



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TOIMINNOT PIENJÄNNITE- JAKELUVERKOSSA JA SEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

TEKIJÄ/T: Janne Hakulinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Janne Hakulinen	
Työn nimi Älykkään sähköverkon toiminnot pienjännitejakeluverkossa ja sen tulevaisuudennäkymät	
Päiväys	06.06.2019 Sivumäärä/Liitteet 51
Ohjaaja(t) Timo Savallampi, lehtori; Juhani Rouvali, yliopettaja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Voimatel Oy/Palvelupäällikkö, DI Harri Smolander	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Älykkäiden sähköverkkojen tulevaisuuden toiminnot ja muutokset perustuvat ilmastopolitiikassa ja sähköntuotannossa tapahtuviin muutoksiin. Tuotannossa ja lainsäädännössä tapahtuvien muutosten vuoksi sähköverkkoon sekä kuluttajien puolelle on kehitettävä uusia älykkäitä ja joustavia ratkaisuja, jotta sähköverkko voi toimia yhdessä loppukuluttajan kanssa joustavana ja toiminnoiltaan dynaamisena energiajärjestelmänä jättäen loppukuluttajalle mahdollisuuden arvovalintoihin oman energiankulutuksensa suhteen. Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Voimatel Oy. Voimatel Oy on energia-alaan erikoistunut yritys, jonka toimialaan kuuluu sähkö- ja tietoliikenneverkkojen suunnittelu, rakentaminen sekä huolto ja kunnossapito.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia sähköverkkojen pienjänniteverkon osaa ja sen tulevaisuuden ratkaisujen kehittymistä. Tavoitteena oli tutkia olemassa olevan aineiston ja luodun tiekartan perusteella tulevaisuuden toimintoja sekä niiden kehitystä.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin olemassa olevaan sähköverkkoon sekä uusiin innovaatioihin. Päättökimuskoh-teita olivat mikroverkkoteknologia, hajautettu tuotanto, energiayhteisöt, LVDC-verkot ja sähköverkkoihin tulevat kommunikaatio ratkaisut. Työ toteutettiin tutkimustyönä. Työssä käytettiin lähteinä olemassa olevaa kirjallisuutta, erilaisia artikkeleita ja tutkimustöitä. Lähteet haettiin pääsääntöisesti internetistä, koska painettu kirjallisuus on pääsääntöisesti vanhentunutta tietoa.</p> <p>Tehdyssä tutkimuksessa saatiin tuloksiksi älykkään pienjännitejakeluverkon innovaatioiden kehityksen suuntaa tulevaisuudessa, sekä energiantuotannon hiilineutraaliuden vaikutuksista sähköverkkoihin. Lisäksi tuloksia saatiin innovaatioiden hyödyistä energian saannin varmistamiseksi tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat Sähköverkot, Älykäs sähköverkko, Pienjännitejakeluverkko	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Janne Hakulinen			
Title of Thesis Smart Grid Functions in the Low Voltage Network and its Future Prospects			
Date	6 June 2019	Pages/Appendices	51
Supervisor(s) Mr. Timo Savallampi, Senior Lecturer; Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Voimatel Oy/ Mr. Harri Smolander, M.Sc. (Tech.), Service Manager			
<p>Abstract</p> <p>Future operations and changes in smart grids are based on changes in climate policy and power generation. Due to the changes in production and law, new smart and flexible solutions must be developed for the electricity grid and the consumer side so that the electricity grid can work together with the end consumer as a flexible and functionally dynamic energy system leaving the end consumer the opportunity to make value judgement in relation to their own energy consumption. This thesis was commissioned by Voimatel Oy. Voimatel Oy is a company specializing in the field of energy and its business area is the design, construction and maintenance of electrical and telecommunication networks.</p> <p>The purpose of the thesis was to study the part of the low-voltage electricity network and the development of its future solutions. The aim was to study future activities and their development based on existing material and the road map created.</p> <p>This thesis explored the existing power grid and new innovations. The main research topics were micro-network technology, decentralized production, energy communities, LVDC networks and communication solutions for electricity networks. The thesis was carried out as a research work. Existing literature, various articles and research works were used as sources. As a rule, sources were searched from the Internet because printed literature is mainly outdated information.</p> <p>As a result of this thesis, the direction of future development of smart low-voltage distribution network innovations, as well as the effects of carbon neutrality on power grids were produced. In addition, the benefits of innovation to secure future energy supply were found.</p>			
Keywords electricity network, smart grid, low voltage network			

## SISÄLTÖ

1	LYHENTEET JA TERMIT .....	6
2	JOHDANTO.....	7
3	VOIMATEL OY.....	8
4	SÄHKÖVERKKO .....	9
4.1	Sähkömarkkinalaki .....	11
4.2	Suurjänniteverkko .....	11
4.3	Keskijänniteverkko .....	11
4.4	Pienjänniteverkko .....	12
5	JOUSTAVA JA ASIAKASKESKEINEN VERKKO .....	13
5.1	Asiakaskeskeysyys .....	13
6	ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO .....	15
6.1	Älyverkkovisio.....	17
6.2	Roadmap 2025 .....	17
6.3	Älyverkon kommunikaatio.....	19
6.3.1	Internet of Things (IoT) .....	20
6.3.2	NarrowBand internet of things (NB-IoT) .....	21
6.3.3	5G-tekniikka .....	22
6.3.4	Kyberturvallisuus.....	22
6.4	Kapasiteetti .....	23
6.5	Luotettavuus .....	24
6.6	Tehokkuus.....	25
7	ÄLYMITTARIT .....	27
7.1	Älymittareiden toiminnot .....	28
8	ÄLYKÄS PIENJÄNNITEVERKKO .....	31
8.1	Kysyntäjousto.....	32
8.1.1	Virtuaalivoimalaitos .....	33
8.2	Datahub.....	35
9	SÄHKÖN VARASTOINTI .....	36
9.1	Akut.....	37
9.1.1	Sähköauton akusto.....	37
10	HAJAUTETTU TUOTANTO .....	39

10.1 Mikroverkot .....	39
10.2 Energiayhteisöt.....	40
10.3 LVDC-verkot .....	43
11 YHTEENVETO .....	45
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	47

## 1 LYHENTEET JA TERMIT

AC	Alternative current (Vaihtovirta)
aFRR	Automaattinen taajuudenhallintareservi
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMM	Automatic Meter Management
AMR	Automatic Meter Reading
CHP	Combined Heat and Power (sähkön ja lämmön yhteistuotanto)
DC	Direct current (Tasavirta)
GHz	Gigahertsi
HAN	Home Area Network
HVDC	High Voltage Direct Current (Suurjännite tasavirta)
KAH	Keskeytyksistä aiheutuva haitta
kHz	Kilohertsi
kVA	kilovolttiampeeri
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LVDC	Low Voltage Direct Current (Pienjännitteinen tasavirta)
mFRR	Manuaalisen taajuuden palautusreservi
MVA	Megavoltiampeeri
NAN	Neighborhood Area Network
NB-Iot	NarrowBand Internet of Things
EU	Euroopan Unioni
Pj-verkko	Pienjänniteverkko
RMR	Remote Meter Reading
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
kV	Kilovoltti
V	Voltti
V2G	Vehicle-to-Grid
V2H	Vehicle-to-Home
WAN	Wide Area Network

## 2 JOHDANTO

Sähköenergian tarve kasvaa nyky-yhteiskunnassa jatkuvasti ja sen tuotannossa täytyy ottaa huomioon ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaatimukset fossiilivapaalle sähköntuotannolle. Tämän takia energiantuotannossa panostetaan uusiutuviin energianlähteisiin, jotka luovat uusia haasteita sähköverkkojen toiminnallisuuksiin, kuten säätövoimaan. Nykyinen sähköverkko alkaa olla riittämätön, joten siihen on luotava uusia ratkaisuja, jotka hyödyttävät kaikkia osapuolia. Sähköverkoille on annettu uusia määräyksiä muun muassa myrskyjen aiheuttamien sähkökatkojen pituuksien suhteen. Tämän takia jakeluverkkoyhtiöt joutuvat investoimaan sähköverkkojen rakentamiseen, automatisointiin ja "säätövarmaan" sijoitteluun.

Työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän loppuraportissa tulevaisuuden älyverkkojen keskeisimmäksi teemaksi nostettiin asiakas, jonka tarkoituksena on antaa älyverkkojen kehitykseen suuntaan, jolla kehitetään palveluita sekä toimintoja, jotta asiakas voi vaikuttaa omaan energiankäyttöönään sekä sen kustannuksiin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa tilaajayhtiötä ja työntekijää hyödyttävä selvitys älykkään sähköverkon ja pienjännitejakeluverkon osan älykkyydestä sekä siihen liittyvistä uusista toiminnoista ja laitteista, kuten hajautetun tuotannon, kysyntäjoustop, LVDC verkkojen ja energianvarastoinnin vaikutuksista sekä tulevaisuuden älymittareista.

Työssä on tarkoitus tutkia toiminnallisuuden näkökulmaa ja mitä toimintoja älykkäässä sähköverkossa tulisi olla, jotta kasvavaan energiantarpeeseen voitaisiin vastata ympäristöystävällisesti. Tavoitteena on luoda tulevaisuuden kuva älykkästä sähköverkosta.

Tavoitteena on hankkia tietoa sekä nykyisestä että lisääntyvästä sähköjakeluverkon automaatiosta, säätö näkökulmista ja tutkia sähköverkon kehitystä aikavälillä 2019-2025. Tutkitaan myös mahdollisten IoT-tekniikoiden, 5G-verkkojen ja tiedon analysointi mahdollisuuksien hyödyntämistä ja kehittymistä tulevaisuuden sähköverkossa.

Opinnäytetyö on tehty Voimatel Oy:lle tutkimustyönä. Työssä aineistoa on haettu pääsääntöisesti internetistä, sillä kirjoihin painettu tieto on yleensä vanhentunutta. Työssä on käytetty kotimaisia ja ulkomaalaisia lähteitä.

### 3 VOIMATEL OY

Voimatel Oy on maanlaajuinen sähkö- ja tietoliikenneverkkojen suunnitteluun, rakentamiseen sekä huoltoon ja kunnossapitoon erikoistunut yritys, joka perustettiin vuonna 2001. Alkuperäisiä perustajaosakkaina olivat Savon Voima Oy sekä silloinen Kuopion Puhelin Oy, nykyinen osuuskunta KPY. Myöhemmin alkuvaiheessa mukana oli myös IVO Transmission Engineering Oy, joka tunnetaan nykyisin nimellä Eltel Networks Oy. Vuonna 2014 Osuuskunta KPY osti Savon Voima Oyj omistuksessa olleen osan Voimatel Oy:stä ja omistaa näin 100% yrityksen osakekannasta. (KPY, ei pvm)

Voimatel Oy työllistää noin 900 henkilöä ja liikevaihto vuonna 2018 oli 124,9 miljoonaa euroa. Voimatel Oy:llä on myös tytäryhtiö BofTel Oy. BofTel Oy:llä on toimintaa pohjoismaissa, Baltiassa, Länsi- ja Itä-Euroopassa sekä Venäjällä. (KPY, ei pvm)

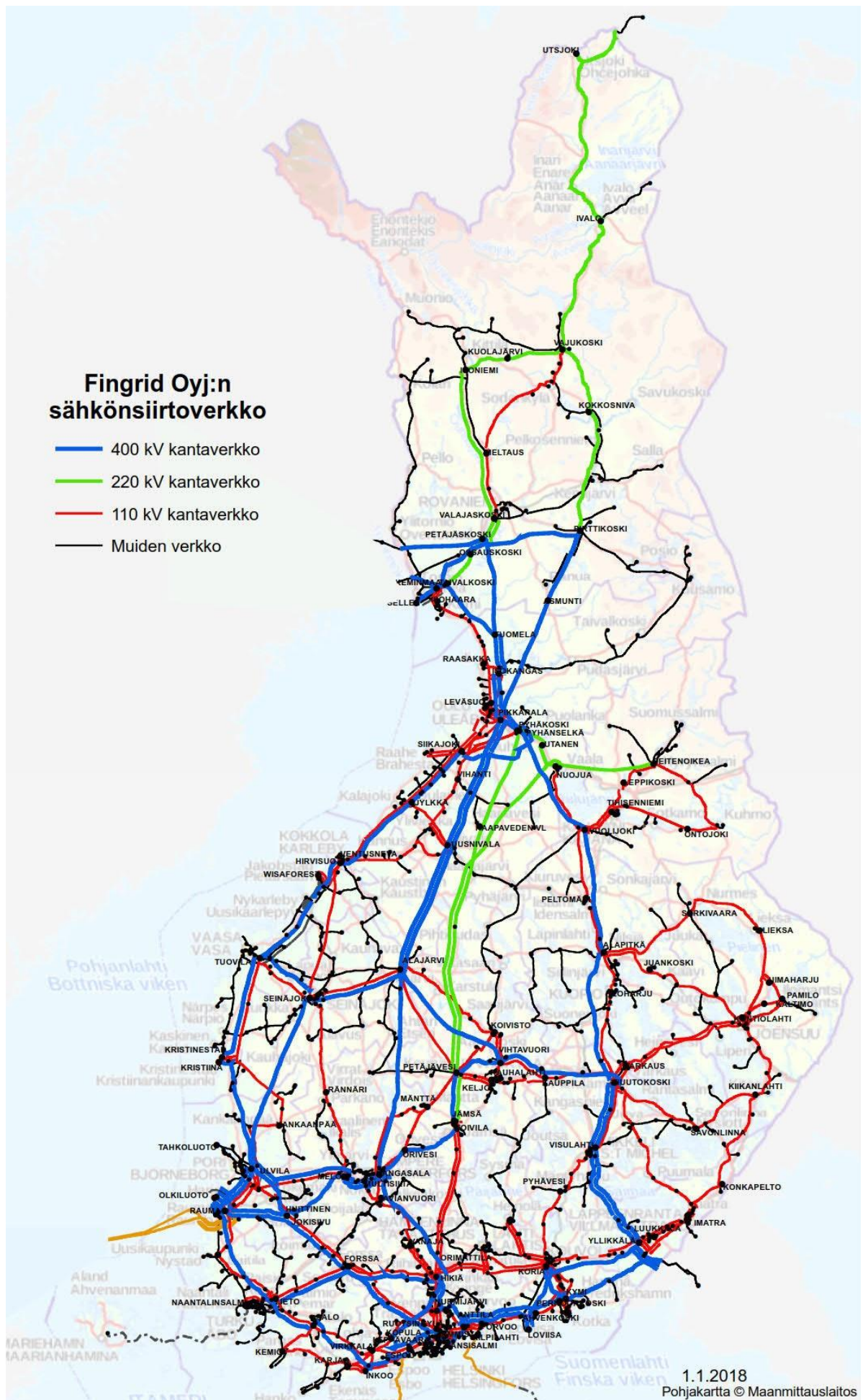
Voimatel suorittaa tilatut työt suunnittelusta, käyttöönottoon ja aina valmiiseen dokumentointiin asti. Voimatel huoltaa ja pitää kunnossa verkkoja taaten niille pitkän elinkaaren. Voimatelin pääkonttori sijaitsee Siilinjärven Toivalassa. (KPY, ei pvm)



## 4 SÄHKÖVERKKO

Suomen sähköverkko rakentuu kolmesta osa-alueesta kantaverkosta, keskijänniteverkosta sekä pienjänniteverkosta. Siirtoverkkojen jännitteet Suomessa ovat 400 kV, 220 kV ja 110 kV. Näistä johdoista muodostuu niin kutsuttu kantaverkko yhdessä sähköasemien kanssa. Kantaverkon jälkeen tulee jakeluverkko, joka jaetaan vielä keskijännite- ja pienjännitejakeluverkkoihin. Keskijännitejakeluverkko muodostuu 1-35 kV johdoista. Yleisimmin keskijänniteverkossa käytetään 20 kV jännitetasoa. Pienjännitejakeluverkko muodostuu 0,4-1 kV verkoista. Pienjännitejakeluverkko on lähimpänä yhteydessä kuluttajiin. Kuvassa 1 nähdään Fingridin omistama Suomen siirtoverkko. (Energiateollisuus, ei pvm)

Sähköverkossa on generaattoreita, sähköasemia, erikokoisia jakelumuuntajia sekä eri jännitetasoilla toimivia johtoja, kytkinasemia ja sensoreita. Näistä generaattorit tuottavat energiaa sähköverkkoon, sähköasemat ovat verkon solmupisteitä, joissa eri jännitetason sähköenergia voidaan muuntaa, jotta sitä voidaan jakaa eteenpäin kuluttajille sopivassa muodossa. Jakelumuuntajat ovat yleisesti lähellä asutusalueita, jotta pienellä jännitteellä tapahtuvat siirrot eivät aiheuttaisi pitkillä matkoilla häviöitä. Jakelumuuntajat sijaitsevat yleisesti pylväissä, muuntajakopeissa tai kerrostalojen kellaritiloissa. (Energiateollisuus, ei pvm)



KUVA 1 Suomen siirtoverkko (Fingrid Oyj, 2018)

#### 4.1 Sähkömarkkinalaki

Elokuussa 2013 1§ annetussa uudessa sähkömarkkinalaissa on edellytetty, että

*Tämän lain tarkoituksena on varmistaa edellytykset tehokkaasti, varmasti ja ympäristön kannalta kestävästi toimiville kansallisille ja alueellisille sähkömarkkinoille sekä Euroopan unionin sähkön sisämarkkinoille siten, että hyvä sähkön toimitusvarmuus, kilpailukykyinen sähkön hinta ja kohtuulliset palveluperiaatteet voidaan turvata loppukäyttäjille. Sen saavuttamisen ensisijaisina keinoina ovat terveen ja toimivan taloudellisen kilpailun turvaaminen sähkön tuotannossa ja toimituksessa sekä kohtuullisten ja tasapuolisten palveluperiaatteiden ylläpitäminen sähköverkkojen toiminnassa.*

*Sähköalan yritysten tehtäviin kuuluu huolehtia asiakkaitensa ja verkkonsa käyttäjien sähkön-hankintaan liittyvistä palveluista sekä edistää omassa ja näiden toiminnassa sähkön tehokasta ja säästäväistä käyttöä. (Finlex, 2013)*

Sähköyhtiölle asetettiin myös rajat myrskyjen ja lumikuormien aiheuttamien sähkökatkojen pituuksiin, jotka tulevat voimaan vuonna 2028. Sähkökatkojen pituudet ovat haja-asutusalueella enintään 36 tuntia ja asemakaava-alueella enintään 6 tuntia. Tämän takia verkonomistajat ovat aloittaneen mittavat hankkeet niin kutsutun säävarman sähköverkon rakentamiseksi. Tästä esimerkkinä on jakeluverkkojen suuret maakaapelointi projektit varsinkin haja-asutusalueilla, joissa aiemmin on jakeluverkot toteutettu pääsääntöisesti ilmajohto- ja ilmakaapelilinjoilla. (Finlex, 2013)

#### 4.2 Suurjänniteverkko

Suurjänniteverkko eli niin kutsuttu kantaverkko on liitetty sähköasemiin ja suurimpiin voimalaitoksiin, jotka tuottavat suurimman osan suomessa käytettävästä sähköstä. Kantaverkkoa käytetään sähkön siirtoon voimalaitoksista lähemmäs kulutusalueita. Kantaverkon omistaa Fingrid Oyj. Kantaverkko on yhteydessä ulkomaihin kuten Venäjään, Ruotsiin, Norjaan sekä Viroon. Näistä maista Fingrid ostaa sähköä, mikäli Suomen sähköverkossa tapahtuu notkahdus esimerkiksi voimalaitoksen kaatumisen vuoksi. Siirtoverkossa jännitteet ovat 400 kV, 220 kV ja 110 kV.

Suuria jännitteitä käytetään, häviöiden minimoimiseksi ja sen vuoksi, että suuria jännitteitä on helpompi hallita, kuin suuria virtoja. Suurien virtojen kanssa kaapeleiden täytyisi olla paksumpia. Jos sähköä siirrettäisiin suurilla virroilla, seuraisi siitä verkon rakentamis- ja ylläpitokustannuksien kasvu. Suurilla virroilla kaapeli paksuudet kasvavat reilusti suureen jännitteeseen verrattuna. (Energiateollisuus, ei pvm)

#### 4.3 Keskijänniteverkko

Keskijänniteverkon jännitetaso on 1–35 kV, Suomessa keskijänniteverkon jännitetaso on yleensä 20 kV. Keskijänniteverkko liittyy sähköaseman kautta kantaverkkoon ja muunnetaan 110/20 kV sähköasemalta. Tältä asemalta sähkö siirtyy keskijänniteverkkoa pitkin pienjänniteverkon jakelumuuntajille, jotka on sijoitettu lähelle asutusalueita. Pienet voimalaitokset syöttävät sähkön keskijänniteverkkoon. Pienemmät teollisuuslaitokset, suuret kiinteistöt ja liikerakennukset voivat liittyä suoraan keskijänniteverkkoon. (Lakervi & Partanen, 2009, ss. 125-126)

Keskijänniteverkko on pääsääntöisesti silmukoitu, jolloin sen vikaantuessa sähkönsyöttö ei katkea täysin. Keskijänniteverkko on pääsääntöisesti rakennettu avojohtoverkkona, mutta varsinkin kaupunkikeskittymissä keskijänniteverkko on maakaapeloitu. (Lakervi & Partanen, 2009, ss. 125-126)

#### 4.4 Pienjänniteverkko

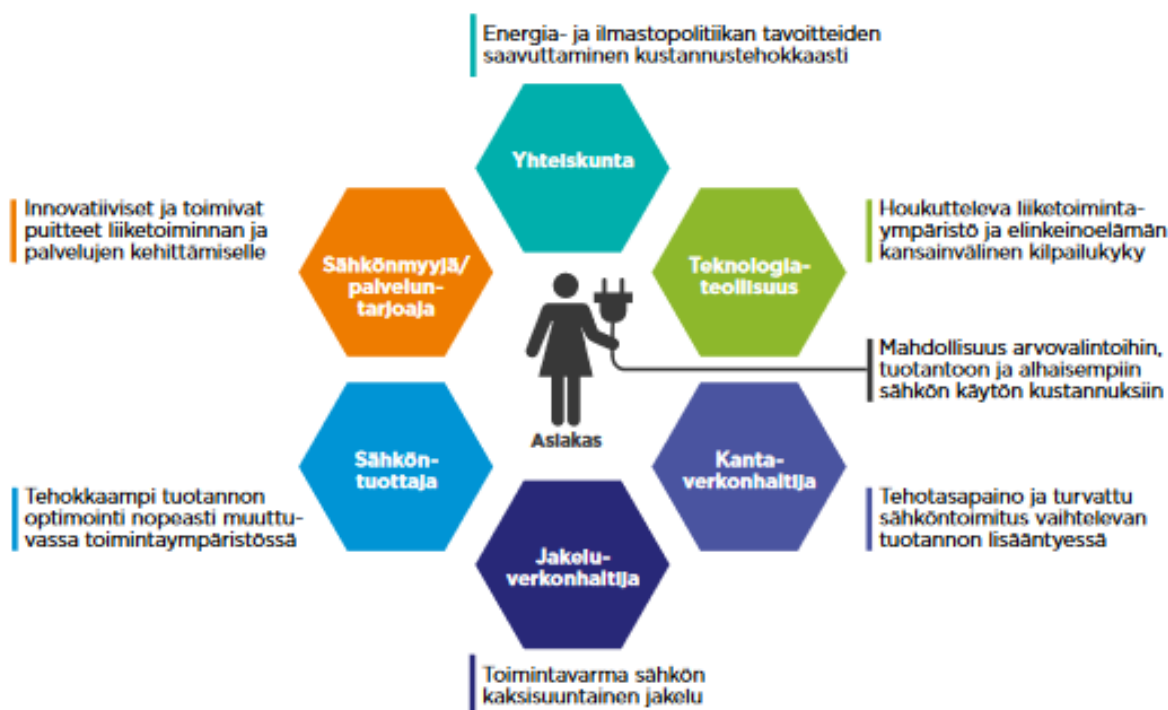
Pienjänniteverkon jännitetaso on 50-1000 V. Tämä jännite muunnetaan keskijännitteestä jakelumuuntajan avulla, joka on yleensä sijoitettu lähelle asutusaluetta. Jakelumuuntajat ovat yleensä 20/0,4 kV suuruisia. 1 kV suuruista jännitettä käytetään pienjänniteverkossa siirtoon harvaan asutuilla alueilla. Pienjänniteverkko on rakennettu säteittäiseksi ja siitä käytetään maadoitettua järjestelmää.

Tämän vuoksi pienjänniteverkoissa on yksi syöttöpiste, joka on yleensä 20/0,4 kV jakelumuuntamo. Pienjänniteverkossa kulutus tulee pienjännitekulutuskojeista. Pienjänniteverkko pyritään pääsääntöisesti maakaapeloimaan nykypäivänä, mutta siitä käytetään myös ilmakaapeleita. Pienjänniteverkossa on myös jonkin verran olemassa avojohtolinjoja. Nämä linjat saneerataan ilma- tai maakaapeleiksi säävarmaa sähköverkkoa hankkeen aikana. (Lakervi & Partanen, 2009, ss. 158-159)

## 5 JOUSTAVA JA ASIAKASKESKEINEN VERKKO

Työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän julkaiseman älyverkkotyöryhmän loppuraportin pääteemaksi on muodostunut joustava ja asiakaskeskeinen verkko. Tämä tarkoittaa, että asiakkaalla on entistä suurempi mahdollisuus osallistua sähkömarkkinoille esimerkiksi kysynnän jouston avulla.

Sähköverkon joustavuus tulee ilmi siinä vaiheessa, kun uusiutuvan energiantuotanto yleistyy energiantuotannon sekä energiayhteisöjen ja pien- sekä mikrotuottajien keskuudessa. Joustavuutta tarvitaan niin kuluttajilta, kuin tuottajilta, jotta kulutus ja tuotanto pystytään pitämään tulevaisuudessa tasapainossa. Aiemmin tätä on kompensoitu sähköverkossa olevalla inertialla. Sähköverkon inertialla tarkoitetaan sähköverkon liike-energiaa, joka on kiinni voimalaitoksissa ja tehtaissa olevissa pyörivissä koneissa, jotka pyörivät sähköverkon kanssa samalla taajuudella. Inertialla hidastetaan taajuuden muutosta sähköverkossa. Uusiutuvien energianlähteiden lisääntyminen ja fossiilisista polttoaineista luopuminen aiheuttaa verkon inertian laskun, joka johtaa siihen, että tuoton ja kulutuksen tasapainottaminen vaikeutuu. Aiemmin tuottoa ja kulutusta on tasapainotettu hiilivoimaloiden avulla. Tulevaisuudessa tuoton ja kulutuksen tasapainottamista voidaan kompensoida erilaisilla sähkövarastoilla, jotka aktivoituisivat tarpeen vaatiessa esimerkiksi vikojen aikana. (Fingrid, 2018) (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)



KUVA 2 Työ- ja elinkeinoministeriön havainnekuva joustavasta ja asiakaskeskeisestä sähköverkosta (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

### 5.1 Asiakaskeskeisyys

Älyverkkotyöryhmän loppuraportissa nostettiin asiakas keskiöön, kuten kuvasta 2 nähdään. Tällä pyritään siihen, että älyverkkosten kehityksessä mentäisiin eteenpäin asiakkaan tarpeiden mukaisesti ja että asiakas voi tehdä valintoja sähkön käytöstään. Työryhmän päätarkoituksena oli tutkia keinoja,

joilla älykäs sähköjärjestelmä voisi hyödyttää ja helpottaa tasapuolisesti asiakkaan ja muiden osapuolien mahdollisuuksia osallistua aktiivisesti sähkömarkkinoille samalla edistäen sähkötoimitusvarmuutta. Kysynnän jouston avulla osallistuminen sähkövähittäismarkkinoille helpottaisi verkon kulutuksen ja tuotannon optimointia, joka vaikeutuu hiilivapaan energiantuotannon yleistyessä.

Aiemmin kuluttaja on ollut vain passiivinen sähkökuluttaja, mutta sen rooli on muuttumassa, sillä kuluttajia tarvitaan sähköverkon optimointiin säätövoiman vähenemisen vuoksi. Ongelmaksi voi muodostua kuluttajien halukkuus osallistua kulutusjoustoön, joten joustosta pitäisi seurata kuluttajalle selvää rahallista hyötyä.

Asiakkaalla on suuri rooli pelkästään energiatehokkuuden parantamisessa, sillä kulutustottumuksien on muututtava, jotta sähköä riittää jatkossa. Ilmastopimuksen tavoitteisiin pääsyyn vaaditaan fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä energiantuotannossa, joka tarkoittaa siirtymistä sään mukaan vaihtelevien uusiutuvien energiantuotantomuotojen käyttöön. Sähkön määrän vaihtelevuuden vuoksi loppukäyttäjien on enenemissä määrin alettava tuottamaan sähköään itse mikrotoitannolla tai perustamalla niin kutsuttuja energiayhteisöjä. Tällä tavoin loppukäyttäjät parantavat tulevaisuudessa omaa sähkön toimitusvarmuuttaan. Energiayhteisöistä tulee sähköverkonhaltijalle ongelmia pientuotannon sijoittamisen suhteen. Tähän on kehitettävä jonkinlaista sääntelyä mihin tuotantoa voi pystyttää, jos se liitetään sähköverkkoon.

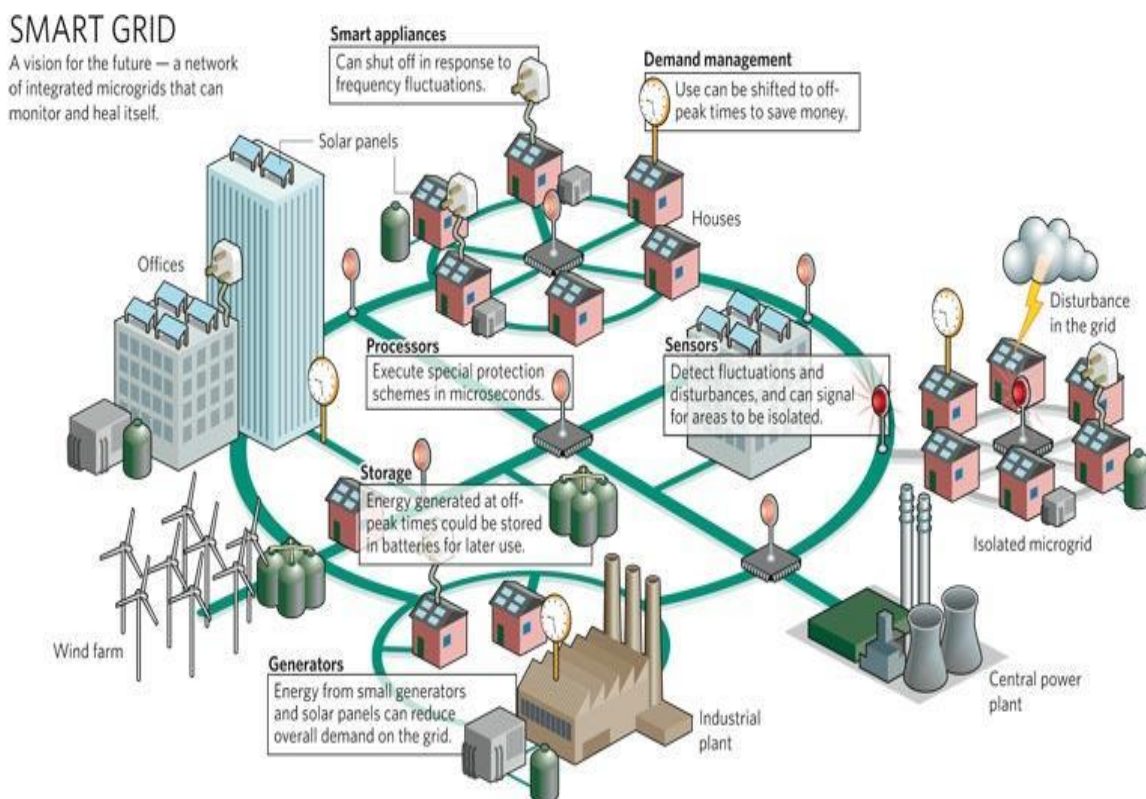
Yhteiseurooppalaisen sähkövähittäismarkkinan avulla sähköverkkoon saataisiin lisää tehokkuutta ja toimitusvarmuuden kasvua. Se lisäisi myös kilpailua, jolla mahdollisesti energianhinta voisi laskea. Lisäksi se parantaisi mahdollisuuksia ilmastotavoitteiden saavuttamiseen koko Euroopan alueella. Tähän vaadittaisiin Euroopan alueella toimiva yhteinen sähkön markkinapaikka, johon yksityishenkilöt tai aggregaattorit voisivat myydä sähköenergiaa.

## 6 ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO

Älykäs sähköverkko on sähköjärjestelmä, joka tarkkailee sähkön virtaamista ja etsii parasta vaihtoehtoa sähkön kulutuksen ja tuotannon kannalta. Älykkäässä sähköverkossa sähkövoimatekniikkaan yhdistetään automaatio-, tieto- ja viestintä teknologiaa. Näiden avulla pystytään lisäämään sähkön toimitusvarmuutta, vähentämään kasvihuonepäästöjä ja näin auttaa pääsyä ympäristötavoitteisiin. Energian kysynnän jatkuva kasvu on pakottanut sähköverkot kehittymään nopeasti, jotta se voisi täyttää vaatimuksia, joita ovat verkon vahvuus, joustavuus, ympäristöystävällisyys ja kustannustehokkuus.

Älyverkkojen avulla sähköntuotanto ja -kulutus voidaan toteuttaa siellä missä se on kulloinkin kannattavinta. Tällä tavoin mahdollistetaan kustannustehokasta siirtymistä kohti hajautetumpaa ja vähähiilisempää sähköjärjestelmää.

Älyverkko avaa pienkuluttajille mahdollisuuksia erilaisiin sähköntuotantoon ja -kulutukseen liittyviin mahdollisuuksiin ja valintoihin sekä mahdollistaa erilaisten uusien innovaatioiden helpon liittämisen verkkoon. (STEK, ei pvm)



KUVA 3 Kokonaisuuden kuva tulevaisuuden energijärjestelmästä (Energiavirasto, 2014)

Aiemmin sähköä on tuotettu paikallisesti voimalaitoksissa ja sitä on siirretty loppukuluttajalle. Tämä on muuttumassa hiilivoimaloiden poistuessa, jolloin myös säättövoimaa häviää sähköverkosta, jonka takia kulutuksen ja tuotannon muutokset ovat vaikeampia tasata. Kuvassa 3 on tulevaisuuden energijärjestelmä, jonka osana on sähköverkko. Verkossa tuotantoa ja kulutusta ohjataan älykkäästi sekä vikoja paikannetaan ja erotetaan nopeasti.

Tulevaisuudessa sähköntuotantoon liittyy entistä enemmän uusiutuvan energian ja hajautetun sähköntuotannon keinoja nykyisten voimalaitosten rinnalle. Tämä tuottaa haasteita erityisesti tehonhallinnassa, koska energiantarve on jatkuvassa kasvussa. Tuotanto ja kulutus on pyrittävä pitämään tasapainossa, mikä luo haasteita, sillä uusiutuvan energian tuotanto on pääsääntöisesti säästä riippuvaista ja mikrotuotannosta on tulossa yleisesti suosittua. Tämä taas luo tarpeen EU alueen laajuiselle joustomahdollisuudelle. Sähköverkkojen olisi hyvä olla mahdollisimman paljon yhteydessä eri maiden välillä, jotta sähköä voitaisiin siirtää muualle, mikäli sähköä tuotetaan toisessa paikassa ylitarpeiden ja samalla jossain päin siitä voi olla pulaa. Esimerkkinä tästä on, että jossain päin aurinko paistaa paljon ja aurinkovoimala tuottaa sähköä enemmän kuin tarvitaan, kun taas jossain muualla on pilvistä ja näin ollen siellä syntyy sähköstä pulaa. Ylituotantoon on myös mahdollista hyödyntää sähkövarastoja, kunhan ne kehittyvät kustannustehokkaalle tasolle. (Tekniikkatalous, 2017)

Sähköverkko kehittyä samaa tahtia tehoelektroniikan sekä sensorointi- ja mittaustekniikan kanssa. Tämä mahdollistaa verkon integroinnin viestinnän ja älykkään hallinnan kanssa. Nämä ominaisuudet mahdollistuvat, kun yhdistetään edellä mainitut teknologiat älymittareihin. Älymittareista kerrotaan enemmän kappaleessa 7.

Nykyinen sähköjärjestelmä kuljettaa sähköä pääosin vain yhteen suuntaan sähköntuottajalta kuluttajalle. Tulevaisuudessa sähköverkkoa on muutettava, kun sähköjärjestelmän ja sähkömarkkinoiden toimintatapoja joudutaan muuttamaan uusiutuvan ja sään mukaan muuttuvan tuotannon vuoksi. Tulevaisuudessa uusiutuvan energiantuotanto muuttuu entistä yleisemmäksi, sillä fossiilisten energiamuotojen käyttöä halutaan vähentää ja ajan myötä lopettaa käyttö kokonaan. Tämä luo pientuottajalle enemmän mahdollisuuksia osallistua sähköntuotantoon ja sitä kautta sähkömarkkinoille, sillä hän voi myydä tuottamansa ylimääräisen energian verkkoyhtiölle. Tämän toteuttamiseen tarvitaan reaaliaikaisempaa ja kaksisuuntaista sähkömittausta.

Älyverkkojen kannalta siirtyminen reaaliaikaisempaan mittaukseen on tärkeää. Reaaliaikaisempi mitaus on niin kutsuttu varttitase eli mitaus tapahtuu 15 minuutin välein. Varttitase tulee aluksi säätösähkömarkkinoille eikä vaikuta loppukuluttajaan vielä. Myöhemmin myös loppukuluttajien energianmittaus siirtyy tunnista 15 minuutin välein tapahtuvaan mittaukseen.

Varttitaseella kaupankäynti on jo mahdollista Keski-Euroopassa ja Pohjoismaat ovat siirtymässä varttitaseeseen saman aikaisesti, jotta sähkömarkkinat voidaan integroida yhtenäisiksi. Siirryttäessä yhdessä varttitaseeseen suomalaisilla toimijoilla on mahdollisuudet toimia päivän sisäisillä- ja säätösähkömarkkinoilla pohjoismaissa ja jatkossa koko EU-alueella, mikäli yhtenäinen sähköverkko toteutuu. Varttitaseen avulla voidaan tasapainottaa tuotannon ja kulutuksen eroja tarkemmin luomalla markkinat automaattiselle taajuudenhallintareserville aFRR ja nopealle häiriöreserville tai säätösähkömarkkinalle mFRR. Säätösähkömarkkinoille ollaan kehittämässä Datahub sovellusta, joka hoitaa sähkömarkkinoiden tiedonvaihtoa. (Fingrid, ei pvm)

Tulevaisuudessa mahdollisuus on, että loppukuluttaja voisi valita esimerkiksi eurooppalaisen energia-yhtiön, jolta ostaa sähköenergiansa. Tämä vaatisi kuitenkin yhtenäisen sähköverkon ja sen tietoliikenteen integroinnin Euroopan laajuisesti. Tämä loisi uusia kilpailutilanteita energiamarkkinoille.



Tulevaisuudessa tuotannon ja kulutuksen säätely on entistä tarkempaa, koska sähköverkko ei pysty varastoimaan sähköenergiaa, joten kulutuksen ja tuoton täytyy olla tasapainossa tai verkkoon on rakennettava erilaisia sähkövarastoja. Tämä ei kuitenkaan ole kannattavaa ennekuin akkuteknologiat kehittyvät tarpeeksi. (Tekniikkatalous, 2017)

Älyverkko antaa asiakkaalle paremmat mahdollisuudet vaikuttaa oman sähkönkulutuksensa kustannuksiin. Asiakas voi hyötyä hetkellisen sähkönkulutuksen muuttamisesta rahallisesti tarjoamalla esimerkiksi sähkölämmityksen tai sähköautonsa latauksen automaattista ohjaamista sähkömarkkinoille, jolloin hän voi lämmittää tai ladata autoaan halvan sähkön aikaan eikä hänen asumismukavuutensa kärsi. Ongelmaksi muodostuu halvan sähkön aikaan ladattaessa, että kaikki lataavat samaan aikaan, joka aiheuttaa siihen kohtaan tehopiikkejä. Tämän vuoksi latausta on ohjattava älykkäästi, mutta kuitenkin siten, että auton akku on täynnä kuluttajan haluamaan aikaan.

Loppuasiakkaat voivat vaikuttaa omaan energiankulutukseen hankkimalla energiaa säästäviä laitteita tai palveluja, joilla heidän energiankulutustaan ohjataan.

Älykäs sähköverkko näkyy peruskuluttajalle tällä hetkellä etäluettavien sähkömittareiden asennuksena. (Työ- ja elinkeinoministeriö, ei pvm) (Avancini, ym., 2019)

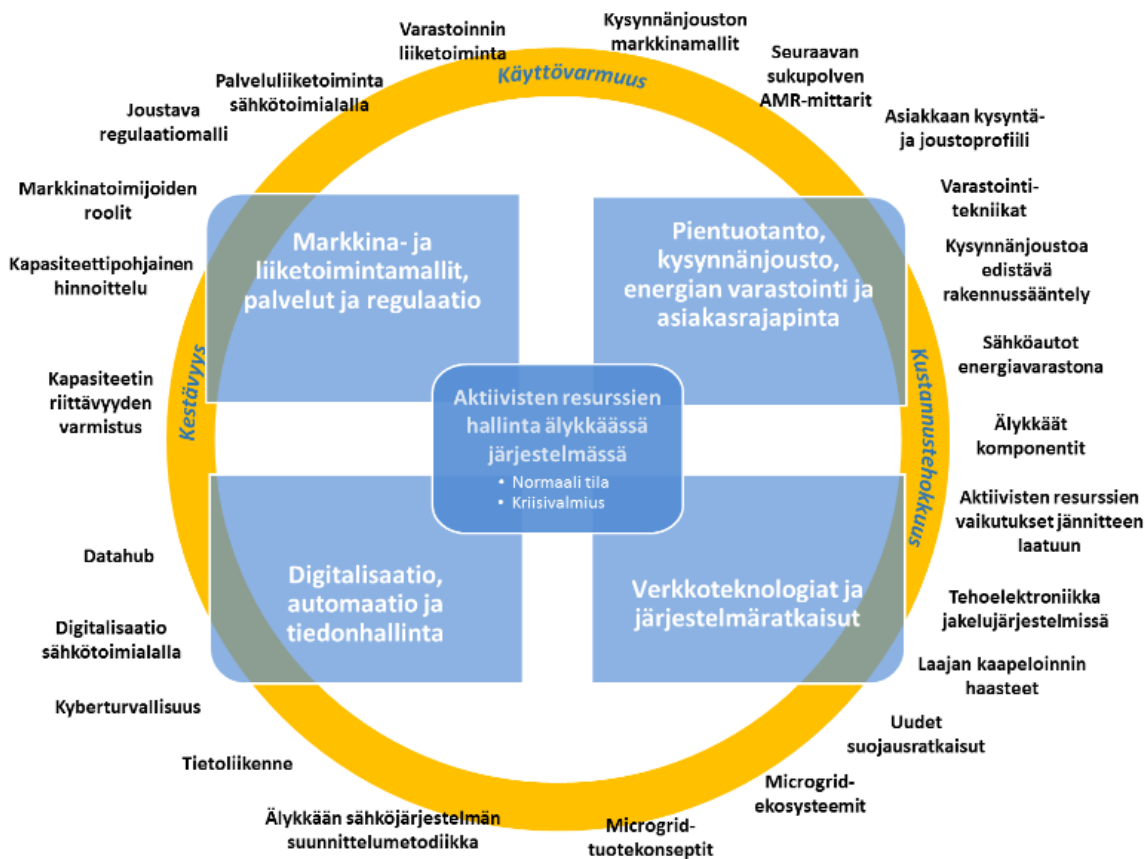
## 6.1 Älyverkkovisio

Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) julkaiseman älyverkkovision mukaan älyverkot toimivat kustannustehokkaana palvelualustana, jonka tarkoituksena on vähentää hiilipitoisten järjestelmien käyttöä ja edesauttaa sähkönvähittäismarkkinoiden kehitystä. Syy päästöjen vähentämiseen tulee EU:n ilmasto- ja energiapolitiikasta. Älyverkkovision tavoitteena on edistää kasvua, työllisyyttä ja mahdollisuutta kehittää uusia innovaatioita samalla elämänlaatua parantaen. Tavoitteena on myös lisätä valinnan varaa asiakkaan näkökulmasta sekä vähentää kotitalouksien energiankulutusta ja näin alentaa kustannuksia. EU:n mukaan keskeisiä tekijöitä ovat energian osuuden ja energiatehokkuuden lisääminen. Näiden avulla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja saavuttaa ilmastotavoitteet. Älyverkkovisiossa tulevaisuuden älyverkkoratkaisuja tarkastellaan sähkömarkkinoiden toimivuuden kannalta asiakkaan ollessa keskiössä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2016, s. 6) (Euroopan Unioni, ei pvm)

## 6.2 Roadmap 2025

Roadmap 2025 ja verkkovisio hankkeet on toteutettu vuosina 2005-2007 tehdyn Roadmap 2015 ja Verkkovisio 2030 hankkeiden perusteella. Roadmap 2025 oli tarkoitus luoda tulevaisuuden kuva sähköverkoista ja sen kehityspoluista. Hankkeessa tarkasteltiin sähköverkkoa, sähkökauppaa, valmistavaa teollisuutta ja palveluliiketoimintaa. (Kumpulainen, ym., 2016)

Sähköverkon kehitystä nopeuttavat sähköautojen sekä julkisen liikenteen sähköistyshalukkuus. Tällä on vaikutusta myös energianvarastointi järjestelmien kysyntää, kehitykseen sekä hinta kehitykseen. Uusiutuvan energian saanti on sääkohtaista, joten energiaa pitäisi saada varastoitua siltä varalta, että aurinkoenergiaa ei olekaan saatavilla tarpeeksi pilvisyyden vuoksi. (Kumpulainen, ym., 2016)



KUVA 4 Roadmap 2025 ja tutkimus- ja kehitystyötä vaativat asiat (Kumpulainen, ym., 2016, s. 23)

Kuvassa 4 on esitetty älyverkkojen kehityksen roadmap 2025 ja siihen liittyvät asiat, joihin vaaditaan lisää kehitys ja tutkimustyötä ennen kuin niitä voidaan hyödyntää älyverkoissa.

Kysynnänjouston laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy ongelmia sen liiketoimintamalleissa, eli kuinka siitä saadaan kilpailtua liiketoimintaa, joka on tasapuolista kaikille osapuolille. Kysyntäjousto vaatii palveluntarjoajilta, sähkönmyyjiltä sekä verkkoyhtiöiltä uusien liiketoimintamallien luomista, jotka ovat kuluttajia houkuttelevia. Ennen kysyntäjousto käyttöönottoa kuluttajien osalta on kuitenkin päätettävä, että kuka päättää mitä kuormia joustolla ohjataan. Onko päätöksentekijä asiakas, sähkönmyyjä vai joku kolmas osapuoli.

Kysyntäjousto asiakaskäyttäytyminen on myös yksi ongelmakohta. Ratkaisuna asiakaskäyttäytymiseen voisi olla erilaisten toimintamallien luonti kysyntäjousto hyödyntämiseen, joka räätälöitäisiin jokaiselle asiakkaalle omien tarpeiden mukaisesti. Tällä saataisiin kaikille miellyttävä kokonaisuus. Esimerkkinä haja-asutusalueella asuva henkilö voi käyttää omilla aurinkopaneeleilla tuottamaansa sähköä omiin tarpeisiinsa ja ylituotanto voidaan varastoida akkuihin tai myydä eteenpäin. Hänellä on mittalaitteet, jotka mittaavat kulutusta ja tuottoa, jolla asiakas pystyy säästämään siirtohinnoissa. Kaupunkialueella kerrostalossa asuva voisi hyötyä joustosta parhaiten kokonaispalvelun avulla, joka ohjaa ja säätelee sähkökuormia kotiautomaation avulla. Tällä tavoin kysynnänjousto hyödyntämällä asiakkaan ei tarvitse miettiä omaa sähkönkulutustaan. (Bremer;Frilander;Kaskinen;& Malho, 2017)

Sähkönvähittäismarkkinat ovat olleet Suomessa pitkään samanlaisia. Sähköä on mitattu tuntitasolla ja kuluttajat ovat voineet valita, joko kiinteän sähköhinnan tai tuntitasolla vaihtelevaan sähkön hinnan,

joka määräytyy sähköpörssin spot-hinnasta. Sähkön myynti ja mittaus ovat kuitenkin siirtymässä kohti reaaliaikaisempaa varttitasetta, joka tarkoittaa, että hinta määräytyy 15 minuutin välein. Varttitaseesta siirrytään tulevaisuudessa kohti täysin reaaliaikaista sähkömittausta. Tämä ei ole tapahtumassa kuitenkaan lähiaikoina. Varttitaseen tasejaksolla tapahtuvien tasevirheistä aiheutuvat kustannukset jakautuvat virheitä aiheuttaville osapuolille eikä kaikille sähkömarkkinaosapuolille, kuten tuntitaseessa.

Varttitaseeseen siirtymisen syynä on pääsääntöisesti ilmastonmuutoksen torjunta ja Euroopan tavoite saada yhteiset sähkömarkkinat EU-alueelle, mutta myös tuotannon vaihtelu, joka aiheuttaa lisääntyviä sähkön hinnanmuutoksia.

Varttitaseeseen siirtymisen vaikutukset aiheuttavat jakeluverkkoyhtiöille ongelmia mittaustiedonhallinnassa, -varastoinnissa ja tiedonvaihdossa, koska mittaustiedon määrä nelinkertaistuu. Vaikutukset tiedonvaihtoon ovat kuitenkin pienet, sillä nykyisellä tiedonsiirrolla on hyvät valmiudet siirtyä varttitaseeseen käyttöön. Ongelmia aiheuttaa tietojärjestelmien saatavuus nopealla aikataululla, sekä mittalaitteiston ennenaikainen vaihto, joka aiheuttaa kustannuksia. Suurin osa mittareista voitaisiin siirtää varttitaseeseen ohjelmistopäivityksen avulla, tähän ei ole kehitetty massaohjelmointityökaluja, joka tarkoittaa tällä hetkellä sitä, että jokainen mittaria pitäisi ohjelmoida yksitellen tai ohjelmointityökalu pitäisi kehittää. Datahubin avulla mittaustiedonhallintajärjestelmien muutostarpeet jäävät vähäisiksi, koska Datahub hoitaa taselaskennan ja laskee tasevirheet verkkoyhtiöiden puolesta.

Varttitaseeseen siirryttäessä tulee muuttua kaikki siihen vaikuttavat tietojärjestelmät, täytyy lisätä automaatiota kaupankäyntiin. Tuntitaseessa mittausjaksoja on 24 kun taas varttitaseessa 96 kappaletta. Siirtymävaiheen alussa osa kohteista on mitattuja ja osa mallinnettuja eli osa on mallinnettu tuntimitauksesta. (Energiateollisuus, 2018)

Sähkönvarastointi ja mikroverkot tulevat yleistymään tulevaisuudessa. Näiden tulemiseen loppukäyttäjällä on suuri rooli, sillä sähkömarkkinaosapuolilla on toiminnassa mahdollistajan rooli. Näiden asioiden kysynnän kasvaessa myös toteutukseen kehittyy vaihtoehtoja, jolloin siitä tulee monipuolisempaa ja sen kustannukset laskevat.

Mikroverkot ovat tällä hetkellä suuren tutkinnan alla ympäri maailmaa. Mikroverkot toimivat kuin pienet versiot sähköverkosta, jotka voidaan erottaa tarpeen vaatiessa verkosta. Tällä mahdollistetaan verkon kulutushuippujen kompensointi ja vikojen erotus sekä sähkönsyötön jatkuvuus asiakkailta.

### 6.3 Älyverkon kommunikaatio

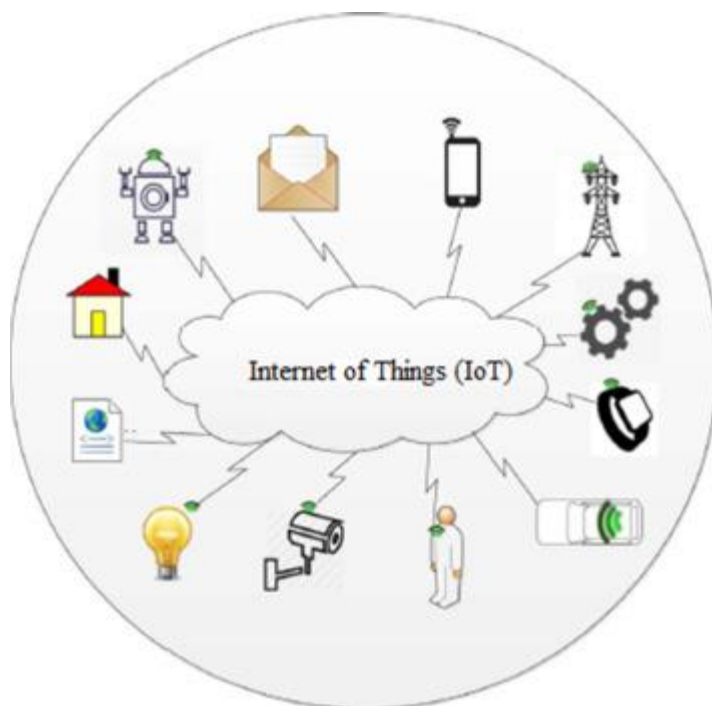
Älyverkkojen kehityksen kannalta yksi tärkeimmistä osa-alueista on kommunikaatio ja tiedonsiirto. Tärkeäksi tässä aiheessa nousee eri laitteiden välinen tiedonsiirto, jotta älyverkkoa voidaan optimoida parhaimmalla mahdollisella tavalla. Nykyisin tiedonsiirrossa käytetään PLC, 2G tai 3G mobiiliverkkoja ja erilaisia radioliikenneteknologioita. Kun tiedonmäärä tulee tulevaisuudessa kasvamaan, tarvitaan reaaliaikaisempia ja nopeampia tiedonsiirto vaihtoehtoja. Tietoa siirretään myös paljon valokuituverkolla. Monet uudet kommunikaatiojärjestelmät käyttävät jo olemassa olevia tiedonsiirtoverkkoja, kuten mobiiliverkkoja.

### 6.3.1 Internet of Things (IoT)

Internet of Thingsillä eli lyhyemmin IoT:llä tarkoitetaan esineiden internettiä, jossa laitteet liitetään antureiden ja sensoreiden avulla internettiin. Toisin sanoen IoT yhdistää fyysiset laitteet digitalisaatioon. IoT laitteiden määrä maailmassa vuonna 2019 on noin 42,1 miljardia ja niiden määrän uskotaan nousevan 50 miljardiin vuoteen 2020 mennessä. IoT:ssä jokainen verkon osa on yhteydessä internettiin omalla IP-osoitteella. Näin verkonlaitteita voidaan hallita etänä internetin kautta. IoT mahdollistaa kuluttajatuotteiden innovatiivisen kehittämisen helposti sen muokattavuuden vuoksi. Rakennusten säätömahdollisuudet kasvavat IoT:n myötä, sillä kun laitteistoa kytketään internettiin, saadaan säätövoimaa tai niin kutsuttu virtuaalivoimalaitos. (Kimani;Oduol;& Langat, 2019)

IoT-tekniikalla on keskeinen rooli älykkäissä sähköverkoissa, sillä se auttaa suurten tietomäärien siirtämisessä ja hallinnoimisessa. IoT:llä luodaan myös tehokas tiedonsiirto antureiden, toimilaitteiden, älymittareiden ja ohjelmien välillä, mikä johtaa energiansäästöön ja verkon hallinnan kustannusten alenemiseen. IoT:n avulla mahdollistetaan reaaliaikaista energiankulutuksen ja energian kysynnän seuranta ja samalla kuluttajien oman kulutuksen seurannan tehostamista. Näin helpotetaan kulutuksen ja tuotannon tasapainottelua. (Kimani;Oduol;& Langat, 2019)

IoT:n ja älymittareiden avulla voidaan seurata jakeluverkon jännitteenlaatua tehokkaammin ja nopeammin laitteiden ollessa yhteydessä toisiinsa. Laitteiden ollessa yhteydessä toisiinsa internetin kautta tietoliikenne on lähes reaaliaikaista. Älyverkoissa IoT mahdollistaa verkon laitteiden toisiinsa yhteydessä olemisen ja samalla hyödyntäen kaksisuuntaista viestintää. IoT:n avulla kuluttajat, tuottajat sekä sähkönmyyjät minimoivat inhimillisten virheiden tapahtumisen sähköverkon toiminnallisuudessa. Älyverkon hallinta sen alkupisteestä loppukuluttajalle tulee mahdolliseksi käyttämällä älykkäitä mittareita, -laitteita, antureita ja muita toimilaitteita. (Kimani;Oduol;& Langat, 2019)



KUVA 5 Internet of Things periaatekuva (Gupta, ym., 2019)

IoT pohjaisten älyverkkojen hyötyjä ovat muun muassa:

- Älymittareiden tehokkaampi hyödyntäminen (Advanced Metering infrastructure, AMI)  
Älykkäiden mittareiden hallinta AMI on helposti toteutettavissa IoT:n avulla. AMI:in kerätään älymittareiden keräämät tiedot, josta ne toimitetaan eteenpäin. Näillä tiedoilla sähkön myyjät voivat suorittaa reaaliaikaista hinnoittelua sekä sähkön tuottajat kysynnän ennustamista.
- Sähköjärjestelmän tehokkuuden parantaminen  
IoT:n avulla älykäs sähköverkko pystyy suorittamaan niin kutsuttua self-healingia eli se voi olla itsekorjautuva tai se pystyy ennakoimaan vikoja. IoT:n avulla myös mikroverkot voitaisiin automaattisesti erottaa verkon havaitessa vikaantumisen tai energian tarpeen.
- Kysyntään vastaaminen  
IoT:n käyttö älyverkoissa auttaa hallitsemaan tuotannon ja kysynnän välistä eroa. Se luo dynaamista hinnoittelua, joka nostaa sähköhintaa huippukuormien aikana ja laskee niitä, kun tuotantoa on enemmän kuin kulutusta. Tällä ohjataan ihmisiä kysyntäjouston pariin.
- Vuorovaikutus loppukuluttajan kanssa  
IoT:n mahdollistama reaaliaikainen kaksisuuntainen tietoliikenne asiakkaan, sähköyhtiön ja sähkönmyyjän välillä antaa tärkeää tietoa kulutuksen optimoinnista sähköyhtiölle ja samalla asiakas saa tiedon omasta kulutuksestaan.
- Verkko-omaisuuden valvonta ja käyttö  
IoT:n avulla sähköverkon anturit ja muut mittalaitteistot tarjoavat tietoja, jolla voidaan selvittää yksittäisien verkkokomponenttien tilan. IoT auttaa havaitsemaan, ennustamaan ja reagoimaan uusiin vikoihin ja ongelmiin ennakoivasti, mikä johtaa verkon ylläpitokustannuksien minimointiin. (Kimani;Oduol;& Langat, 2019)

### 6.3.2 NarrowBand internet of things (NB-IoT)

NarrowBand internet of things eli lyhyemmin NB-IoT on IoT:stä jalostettu tiedonsiirtoprotokolla, joka toimii LTE-verkossa. NB-IoT käyttää 200 kHz kaistanleveyttä ja alle 1 GHz lisensoitua taajuusalueita. Yhtä tukiasemaa kohti NB-IoT voi yhdistää satoja tuhansia laitteita. NB-IoT:n etuja ovat nopea ja helppo käyttöönotto, sen energiatehokkuus. Laitteen ollessa käyttämätön, se siirtyy lepotilaan, jolloin se ei kuluta akkuaan. Tämä pidentää laitteen akuston käyttöikää. Käyttöönotto vaatii vain olemassa olevien tukiasemien uudelleen ohjelmointia, sillä NB-IoT hyödyntää olemassa olevia tietoliikenneverkkoja.

NB-IoT:tä voidaan hyödyntää heikon kuuluvuuden kohteissa, sillä sen taajuus läpäisee materiaalia hyvin. NB-IoT:llä on myös pitkä kuuluvuusalue, sillä se käyttää LPWAN-verkkoa, joka takaa suuren tiedonsiirtokaistan noin 10-100 km säteellä. (Pöyry, 2017)

### 6.3.3 5G-tekniikka

5G-tekniikka on viidennen sukupolven mobiiliteknologia, jota voidaan käyttää kaikissa internetin välityksellä toimivissa laitteissa. 5G-verkoissa tiedonsiirto nopeus kasvaa jopa 10 kertaiseksi ja tietoliikennekapasiteetti 100 kertaiseksi. 5G-verkoissa on lyhyempi viive mikä on sähköverkkolaitteiden tulevaisuuden kommunikaatiossa suuri tekijä. (Pöyry, 2017)

Tulevaisuuden sähköverkoissa tiedonsiirtonopeudella on suuri merkitys tietoa siirrettäessä reaaliajassa. 5G-verkko takaa nopeaa reagointikykyä sähköntuotannon vaihteluihin. 5G-tekniikka hyödyttää myös aggregaattoreita, jotka tarvitsevat nopeita tiedonsiirtoväyliä toimintaansa.

5G-tekniikalla voidaan käyttää kaksisuuntaista tiedonsiirtoa samalla taajuudella, jolla mahdollistetaan tiedonsiirtokyvyn kaksinkertaistaminen. Tämä tarpeellista älymittareiden ja sähköverkonlaitteiston kaksisuuntaisen tiedonvaihdon kannalta. (Pöyry, 2017)

5G-verkot toimivat korkeilla taajuuksilla, mikä tuo kapasiteettia. Korkealla taajuudella signaalien läpäisykyky on heikompaa. Ratkaisuna on, että rakennetaan paljon pieniä tukiasemia lähemmäs, jotta verkon toiminnallisuus tehokkaana. (Pöyry, 2017)

### 6.3.4 Kyberturvallisuus

Kyberturvallisuus on yksi suurimmista haasteista älyverkoissa. Sähköjärjestelmän siirtyessä entistä enemmän kohti automatisoitua ja älykkäämpää verkkoa, jonka laitteistoa liitetään entistä enemmän internettiin, on huolehdittava laitteiston kyberturvallisuudesta. Laitteiden liittyessä internettiin tiedonsiirto mahdollisuuksien lisäämiseksi ne altistuvat entistä enemmän viruksille ja haittaohjelmille sekä muille kyberturvallisuutta uhkaaville asioille.

Kyberturvallisuuden tarve kasvaa merkittävästi, mikäli sähköverkkoja yhdistetään entistä enemmän maiden välisiä rajojen ylittäviksi, sillä haittaohjelmilla voisi mahdollisesti kaataa esimerkiksi koko Euroopan alueen sähköverkon.

Saksan kyberturvallisuuskeskus on julkaissut raportin, jossa kerrotaan, että Saksan sähköverkon pimentäminen on mahdollista ja se vaikuttaisi myös muihin Euroopan maihin. Mikäli hyökkäys kohdistuisi korkeatehoisiin voimalaitoksiin, Euroopan alueen sähköverkko olisi vaarassa lyhyenkin katkon vuoksi. (Saraste, 2018)

Sähköverkkoa ja sen laitteistoa kehitettäessä ja siihen liitettävän automaation ja erilaisen teknologian kehityksessä pitääkin kulkea turvallisuus edellä ja pyrkiä kehittämään varmempia haittaohjelmien torjuntaohjelmia. Kyberturvallisuutta on kehitettävä kuitenkin niin, että se luo luottamuksen energiajärjestelmän toimintaa kohtaa, sekä tukee energiajärjestelmän tasapainoista kehitystä.

Hajautetumpi tuotanto aiheuttaa turvallisuusriskejä, sillä siinä on enemmän etäohjattavia laitteita, jotka osallistuvat tehotasapainon ylläpitoon. Mikäli tehotasapainoa voidaan haittaohjelmilla heilauttaa se voi aiheuttaa sähköverkoston kaatumisen. Sähkömarkkinoiden siirtyminen reaaliaikaisempaan ja

automatisoidumpaan malliin ja asiakastietojen siirtyminen yhteen paikkaan aiheuttaa riskejä asiakastietojen väärinkäyttöön. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

## 6.4 Kapasiteetti

Sähkön kulutuksen jatkuva kasvu ja tuotantomuotojen muuttuminen aiheuttavat muutosvaatimuksia sähkön käytön ohjaamisessa. On arvioitu, että sähköntuotannon kapasiteettia olisi nostettava noin gigawatin verran viikossa, jotta se vastaisi kasvavaa energiantarvetta. Keskeiset sähkön kysyntään vaikuttavat tekijät ovat sähköinen liikenne, aurinkosähkön tuotanto ja kiinteistöjen lämmitystapojen muutokset. Nämä tekijät aiheuttavat sähköverkkoon huipputehojen kasvua, vaikkakin energian siirtotarve on laskussa. Ongelmaksi muodostuu myös kaupungistuminen ja haja-asutusalueiden taantuminen eli näillä alueilla tapahtuu muuttotappiota. Ihmisten poismuutto aiheuttaa sen, että sähkönkäyttöpaikkoja jää tyhjilleen ja näin sähköntarve alueella vähenee.

Uusiutuvien energiamuotojen tuotannon kasvu aiheuttaa yhdessä kulutuksen ja uusien kulutuslaitteiden kanssa sähköverkkoon suuria vaihteluita, jonka vuoksi sähkönkulutus tottumuksia on muutettava esimerkiksi kulutusjouston avulla. (ABB, ei pvm) (Lassila;Haakana;Haapaniemi;Räisänen;& Partanen, 2019)

Kapasiteettia pitäisi pystyä kasvattamaan ilman fossiilisia energiantuotantomuotoja, jotta Pariisin ilmastopöytäkirjassa sovittuihin ilmastotavoitteisiin voitaisiin päästä. Kapasiteettia pystytään lisäämään ilman fossiilisia energiantuotanto muotoja hyödyntämällä aurinko- ja tuulienergiaa, mutta nämä energiamuodot eivät ole säätövoimaa ja vaativat sähkön varastointiteknologiaa, jotta huippukulutusaikeihin voidaan valmistautua. Akkuteknologian hyödyntäminen ei ole järkevää ennen kuin teknologia kehittyy kustannustehokkaaksi. Akkuteknologian kehitys tapahtuu sähköautojen kehityksen ja yleistymisen kanssa samaa tahtia.

Yhtenä esimerkkinä kunnolla hyödynnettävistä sähkövarastoista ovat sähköautojen akut. Näitä akkuja voidaan käyttää myös säätövoimana kaksisuuntaisenverkon avulla. Näiden ohjaamiseen tarvitaan kuitenkin älykästä latausjärjestelmää, jotta kulutushuiput saadaan optimoituja verkon kestävyysnäkökulmasta järkeviksi ja sähkön ylituotannon aikaan niitä voidaan ladata. Älykäs latausjärjestelmä seuraisi kulutushuippuja ja siirtäisi latausajankohdat pois näiltä ajoilta, joilla sähköä ei ole tarjolla tarpeeksi.

Lisätuotannon tarvetta lasketaan kysyntäjoustolla, jolla voidaan siirtää kysyntää tai kulutusta eri ajankohdalle. Lisäksi sähkön varastointia täytyy kehittää, jotta siitä saadaan kulutushuippujen tasaaja tulevaisuudessa.

Sähkölämmityskohteiden yhteiskulutus Suomessa on enemmän kuin kaikkien Suomen ydinvoimaloiden tuotto yhteensä. Sähkölämmitystä voidaan helposti hyödyntää kulutusjoustopuolella.

Kapasiteetin käyttöön olisi hyvä luoda säätösähkölle markkinapaikka, jossa sähköä voisi ostaa ja myydä kuin pörssissä. (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2018)

Hajautettutuotanto aiheuttaa ongelmia erityisesti verkonhaltijalle, sillä hajautettua tuotantoa voidaan sijoitella satunnaisesti ympäri verkkoa. Verkonhaltijalle aiheutuu ongelmia tuotannon osuessa verkon heikkoon kohtaan, jolloin verkonhaltija joutuu tekemään luultavimmin investointeja verkkoonsa, jotta se kestää lisääntyvän energianmäärän.

## 6.5 Luotettavuus

Sähköverkon ja sähkön toimitusvarmuuden luotettavuus on tärkeä kehityskohde ja on älyverkkojen kehityksessä yksi pääteemoista. Toimitusvarmuuden parantaminen on noussut esille uuden sähkömarkkinalain vuoksi, jossa päätettiin, että myrskyjen tai lumikuorman aiheuttamien sähkökatkojen pituudet saavat olla asemakaava-alueella enintään 6 tuntia ja haja-asutusalueella enintään 36 tuntia. Näille ajoille on annettu määräjat työ- ja elinkeinoministeriön julkaisussa, jossa toiminta-alueilla olevista asiakkaista on 50 % oltava vaatimusten piirissä 31.12.2019 mennessä, 75 % oltava 31.12.2023/31.12.2028 ja 100 % oltava 31.12.2028/31.12.2036 vaatimusten piirissä. (Partanen, 2018)

Sähköverkkojen on oltava sellaisella tasolla, että sähkökatkojen pituuksien maksimiajat eivät ylitä viimeistään vuonna 2028 tai mikäli verkkoyhtiölle on myönnetty lisäaikaa niin vuoteen 2036 mennessä. Tämän takia jakeluverkkoyhtiöt ovat alkaneet kaapeloida jakeluverkkojaan omilla alueillaan. Tällä alennetaan sään aiheuttamien vikojen ilmenemistä, sillä sääilmiöt vaikuttavat helpommin ilmajohtoihin ja -kaapeleihin kuin maan alla kulkeviin maakaapeleihin. Maakaapelitkaan eivät ole täysin viattomia, vaikka ovatkin maan alla sääilmiöiltä piilossa. Maakaapeleiden yleisin vian aiheuttaja on kaivuutyön aiheuttama kaapelin vaurioituminen tai katkeaminen. Muita kaapeliverkon vikoja aiheuttavat muun muassa asennusvaiheessa vaurioitunut suojakuori tai huonosti tehty kaapelijatkos, joka pettää ajan myötä. Maakaapelointi aiheuttaa verkon maasulkuvirtojen kasvua ja näin ollen kasvattaa myös sen kompensoinnin tarvetta. Nämä viat tulevat yleensä ilmi vasta pitkällä aikavälillä. Tähän on kehitetty mittalaite, joka havaitsee viat osittaispurkausmittauksella. Tätä menetelmää on käytetty ainakin keskijänniteverkon maakaapeleissa ja laitevalmistajan mukaan vika voidaan paikantaa yhden metrin alueelle. (Tienari, 2018)

Luotettavuutta parannetaan siirtämällä ilmajohto- ja ilmakaapeliverkkoja pois metsien keskeltä teiden varsille sekä korvaamalla pienjännite avojohtoja päällystetyillä ilmakaapeilla. Verkon toimintavarmuutta voidaan parantaa luomalla rengasyhteyksiä sekä lisäämällä verkkoon automaatiota, joka parantaa vianpaikannusta ja -eristämistä.

Vianpaikannus kaapeliverkossa on vaikeampaa kuin ilmajohtoverkoissa, koska ilmajohtoviat voidaan paikantaa visuaalisesti. Kaapeliverkko on maan alla, joten sen vikojen paikantaminen on vaikeampaa. Maakaapeliverkoissa vian havainnointiin käytetään hyödyksi paljon muuntamoautomaatiota ja muuntamoilla sijaitsevia mittareita ja sensoreita, jotka mittaa virta-arvoja. Virta-arvojen muutoksien avulla voidaan havaita maakaapelivika ennekuin se näkyy muualla. (ABB, ei pvm)

Vianpaikannus on helpottunut kaapeloidussa pienjänniteverkossa uusien älymittareiden avulla, jotka lähettävät tietoa jatkuvasti verkon tilasta sekä keskustelevat jakelumuuntamoilla sijaitsevien sensorien



ja mittareiden kanssa virta- ja jännitearvoista sekä näiden muutoksista ja auttavat näin vikapaikkojen rajauksessa. Lisäksi on olemassa erilaisia muuntamoille asennettavia ilmaisimia, kuten suunnattu oikosulku- ja maasulkuilmaisimet, jotka kertovat vian suunnan.

Tulevaisuuden automaatiolla ja teknologialla voi olla mahdollista jopa ennakoita vikoja mittareiden, sensoreiden, muuntamoiden ja sähköasemien kehittyneen viestinnän avulla, jolloin älyverkko yrittäisi itse torjua vian tai lähettää siitä ennakoivan tiedon valvomolle, jolloin valvomosta voitaisiin lähettää huoltoryhmä liikkeelle ennakkoon. Näin viankorjauksiin käytetty aika lyhentyisi ja samalla sähkökatkojen pituudet lyhenisivät. Sähköverkossa tapahtuvien vikojen ja keskeytysten sekä pika- ja aikajälkeenkytkentöjen aiheuttamat kustannukset muodostuvat näistä asioista. Verkkoyhtiölle keskeytykset aiheuttavat kuluja viankorjauksen muodossa. Asiakkaille kuluja aiheutuu esimerkiksi koneiden sammumisesta ja tuotannon keskeytyksistä. Pienjänniteverkossa olevien loppukäyttäjien keskeytyksistä aiheutuvia kuluja on esimerkiksi pakasteiden sulaminen ja ruoan pilaantuminen. Näitä kuluja arvioidaan asiakaskohtaisesti KAH-kulujen perusteella. KAH-kuluja saadaan pienennettyä älyverkkojen avulla nopeamman vianpaikannuksen vuoksi, joka laskee vian keston pituutta. Vianpaikannuksen nopeutuessa myös viankorjaus voidaan suorittaa nopeammin.

## 6.6 Tehokkuus

Sähköverkon tehokkuudella tarkoitetaan yleensä energiatehokkuutta ja siirtohäviöiden minimoimista. Siirrossa tapahtuvien häviöiden minimoiminen on iso osa energian säästämässä. Energiaa säästämällä voidaan suojella ilmastoa vähentämällä energian käyttöä ja välttämällä hukkaenergiaa.

Tehokkuutta parannetaan energiatehokkailla rakennuksilla, sillä tulevaisuudessa sähkönkulutus mukautuu tuotannon mukaan, jolloin energiatehokkaat rakennukset osaavat mukautua tuotannon vaihteluihin. Älykkäät ratkaisut parantavat järjestelmän turvallisuutta vähentämättä verkon tehokkuutta. Nämä ratkaisut perustuvat tuotannon luotettavuuteen, jatkuvaan tiedonsiirtoon sekä siirto- ja jakeluinfrastruktuurin kehitykseen. Sähköverkon tehokkuutta nostavat myös tarkka valvonta ja ohjaus, verkossa tapahtuvien muutosten ennakoitavuus sekä joustavuus, vikasuojauksen ja vika-analyysin kattavuus sekä sähköverkkojen käyttöturvallisuus. (Siemens, ei pvm)

Älyverkot toimivat energiatehokkaana ratkaisuna, kun niihin kehitetään uusia ratkaisuja, jotka hyödyntävät vähemmän fossiilisia polttoaineita energiatuotannossa. Energiatehokkuutta parantaa myös loppukäyttäjien energiankulutus käyttäytyminen. Kuluttajien energiatehokkuus vaatii usein investointeja uusiin laitteisiin, mutta yleensä uudet laitteet tuovat säästöjä sähkölaskuun energiankulutuksen kautta. Uusien laitteiden hankinnalla saadaan aikaan materiaalitehokkuutta, kun ostettavat laitteet on hankittu harkiten ja käyttämällä pitkäikäisiä laitteita. Uusien sähkölaitteiden hankinnassa olisikin hyvä ottaa huomioon niiden ohjattavuus ja älykkyys, jolla voidaan laskea asuinrakennusten, ja näin samalla koko sähköjärjestelmän energiankulutusta. Kun sähköjärjestelmään liitetään energiatehokkaita ja älykkäitä laitteita, jotka pystyvät kommunikoimaan keskenään saadaan mahdollisuuksia kulutusjous-  
tolle.

Jakeluverkon sähkönsiirron kannalta LVDC-verkot ovat paras vaihtoehto, sillä niihin voidaan sijoittaa tuuli-, aurinko- ja vesivoimalat pitkienkin matkojen päähän loppukäyttöpaikasta.

## 7 ÄLYMITTARIT

Suomi on maailman ensimmäisenä maana siirtynyt etäluettaviin sähkömittareihin lähes jokaisessa kulutuskohteessa. Suomen sähkönmittaus ja mittaustiedon hyödyntäminen verkkoyhtiöiden sekä sähkönmyyjien keskuudessa on ainutlaatuinen Euroopassa, sillä kaikkien mittauspisteiden kulutuksen ja tuotannon energiatieto luetaan ja toimitetaan asiakkaalle, markkinaosapuolille ja taseselvitykseen. Tällä tavoin pienasiakkaat saavat myös tiedon, joka perustuu mittaustietoon, eikä kuormituskäyristä tulkittuun tietoon. Tämä mahdollistaa asiakkaalle sähköpörssin tuntihintaisen sähkön hankinnan päätävissä olevan kysyntäjoustoperusteella. (Lehto, 2019)

Tällä hetkellä Suomessa sähköä mitataan tuntitasolla, mutta siitä ollaan siirtymässä varttitaseeseen jakeluverkonhaltijan mittausvastuulla olevissa rajapistemittauksissa ja yli 1 MVA kohteissa viimeistään joulukuun 2020 loppupuolella. Vuoteen 2022 mennessä kaikki etäohjelmoitavissa olevat etäluettavat mittaukset siirretään varttimittaukseen. Vuoteen 2029 mennessä kaikki etämittaukset ovat varttimittauksen piirissä ja mitattuun varttitietoon perustuvassa taseselvityksessä.

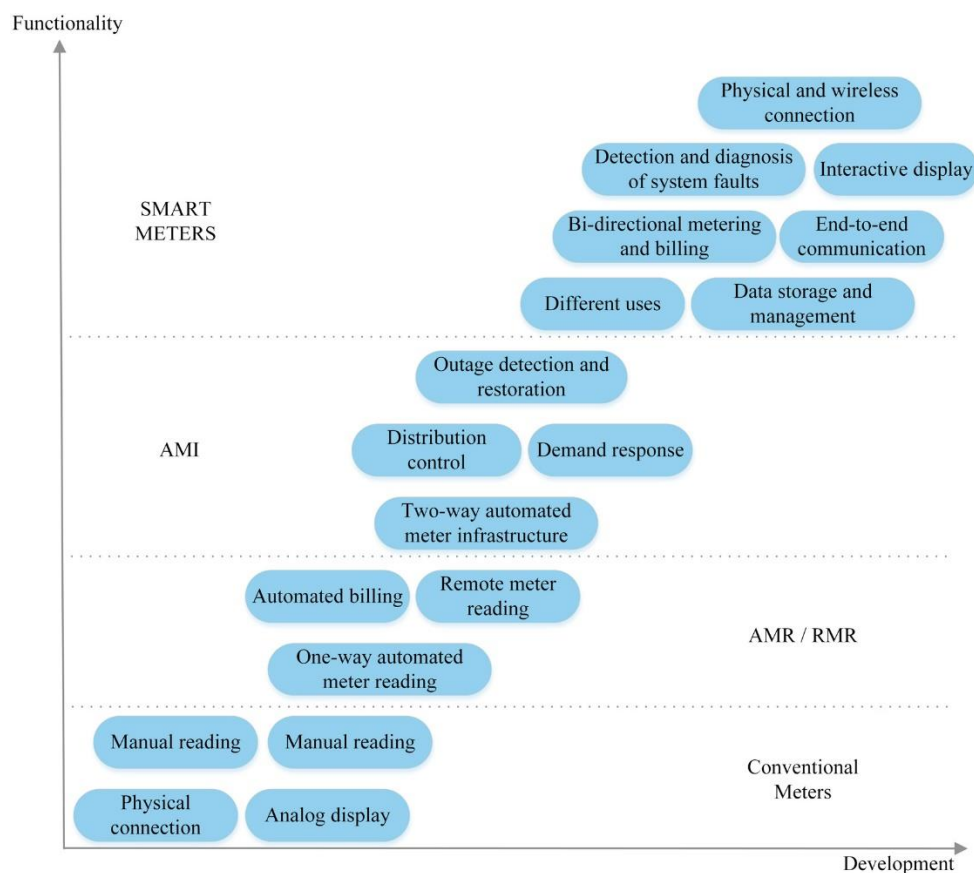
Älymittauksen avulla annetaan asiakkaalle valintamahdollisuuksia mahdollistamalla tämän osallistuminen kulutusjoustoperusteeseen sekä seuraamalla sähköntoimitukseen ja sähkönlaatuun liittyviä tietoja. Asiakkaalle saadaan myös helposti tietoa hänen sähkönkulutuksestaan ja pystytään mahdollistamaan itse tuotetun sähkön myynti sähkömarkkinoille. (Lehto, 2019)

Älyverkkotyöryhmän ehdotuksen mukaan

”Kuormanohjaustoiminnallisuus tulee sisällyttää seuraavan sukupolven älymittareihin niille asiakkaille, joilla on merkittäviä ohjattavia kuormia (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2016, s. 28).”

Tämä mahdollistetaan asentamalla kuormanohjausrele ja antamalla reaaliaikaista tai lähes reaaliaikaista mittaustietoa ohjaus- ja kysyntäjoustoperusteeseen. Verkkoyhtiöt ja verkonhaltijat eivät ole olleet yksimielisiä kuormanohjauksen tarpeellisuudesta. Puolesta olevat ovat perustelleet ratkaisua asiakkaiden alhaisempana kynnyksenä osallistua kysyntäjoustoperusteisiin markkinoille ilman erillistä investointia. Vastaan olevat perustelivat päätöstään erinäisillä vastuilla ja rooleilla sekä kuormanohjausreleen heikkoon tekniseen toiminnallisuuteen viitaten. Vastuualueiden epäselvyys kasvatti sitä mukaan mitä monipuolisemmaksi ja reaaliaikaisemmaksi mittauslaitteisto muuttuisi. Parempana ratkaisuna kuorman ohjaukselle nähdään se, että mittauslaitteessa olisi avoin rajapinta, johon asiakkaan kuormanohjausta suorittava kotiautomaatio voisi liittyä. (Pöyry, 2017)

Älymittareilla on mahdollista vastata kuluttajien odotuksiin kulujen laskemisesta tarkkailemalla ja valvomalla laitteita sekä kulutusta. Älymittareiden avulla palveluntarjoaja ja kuluttaja voivat toimia yhteistyössä, asiakas voi esimerkiksi seurata omaa kulutustaan ja sen muutoksia omalla älypuhelimellaan. Tämä mahdollistaa sen, että mittareissa ei jatkossa tarvitse olla erillistä näyttöä, joka on verrattain kallis osa. Uusien mittareiden toiminnoista ja niiden kaksisuuntaisesta viestinnästä saatavien tietojen avulla sähkön toimittaminen siirtyy seuraavalle tasolle, sillä sähköntuotannon muuttuessa entistä enemmän uusiutuviin energianlähteisiin täytyy sähkönmittauksen vähintään olla kaksisuuntaista. Tämän takia tarvitaan entistä parempaa ja nopeampaa tiedonsiirtoa.



KUVA 6 Sähkönmittauksen toiminnot ja kehitys (Avancini, ym., 2019, s. 705)

## 7.1 Älymittareiden toiminnot

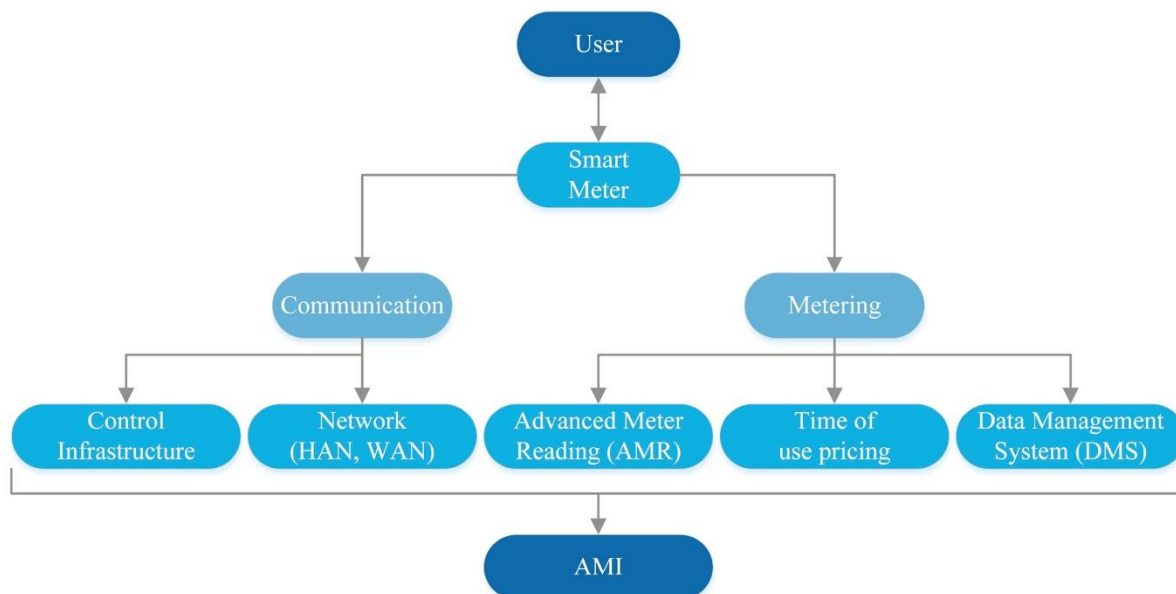
Mittareiden perustoimintoja ovat energian säännöllinen ja tarkka mittaus. Näillä mahdollistetaan älyverkkojen energiankulutuksen vähentämisen keräämällä tietoa energian tarjonnasta ja kysynnästä. Älymittauksella pystytään myös pienentämään energiayhtiön kuluja, koska sähkönjakelu voidaan katkaista etäyhteydellä tai kun asiakas ilmoittaa virheestä, esimerkiksi sähkönlaadun häiriö. Tällöin energiayhtiöllä on mittauslaitteelta saatua faktatietoa sähkönlaadusta tai muusta häiriötilanteesta.

Älymittausjärjestelmän tärkein toiminto on kahdensuuntainen energian mittaus. Tämä mahdollistaa helpon siirtymisen kohti uusiutuvan energian hyödyntämistä ja niin kutsuttua mikrotuotantoa. Mikrotuotannolla tarkoitetaan energiantuotantoa, jonka toteuttaa pienasiakas esimerkiksi omilla aurinkopaneeleillaan ja tuottaa näillä enemmän energiaa kuin on tarve.

Älymittareiden tarjoamien etujen pohjalta niiltä odotetaan kolmea parannusta.

1. Mittaustietojen saatavuudella käyttäjälle mahdollistetaan tämän sähkönkulutuksen sovittaminen taloudellisiin kannustimiin tai energiansäästön parantamiseen.
2. Mittareiden etäluennan avulla palveluntarjoaja voi laskea prosessiin liittyviä toimintakustannuksia, inhimillisiä virheitä sekä lisätä järjestelmän turvallisuutta.
3. Älymittareiden avulla voidaan vähentää energiankulutusta automatisoimalla ne reagoimaan tehonpuutteeseen, vikoihin ja ylilyönteihin ohjaamalla energiaa sinne missä sitä tarvitaan eniten. Älymittareilla mahdollistetaan myös älykotien ympäristö.

Älymittarit mahdollistavat älykotien edistyneen mittausinfrastruktuurin (AMI) yhdistämällä älykkäät mittarit kotiverkkoihin (HAM), WAN verkkoihin ja NAN verkkoihin. Näiden avulla pystytään parantamaan automaattista mittarinluentaa (AMR) ja automaattista mittarinhallintaa (AMM). (Avancini, ym., 2019, s. 703)



KUVA 7 Älymittaus järjestelmä (Avancini, ym., 2019, s. 706)

Älykkäät mittarit suorittavat mittausuureiden mittauksen, jotta asiakkaille ja palveluntarjoajille saadaan mahdollisimman reaaliaikaista tietoa energiankulutuksesta ja asiakas voi näin muuttaa omia energiankulutukseen liittyviä toimintatapoja. Mitatut tiedot muunnetaan tietoliikenneprotokollan mukaiseksi ja lähetetään hallintajärjestelmään langallisten tai langattomien verkkojen kautta. Mittari pystyy analysoimaan tietoa sen valvoman kohteen energiankulutuksesta ja pystyy katkaisemaan jonkin laitteen sähkönsyötön hetkeksi, mikäli verkossa tarvitaan energiaa jossain muualla.

Kuvassa 7 nähdään, että tyypillisessä älymittaus järjestelmässä loppukäyttäjän mittari kommunikoi järjestelmän kanssa kaksisuuntaisesti. Älymittari kerää tietoa mittamaalla kohteen energiankulutusta ja siirtää tiedon tiedonhallintajärjestelmään internetin avulla. Sähkönmyyjä näkee kohteen tiedot järjestelmästä ja pystyy laskuttamaan oikean kulutuksen mukaan sekä ohjaamaan asiakasta hänen energian kulutustottumuksissaan tuottamalla hänellä tietoa kulutuksestaan.

AMI eli edistysellinen mittausinfrastruktuuri on kokonaisuus, jossa hallinnoidaan mittaus toimintoja ja mittautietoa sekä analysoidaan energiankulutusta. AMI järjestelmä ohjaa mittaria, koska järjestelmä kommunikoi verkon ja mittarin kanssa, josta se pystyy päättämään esimerkiksi energian tarpeen seuraavan tunnin ajalle. Tällä tavoin älykästä mittausjärjestelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi kulutusjoustossa. (Avancini, ym., 2019)

Vaatimukset tuntimittaukseen perustuvat lainsäädäntöön ja viranomaismääräyksiin. Toimialalla on myös annettu suosituksia hyvistä toimintatavoista. Vaatimuksia ovat:

- Rekisteröity tieto tulee voida lukea mittauslaitteiston muistista etänä.

- Mittauslaitteiston on rekisteröitävä yli kolmen minuutin jännitteettömien ajan jaksojen alkamis- ja päättymisajankohdat
- Mittauslaitteiston on vastaanotettava, pantava täytäntöön ja välitettävä kuormanohjauskomentoja eteenpäin viestintäverkon kautta
- Verkonhaltijan tietojärjestelmästä on löydyttävä mittauksien ja jännitteettömien aikaa koskevat tiedot. Tietojärjestelmissä on säilytettävä mittauksien tietoja vähintään kuusi vuotta ja kaksi vuotta jännitteettömien ajan tietoa
- Tietojärjestelmän tietosuojan, joka käsittelee mittauslaitteiston ja verkonhaltijan mittauksien tietoja tulee olla asianmukaisesti varmistettu

Verkonhaltijan tulee asiakkaan tilauksesta tarjota

- Tuntimittauslaitteistot, sähkönkulutuksen reaaliaikaista sähkönkulutusta ja sähköajoneuvojen latauspisteen mittaamista varten

Asiakkaan on saatava mittauslaitteiston keräämä tieto käyttöönsä, samaan aikaan kuin sähköntoimitajansa. (Pöyry, 2017, s. 18)

## 8 ÄLYKÄS PIENJÄNNITEVERKKO

Älykästä sähköverkkoa on kehitetty lähinnä siirtoverkoissa ja keskijänniteverkkoissa kehittämällä verkostoautomaatiota ja nyt sitä ollaan tuomassa myös pienjänniteverkkoihin.

Teknologian kehityksen vuoksi sähköä tarvitsevien laitteiden määrä on noussut huomattavasti viime vuosikymmenien aikana. Tämä on johtanut kasvaneeseen energiankulutukseen. Energiankulutuksen kasvu ja uusiutuvien energianlähteiden kasvava käyttö aiheuttavat suurta kuormitusta ja muutostarvetta pienjänniteverkolle. Kun tuotantoa pyritään siirtämään lähemmäs kuluttajaa, sähköverkon laitteistojen päivittäminen pienjänniteverkkoon on myös ajankohtaista. Uusiutuvan energiantuotanto on suurin syy pienjänniteverkon muutostarpeeseen, sillä kun uusiutuvien energianlähteiden käyttö kasvaa, tulevaisuuden sähköntuotanto muuttuu epävarmemmaksi, sillä uusiutuva energia on saatavuudeltaan jaksottaista. Asiakkaiden alkaessa tuottaa omaa pientuotantoaan entistä enemmän, täytyy verkko pyrkiä pitämään tasapainossa sähköntuotannon ja kulutuksen osalta. Tämä tapahtuu esimerkiksi kaksisuuntaisella mittauksella. (ABB, 2015)

Mikrotuotanto on teholtaan korkeintaan 100 kVA suuruista ja pientuotanto on korkeintaan 2 MVA suuruista tuotantoa. Mikro- ja pientuotannon lisääntyessä yksityisillä sähköntuottajilla on entistä enemmän mahdollisuuksia osallistua sähkömarkkinoille sähköntuottajina myymällä oman tuotantonsa sähköverkkoyhtiölle. Tämä sähkönpientuotanto luo paljon mahdollisuuksia asiakkaalle toimi omavaraisena sähköntuottajana tai myydä tuottamaansa sähköä takaisin verkkoon. Pientuotanto luo tuotannon ja kulutuksen epätasaisuuksia verkossa, joita pitää pystyä ohjaamaan. Tässä vaiheessa käyttöön tulee kysynnänjousto sekä kuormanohjaus. Kuormanohjaus voidaan toteuttaa kohteessa olevalla älymittarilla, joka mittaa tietoa verkosta molemmista suunnista ja lähettää tätä tietoa kuormanohjausyksikköön. Tällä tavoin parannetaan yleistä sähkönlaatua, sillä verkon taajuuden pitäisi pysyä mahdollisimman stabiilina ja standardin mukaisena. Taajuuden muutos näkyy asiakkaalla esimerkiksi valojen välkkymisenä. (Elenia, ei pvm)

Nykypäivänä sähköverkkoon on kytkettynä paljon erilaisia herkkiä ja epäsymmetristä kuormaa tuottavia laitteita, jotka voivat vaikuttaa sähkön laatuun negatiivisesti. (Kainulainen, 2015)

Älykkään pienjänniteverkon toiminta mahdollistetaan pääsääntöisesti verkostoautomaatiota lisäämällä, johon kuuluu muuntamoautomaatio ja erilaiset sensorit sekä uuden sukupolven älymittarit ja niiden kaksisuuntainen tiedonsiirto ja tiedonkeruu. Tarvitaan myös uusia tiedonsiirto teknologioita sekä ohjelmistoja. Älymittareilla ja kahdensuuntaisella viestinnällä mahdollistetaan kuluttajien osallistuminen sähkömarkkinoille kysyntäjoustop kautta.

Verkon tilaa voidaan tutkia mittaamalla virta- ja jännitetietoja. Näitä tietoja voidaan hyödyntää esimerkiksi vianhallinnassa ja -paikannuksessa. Vian laatu voidaan arvioida mittaustiedoista, joiden avulla siirrytään mahdollisiin jatkotoimenpiteisiin, kuten huoltotöihin. Mikäli vika ei vaadi huoltotöitä, voidaan mittaustiedon perusteella yrittää kytkeä sähköt verkon osaan takaisin etäohjauksen avulla.

Kuluttaja hyötyy mittaustiedosta, siten että saa tietoa omasta kulutuksestaan ja pystyy näin halutesaan muuttamaan omia kulutustottumuksia ja säästämään rahallisesti. (Borlase, 2013)

Pienjänniteverkkoihin on tulossa niin sanottuja energiayhteisöjä, jolla tarkoitetaan, että ryhmä kuluttajia perustavat esimerkiksi pienen aurinkoenergiavoimalan, joka tuottaa heille sähköä yhteiseen käyttöön tai sitä kerätään sähkövarastoon. Pientuotannon osakkaat voivat käyttää tuottamansa sähkön esimerkiksi vähentämään lämmityskustannuksia tai syöttämällä elintärkeitä toimintoja verkon vikaantumisen aikana.

## 8.1 Kysyntäjousto

Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkönkäytön hetkellistä vähentämistä tai huippukulutus aikojen tasoittamista siirtämällä kulutusta halvemman tai matalamman kulutuksen ajankohtiin. Kysyntäjoustoa on ollut käytössä lähinnä jakeluverkkoyhtiöllä ja teollisuudessa, mutta nyt se on tulossa kaikille sähkönkäyttäjille mahdolliseksi. (Sarvaranta, 2010)

Kysyntäjoustoa tullaan tulevaisuudessa tarvitsemaan enemmän yksityisiltä sähkönkäyttäjiltä, sillä erilaiset joustamattomat energian tuotantomuodot ovat kasvussa. Joustamattomia energiantuotanto muotoja ovat ydinvoima sekä vesi-, aurinko-, ja tuulienergia. Ensimmäisenä askeleena kohti tätä asiakkaan kysyntäjousto toimintaa on luopuminen vanhoista hinnoittelukäytännöistä, kuten yöstä ja kaksiaikatariffista ja siirtyä kohti hintaohjausta. Hintaohjauksella tarkoitetaan sitä, että lämmitystä ohjataan sähkön ”halvoille tunneille” eli tulevaisuudessa sille ajalle, kun sähköä on paljon tarjolla. (Lähienergia, 2017)

Älykkäässä sähköverkossa kysyntäjouston mahdollistaa älykäs energiamittari ja Datahub, joka kerää kulutus- ja tuotantotiedot 15 minuutin välein ja siirtää ne Datahubiin, joka hoitaa taseselvityksen. Älykkäät mittarit saavat viestintäverkon kautta kulutuksenohjauskäskyjä, joiden perusteella se ohjaa kulutusta tai vaihtoehtoisesti lähettää käskyt eteenpäin laitteistolle, jolla ohjataan kohteen kulutusta. Kuormien ohjaukseen tarvitaan kuitenkin erillinen sopimus.

Joustomarkkinoilla toimivat tällä hetkellä lähinnä erimaiden kantaverkkoyhtiöt.

AMR-teknologia mahdollistaa kysyntäjouston pienkuluttajille hyödyntämällä rakennusautomaatiota. Automatisoidussa kysyntäjoustossa kuluttajan toimia vaaditaan vain laitteiston hankintapäätöksessä ja lupaa laitteiston mahdolliseen etäohjaukseen. Kysyntäjoustossa helpoiten hyödynnettäviä kohteita ovat talojen lämminvesivaraajat, erinäiset lämpöpumput, jäähdytys- ja kylmälaitteet sekä sähköautojen akut. Esimerkiksi lämminvesivaraajan ohjaaminen toimii siten, että internetohjelma tarkkailee sähkön pörssihintoja ja hinnan noustessa se kytkee varaajan pois päältä kotiautomaation avulla. (Pekkarinen, 2009)

Kuormia ohjattaessa markkinahinnan perusteella verkon tehot kasvavat kuormien risteilyjen vähenevän vuoksi. Tehopohjainen siirtotariffi luo kannustimia huomion kiinnittämisen omiin huipputehoihin. Kun kuormia ohjataan markkinaperusteisesti jakeluverkon huipputehot kasvavat. Tehopohjaisilla siirtotariffeilla on mahdollista tasoittaa näiden kuormien kasvua. Tehopohjainen hinnoittelu on toteu-

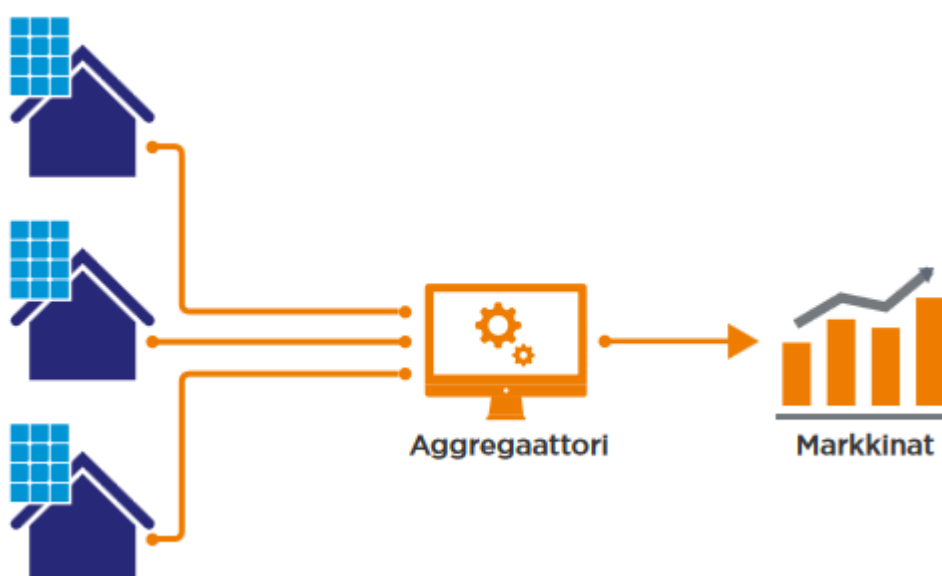


tettävissä asiakkaan toteutuneiden huipputehojen perusteella tai liittymispisteeseen määriteltyyn tehorajaan tai -kaistaan perustuvan maksukomponentin perusteella. Tämä ei kuitenkaan vaikuta sähkönmyyjän hinnoitteluun vaan se voidaan edelleen toteuttaa tuntihinnoitteluun perustuen. Tällöin asiakkaalla on kannuste kuormien optimointiin myös markkinahintojen perusteella.

Tehopohjaiseen hinnoitteluun siirtyminen on edellytyksenä kokonaistehokkuuden toteutumisen kanalta. Tehopohjaisen hinnoittelun käyttöönottoa auttaa AMR-mittareissa oleva valmius ohjattavan tehonrajoitukseen, mutta se on toteutettavissa myös ilman kyseistä ominaisuutta.

Tehopohjainen hinnoittelu toimii kannustimena kysyntäjoustoon verkkoyhtiön näkökulmasta, kun taas myyjän näkökulmasta asiakkaalla oleva ohjauspotentialiaali pienenee. (Järventausta, ym., 2015)

Tulevaisuudessa kysyntäjoustoon mukaan tulevat itsenäiset aggregaattorit. Aggregaattorilla tarkoitetaan osapuolta, joka yhdistää monien eri asiakkaiden omatuotannon, kulutuksen tai sähkövaraston suuremmaksi kokonaisuudeksi ja vie sen sähkömarkkinoille. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)



KUVA 8 Aggregaattorin toimintaperiaate (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

Aggregaattori mahdollistaa pienasiakkaiden osallistumisen sähkömarkkinoille. Aggregaattori mahdollistaa kulutuksen pienentämistä korkea hinnan aikaan ja nostaa kulutusta silloin kun sähköä on paljon tarjolla ja hinta on matala. Näin saadaan sähkönkäyttäjien kuluja matalammaksi.

Itsenäiset aggregaattorit luovat sähkömarkkinoille lisää toimijoita ja lisäävät näin asiakkaiden valinnanvaraa. Itsenäinen aggregaattori ei tarvitse sopimusta asiakkaan sähkönmyyjän tai tasevastaavan kanssa eikä aggregaattori ole itse kumpikaan edellä mainituista. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

### 8.1.1 Virtuaalivoimalaitos

Virtuaalivoimalaitoksella ohjataan energiaverkon tehokuormia ja tuotanto- sekä varastointikapasiteettiä. Tällä tavoin parannetaan koko energiaverkoston tehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Virtuaalivoimalaitos tuottaa itselleen sähköä esimerkiksi aurinkopaneelien avulla ja säätelee automaattisesti omaa sähkönkulutustaan oman tuotannon ja sähkövarastojen avulla. Virtuaalivoimalaitos tarvitsee

älykkäitä järjestelmiä toimiakseen, jonka avulla se ostaa, varastoi ja kuluttaa energiaa oman ja sähköverkon tarpeen perusteella. Virtuaalivoimalaitoksella osallistutaan kysyntäjoustoon ja autetaan näin sähköverkon tehonhallinnassa.

Virtuaalivoimalaitoksissa on myös ongelmia, kuten riittävän ohjattavan tehokapasiteetin aikaansaaminen. Investoinnin energiaverkon tehonsäätöratkaisuihin ja niiden ylläpitoon on harvoin kannattavaa.

## Näin virtuaalivoimalaitos toimii

### Perinteinen malli



### Joustava malli



### Jouston jälkeen



KUVA 9 Virtuaalivoimalaitoksen toimintaperiaate (Taloussanomien, 2019)

Kuvassa 9 on virtuaalivoimalaitoksen toimintaperiaate, jossa virtuaalivoimalaitoksena toimiva kiinteistö tuottaa itse omatuotannollaan energiaa, jonka se varastoi sähkövarastoihin myöhemmin käytettäväksi. Kiinteistö käyttää kantaverkosta saatavaa energiaa joustavasti eli jos kantaverkossa on pulaa energiasta kiinteistön älykäs järjestelmä käyttää omia varastojaan.

Virtuaalivoimalaitoksia on myös testattu kotitalouksissa, mutta pienemmässä mittakaavassa yhdistämällä lämminvesivaraajia ja käyttämällä niitä virtuaalivoimalaitoksina.

Virtuaalivoimalaitokset toimivat niin energiasäästäjinä kuin säätövoimana sähköverkolle. (Taloussanomat, 2019)

## 8.2 Datahub

Datahub on tiedonvaihtojärjestelmä, johon tallennetaan tietoja Suomen sähkökäyttöpaikoista ja jakeluverkonhaltijoiden tuotetiedoista tällä tavoin saadaan varmistettua, että asiakkaan tuote vastaa käyttöpaikan siirtotuotetta. Tätä hyödyntävät sähkömyyjät ja jakeluverkkoyhtiöt, kun asiakas päättää vaihtaa sähkömyyjää. Myyjän vaihdoksessa tarvittavat tiedot löytyvät Datahubista ja ne siirtyvät jakeluverkkoyhtiön ja sähkömyyjän välisesti. Tämä yksinkertaistaa, nopeuttaa ja tehostaa kaikkien osapuolten toimintaa, sillä tällä hetkellä tiedot sijaitsevat eri yhtiöiden järjestelmissä.

Datahubissa kaikki tiedot ovat tasapuolisesti kaikkien saatavissa samanaikaisesti, mutta tietoja voi hakea vain siihen valtuutettu osapuoli. Asiakkaiden tiedot on kuitenkin voitava yksilöidä tarkasti, jotta tietoja voidaan jakaa turvallisesti. Tietojen yksilöintiin käytetään henkilötunnuksia ja yritysten y-tunnuksia.

Suomessa käytössä olevien etäluettavien älymittareiden avulla käyttöpaikoista siirtyy paljon tietoa. Datahub tulee tähän tiedon varastointipaikaksi, johon asiakkaiden tiedot kulutuskohteista ja niiden energiankulutuksesta sijoitetaan. Tällä tavoin asiakkaan ja sähkömyyjän välistä suhdetta lähennetään ja hänelle voidaan tuottaa paljon tietoa muun muassa hänen henkilökohtaisesta sähkökulutuksesta, esimerkiksi suoraan hänen mobiililaitteelleen. Mobiililaitteella asiakas voisi seurata esimerkiksi useiden eri puolella Suomea sijaitsevien omistamiensa kiinteistöjen tai asuintilojen energiankulutusta yhtäaikaisesti yhdestä sovelluksesta. Yhdessä Datahub, älymittarit ja mobiilisovellus luovat mahdollisuuksia asiakkaiden energiatehokkuuden parantamiseen ajoittamalla energian käyttöönsä tai osallistamalla sähkön kysynnän joustoon. (Ediel, ei pvm)

Datahub automatisoi sähkömyyjän vaihdoksia, sillä se päättelee ilmoituksen, käyttöpaikan ja sopimustilanteen perusteella muuttaako asiakas vaihtaako vain sähkömyyjää. Samalla Datahub päättelee, onko asiakkaalla tarvetta uuteen verkkosopimukseen jakeluverkkoyhtiön kanssa. (Fingrid, ei pvm)

## 9 SÄHKÖN VARASTOINTI

Sähkövarasto on laitos tai laite, johon sähköenergiaa varastoidaan odottamaan sen käyttöä myöhemmin. Sähkövarastot voivat toimia esimerkiksi omatuotannon ylijäämäosuuden varastona tai mahdollisten sähkökatkojen hätävaratoimintona. Varastoon voidaan varastoida sähköenergiaa suoraan tai energia voi olla varastoituna muuna muotona ennen varsinaista muuntamista sähköksi, kuten vesi. Vedestä tuotetaan sähköä muuntamalla veden potentiaalienergia sähköenergiaksi. Pumppuvoimalaitokset ovat suuria laitoksia, ja tässä opinnäytetyössä keskitytään pienempiin mahdollisuuksiin, jotka ovat hyödynnettävissä pienjänniteverkossa.

Tulevaisuuden sähköverkoissa on sähkövarastoinnilla suuri merkitys, sillä uusiutuva ja säätilasta riippuva energian tuotanto luo epävarmuutta sähkön saannin kannalta. Sähköä olisi tuotantohuippujen aikaan hyvä saada varastoitua ja ottaa käyttöön, kun sähkön tuotantoaste laskee. Tällä tavoin parannetaan sähköjärjestelmän toimitus- ja toimintavarmuutta.

Sähkön varastoinnilla parannetaan energiatehokkuutta ja pystytään minimoimaan sähkön laadun vaihtelut, sekä pitämään sähköverkko toiminnassa sähköntuotannon laskun aikana. Sähkövarastoihin voidaan ylituotannon aikaan sijoittaa ylimääräinen energia ja käyttää sitä myöhemmin suuren kulutuksen jaksoissa.

Ongelmaksi sähkövarastoinnissa muodostuvat sähkövarastojen hinta ja tilavaatimukset sekä ympäristöön tuleva visuaalinen haitta. Kuvassa 10 on Teslan valmistama akusto, joka toimii sähkövarastona sekä säätövoimana.



KUVA 10 Telan valmistama sähkövarasto (Energiauutiset, 2017)

Sähkövarastot sopivat hyvin jouston tarpeisiin ja niiden avulla voidaan tarjota käyttäjille erilaisia palveluita, kuten omatuotannon hyötyjen maksimointia tai valtakunnallisenverkon tehotasapainon ylläpitoa.

Työ- ja elinkeinoministeriö linjaa, että jakeluverkkoyhtiöt eivät osallistu sähkövarastointi markkinoille varastopalvelun tarjoajana, eli jakeluverkot eivät omistaisi tai käyttäisi varastoja vaan ne kuuluisivat kilpailtuun toimintaan. Jakeluverkkoyhtiöt voivat kuitenkin hyödyntää sähkövarastoja varmistamaan sähkön laatua hankkimalla sähkövarasto palveluita markkinoilta. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2018)

Sähkövarastoja kannattaa käyttää mahdollisimman monipuolisesti, jolloin niiden kannattavuus paranee. Tästä esimerkkinä on sähköautojen akuston käyttö sähkövarastona ja säätövoimana. Sähkövarastojen valmistaminen on tehtävä siten, että erivalmistajien laitteet on oltava integroitavissa muiden valmistajien laitteiden kanssa, jotta yksityisasiakkaat voivat valita varastonsa vapaasti.

## 9.1 Akut

Sähköenergiaa varastoidaan nykypäivänä moniin eri laitteisiin kuten puhelimiin ja tietokoneisiin sekä muihin mukana kannettaviin laitteisiin. Sähköverkoissa energianvarastointi on tulevaisuudessa suuri osa sähköverkkojen kehitystä. Akkuteknologiaa on hyödynnettävä sähköverkoissa tulevaisuudessa, koska tulevaisuuden sähköverkossa tarvitaan säätövoimaa hiilivoiman poistumisen vuoksi ja kun sitä ei tuotannon puolella ole enää niin paljoa saatavilla on akkuteknologia siihen hyvä ratkaisu.

Akkuja on useita erilaisia, mutta litiumakut hallitsevat tulevaisuudessa sähkövarastointitekniikkaa, sillä sähköautotekniikkaa kehitetään näitä akkuja käyttämällä, joka luo kehitysalustan litiumakuille. Akustotekniikka on Suomen olosuhteisiin sopivin vaihtoehto sähkövarastointiin, sillä ne ovat kestävä ratkaisu hyvin huollettuihin. Isompien sähkövarastojen kuten pumppuvoimalaitosten rakentaminen on kalliimpaa ja vaatii tietynlaista maastoa, kun taas akuston pystyy rakentamaan melkein, minne tahansa. (Blomqvist;Härkönen;& Makkonen, Sähkövarastointitekniikat- ja markkinat, 2017)

Suomessa on jo nyt suhteellisen suuria akusto sähkövarastoja kuten esimerkiksi Fortumin ”Batcave” litium-ion sähkövarasto. Akuston nimellisteho on 2 MW ja kapasiteetti 1 MWh. Akusto pystyy sekunti- ja minuuttitasoiseen nopeaan joustoon sähköverkon taajuussäädössä. (Fortum, 2017)

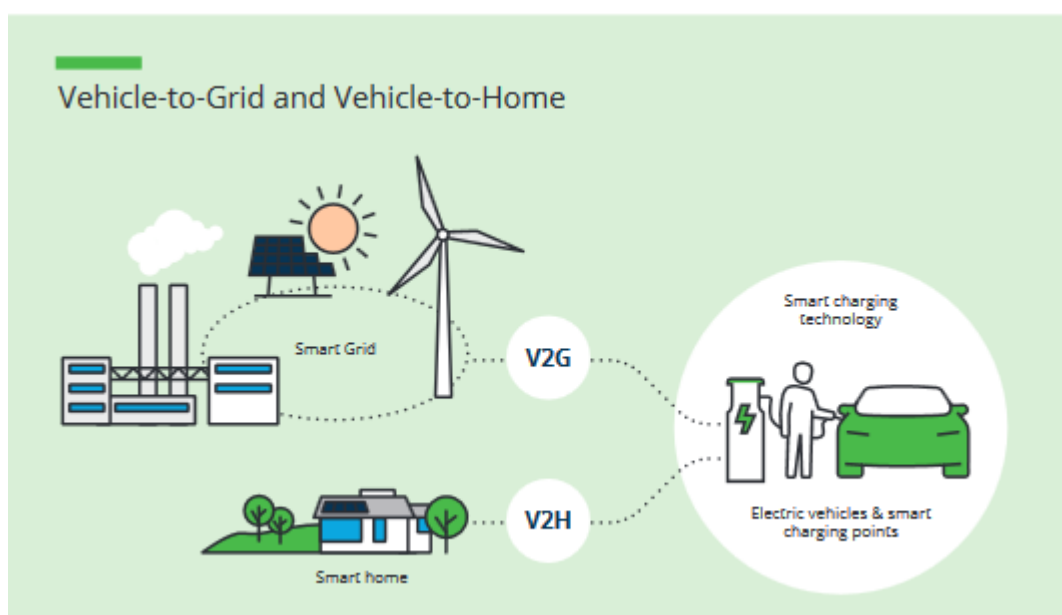
Suurimman osan kotitalouksista ensimmäinen sähkövarasto tulee olemaan sähköauton akku.

### 9.1.1 Sähköauton akusto

Sähköautojen akkujen käyttö sähkövarastona on herättänyt kiinnostusta ympärimaailmaa ja niiden mahdollinen käyttö säätövoimana sähköverkossa on merkittävä uudistus. Sähköautojen akustoa on hyödynnettävä, koska autot ovat yleensä aina parkkeerattuina ollessaan latauksessa, jolloin ne ovat yhteydessä verkkoon.

Sähköauton akustoa voidaan käyttää liikkuvana sähkövarastona niin sähköverkon tasapainotukseen kuin esimerkiksi omakotitalon sähkövarastona. V2G eli Vehicle-to-Grid tarkoittaa, että sähköauto on latauspisteen kautta yhteydessä sähköverkkoon. Ensto on laskenut, että 100 000 sähköautoa, joiden akuston koko on keskimäärin 50 kWh tuottaisi 3000 MWh akkukapasiteetin, jolla mahdollistettaisiin 600 MW lisäenergia kysyntäpiikkien ajaksi. (Ensto, 2016)

V2H eli Vehicle-to-Home tarkoittaa, että sähköauto on kytkettynä latauspisteen kautta omakotitalon sähköverkkoon ja näin akuston kapasiteettia pystytään purkamaan omakotitalon käyttöön esimerkiksi lämmitykseen korkean sähkönhinnan aikaan tai vastaavasti sitä voidaan ladata älykkäästi halvansähkön aikana tai omatuotannolla kun esimerkiksi aurinkopaneelit tuottavat paljon energiaa. (Teknologiateollisuus, ei pvm)



KUVA 11 V2G ja V2H (Ensto, 2016)

V2G:ssä sähköauton akustoa käytetään tasaamaan sähköverkon kulutushuippujen ja taajuuden vaihtelun tasapainotukseen. Sähköauton akku toimii taajuuden tasaajana siten, kun verkon taajuus alkaa laskea verkkoon yhteydessä olevien sähköautojen akustoja alettaisiin purkamaan verkkoon. Tällä tavoin sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainoa voidaan helpottaa. Tämä vaatii suuren määrän sähköautoja, jotka ovat yhteydessä sähköverkkoon, sekä auton omistajan luvan akun purkamiseen. Purkaminen täytyy tapahtua myös siten, että siitä ei aiheudu haittaa auton omistajalle. Haittana voi olla esimerkiksi, että auton akku on tyhjennetty täysin, kun omistaja tarvitsisi sitä.

Taajuuden noustessa taas sähköautojen akkuihin syötetään sähköä, jotta tuotanto ja kulutus pysyisivät samana. Tämä toiminto vaatii älykkään latausjärjestelmän.

## 10 HAJAUTETTU TUOTANTO

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan tuotantoa, joka on siirretty kauemmaksi suurista voimalaitoksista ja lähemmäksi loppukuluttajaa. Hajautettu tuotanto jaetaan vielä pien- ja mikrotuotantoon. Pientuotannon rajaksi on määritelty alle 2 MVA laitteistot. Mikrotuotannon raja on yleisesti 100 kVA. Hajautettua tuotantoa voi esiintyä jakeluverkoissa niin 0,4 kV kuin 20 kV verkoissa. Sitä voi esiintyä myös kuluttajanpuolella mittaria tai jakeluverkonpuolella. Hajautetun tuotannon ajoa ei suunnitella keskitetysti vaan ohjataan paikallisesti ja sitä on sijoitettu jakeluverkkoon yhteen tai useampaan paikkaan.

20kV verkkoon liitetyn tuotannon koko riippuu liittymispisteen etäisyydestä sähköasemalta tai toisin sanoen oikosulkutehosta. Pienjänniteverkkoon liittyessä pienet tuotantolaitokset liitetään oman liittymispisteen kautta tai sähkökäyttöpaikan rinnalle liittymispisteen taakse. (Motiva Oy, 2017)

Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon voi aiheuttaa sähköenergian siirron vähenemisen, jolloin siirrettävän energian määrä pienenee suhteessa enemmän mitoitettavaan huipputehoon. Tämä aiheuttaa sähköverkkojen suunnittelulle ja rahoitukselle haasteita, sillä verkkoyhtiöiden siirtotulot laskevat ja näin rahaa ei riitä verkoston kehittämiseen ja ylläpitoon. Hajautettu tuotanto lisää verkon vaatimuksia joiltain osin, vaikka se voi vähentää verkossa siirrettävää energian määrää, joten hajautetun tuotannon lisääminen verkkoon voikin lisätä sähköverkon investointikustannuksia eri alueilla. Sähköverkko ei välttämättä kestä jokaiselta kohdalta hajautetun tuotannon liittämistä verkkoon, jolloin kyseessä olevaa verkon kohtaa voidaan joutua vahventamaan. Tämä voi yhdessä verkon hallinnan kanssa johtaa sähkönsiirtohintojen nousuun. Hajautettu tuotanto tulee kuitenkin pidemmällä aikavälillä parantamaan sähköntoimitusvarmuutta mikroverkkojen ja sähkövarastojen avulla. (Vihanninjoki, 2015)

Loppukäyttäjän pientuotanto on yleisesti ottaen joko tuuli- tai aurinkovoiman hyödyntämistä loppukäyttöpaikalla, esimerkiksi aurinkopaneelit oman asuinrakennuksen katolla. Aurinkopaneelien tuottama energia käytetään pääsääntöisesti omalla kiinteistöllä esimerkiksi lämmitykseen tai lämminvesivaraajan käyttöön. Mikäli sähköä tuotetaan ylimääräistä, se on mahdollista myydä takaisin päin ja näin madaltaa sähkönsiirtomaksua. Tehon kaksisuuntainen liike aiheuttaa kuitenkin verkolle vaatimuksia muun muassa vikavirtojen suuruuksien kanssa. (Sarvaranta, 2010)

### 10.1 Mikroverkot

Mikroverkoilla tarkoitetaan paikallista sähköverkon osaa, jossa on hajautettuja energianlähteitä, energianvarastointiratkaisuja ja joustavia kuormia ja se voidaan erottaa verkosta itsenäiseksi osaksi esimerkiksi verkon vikaantumisen ajaksi tai verkon kuormituksen laskemiseksi. Mikroverkot optimoivat energiankulutusta ja auttavat energianhallinnan automaatiassa. Tällä varmistetaan energian saannin jatkuvuus myös vikatilanteissa. Mikroverkot ovat tulevaisuudessa suuri mahdollisuus verkon kulutuksen ja tuotannon tasapainotuksessa, sillä näitä erottamalla valtakunnanverkosta saadaan kulutusta laskettua paikallisesti. (Pehkonen, 2019)

Mikroverkot toimivat sähkövarastoilla, joustavilla kuormilla ja omalla sähköntuotantojärjestelmällä, joka lataa sähkövarastoa ja toimii sähkövaraston apuna irtikytkennän aikana. Lisäksi tässä voidaan hyödyntää mahdollisten sähköautojen akkujen varausta, jota voidaan purkaa mikroverkkoon muiden järjestelmien tueksi. Tällä tavoin voidaan turvata kriittiset toiminnot kohteissa.

Mikroverkkojen yleistyessä voimayhtiöt alkavat menettää asemaansa, sillä mikroverkkojen sisällä ihmiset voivat alkaa myydä sähköä toisilleen. Tästä esimerkkinä on kokeilu New Yorkin Brooklynistä, jossa osa asukkaista tuottaa itselleen sähköä ja myy sitä muille jäsenille mikroverkkojen kautta olematta itse yhteydessä sähköntuotantoyhtiöihin. (Laatikainen, 2018)

Suomessa mikroverkot herättävät myös kiinnostusta, mutta lainsäädäntöön ja valvontaan tarvittaisiin muutoksia, jotta tämä voitaisiin mahdollistaa. Mikroverkoilla voidaan saavuttaa energiaomavaraisuus sähkövarastojen ja omatuotannon avulla.

Maatiloilla mikroverkot ovat nosteessa, sillä maatilat sijaitseva yleisesti haja-asutusalueilla, jossa sähkökatkot ovat yleisempiä, kuin asemakaava-alueella. Maatiloilla hyödynnetään CHP-laitoksia, jossa tuotetaan lämpöä ja sähköä yhtäaikaaisesti. Tämän lisäksi aurinkopaneelit sekä sähkövarastot mahdollistaisivat toiminnan verkossa olevan vian aikana. Maatila on kuitenkin yhteydessä sähköverkkoon, mutta tällaisella mikroverkolla pystyisi sähköverkko joustamaan tarpeen vaatiessa ilman haittaa kummallekään osapuolelle. (Mynttinen;Laihanen;& Karhunen, 2018)

## 10.2 Energiayhteisöt

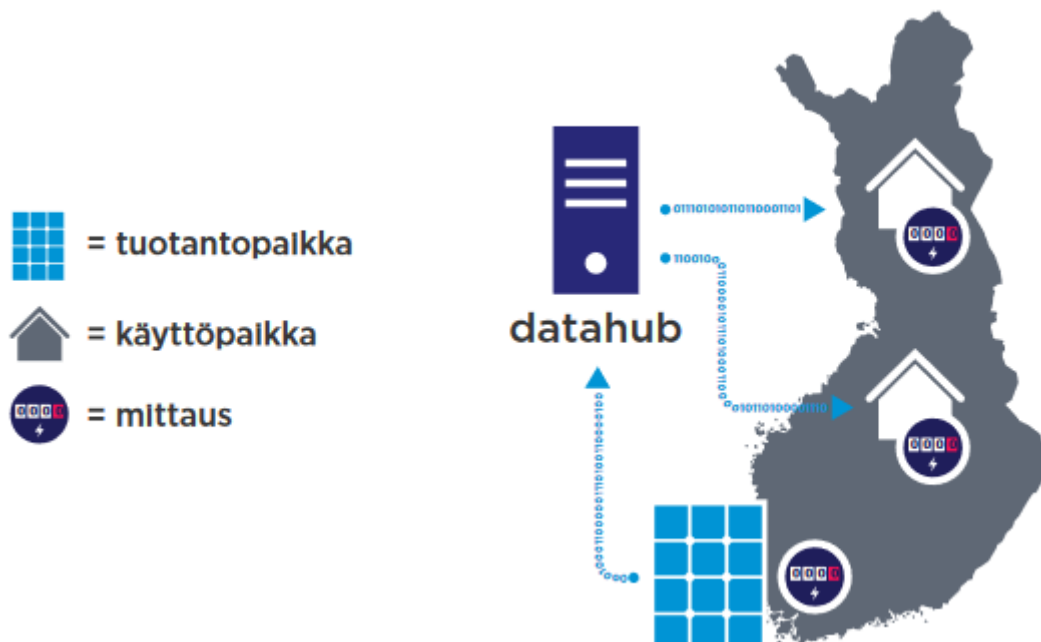
Energiayhteisöillä tarkoitetaan esimerkiksi naapurustoa, joka on investoinut yhdessä aurinkovoimalaan tai muuhun sähköntuotantolaitokseen, jolla he tuottavat sähköä omaan käyttöönsä. Kun sähköä tuotetaan ylimääräistä, se on mahdollista varastoida sähkövarastoon ja käyttää silloin kun sähköä ei ole saatavilla. Energiayhteisöillä parannetaan energiatehokkuutta sekä luodaan sähköverkoille joustomahdollisuuksia, mutta samalla ne vähentävät energiamäärää sähkönsiirrossa, mikä aiheuttaa ongelmia sähköverkkoyhtiöiden liiketoimintaan.

Energiayhteisöjä voi olla kahta erilaista, hajautettu tai paikallinen energiayhteisö. Paikallisia energiayhteisöjä on vielä kahta erilaista, on kiinteistön sisäinen energiayhteisö, kuten esimerkiksi asunto-osakeyhtiö tai kiinteistörajat ylittävä energiayhteisö, kuten omakotitalo naapurusto. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

### **HAJAUTETTU ENERGIAYHTEISÖ**

Hajautetulla energiayhteisöllä tarkoitetaan energiantuotantoa, joka tapahtuu muualla kuin käyttöpisteessä, esimerkiksi tuottajalla on paljon tuotantoa omalla kesämökkillään ja hän haluaa käyttää sitä kotonaan. Tässä tapauksessa hän voi tehdä verkkoyhtiön kanssa sopimuksen, jossa sovitaan, että hän käyttää tuottamansa energian siirtoon olemassa olevaa jakeluverkkoa ja maksaa sen käytöstä. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)



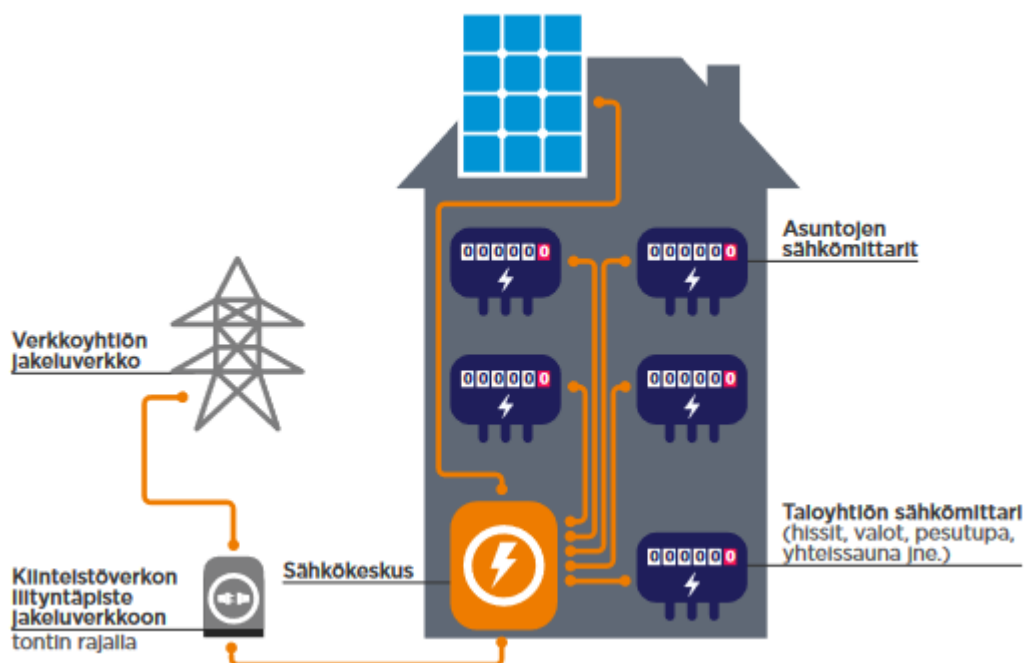


KUVA 12 Hajautettu energiayhteisö (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

Hajautetulla energiayhteisöllä ja Datahubin käytöllä mahdollistetaan tulevaisuudessa, että tuottaja voi myydä tuottamaansa energiaa myös yhteisön ulkopuolella oleville sähkönkäyttäjille, mutta tämä vaatii uudenlaista lainsäädäntöä ja toteutuksen pohdintaa.

### KIINTEISTÖN SISÄINEN ENERGIAYHTEISÖ

Kiinteistön sisäisellä energiayhteisöllä tarkoitetaan samassa kiinteistössä asuvien tai asunto-osakkeen omistavien henkilöiden muodostamasta energiayhteisöstä, joka esimerkiksi ostaa aurinkopaneelit kerrostalon katolle.



KUVA 13 Kiinteistön sisäinen energiayhteisö (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

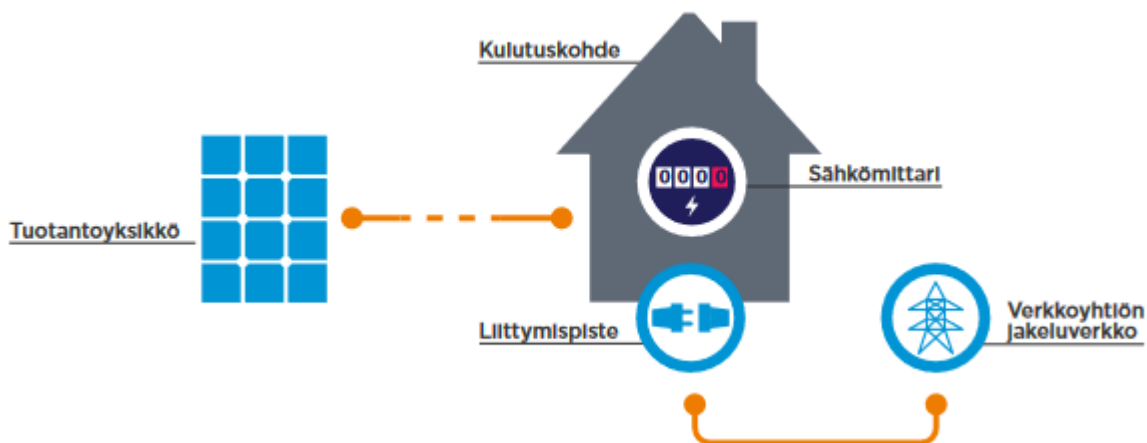
Talo on yhteydessä jakeluverkkoon, mutta sillä on myös omaa tuotantoa aurinkopaneelin kautta saatavalla energialla, jota voidaan käyttää esimerkiksi yhteistilojen sähkökäyttöön ja näin laskea taloyhtiön sähkölaskua.

TEM:in mukaan ”kiinteistön sisällä tuotetusta ja kulutetusta energiasta, joka ei ylitä jakeluverkon liittymispistettä ei tarvitse maksaa verkkopalvelumaksua jakeluverkkoyhtiölle (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018).”

Omatuotannon sähkömittaus on toteutettava siten, että se ei sekoitu verkosta otettavan sähkömittauksen kanssa. Tällä tavoin varmistetaan, että energiayhteisön jäsenet saavat hyödyn omatuotannostaan.

## KIINTEISTÖRAJAT YLITTÄVÄ ENERGIAYHTEISÖ

Kiinteistörajat ylittävällä energiayhteisöllä tarkoitetaan energiantuotannon rakentamista esimerkiksi naapurin omistamalle maalle, josta tuotetta sähkö siirretään käyttökohteisiin. Tämä sen takia, koska sähkönpientuotannon rakentaminen ei ole aina mahdollista omalle kiinteistölle, joten naapurustoille luodaan mahdollisuus energiayhteisöihin rakennuttamalla energiantuotantoa esimerkiksi naapurin maille.



KUVA 14 Kiinteistörajat ylittävä energiayhteisö (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

Tässä on otettava huomioon, että tuotantoyksikön liittymä ei saa yhdistyä jakeluverkon liittymään muodostaen rengasyhteyttä eikä liittymisjohto saa yhdistää sähkökäyttöpaikkoja turvallisuuden ja asianmukaisen kohtelun vuoksi. Ongelmaksi tässä muodostuu kuitenkin se, että sähkön siirtäminen ja sähköverkkojen rakentaminen ovat luvanvaraista toimintaa, mikäli sähköverkko ylittää kiinteistörajat.

TEM on ehdottanut älyverkkotyöryhmän loppuraportissa, että

Kiinteistörajat ylittävien energiayhteisöjen mahdollistamiseksi työryhmä esittää pientuotantokohteen kulutuskohteeseen liittävän kiinteistörajat ylittävän sähköjohton rakentamisen sallimista ilman jakeluverkkoyhtiön suostumusta ja ilman sähköverkkolupaa. Tällaisessakin tilanteessa asiakas vastaa sähkökäyttöpaikan liittymispisteen takaisesta sähkölaadusta ja sähköturvallisudesta. (Pahkala;Uimonen;& Väre, 2018)

Kiinteistörajat ylittävät verkonrakenteet mahdollistavat myös naapurustojen osallistumisen tasapuolisesti energiayhteistöimintaan.

### 10.3 LVDC-verkot

Kirjainyhdistelmä LVDC tulee sanoista Low Voltage Direct Current eli suomeksi pienjännitteinen tasa-sähkö. Tasasähköä on aiemmin hyödynnetty mannertenvälisessä HVDC sähkönsiirrossa sen suuren tehonsiirtokapasiteetin sekä aiheutuvien häviöiden vähyyden takia. LVDC-verkot ovat hyvä ratkaisu tulevaisuuden sähköverkkojen kustannustehokkaaseen ratkaisuun, sillä sen avulla saadaan ratkaisuja keskeisiin ongelmiin kuten kapasiteettivajeeseen, sähkön laadun epätasaisuuteen sekä verkon taajuuden vaihteluihin. (Ensto, 2017)

Nykyään pienjänniteverkot ovat pääsääntöisesti vaihtosähköllä toimivia, mutta tulevaisuudessa osaa jakeluverkosta voidaan alkaa toteuttaa tasasähköllä. Tasasähköllä siirrettäessä energia hyödyntää koko johtimen poikkipintaa, kun taas vaihtosähköllä johtimesta käytettävä pinta-ala rajoittuu sen ulkokuoreen, jonka takia LVDC-verkoilla voidaan siirtää jopa 6-10 kertaa enemmän tehoa kuin vaihtosähköverkolla. (Ensto, 2017)

LVDC-verkon etuna on, että sen asennukset voidaan tehdä pienjännitestandardien mukaisesti, sillä se perustuu 1500 V nimellisjännitteeseen. Kun sähköä siirretään tasasähköllä lähemmäs käyttöpaikkaa ja muunnetaan käyttöpaikan lähellä takaisin vaihtosähköksi, tällöin asiakas voi käyttää sähkölaitteitaan normaalisti tekemättä muutoksia omaan järjestelmäänsä. Kiinteistöjen saarekekäytöt paranevat tasasähköverkon avulla, sekä investointikustannukset ovat pienemmät verrattuna vastaavaan vaihtosähköverkkoon. (Ensto, 2017)

LVDC-verkon ongelmaksi muodostuu jännitteen epätasaisuus, joka voi johtua epäsymmetrisistä kuormista. Tämä tulee ilmi erityisesti kaksisuuntaisessa LVDC jakelujärjestelmässä. Jännitteiden epätasaisuuden ratkaisuksi on ehdotettu DC/DC-muuntimella varustettua jännitteentasapainotinta. (Gwon, ym., 2017)

Pitkillä siirtoväleillä on todettu tasasähkön olevan parempi vaihtoehto, koska vaihtosähköllä siirrettäessä varsinkin pitkillä välimatkoilla jännitteessä tapahtuu alenemaa. Tästä voidaan todeta, että vaihtosähkö on laadukkaampaa, mikäli se voidaan muuntaa tasasähköstä lähempänä kulutuskohdetta. (Blomqvist;Härkönen;& Makkonen, 2017)



KUVA 15 LVDC verkko (Ensto, 2018)

LVDC Feeder Station	LVDC syöttöyksikkö
Maximum Power Point Tracking	Aurinkoenergiavoimalan liitäntäyksikkö
Battery Management	sähkövaraston/akkujärjestelmäyksikkö
LVDC Substation	LVDC muuntamo
Electric Vehicle Charging	Sähköauton latausyksikkö

TAULUKKO 1 Kuvan 15 selitteet muokattu lähteestä: (Blomqvist;Härkönen;& Makkonen, 2017)

Kuvassa 15 esitetyssä LVDC-verkossa syöttöyksikköä syöttää keskijänniteverkko, josta tuleva sähkö muunnetaan 750 VDC eli tasasähköksi ja siirretään kohti kulutuskohteita tasasähköllä häviöiden minimoimiseksi. Kulutuskohteilla tasasähkö muunnetaan 230 VAC eli vaihtosähköksi tai niin kutsutuksi kulutussähköksi, jolloin vaihtosähköllä suoritettava sähkönsiirto jää mahdollisimman lyhyeksi, tällöin siirrossa tapahtuvat häviöt minimoituvat ja jännitteen laatu pysyy parempana. Tämä lisää komponenttien määrää jakeluverkoissa, sillä muuntamiseen tarvitaan vaihto- ja tasasuuntaajia. Suuntaajien ongelma on niiden lyhyempi käyttöikä, kun muiden verkon komponenttien, joten niiden vaihdosta aiheutuu kuluja.

Muuntaja toimii samalla periaatteella myös toiseen suuntaan eristäen asiakkaalta tulevat epälineaariset kuormat ja kokonaissärökertoimen lähteet, koska muuntamon ja syöttöyksikön välissä on tasasähköverkko, joten nämä häiriötekijät eivät pääse keskijänniteverkkoon. (Ensto, 2018) (Silventoinen, 2018)

LVDC-verkkojen etuna on myös uusiutuvan energian yksinkertainen liittäminen verkkoon, joka mahdollistaa hajautetun tuotannon integroimista verkkoon ja näin mahdollistaa oma varainen mikroverkko. Mikroverkkojen mahdollistajana toimivat sähkövarastot, joihin voidaan ladata energiaa irtikytkennän varalle. Nämä sähkövarastot toimivat erotuksen aikana hajautetun tuotannon tukena. Sähkövarastot toimivat myös niin kutsuttuina virtuaalivoimalaitoksina, jotka pystyvät tukemaan muuta sähköverkkoa kulutushuippujen aikana. (Ensto, 2017)

## 11 YHTEENVETO

Sähköverkot, sähkön vähittäismarkkinat ja kuluttajien kulutustottumukset ovat muutoksen alla. Ennen sähköä tuotettiin kulutuksen mukaan, mutta tulevaisuudessa sähköä kulutetaan tuotannon mukaan, koska halutaan päästä ympäristötavoitteisiin ja hiilivapaaseen energiantuotantoon. Hiilivapaa energiantuotanto aiheuttaa säätövoiman vähenemisen sähköverkosta, joten tarvitaan uusia ratkaisuja energian kulutuksen ja tuotannon optimointiin. Optimointiin ratkaisuna on tulevaisuudessa sähkövarastojen hyödyntäminen. Älykkäiden sähköverkkojen ja loppukuluttajien dynaaminen yhteistoiminta on tulevaisuudessa tärkeää. Vähittäismarkkinoiden kehittäminen ja kuluttajien käyttäytyminen vaikuttaa suuresti tulevaisuuden energiajärjestelmän ylläpitoon ja siihen millaiseksi se tulee muodostumaan.

Pienjänniteverkkojen kehityksellä pitäisi mahdollistaa energian siirto dynaamisessa verkossa ja antaa kuluttajille mahdollisuuksia erilaisiin arvovalintoihin. Loppuasiakkaiden on pystyttävä mukautumaan saatavilla olevan energian vaihteluihin, kuitenkin siten, että jokainen saa tarvitsemansa energian, joko maksamalla siitä enemmän tai tuottamalla sitä itse enemmän. Loppukäyttäjää on saatava kannustettua kohti omatuotantoa ja ohjaamaan omaa energian käyttöään ajankohtaan, jolloin se on energiajärjestelmän ylläpidon kannalta optimaalisinta.

Hyviä kehityskohteita on IoT-tekniikoiden ja tekoälyn yhdistäminen energiajärjestelmään esimerkiksi kunnossapidon puolelle. IoT-tekniikoilla edistetään energiajärjestelmän toimintojen optimointia, kuten sähkön vähittäismarkkinoiden hallintaa. Jakeluverkkojen laitteiston yhdistäminen toisiinsa IoT:n avulla joka avulla saadaan reaaliaikaista tietoa sekä loppukuluttajan sähkölaitteiden yhdistäminen internettiin ja tällä tavoin edesauttaa yksittäisten kiinteistöjen energiatehokkuuden parantamista.

Sähköverkkojen luotettavuuden ja sähkön toimitusvarmuuden parantamiseksi on älyverkkojen kommunikaatiolla ja niihin liittyvillä ohjelmistoilla suuri merkitys. Ohjelmistojen on oltava tehokkaita ja tiedonsiirtoväylien oltava nopeita sekä niiden siirtokaistan on oltava suurta. Älykkäiden mittareiden ja sähköverkon muiden laitteiden on pystyttävä kommunikoimaan keskenään nopeasti ja tiedon on oltava helposti luettavassa muodossa. Tällä tehostetaan vianpaikannusta ja viankorjausta.

Datahub on hyödyllinen sovellus sähkönvähittäismarkkinoiden tehostajana, jonka toiminta perustuu nopeaan tiedonsaantiin sekä sähkön käyttäjien, jakeluverkkoyhtiöiden ja sähkönmyyjien tietojen tallentamiseen. Tämä helpottaa myyjän vaihdoksissa tarvittavien tietojen siirtymistä.

Datahub mahdollistaa uusien palvelujen kehittämisen energian käyttäjille sekä sen tuottajille ja myyjille.

Älykkäiden sähköverkkojen pienjännitteisen osuuden tärkein kehityskohde on mikroverkkoteknologian kehittäminen ja siihen liittyvien hajautetun tuotannon, LVDC-verkkojen, energiayhteisöjen ja sähkövarastojen kehittäminen sille tasolle, että niitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa takaamaan kuluttajille mahdollisimman luotettavan ja toimintavarman sähkösaannin. Sähköntuotannon muuttuessa uusiutuviin energianlähteisiin pitää pystyä takaamaan sähkön toimitusvarmuus käyttämällä hyödyksi esimerkiksi sähkövarastoja sekä luomalla virtuaalivoimalaitoksia. Suurista kiinteistöistä, kuten esimer-

kiksi kauppakeskuksista olisi hyvä tehdä virtuaalivoimalaitoksia, jolloin sähköverkolle saataisiin enemmän säätövoimaa. Uusien kiinteistöjen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon ainakin tilavarauksissa mahdollisuudet virtuaalivoimalaitoksen luomiseen, sillä myöhemmin muutoksien teko maksaa enemmän.

Autoteollisuuden kehittäessä sähköautojen akkuteknologiaa myös sähkövarastojen hinnat tulevat putoamaan alemmas, sekä niistä tulee entistä tehokkaampia. Sähköautojen lisääntyessä useimmilla kotitalouksilla ensimmäinen sähkövarasto on juuri sähköauton akusto.

Älykkääseen sähköverkkoon siirtyminen on jo teknisesti mahdollista ja sitä toteutetaan asentamalla olemassa olevaan verkkoon uusia älykkäitä laitteita sekä korvaamalla vanhentunutta verkkoa uudella. Uusia laitteita asentamalla ja vanhoja korvaamalla saadaan verkon rakentamiskustannukset pysymään kohtuullisina.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- ABB. (2015). *Älykäs sähköverkko on energian internet Kohti uusiutuvaa tuotantoa, luotettavaa jakelua ja energiatehokasta käyttöä*. Haettu 18. 3. 2019 osoitteesta <https://docplayer.fi/671615-Alykas-sahkoverkko-on-energian-internet-kohti-uusiutuvaa-tuotantoa-luotettavaa-jakelua-ja-energiatehokasta-kaytto.html>
- ABB. (ei pvm). *Kapasiteetin lisääminen vastaa tulevaisuuden vaatimuksiin*. Haettu 3. 4. 2019 osoitteesta ABB: <https://new.abb.com/fi/alykas-sahkoverkko/miksi-alykas-sahkoverkko/kapasiteetti>
- ABB. (ei pvm). *Sähkönjakelu*. Haettu 3. 4. 2019 osoitteesta ABB: <https://new.abb.com/fi/alykas-sahkoverkko/teknologiat/s%C3%A4hk%C3%B6jakelu>
- Avancini, D. B.;Rodrigues, J. J.;Martins, S. G.;Rabêlo, R. A.;Al-Muhtadi, J.;& Solic, P. (1. 1. 2019). Energy meters evolution in smart grids. *Journal of Cleaner Production*, 1-14. Haettu 4. 3. 2019 osoitteesta [https://ac.els-cdn.com/S0959652619302501/1-s2.0-S0959652619302501-main.pdf?\\_tid=772a3957-413a-432a-a049-ca6dd2fcfeb&acdnat=1551695404\\_9d3cfe69eb06107ca832737084ce10ab](https://ac.els-cdn.com/S0959652619302501/1-s2.0-S0959652619302501-main.pdf?_tid=772a3957-413a-432a-a049-ca6dd2fcfeb&acdnat=1551695404_9d3cfe69eb06107ca832737084ce10ab)
- Blomqvist, K.;Härkönen, J.;& Makkonen, T. (2017). *Sähkön varastointitekniikat- ja markkinat*. Karelia. Haettu 5. 5. 2019 osoitteesta <http://www.karelia.fi/mobiilisahkovarastot/wp-content/uploads/2018/02/Sahkon-varastointitekniikat-ja-markkinat.pdf>
- Blomqvist, K.;Härkönen, J.;& Makkonen, T. (2017). *Älykkäät sähköverkot*. Joensuu: Karelia. Haettu 11. 4. 2019 osoitteesta <http://www.karelia.fi/mobiilisahkovarastot/wp-content/uploads/2018/04/Alykkaat-sahkoverkot.pdf>
- Borlase, S. (2013). *Smart grids: infrastructure technology, and solutions*. Boca Raton, FL : CRC Press 2013. Haettu 8. 4. 2019
- Bremer, O.;Frilander, O.;Kaskinen, T.;& Malho, M. (2017). *Kysyntäjousto kuluttajan näkökulmasta*. Helsinki: Demos Helsinki. Haettu 28. 3. 2019 osoitteesta <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/Kysynta%CC%88jousto+kuluttajan+na%CC%88ko%CC%88kulmasta.pdf/61f45c27-10bb-4ab9-ba20-a3bd0ee37014/Kysynta%CC%88jousto+kuluttajan+na%CC%88ko%CC%88kulmasta.pdf.pdf>
- Ediel. (ei pvm). *Datahub - kohti keskitettyä tiedonvaihtoa*. Haettu 12. 4. 2019 osoitteesta Ediel: <https://www.ediel.fi/datahub>
- Elenia. (ei pvm). *Sähköntuotanto*. Haettu 14. 5. 2019 osoitteesta Elenia: [https://www.elenia.fi/sahko/sahkon\\_tuotanto](https://www.elenia.fi/sahko/sahkon_tuotanto)
- Energiateollisuus. (2018). *Sidosryhmäkysely 15 minuutin tasejaksoon siirtymisestä*. Energiateollisuus. Haettu 28. 3. 2019 osoitteesta [https://energia.fi/files/2279/Energiavirasto\\_Sidosryhmäkysely\\_15\\_minuutin\\_tasejaksoon\\_siirtymisesta\\_20180124.pdf](https://energia.fi/files/2279/Energiavirasto_Sidosryhmäkysely_15_minuutin_tasejaksoon_siirtymisesta_20180124.pdf)
- Energiateollisuus. (ei pvm). *Sähköverkkojen rakenne*. Haettu 21. 2. 2019 osoitteesta Energia: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot)
- Energiauutiset. (15. 2. 2017). *Teslalta jättisähkövarasto huippunopeasti*. Haettu 15. 4. 2019 osoitteesta Energiiauutiset: <https://www.energiiauutiset.fi/sahkoverkot/teslalta-jattisahkovarasto-huippunopeasti.html?p487=9>

- Energiavirasto. (21. 8. 2014). *Älyverkon luoma uusi toimintaympäristö*. Haettu 2. 4. 2019 osoitteesta Energiavirasto: [https://www.energiavirasto.fi/-/alyverkon-luoma-uusi-toimintaymparisto?redirect=https%3A%2F%2Fwww.energiavirasto.fi%2Fhome%3Fp\\_id%3D3%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dmaximized%26p\\_p\\_mode%3Dview%26\\_3\\_keywords%3D%25C3%2584lyverkon%2Bluoma%2Buusi%2Btoimi](https://www.energiavirasto.fi/-/alyverkon-luoma-uusi-toimintaymparisto?redirect=https%3A%2F%2Fwww.energiavirasto.fi%2Fhome%3Fp_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_3_keywords%3D%25C3%2584lyverkon%2Bluoma%2Buusi%2Btoimi)
- Ensto. (9. 2016). *V2G and V2H The smart future of vehicle-to-grid and vehicle-to-home*. Haettu 15. 4. 2019 osoitteesta Ensto: [https://www.ensto.com/globalassets/brochures/ev-charging/ensto\\_ev\\_v2g\\_article.pdf](https://www.ensto.com/globalassets/brochures/ev-charging/ensto_ev_v2g_article.pdf)
- Ensto. (18. 12. 2017). *Enston tasasähköön perustuva LVDC-ratkaisu tarjoaa lisätehoa, laatua ja älykkyyttä sähkönjakeluun*. Haettu 10. 4. 2019 osoitteesta Ensto: <https://www.ensto.com/fi/yhtio/utiset-ja-media/artikkelit/Tasasahkoon-perustuva-Ensto-LVDC-alyverkko/>
- Ensto. (21. 12. 2017). *Vaihtosähkön sijasta tasasähköön - Enston LVDC-älyverkko maksimoi kapasiteetin ja minimoi tehohäviöt*. Haettu 11. 4. 2019 osoitteesta Ensto: <https://www.ensto.com/fi/yhtio/utiset-ja-media/artikkelit/Tasasahkoon-perustuva-Ensto-LVDC-alyverkko-osa2/>
- Ensto. (2. 1. 2018). *Tasasähköön perustuvan LVDC-älyverkon liitäntäyksiköt mahdollistavat irrallisen saarekeverkon käytön*. Haettu 11. 4. 2019 osoitteesta Ensto: <https://www.ensto.com/fi/yhtio/utiset-ja-media/artikkelit/lvdc-artikkeli-osa-3/>
- Euroopan Unioni. (ei pvm). *Investointeja kestävään energiaan tulevaisuuden hyväksi*. Haettu 28. 2. 2019 osoitteesta europa: [https://europa.eu/european-union/topics/energy\\_fi](https://europa.eu/european-union/topics/energy_fi)
- Fingrid. (11. 9. 2018). *Mitä on inertia?* Haettu 5. 4. 2019 osoitteesta Fingridlehti: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- Fingrid. (ei pvm). *Datahub*. Haettu 5. 5. 2019 osoitteesta Fingrid: <https://www.fingrid.fi/palvelut/vahittaismarkkinoiden-tiedonvaihto/datahub/>
- Fingrid Oyj. (1.. 1. 2018). *Fingridin sähkönsiirtoverkko*. Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta Fingrid: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>
- Fingrid. (ei pvm). *Varttitase Kysymyksiä ja vastauksia*. Haettu 1. 4. 2019 osoitteesta Fingrid: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/varttitase/kysymyksiä-ja-vastauksia/>
- Finlex. (2013). *Sähkömarkkinalaki (588/2013)*. Haettu 5. 4. 2019 osoitteesta Finlex: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>
- Fortum. (1. 3. 2017). *Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä*. Haettu 5. 5. 2019 osoitteesta Fortum: <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>
- Gupta, A.;Anpalagan, A.;Carvalho, G. H.;Khwaja, A. S.;Guan, L.;& Woungang, I. (5. 2. 2019). Prevaling and emerging cyber threats and security practices in IoT-Enabled smart grids: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 118-148. Haettu 17. 4. 2019 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804519300207>
- Gwon, G.-H.;Kim, C.-H.;Oh, Y.-S.;Noh, C.-H.;Jung, T.-H.;& Han, J. (21. 2. 2017). Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 158-167. Haettu 2. 5. 2019 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516325285>
- Järventausta, P.;Repo, S.;Trygg, P.;Rautiainen, A.;Mutanen, A.;Lummi, K.;. . . Belonogova, N. (2015). *Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli)*. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos.



- Haettu 19. 5. 2019 osoitteesta  
[https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/kysynnan\\_jousto\\_loppuraportti.pdf](https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/kysynnan_jousto_loppuraportti.pdf)
- Kainulainen, R. (2015). *Älykäs pienjänniteverkko*. Espoo: Aalto-Yliopisto Sähkötekniikan korkeakoulu. Haettu 3. 4. 2019 osoitteesta  
[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/18618/master\\_Kainulainen\\_Riina\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/18618/master_Kainulainen_Riina_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kimani, K.; Oduol, V.; & Langat, K. (2019). Cyber security challenges for IoT-based smart grid networks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 36-49. Haettu 17. 4. 2019 osoitteesta  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548217301622>
- KPY. (ei pvm). *Voimatel Oy*. Haettu 1. 3. 2019 osoitteesta KPY: <http://www.kpy.fi/voimatel-oy>
- Kumpulainen, L.; Rinta-Luoma, J.; Voima, S.; Kauhaniemi, K.; Sirviö, K.; Koivisto-Rasmussen, R.; . . . V. (2016). *Roadmap 2025*. Energiateollisuus. Haettu 28. 3. 2019 osoitteesta  
[https://energia.fi/files/786/Roadmap\\_2025\\_loppuraportti.pdf](https://energia.fi/files/786/Roadmap_2025_loppuraportti.pdf)
- Laatikainen, T. (12. 2. 2018). *Sähkön mikroverkot tulevat ja tekevät sähköstä trendikästä - "Voi laajentaa helposti"*. Haettu 9. 4. 2019 osoitteesta Tekniikkatalous: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/sahkon-mikroverkot-tulevat-ja-tekevät-sahkosta-trendikasta-voi-laajentaa-helposti-6701000>
- Lakervi, E.; & Partanen, J. (2009). *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto.
- Lassila, J.; Haakana, J.; Haapaniemi, J.; Räisänen, O.; & Partanen, J. (2019). *Sähköasiakas ja sähköverkko 2030*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Haettu 10. 4. 2019 osoitteesta  
<https://www.lut.fi/documents/10633/521610/Sa%CC%88hko%CC%88asiakas+ja+sa%CC%88hko%CC%888verkko+2030-loppuraportti.pdf/a5b20152-8247-45d4-b747-17a236659666>
- Lehto, I. (13. 2. 2019). *Energiateollisuus ry:n (ET) näkemys varttimittaukseen siirtymisen aikataulusta jakeluverkoissa*. Haettu 4. 3. 2019 osoitteesta Energia.fi:  
[https://energia.fi/files/3526/Varttimittaus\\_kantapaperi\\_20190213\\_FINAL.pdf](https://energia.fi/files/3526/Varttimittaus_kantapaperi_20190213_FINAL.pdf)
- Lähienergia. (10. 11. 2017). *Suomen Lähienergialiiton lausunto: Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu – Energia – 38/2017. Matkalla kohti joustavaa ja asiakaskeistä sähköjärjestelmää*. Haettu 10. 4. 2019 osoitteesta Lähienergia: <https://www.lahienenergia.org/julkaisut/suomen-lahienenergialiiton-lausunto/>
- Löf, N. (2009). *Pienjänniteverkon automaatoratkaisuiden kehitysnäkymät*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Haettu 19. 3. 2019 osoitteesta [http://www.tut.fi/eee/research/inca-public/tiedostot/Raportit/Diplomityo\\_Lof\\_Niklas\\_final.pdf](http://www.tut.fi/eee/research/inca-public/tiedostot/Raportit/Diplomityo_Lof_Niklas_final.pdf)
- Motiva Oy. (11. 1. 2017). *Sähkön pientuotanto*. Haettu 16. 4. 2019 osoitteesta Motiva:  
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/sahkon\\_pientuotanto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto)
- Mynttinen, S.; Laihanen, M.; & Karhunen, A. (14. 2. 2018). *Pien-CHP-laitosten mahdollisuuden hajautetussa energiantuotannossa maataloilla case Etelä-savo*. Haettu 2019. 4. 2019 osoitteesta XAMK:  
<https://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitystoiminnan-blogi/pien-chp-laitosten-mahdollisuudet-hajautetussa-energiantuotannossa-maataloilla-case-etela-savo/>
- Pahkala, T.; Uimonen, H.; & Väre, V. (24. 10. 2018). *Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä*. Haettu 28. 2. 2019 osoitteesta Valto:  
[http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/TEM\\_33\\_2018.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/TEM_33_2018.pdf)
- Partanen, J. (2018). *Sähkön siirtohinnot ja toimitusvarmuus*. Työ- ja elinkeinoministeriö. Haettu 8. 4. 2019 osoitteesta

[http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43\\_18\\_Sahkonsiirtohinnaat\\_ ja\\_toimintavarmuus.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43_18_Sahkonsiirtohinnaat_ ja_toimintavarmuus.pdf)

- Pehkonen, E. (1. 2. 2019). *Teollinen mikroverkko kysyntäjoustoa hyödyntävän energianhallintajärjestelmän osana*. (Sähköala.fi) Haettu 5. 5. 2019 osoitteesta Sähköala:  
[http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/energiatehokkuus/fi\\_FI/Teollinen\\_mikroverkko\\_energianhallintajarjestelman\\_osana/](http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/energiatehokkuus/fi_FI/Teollinen_mikroverkko_energianhallintajarjestelman_osana/)
- Pekkarinen, M. (5. 2. 2009). *Sähkönkulutuksen mittauksen uudistus*. Haettu 8. 4. 2019 osoitteesta docplayer:  
<https://docplayer.fi/9243432-Sahkonkulutuksen-mittauksen-uudistus-elinkeinoministeri-mauri-pekkarinen-tiedotustilaisuus-5-2-2009.html>
- Pöyry. (15. 12. 2017). *AMR 2.0 loppuraportti*. Haettu 7. 3. 2019 osoitteesta Työ- ja Elinkeinoministeriö:  
<https://tem.fi/documents/1410877/3481825/AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017/6a2df7e6-a963-40c0-b4d8-d2533fbca488/AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017.pdf>
- Saraste, A. (25. 8. 2018). *Uusi kyberraportti Saksasta varoittaa: hakkerit voisivat pimittää koko Euroopan sähköverkon*. Haettu 8. 4. 2019 osoitteesta Yle uutiset: <https://yle.fi/uutiset/3-10369841>
- Sarvaranta, A. (2010). *Selvitys älykkäistä sähköverkoista ja niiden kehityksestä Euroopan unioniassa ja Suomessa*. Energiateollisuus. Haettu 12. 4. 2019 osoitteesta  
[https://energia.fi/files/665/Alykkaat\\_sahkoverkot\\_Suomessa\\_ ja\\_Euroopassa.pdf](https://energia.fi/files/665/Alykkaat_sahkoverkot_Suomessa_ ja_Euroopassa.pdf)
- Siemens. (ei pvm). *Tehokas sähköverkko*. Haettu 24. 4. 2019 osoitteesta Siemens:  
[http://www.siemens.fi/fi/infrastructure\\_and\\_cities/alykkaat\\_sahkoverkot/tehdokas\\_sahkoverkko.htm](http://www.siemens.fi/fi/infrastructure_and_cities/alykkaat_sahkoverkot/tehdokas_sahkoverkko.htm)
- Siewierski, T.;Szykowski, M.;& Wedzik, A. W. (5. 2018). A review of economic aspects of voltage control in LV smart grids. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 37-45. Haettu 25. 3. 2019 osoitteesta  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300315>
- Silventoinen, J. (2018). *Kustannustehokkaiden verkkoratkaisujen määrittäminen haja-asutusalueille*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Haettu 11. 4. 2019 osoitteesta  
<http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/156103/Diplomity%C3%B6%20-%20Silventoinen%20Juha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- STEK. (ei pvm). *Älykäs sähköverkko*. (STEK) Haettu 4. 3. 2019 osoitteesta STEK: <https://stek.fi/alykas-sahkonkaytto/alykas-sahkoverkko/>
- Taloussanommat. (13. 5. 2019). *Suomessa kehitettiin uudenlainen voimalaitos – ”Omistaja ei huomaa muuta, kuin että tilille tulee rahaa”*. (L. Nuoska, Toimittaja) Haettu 19. 5. 2019 osoitteesta Taloussanommat:  
<https://www.is.fi/taloussanommat/art-2000006103739.html>
- Tekniikkatalous. (12. 5. 2017). *Sähköverkoista tulee Suomessakin kaksisuuntaisia - kuluttajat myyvät ylijäämän sähköyhtiöille*. Haettu 8. 3. 2019 osoitteesta [www.tekniikkatalous.fi](http://www.tekniikkatalous.fi):  
<https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/sahkoverkoista-tulee-suomessakin-kaksisuuntaisia-kuluttajat-myyvat-ylijaaman-sahkoyhtioille-6648786>
- Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. (2018). *Säätövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle*. VTT. Haettu 10. 4. 2019 osoitteesta [https://www.vtt.fi/inf/pdf/whitepapers/VTTWhitePaper2018-Saatovoimaa\\_tulevaisuuden\\_sahkomarkkinalle.pdf](https://www.vtt.fi/inf/pdf/whitepapers/VTTWhitePaper2018-Saatovoimaa_tulevaisuuden_sahkomarkkinalle.pdf)
- Teknologiateollisuus. (ei pvm). *Sähköautoista tulee osa älykästä verkkoa*. Haettu 29. 4. 2019 osoitteesta Teknologiateollisuus: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/uutiset/sahkoautoista-tulee-osa-alykasta-verkkoa>

- Tienari, I. (2018). *Pienjännitteisen maakaapeliverkon ennakoiva vainhavainnointi*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Haettu 29. 4. 2019 osoitteesta  
[https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Diplomity%C3%B6\\_Pienj%C3%A4nnitteisen\\_maakaapeliverkon\\_ennakoiva\\_vainhavainnointi.pdf](https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Diplomity%C3%B6_Pienj%C3%A4nnitteisen_maakaapeliverkon_ennakoiva_vainhavainnointi.pdf)
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (19. 6. 2016). *Suomen älyverkkovisio*. Haettu 28. 2. 2019 osoitteesta Työ- ja Elinkeinoministeriö: <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/%C3%84lyverkkovisio+final/9ddc2545-586e-4574-8195-ef9987a07151/%C3%84lyverkkovisio+final.pdf>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2018). *Älyverkkotyöryhmän ehdotukset ja niiden tarkemmat perustelut*. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. Haettu 15. 4. 2019 osoitteesta  
[http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/Liite\\_TEM\\_33\\_2018.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/Liite_TEM_33_2018.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (ei pvm). *Kysymyksiä ja vastauksia älykkästä sähköjärjestelmästä*. (Työ- ja elinkeinoministeriö) Haettu 27. 2. 2019 osoitteesta Työ- ja Elinkeinoministeriö: <https://tem.fi/perustietoja>
- Vihanninjoki, V. (2015). *Hajautettu energiantuotanto Suomessa*. Suomen ympäristökeskus SYKE. Haettu 9. 4. 2019 osoitteesta  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwiPvfj1rsLhAhXNdJoKHXNnC6QQFjACegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.syke.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%257D%2F111845&usg=AOvVaw0fUHLxD6XLsMMWP6TP6UaR>