttavat tuntuvasti sähköverkon tasapainoon sekä sähkön hintaan. Fingridillä on Suomen kantaverkkoyhtiönä merkittävä rooli tulevaisuuden markkinoiden kehittäjänä. (1;2.)

Lauantaina 24.10.2017 tehtiin Euroopassa tuulivoimaennätys. 24,6 % EU:n sähkön kulutuksesta katettiin tuulivoimalla tuotetulla sähköllä. Tuulivoiman tuotanto oli Tanskassa 109 % ja Saksassa 61 % suhteessa kulutukseen. (28.) Suomi on edelläkävijä koko Euroopassa kulutusjoustojen mahdollistajana.

Työssä tuodaan esille eri toimijoiden rooleja energiasektorin murroksessa. Kuka keksii parhaimman eli tuottavimman tavan toimia ja mikä on sähkövarastojen merkitys tässä kehityksessä?

Tuulivoima tuntuu Suomen sähköjärjestelmässä



5 Infotilaisuus aggregointipiloteista

28.11.2017

FINGRID

Kuva 1. Tuulivoimatuotanto Suomessa 1.-3.10.2017 (1;28).

2 Virtuaalivoimalaitos

Virtuaalivoimalaitos (engl. Virtual Power Plant, VPP) on energiaverkoston tehokuormien sekä tuotanto- ja varastointikapasiteetin ohjaamista koko energiaverkon tehokkuuden kannalta mahdollisimman optimaalisesti. (3;4.) Virtuaalivoimalaitos on yksi älykkään sähköverkon (engl. smart grid) mahdollistama sovellus. Tekniikan kehittyminen ja erityisesti digitalisaatio vauhdittaa energiasektorin muutosta. Hajautettu energiantuotanto lisääntyy. Yhdistämällä erilaisia tuotantomuotoja virtuaalivoimalaitokseksi saadaan luotua kysyntäjoustoa. Olosuhteista riippuvaiset sähkön tuotantomuodot, kuten aurinko- ja tuulienergia, vaativat sähköverkolta tulevaisuudessa yhä enemmän joustavuutta eli säätövoimaa. Säätövoimaa saadaan vesivoiman lisäksi sähköä varastoimalla. Sähkövarastojen lisääntyminen mahdollistaa uusiutuvien energianlähteiden käytön kasvun Suomessa. Kuvassa 2 on havainnollistettu virtuaalivoimalaitosta.

Virtuaalivoimalaitoksen voi rakentaa hyvin erilaisista komponenteista, pienistä ja suurista, yksityisen kuluttajan tai yrityksen omistamista laitteista. Fortum on kokoamassa noin 70 omakotitaloasukkaan lämminvesivaraajista virtuaalivoimalaitoksen, jonka kapasiteetti tarjotaan kantaverkkoyhtiö Fingridille sähköjärjestelmän tehotasapainon yllä-

pitämiseksi. Teknisesti tämä tapahtuu lämminvesivaraajien kauko-ohjaamisella. Kun tehoa tarvitaan sähköjärjestelmässä lisää, Fortum ohjaa talouksien lämminvesivaraajien toimintaa hetkellisesti ilman, että sillä on vaikutusta kodin lämmitykseen tai lämpimään käyttöveteen. (5.) Fortum ja Ericsson ovat tehneet sopimuksen Ericssonin Kirkkonummen datakeskuksen UPS-laitteiden akustojen liittämisestä osaksi Fortumin virtuaalivoimalaitosta (6).

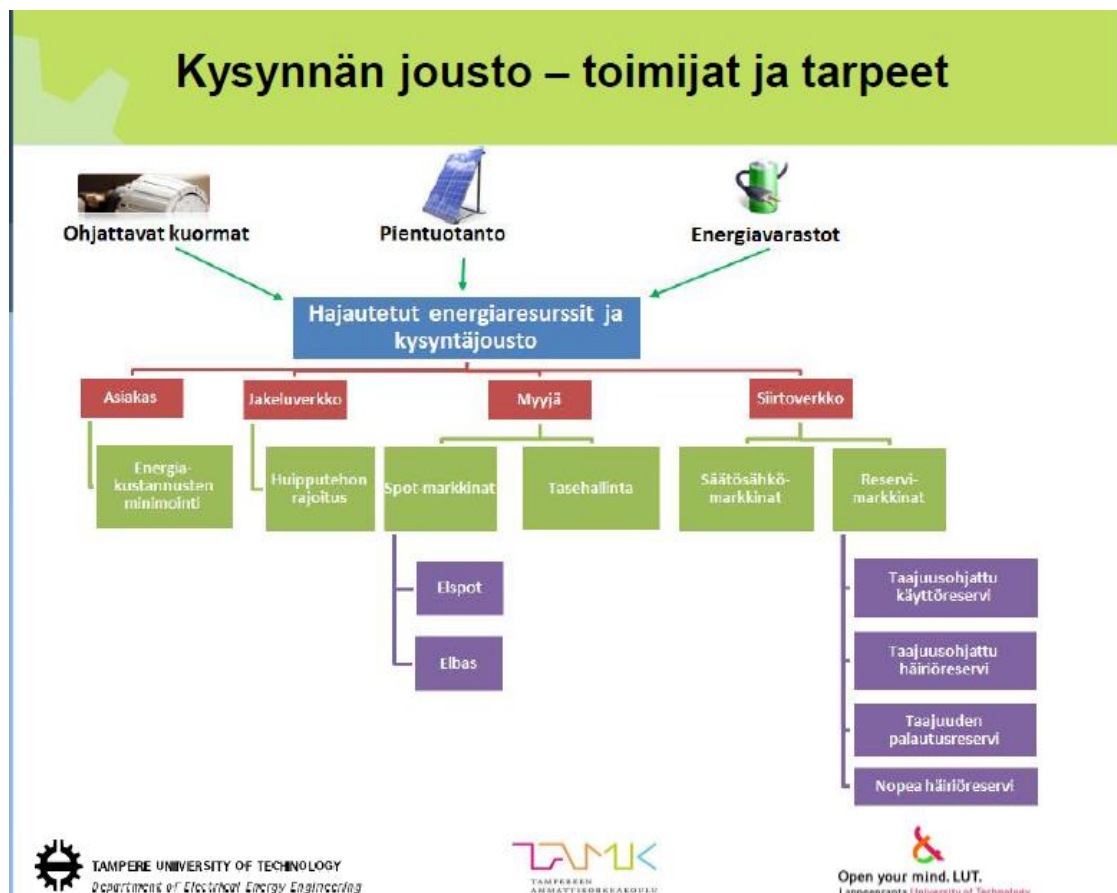
Helen markkinoi omia tuottaja-paketteja, aurinkopaneelien ja sähkövarastojen yhdistelmiä, omakotiasukkaille osana omaa virtuaalivoimalaitostaan (7). Helenillä, kuten Fortumilla on yksi konttikokoluokan sähkövarasto ja useita virtuaalivoimalaitokseen liittyviä muita projekteja, joista mainittakoon erityisesti sähköautojen akkujen käyttö tulevaisuudessa osana kysyntäjoustoa. Myös muut energialaitokset ovat aktivoituneet ja projekteja on käynnissä ympäri Suomea. Keskeistä näille kaikille projekteille on automaattisten ohjausjärjestelmän kehittäminen toimimaan, ohjaamaan ja mittaamaan kaikkia koneita ja laitteita luotettavasti.



Kuva 2. Havainnekuva akkujen muodostamasta virtuaalivoimalaitoksesta (30).

2.1 Kysyntäjousto

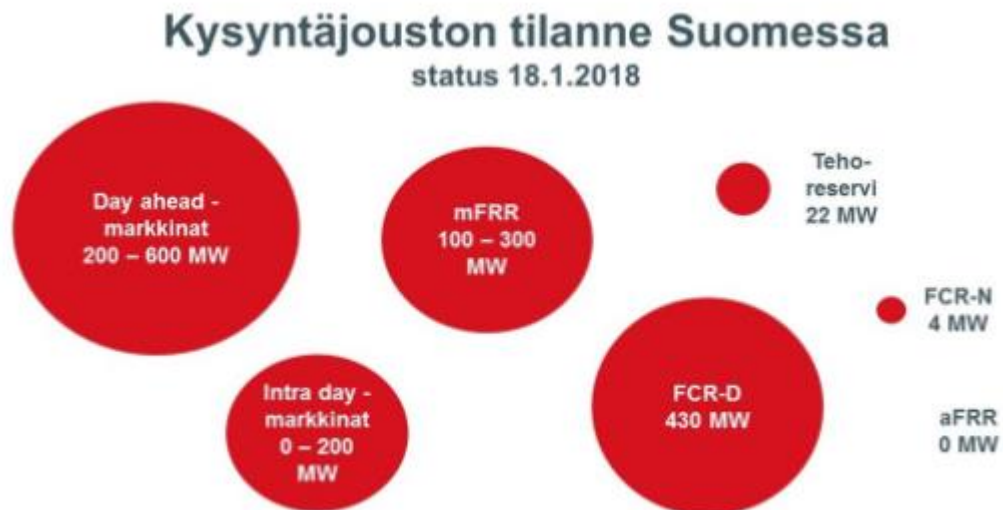
Kysyntäjousto on sähkökäytön siirtämistä korkean hinnan ja kulutuksen tunneilta edullisempaan ajankohtaan. Se on myös käytön hetkellistä muuttamista tehtasapainon hallinnan tarpeisiin. Kuvassa 3 on esitetty kysyntäjouston toimijat ja tarpeet. Joustamattoman tuotannon, kuten ydinvoiman ja uusiutuvan energian, kasvu lisää kysyntäjouston tarvetta. Joustamaton tuotanto on haaste nykyiselle markkinamallille, jossa käydään kauppaa ainoastaan energialla. Kysyntäjousto on yksi tapa turvata nykyisen markkinamallin toimivuus. (8.)



Kuva 3. Kysyntäjouston pelkistetty periaatekuva (14).

Suomessa suurteollisuuden, kuten metalli-, metsä- ja kemianteollisuuden, kuormat ovat toimineet tehtasapainoa ylläpitävinä reserveinä jo pitkään. Kysyntäjousto lisää tarjontaa niin säätösähkö- kuin reservimarkkinoilla. Kuvasta 4 saa käsityksen kysyntäjouston määrästä. (8;9.)

Uusi asia sähkömarkkinoilla ovat aggregaattorit eli yritykset, jotka muodostavat pientuotannosta ja -kulutuksesta suuremman kokonaisuuden, joka voi osallistua eri markkinoille. Kuluttajan oma pientuotanto voidaan rinnastaa kysyntäjoukseen, mikäli se reagoi markkinatilanteeseen ja sillä voidaan pienentää tai suurentaa kohteen sähkönottoa verkosta, esimerkkeinä liiketilojen ja rakennusten varavoimakoneet ja energiavarastot. (28.)



Kuva 4. Markkinoilla olevan kysyntäjoukseen määrä Suomessa (8).

2.2 Reservit ja säätösähkö

Sähköä pitää tuottaa kaiken aikaa yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Tuotannon ja kulutuksen tasapainon kertoo sähköverkon taajuus, joka on tasapainotilassa 50,0 Hz. Sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat etukäteen kulutuksensa ja tuotannon niin, että se on tasapainossa. Poikkeamien tasapainottamiseen tarvitaan reservejä, joita Fingrid hankkii ylläpitämiltään markkinoilta. Reserveillä tarkoitetaan voimalaitoksia ja kulutuskohteita, jotka laskevat tai nostavat tehoa tarpeen mukaan. (8.)

Pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä reservien ylläpitovelvoitteet on sovittu Pohjoismaiden järjestelmävastaavien välisellä sopimuksella. Yhteisesti ylläpidettävä reservi jaetaan vuosittain pohjoismaalaisten kantaverkkoyhtiöiden kesken maiden käyt-

tämien vuosienergioiden suhteessa. Fingrid ylläpitää myös nopeaa häiriöreserviä oman alueensa tarpeen verran. (8.)

Kunkin maan kantaverkkoyhtiö hankkii oman osuutensa reservistä parhaaksi katsomallaan tavalla. Reservivelvoitteiden täyttämiseksi voidaan käydä kauppaa myös eri maiden välillä. Normaalitylanteessa muista Pohjoismaista voidaan ostaa enintään 1/3 taajuusohjatun reservin velvoitteista. Reservejä on kuitenkin ylläpidettävä riittävästi myös kansallisesti, jotta taajuus saadaan pidettyä tasapainossa kaikissa tilanteissa, esimerkiksi saarekekäyttötilanteessa. (8.)

Reservinmyyjän tulee olla säätökykyisen kohteen omistaja tai sen avoimen sähkön toimitusketjun osapuoli (sähkönmyyjä tai tasevastaava). Avoimen toimitusketjun ulkopuolinen osapuoli voi toimia reservinmyyjänä taajuusohjatussa häiriöreservissä (Frequency Containment Reserve for Disturbances, FCR-D) sekä taajuusohjatussa käyttöreservissä (Frequency Containment Reserve for Normal operation, FCR-N). Jos reservinmyyjä ei ole kohteen omistaja, tulee sillä olla omistajan lupa säätökäyttöön. Kohteen tasevastaavaa tulee informoida säätökäytöstä jos reservinmyyjä ei ole tasevastaava. Reservinmyyjän tulee tehdä sopimus Fingridin kanssa osallistumisesta reservimarkkinoille. (8.)

Reservikohteen tulee sijaita Suomessa tai olla suoraan kytkettävissä Suomen sähköverkkoon ja täyttää kyseisen reservituotteen markkinapaikan edellytykset ja tekniset vaatimukset. Taulukosta 1 ilmenee Fingridin reservikohteet ja kuvasta 5 reservilajit.

Fingrid ylläpitää säätösähkömarkkinoita yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Säätömarkkinoille osallistuminen edellyttää säätösähkömarkkinasopimuksen tekemistä Fingridin kanssa. Tuotannon ja kuorman haltiat voivat antaa säätösähkömarkkinoille tarjouksia säätökykyisestä kapasiteetistaan.

Säätökapasiteettimarkkinat otettiin käyttöön keväällä 2016. Reservinmyyjä, jonka kapasiteettitarjous hyväksytään säätökapasiteettimarkkinoilla, sitoutuu jättämään ylössäätötarjouksen säätösähkömarkkinoille kapasiteettikorvausta vastaan. Säätökapasiteettimarkkinoilla Fingrid varmistaa, että sillä on mitoittavaa vikaa vastaava määrä nopeaa häiriöreserviä myös varavoimalaitostensa huolto- ja korjauskeskeytyksissä. Säätökapasiteettimarkkinat sisältyvät säätösähkömarkkinasopimukseen. Säätökapasiteetti-

markkinoiden tarjouskilpailut pidetään Fingridin sähköisessä reservi- ja säätösähkömarkkinakaupankäyntijärjestelmässä (Vaksi-järjestelmä). (8.)

Fingrid kattaa reservien ylläpitokustannukset kantaverkkotariffilla ja tasepalvelusta kerättävin maksuin. Säätösähkömarkkinoiden kustannukset katetaan tasesähkökaupalla. (8.)

Taulukko 1. Fingridin reservien velvoitteet ja hankintalähteet vuonna 2018 (8).

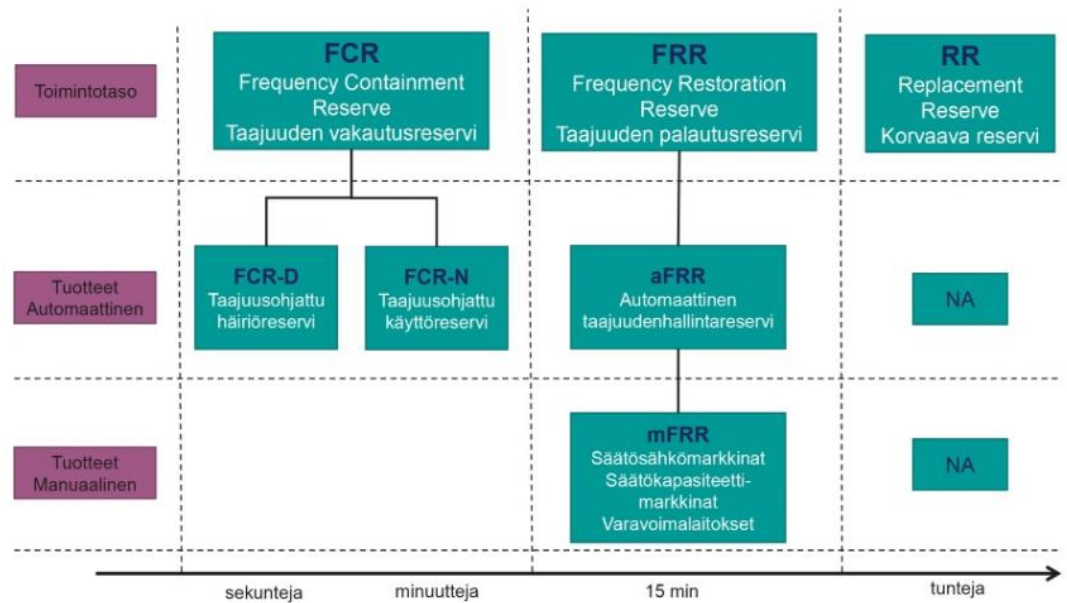
Reservi	Velvoite	Hankintakanavat	Sopimusten mukainen enimmäiskapasiteetti
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	n. 140 MW	Vuosihankinta	72,6 MW
		Tuntimarkkinat	124 MW
		Muut Pohjoismaat	-
		Viipurin DC-linkki	90 MW
		Viro, Estlink 1 & 2	35 MW
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	220–265 MW	Vuosimarkkinat	435 MW
		Tuntimarkkinat	595 MW
		Muut Pohjoismaat	-
Automaattinen taajuudenhallinta-reservi (aFRR)	70 MW (vain osalle vuorokauden tunneista)	Tuntimarkkinat Ruotsi	- -
Säätösähkömarkkinat ja nopea häiriöreservi (mFRR)	880–1100 MW	Säätösähkömarkkinat ja säätökapasiteettimarkkinat	-
		Fingridin varavoimalaitokset	935 MW
		Käyttöoikeussopimuslaitokset	299 MW

Reservituotteet jaotellaan käyttötarkoituksen perusteella kolmeen ryhmään:

1. Taajuuden vakautusreservejä (Frequency Containment Reserve, FCR) käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan.
2. Taajuuden palautusreservien (Frequency Restoration Reserve, FRR) tarkoituksena on palauttaa taajuus normaalialueelle (49,9–50,1 Hz) ja vapauttaa aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön.

3. Korvaavilla reserveilla (Replacement Reserve, RR) valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin mahdollisiin uusiin vikatilanteisiin palauttamalla aiemmin aktivoituneet taajuuden palautusreservit takaisin valmiuteen. Tämä ei ole käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. (8.)

Älykkäät ja ohjatut sähkövarastot soveltuvat erittäin hyvin taajuusohjattuun käyttö- ja häiriöreserviin johtuen niiden nopeasta reagoitajasta. (30).



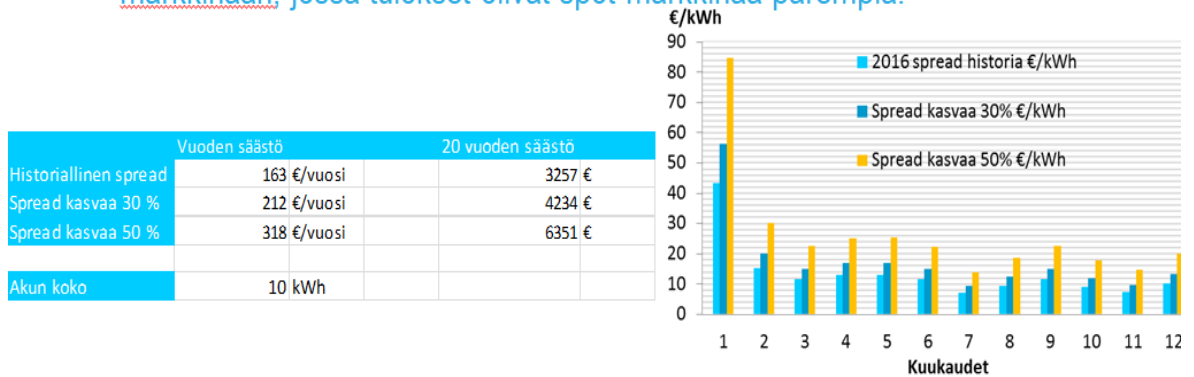
Kuva 5. Eri reservilajit (8).

2.3 Tasesähkö ja Spot-markkinat

Sähkömarkkinoilla toimivan osapuolen on huolehdittava sähkötaseestaan eli ylläpidettävä sähkön tuotannon/hankinnan ja kulutuksen/myynnin välinen tasapaino. Käytännössä osapuoli ei tähän pysty, ja sillä on oltava sähkötaseen tasapainottava avoin toimittaja. Tasevastaavaksi kutsutaan osapuolta, jonka avoin toimittaja on Fingrid. Fingridin ja tasevastaavan välinen avoin toimitus sovitaan tasepalvelusopimuksella, jonka ehdot ovat yhtäläiset ja julkiset. (8.) Kuvassa 6 on laskettu akusta saatava hyöty vuoden 2016 hinnoilla tase-markkinassa ja kuvassa 7 spot-markkinassa.

Akusta saatava hyöty tase-markkinassa

- Akkua voidaan käyttää seuraavan tunnin tase-markkinassa. Tulosten perusteella akun nopea säätömahdollisuus sopii erittäin hyvin tase-markkinaan, jossa tulokset olivat spot-markkinaa parempia.



Tuesday, April 3, 2018

Solar Factory Oy

6

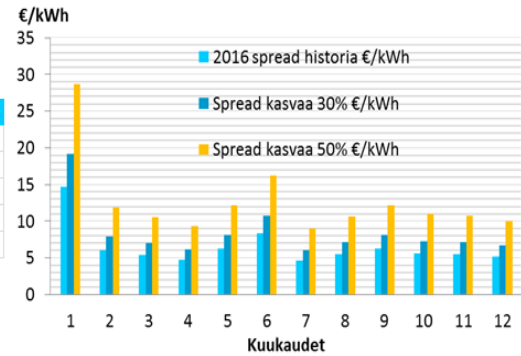
Kuva 6. Sähkövarastosta saatu hyöty tase-markkinassa 2016 hinnoilla (30).

Spot-hinta on Pohjoismaisessa Nord Pool -sähköpörssissä muodostuva sähkön hinta jokaiselle vuorokauden tunnille. Tärkeimmät toimijat näillä markkinoilla ovat tarjontapuolella sähkön tuottajat ja ostajapuolella sähkön vähittäismyyjät sekä suuret teollisuuslaitokset, jotka ostavat tarvitsemansa sähkön suoraan pörssistä. Spot-markkinoilla toimijat lähettävät klo 13.00:een mennessä Suomen aikaa tarjouksensa Nord Pooliin, jossa he kertovat kuinka suuren määrän ja millä hinnalla ovat valmiita myymään tai ostamaan sähköä kullakin tunnilla. Näiden tarjousten perusteella Nord Pool laskee kysyntä- ja tarjontakäyrät, joiden perusteella markkinahinta muodostuu jokaiselle tunnille. Sähkövarastoa voidaan käyttää seuraavan päivän spot-markkinassa hintavaihteluiden tasaamiseen. Ideana on ladata sähkövarasto halvoilla tunneilla ja purkaa kalliimmilla tunneilla. Tämä erityisesti talvikuukausina, jolloin aurinkovoiman käyttö sähkövaraston kanssa on pienimmillään ja kulutus korkeimmillaan.

Akusta saatava hyöty spot-markkinassa

- Akun käyttöä tarkasteltiin tuntitasolla spot-markkinaa vasten 2016 vuoden hinnoilla. Tarkoituksena oli löytää spot-markkinasta aamuyön tai aamun halvat tunnit, jolloin akun lataus käynnistettiin ja akun purku pyrittiin ajoittamaan kalleimmille tunneille. Halvimpien ja kalliimpien tuntien erotus laskettiin yhteen.

	Vuoden säästö		20 vuoden säästö	
Historiallinen spread	78	€/vuosi	1561	€
Spread kasvaa 30 %	101	€/vuosi	2030	€
Spread kasvaa 50 %	152	€/vuosi	3045	€
Akun koko	10	kWh		



Tuesday, April 3, 2018

Solar Factory Oy

5

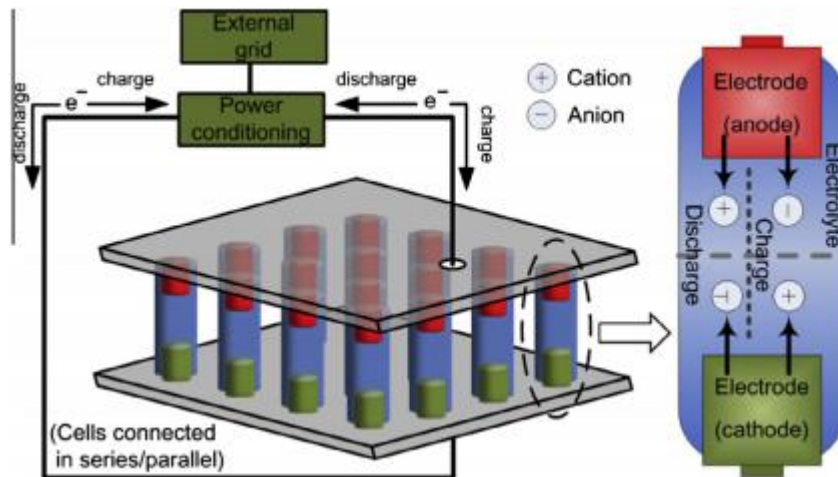
Kuva 7. Sähkövarastosta spot-markkinassa saatu hyöty 2016 hinnoilla (30).

3 Sähkövarastot

Sähkövarasto on laitos, johon varastoidaan sähköä. Siihen syötetään ja siitä puretaan energiaa. Varastointi voi olla suoraan sähköenergiana kuten akuissa tai vaikka veden potentiaalienergiana pumppuvoimalaitoksessa. Seuraavia laitoksia kutsutaan sähkövarastoiksi: akku, pumppuvoimala, lämpövarasto, vauhtipyörä, vety ja synteettiset kemikaalit, paineilmaparasto, nesteilmavarasto, superkondensaattorit ja suprajohdevarasto.

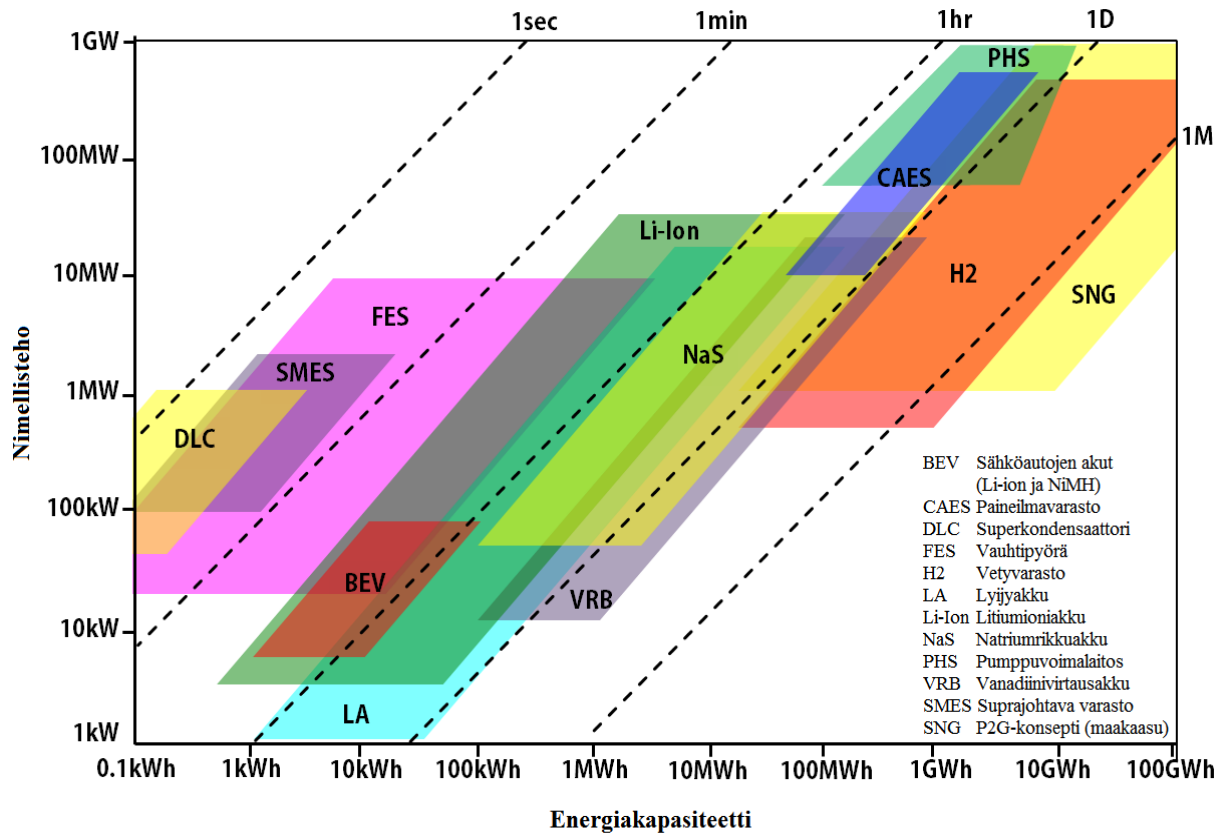
3.1 Yleiskatsaus sähkövarastoihin

Sähkön varastointiprosessi koostuu kolmesta eri osasta: latautumisesta, sähkön varastoinnista ja purkautumisesta. Jokaisessa varastoinnin vaiheessa tapahtuu myös häviöitä. Kuvassa 8 on esitetty miten prosessi toimii akulla.



Kuva 8. Akun toimintaperiaate (11).

Varastointiteknologioiden valintaan vaikuttavat erityisesti teho, kapasiteetti, elinikä, vasteaika, itsepurkautuminen ja hyötysuhde. Kuvassa 9 on esitetty sähkön varastointiteknologioiden nimellisteho kapasiteetin funktiona. Kuvasta 9 huomataan, että akut sopivat lähes kaikkiin sovelluskohteisiin. Kuvan oikeassa yläkulmassa olevat teknologiat on tarkoitettu erittäin suurten energiamäärien varastointiin ja ne pystyvät tuottamaan myös erittäin suuren ulostulotehon. Näitä ovat pumppuvoimalaitos, paineilmaparasto, vetyvarasto ja sähkön muuttaminen kaasuksi. Superkondensaattorilla ja suprajohdavalalla varastolla pystytään tuottamaan suuri ulostuloteho, mutta kapasiteetti on selvästi muita teknologioita lyhyempi.



Kuva 9. Varastointiteknologioiden vertailu kapasiteetin ja tehon suhteen (10;12).

Akkuja on käytetty sähkökemiallisina energiavarastoina jo pitkään, ainakin 1800-luvulta lähtien. (14). Akun ominaisuudet vaihtelevat paljon teknologiasta riippuen. Akkuja voidaan käyttää voimajärjestelmän osista aina kotitaloussovelluksiin saakka. Sähköverkko-sovelluksissa tavallisimpia akkuja ovat lyijy-, nikkeli-, litium- ja natriumpohjaiset akut.

Lyijypohjaiset akut ovat markkinoiden vanhimpia ja halvimpia. Ne ovat myös luotettavia ja omaavat melko korkean hyötysuhteen. Lyijyakuilla on alhainen syklinen elinikä sekä suppea toimintalämpötila. Lyijy on ympäristömyrkky, mutta lyijyakit ovat vielä yleisiä erilaisissa piensähkölaitteissa ja UPS-laitteistojen akustoina. (10;11;12.)

Nikkelikadmium (NiCd)- ja nikkelimetallihybridiaikut (NiMH) ovat yleisimpiä nikkeliakuisia. NiCd-akut ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan lyijyakkuja parempia, mutta ovat myös kalliimpia. Hinnan lisäksi kaupallista menestystä on haitannut myrkyllinen kadmium. NiMH-aku on ympäristöystävällisempi vaihtoehto NiCd-akulle. Sillä on lisäksi suurempi energiatiheys. (10;11;12.)

Litiumioniakkuja käytetään paljon matkapuhelimissa ja pienlaitteissa, mutta niitä hyödynnetään myös sähköverkoissa ja kotitalouksien sähkövarastoina. Litiumioniakuilla on korkea hyötysuhde, pitkä elinikä, korkea energiatiheys ja ne eivät juurikaan itsepurkaudu. Litiumioniteknologian heikkoutena on lämpötilaherkkyys. Korkea lämpötila vähentää käyttöikää. Käyttöikää vähentää myös, jos akun varaustila laskee kovin alhaiseksi. (10;11;12.)

Natriumrikkiakkuteknologia (NaS) on vielä kehitysvaiheessa. NaS akuilla on korkea energiatiheys ja hyötysuhde, nopea vasteaika, erittäin alhainen itsepurkautuminen sekä vähäinen huollon tarve. Haittapuolina ovat korkea hinta ja korkea käyttölämpötila, jonka vuoksi tarvitaan erillinen laitteisto sen saavuttamiseksi. (10;11;12.)

Virtausakku poikkeaa perinteisistä akuista siten, että nestemäiset elektrolyytit ovat erillisissä tankeissa, joista ne johdetaan kennoille, joissa sähkötuotanto tapahtuu. Energiakapasiteettia mitoitetaan elektrolyyttitankkien tilavuutta muuttamalla ja akun tehokennojen määrää ja pinta-alaa muuttamalla. Vanadiiniakku (engl. Vanadium Redox Battery, VRB) on yksi virtausakkuteknologioista. (10;11;12.)

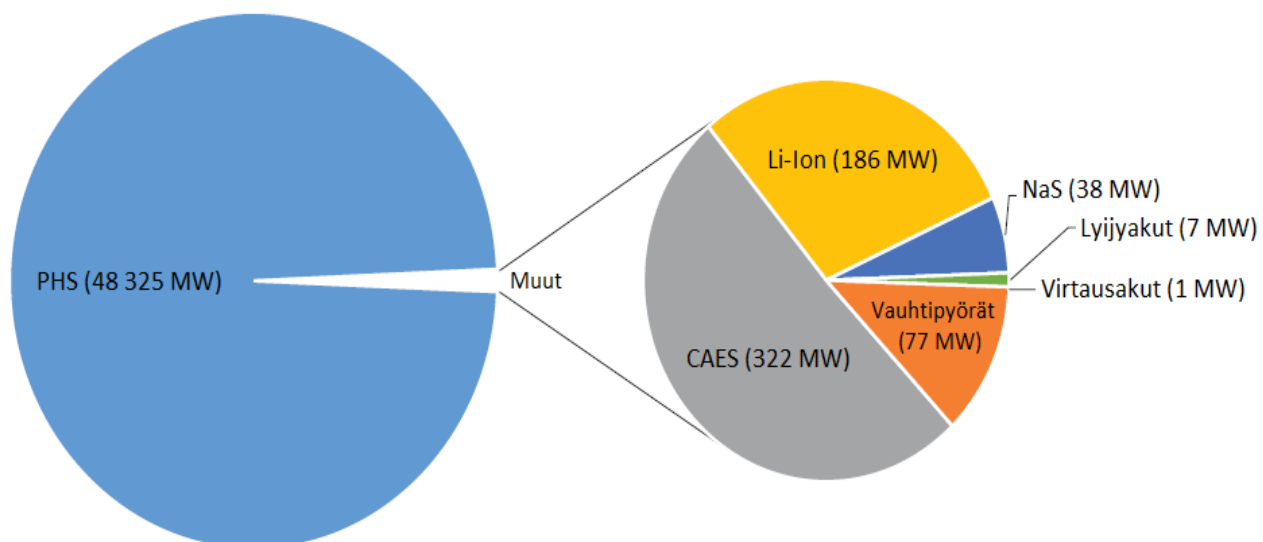
Selvästi yleisin ympäri maailman käytössä oleva mekaaninen sähkövarastointitekniologia on pumppuvoimalaitos (engl. Pumped Hydro Storage, PHS). Yhdysvaltain energiaministeriön energiavarastotietokannan mukaan vuonna 2016 oli asennettua pumppuvoimalaitoskapasiteettia noin 160 GW, joka muodostaa yli 99 % koko maailman asennetusta varastointikapasiteetista. Pumppuvoimalaitos toimii kuten vesivoimalaitos, mutta vettä voidaan pumpata takaisin ala-altaasta yläaltaaseen. (10;11;12.)

Paineilmavarastossa (engl. Compressed Air Energy Storage, CAES) energia varastoidaan puristamalla ilmaa mekaanisesti varastoon kompressorin avulla. Varastona voi olla vaikka maanalainen onkalo. Varaston latautuessa voimalan generaattori toimii moottorina tuottaen mekaanista energiaa kompressorille. Kun sähköä tarvitaan, varastossa oleva paineilma laajennetaan lämmittämällä ja johdetaan turbiiniin, joka pyörittää generaattoria. Paineilmavarastoja on käytössä vain muutamia johtuen sopivien rakennuspaikkojen puutteesta. (10;11;12.)

Vauhtipyörä varastoi liike-energiaa sähkökoneeseen yhdistettyyn tyhjiössä pyörivään pyörään. Ladattaessa kone toimii moottorina, joka pyörittää vauhtipyörää, ja purettaessa generaattorina, jolloin vauhtipyörään varastoitunut liike-energia muuttuu sähköener-

giaksi. Vauhtipyörän haittana ovat suuret häviöt ja pieni energiatiheys. Etuna on, että se voidaan ladata ja purkaa, myös täysin tyhjäksi, tuhansia kertoja. (10;11;12.)

Sähkömagneettisia varastoja ovat SMES-varasto (engl. Superconductive Magnetic Energy Storage) ja superkondensaattori. SMES:n toiminta perustuu suprajohtavan käämin avulla synnytettyyn magneettikenttään, johon energia varastoidaan. Voimakas magneettikenttä saadaan luotua jäähdyttämällä käämi lähelle absoluuttista nolapistettä, jolloin suprajohtavan materiaalin resistanssi häviää. Varastolla on korkea hyötysuhde, nopea vasteaika ja sen tehotehiys on suuri. SMES-varaston ongelmana on alhainen toimintalämpötilavaatimus, nopea itsepurkautuminen sekä pieni tehotehiys. Superkondensaattorin toimintaperiaate on sama kuin tavallisella kondensaattorilla, mutta se kykenee varastoimaan suuremman määrän energiaa. Superkondensaattorin rakenne muistuttaa akkua, mutta sen kennoissa ei tapahdu kemiallista reaktiota. Energia on varastoitu sähköstaattiseen kennoon. SMES:n tavoin superkondensaattoreita voidaan hyödyntää tehosovelluksissa. (10;11;12.)



Kuva 10. Verkkoon kytketty varastointikapasiteetti EU-maissa sekä Norjassa ja Sveitsissä syyskuussa 2016 (11;12).

Kuvassa 10 on esitetty syyskuussa 2016 verkkoon kytketty varastointikapasiteetti EU-maissa sekä Norjassa ja Sveitsissä Yhdysvaltojen energiaministeriön sähkövarastotietokannan mukaan. Kuvasta käy ilmi, että näissä 30 maassa varastointikapasiteetti

muodostuu lähes kokonaan pumppuvoimalaitoksista. Akuista litiumioniakkukapasiteettia on eniten. Arvion mukaan EU-maissa sekä Norjassa ja Sveitsissä oli tuolloin noin 34 100 verkkoon kytkettyä Li-Ion-akkua, joista noin 34 000 on kuluttajien akkuja. Pumppuvoimalaitoksia näissä maissa on 157 ja paineilmaparastoja 3 kappaletta. (11;12.)

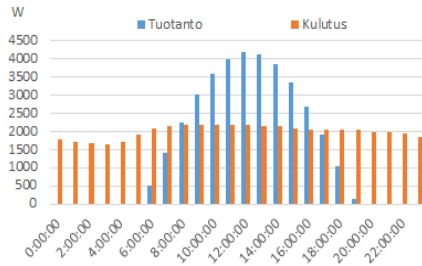
Akkujen hintojen odotetaan laskevan voimakkaasti. Erityisen suurta hinnan lasku olisi litium-, NaS- ja virtausakuilla. Litiumakkuteknologiaan perustuvien varastojärjestelmien hintojen ennustetaan laskevan vuodesta 2015 vuoteen 2050 mennessä enimmillään 81 % ja pienimmilläänkin 34 %. Euroopan komission julkaiseman raportin mukaan akkujen hintojen odotetaan laskevan jopa 70 % vuoteen 2030 mennessä. (12;13.)

3.2 SonnenBatterie

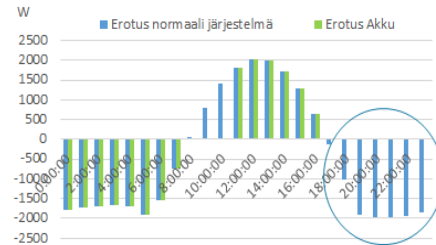
Saksa on monestakin syystä edelläkävijä sähkövarastojen kehittäjänä. Pisimpään markkinoilla ollut Sonnen GmbH on myynyt Eurooppaan yli 30 000 älykästä sähkövarastoa. Kokonaisuus sisältää invertterin, akun sekä ohjausjärjestelmän. Kodinkoneita ja -laitteita voidaan ohjata releellä tai erityisillä smart plugeilla. Sähkövaraston voi asentaa minkä tahansa aurinkopaneelijärjestelmän osaksi. Takuu on 10 vuotta tai 10 000 lataussykliä. Odotettu elinikä on yli 20 vuotta. Kuva 11 esittää miksi sähkövarastoa kannattaa käyttää aurinkopaneelijärjestelmän kanssa. Saksassa sähkön hinnat vaihtelut ovat suuria. Tästä johtuen on kannattavaa hankkia jopa pelkkä sähkövarasto, joka varataan yöllä halvalla sähköllä ja puretaan päivällä huippuhinnalla. Kerrostaloasunnoissa on pieniä 2 kWh:n sähkövarastoja, omakotitaloissa koot vaihtelevat 4–16 kWh välillä. Suomessa on alettu markkinoida voimakkaasti tuottajapaketteja, jotka koostuvat esim. 10 aurinkopaneelistä (3 kWp) ja 10 kWh:n sähkövarastosta. Hintaa tällaiselle paketille tulee asennettuna hieman alle 20 000 euroa.

Energiavaraston toiminta

- Aurinkopaneelin tuotanto ja kohteen kulutus



- Tuotannon ja kulutuksen erotus. Negatiivinen palkki = sähkö otetaan verkosta kattamaan kulutusta

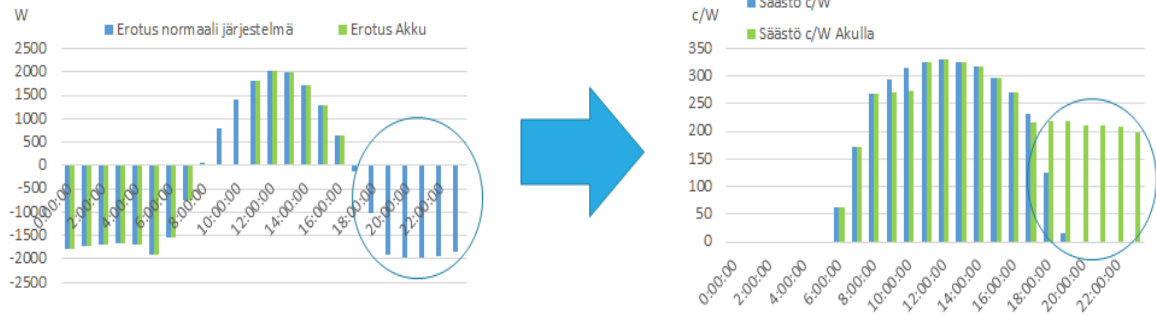


- Energiavarastoon ladataan ylimääräinen tuotanto aurinkopaneeleista ja akkuun ladattua sähköä voidaan käyttää yöllä, jolloin aurinkopaneelit eivät tuota. Tämä pienentää merkittävästi aurinkopaneelijärjestelmän omistajan sähkölaskua.

Kuva 11. Sähkövaraston toiminta osana aurinkopaneelijärjestelmää (30).

Kapasiteetiltaan 10 kWh:n sonnenBatterie eco 8.0/10 painaa 182 kg. Sähkövarasto asennetaan lämpimään sisätilaan ja kaapin mitat ovat (K/L/S) senttimetreissä 184/64/22. 25 kg painavia japanilaisen Sonyn valmistamia 2 kWh akkumoduuleita asennetaan 10 kWh järjestelmään viisi. Akkukennot (3,2 V @ 3 Ah) ovat LFP (Lithium Iron Phosphate) teknologiaa ja niitä on yhdessä moduulissa 224 kpl. 16 kennoa on kytketty sarjaan ja 14 rinnan. Tästä saadaan nimellisjännitteeksi 51,2 V ja kapasiteetiksi 2 kWh (40 Ah). Kuva 12 näyttää sähkövarastosta saatavan hyödyn. (30.)

Energiavaraston toiminta



- Energiavaraston avulla esimerkkipäivä säästää yli 30 %:a enemmän sähkölaskussa yöllä olevan vuorokauden aikana

Friday, April 6, 2018

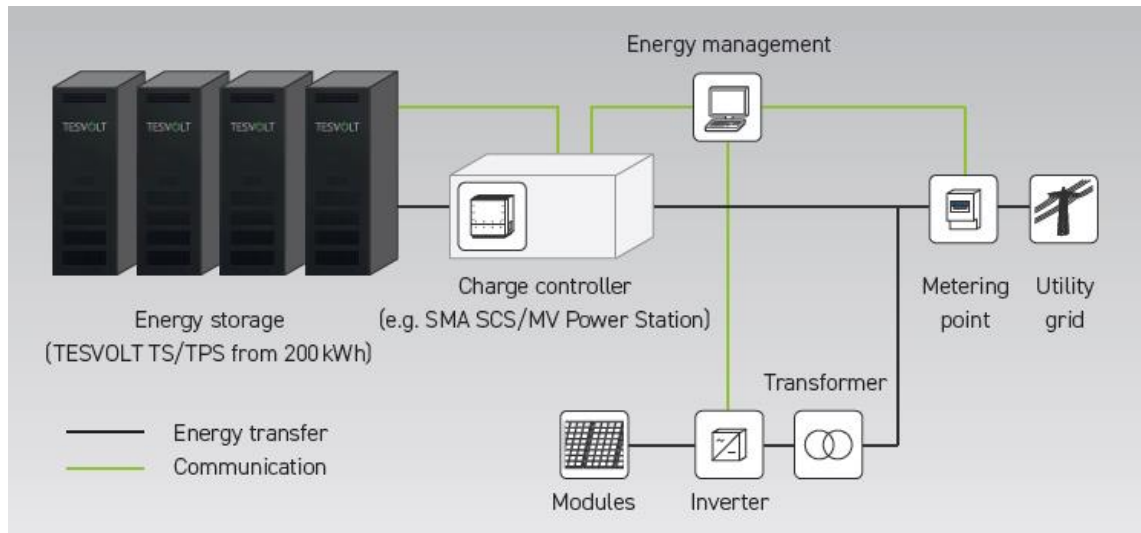
Solar Factory Oy

9

Kuva 12. Sähkövaraston hyöty osana aurinkopaneelijärjestelmään (30).

3.3 Tesvolt

Vasta muutaman vuoden toiminut saksalainen Tesvolt GmbH toimittaa sähkövarastoja hyvin moninlaisiin sovelluksiin pienistä (10 kWh) aina suuriin voimaloihin (100 MWh). Yhteen isoon 13,7 metriä (45 ft) pitkään konttiin saadaan mahtumaan 2 MWh:n edestä akkukapasiteettia. Riippuen asennuspaikasta konttiin asennetaan joko lämmittimet tai jäähdyttimet. Tämän lisäksi tulee toinen pienempi 6,1 metrin (20 ft) kontti, jossa on invertteri, katkaisija ja keskijännitemuuntaja. Tällaisen hinta asennettuna nousee pitkälle yli miljoonan euron. Kuva 13 esittää jakeluverkkoon kytkettyä järjestelmään. Off-grid eli saarekekäyttöjärjestelmät ovat myös yleisiä maailmalla. Esimerkiksi Afrikassa on lähes rajattomat markkinat aurinkopaneelijärjestelmien ja sähkövarastojen off-grid yhdistelmille. Tesvolt käyttää korealaisen Samsungin SDI-akkuteknologiaa (Lithium NMC prismatic). Yksi akkumoduuli painaa 36 kg, ja siinä on kapasiteettia 4,8 kWh. Tesvoltin sähkövarastot on suunniteltu lähinnä yritys-, maatila-, kauppakeskus- ja teollisuusympäristöön. Takuu on 10 vuotta tai 8000 latausykliä. Odotettu elinikä on 30 vuotta. (30.)

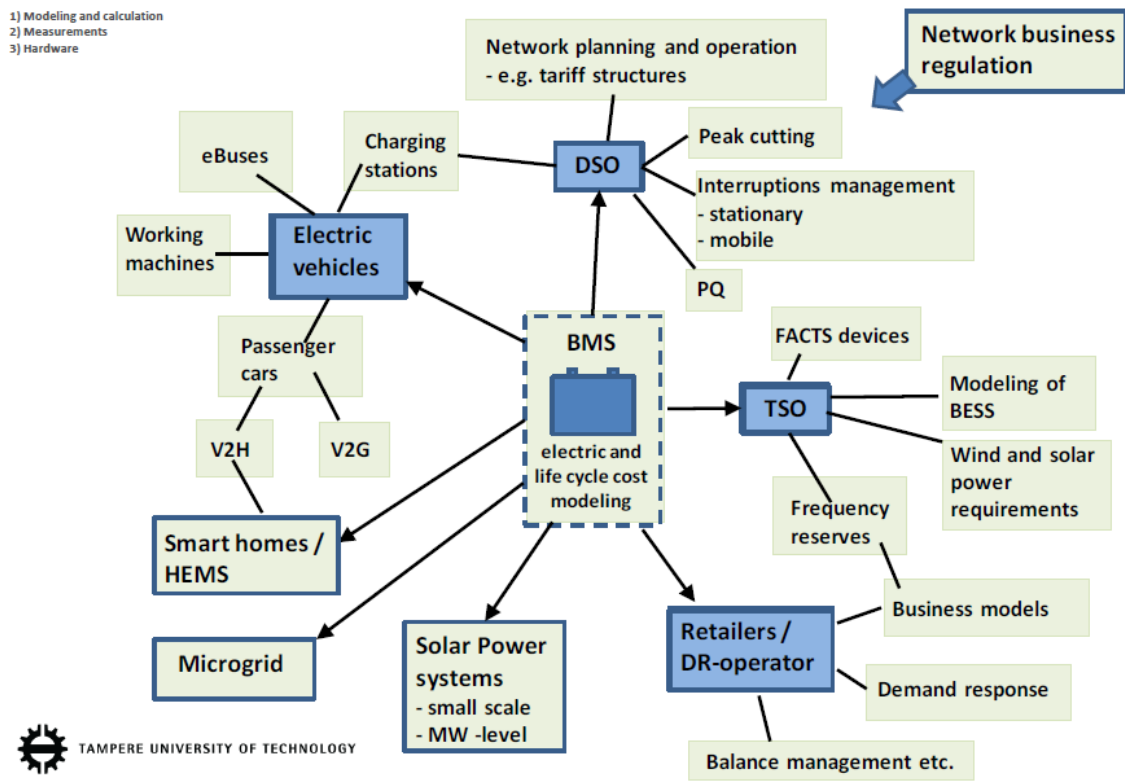


Kuva 13. Tesvoltin On-grid järjestelmän kaavio (30).

4 Sähkövarastot markkinalähtöisestä näkökulmasta

Seuraavaksi esitellään sähkövarastoja niiden markkinalähtöisestä näkökulmasta. Ensiksi käydään läpi nykyistä lainsäädäntöä koskien sähkövarastoja. Lopuksi tutustutaan Euroopan komission puhtaan energian pakettiin. Kuvassa 14 on esitetty sähkövarasto älykkään sähköverkon osana.

Battery energy storage systems as part of Smart Grids



Kuva 14. Sähkövarasto osana älyverkkoa (14).

4.1 Nykyinen lainsäädäntö

Sähkövarastoa ei ole määritelty sähkömarkkinadirektiivissä 2009/72/EY eikä myöskään sähkömarkkinalaissa. Euroopan parlamentin julkaiseman tutkimuksen mukaan sähkövaraston katsotaan usein olevan sähkön tuotantolaitos (15). Sähkömarkkinalain mukaan ”sähkömarkkinoilla toimivan yrityksen on eriytettävä sähköverkkotoiminta muista sähköliiketoiminnoista sekä sähköliiketoiminnot muista yrityksen harjoittamista liiketoiminnoista” (16). Muut sähköliiketoiminnot ovat sähköntuotanto ja -myynti. Energiavirasto toteaa suosituksessaan sähköliiketoimintojen eriyttämisestä: ”Kapasiteetiltaan suuret kiinteät energiavarastot, jotka kykenevät syöttämään keskijänniteverkkoon eivät voi kuulua verkkoliiketoimintaan.” Sähkövarastot eivät siis myöskään voi kuulua sähköverkkomaisuuteen. Lainsäädäntö sallii sähkövarastojen tuottamien palveluiden oston kolmansilta osapuolilta eli markkinoilta. Verkkoyhtiön ostamat palvelut kasvattavat operatiivisia kustannuksia. Nämä taas vaikuttavat tehostamiskannustimeen, joka kannustaa verkonhaltijaa toimimaan kustannustehokkaasti. Operatiivisten kustannusten nousu

voi joissakin tapauksissa pienentää verkkoyhtiön sallittua tuottoa. Sähkövarastopalveluiden tuomat edut, kuten asiakkaan kokemien keskeytysten väheneminen ja heikon verkon vahvistuminen, vaikuttavat toisaalta positiivisesti muihin kannustimiin. (17.)

Valtioneuvoston asetuksessa sähkötoimituksen selvityksestä ja mittauksesta 66/2009 (mittausasetus) säädetään käyttöpaikan ja sähkötuotantolaitoksen varustaminen mittalaitteistolla sähköverkossa. Koska sähkövarastoa ei ole laissa määritelty, on sen asema myös mittauksien osalta epäselvä.

Jakeluverkon haltija tekee jakeluverkossaan taseselvityksen, jossa määrittää alueellaan toimivien sähkönmyyjien sähkötoimitukset tuntitasolla. Jakeluverkon haltija määrittää yleensä alueen kokonaistaseen tuotanto- ja rajapintamittauksien avulla. Käyttöpaikkakohtainen kulutus määritellään tämän jälkeen tuntimittauksista tai poikkeustapauksissa kuormituskäyrien perusteella. Jakelualueen kokonaissähkönkäytön ja käyttöpaikkakohtaisen käytön erotus on verkon häviöt. (18.)

Mittausasetuksen mukaan sähkön tuotanto- ja kulutuskäyttöpaikat on varustettava mittauksella. Sähkövarastot aiheuttavat vääristymiä taseselvitykseen, jos verkkoon kytkettyä varastoa ei käsitellä käyttöpaikkana. Sähkövarastoihin ladatun ja niiden verkkoon syöttämän sähkön osuutta taseselvityksessä ei tiedetä, jos sitä ei mitata. Vääristymä voi johtaa siihen, että yhden tunnin aikana verkon häviöt voivat taseselvityksen mukaan olla negatiiviset.

Sähkövarasto syöttää sähköä verkkoon, mutta se myös kuluttaa sähköä latautuessaan. Sähkömarkkinalaissa on määritelty kanta- ja jakeluverkonhaltijan oikeus hankkia ja toimittaa sähköä. Sähkömarkkinalain 30 §:n mukaan ”kantaverkonhaltija ja oikeudellisesti eriytettyä jakeluverkkotoimintaa harjoittava verkonhaltija voi hankkia ja toimittaa sähköä, jos toiminnan tarkoituksena on:

1. sähköverkon häviöenergian hankinta
2. järjestelmävastuuseen kuuluvien tehtävien hoitaminen
3. siirtorajoitusten hallinta

4. verkon rakentamista, käyttöä ja kunnossapitoa palvelevien siirrettävien varavoimakoneiden käyttö ja niillä tuotetun sähkön toimitus verkkoon.

5. omakäyttösähkön hankinta yhteisön toimitiloihin, sähköasemille tai linkkiasemiin taikka muihin näitä vastaaviin yhteisön kohteisiin

6. jakeluverkonhaltijan sähkötoimitus tähän lakiin perustuvan velvollisuuden nojalla loppukäyttäjälle tilanteessa, jossa vähittäismyyjän toimitus on keskeytynyt myyjästä aiheutuvasta syystä.” (19.)

Jakeluverkonhaltija voi siis hankkia sähköä varastoon vain sähkömarkkinalain 30 §:n mukaisiin tilanteisiin. Verkonhaltija ei myöskään voi toimittaa sähkövarastolla tuotettua sähköä, ellei kyse ole edellä mainitusta tilanteesta.

Kaupantekoa sähkövarastoilla Fingridin reservimarkkinoilla ja osana virtuaalivoimalaitoksia käsitellään tarkemmin omissa kohdissaan. Sähkövarastoa voi myös ladata aurinko- ja tuulivoimalla ja varaston sähköä syöttää kiinteistön omaan verkkoon. Tätä kutsutaan mikrotuotannoksi.

4.2 Euroopan komission puhtaan energian paketti

Sähkömarkkinadirektiivi, osana Euroopan komission puhtaan energian pakettia (engl. clean energy for all europeans), on tällä hetkellä Euroopan parlamentin ja Eurooppa-neuvoston käsittelyssä. Direktiivi tuo sähkövarastot ja kysyntäjouston myös verkkoyhtiöiden työkalupakkiin. Niitä voidaan siis hyödyntää perinteisten investointien rinnalla silloin kun se on tarkoituksenmukaista. Markkinatoimijat voivat luonnollisesti edelleen omistaa ja operoida sähkövarastoja omiin tarpeisiinsa vapaasti. Lopullinen muotoilu ja päätös vielä puuttuu, mutta näyttää siltä, että verkkoyhtiöiden mahdollisuus omistaa varastoja helpottuu verrattuna alkuperäiseen komission esitykseen. Lähtökohtana olisi kuitenkin, että verkkoyhtiö hankkii varastokapasiteetin markkinatoimijalta. Ennen kuin sähkövarastoja voidaan oikeasti hyödyntää verkkoyhtiöiden tarpeisiin, pitää sähkömarkkinalaki ja Energiaviraston regulaatiomalli päivittää. Euroopan komission puhtaan energian pakettiin kuuluva uudistettu sähkömarkkinadirektiivi saataneen käytännössä voimaan 2020-luvun alkupuolella. (20.)

5 Tuet ja takaisinmaksuaika

Uusiutuvaan energiaan siirtymistä kannustetaan monilla eri tavoilla. Tässä esitellään sähkövarastoihin ja niihin useasti liittyvien aurinkosähköjärjestelmien tuet. Business Finland (ent. Tekes) voi myöntää energiatukea (25 % vuonna 2018) yhtiöille ja julkisille rakennuksille, maatilat voivat saada tukea (40 % vuonna 2018) energiajärjestelmien investointien kustannuksista ja kotitaloudet kotitalousvähennyksen kautta (50 % työstä vuonna 2018).

5.1 Energiatuki

Energiatuen tavoitteena on edistää uusien ja innovatiivisten ratkaisujen kehittämistä energiajärjestelmien muuttamiseksi pitkällä aikavälillä vähähiiliseksi. Business Finland voi myöntää energiatukea mm. selvitys- ja investointihankkeisiin, jotka edistävät uusiutuvan energian käyttöä tai tuotantoa. (22.)

Energiatukea voivat saada kaiken kokoiset yritykset, mukaan lukien toiminimet sekä ammatin- ja liikkeenharjoittajat ja yhteisöt, kuten kunnat, seurakunnat ja säätiöt.

Energiatukea eivät saa asunto-osaakeyhtiöt, asuinkiinteistöt, maatilat tietyin poikkeuksin, valtionosuutta saavat perustamishankkeet eivätkä organisaatiot, joiden toimintaa rahoitetaan valtion talousarviosta. Lisäksi arvioidaan yrityksen kykyä suoriutua projektista eikä verovelkaa saa olla. (22.)

Sairaalat voivat saada tukea, mutta hoivakodit eivät (22). Hoivakodit tulkitaan siis asuinkiinteistöiksi.

Energiavarastoihin liittyviä hankkeita tuetaan, jos samalla investoidaan energiatehokkuutta parantaviin koneisiin ja laitteisiin tai uusiutuvan energian tuotantokapasiteettiin. Energiavarastoon liittyvien kustannusten enimmäismäärä hankkeessa on 50 % hankkeen kokonaiskustannuksista. Aurinkosähköhankkeille investointituki on 25 % ja pien-
tuulivoimahankkeille 20–25 %. Sähkövarasto yhdistettynä aurinkosähköhankkeeseen voi saada vuonna 2018 kokonaisuudessaan 25 % tukea, jos sähkövaraston osuus hankkeen kokonaiskuluista on enintään puolet. Kannattaa panna merkille, että tukien painopisteet ja määrät vaihtelevat vuosittain.

5.2 Tuki maatalouksille

Maatiloilla on mahdollisuus hakea aurinkosähköinvestoinnille investointitukea ELY-keskukselta, jonka suuruus voi olla enintään 40 % investoinnin verottomasta hinnasta. Jotta tukea voi saada, tulee investoinnin olla vähintään 17 500 euroa (alv 0 %). Tämän lisäksi aurinkosähköjärjestelmän tuotanto tulee käyttää kokonaan maataloustoiminnassa vuositason ja maatalouden yrittäjätuloa pitää olla vuodessa vähintään 25 000 euroa eikä tähän lasketa metsätuloja.

Tukea pitää hakea ennen investoinnin toteuttamista eikä investointia saa aloittaa ennen kuin tukipäätös on tullut. Investointituen hakeminen tapahtuu Maaseutuviraston Hyrrä-järjestelmässä. Hakemuksen liitteeksi tarvitaan maatalouden sähkönkäyttötiedot, aurinkosähköjärjestelmän rakennussuunnitelmat, liiketoimintasuunnitelma, maatalouden verolomake, hakijoiden velkatodistus ja velkaluettelo. Pro Agrian neuvojat auttavat hakemuksen laadinnassa. ELY-keskuksen myöntämä tuki on voimassa kahden vuoden ajan ja maksatusta tulee hakea tänä aikana.

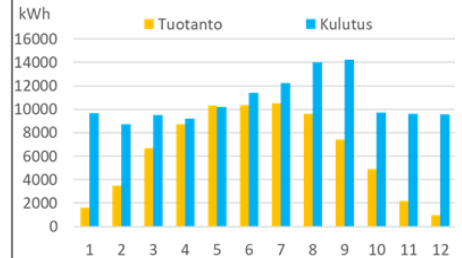
5.3 Esimerkki

Sähkövarastolla täydennetty aurinkopaneelijärjestelmä on hyvä ratkaisu maatiloille, joilla sähkönkulutus on yleensä suurta. Aurinkopaneeleille löytyy tilaa rakennusten katoilta tai asennus voidaan tehdä tarvittaessa myös maahan. Tärkeää on saada paneelit suunnattua oikein ja tehdä mitoituskalkelmat huolellisesti. Tällöin investointi saadaan nopeasti kannattavaksi. Kuvassa 15 ja 16 on esitetty laskelmat järjestelmän mitoitukselta ja takaisinmaksuajasta. (30.)

Maatila 50 kW aurinkosähkö ja 48 kWh sähkövarasto varavoimalla

- 11 c/kWh sähkön hinnalla

Sähköhinta	11	c/kWh
Verkkoon syötettävästä sähköstä	2,9	c/kWh
Kohteen kulutus	128022	kWh
Aurinkopaneelijärjestelmän koko	49500	Wp
Aurinkopaneelijärjestelmän hinta (Alv. 24 %)	83336	€
Vuotuinen tuotanto	53866	kWh
Arvioitu tuki aurinkosähkölle (40 %)	33334	€
Aurinkopaneelin teho	275	W
Aurinkopaneelin lkm	180	kpl
Aurinkopaneelin kulma	30	Astetta
Aurinkopaneelin suunta (Etelä 180)	180	Astetta
Taloudellinen pitoaika	30	Vuotta
Akun koko	48	kWh
Järjestelmän kokonaishinta (Alv 24 %)	124965	€



Wednesday, April 4, 2018

Solar Factory Oy

13

Kuva 15. Esimerkissä on laskettu kulutukseen sopiva järjestelmä (30).

Oikein mitoitettu järjestelmä takaa investoinnille kohtuullisen lyhyen takaisinmaksuajan varsinkin tuen kanssa, kuten kuvasta 16 ilmenee. Kulutushuippujen tasaaminen ja sähkökatkojen aikana varavoimana toiminen tulee huomioida sähkövaraston eduksi. (30.)

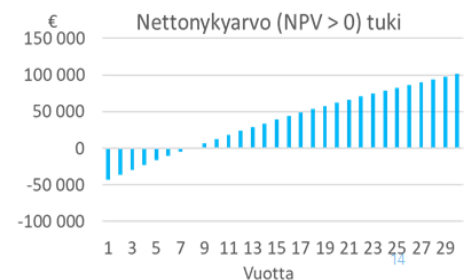
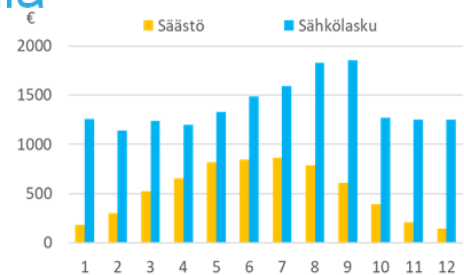
Maatila 50 kW aurinkosähkö ja 48 kWh sähkövarasto varavoimalla

- 11 c/kWh sähkön hinnalla

Korko (NPV diskonttaus korko)	2 %
Vuotuinen säästö	7124 €/vuosi

Ei tukea	
Takaisinmaksuaika	14 vuotta
Sisäinen korko IRR	4 %

Tuen kanssa (40 % tuki)	
Takaisinmaksuaika	8 vuotta
Sisäinen korko IRR	7 %

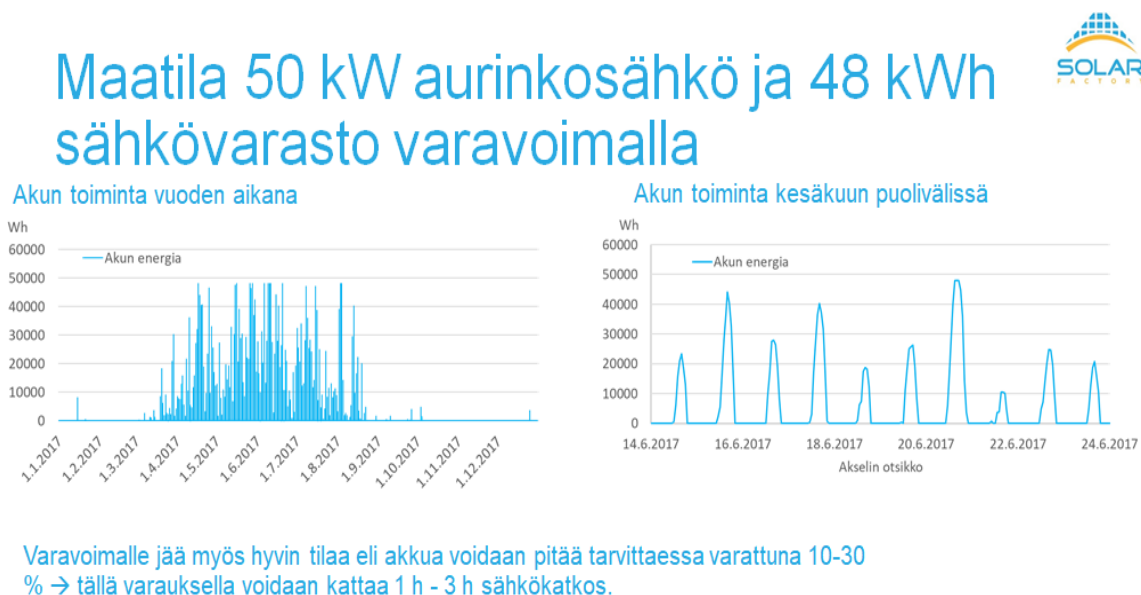


Wednesday, April 4, 2018

Solar Factory Oy

Kuva 16. Kuvassa on laskettu takaisinmaksuaika tuen kanssa ja ilman (30).

Maatiloilla sähkövarastoa tarvitaan erityisesti varavoimana sähkökatkosten varalle. Oikein mitoitettulla järjestelmällä saadaan aurinkopaneelien ylijäämätuotanto varastoitua sähkövarastoon, purettua sitä illan ja yön aikana jättäen kuitenkin riittävästi sähkökatkon varalta varastoon. Kuvassa 17 on esitetty akun toimintaa. (30.)



Wednesday, April 4, 2018

Solar Factory Oy

15

Kuva 17. Kuvassa on laskettu sähkövaraston varavoimakapasiteettia (30).

6 Aggregointi

Aggregoinnilla tarkoitetaan pienten sähkökuluttajien ja -tuottajien joustokyvyn yhdistämistä sähkö- ja reservimarkkinoilla hyödynnettäviksi kokonaisuuksiksi. Aggregointi on yksi tapa saavuttaa sähköjärjestelmään tarvittava lisäjousto vaihtelevan sähköntuotannon osuuden kasvaessa. Teknisiä ratkaisuja on saatavilla, mutta haasteena on olemassa olevien markkinamallien soveltuvuus aggregointiin. Perinteisesti joustoa ovat voineet tarjota ainoastaan sähkön toimitusketjun osapuolet (tasevastaava – sähkön myyjä – sähkön kuluttaja). Tämä rajoitus on poistumassa ja on syntynyt uusia toimitusketjun ulkopuolisia joustokyvyn tarjoajia, aggregaattoreita. Heidän toimintansa parempi mahdollistaminen Pohjoismaissa vaatii vielä markkinoiden pelisääntöjen uudistamista. (23.)

Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt Energinet (Tanska), Fingrid (Suomi), Statnett (Norja) ja Svenska kraftnät (Ruotsi) tarkastelevat yhdessä aggregointimallien kehittämistä pohjoismaisilla reservimarkkinoilla. Työn tuloksena on julkaisu raportti, jossa on kuvattu Pohjoismaissa käytössä olevat aggregointimallit ja niiden pilotit (24). Pohjoismainen yhteistyö jatkuu keskittyen pilottien toteutukseen. Tavoitteena ovat harmonisoidut pelisäännöt pohjoismaisilla reservimarkkinoilla, jotta reservintarjoajat voivat osallistua markkinoille samoin ehdoin eri maissa. Harmonisointi voidaan käytännössä toteuttaa vaiheittain, koska aggregointimallien kehitys on eri Pohjoismaissa eri vaiheessa. (23.)

6.1 Fingridin aggregointipilotit

Pohjoismaisen sekä muiden lähialueiden kantaverkkoyhtiöiden yhteistyö lisäksi Fingrid on kehittänyt aggregointimalleja Suomessa. Taajuusohjattujen reservien markkinapaikkoja on Suomessa jo avattu toimitusketjun ulkopuolisille reservintarjoajille ja loppuvuonna 2017 alkaneiden pilottiprojektien tarkoitus on selvittää samaa säätömarkkinoilla. (23.) Vuoden 2018 loppuun kestävien pilottien avulla on tarkoitus selvittää useasta taseesta aggregoinnin mahdollistamista sekä toimitusketjun ulkopuolisen reservinmyyjän osallistumista säätösähkömarkkinoille.

Fingridin pilottiyhteistyökumppanit ovat Helen Oy ja Voltalis S.A. Helen toimii Suomessa sähkön myyjänä ja tuottajana. Pilotissa Helen tulee hyödyntämään kiinteistöjen varavoimaa. Ranskalainen Voltalis on toiminut aggregaattorina vuodesta 2008 ja operoi noin 100 000 ranskalaista kotitaloutta ja pienempiä kaupallisia kohteita. Pilotissa Voltalis keskittyy kysyntäjouston, myös kotitalouksien, aggregointiin. Fingridin tavoitteena on selvittää pilotoitavien mallien toimivuus, tiedonvaihtotarpeet osapuolten välillä sekä se, millaisia vaikutuksia säädöstä on jälkeinpäin (rebound). (28.)

1. Helen; aggregaattorilla on tasevastuu, tasesähkökompensaatio

* Aggregaattorilla on tasevastuu, mutta se voi aggregoida resursseja myös muista kuin omasta tasevastuustaan.

* Fingrid maksaa aggregaattorille korvausta tilatun säädön mukaisesti.

* Mikäli toimitettu energiamäärä on pienempi kuin tilattu säätö, tehdään toimittamattomasta energiasta tehokauppa Fingridiltä aggregaattorille nolalahinnalla.

* Mikäli toimitettu energiamäärä on suurempi kuin tilattu säätö, tehdään ylijäämäenergiasta tehokauppa aggregaattorilta Fingridille nollahinnalla.

Katso kuvat 18 ja 19

2. Voltalis; aggregaattorilla ei ole tasevastuuta, rahallinen kompensatio

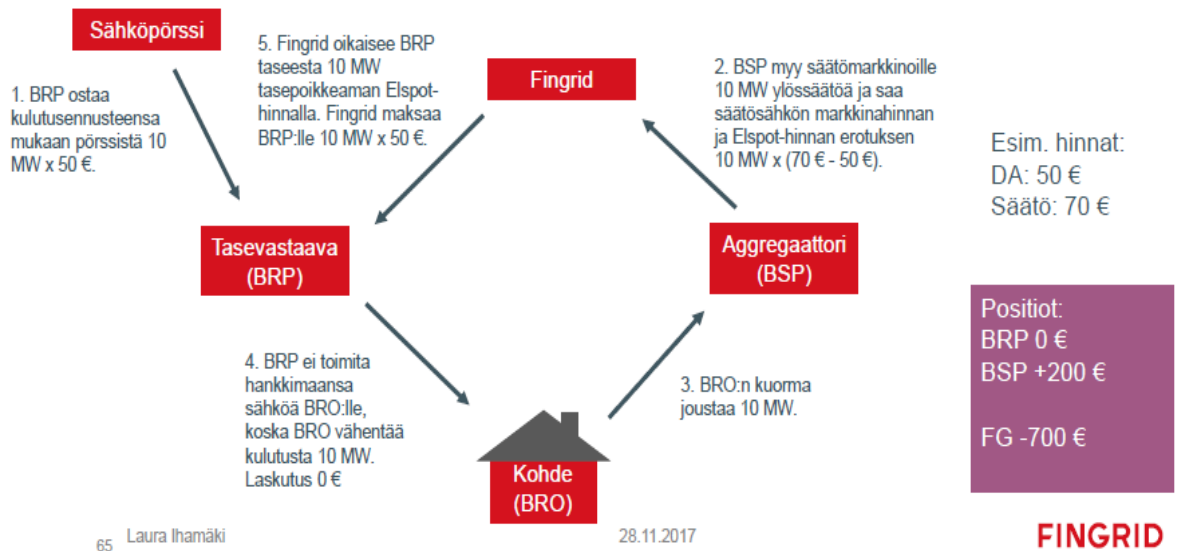
* Fingrid maksaa aggregaattorille korvausta toimitetun energiamäärän mukaisesti.

* Toimittamattomasta energiamäärästä aggregaattori maksaa Fingridille sanktiona 100 % kyseisen tunnin säätöhinnasta.

* Mikäli toimitettu energiamäärä on suurempi kuin tilattu säätö, maksaa Fingrid aggregaattorille korvausta vain tilatun säädön mukaisesta energiamäärästä.

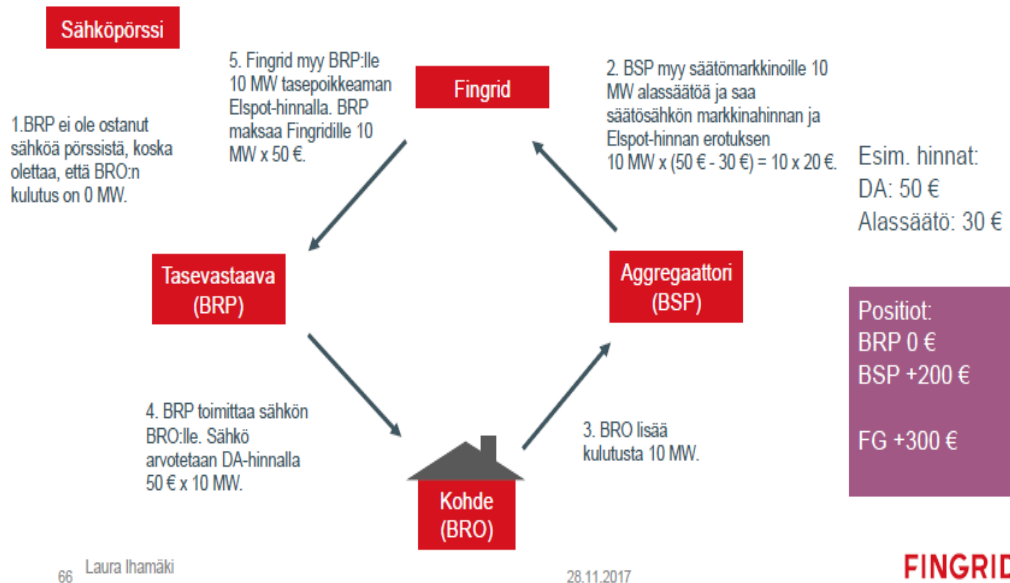
Katso kuvat 18 ja 19

Oikaisumalli, kulutuksen ylössäätö



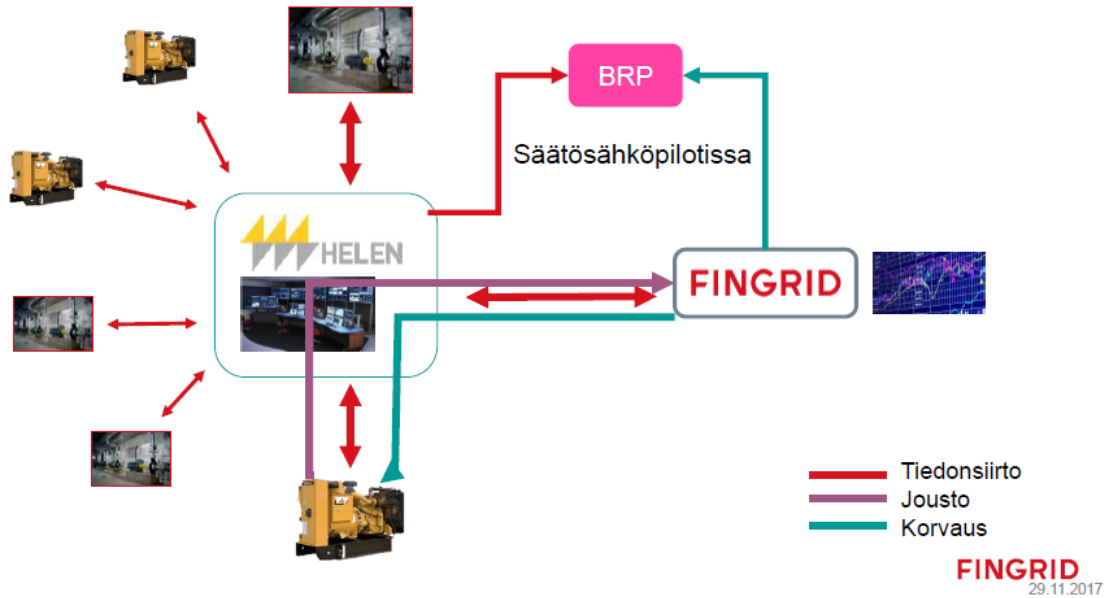
Kuva 18. Kuva esittää, miten kulutuksen ylössäätö tapahtuu (28).

Oikaisumalli, kulutuksen alassäätö



Kuva 19. Kuva esittää, miten kulutuksen alassäätö tapahtuu (28).

Kuvassa 20 selviää Helenin toimintamalli. Aggregoitavien varavoimakoneiden tulee olla etäohjauksessa ja reaaliaikamittauksen piirissä. Tämä vaatii pienen muutoksen varavoimakoneiden ohjelmoitavaan logiikkaan. Helen toimittaa konetta ohjaavan ohjausboxin. Etäohjaus hoidetaan Helenin valvomosta ja Helen hoitaa myös Fingridiin liittyvän yhteydenpidon. Helen maksaa säätösähkökorvauksen ja muut mahdolliset korvaukset asiakkaalle ja veloittaa oman osuuden syntyneistä kaupoista. (28.)

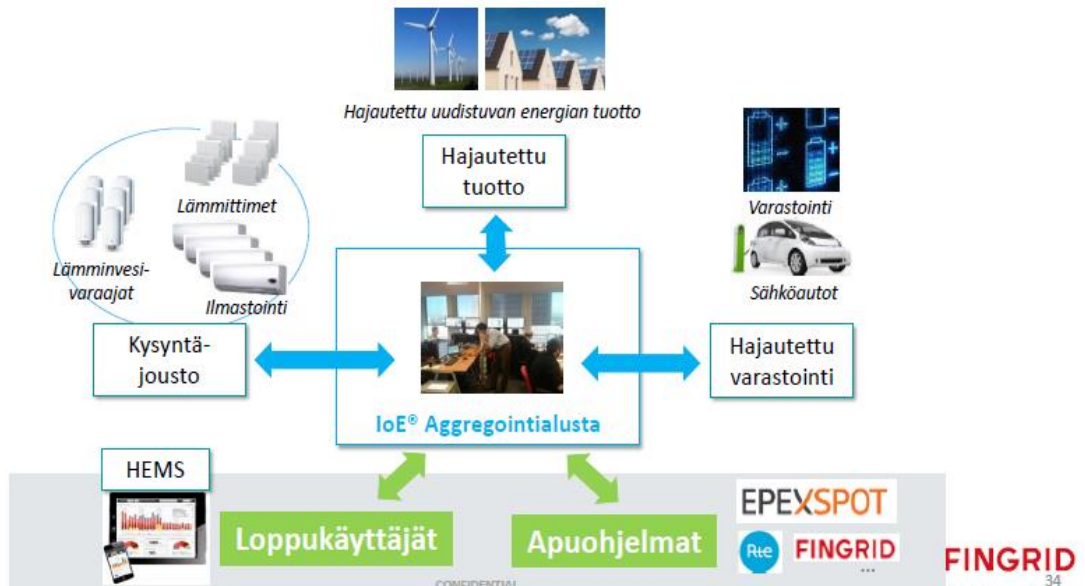


Kuva 20. Helenin toimintamalli pilotissa (28).

Voltalis on ranskalainen yritys, joka on tehnyt alan tuotekehitystä lähes kymmenen vuoden ajan ja toiminut kuusi vuotta päivittäisenä myyjänä energiemarkkinoilla.

What is Voltalis

» Muunna loppukäyttäjä järjestelmän optimoinnin aktiiviseksi osallistujaksi

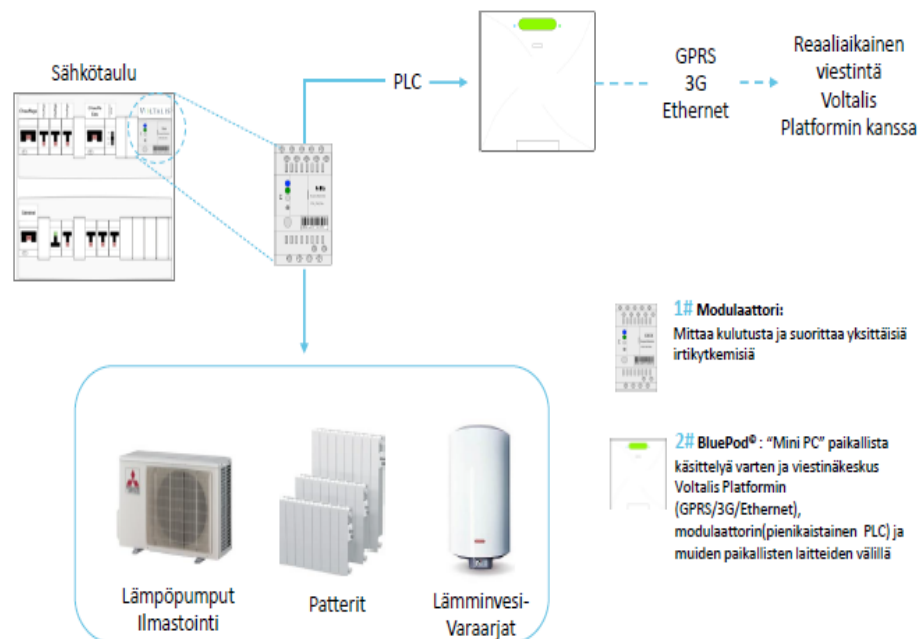


Kuva 21. Voltalisin toimintaperiaate (28).

Voltalis hoitaa yli 100 000 kohteen aggregoinnin reaaliajassa ja kehittää jatkuvasti uusia ratkaisuja niin kuluttajille kuin sähkövoimajärjestelmälle. Voltalis on Internet of Energy (IoE) -toimija ja sillä on patentoitu aggregointi- ja optimointialusta, jolla ohjataan lähes miljoonaa laitetta. Loppukäyttäjä saa säästöä ja käyttöönsä henkilökohtaisen käyttöliittymän. Kuvat 21 ja 23 havainnollistavat Voltalisin toimintaa. (28.)

Esimerkiksi 3000 lämminvesivaraajan säädöllä saadaan kulutushuiput puolittumaan, ilman että loppukäyttäjä huomaa mitään vaikutusta. Kulutusta voidaan jakaa koneoptimisen perusteella tehokkaammalla tavalla kuin pelkkien hintasignaalien perusteella. (28.)

Tyypillinen asennus kodissa



CONFIDENTIAL

38

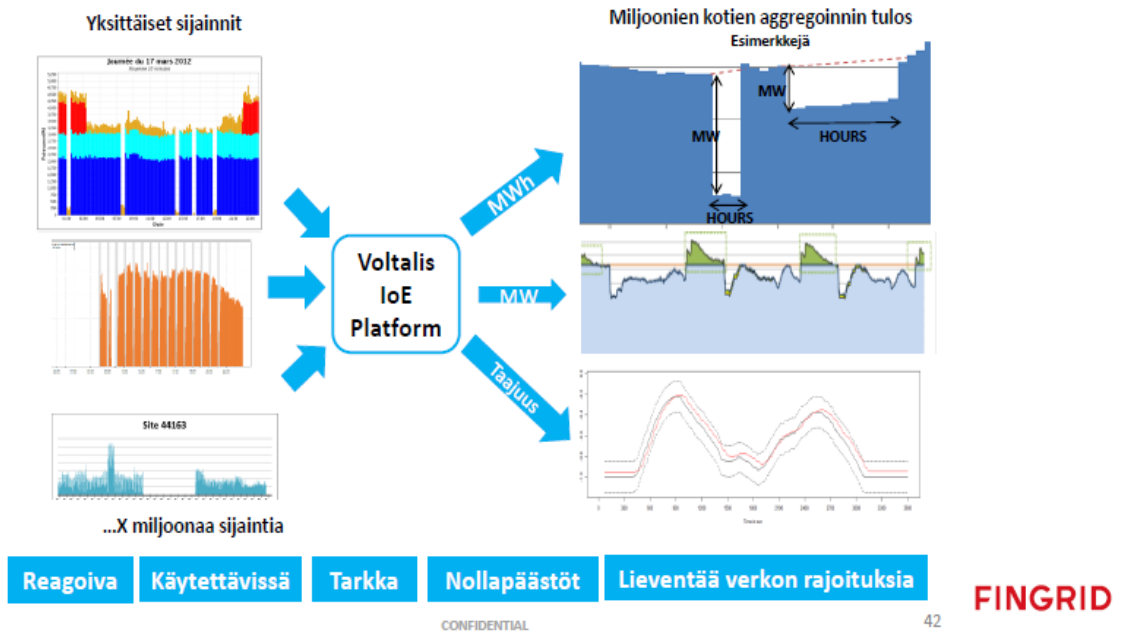
FINGRID

Kuva 22. Aggregoitavan kuluttajan kotiin tarvittavat asennukset ja laitteet (28).

Sadat kunnat ja julkiset laitokset ovat aktiivisesti tukeneet Voltalisin kysyntäjousteratkaisua vuodesta 2010 lähtien. Myös kansalaiset ovat kiinnostuneita osallistumaan. 75 % tavoitetuista ihmisistä on ottanut vastaan Voltalisin laitteen. Kuvassa 22 on tyypillinen asennus kodissa. (28.)

Joustavuuksien aggregointi

» Vaihtoehto tehonkulutukselle



Kuva 23. Voltalis edustaa 300 MW:a ja käsittelee suuren määrän dataa päivittäin (28).

Fingrid päättää pilottien tulosten pohjalta miten aggregointia kehitetään säätömarkkinoilla ja muilla reservimarkkinoilla. Pilottien aikana kerätään palautetta erityisesti pilotti-kohteilta, niiden tasevastaavilta ja myyjiltä sekä aggregaattoreilta. Fingrid viestii pilottien etenemisestä vuoden 2018 aikana mm. asiakaslehdessään, kevään reservipäivillä ja webinaareissa.

7 Tulevaisuudennäkymiä

Vihreään sähköjärjestelmään siirtyminen on käynnissä. Päästökauppa sekä energiatehokkuuden että uusiutuvan energia tavoitteet ovat vauhdittaneet koko energia- ja sähköjärjestelmän murrosta. Lähtökohtana tälle kaikelle on ilmastonmuutoksen torjunta.

Fingridin näkee tulevaisuuden vihreään sähköjärjestelmään siirtymisessä kolme keskeistä teemaa: sähkön käyttäjän aseman vahvistamiseen, markkinapaikkojen kehittämiseen siten, että ne vastaavat tuotantorakenteen muutokseen, sekä markkinatoimijoiden aktiiviseen osallistumiseen sähköjärjestelmän tasapainottamiseksi. (26.)

Kuluttajilla on tulevaisuudessa parempi mahdollisuus osallistua ilmastonmuutoksen torjuntaan omilla valinnoillaan. Sähkön käyttäjät voivat sähkön myyjän valinnan lisäksi osallistua myös kysyntäjousto.

7.1 Kuluttajan rooli

Vihreässä sähköjärjestelmässä merkittävä osa sähköntuotannosta vaihtelee sään mukaan. Välillä tuulee kovaa, välillä on täysin tyyntä. Aurinko ei paista yöllä ja on välillä päivälläkin paksujen mustien pilvien takana. Sähkönkulutusta on pystyttävä mukauttamaan sähköntuotantoon aivan uudessa laajuudessaan. Sähkövarastojen yleistyminen myös kuluttajilla lisää joustomahdollisuuksia ja samalla hankkia taloudellista etua. Sähkövarasto voidaan ladata kuluttajan omalla aurinkopaneelijärjestelmän ylijäämäenergialla päivällä täyteen ja purkaa illalla ja yöllä. Sähkövarastoa voidaan myös ladata verkosta halvalla tuntihinnalla, esimerkiksi yöllä, ja käyttää kalliimpien tuntien aikana. Kuluttajat voivat myös antaa sähkönmyyjälle tai muulle palveluntarjoajalle mahdollisuuden ohjata sähkön käyttöä älykkäästi sähkön hinnan mukaan.

Palveluntarjoajat, aggregaattorit, kokoavat kuluttajien kysyntäjoustop suuremmiksi kokonaisuuksiksi ja tarjoavat ne joustomarkkinoille helpottamaan reaaliaikaisen voimajärjestelmän tasapainoa. Kuluttajan kysyntäjousto-elementtejä ovat esimerkiksi sähkövarastot sekä sähkölämmitystalouksien lämpöpumppujen ja lämminvesivaraajien tarjoama kapasiteetti. Sähköautojen yleistyminen tarjoaa lisäjoustomahdollisuuksia kuluttajille, kunhan kaksisuuntaisten latauspisteiden verkosto saadaan rakennettua. (26.)

7.2 Sähkömarkkinat

Sähköä pitää tuottaa ja kuluttaa joka hetki yhtä paljon. Jos tuotantoa on enemmän kuin kulutusta, sähköjärjestelmän taajuus nousee. Vastaavasti, jos tuotantoa on liian vähän, taajuus laskee. Liian suuret vaihtelut aiheuttavat sähkölaitteiden rikkoutumisia ja pahimmillaan pitkiä sähkökatkoksia. Sähkömarkkinoilla sähkön hinta muodostuu kulutuksen ja tuotannon välisestä erosta. Reaaliaikamarkkinoilla, eli säätösähkö- ja reservimarkkinoilla, voi usein olla suuria hintavaihteluita. Hintavaihtelut tulevat tulevaisuudessa merkittävästi kasvamaan. Fingrid vastaa sähköjärjestelmän toimivuudesta ja edistää sähkömarkkinoiden toimivuutta poistamalla markkinoille tulon esteitä. Vihreässä sähkö-

järjestelmässä suurteollisuuden lisäksi yhä useamman kuluttajan on mukautettava sähkökäyttöään sään mukaan vaihtelevaan tuotantoon. Tehopohjaiseen hinnoitteluun siirtyminen ohjaa kuluttajien leikkaamaan omia kulutushuippujaan. Joustava sähkökäyttäjä pääsee hyötymään tästä muutoksesta. Yksin tai palveluntarjoajan avustuksella erityisesti sähkövaraston omistavat kuluttajat voivat myydä kalliilla ja ostaa tuulisena ja aurinkoisena päivä akut täyteen halpaa energiaa. Myös tehopiikkien leikkaaminen on sähkövarastojen omistajille vaivatonta. Joustamattomat sähköntuottajat ja -kuluttajat joutuvat taas maksamaan nykyistä suuremman osan sähköjärjestelmän tasapainottamisen kuluista. (26.)

Saksassa on toiminnassa sonnenCommunity, jossa siihen kuuluvat sonnen-sähkövaraston omistavat kotitaloudet voivat tasata keskenään tuotannon yli- ja alijäämää. Kysymyksessä on eräänlainen osuuskuntamalli. Suomessa tämä ei ole vielä järkevää sähkön siirtohinnoitteluun liittyvistä ja verotuksellisista syistä. Valtioneuvoston asettamat tavoitteet ja erinäisten työryhmien työn tulokset tukevat kuitenkin tämäntyyppistä kehitystä, joten määräyksiin on tulossa muutoksia myös Suomessa. Kuvassa 24 on esitetty mahdollinen tulevaisuuden sonnenCommunity Suomessa.

Tulossa

sonnenCommunity



- Video: <https://www.youtube.com/watch?v=FBfdEhZnuVk>



Friday, April 6, 201

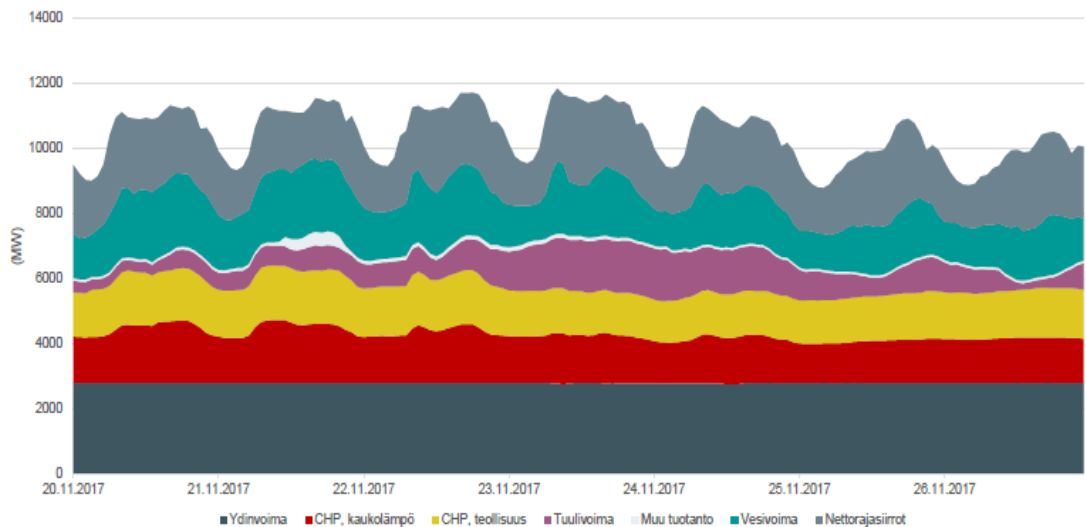
7

Kuva 24. Tulevaisuuden yhteisöllinen toimintamalli (30).

8 Yhteenveto

Yhdistämällä erilaisia tuotantomuotoja virtuaalivoimalaitokseksi saadaan luotua kysyntäjoustoa. Olosuhteista riippuvaiset sähkön tuotantomuodot kuten aurinko- ja tuulienergia, vaativat sähköverkolta tulevaisuudessa yhä enemmän joustavuutta eli säätövoimaa. Säätövoimaa saadaan vesivoiman lisäksi sähköä varastoimalla. Sähkövarastojen lisääntyminen mahdollistaa uusiutuvien energianlähteiden käytön kasvun Suomessa. Kuva 25 havainnollistaa sähköntuotannon keskimääräistä vaihtelua marraskuussa 2017. Olemme selkeästi menossa kohti vihreää energiantuotantoa. Valtiovalta kannustaa erilaisilla tuilla siirtymään uusiutuvaan päästöttömään energiaan sekä luopumaan esimerkiksi hiilen käytöstä. Hiilen käytöstä luopumiselle on annettu myös takaraja, vuosi 2029. Osa Työ- ja elinkeinoministeriön myöntämistä energiakärkihanketuista on koettu kilpailua vääristäviksi.

Tuotannon keskimääräinen vaihtelu



4 Infotilaisuus aggregointipiloteista

28.11.2017

FINGRID

Kuva 25. Esimerkki sähköntuotannon vaihtelusta (28).

Uusiutuvan energian määrä tulee lähivuosina voimakkaasti kasvamaan. Vaikka pitkän ja lyhyen aikavälin sääennustuksilla pystytään luultua paremmin ennakoimaan aurinko- ja tuulivoiman tuotantoa, lisääntyy sähköntuotannon keskimääräinen vaihtelu tulevai-

suudessa. Sähkön varastointi tulee olemaan keskeisessä asemassa. Sähkökemialliset varastot eli akut soveltuvat parhaiten kysyntäjouston tarpeisiin.

Sähkövarastojen käyttöön liittyy lainsäädännöllisiä haasteita. Nykyisen sähkömarkkina-lain mukaan verkkoyhtiö ei voi käytännössä omistaa sähkövarastoa. Lainsäädäntö on uudistumassa. Sähkövarasto on siinä määritelty ja verkkoyhtiöiden osalta tilanne tulee helpottumaan. Tosin kaikilla markkinapohjaisesti toimivilla on nyt jo mahdollisuus hyödyntää sähkövarastoja ja myydä palveluitaan myös verkkoyhtiöille. Energiaviraston on arvioitava lainsäädäntömuutosten vaikutukset valvontamenetelmiin. Olemme siis pitkäl-lä 2020-luvulla, ennen kuin uutta sähkömarkkinalakia päästään soveltamaan käytän-töön. Saksassa käytössä oleva sähkövarastojen omistajien yhteisö, jossa sähköä voi-daan myydä ja ostaa yhteisön sisällä, tulee mahdollistaa Suomessa. Tämä vaatii muu-toksia myös verotuksen osalta.

Virtuaalivoimalaitospilotteja on käynnissä ympäri Suomea suuri määrä. Sähkölaitokset kokoavat pientuottajia ja –kuluttajia yhteen ja hyödyntävät saavutettavan kysyntäjous-ton sähkömarkkinoilla. Aggregaattoreina toimii myös muita yhtiöitä kuin sähkölaitoksia. Sähkövarastot ovat merkittävä osa näitä projekteja.

Sähkön siirtohintaa tulee nousemaan, joidenkin arvioiden mukaan merkittävästi. Teho-huippuihin perustuva hinnoittelu tulee myös lisäämään sähkövarastojen kiinnostavuut-ta. Uusien rakennusten energiatehokkuusvaatimukset lisäävät sähkövarastoinvestoin-teja. Valmiit liityntämahdollisuudet sähkökeskuksissa paikalliselle sähköntuotannolle ja -varastoinnille edistäisivät osaltaan uusiutuvan energia käytön lisääntymistä. Sähköva-rastojen ohjautomaatiota kehittää useampi toimija. Sähkövarastojen ohjautrajapin-tojen standardisointi helpottaisi tilannetta ja nopeuttaisi varastojen yleistymistä. Valmis-tajat tuskin pystyvät löytämään asiasta yhteisymmärrystä.

Käytössä olevat turvalliset akkuteknologiat ovat nyt jo riittävän kehittyneitä, mutta kehi-tystyötä tehdään ympäri maailmaa niin julkisin kuin yksityisin varoin. Suomikin panos-taa akkuosaamisen kehittämiseen. Meiltä löytyy osaamista ja raaka-aineita.

Uudet akkuteknologit ja vanhojen kehittäminen sekä kysynnän arviolta kymmenkertais-tuminen muutaman vuoden sisällä, johtavat todennäköisesti hintojen laskuun. Inves-toinnin takaisinmaksuaika ja tuotto kiinnostavat asiakkaita. Aurinkopaneelien hinnat tuskin laskevat enää kovin merkittävästi. Sähkövarastojen hintakehityksestä on useita

arvioita, mutta voimme olettaa hinnan putoavan kolmasosaan nykyisestä seuraavan kymmenen vuoden aikana. Jos sähkön siirtohintaa samalla nousee ja huipputehoon perustuva hinnoittelu yleistyy, tulee sähkönkäyttäjälle erittäin houkuttelevaksi vaihtoehdoksi ryhtyä mikrotuottajaksi, varastoida sähköä ja tehdä sopimus aggregaattorin kanssa hyvään hintaan.

Lähteet

- 1 Suomi edelläkävijänä sähkön kulutusjoustossa. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2018/suomi-edellakavija-sahkon-kulutusjoustossa-euroopassa---sahkojarjestelman-murros-vaatii-suuria-muutoksia-markkinoiden-rakenteisiin/>>. Luettu 5.4.2018.
- 2 Uusiutuva energia. 2018. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. <<http://tem.fi/uusiutuva-energia/>>. Luettu 5.4.2018.
- 3 International Electrical Engineering Journal (IEEJ) Vol. 6 (2015) No.9, pp. 2010-2024 ISSN 2078-2365 <http://www.ieejournal.com/>. Verkkoaineisto. <<https://pdfs.semanticscholar.org/edfb/8d4a51fe37ba1970872635f423a209d44fd8.pdf>>. Luettu 3.4.2018.
- 4 Multi-criteria optimization of an energy storagesystem within a Virtual Power Plant architecture P. Lombardi, *Member, IEEE*, M. Stötzer, *Student Member, IEEE*, Z. Styczynski, *Senior Member, IEEE*, A. Orths, *Member, IEEE* 978-1-4577-1002-5/11/\$26.00 ©2011 IEEE. Luettu 3.4.2018.
- 5 Virtuaalivoimalaitos: Kotitalouksien kanssa puhtaamman maailman puolesta. 2018. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www.fortum.fi/virtuaalivoimalaitos-kotitalouksien-kanssa-puhtaamman-maailman-puolesta>>. Luettu 25.3.2018.
- 6 Ericsson's data center and Fortum collaborate. 2018. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www3.fortum.com/media/2018/01/ericssons-data-centre-and-fortum-collaborate-demand-response>>. Luettu 24.3.2018.
- 7 Aurinkoenergian tuottajapaketti. 2018. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/aurinko/kodit/aurinkoenergian-tuottajapaketti/>>. Luettu 3.4.2018.
- 8 Sähkömarkkinat. 2018. verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/>>. Luettu 26.3.2018.
- 9 Hirn, Esa. 2016. Kysyntäjoustopon laaja näkökulma ja mahdollisuudet. YAMK opinnäytetyö 21.11.2015, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki. Luettu 1.4.2018.
- 10 IEC Electrical Energy Storage. 2011. White paper. Verkkoaineisto. <<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>>. Luettu 3.4.2018.
- 11 Applied Energy 137. 2015. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Verkkoaineisto. <<https://ac.els-cdn.com/S0306261914010290/1-s2.0->

- S0306261914010290-main.pdf?_tid=a31d1a2d-efc8-49f8-89b5-d001b76747d1&acdnat=1523090364_a2a22f4b70e2968ef04727532bcf2b72>. Luettu 3.4.2018.
- 12 Varonen, Valtteri. 2017. Sähkövarastojen käyttö verkkoliiketoiminnassa, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. Luettu 1.2.2018.
 - 13 Energy storage-the role of electricity. 2017. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_t_travail_service_part1_v6.pdf>. Luettu 2.4.2018.
 - 14 Markkula, Joni.2016. Akusto osana sähköverkkoa, esitys, 20.6.2016. Tampere.
 - 15 Gouardères, F. 2015. Energy Storage: Which Market Designs and Regulatory Incentives are needed?, Study for the ITRE Committee, European Union, 84 p.
 - 16 Sähkömarkkinalaki 77 §, Sähkömarkkinalaki. 2013. L 588/2013. Verkkoaineisto. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/al-kup/2013/20130588>>. Luettu 21.3.2018.
 - 17 Energiaviraston suositus – Sähkö- ja maakaasuliiketoimintojen laskennallinen ja oikeudellinen eriyttäminen. 2015. Dnro 2449/421/2015, 36 s. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Eriytt%C3%A4missuositus+2449_421_2015.pdf/b1e97829-3dca-48fd-8c2b-eefaeaf7d4bb>. Luettu 21.3.2018.
 - 18 Partanen, J., Viljainen, S., Lassila, J., Honkapuro, S., Salovaara, K., Annala, S., Makkonen, M. (2014). Sähkömarkkinat - opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
 - 19 Sähkömarkkinalaki 30 §, Sähkömarkkinalaki 2013. L 588/2013. Verkkoaineisto. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/al-kup/2013/20130588>>. Luettu 21.3.2018.
 - 20 Vesa, Juha. 2018. Ryhmäpäällikkö, Sähkö- ja elektroniikka-alan standardisointijärjestö SESKO. Helsinki. Haastattelu 13.3.2018.
 - 21 Puhtaan energian paketti etenee. 2018. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. <http://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/ministeri-tiilikainen-puhtaan-energian-paketti-eteni-hyvin-energianeuvostossa>. Luettu 14.3.2018.
 - 22 Energiatuki. 2018. Verkkoaineisto. Business Finland. <<https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/pk-ja-midcap-yritys/energiatuki/>>. Luettu 1.4.2018.
 - 23 Säätosähkömarkkinoiden aggregointipilotti. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahkomarkkinoiden-aggregointipilotti/>>. Luettu 1.4.2018.

- 24 Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden raportti aggregoinnista reservimarkkinoilla. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2017/pohjoismaisten-kantaverkkoyhtioiden-raportti-aggregoinnista-reservimarkkinoilla-julkaistu/>>. Luettu 1.4.2018.
- 25 Unlocking flexibility. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2017/nordic-tso-discussion-paper-on-third-party-aggregation.pdf>>. Luettu 1.4.2018.
- 26 Sähkömarkkinoiden tulevaisuus. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<http://www.sahkomarkkinoidentulevaisuus.fi/>>. Luettu 1.4.2018.
- 27 Suomi hakee kärkipaikkaa Euroopan akkumarkkinoilla. 2018. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. <http://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/suomi-hakee-karkipaikkaa-euroopan-akkumarkkinoilla>. Luettu 4.4.2018.
- 28 Infotilaisuus aggregointipiloteista. 2017. Seminaari 28.11.2017. Messukeskus, Helsinki. Fingrid Oyj. Seminaariaineisto.
- 29 Rantanen, Juha-Pekka. 2017. Kysyntäjousto akkupohjaisissa älykkäissä sähköverkoissa, Insinöörityö, Hämeen ammattikorkeakoulu. Verkkoaineisto.
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126349/Rantanen_Juha-Pekka.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 5.4.2018.
- 30 Asiakasesitykset. 2018. CRM. Solar Factory Oy.

