



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology

**Hajautettujen energiaressurssien rooli  
sähköjärjestelmän kehittämisessä  
The role of distributed energy resources in electric  
system development**

Miika Ratilainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Miika Ratilainen

### **Hajautettujen energiaressurssien rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä**

2017

Kandidaatintyö.

24 s.

Ohjaaja: Professori Jarmo Partanen

Hakusanat: hajautettu energiaressurssi, hajautettu tuotanto, aurinkovoima, tuulivoima, ohjattava kuorma, akkuvarasto, sähköauto

Tässä opinnäytetyössä selvitetään maailmanlaajuisesti, millainen on hajautettujen energiaressurssien rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä, sekä mitä uhkia ja mahdollisuuksia niihin liittyy. Tarkasteltavia energiaressursseja ovat: aurinkovoima, tuulivoima, ohjattavat kuormat, akkuvarastot sekä sähköautot. Työssä luodaan katsaus kyseisten energiaressurssien rooliin viimeisten vuosikymmenien aikana sekä nykypäivänä, pääpainon ollessa tulevaisuuden kehityksessä. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Ennen sähköä tuotettiin valtaosin suurissa voimalaitosyksiköissä, käyttäen runsaasti fossiilisia polttoaineita. Tämä linja on jatkunut nykypäivään asti, mutta samalla ollaan siirtymässä kohti sähköntuotantoa pienissä hajautetuissa yksiköissä. Liikenteessä on niin ikään suosittu fossiilisia polttoaineita käyttäviä polttomoottoriautoja. On havahduttu siihen, että päästöjä täytyy rajoittaa ja ehtyville resursseille on löydettävä korvikkeita. Hajautetut energiaressurit tarjoavat sähköntuotantoon, sähköjärjestelmien ylläpitoon sekä liikenteeseen kestävästä kehityksen periaatteiden mukaisen vaihtoehdon, missä toimitaan sekä luontoa säästäen että taloudellisesti järkevästi. Tärkeimpiä hajautettujen energiaressurssien suosiota kasvattavia tekijöitä ovatkin tuotannon vähäiset kasvihuonekaasu- ja pienhiukkaspäästöt sekä niiden hyvä hintakilpailukyky vaihtoehtoisiin ratkaisuihin verrattuna.

Hajautetut energiaressurit tarjoavat runsaasti mahdollisuuksia, mutta pitävät sisällään myös haasteita. Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon määrä tulee kasvamaan maailmanlaajuisesti, erityisesti aurinkosähkön määrä tulee kasvamaan paljon. Hajautetun tuotannon lisääntyminen sähköjärjestelmissä aiheuttaa haasteen tehotasapainon hallintaan. Tämä voidaan kuitenkin hoitaa käyttämällä ohjattavia kuormia ja lisäämällä näin järjestelmän joustavuutta. Hajautetut energiaressurit ovat siis itsessään ratkaisuja aiheuttamiinsa haasteisiin. Hajautettujen energiaressurssien rooli sähköjärjestelmissä tulee olemaan merkittävä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Miika Ratilainen

### **The role of distributed energy resources in electric system development**

2017

Bachelor's Thesis.

24 p.

Examiner: professor Jarmo Partanen

Key words: Distributed energy resources, distributed generation, solar power, wind power, controllable load, electric vehicle

In this bachelor's thesis it's studied globally what is distributed energy resources role in electric system development and what threats and opportunities are included in them. Researched resources are: solar power, wind power, controllable loads, battery storages and electric vehicles. It is viewed in this study that what was the role of above-mentioned energy resources in last decades and nowadays, but the main focus is on future development. The study is done as literature research.

Electricity was generated in large power plant units in the past, using plenty of fossil fuels. Generation is mostly still the same nowadays, but in the same time generation in small distributed units is rising. Internal combustion engine cars which uses fossil fuels as well have been popular in the traffic. It has been noticed that emissions must be decreased and substitute for depletable resources have to be found. Distributed energy resources offer sustainable development variable for generation of electric, maintenance of electric system and for traffic. In this variable environment is taken into account and it is economically reasonable as well. Most important points which raises distributed energy resources are minor greenhouse gas emissions and fine dust emissions and decent price competitiveness of them comparing to other solutions.

Distributed energy resources offer plenty of opportunities but also includes some challenges. Distributed generation will be globally increased in future, especially solar power. Increased amount of distributed generation may cause challenge of maintaining power balance. This challenge can be managed by using controllable loads and enhancing the flexibility of system by this. So distributed energy resources are solutions to the challenges by themselves. The role of distributed energy resources will be significant.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto.....	6
2. Sähköjärjestelmän kehitys .....	7
3. Hajautetun tuotannon rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä.....	9
3.1 Aurinkovoima.....	9
3.2 Tuulivoima .....	11
3.3 Hajautetun tuotannon uhat .....	12
3.4 Hajautetun tuotannon mahdollisuudet .....	13
4. Ohjattavien kuormien rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä.....	15
4.1 Yleisesti .....	15
4.2 Akkuvarastot.....	16
4.3 Sähköautot.....	18
5. Yhteenveto .....	20
Lähteet .....	22

## **KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

GWEC	The global wind energy council, kansainvälinen tuulivoima neuvosto
CCHP	Combined cooling, heating and power, yhdistetty jäähdytys, lämmitys ja sähköntuotanto
VPP	Virtual power plant, virtuaalinen voimalaitos
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide, hiilidioksidi
IEA	International energy agency, kansainvälinen energiavirasto

## 1. JOHDANTO

Tavoitteena tässä kandidaatintyössä on selvittää maailmanlaajuisesti hajautettujen energiaressurssien roolia, uhkia ja mahdollisuuksia sähköjärjestelmän kehittämisessä. Tarkasteltavia energiaressusseja ovat: aurinkovoima, tuulivoima, ohjattavat kuormat, akkuvarastot, sekä sähköautot. Työssä selvitetään, mitä vaatimuksia kyseiset energiaressurit asettavat sähköverkolle sekä kuinka ylläpidetään tehotasapainoa tulevaisuuden sähköverkossa.

Ennen sähköä tuotettiin pääasiassa suurissa voimalaitosyksiköissä, yleisiä voimaloita olivat mm. ydin-, vesi-, ja hiilivoimalat. Nämä ovat vielä tänä päivänäkin yleisiä, mutta samalla ollaan siirtymässä sähköntuotantoon pienemmissä hajautetuissa yksiköissä. Tähän trendin muutokseen on vaikuttanut mm. ilmastopöytäkirjat, joissa on sovittu yhteisistä pelisääntöistä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Lopullisena tavoitteena ilmastopöytäkirjoilla on saavuttaa päästötasapaino ja ilmastolämpenemisen pysäyttäminen. Näihin tavoitteisiin pääseminen taas edellyttää fossiilisten polttoaineiden käytön lopettamista kokonaan. Päästöjä aiheuttavia sähköntuotantomuotoja ollaan ruvettu jo nykypäivään mennessä korvaamaan päästöttömillä tuotantomuodoilla, kuten aurinko- ja tuulivoimalla. Liikenteessä taas perinteisiä polttomoottoriautoja tullaan korvaamaan sähkömoottoreilla varustetuilla autoilla. Yhdessä puhtaana sähköntuotannon kanssa ne ovat huomattavasti perinteisiä autoja vähäpäästöisempiä. Aurinko- ja tuulivoiman, sekä sähköautojen suosion kasvuun on myös vaikuttanut niiden parantunut hintakilpailukyky verrattuna perinteisiin vaihtoehtoihin.

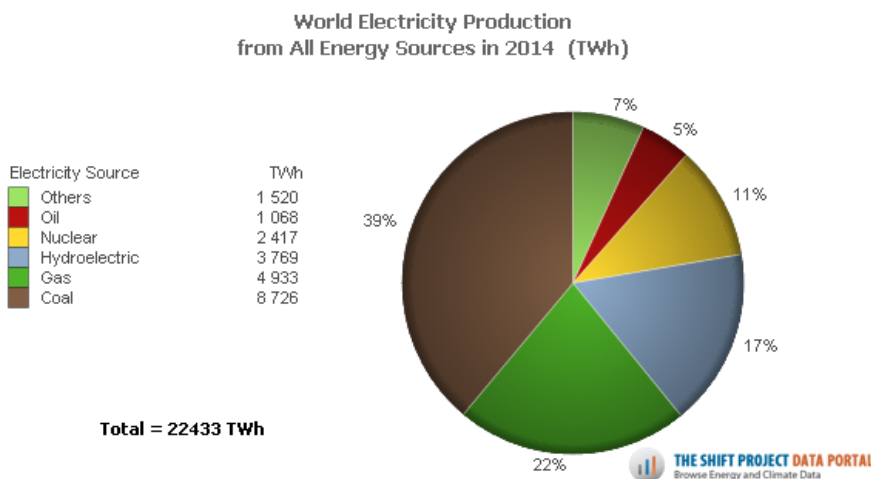
Perinteiset voimalat tuottavat sähköä tasaisesti, mutta aurinko- ja tuulivoiman tuottama sähkö on voimakkaasti olosuhteista riippuvaista ja siten hyvin epätasaista. Tämän takia tulevaisuuden sähköverkkoon tarvitaan runsaasti lisää joustavuutta ja säätövaraa. Tätä sähköverkon joustavuutta voidaan lisätä mm. ohjattavilla kuormilla, kuten akkuvarastoilla ja sähköautoilla. Sähköverkkoon integroiduilla akkuvarastoilla ja sähköautoilla on mahdollista varastoida sähköä suuressa mittakaavassa, mikä onkin edellytys hajautetun tuotannon voimakkaalle lisääntymiselle. Joustavuutta voidaan lisätä myös muilla ohjattavilla kuormilla esimerkiksi tasoittamalla kysyntäpiikkejä.

## 2. SÄHKÖJÄRJESTELMÄN KEHITYS

Ensimmäiset sähköverkot rakennettiin erillisiksi saarekkeiksi. Kysynnän lisääntyessä näitä saarekkeita alettiin yhdistelemään isommiksi kokonaisuuksiksi. Näin pystyttiin laskemaan kustannuksia, sekä parantamaan sähkön toimitusvarmuutta. Laajemmissa verkoissa sähkön tuotanto oli mahdollista toteuttaa entistä suuremmissa yksiköissä. Suurissa voimalaitoksissa sähköntuotanto tuli halvemmaksi, esimerkiksi valvonnan ja automaation kustannukset tuotettua energiayksikköä kohden pienenevät. Samalla myös päästöjen määrä tuotettua energiayksikköä kohden väheni. Lisäksi suurten verkkojen myötä tuotanto yksiköiden kokonaiskuormitus tuli tasaisemmaksi, kulutuksen tasautuessa alueiden välillä. Vaikka tämä kehitys-suunta jatkuu edelleen, on myös samalla alettu palaamaan pienimuotoiseen voiman tuotantoon. [1]

On havahduttu siihen, että on tärkeää lisätä pienimuotosta jakeluverkkoihin hajautettua sähköntuotantoa. Tähän on lukuisia syitä: Päästöjä on vähennettävä ja vähenemään käyviä energiareсурseja on säästettävä. Uusiutuvat energiavarat sijaitsevat hajallaan ja kuljetus suuriin voimalaitoksiin on joko mahdotonta, tai kallista ja energiaa kuluttavaa. Sähkön siirtokustannuksia voidaan myös mahdollisesti pienentää tuottamalla sähkö lähellä kulutusta. Erityisesti silloin, kun tuotetulla sähköllä katetaan oma kulutus. [1]

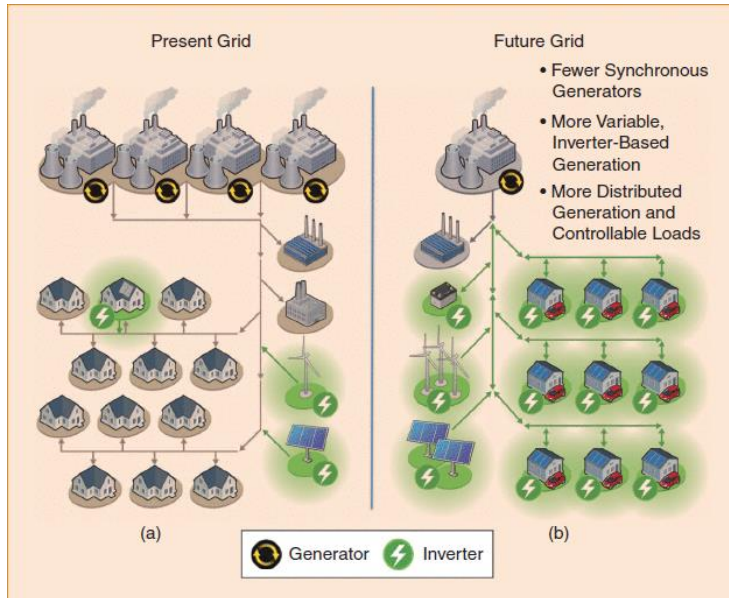
Nykyisessä sähköjärjestelmässä sähkö tuotetaan vieläkin pääasiassa suurissa voimaloissa, kuten ydin-, hiili-, kaasu-, ja vesivoimaloissa. Kuvasta 1 nähdään, että vuonna 2014 nämä sähköntuotantotavat kattoivat lähes 90% maailman kokonaissähköntuotannosta. Päästömaksujen ja -rajoitteiden takia fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten osuus kokonaistuotannosta on vähentynyt. Suurten yksiköiden tueksi on tullut hajautettua tuotantoa, kuten aurinko- ja tuulivoimaa. Näiden osuus kokonaistuotannosta on voimakkaassa nousussa mm. parantuneesta hintakilpailukyvystä johtuen [2].



**Kuva 1.** Maailman sähköntuotanto energianlähteittäin vuonna 2014 [3]

Tulevaisuuden sähköjärjestelmässä perinteisten suurten voimaloiden osuus sähköntuotannosta tulee vähenemään suhteessa nykypäivään, mutta ei kuitenkaan häviämään. Sähköautot tulevat yleistymään ja lisäämään sähkön tarvetta. Hajautettujen energiareсурssien rooli sähköjärjestelmässä tulee kasvamaan merkittävästi. Hajautetun tuotannon osuus kokonaistuotannosta tulee kasvamaan suureksi. Sähkön varastoituminen tulee taloudellisesti kannattavaksi akkujen hintakilpailukyvyn parantuessa ja sähköautojen yleistyessä. Sähkölaitteiden

älykkyyden lisääntyessä ohjattavat kuormat, mm. kodin sähkölaitteet tulevat osaksi järjestelmää. Kuva 2 havainnollistaa tulevaisuuden verkkoa nykypäivän verkkoon verrattuna. [2]



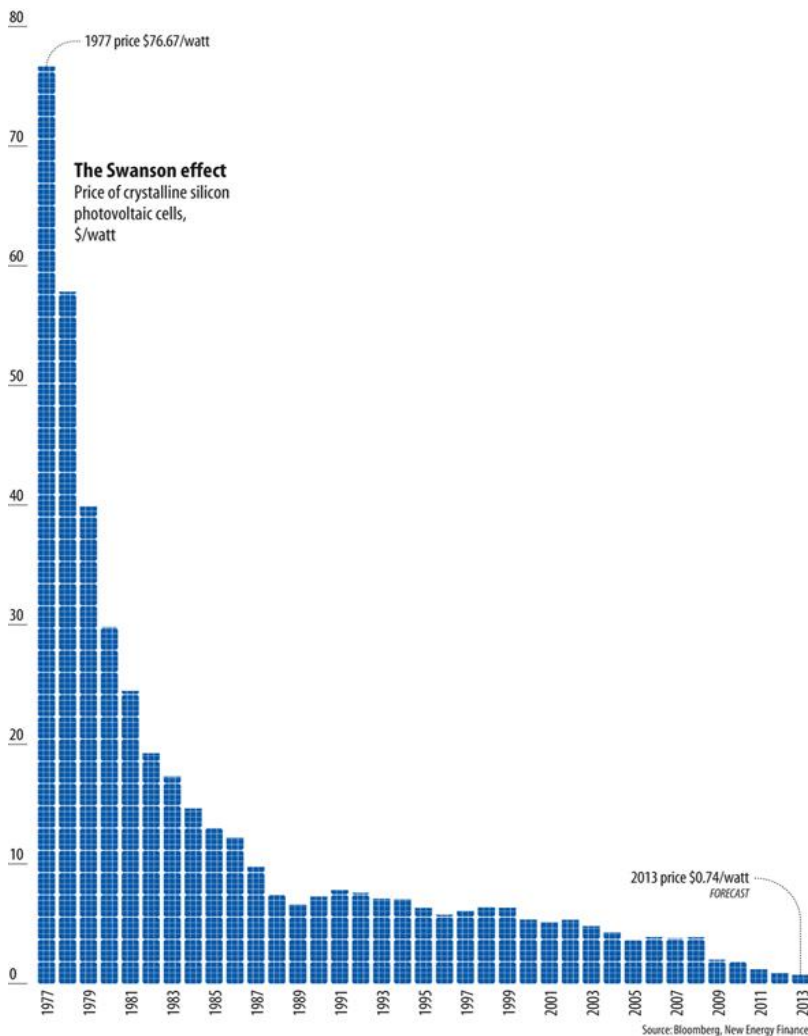
**Kuva 2.** Nykypäivän sähköjärjestelmä verrattuna tulevaisuuden sähköjärjestelmään [2]



### 3. HAJAUTETUN TUOTANNON ROOLI SÄHKÖJÄRJESTELMÄSSÄ

#### 3.1 Aurinkovoiman rooli sähköjärjestelmässä

Aurinkosähköjärjestelmät ovat kehittyneet ja yleistyneet valtavasti viimeisen 40 vuoden aikana. Kuvasta 3 nähdään, että aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet dramaattisesti. Vuoden 1977 aurinkopaneelin keskihinta oli 76.67 \$/W ja vuonna 2013 vastaava hinta oli enää 0,74 \$/W [4]. Vuoden 2013 hinta oli siis noin sata kertaa halvempi vuoden 1977 hintaan verrattuna. Nykypäivään mennessä hinnat ovat vieläkin jatkaneet laskuaan jyrkästi ja loppua laskulle ei näy. Lokakuussa 2017 Saudi Arabiassa tehtiin kaikkien aikojen ennätys aurinkosähkön tuotantohinnassa: Sähköä luvattiin tuottaa hintaan 0,0179 \$/kWh [5]. Yli 10 vuotta sitten aurinkosähkön rooli sähköjärjestelmässä oli olemattoman pieni johtuen korkeista hinnoista.



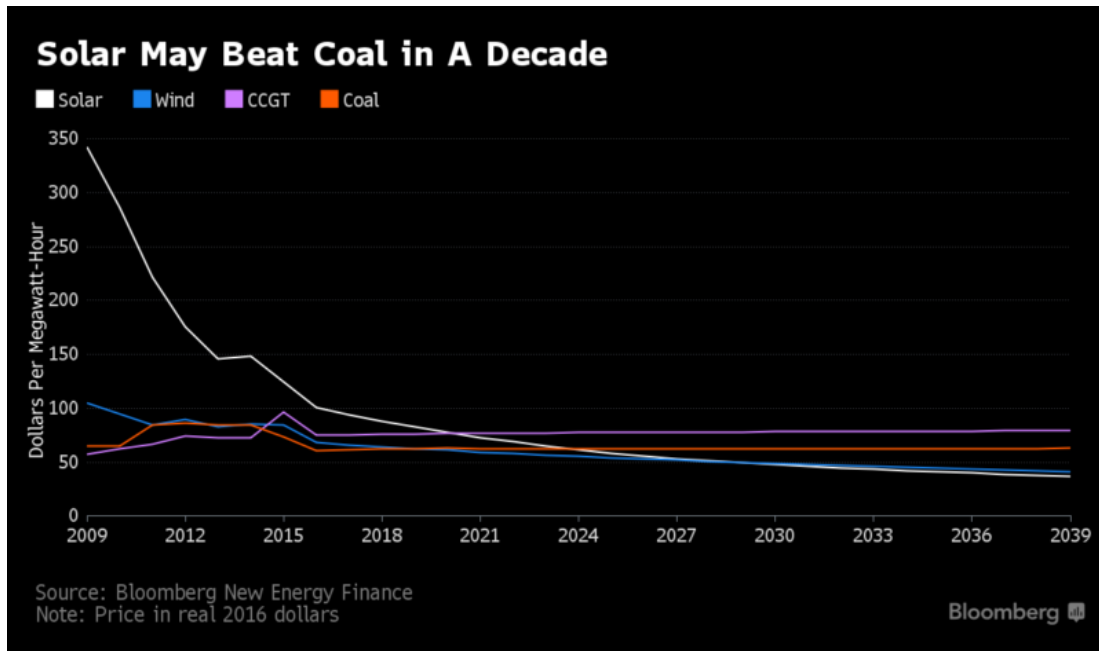
**Kuva 3.** Aurinkopaneelien keskimääräinen hintakehitys [4]

Aurinkosähkön hinnan laskemiseen on useita syitä: Suurin syy hinnan laskuun ja kilpailukyvyn paranemiseen on ollut massiivisesti lisääntynyt tuotanto. Kilpailu alalla on kansainvälisesti lisääntynyt merkittävästi. Viime vuosina aurinkopaneelien tekniikkaa on myös kehitetty huomattavasti. Kesäkuussa 2015 saavutettiin aurinkopaneelille 18.2% hyötysuhde. Tammikuussa 2016 saavutettiin 29.8 % hyötysuhde. Tietyissä laboratorio olosuhteissa on pystytty saavuttamaan jo 46% hyötysuhde, mutta siinä käytetyt komponentit ovat hyvin kalliita eivätkä hintakilpailukykyisiä perinteisiin katoille sijoitettaviin aurinkopaneelisiin verrattuna [6].

Nykyään aurinkosähköllä on jo rooli sähköjärjestelmässä. Aurinkosähköstä on tullut tietyillä reunaehdoilla kannattavaa ja kannattavuus kasvaa koko ajan. Aurinkosähkö on taloudellisesti erityisen kannattavaa silloin, kun sähköä tuotetaan omaan käyttöön. Tämä johtuu siitä, että sähkön myyntihinta on ostohintaa pienempi, eikä sähköntuotannosta omaan käyttöön tarvitse maksaa veroja. Nykyään suuret aurinkosähköjärjestelmät voivat olla jo kannattavia sähkön myynnissäkin. Taloudellinen kannattavuus paranee lähestyttäessä päiväntasaajaa. Monissa valtioissa aurinkosähkön kannattavuutta parannetaan myös tukimekanismein. Sähköntuotantoon aurinkopaneelilla on panostettu maailmalla kovasti; maailmanlaajuisesti asennettua kapasiteettia on jo yli 320 GW [7]. Esimerkiksi pelkästään Saksassa oli 2015 lopussa aurinkosähkön tuotantoa 40 GW verran. Tämä kattoi 7.5% Saksan sen hetkisestä kokonaissähkönkulutuksesta [8].

Aurinkovoiman kasvu selittää suurimman osan hajautettujen energioresurssien kasvusta maailmanlaajuisesti. Vuoden 2016 marraskuussa Yhdysvalloissa oli aurinkovoima kapasiteettia 32 GW, mikä käsitti vain 1% valtion kokonaiskulutuksesta. Melko pienestä osuudesta huolimatta aurinkovoiman osuus on huimassa kasvussa. Uudesta rakennetusta sähköntuotantokapasiteetista Yhdysvalloissa yksi kolmasosa on aurinkovoimaa. Tämä osuus tulee kasvamaan vielä suuremmaksi lähitulevaisuudessa. [7]

Aurinkovoiman kasvu on ollut lähivuosina räjähdysmäistä ja kasvun ei ennusteta hiipuvan. Aurinkovoiman suosiota tulee kasvattamaan entisestään sen päästöttömyys ja ilmainen ja ehtymätön polttoaine, eli auringonsäteily. Jossain päin maailmaa aurinkoenergia on jo edullisempaa kuin hiilellä tuotettu energia. Lokakuussa 2017 Saudi Arabiassa aurinkosähkön tuotantohinta oli 0,0179 \$/kWh. Tämä hinta on melkein nelinkertaisesti halvempi kuin hiilellä tuotetun sähkön hinta keskimäärin maailmalla [9]. Alle 10 vuoden kuluttua se on mahdollisesti edullisin vaihtoehto lähes kaikkialla. Kuvasta 4 nähdäänkin, että aurinkosähkön hinta tulee laskemaan hiilellä tuotettua sähköä alhaisemmaksi lähitulevaisuudessa. Tulevaisuudessa aurinkovoimalla tulee olemaan erittäin merkittävä rooli sähköjärjestelmissä. Todennäköisesti se on tulevaisuudessa maailmanlaajuisesti tärkein sähköntuotantomuoto.

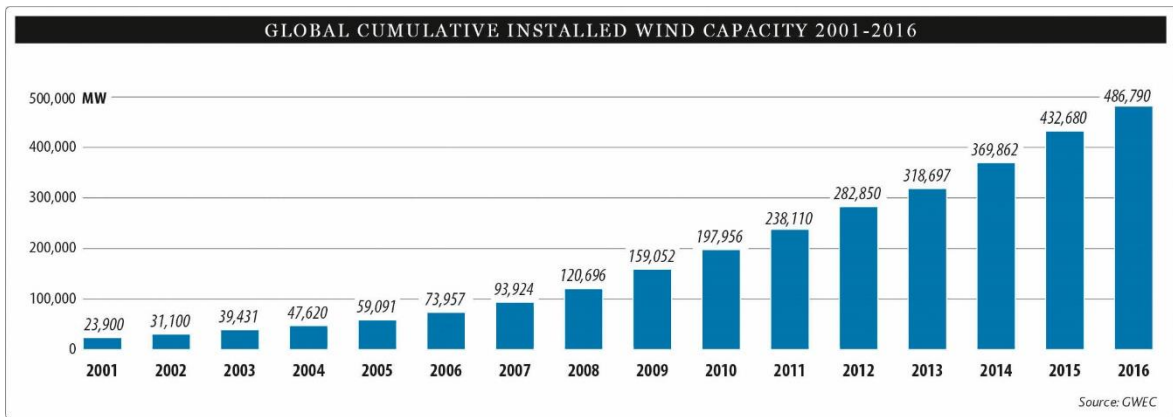


**Kuva 4.** Aurinkosähkön hinta kehitys verrattuna tuuli-, kaas- ja hiilisähkön hintaan [9]

### 3.2 Tuulivoiman rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä

Tuulivoiman suosio on kasvanut viimeisen 20 vuoden aikana huimasti. Tähän on vaikuttanut useat tekijät: Voimalaitosten tekniikka on kehittynyt ja tuulienergiaa voidaan nykyään muuttaa sähköksi tehokkaammin. Kilpailu alalla on lisääntynyt ja kasvanut tuotanto on laskenut voimalaitosten hintoja. Valtioiden takaamat tuet uusiutuvalle energialle on myös ollut merkittävässä roolissa tuulivoiman lisääntymisessä. Näillä tuilla on saatu tuulivoimasta taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi päästömaksut ja -rajoitteet ovat olleet eduksi tuulivoimalle, sen ollessa puhdasta energiaa.

Kuvasta 5 nähdään tuulivoiman asennettu maailmanlaajuinen kokonaiskapasiteetti 15 viimeisen vuoden aikana. 2000-luvun alkupuolella asennettu kapasiteetti oli vielä varsin vähäistä. Tällöin tuulivoiman rooli sähköjärjestelmissä oli pienehkö. 15 vuoden aikana kapasiteetti on kuitenkin kasvanut 20-kertaiseksi ja kasvu tulee jatkumaan tulevaisuudessa. The global wind energy council (GWEC) ennustaa, että asennettu maailmanlaajuinen kapasiteetti on 800 GW vuoteen 2021 mennessä [10]. Kuvasta 4 nähdään, että tuulella tuotetun sähkön hinta on tällä hetkellä vain hieman kalliimpaa kuin hiilellä tuotetun. 2020 mennessä tuulisähkön ennustetaan olevan jo halvempaa, kuin hiilisähkö. Tämä on merkittävä rajapyykki, sillä nykypäivään mennessä sähköntuottaminen hiilellä on ollut halvin mahdollinen keino. Tulevaisuudessa tuulisähköllä tulee olemaan iso rooli sähköjärjestelmässä.



**Kuva 5.** Maailmanlaajuinen kumulatiivinen asennettu tuulivoima kapasiteetti [10]

Tuulivoiman haittavaikutuksia ovat tuulivoimaloiden tuottama häiritsevä melu, sekä näköala haitat. Tuulivoimaloiden kasvava koko vahvistaa näiden haittojen vaikutusta. Nämä tulevat vaikeuttamaan tuulivoimaloiden rakennuslupien saantia. Sopivalla rakenteellisella suunnittelulla pystytään kuitenkin hillitsemään meluhaitan syntymistä. [11]

### 3.3 Hajautetun tuotannon uhat

Lisääntyvän aurinko- ja tuulisähkön haasteena tulee olemaan tehotasapainon ylläpitäminen. Uusiutuvan energian tuet voivat aiheuttaa sähkön markkinahinnan laskua. Tällöin voi tulla vastaan tilanne, jossa ilman tukea toimivat sähkötuottajat joutuvat sulkemaan tuotannon taloudellisista syistä. Tällaisessa tapauksessa tehotasapainon ylläpitäminen voi käydä erityisen haasteelliseksi [12]. Aurinko- ja tuulisähkön tuotanto on epätasaista ja olosuhteista riippuvaista. On kuitenkin saavutettu edistystä sään ennustamisessa, joten nykyisellä tekniikalla hajautettua tuotantoa pystytään ennustamaan melko tarkasti. [7] Aurinko- ja tuulisähkövoimaloiden tehoa ei voi säätää yhtä hyvin kuin perinteisten voimaloiden. Säättövoiman tarve tulee kasvamaan huomattavasti. Tästä syystä hajautetulla tuotannolla ei pystytä tulevaisuudessaakaan syrjäyttämään perinteisiä voimaloita kokonaan. Sähköntuotanto hajautetuilla tuotantomuodoilla suuressa mittakaavassa edellyttää sähkönvarastointia, joka on tällä hetkellä vielä kallista.

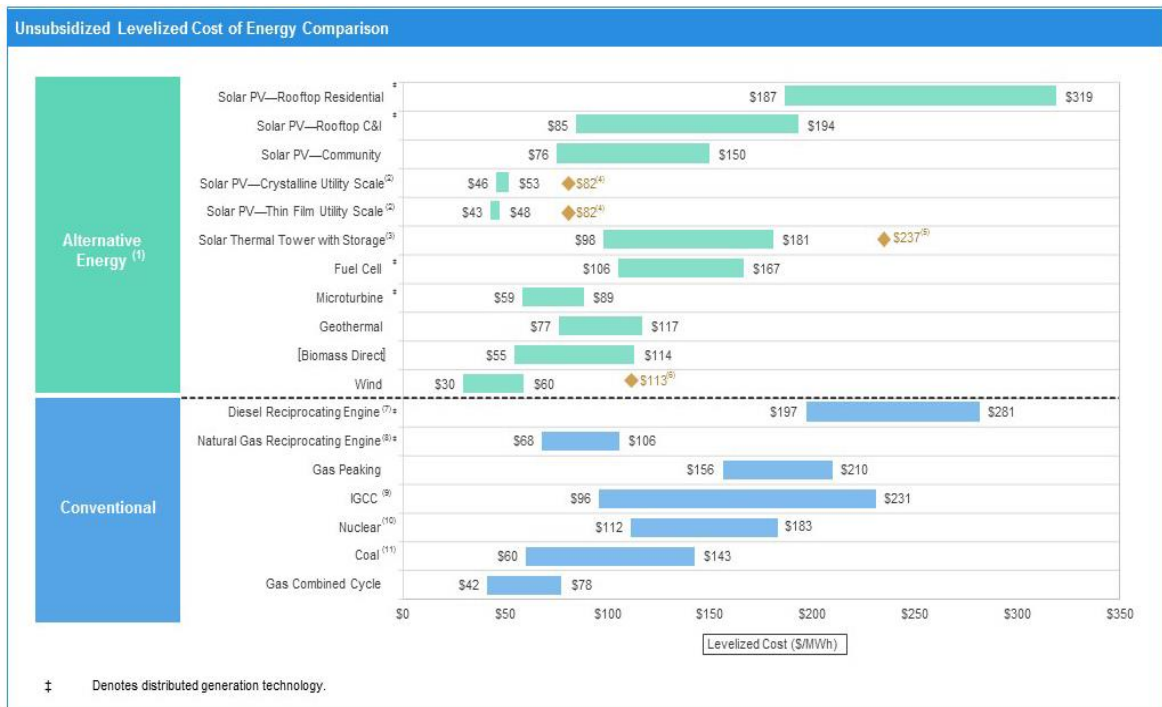
Perinteisissä suurissa voimalaitosyksiköissä on runsaasti pyörivää massaa eli inertiaa. Häiriön tai katkoksen sattuessa tämä massa jatkaa pyörimistä ja kykenee ylläpitämään taajuutta. Hajautetulla tuotannolla on vähemmän inertiaa perinteisiin voimalaitoksiin verrattuna, aurinkovoimalla ei ole sitä yhtään. Hajautetun tuotannon lisääntyessä sähköverkossa inertia siis vähenee. Häiriön tai katkoksen sattuessa tällaiseen sähköjärjestelmään, taajuus voi romahtaa nopeasti, koska ei ole pyörivää massaa taajuuden ylläpitoon. Taajuus koko sähköverkossa on vakio ja sen romahtamisella on vakavia seurauksia; sähköt menevät poikki kailta sähkökäyttäjiltä koko sähköverkon alueella.

### 3.4 Hajautetun tuotannon mahdollisuudet

Aurinko- ja tuulivoiman mahdollisuudet puhtaina energianlähteinä ovat tulevaisuudessa suuret. Pariisin ilmastopöytäkirjassa neuvoteltiin kansainvälisesti ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi ja siihen liittyvistä toimenpiteistä. Pitkän tähtäimen tavoite on rajoittaa ilmastolämpeneminen 1.5°C asteeseen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että fossiilisten polttoaineiden käyttö tulisi lopettaa vuoteen 2050 mennessä [13]. Vuoteen 2100 mennessä on tavoitteena, että kansainvälisesti kasvihuonekaasupäästöt ja -nielut olisivat tasapainossa [14]. Kuvasta 1 nähdään, että vuonna 2014 maailmanlaajuisesti kaksi kolmasosaa sähköstä tuotettiin fossiililla polttoaineella. Näitä on pakko alkaa korvaamaan ylisuurien päästöjen takia sekä pelkästään siksi, että fossiiliset polttoaineet tulevat ehtymään ennen pitkää. Näiden tuotantolaitosten lakkauttaminen luo valtavan tyhjiön sähköntuotantomarkkinoille. Päästöttömyys on jo lisännyt hajautetun tuotannon määrää maailmalla, mutta vain murto-osan siitä määrästä, minkä ne tulee kasvamaan tulevaisuudessa.

Aurinko- ja tuulivoiman mahdollisuuksia markkinoilla parantaa tukimekanismit, joita monet valtiot takaavat uusiutuvalle energialle. Lisäksi aurinko- ja tuulivoima ovat puhtaan energian muotoja, ja hyötyvät siten ilmastopöytäkirjan kannustimiksi tehdyistä päästömaksuista ja -rajoitteista.

Aurinko- ja tuulivoiman hintakilpailukyky on nykyään jo hyvä myös ilman tukia, tämä voidaan nähdä kuvasta 6. Erityisen kilpailukykyisiä ovat teollisuustason aurinkovoimalat, sekä tuulivoimalat maalla. Yhdysvalloissa sekä teollisuustason aurinkosähkö (43-53 \$/MWh) että tuulisähkö (30-60\$/MWh), ovat molemmat hiilisähköä (60-143 \$/MWh) edullisempaa. Aurinkosähkön hinta Yhdysvalloissa on huomattavasti korkeampi verrattuna kansainvälisesti halvimpaan aurinkosähköön (Saudi Arabiassa 17,9 \$/MWh). Aurinkosähkö on yksittäiselle asiakkaalle vielä melko kallista (187-319 \$/MWh), mutta toteutettuna yhteisölle, esimerkiksi taloyhtiölle, hinta on jo kilpailukykyinen tavanomaisen energian kanssa (76-150 \$/MWh).



**Kuva 6.** Energianlähteiden hintavertailu Yhdysvalloissa (\$/MWh). Kuvassa ei ole otettu huomioon mahdollisia vaihtoehtoisen energian ajoittaisuuteen, luotettavuuteen, tai varatuotantoon liittyviä kustannuksia. [15]

Vuonna 2016 maailmanlaajuisesti noin 1.1 miljardia ihmistä eli kokonaan ilman sähköä, joista suurin osa asuu köyhissä valtioissa Afrikassa ja Aasiassa [16]. Afrikan ja Aasian valtioissa olisi runsaasti potentiaalia aurinkosähköntuotannolle, auringonsäteilyn ollessa siellä hyvin voimakasta. Hajautetulla tuotannolla olisikin mahdollista helpottaa näiden maanosien sähköpulaa. IEA ennustaa, että vuonna 2030 uusiutuvalla energialla tuotetaan 60% uudesta sähköntuotannosta Saharan eteläpuoleisessa Afrikassa [16]. Tämä kehitys parantaisi huomattavasti hyvinvointia tällä alueella, lisäämättä silti kasvihuonekaasupäästöjä. Kehitysmaiden sähköistäminen on siis suuri mahdollisuus hajautetulle tuotannolle.

## 4. OHJATTAVIEN KUORMIEN ROOLI SÄHKÖJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMISESSÄ

### 4.1 Yleisesti

Ohjattavilla kuormilla voidaan lisätä sähkön kysynnänjoustoa ja näin mahdollistaa hajaute-  
tun tuotannon lisääntymistä sähköjärjestelmissä. Ohjattavilla kuormilla ei ole vielä tähän  
mennessä juurikaan ollut roolia sähköjärjestelmissä, mutta sähköverkkojen ja -laitteiden  
älyn lisääntyessä, rooli tulevaisuudessa tulee olemaan merkittävä. Ohjattavien kuormien  
käyttö sähköjärjestelmässä edellyttää älykkäitä mittausrakenteita, sekä molemmin suuntaista  
kommunikaatiota ohjattavien kuormien ja verkkoyhtiön välillä.

Smart grid teknologian kehittyessä, sähkökäyttäjät voivat aktiivisesti osallistua sähkön ky-  
synnän hallintaan molemminpuolisella informaation jakamisella jakeluverkkoyhtiön ja älyk-  
käiden laitteiden välillä reaali ajassa. Ohjattavien kuormien hallinnalla voidaan tasoittaa säh-  
kön kysyntähuippuja, tasapainottaa kuormaa, hallita verkon taajuutta, sekä jännitteen laatua.  
Yksittäiset sähkökäyttäjät voivat ohjattavien kuormien avulla tarjota verkkoyhtiöille avus-  
tavia palveluita sähköverkon hallintaan, sekä säästää omissa sähkölaskuissaan pienentämällä  
huippukulutusta ja ohjaamalla sähkökulutusta halvemmille tunneille. [17]

Hajautetussa sähköjärjestelmässä yleisiä passiivisia ohjattavia kuormia ovat: jääkaapit, pa-  
kastimet, ilmastointilaitteet, lämminvesivaraajat, sekä ilmanlämpöpumput. Passiivisilla oh-  
jattavilla kuormilla voi tasoittaa kysyntää ja vähentää huipputehon tarvetta. Perinteisesti säh-  
kökäyttäjä tekee verkkoyhtiön kanssa sopimuksen ohjattavien kuormien käytöstä. Sopi-  
muksessa asiakas sitoutuu laskemaan kysyntää kiinteään aikaan, kun järjestelmässä on huip-  
pukysyntä, tai milloin vain verkkoyhtiön sitä pyytäessä. Vastikkeeksi tästä asiakas saa ra-  
hallista palautusta. Aktiivisia ohjattavia kuormia ovat akkuvarastot, sähköautot, sekä CCHP  
järjestelmät. Verrattuna passiivisiin kuormiin, näillä voi myös syöttää verkkoon sähköä. Ne  
voivat toimia lyhytaikaisena tehonlähteenä. Aktiiviset kuormat ovat myös joustavampia re-  
surssia verkkoyhtiön ohjattaviksi. [17]

Ohjattavien kuormien optimaalinen käyttö hyödyttää niin asiakasta, kuin verkon haltijaakin.  
Sähkökäyttäjä voi siirtää kulutusta halvemmille tunneille ja säästää näin kustannuksissa.  
Monissa valtioissa asiakas maksaa tehontarpeen mukaan, joten sähkökäyttäjä hyötyy pie-  
nentyneestä huipputehosta. Verkonhaltija hyötyy myös vähentyneestä huipputehontarpeesta,  
koska tällöin heidän ei tarvitse investoida niin paljon sähköverkkoon. Verkonhaltija hyötyy  
myös ohjattavien kuormien tuomista verkonhallintaa avustavista palveluista. Vuonna 2013  
tehdyssä tutkimuksessa sopivalla ohjattavien kuormien käytöllä saatiin laskettua huipputeh-  
on tarvetta 20%, sekä vähennettyä kuluja 5% [18].

Hajautetun energiareurssien ja hajautetun tuotannon lisääntyessä sähköverkolta vaaditaan  
joustavia ratkaisuja takaamaan jokahetkisen tehotasapainon. Yksi mahdollinen ratkaisu olisi  
mikroverkot, jotka voisivat hallita paikallista tuotantoa ja kuormia tarvittaessa täysin itse-  
näisesti. Mikroverkot voivat siis toimia osana sähköverkkoa, tai itsenäisenä kokonaisuutena.  
Toinen mahdollinen ratkaisu olisi VPP, eli virtuaalinen voimalaitos, joka sovitaisi yhteen  
pieniä hajautettuja sähköä tuottavia yksiköitä, sekä ohjattavia, tai joustavia kuormia. Toisin

kuin mikroverkot, VPP on koko ajan kytkettynä sähköverkkoon. VPP siis yhdistää hajautettuja energiaresursseja, ja keskittyy pääasiassa kommunikaatioon ja sähkömarkkinoihin osallistumiseen. [17]

Suurimpana uhkana laitteiden älyn lisääntyessä ja reaaliaikaisen tiedon lähettämisessä on tietoturva. Kuinka voidaan turvata ihmisten yksityisyys? Voiko joku sivullinen kaapata hallintaan toisen laitteet? Tietoturvaan tullaan kyllä panostamaan, mutta tällä hetkellä sen taso ei ole vielä riittävä [19].

## 4.2 Akkuvarastojen rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä

Kyky varastoida sähköä suuressa mittakaavassa tulee mullistamaan sähköverkkojen toiminnan. Tulevaisuudessa sähköä tullaan tuottamaan lähempänä kulutusta. Uusiutuva energiantuotanto yhdessä energianvarastoinnin kanssa tulee merkittäväksi osaksi sähköjärjestelmiä. Olosuhteista riippuvaiset hajautetun tuotannon muodot, kuten aurinko- ja tuulivoima vaativat sähköverkolta runsaasti joustavuutta. Joustoa sähköverkkoon saadaan mm. säätövoimalla. Akkuvarastot olisivat yksi keino mahdollistaa hajautetun tuotannon lisääntyminen sähköjärjestelmissä.

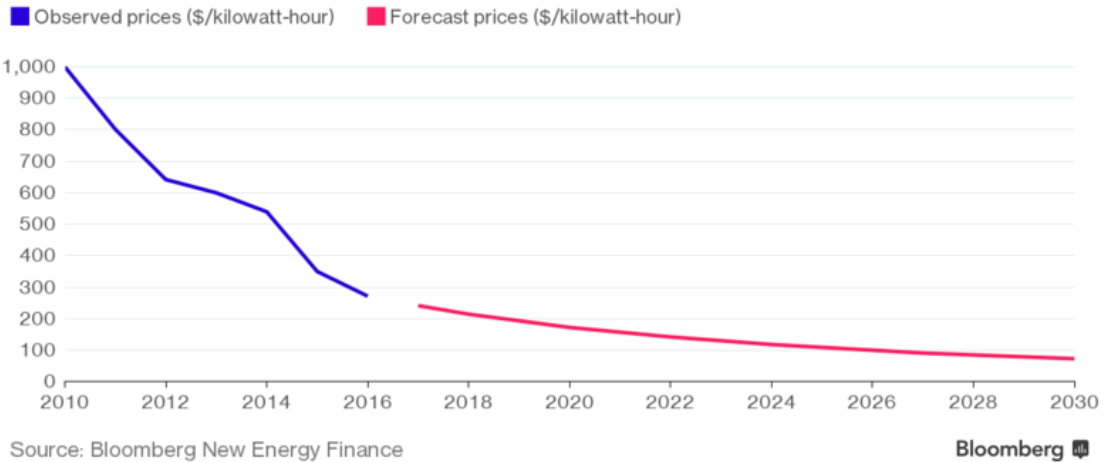
Akkuteknologiassa litium-ioni akkujen rooli on suurin. Vuonna 2015 kaikista uusista sähkövarastoista 95% oli toteutettuja litium-ioni tekniikalla. Suosioon on vaikuttanut laskeneet hinnat, sekä turvallisuuden parantuminen. Suosiota selittää myös se, että ne voivat toimia sekä tehovarastoina, että energiavarastoina. Eli litium-ioni akkuja voi käyttää systeemeissä, jotka tarvitsevat suuren energian lyhyessä ajassa, tai pienemmän energian pidemmässä ajassa. [20]

Kuvasta 7 nähdään litium-ioni akkujen hinnankehitys vuodesta 2010 vuoteen 2016, sekä ennuste vuoteen 2030 asti. Korkeista hinnoista ja vähäisemmästä säätövoiman tarpeesta johtuen ennen akkuvarastoilla ei ole ollut roolia sähköjärjestelmissä. Kehittyneellä akkuteknikalla ja massatuotannolla hinnat on kuitenkin saatu laskemaan huomattavasti ja trendi tulee jatkumaan myös tulevaisuudessa. Kuvasta 8 nähdään, että maailmassa tuotettava akkukapasiteetti tulee kasvamaan yli kaksinkertaiseksi vuoteen 2021 mennessä. [21]



## Cheaper, Faster

Lithium-ion batteries are expected to get a lot more affordable very quickly



Kuva 7. Litium-ioni akkujen hinnankelitys [21]

## Battery Boom

Global battery manufacturing capacity is set to more than double by 2021



Kuva 8. Maailmanlaajuisesti tuotetun akkukapasiteetin kasvu lähivuosina [21]

Akkuvarastot ovat jo tänä päivänä taloudellisesti kannattavia tietyillä tavoilla käytettyinä. Neljä tärkeintä akkuvarastojen sovellustapaa on: 1. Sähkökäytön tehopiikkien tasoittaminen. Monet sähkökäyttäjät maksavat huipputehon tarpeesta. Sähkövarastoilla voi tasoittaa tehopiikkejä ja säästää siten sähkölaskussa. 2. Verkkotason uusiutuvan sähköntuotannon tasoittaminen. Sähkövarastoilla voi tasoittaa aurinko- ja tuulivoiman tuotantoa, näin voidaan vähentää tuotetun tehon vaihtelevuutta. 3. Pienen mittakaavan aurinkosähkövarastoiksi. Yksittäiselle sähkökäyttäjälle tämä on kannattavinta siten, että mitoitetaan aurinkopaneelit ja sähkövarasto kattamaan oman kulutuksen. Näin voidaan vähentää sähkön ostoa verkosta. Yksittäisen sähkökäyttäjän tapauksessa ei yleensä ole kannattavaa myydä sähköä verkkoon alhaisen myyntihinnan takia. 4. Akkuvarastoja sovelletaan myös sähköverkon taajuudensää-

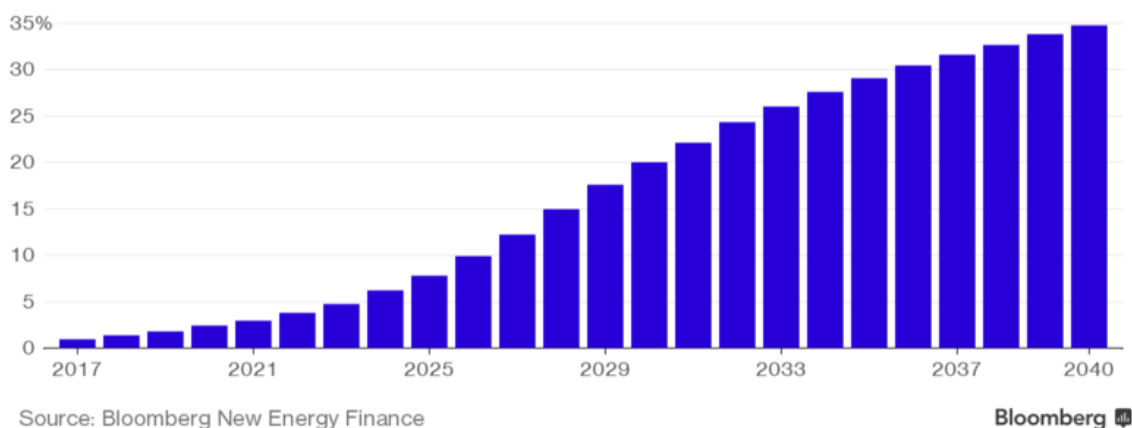
töön. Sähköverkot kokevat jatkuvaa epätasapainoa tuotannon ja käytön suhteen, koska miljoonia sähkölaitteita kytketään jatkuvasti verkkoon ja sieltä pois. Tämä epätasapaino aiheuttaa sähkön taajuuden poikkeamia ohjearvosta. Jos taajuuden poikkeama on riittävän suuri, niin se voi vahingoittaa herkkiä sähkölaitteita. Sähkövarastosysteemit ovat erityisen sopivia taajuuden säätöön niiden nopean toimivuuden vuoksi, sekä kyvyn ladata ja purkaa sähköä tehokkaasti. Tämän sovellustavan uhkana on se, että jos taajuudensäätö tarjonta kasvaa, niin sen hinnat tulisivat laskemaan myös. Tällöin koko toiminta voisi tulla kannattamattomaksi. Lisäksi akkuvarastoja voitaisiin käyttää myös jännitteen laadun hallintaan. Akuista saatavaa taloudellista hyötyä voi myös parantaa käyttämällä sitä samalla moneen käyttötarkoitukseen. [20]

### 4.3 Sähköautojen rooli sähköjärjestelmässä

Sähköautojen määrä liikenteessä tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa. Kuvasta 10 nähdään, että tällä hetkellä myydyistä autoista vajaa 2% on sähköautoja, vuonna 2030 myytyjen sähköautojen osuuden ennustetaan olevan yli 20% kaikista myydyistä autoista [21]. Syynä sähköautojen kasvavaan suosioon on niiden parantuva hintakilpailukyky verrattuna perinteisiin polttomoottoriautoihin, sekä niiden päästöttömyys. Tutkimukset ennustavat keskimäärin uuden sähköauton olevan polttomoottoriautoa halvempia vuoteen 2026 mennessä [21].

#### Electric Cruising

Plug-in vehicles are projected to make up a fifth of new car sales by 2030



**Kuva 10.** Sähköautojen osuus myydyistä uusista autoista maailmanlaajuisesti [21]

Sähköautojen lisääntyminen tuo sähköjärjestelmille paljon uusia mahdollisuuksia, mutta samalla myös haasteita. Sähköautot voivat toimia sähköjärjestelmässä ohjattavina kuormina. Niillä voi varastoida sähköä matalan kysynnän aikaan ja tarvittaessa voi myös syöttää virtaa verkkoon päin korkean kysynnän aikaan, estäen sähköverkon ylikuormittumista. Suuri määrä sähköjärjestelmään integroituneita sähköautoja voisi toimia valtavana sähkövaras-

tona. Akkuvarastoihin verrattuna tämä olisi halvempi tapa varastoida sähköä, koska sähköautot on kuitenkin hankittu tieliikennekäyttöä varten. Akkuvarastojen tavoin sähköautoilla voisi tarjota verkkoyhtiöille verkonhallintaan liittyviä palveluja, kuten jännitteen laadun ylläpitoa, taajuuden hallintaa, sekä pienentää huipputehon tarvetta. Sähköautojen lisääntyminen voisi omalta osaltaan mahdollistaa hajautetun uusiutuvan energian tuotantoa.

Pienhiukkaspäästöt ovat merkittävä ongelma monissa suurkaupungeissa ympäri maailmaa. Pienhiukkaspäästöt voivat aiheuttavat kaupunkien ylle ihmisten terveydelle haitallisen savusumun. Ongelma aiheutuu pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Suurin osa suurkaupunkien pienhiukkaspäästöistä syntyy polttomoottoriautoista, myös hiilivoimalat ovat runsaasti pienhiukkaspäästöjä aiheuttavia. Pahimmat pienhiukkasongelmat maailmalla on Intiassa ja Kiinassa, missä on liikenteessä valtava määrä autoja ja runsaasti hiilivoimaloita sähköntuotannossa. Pelkästään Intiassa 2.5 miljoonaa ihmistä kuolee vuosittain johtuen näistä ilmansaasteista [22]. Terveydellisistä syistä näiden fossiilisten polttoaineiden käyttöä on pakko rajoittaa. Tämä luo suuren tyhjiön liikenteen ja sähköntuotannon markkinoihin, mitkä olisi mahdollista täyttää sähköautoilla sekä uusiutuvalla energialla.

Sähköautojen lisääntyminen voi olla myös uhka sähköjärjestelmille, jos niitä ei saa integroida järjestelmään ohjattavina kuormia. Sähköautot voisivat aiheuttaa suuria tehopiikkejä sähköverkkoon, jos niitä ei kyetä kontrolloimaan älykkäästi. Sähköverkkojen nykyinen kapasiteetti riittää kattamaan sähköautojen lisääntymisen, mutta paikalliset hajautetut verkot eivät välttämättä sopeudu nopeaan huipputehon kysynnän kasvuun. Sähköautojen tyypillinen päivittäinen käyttömätka on 40km, minkä lataaminen vaatii 6-8kWh energiaa. Tämä vastaa keskimäärin yksittäisen pienen talouden energiankulutusta Yhdysvalloissa. Toisin sanoen jokainen sähköauto kuormittaa verkkoa siellä yhden asunnon verran. Paikallisten muuntajien suunnittelussa ei välttämättä ole otettu huomioon huipputehon kasvua, ja ne ovatkin herkkiä ylikuormittumaan. Erityisen suuren riskin aiheuttaa se, jos saman alueen kaikki sähköautot kytketään lataukseen samaan aikaan. Tilanne on kuitenkin vältettävissä älykkäällä lataamisella, jossa ladataan silloin kuin kysyntä on vähäistä. Tämä tuo molemminpuolisen hyödyn sekä sähköauton omistajalle, että sähköverkkoyhtiölle. Sähköauton omistajan ei kannata ladata autoa sähkön korkean hinnan aikaan ja sähköverkkoyhtiö hyötyy vähentyneestä huipputehontarpeesta. [23]

## 5. YHTEENVETO

Hajautetut energioresurssit ovat lisääntyneet voimakkaasti tähän päivään mennessä, tulevaisuudessa niiden lisääntyminen tulee vielä voimistumaan entisestään. Niiden rooli sähköjärjestelmän kehittämisessä on merkittävä. Hajautettu tuotanto tulee lisääntymään voimakkaasti, erityisesti aurinkosähkön määrä. Hajautettu tuotanto tulee osittain syrjäyttämään perinteisen sähköntuotannon, erityisesti fossiililla polttoaineilla toimivia sähköntuotantolaitoksia. Hajautetut energioresurssit tulevat muuttamaan sähköverkkojen dynamiikkaa. Loppukäyttäjää ei tulevaisuudessa sähköverkon näkökulmasta nähdä enää vain kuormina, vaan he voivat toimia myös lähteinä. Sähkö ei siis virtaa enää vain sähköverkosta käyttäjille, vaan hajautettujen energioresurssien lisääntyessä sähkökäyttäjät voivat myös syöttää sähköä sähköverkkoon.

Kasvihuonekaasujenpäästöjen, erityisesti CO<sub>2</sub>-päästöjen lisääntyminen ja näistä johtuva ilmaston lämpeneminen on ollut globaali huolenaihe viime vuosikymmenien ajan. Hajautetut energioresurssit tarjoavat mahdollisuuden ehkäistä kasvihuonekaasupäästöjen syntymistä ja hillitä näin ilmastolämpenemistä. Pariisin ilmastopimuksen pitkän tähtäimen tavoite on vuoteen 2100 mennessä päästä maailmanlaajuisesti tasapainotilaan kasvihuonekaasupäästöjen ja -nielujen suhteen. Tähän tavoitteeseen pääseminen taas edellyttää fossiilisten polttoaineiden käytön lopettamista kokonaan. Vuonna 2014 fossiiliset polttoaineet käsittivät maailmanlaajuisesti kaksi kolmasosaa kaikesta sähköntuotannosta. Kaiken tämän korvaaminen puhtaalla sähköntuotannolla tulee olemaan erittäin suuri haaste. Samalla se edellyttää myös fossiililla polttoaineilla toimivien kulkuneuvojen käytön lopettamista. Polttomoottoriautoja tullaan korvaamaan sähkömoottorein varustetuilla autoilla. Ilmastomuutoksen hillitseminen siis luo hajautetuille energioresursseille valtavan markkinapotentiaalin.

Monien suurkaupunkien yllä on pienihiukkasista johtuva ihmisten terveydelle haitallinen savusumu. Pienihiukkaset taas aiheutuvat pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä liikenteessä ja sähköntuotannossa. Terveystieteistä syistä fossiilisten polttoaineiden käyttöä tulisi rajoittaa suurkaupungeissa. Tämä luo suuren potentiaalin hajautetuille energioresursseille, erityisesti sähköautoille.

Hajautettujen energioresurssien hintakehitys on ollut merkittävä tekijä niiden suosion kasvussa. Parantuneella hintakilpailukyvyllä ollaan saatu hajautettujen energioresurssien määrää markkinoilla kasvamaan luonnollisesti. Erityisen paljon on laskenut aurinkosähkön hinta. Romahtanut hinta on tehnyt aurinkosähköstä taloudellisesti kannattavaa. Lähitulevaisuudessa sekä tuuli- että aurinkosähkö tulevat molemmat olemaan hiilisähköä edullisempaa. Positiivinen hintakehitys tulee mahdollistamaan hajautetun tuotannon laajamittaisen lisääntymisen sekä fossiilisten polttoaineiden syrjäyttämisen sähköntuotannossa. Hajautetun tuotannon lisääntymistä helpottaa lisäksi myös monien valtioiden takaamat tukimekanismit uusituvalle energialle.

Akkuteknologiassa merkittävän litium-ioni akkujen hinnat ovat laskeneet huomattavasti. Laskeneet hinnat ovat tehneet sähkön varastoimisesta taloudellisesti kannattavampaa, sekä vaikuttaneet oleellisesti myös sähköautojen hintojen alenemiseen. Sähköautojen ennustetaan olevan keskimäärin polttomoottoriautoja halvempia jo vuoteen 2026 mennessä. Hintakehitys mahdollistaa siis omalta osaltaan perinteisten autojen syrjäyttämisen.

Ennen sähköjärjestelmissä perustuotanto tapahtui suurissa voimalaitosyksiköissä ja tuotanto oli tasaista, kuorma taas vaihteli joka hetki. Tehotasapainoa ylläpidettiin säätövoiman avulla. Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon lisääntyessä verkossa myös sähköntuotantopuolesta tulee hetkittäin muuttuvaa. Tehotasapainon ylläpitäminen käy entistä hankalammaksi sekä tuotannon että kulutuksen ollessa epätasaista. Tuuli- ja aurinkovoiman polttoaine on ilmaista, niin niiden tuotantoa ei kannata säätää tai keskeyttää. Lisäksi hajautetun tuotannon lisääntyessä järjestelmän pyörivä massa eli inertia vähenee, mikä voi hankaloittaa taajuuden hallintaa. Taloudellisin ratkaisu näiden ongelmien ratkaisemiseksi on kysynnän jouston lisääminen. Tasoitetaan siis kysyntäpuolta ja luodaan sinne säätövaraa. Tämä voidaan toteuttaa sähköverkon älykkyyden lisäämisellä sekä ohjattavilla kuormilla. Kuorman ohjaus tarjoaa kantaverkkoyhtiölle mahdollisuuden tehotasapainon, taajuuden, sekä tehopiikkien hallintaan. Ohjattavien kuormien käyttö siis kompensoi lisääntyvän hajautetun tuotannon aiheuttamaa haastetta tehotasapainon ylläpitämisessä ja näin mahdollistaa hajautetun tuotannon lisääntymisen. Hajautetut energioresurssit siis aiheuttavat sähköjärjestelmälle haasteita, mutta ovat samalla itse ratkaisu näihin haasteisiin.

## Lähteet

- [1] Valkoinen, J., Tommila, T., Jaakola, L., Wahlström, B., Koponen, P., Kärkkäinen, S., Kumpulainen, L., Saari, P., Keskinen, S., Saaristo, H., Lehtonen, M., 2005. Paikallisten energiasurssien hallinta hajautetussa energiajärjestelmässä. VTT Tiedotteita 2284. Espoo: Ota-media.
- [2] Kroposki, B., Johnson, B., Zhang, y., Gevorgian, V., Denholm, P., Hodge, B., Hannegan, B. 2017. Achieving a 100% renewable grid. IEEE power&energy,. vol. 15, no. 2, s. 61-73.
- [3] The shift project data portal. 2014. Breakdown of electricity generation by energy source. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.11.2017]. Saatavissa <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart>
- [4] Shahan, Z. 13 Charts on solar panel cost & growth trends. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa <https://cleantechnica.com/2014/09/04/solar-panel-cost-trends-10-charts/>
- [5] Dipaola, A. 2017. Saudi Arabia gets cheapest bids for solar power in auction. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-03/saudi-arabia-gets-cheapest-ever-bids-for-solar-power-in-auction>
- [6] How solar panel cost and efficiency have changed over time. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa <http://news.energysage.com/solar-panel-efficiency-cost-over-time/>
- [7] Mather, B., Yuan, G. 2017. On the sunny side, integrating solar energy at increasing rates. IEEE power&energy,. vol.15, no. 2, s. 14-16
- [8] Energiatalous. 2016. Aurinkosähkölle povataan valoisaa tulevaisuutta Suomessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa <https://www.energiatalous.fi/?p=543>
- [9] Energiatalous. 2017. Aurinkoenergia ohittamassa hiilen maapallon halvimpana energianlähteenä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa <https://www.energiatalous.fi/?p=813>
- [10] The global wind energy council. Strong outlook for wind power. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.11.2017]. Saatavissa <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Global-Cumulative-Installed-Wind-Capacity-2001-2016.jpg>
- [11] Holttinen, H, VTT. 2011. Tuulivoima Suomessa ja maailmalla. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.11.2017]. Saatavissa [http://www.vtt.fi/files/news/2011/Tuulivoima\\_media-aamiainen\\_esitys.pdf](http://www.vtt.fi/files/news/2011/Tuulivoima_media-aamiainen_esitys.pdf)

- [12] LUT uutiset. 2014. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa [https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa)
- [13] Greenpeace Suomi. 2015. Pariisissa ilmastopimus – Fossiiliset historian 2050 mennessä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.11.2017]. Saatavissa <http://www.greenpeace.org/finland/fi/media/lehdistotiedotteet/Pariisissa-ilmastopimus---fossiiliset-historiaan-2050-mennessa/>
- [14] Energiavirasto. 2016. Aikaperspektiivejä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.11.2017]. Saatavissa [https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Hanna-Mari+Ahonen\\_greenstream.pdf/7621878e-90ce-48f8-aa8a-600112a18d22](https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Hanna-Mari+Ahonen_greenstream.pdf/7621878e-90ce-48f8-aa8a-600112a18d22)
- [15] Lazard. 2017. Levelized cost of energy 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.11.2017]. Saatavissa <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-2017/>
- [16] International energy agency. 2017. Energy access outlook 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.11.2017]. Saatavissa <https://www.iea.org/access2017/>
- [17] Shen, J., Jiang, C., Li, B. 2015. Controllable load management approaches in smart grids. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.11.2017]. Saatavissa <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/11187/htm#B46-energies-08-11187>
- [18] Koutitas, G., Tassiulas, L. 2013. Periodic flexible demand: Optimization and phase management in the smart grid. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.11.2017]. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/document/6471273/?arnumber=6471273>
- [19] Geer, D. 2014. The internet of things: top five threats of IoT devices. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.11.2017]. Saatavissa <https://www.csoonline.com/article/2134265/network-security/the-internet-of-things--top-five-threats-to-iot-devices.html>
- [20] D'Aprile, P., Newman, J., Pinner, D. 2016. The new economics of energy storage. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.11.2017]. Saatavissa <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/the-new-economics-of-energy-storage>
- [21] Hirtenstein, A. 2017. Bloomberg. Move over Tesla, Europe's building its own battery giga factories. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.11.2017]. Saatavissa <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-05-22/move-over-tesla-europe-s-building-its-own-battery-gigafactories>
- [22] Schmidt, A. 2017. India's extreme smog pollution can take large toll on human health. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.12.2017]. Saatavissa <https://www.accuweather.com/en/weather-news/indias-extreme-smog-pollution-can-take-large-toll-on-human-health/70003366>

[23] Schmidt, E. 2017. The impact of growing electric vehicle adoption on electric utility grids. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.11.2017]. Saatavissa <https://www.fleetcarma.com/impact-growing-electric-vehicle-adoption-electric-utility-grids/>