

Tomi Korhonen

**TULEVAISUUDEN SÄHKÖVERKON KEHITYS:  
TIETOTEKNISET RATKAISUT ENERGIAN  
INTERNETISSÄ**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2024

# TIIVISTELMÄ

Korhonen, Tomi

Tulevaisuuden sähköverkon kehitys: Tietotekniset ratkaisut energian internetissä

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 34 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja(t): Riekkinen, Janne

Maapalloa kuormittavien päästöjen vähentämiseksi energian tuotannossa on alettu hyödyntää uusiutuvia energianlähteitä. Tämä energiamurros sekä sähköistyminen vaativat sähköverkolta uudenlaista joustavuutta. Energiamurroksen ja sähköistymisen ratkaisuksi on esitetty äly sähköverkkoa, joka ei kuitenkaan huomio täysin tietotekniikan potentiaalia. Energian internet -käsite kuvaa tietotekniikan yhdistämistä energiaverkkoon kokonaisvaltaisesti. Uudesta energiaverkosta käytetään useita muitakin termejä, joita kaikkia kuitenkin yhdistää informaatioteknologian (IT) hyödyntäminen ja monikerroksinen rakenne. Tietotekniikalla voidaan parantaa energiaverkon hallintaa ja kehittää kokonaan uusia markkinamekanismeja. Tämä tutkielma tarkasteli tulevaisuuden sähköverkkoa energian internetin näkökulmasta sekä siinä tarvittavaa tietotekniikkaa. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka lähdemateriaali rajattiin aluksi informaatioteknologia-alan tutkimukseen ja laajennettiin tarvittaessa käsiteltävien aiheiden tarkentamiseksi. Tulokset osoittivat, että monia energian internetin esittämiä sähköverkkoratkaisuja on alettu hyödyntämään, vaikka termi(t) ei ole noussut laajaan käyttöön. Ratkaisuilla on merkittävää potentiaalia parantaa sähköverkon tehokkuutta ja joustavuutta. Tutkielmassa havaittiin energian internetin tiedonsiirron pohjautuvan olemassa oleviin tietoverkkoihin. Lisäksi se hyödyntää IT-alan kehitystä, joten alan innovaatiot edistävät myös sähköverkon kehitystä. Kysyntä-tarjontajoukon hallinta nousee avainasemaan tulevaisuudessa ja algoritmeilla on ratkaiseva rooli tuotannon optimointiongelman ratkaisussa. Eräs esiin nouseva ratkaisu ongelmaan on virtuaalinen voimalaitos. IT-teknologian kustannusten alenemisen myötä energian internetin ratkaisut voivat yleistyä. Alan tutkimus kaipaakin lisää näkyvyyttä ja yrityksille kannustimia innovoida uusia ratkaisuja.

Asiasanat: energian internet, älyverkko, virtuaalinen voimalaitos, IoT, tuotannon optimointi

## ABSTRACT

Korhonen, Tomi

Development of the future power grid: Information technology solutions in the Energy Internet

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 34 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor(s): Riekkinen, Janne

In order to reduce emissions that pollute the Earth, renewable energy sources have been utilized increasingly in energy production. The smart grid has been proposed as a solution to the energy transition and electrification; however it does not fully exploit the potential of information technology (IT). The concept of the Energy internet or Internet of Energy (IoE) describes the holistic integration of information technology into the energy grid. Various terms are used to describe this new energy network which all include utilization of IT and a multi-layered structure. IT has the potential to enhance the management of the power grid and to develop entirely new market mechanisms. This thesis examined the future electricity grid from the perspective of the energy internet and the information technology it will use. The thesis was conducted as a literature review, initially focusing on research in the field of information technology and then expanding to address specific topics as needed. The results indicated that many solutions proposed by the Energy Internet have been implemented in the electricity grid, although the term(s) itself has not gained widespread usage. These solutions have significant potential to improve the efficiency and flexibility of the electricity grid. The data transmission of the Energy Internet is based on existing data networks. IoE leverages developments in the IT sector, thereby promoting the advancement of the electricity grid. Managing demand-supply flexibility will become a key issue in the future and algorithms will play a crucial role in solving the generation optimization problem. One emerging solution to this problem is a virtual power plant. As the cost of information technology falls, Energy Internet solutions could become more widespread. Research in this area needs more visibility and incentives for companies to innovate new solutions.

Keywords: Energy Internet, Internet of Energy, Smart Grid, Virtual Power Plant, IoT, production optimization

## KUVIOT

KUVIO 1	Pelkistetty kuvaus energian internetin rakenteesta Ghiasi ym. (2022) mukaillen.....	10
KUVIO 2	Malli energiapilven hallinnan rakenteesta (Schaefer ym., 2020) suomennettuna.....	12
KUVIO 3	Energian internetin kolmen tason malli Gu ja Qu (2019) tutkimusta mukaillen.....	12
KUVIO 4	Reuna- ja sumulaskentaa hyödyntävä malli energian internetin datan käsittelyyn eri tasoilla .....	26

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT

1	JOHDANTO .....	6
2	ENERGIAN INTERNET .....	9
2.1	Energian internetin määritelmä ja läheiset käsitteet .....	9
2.2	Energian internetin rakenne .....	11
2.3	Sähköverkkoinfrastruktuuri .....	12
2.3.1	Älysähköverkot .....	13
2.3.2	Hajautettu energian tuotanto ja varastointi .....	13
2.3.3	Sähkömarkkinat ja sähkön laadun ylläpito .....	14
3	TULEVAISUUDEN ENERGIAN INTERNETIN SÄHKÖVERKKO .....	16
3.1	Energian internetin hyödyntämisen mahdollisuudet .....	16
3.2	Energian internetin tietotekniset vaatimukset .....	17
4	TIETOTEKNIikka ENERGIAN INTERNETISSÄ .....	19
4.1	Langattomat verkot .....	19
4.2	Älysähkömittarit ja IoT-laitteet .....	21
4.3	Virtuaaliset voimalaitokset .....	22
4.4	Algoritmit, koneoppiminen ja massadata .....	24
4.5	Pilvilaskenta ja reunalaskenta .....	25
5	YHTEENVETO .....	28
	LÄHTEET .....	31

# 1 JOHDANTO

Maailman talouskasvu tarvitsee jatkuvasti lisää energiaa. Mahdolliset taloudelliset tuottavuusharppaukset, kuten massiivinen tekoälyn hyödyntäminen, vaativat huomattavasti energiaa (IEA, 2024). Energiantuotannon päästöt aiheuttavat kuitenkin merkittävää haittaa ihmisille ja ekosysteemeille (Caballero ym., 2019), minkä myötä fossiilisista polttoaineista on luovuttava. Tämä on johtanut pyrkimykseen kasvattaa uusiutuvan energian tuotantoa merkittävästi.

Uusiutuva energiantuotanto on useimmiten sähköä. Kansainvälisen energiajärjestö IEA:n mukaan sähköenergian osuus maailman energiankulutuksesta kasvaa jatkuvasti ja vuonna 2019 osuus oli 19,7 % (IEA, 2021). Energiamurros, sähköistyminen ja kasvava energian tarve asettavat paineita sähköverkolle. Tulevaisuudessa verkkoa pitää kasvattaa energiatehokkaasti ja skaalautuvasti. IEA (2022) ennustaa sähkön kysynnän kasvavan yli 60 % maailmanlaajuisesti vuoteen 2035 mennessä. Tuotannon laajentamisen lisäksi tärkeä tavoite on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Päästöjä voidaan vähentää helpoiten optimoimalla energiankulutusta tietotekniikan avulla (Himeur ym., 2023). Ratkaisuksi on ehdotettu langattomiin verkkoihin, esineiden internet (IoT) -laitteisiin sekä tekoälyyn pohjautuvia älykkäitä energiajärjestelmiä (Ghiasi ym., 2022). Eräs tällainen älykäs järjestelmä on energian internet (engl. Energy Internet tai Internet of Energy, IoE). Se voidaan hahmottaa tavaksi tai malliksi muodostaa sähköverkko. Tietotekniikan yhdistämistä energiaverkkoihin kuvataan akateemisessa tutkimuksessa myös muilla termeillä. Perinteisesti tutkimusta on pääasiassa kohdistunut älyverkkoihin. Ne ovat kuitenkin vain osa tulevaisuuden ratkaisua ja vaativat toimiakseen uudenlaista tietotekniikkaa, johon energian internet keskittyy tarjoten laajemman näkökulman (Siluk ym., 2023).

Fossiilisen energian osuus maailman energiantuotannosta ylittää edelleen 80 prosenttia (Ritchie & Rosado, 2024). Energiasektori on keskeisessä asemassa muutoksessa ja tietotekniikan soveltaminen juuri siellä luo mahdollisuuden saavuttaa merkittäviä positiivisia ilmastovaikutuksia. IoE-ratkaisuja voidaan hyödyntää muun muassa älyverkoissa, -rakennuksissa ja -kaupungeissa (Himeur ym., 2024). Tavoitteena onkin luoda turvallisempia, puhtaampia ja kes-

tävämpiä energiajärjestelmiä (Siluk ym., 2023). Esimerkki tieto- ja energiantekniikan yhdistämisellä haettavista eduista Suomessa on energiayhtiö Fortumin toimitusjohtajan Pekka Rauramon siirtyminen telekommunikaatioyhtiö Nokian johtoon. Rauramon lausunto: "There is no green without digital" kuvaa vähintään isoja odotuksia alalla (Nokia, 2023).

Viime aikoina esiin nousutta tarvetta hyödyntää tietotekniikkaa energia-sektorilla, osoittaa energian internetin esittely kansainvälisen International Electrical and Electronics Engineers -organisaation erikoisjulkaisussa (Wang ym., 2018). Wangin ym. (2018) mukaan IoE:n käyttöönotossa tulee kiinnittää huomiota vaihtoehtoisten energialähteiden integroimiseen, kehittyneeseen sensoriteknologiaan ja datan yksityisyyden hallintaan. Nämä teemat nousevat esiin myös tässä tutkielmassa. IoE yhdistää energiasektorin sensorit datavetoiseksi verkostoksi, mikä mahdollistaa dynaamisen ja reaaliaikaisen energian tuotannon, jakelun, ja kulutuksen (Himeur ym., 2023). Monet lupaavat energiatehokkuusratkaisut ovat riippuvaisia tieto- ja viestintäteknologiasta (ICT), joten on olennaista, että näiden oma energiatehokkuus on hyvällä tasolla. ICT-sektorin oma energiankulutus oli noin 4 % maailman energiankulutuksesta vuonna 2020 kasvaen maltillisesti (Malmodin ym., 2020).

Tässä kandidaatintutkielmassa esitellään energian internet -konsepti, jonka avulla tietotekniikkaa voidaan hyödyntää energiajärjestelmän eri vaiheissa. Lisäksi selvitetään energian internetille tarvittavaa ja parhaiten soveltuvaa tietotekniikkaa. Olennaisimmat tietotekniikat tunnistetaan älykkäille energiaverkoille tehtyjen mallien perusteella ja tarvittavista tekniikkakategorioista esitellään ja arvioidaan alalle sopivia ratkaisuja. Tietoteknologioita tarkastellaan energian internetin tutkimuskontekstissa, mikä mahdollistaa teknologioiden arvioinnin aiheen sisäisessä kehyksessä.

Tutkielman tavoitteena on selvittää, mikä on energian internet sekä mitä tietoteknisiä ratkaisuja on energiaverkon kehittämiseksi. Aiemmissa kokoavissa tutkimuksissa aiheen rajaus on ollut hyvin laaja. Niissä ei myöskään ole keskitytty säännönmukaisesti kaikkein olennaisimpiin teknologioihin. Tämä tutkielma kokoakin tuoreen yhteenvedon aiheen aikaisemmasta tutkimuksesta. Tutkielman tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- 1) *Millainen on tulevaisuuden sähköverkko energian internetin näkökulmasta?*
- 2) *Mitä tietoteknisiä ratkaisuja energian internet tarvitsee?*

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Lähteitä on etsitty pääasiassa SCOPUS- ja Web of Science -tietokannoista sekä JYKDOK-kirjastosta. IoE on käsitteenä monialainen, joten tutkimuksia alettiin tarkastella rajaamalla tietokantahakuja "Computer science" -kategorian tai sitä vastaavaan rajaukseen. Tämän lisäksi aihetta on tutkittu runsaasti "Engineering"-kategoriassa. Yksittäisten aiheiden tarkentamiseksi hakua laajennettiin tarpeen mukaan. Päähakusanoja ovat olleet "Internet of Energy" ja "Energy Internet". Lisäksi on hyödynnetty näiden yhdistelmiä yksittäisiin teknologioihin, kuten esineiden internetiin.

Esitetyillä termeillä aineistoa on saatavilla rajallisesti, mutta käytetyt teolliset artikkelit ovat vertaisarvioituja. Lisäksi lähteiden valinnassa painottui julkaisukanava ja -vuosi. Vertailuna Scopuksesta löytyi keväällä 2024 noin 160 tutkimusta "Internet of Energy" asetettuna otsikon hakusanaksi vuodesta 2007 lähtien. "Energy Internet" haku tuotti 1100 tulosta kun taas "Smart grid" hakusanalla vastaavalla ajanjaksolla oli 18 800 osumaa. Energian internet ei siis ole saanut valtavaa huomiota tutkimuksessa. Se on kuitenkin edelleen sopiva ja ajankohtainen termi kuvaamaan energiasektorin muutosta, eikä korvaavaa termiä lähdemateriaalista löydy. Myös aiheen tutkimuksissa tunnistettiin lähdemateriaalin niukkuus (Joseph & Balachandra, 2020; Siluk ym., 2023).

Termi "Internet of Energy" mainitaan hyödynnettyihin tietokantoihin sekä Google Scholariin tehdyn katsauksen perusteella ensimmäisen kerran vuonna 2007 Karnouskosin ja Terzidisin (2007) konferenssipaperissa ja toistuvasti artikkeleissa ja konferenssipapereissa vuodesta 2010 eteenpäin. "Energy Internet" -termi esitetään samoihin aikoihin Tsoukalasin ja Gaon (2008 a, 2008b) konferenssipapereissa. Toisaalta Josephin ja Balanchandran (2020) sekä Bieganskan (2024) mukaan Rifkinin (2011) teos *"The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world"* olisi ensimmäinen "energy internet" -konseptin esittely. Rifkin mielsi energia internetin kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi, kun taas Tsoukalas näki sen älyverkkojen seuraajana (Joseph & Balanchandra, 2020). Nykyisen laaja-alaisen tutkimuksen voidaan nähdä tukevan tulkintaa, että energian internet on kattokäsite, jonka osa esimerkiksi älyverkot ovat.

Tutkielman toisessa luvussa esitellään energian internet sille annettujen määritelmien ja mallien sekä tarvittavan infrastruktuurin kautta. Infrastruktuurin vaatimia osia ovat älysähköverkot, uusiutuva energiantuotanto sekä sähkömarkkinat. Luku taustoittaa tutkimuskysymystä yksi. Luvussa kolme käsitellään ja arvioidaan erilaisten teknisten ratkaisujen soveltuvuutta energian internetille ja niiden roolia tulevaisuudessa sitoen ensimmäisen tutkimuskysymyksen vastauksen yhteen. Neljännessä luvussa vastataan toiseen tutkimuskysymykseen kuvaamalla energian internetille olennaisimmat ja lupaavimmat teknologiat. Viimeisenä viides luku luo yhteenvedon aiheesta ja muodostaa johtopäätökset. Viidennessä luvussa käsitellään myös tutkielman rajoitteita ja jatkokäsitelmäkysymyksiä. Tämän tutkielman tavoitteena on antaa yleiskuva tutkielman tekohetkestä eteenpäin relevanteista informaatioteknologioista ja ratkaisuksista energian internetille.



## 2 ENERGIAN INTERNET

Tässä luvussa tarkastellaan, millainen tulevaisuuden sähköverkko olisi energian internetin näkökulmasta. Aluksi luku esittelee energian internetille annettuja määritelmiä sekä esittelee kaksi sen rakennetta hahmottelevaa mallia. Sitten käsitellään energian internetin tarvitsemaa sähköverkkoinfrastruktuuria, joka sisältää älysähköverkot ja hajautetun energiantuotannon. Lopuksi kuvataan energian internetiä koskevat perusteet sähkömarkkinoista ja sähköverkon tasapainottamisesta.

### 2.1 Energian internetin määritelmä ja läheiset käsitteet

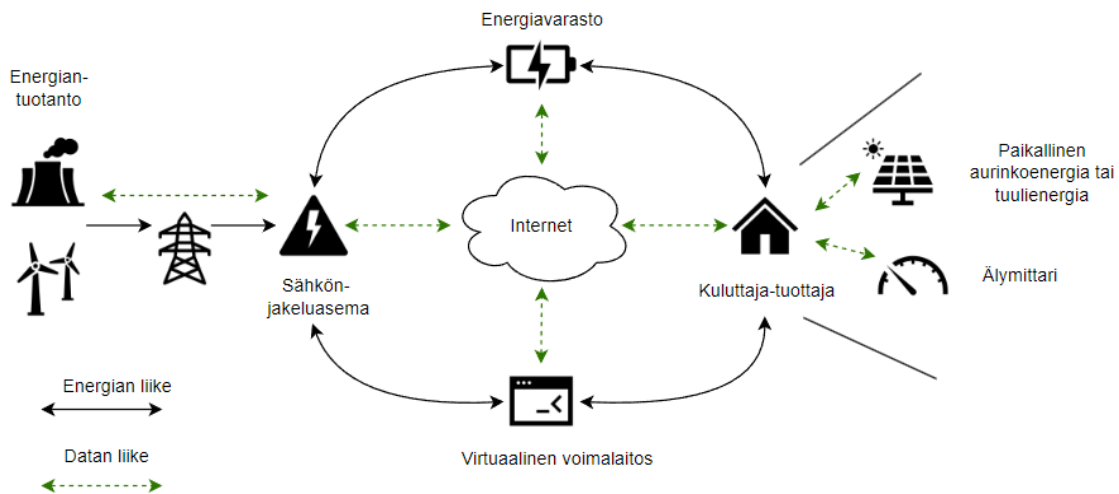
Energian internet on Yaghmaee Moghaddamin ja Leon-Garcian (2018) määritelmän mukaan: "osa esineiden internetiä, joka kattaa kaikki sähköenergiajärjestelmien näkökohdat ja tarjoaa turvallisen yhteyden ja yhteen toimivuuden sähköverkon ja internetin välillä". Siluk ym. (2023) lähestyvät tätä määritelmää käytettyjen teknologioiden kautta. He etsivät sopivaa käsitettä energiajärjestelmälle, jolle on ominaista pilvilaskennan, esineiden internetin ja massadatan käyttö. Yksi eniten tutkimuksista esiin nouseva termi on tällöin IoE, joka heidän mukaansa luo perustan älykkäille kaupungeille perinteisen tietoverkon kautta ja täydentyy uusiutuvan energian integraatiolla (Siluk ym., 2023). Kabalci ym. (2019) tutkimus taas osoittaa IoE:n koostuvan älyverkoista, kommunikaatioverkoista ja älykkäistä elementeistä, kuten sensoreista.

Yksi ensimmäisistä määritelmistä on vuodelta 2011. Josephin ja Balachandran (2020) mukaan Rifkin (2011) määritteli energian internetille tuolloin neljä vaatimusta tai tavoitetta. Ensimmäiseksi uusiutuvien energianlähteiden tulee olla energian päälähde. Toiseksi energian internetin tulee tukea näiden sekä energiavarastojen laajaa integraatiota. Kolmannen ja neljännen tavoitteen mukaan sen tulee tukea energian ja tiedon kaksisuuntaista kulkua sekä tulevaisuuden sähköistä liikkumista (Joseph & Balachandra, 2020).

Energian internet muistuttaa rakenteeltaan internetiä. Samalla tavoin kuin internet sisältää tiedon luomista ja siirtämistä, energian internet sisältää energian tuotantoa, jakelua ja kulutusta (Hannan ym., 2018). Tsoukalasin ja Gaon (2008a) hahmottelemassa energian internetissä energia kulkisi kuin datapaketit internetissä. Monille energian internetille ehdotetuille teknologioille löytyy vastine tietoverkosta. Esimerkiksi energiareitittimen tehtävä vastaisi internetreitittimen tehtävää (Hannan ym., 2018). Suuri osa IoE-tutkijoista tulee tietoteknisiltä aloilta, mikä selittää samankaltaisuutta.

Kootuista kuvauksista havaitaan, ettei tarkkaa määritelmää ole, mutta informaatioteknologian hyödyntäminen on olennaisessa roolissa kaikissa kuvauksissa. Energian internetissä siis virtaisi kaksisuuntaisesti energiaa ja dataa sekä siirrettäisiin rahaa (Joseph & Balachandra, 2020). Energian internetin rakennetta kuvataan kuviossa 1. Sähköverkon rakenteesta on kuvattu olennaisimmat osat, jotka puolestaan vaihtavat dataa internetin välityksellä. Tämän älykkään tiedonsiirron myötä energian internet syntyy.

Alan tutkimuksessa esiintyy Siluk ym. (2023) havaintojen perusteella muutamia eri termejä kuvaamaan energian internetin kaltaista konseptia. Eniten käytetty kattotermin heidän mukaansa on älykäs energia (engl. Smart Energy). Smart Energy viittaa älykkäiden energiaverkkojen käyttöön, jossa eri sidosryhmät, kuten tuottajat ja asiakkaat, koordinoivat toimintaansa kestävän, kustannustehokkaan ja turvallisen sähkötoimituksen varmistamiseksi. Toinen käytetty termi oli energiapilvi (engl. Energy Cloud), joka toimii pilvipohjaisena energianhallintajärjestelmänä energiaverkon eri toimijoiden integroimiseksi. Tällöin toimijat voivat tietotekniikan avulla luoda omia älyverkkoja (Siluk ym., 2023).



KUVIO 1 Pelkistetty kuvaus energian internetin rakenteesta Ghiasi ym. (2022) mukailten

## 2.2 Energian internetin rakenne

Energian internetin rakenne koostuu älykkäistä sähköverkoista, joissa on hajautettuja energianlähteitä, varastointijärjestelmiä sekä sähköverkon komponentteja, kuten älymittareita ja muuntimia (Gu & Qu, 2020). Näihin perustuvat älyverkot vahvistaisivat energiajärjestelmän kestävyyttä. Energian internet tarjoaa pohjan myös muille energiaa säästäville ratkaisuille kuten rakennusten energianhallintajärjestelmille, joiden avulla rakennusten energiankäyttöä voidaan parantaa (Hannan ym., 2018).

Energian internetille on hahmoteltu erilaisia malleja, joista useimmat koostuvat kerroksista. Seuraavaksi esitellään kaksi mallia, joista Schaefer ym. (2020) kehittämä energiapilven hallintamalli on kattavampi (kuvio 2). Malli on kehitetty "Energy Cloud" -konseptille, mutta se sisältää samoja keskeisiä osia kuin energian internet käsite. Malli sisältää seitsemän kerrosta ja pyrkii kuvaamaan tiedon siirtymisen IoE-sensoreilta energian hallintajärjestelmään ja muihin sovelluksiin. Mallin kerrokset kattavat fyysiseen energiainfrastruktuurin ja datan käsittelyn.

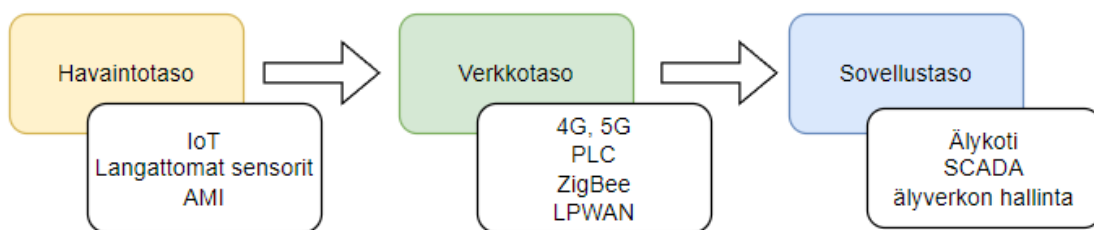
Schaefer ym. (2020) mallin alin eli fyysinen kerros kuvastaa kaikkea energiaverkon infrastruktuuria, kuten tuotantolaitoksia, kodinkoneita ja älymittareita. Sumu- tai reunakerros keskittyy käsittelemään IoT-laitteista tulevan datan ennen pilvipalveluun lähettämistä. Verkkokerros sisältää kaikki datan siirtoon vaadittavat tekniikat, kuten matkapuhelinverkot sekä tarvittavat protokollat. Pilvipalvelukerros suorittaa datan tallennuksen ja hallinnan. Tämän voi toteuttaa ulkopuolinen palveluntarjoaja tai energiayhtiö itse. Palvelukerros analysoi ja valmistelelee tämän datan käytettäväksi. Istuntokerros mahdollistaa kommunikoinnin internetissä rajapintojen ja protokollien, kuten HTTP:n avulla. Ylimpänä oleva sovelluskerros näkyy loppukäyttäjälle ja tarjoaa palvelut, kuten älypuhelinsovellukset (Schaefer ym., 2020). Pilvikerros ja pilvipalvelukerros toimivat läheisesti yhdessä ja voitaisiin mallissa mahdollisesti yhdistää.

Lisäksi mallissa on neljä tuki tai hallintaosaa, jotka toteuttavat energiajärjestelmän hallinnan ulkopuolisia, mutta välttämättömiä tehtäviä (Schaefer ym., 2020). Tukiosat voivat liittyä mihin tahansa kerrokseen ja niitä kuvataan pystypalkein. Olennainen toimija on välittäjä eli käytännössä energiemarkkinat, jotka hoitavat hinnoittelua ja kulutuspiikkejä. Lisäksi turvallisuus ja yksityisyys -osa koskee kaikkia kerroksia. Kolmannen osapuolen palvelut, kuten sähköyhtiöt, ylläpitävät energia pilveä (Schaefer ym., 2020). Lisäksi heidän mallissansa on pilviauditoija, joka suorittaa koko järjestelmään toimivuus- ja turvallisuustarkastuksia. Ulkopuolista auditoijaa tarvittaisiin hajautetussa energiajärjestelmässä luottamuksen säilyttämiseksi. Vaikka malli on luotu energian pilven hallintaa varten se kattaa kaikki energian internetin olennaiset toiminnallisuudet sekä auttaa hahmottamaan vaadittavat teknologiat.



KUVIO 2 Malli energiapilven hallinnan rakenteesta (Schaefer ym., 2020) suomennettuna.

Toisena mallina esitellään karsitumpi kolmen tason mallin energian internetin rakenteeksi. Kolmen tason mallissa (kuviokuva 3) pohjalla on havainto- eli laitetaso kuvaten fyysisiä sensoreita ja IoT-laitteita (Gu & Qu, 2020). Heidän mukaansa tällä tasolla tiedot analysoidaan. Taso mahdollistaa myös uusien laitteiden lisäämisen. Seuraavana oleva verkkotaso mahdollistaa datan siirron havaintotasolta eteenpäin. Verkkotaso voi sisältää erilaisia protokollia, reititystekniikoita ja verkkoratkaisuja tiedonsiirron optimoimiseksi. Tätä tietoa hyödyntää sovellustaso, joka tuottaa datasta hyödyllistä tietoa ja toiminnallisuuksia (Gu & Qu, 2020). Tässä mallissa on samat keskeiset osat kuin Schaefer ym. (2020) mallissa. Malli ei kuitenkaan ole yhtä laaja eikä tarkka. Siitä puuttuu esimerkiksi tiedon prosessoinnille oma kerros, eikä se huomioi energiamarkkinaa.



KUVIO 3 Energian internetin kolmen tason malli Gu ja Qu (2019) tutkimusta mukailien.

## 2.3 Sähköverkkoinfrastrukturi

Tämä alaluku kuvaa energian internetin tarvitseman sähköverkkoinfrastruktuurin olennaisimpia osia. Energian internetin fyysinen kerros tarvitsee älysähköverkon energian siirtoa varten sekä uusiutuvaa energiaa sähköntuotantoa

varten. Lisäksi tarvitaan sähkömarkkinat sähkönkulun ohjaamiseksi ja jakamiseksi.

### 2.3.1 Älysähköverkot

Älysähköverkot ovat lähin teknologia energian internetille (Ghiasi ym., 2022). Älysähköverkot voidaan tulkita osaksi energian internetiä tai sen edeltäjäksi (Joseph & Balachandra, 2020). Myös Silukin ym. (2023) mukaan ne voidaan nähdä energian internetin yhtenä kerroksena. He erottavat älyverkot energian internetistä sillä, että ne kiinnittävät huomion sähköjärjestelmän eri osiin ja huomioivat laajuudessaan eri tasoja (Siluk ym., 2023). Saman tyylliseen päätelmään tulevat Kabalci ym. (2019), joiden mukaan älyverkot keskittyvät sähköverkkojen digitalisoimiseen, kun taas energian internet kattaa laajemman ja integroidun näkökulman energiaverkkoon. Caballeron ym. (2019) mukaan älyverkot voidaan nähdä hybridijärjestelmänä, joka integroi sähköverkon monimuotoiseen kommunikaatioteknologiainfrastruktuuriin. Älyverkko ei siis huomio energian internetin kerroksisuutta ja sen vaatimaa datan prosessointia.

Perinteisistä sähköverkoista älyverkot eroavat siten, että niissä tieto kulkee kaksisuuntaisesti (Abrahamsen ym., 2021). Perinteisessä sähköverkossa tieto kulkee vain tuottajalta asiakkaalle. Älykkäät ratkaisut, kuten sähkömittarit mahdollistavat muun muassa ongelmien havaitsemisen tai verkon automaattisen testauksen (Abrahamsen ym., 2021). Heidän mukaansa älyverkkoon siirtyminen ei tapahdu myöskään kerralla vaan on enemmänkin verkon evoluutiota. Suomenkielisessä tutkimuksessa sekä älysähköverkko että älyverkko termejä käytetään viittamaan samaan asiaan.

Älyverkot ovat olleet runsaan tutkimuksen kohteena verrattuna energian internetiin ja muihin sen kaltaisiin älykkäisiin energijärjestelmiin. Älyverkoille on useita standardoituja malleja, joita ovat kehittäneet esimerkiksi eri virastot (Abrahamsen ym., 2021). Malleja yhdistävät samankaltaiset osa-alueet tai tasot (Etherden ym., 2016). Älyverkkojen osana voi olla mikroverkkoja, jotka voivat toimia itsenäisesti tai olla osa suurempaa sähköverkkoa. Koska ne voivat toimia irrallaan muusta verkosta niitä voidaan käyttää myös sähkökatkojen aikana (Zhang ym., 2019).

### 2.3.2 Hajautettu energian tuotanto ja varastointi

Suurin muutos sähköverkkoinfrastruktuurissa tulee olemaan siirtymä suurista yksittäisistä fossiilisen energian voimalaitoksista hajautettuihin uusiutuvan energian voimalaitoksiin (engl. Distributed Renewable Energy System, DRES). Hajautettu tuotanto tarkoittaa, että sähkö tuotetaan lähellä kulutusta ja yksittäinen voimalaitos on kapasiteetiltaan alle 300 megawattia (Gu & Qu, 2020). Tehorajaus ei ole yksimielinen, mutta olennaista on ero isotehoisiin keskitettyihin voimalaitoksiin.

Hajallaan olevan uusiutuvan energiatuotannon lisäksi tuotannon vaihtelu ja epäsäännöllisyys voivat vaikuttavat sähkön laatuun heikentävästi sekä vaatia uudenlaista joustavuutta sähköverkolta (Ghiasi ym., 2022). IEA:n (2022) mu-

kaan 90 % sähköntuotannon kasvusta oli tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä. Uusiutuvat energianlähteet eivät siis vielä pysty korvaamaan sähkön vuosittaista kasvua, eivätkä varsinkaan koko energiantarvetta. Energia-ala kaipaakin innovaatioita tuottamaan sähköverkolle perusteita. Tällaisia voisivat olla esimerkiksi pienydinvoimalat tai vety (Borenus ym., 2021). Useat valtiot aikovatkin kasvattaa merkittävästi ydinvoimakapasiteettiaan (Department of Energy, 2024). Uudet reaktoryypit, kuten modulaariset pienydinvoimalat vaikuttaisivat olevan yhdistettävissä energian internetiin.

Aurinkosähkön kohdalla lisääntyvä ajoittainen tuotanto voi johtaa esimerkiksi Pohjoismaissa siihen, että kesäisin linjat ylikuormittuvat, kun taas osan vuodesta tarvitaan sähköä verkosta (Bieganska, 2024). Lisäksi kulutuspiikit ja uudet teknologiat, kuten liikenteen ja lämmityksen sähköistyminen haastavat energiajärjestelmää (Borenus ym., 2021; Joseph & Balachandra, 2020). Nämä tekijät vaativat älykkäitä ratkaisuja ja lisäävät energiaverkon osapuolten keskinäisriippuvuutta. Lisäksi uusiutuva energiantuotanto tarvitsee varastointia, akkujen tai generaattoreiden muodossa. (Gu & Qu, 2020).

Perinteiseen energian kierron ryhmittelyyn Schaefer ym. (2020) lisäävät varastoinnin, jolloin ryhmittely sisältäisi energian tuotannon, siirron, varastoinnin ja kulutuksen. Sähkön varastoinnista odotetaan uutta merkittävä elementtiä, jonka integrointi on energian internetin keskiössä. Varastointi tasaa sähkön kysyntää ja tarjontaa (Ghiasi ym., 2022). Lisäksi sillä voidaan korvata perinteisten keskitettyjen sähkögeneraattoreiden poiston myötä vähenevää inerttia eli pyörivään massaan varastoitunutta kineettistä energiaa (Borenus ym., 2021). Tällä energialla on ylläpidetty sähköverkon taajuutta. Tulevaisuuden energiavarastoja voidaan toteuttaa esimerkiksi mekaanisilla-, kemiallisilla- tai lämpövarastoilla (Yaghmaee Moghaddamin & Leon-Garcian, 2018). Bhandari (2023) toteaa, että näiden käytössä tulee huomioida suuret erot elinkaarikustannuksissa. Toiseksi vain pumppuvesivoimaloilla on toteutettu merkittävää varastointikapasiteettia (Bhandari, 2023).

Hajautetun tuotannon etuna on, että se voidaan yhdistää suoraan kuluttajaan, jolloin se ei ole riippuvainen muusta verkosta. Tuottamalla ja kuluttamalla energia lähellä toisiaan sähkön siirrosta aiheutuvaa siirtohävikkiä pystytään minimoimaan. Vuonna 2014 energian siirtohävikki vaihteli maiden välillä alle 3 %:n ja yli 25 %:n välillä. Maailman keskiarvo oli noin 8 % (World Bank, ei pvm.). Tilaston mukaan Suomessa hävikki oli vain 3 %, jota voidaan pitää erinomaisena tasona. Ero on selkeästi nähtävillä kehittyneiden maiden ja kehittyvien maiden välillä. IoE:n mahdollistamalla älykkäällä reitityksellä siirtohävikkiä voidaan pienentää kaikkialla.

### 2.3.3 Sähkömarkkinat ja sähkön laadun ylläpito

Sähkömarkkinat ovat keskeisessä osassa IoE-konseptia, sillä sähkön hinnoittelumekanismilla saadaan tarvittavaa joustoa verkkoon. Esimerkiksi Schaefer ym. (2020) energiajärjestelmän hallintamalli edellytti tukiosia, kuten toimivan sähkömarkkinan. Toimivilla markkinoilla tasapainotetaan verkkoa ja varmistetaan kysynnän joustavuus, jota esimerkiksi sähköautot tarjoavat akkukapasiteetil-

laan (Himeuer ym., 2024). Tulevaisuudessa energia ei virtaa välttämättä vain verkosta ajoneuvoihin vaan myös ajoneuvoista takaisin verkkoon.

Energian internet tuo energiamarkkinoille uudenlaisen toimijan, tuottajan ja kuluttajan yhdistelmän (engl. prosumer) (Joseph & Balanchandra, 2020). Energian internet mahdollistaakin kuluttajien ostaa, myydä ja jakaa energiaa integroidulla tavalla (Gu & Qu, 2020). Tämä kuluttajien kaksoisrooli luo energiamarkkinoille tarpeen uusille teknologisille innovaatioille (Siluk ym., 2023).

Kysynnän joustavuudelle olennaista on reaaliaikainen hinnoittelu. Euroopan unionissa on tavoitteena siirtyä 15 minuutin sähkön hinnoitteluun (Bhandari, 2023). Tämä mahdollistaa entistä tarkemman kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen. Pohjoismainen sähkömarkkina on hyvä esimerkki tulevaisuuden energiamarkkinoista, sillä se on yksi maailman kehittyneimmistä sähkömarkkinoista ja uusituvan sähkön osuus tuotannosta on suurta (Borenus ym., 2021). Bhandar (2023) toteaa pohjoismaisesta kaupankäynnistä volyymiltaan suurimman osan olevan huomisen kaupankäyntiä (engl. day-ahead). Pienemmän osan hän kuvaa olevan lyhyemmän aikaikkunan päivän sisäistä kauppaa (engl. intraday), jolla tasapainotetaan verkkoa. Tämän jälkeen markkina-algoritmi määrittelee energiantuotannon ajoittamisen ennustetun kysynnän perusteella (Joseph & Balanchandra, 2020). Kysynnän reaaliaikaista korjaamista varten käytetään päivän sisäistä energian toimitusalgoritmia.

Energian internetin ratkaisujen tulee varmistaa sähkön kulutusta vastaava määrä sekä laatu. Näitä laadun mittareita ovat muun muassa jännitteen ja taajuuden vaihtelut. Kansainvälisten sähköstandardien mukaan sähkön laatu on sähkölähteen ominaisuus, joka normaaleissa olosuhteissa ei haittaa kuluttajan työtä (Gu & Qu, 2020). Taajuuden ylläpitoon on erilaisia ratkaisuja kuten perinteinen inertian hyödyntäminen tai tietyt uudet akkuteknologiat. Sähkön varastointiratkaisuja on eri tarkoituksiin. Ne kuitenkin kilpailevat muuta sähköntuotantoa vastaan hinnassa, mikä voi estää niiden yleistymistä (Bhandari 2023).

Tällä hetkellä energiamarkkinat ovat keskittyneet isoille energiayhtiöille. Sekä energiaverkot, että tietoliikenneverkot ovat pitkälti luonnollisia monopoleja eli niitä hallitsee vain yksi toimija, sillä verkkoja on kannattavaa rakentaa vain yksi. Euroopan parlamentissa (2023) on kuitenkin ajettu markkinoiden vapautumista, jolloin energian tuotantoa, jakelua ja myyntiä on alettu eriyttää eri yhtiöihin. Unionin tavoitteena on ollut varmistaa oikeudenmukainen markkinoillepääsy, korkea kuluttajansuoja sekä riittävä taso verkkoyhteyksiä ja tuotantokapasiteettia. Telekommunikaatio sektorilla markkinoiden vapautuminen taas tapahtui ennen sääntelyä yleisten standardien sekä uusien yritysten alalle tulon myötä (Borenus ym., 2021; Euroopan parlamentti, 2023). Energia-alalla kehitystä on ohjannut regulaatio eikä uusia mullistavia toimintamalleja ole syntynyt samalla tavalla. IoE mahdollistaisikin uusia kuluttajan asemaa parantavia innovaatiota.

### 3 TULEVAISUUDEN ENERGIAN INTERNETIN SÄHKÖVERKKO

Tämä luku laajentaa näkökulmaa energian internetin mahdollistamaan sähköverkkoon. Luku yhdistää edellisen luvun energian internetin kuvauksen erilaisiin vaihtoehtoisiin hyödyntämistapoihin. Luvussa tarkastellaan ensin, miten energian internetiä voidaan hyödyntää, ja mitä hyötyjä se tarjoaa. Tämän jälkeen tarkastellaan, mitä tietotekniikkaa energian internet vaatii saavuttaakseen sille määritellyjä tavoitteita. Sitten näiden teknisten ratkaisujen soveltuvuutta energian internetille arvioidaan.

#### 3.1 Energian internetin hyödyntämisen mahdollisuudet

Teknologian ja yhteiskunnan kehittyminen luovat vaihtoehtoisia skenaarioita energian internetin ja älyverkon hyödyntämisen mahdollisuuksiin. Tulevaisuuden teknologioissa voidaan havaita suuntauksia, kuten siirtyminen hajautettuihin (engl. decentralized) järjestelmiin. Näkyvä esimerkki tästä on kryptovaluuttaliikehdintä, mutta sama voisi tapahtua myös energiaverkoille (Himeur ym., 2023). Himeur ym. (2023) uskovat, että tulevaisuudessa voidaan odottaa älykkäämpiä hajautettuja ympäristöjä, jotka vaikuttavat jokapäiväiseen elämäämme.

Borenius ym., (2021) tutkimuksessa luotiin vaihtoehtoisia skenaarioita Suomen sähköverkon kehitykselle ja tutkittiin näiden vaikutuksia matkapuhelinverkkojen kehitykseen. Boreniuksen ym. tutkimuksen perusteella sähköverkon tulevaisuus on riippuvainen monista trendeistä ja epävarmuuksista. Skenaarioihin vaikuttavat näiden yhdistelmät sekä käytetyt energiantuotanto- ja verkontasapainotusmuodot (Borenius ym., 2021). Tästä päätellen energian internettiin vaikuttavat niin sosiaalinen ryhmittäminen, uudet teknologiat kuin energiantuotannon kehittyminen. Kaikissa skenaariossa sähkö- ja kommunikatioverkko integroituivat tiiviimmin.

Heidän tutkimuksensa tuotti skenaariota kahdesta näkökulmasta, jotka olivat asiakaskeskeinen ja verkonhallintakeskeinen. Tietotekniikkaa voidaankin



tulevaisuudessa hyödyntää joko asiakkaiden itsehallinnan lisäämiseksi tai verkon reaaliaikaiseen hallintaan (Borenus ym., 2021). Yhdessä skenaariossa energiayhteisöjen syntyyn ajavat kasvavat energiakustannukset tai kansalaisten haluttomuus rahoittaa sähköverkkojen uusintaa. Toisaalta toisessa skenaariossa tiettyjen teknologisten vaatimusten täytyessä kehitys voisi johtaa teknologian mahdollistamaan kokonaisvaltaiseen palvelukokemukseen (Borenus ym., 2021).

Caballero ym. (2019) ovat esittäneet kuluttajatuottajien yhteisöjen luomista älysähköverkon avulla. He hyödyntävät ryhmittelymallia kuluttajatuottajien jakamiseksi ryhmiin ja IoT-laitteiden energianmittausta tuotanto- ja kulutusmallien johtamiseen. Näiden perusteella luodaan kulutukseltaan tasapainoisia ryhmiä (Caballero ym. 2019). Mallilla tasattaisiin kulutushuippuja merkittävästi ja voitaisiin luoda yhteisöllisyyttä. Koska suurin osa ihmisistä asuu ja tulee asumaan kaupunkien kerrostaloista, näistä muodostuisi luonnollisia energiayhteisöjä tulevaisuudessa (Borenus ym., 2021).

Esitellyt energiayhteisöt vaatisivat soveltuvan sähköverkkorakenteen, joista kolme tutkituinta ovat virtuaaliset voimalaitokset, mikroverkot ja tavoitteelliset kuluttaja-tuottajaryhmät (Caballero ym., 2019). Zhang ym. (2019) esittivät tutkimuksessaan samoja rakenteita ja lisäsivät niihin verkon tasapainottamisen ratkaisuja. Näistä virtuaalinen voimalaitos vaikuttaisi parhaiten skaalautuvalta valtakunnalliseen sähköverkkoon. Lisäksi se sisältää jo itsessään mekanismeja verkon tasapainottamiseen. Verkon rakenteeseen voivat radikaalisti vaikuttaa häiritsevät kehityskulut, kuten talousvaikeudet, kyberuhat tai kansainvälisten yritysjiättien tulo markkinoille (Borenus ym., 2021). Näistä voi seurata suuria vaikutuksia energian internetin käyttöönottoon.

### **3.2 Energian internetin tietotekniset vaatimukset.**

Onnistuakseen energian internet tarvitsee edistyneitä kommunikaatio-, energian hallinta- ja maksuteknologioita (Joseph & Balachandra, 2020). Näistä kommunikaatioteknologia yhdistettynä energianhallintaan on tutkielman näkökulmasta mielenkiintoinen. Myös Schaeferin ym. (2020) tutkimuksen mukaan älykkäiden energijärjestelmien yleistyminen vaatii useita avaintekijöitä. Heidän tutkimuksensa perusteella tällaisia ovat muun muassa teknologian ja laskennan skaalautuvuus. Lisäksi datan käsittelyn paraneminen ja viiveen pieneeminen. Tietotekniikan mahdollistama palvelujen muokkaaminen kuluttajalle parantaa niiden laatua. Käyttöönoton laajenemiseksi olennaista on moninaisten teknologioiden yhteentoimivuus ja laitteiden alenevat hinnat. Näiden saavuttaminen vaatii merkittäviä investointeja energia- ja tietoverkkoinfrastruktuuriin (Schaefer ym., 2020).

Erilaisten IoE-laitteiden monimuotoisuuden takia yhteentoimivuus on keskeisessä asemassa energian internetissä. Siksi energiaverkon kannattaa perustua avoimiin rajapintoihin (Etherden ym., 2016) ja kaupallisiin teknologioihin (Himeur ym., 2024). Myös Abrahamsenin ym. (2021) tutkimuksen perusteella järjestelmän osien tulee olla korvattavissa muiden valmistajien vastaavilla

osilla. Lisäksi yhteentoimivuus tulee varmistaa sekä nykyisiin että tuleviin laitteisiin ja viestintäprotokollisiin (Abrahamsen ym., 2021). Eri valmistajien laitteiden välisen datansiirron standardit ovatkin välttämättömyys täysin integroidun älyverkon saavuttamiseksi (Abrahamsen ym., 2021; Bui ym., 2012). Tämä vaatimus koskee myös energian internetiä.

Kun nämä moninaiset vaatimukset yhdistetään luvussa kaksi esiteltyyn Schaefer ym. (2020) energiapilven hallinta -malliin (kuvio 2) saadaan käsitys tarvittavista teknologioista ja tämän tutkielman näkökulmasta erityisesti tietotekniikoista. Valitut teknologiat toteuttavat yhtä tai useampaa mallin kerrosta tai tukiosaa. Kaikille mallin osille ei kuitenkaan tunnistettu erillistä teknologiaa. Lisäksi valittujen teknologioiden yleisyys lähteissä oli merkittävää, mikä viittaa niiden tärkeyteen energian internetin kannalta. Toisaalta tietyt aiheet ovat saataneet herättää enemmän tutkimusintoa tai olla houkuttelevampia rahoittajien silmissä.

Edellä mainituista syistä esimerkiksi Rifkinin (2011) ja Himeurin ym. (2024) esittelemät sähköauton lataussovellukset eivät ole välttämättömiä energian internetille. Muita ehdotettuja teknologioita IoE:lle ovat lohkoketjuteknologiat (Ghiasi ym., 2022; Himeur ym., 2024; Joseph & Balachandra, 2020), jotka liittyvät verkon kyberturvallisuuteen ja anonymiteettiin. Kyberturvallisuus ja markkina-alusta tulee järjestää skaalautuvasti. Toistaiseksi lohkoketju ei täytä näitä vaatimuksia eikä ole laajasti edustettuna tutkimuksissa. Hajautetulla lohkoketjulla voitaisiin mahdollisesti muuttaa verkon nykyistä keskitettyä rakennetta.

Seuraavassa luvussa tullaan tarkastelemaan teknologioita energian internetin käyttöön soveltuvuuden näkökulmasta. Gun ja Qun (2020) mukaan energian internetin laitteiden erikoispiirteitä ovat vaatimus toimintavarmuudesta ja pitkästä toiminta-ajasta, johtuen laitteiden hajaantuneesta ja kaukaisesta sijainnista. Tällöin ne eivät voi kuluttaa paljoa energiaa. Avointen rajapintojen vaatimuksen vuoksi suurin osa esitetyistä teknologioista ei ole kehitetty ainoastaan energian internetille, vaan niissä hyödynnetään yleistä tietotekniikan kehitystä.

Tutkielman aiemmissa luvuissa on esitetty, millaisia toimintamalleja Pohjoismaisessa sähköverkossa jo käytetään. Monet näistä elementeistä, kuten hyvä älysähkömittarien kattavuus, kehittynyt sähkömarkkina ja merkittävä uusiutuvan energiantuotannon kapasiteetti, ovat energian internetin osia osoittaen niiden validiteetin. Toisaalta Joseph ja Balachandra (2020) väittävät ettei energian internetiä ole missään käytössä, mutta toteavat tarvittavien teknologioiden olevan olemassa. Niinpä osia energian internetistä vaikuttaisi olevan käytössä.

## 4 TIETOTEKNIikka ENERGIAN INTERNETISSÄ

Tässä luvussa tarkastellaan, edellisen luvun perusteluiden mukaan valittuja, energian internetin tarvitsemia tietoteknisiä ratkaisuja. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään älykkään energiaverkon datan siirrolle välttämättömiä langattomia verkkoteknologioita. Seuraavaksi tarkastellaan äly sähkömittareiden ja IoT-laitteiden hyödyntämistä. Alaluku kolme esittelee virtuaalisen voimalaitoksen potentiaalisena ratkaisuna energian internetin sähköverkon luomiseksi. Alaluku neljä käsittelee laskentamalleja ja algoritmeja sekä massadatan hyödyntämistä, joita muun muassa virtuaalinen voimalaitos voi käyttää. Viimeiseksi alaluku viisi esittelee vaihtoehtoisia verkkorakenteita laskennalle.

### 4.1 Langattomat verkot

Langattomat verkot ovat keskeinen osa energian internetiä mahdollistaen kasvavan tiedonsiirron laitteiden, kuten älymittareiden, sähköverkon valvontajärjestelmien ja laskentalaitteiden välillä. Tutkimukset indikoivat, että 5G-verkot ovat jopa 90 % energiatehokkaampia per siirretty datayksikkö kuin 4G-verkot (Himeur ym., 2023). Uusilla tietoteknologioilla onkin merkittävä potentiaali tiedonsiirron energiatehokkuuden parantamiseksi.

Datan käytön määrä on kasvanut nopeasti. Cison (2020) raportissa IoT-laitteiden ennustettiin kattavan puolet nettiin liitetyistä laitteista vuonna 2023 ja kolmanneksen laitteista olevan langattomia. Langattomien IoT-laitteiden yleistyminen asettaa vaatimuksia myös langattomien verkkojen mittakaavalle. Tämän lisäksi IoE:n omat erityispiirteet täytyy huomioida energiainfrastruktuurin langattomissa verkoissa.

Langattomat teknologiat tarjoavat skaalautuvuutta, ja ne mahdollistavat laitteiden nopeamman verkkoon liittämisen kuin kaapelointi (Nokia, 2023). Älyverkon tiedonsiirron selkäranka muodostuu laajoista alueverkoista (engl. Wide-Area-Network, WAN), joilla hallitaan muun muassa teollisuuden ohjaus- ja valvontajärjestelmiä (engl. Supervisory Control And Data Acquisition, SCA-

DA). Näitä käytetään energiaverkon etähallintaan. WAN-verkko muodostuu pääosin, valokuidusta, sähköverkon tiedonsiirrosta (engl. Power Line Communication, PLC) ja matkapuhelinverkoista (Abrahamsen ym., 2021).

Tietoverkon reunalla olevat energian internet -laitteet taas hyödyntävät langattomia lähiverkkoteknologioita, joita ovat ZigBee, alhaisen energian Bluetooth ja Wi-Fi (Kabalci ym., 2019; Abrahamsen ym., 2021). Laajan alueverkon ja lähiverkon välissä voidaan hyödyntää LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) -teknologiaa, josta on eri versioita, kuten Lora ja Ultra Narrow Band (Kabalcin ym., 2019). Heidän mukaansa nämä versiot hyödyntävät matkapuhelinverkon vapaasti käytettäviä lisensoimattomia taajuuksia parantaen merkittävästi viestinnän kantamaa. Toisella tavalla toteutettu LPWAN-teknologia on 3GPP:n luoma lisensoituja matkapuhelinverkkotaajuuksia hyödyntävä LTE-M -protokolla, joka on tarkoitettu juuri IoT-laitteiden välisen kommunikaation (Kabalci ym., 2019).

Langattomat viestintäteknologiat sopivat hyvin sekä IoT-laitteiden, että edistyneiden sähkömittarijärjestelmien tiedonsiirtoon (Kabalci ym., 2019). Heidän mukaansa toistaiseksi käytetyin langallinen menetelmä on PLC-viestintä, kun taas langaton viestintä jakaantuu useille teknologioille. Maantieteellinen hajaantuminen on yksi ongelmista, joita langattomat viestintäteknologiat ratkaisevat (Fang ym., 2020). Etherdenin ym. (2016) mainitsee esimerkiksi Ruotsin, jossa yleensä jo pienillä sähköasemilla on WAN-yhteys. Kaistanleveyden riittävyys muuntoasemien ulkopuolisista älymittareista on kuitenkin edelleen huolenaiheena (Etherden ym., 2016). Tällaiset erilaiset vaatimukset on huomioitava viestintäteknikkaa valittaessa. Lähellä loppulaitteita datan siirtomäärät vähenvät ja teknologioista saadaan hyvin energiatehokkaita (Kabalci ym., 2019). Heidän tutkimuksensa perusteella monikäyttöisimmäksi teknologiaksi osoittautuivat LPWAN-ratkaisut. Niiden edullisuus, kattavuus, kantama ja energiatehokkuus ovat ylivoimaisia. Langallinen yhteys kuitenkin kestää häiriöitä paremmin (Abrahamsen ym., 2021).

Perinteisesti langattomat kommunikaatioverkot, kuten ensimmäisen sukupolven 5G-verkot, ovat Boreniuksen ym. (2021) mukaan suunniteltu kuluttajille, mutta verkkojen teollinen käyttö on alusta asti ollut tavoitteena. Uudemmat verkot tullaankin suunnittelemaan teollisuuden, kuten energiasektorin tarpeisiin (Borenius ym., 2021). Toisaalta Ciscon (2020) tutkimuksessa 5G-teknologian ei nähdä aiheuttavan suurta muutosta energiasektorilla.

Koska energian internet on suunniteltu toimimaan ympäröivässä tietoverkossa, sen oman tiedonsiirron tulee kuormitta verkkoa mahdollisimman vähän. Tulevaisuudessa tietointensiivisten IoT-laitteiden määrän kasvun myötä myös datan määrä tulee kasvamaan johtaen 5G-verkon ruuhkautumiseen ja riittämättömyyteen (Babbar ym., 2023). Ongelmaa voidaan helpottaa datan pakkauksella. Se tarkoittaa, että IoE-laitteiden tiedonsiirrosta voidaan käyttää kaistanleveyttä säästäviä protokollia (Bui ym., 2012). Tällöin datapaketit voivat esimerkiksi sisältää lyhyemmät otsikot tai kulkea ilman aikaleimoja (Etherden ym., 2016).

Toinen ratkaisu on Babbarin ym. (2023) esittämät 6G -teknologiat, jotka voisivat mahdollistaa valtavat tiedonsiirtomäärät keskitettyjen pilvipalvelimien

ja energian internetin laitteiden välillä. Tämän kehityksen lisäksi IoT-laitteiden käyttöä kuitenkin rajoittaa energian saanti. Tulevaisuuden IoT-laitteita kehitetään toimimaan jopa ilman akkua, jolloin energia otetaan ympäristöstä (Babbar ym., 2023). He jatkavat, että vähäinen energia rajoittaa tiedonsiirtoa, joten 6G-viestinnän tulee kuluttaa minimaalisesti energiaa. Hyödyntämällä kehitteillä olevia teknologioita on mahdollisuus merkittävästi parantaa tiedonsiirtokapasiteettia ja energiatehokkuutta langattomissa verkoissa (Babbar ym., 2023) Välttääkseen haasteita, kuten verkkojen ylikuormitusta ja viivettä, 6G-verkosta suunnitellaan autonomista, jolloin se sisältäisi jo itsessään paljon laskentaa reitityksen optimoinnissa (Babbar ym., 2023).

## 4.2 Älysähkömittarit ja IoT-laitteet

Energian internetissä yhä useampi sähkölaite liitetään internetiin. Kaksisuuntainen automaattinen mittarinluku (engl. Automated Meter Reading, AMR) -järjestelmä on yksi älysähköverkon keskeisistä osista (Yaghmaee Moghaddamin & Leon-Garcian, 2018). Suomessa ollaan maailman kärkeä automaattisten älymittareiden käytössä, sillä Suomen 3,4 miljoonasta pienjännitemittarista älymittareita oli 99.6 % jo vuonna 2016 (Borenus ym., 2021). Suomessa kiinteistökohtaiset etäluettavat sähkömittarit ovat olleet jo pitkään käytössä mahdollistaen muun muassa sähkön tuntihintaisen veloituksen. Euroopassa tavoitteena oli vuoteen 2020 mennessä, että 71 %:lla kotitalouksista olisi älymittari (Abrahamsen ym., 2021).

Näiden lisäksi älyverkoissa käytetään kehittyneempää mittausrakennetta (engl. Advanced Metering Infrastructure, AMI) älysähkömittareiden yhdistämiseen (Yaghmaee Moghaddamin & Leon-Garcian, 2018). Kehittyneempi teknologia tarjoaa mittareiden lukemisen lisäksi monipuolisempia toimintoja ja tietoa sähköverkon hallintaan ja optimointiin. Sähkön kysyntä-tarjontajoukon reagointiaikaa voidaan parantaa AMI:en ja kysynnänhallintajärjestelmien tiedonvaihdon nopeuttamisella (Kabalcin ym., 2019). Lisäksi energian internetin tehokkuutta voidaan parantaa yhdistämällä aiemmin netistä irrallaan olleet SCADA-järjestelmät internetin kautta AMI-mittareihin (Abrahamsen ym., 2021).

Asuntokohtaisten sähkömittareiden lisäksi yleistyvät IoT-laittekohtaiset kulutusmittarit. IoT tarkoittaa toisiinsa yhdistyneiden esineiden verkostoa, jota yhdistää kommunikaatioteknologia, joka koostuu datan keräämisestä, prosessoinnista, lähetyksestä ja varastoinnista (Kabalcin ym., 2019). Energiasektorin on oletettu olevan IoT-laitteiden suurimpia käyttäjiä sähköverkon rakenteen muuttuessa hajautetummaksi (Bieganska, 2024). Myös Yaghmaee Moghaddamin ja Leon-Garcian (2018) mukaa IoT-teknologiaa voidaan hyödyntää monilla eri älyverkkojen osa-alueilla, ja se on välttämätön edellytys älyverkkojen tehokalle toteuttamiselle.

Kabalcin ym. (2019) mukaan IoT-verkon etuja on sen kyky luoda erilaisia yksilöityjä verkkorakenteita moninaisille laitteille. Lisäksi sen avulla laitteista voidaan saada energiatehokkaampia sekä halvempia (Kabalcin ym., 2019). Etä-

hallinta internetin kautta mahdollistaa integraation fyysisen maailman ja tietojärjestelmien välillä lisäten tehokkuutta ja taloudellista hyötyä (Gu & Qu, 2020). Heidän mukaansa IoT:n tavoitteena on yhdistää kaikki asiat ajasta ja paikasta riippumatta käyttämällä mitä tahansa reittiä tai verkkoa viestintään. Tällä halutaan pienentää virheitä, parantaa tehokkuutta ja palvelujen laatua.

Toimiakseen IoT-verkon jokaisella laitteella tulee olla uniikki radiotaajuustunniste (RFID), jonka perusteella muut laitteet tunnistetaan ja niitä voidaan päivittää (Gu & Qu, 2020). IoT-laitteiden rajusti kasvava määrä asettaa haasteita monimuotoiselle laitekannalle, sillä laitteiden viestinnän tulisi olla yhteensopivaa. Kabalcin ym. (2019) mukaan on mahdollista, että tulevaisuudessa IoT-viestintä tulee syrjäyttämään WAN-verkot energijärjestelmän viestintäinfrastruktuurina.

Älymittareiden laskevan hinnan ja helpon käytön takia niiden käyttö lisääntyy (Gu & Qu, 2020). Heidän mukaansa IoT-laitteet kehittyvät pääasiassa laitteiston (engl. hardware) kehityksen ja paremman laitteiden välisen kommunikation seurauksena. Jotta älyensensoreilla saadaan verkosta energiatehokkaampi, on IoT-sensoreiden kehityttävä energiatehokkaimmiksi. Haittapuolena IoT-laitteilla on omat turvallisuushaasteensa, jotka periytyvät myös IoT-verkkoon (Gu & Qu, 2020).

### 4.3 Virtuaaliset voimalaitokset

Virtuaaliset voimalaitokset (engl. Virtual Power Plant, VPP) ovat uudenlaisia järjestelmiä, jotka yhdistävät ja kontrolloivat hajautettua uusiutuvan energian tuotantoa. Yhdistämällä useita pieniä tuotantoyksiköitä tai energiavarastoja tehokkaaseen kysyntä-tarjontajouksoon VPP:t saavat kokonaisuuden toimimaan sähköverkossa yhtenä isona tuotantoyksikkönä (Etherden ym., 2016). Lin ym. (2020) mukaan koordinoitulla ohjauksella tasapainotetaan verkkoa sekä minimoidaan kustannuksia. VPP:llä tuleekin olemaan tärkeä rooli energiamarkkinoiden sekä energiapalvelumarkkinoiden kehityksessä (Lin ym., 2020).

Virtuaalinen voimalaitos koostuu useista erillisistä tuotantoyksiköistä, kuten aurinkopaneeleista. Tuotantoyksiköt voivat olla lukuisien eri yhtiöiden tai yksityishenkilöiden omistamia. Lisäksi Etherdenin ym. (2016) mukaan markkinoille tulee eri valmistajien omia VPP-malleja. Näiden haasteiden takia viestiä liittymän tulisi perustua avoimiin standardeihin, jotka yhtenäistäisivät sähköverkon hallintaa ja säästäisivät kustannuksia (Etherden ym., 2016). VPP tarvitsee tietoa tuotannosta, markkinoista ja kysynnästä toimiakseen tehokkaasti. Tiedon siirtoa varten jokainen tuotantoyksikkö tarvitsee oman IP-osoitteen. (Etherden ym., 2016).

Kansainvälinen sähkötekniikan komissio (IEC) on määritellyt standardin hajautettujen energiantuotantoyksiköiden järjestelmien välisille rajapinnoille (Etherden ym., 2016). Heidän mukaansa IEC on myös luonut standardin, joka määrittelee viestintäprotokollan ja tiedonsiirtotavan virtuaalivoimalaitosten ja sähköverkon välille. Tuon standardin mukaan VPP toimii välittäjänä asiakkai-

den tietopyyntöjen ja tuotantoyksiköiden tietojen välillä. Standardi myös erottaa määrittelyssään kaupalliseen VPP:n, joka osallistuu energiamarkkinoille sekä teknisen VPP:n, joka kommunikoi paikallisessa verkossa tuotantoyksiköiden kanssa (Etherden ym., 2016; Zhang ym., 2019). Standardoiduilla rajapinnoilla voidaan mahdollistaa uusien VPP-ratkaisujen luonti.

Tavoitteena on, että tulevaisuudessa VPP yhdistää automaattisesti tuotantoyksiköiden tiedonsiirron, mikä tehostaa verkkoa muttei aiheuta lisäkuluja (Etherden ym. 2016). Myös Fang ym. (2022) painottavat, että VPP-järjestelmä tulee pystyä käyttämään mahdollisimman pienin kustannuksin. Virtuaalivoimalaitos voisi myös automaattisesti osallistua sähkömarkkinoille resursseillaan. Tämä vähentää sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjä ja alentaa sähkön huipuhintoja, mikä hyödyttää kaikkia sähkökäyttäjiä. (Zhang ym., 2018).

Etherden ym. (2016) ehdottamassa VPP-konseptissa SCADA-järjestelmä kerää ja hallinnoi tietoja tuotannosta muodostaen itse virtuaalisen voimalaitoksen. Heidän mukaansa useita mainittujen standardien mukaisia SCADA järjestelmiä on kehitteillä. VPP:n voi siis toteuttaa useilla eri ohjelmistoratkaisuilla. Toistaiseksi ongelmaksi voi muodostua se, että sähköverkon tietoja on vain siirtoyhtiöllä, jolloin näiden tulisi toimia VPP-operaattoreina. Uudet IEC-standardit mahdollisesti ratkaisevat tämän ongelman (Etherden ym., 2016).

Zhang ym., (2019) tutkimat eurooppalaiset kokeelliset VPP:t osoittautuivat käyttökelpoisiksi useissa tehtävissä, kuten kulutushuippujen tasauksessa, uusiutuvien energian lähteiden hallinnassa ja sähköautojen latauksessa. Eräs tuore kaupallinen VPP ratkaisu on Nokian (2024) esittelemä matkapuhelinverkon tukiaseman akkujen -hallintaohjelma. Se osallistuu akkujen kapasiteetilla reaaliajassa sähkömarkkinoille, tarjoten verkon jännitteen tasausta. Toiminnalla operaattori voi kaupallisesti hyödyntää akkukapasiteettia ja pienentää sähkölaskuaan, saaden akuista tuottavan investoinnin (Nokia, 2024). Vaikka Nokia kehitti energian internetin mukaisen ratkaisun se ei käytä IoE-termiä.

Massiivisesti lisääntyvän datan takia VPP:n pitää pystyä käsittelemään suuret määrät tietoa nopeasti (Li ym., 2020). VPP voi integroida hajautetun energian tuotannon tehokkaasti riittävän kommunikaatioteknologian ja sopivan ohjelmiston avulla (Fang ym., 2022). Heidän mukaansa ohjelmiston ytimen muodostavat päätöksiä tekevät algoritmit. Tutkimuksessaan he jakoivat virtuaalivoimalan päätöksenteon kahteen osaan Actor-Critic (AC) -algoritimallin mukaan. Mallissa toimija osa sijaitsee itse voimalaitoksessa ja kriitikko reunasolmussa, jonka laskennalla optimoidaan mallin toimintaa (Fang ym., 2020). Myös Li ym. (2020) tutkimuksen perusteella virtuaaliselle voimalaitokselle tehty DRL-algoritmi pystyi kustannustehokkaasti oppimaan hajautetun tuotannon ja kysynnän mallin. VPP voidaan luultavasti toteuttaa useilla eri algoritmeilla, joiden hyödyntämistä käsitellään seuraavassa alaluvussa.

## 4.4 Algoritmit, koneoppiminen ja massadata

Energian internetin on kyettävä ratkaisemaan haastava sähkön kysyntä-tarjontatasapaino, mikä vaatii monimutkaista laskentaa. Tekoäly (engl. Artificial Intelligence, AI) ja koneoppiminen (engl. Machine Learning, ML) vaikuttavat tehokkaimmilla tavoilla ratkaista kyseinen ongelma (Gu & Qu, 2020). Samaan päätelmään tulivat Babbarin ym. (2023), joiden mukaan AI:n ja ML:n yhdistyminen langattomiin verkkoihin on välttämätöntä IoT-laitteiden suurten tietomäärien keräämiseksi. Syntyvä massadata (engl. Big data) on käsiteltävä reaaliajassa energiamarkkinoilla ja lisäksi data on tallennettava mallien opettamista varten (Hossain ym., 2019). Himeur ym. (2023) ovat esittäneet, että energiasektori tulisi olemaan tekoälyn yleistymisen keskeisiä ajavia voimia. Toistaiseksi AI-innovaatiot ovat tulleet muilta sektoreilta.

Algoritmeilla pyritään ratkaisemaan taloudellista optimointiongelmaa (engl. Economic Dispatch Problem). Energian internetissä se tarkoittaa tuotannon optimointia, jossa pyritään löytämään optimaalinen tuotantomäärä jokaiselle voimalaitokselle niin, että kokonaiskustannukset ovat mahdollisimman alhaiset (Lin ym., 2020). Energian internetissä algoritmit pyrkivät myös säätoivoiman, kuten akkujen käytön optimoimiseen (Fang ym., 2020). Lin ym. (2020) kehittivät syvän vahvistusoppimisen -algoritmin tuotannon optimointiongelman ratkaisemiseksi. Algoritmi hyödyntää useita syötteitä funktiossa ja hyödyntää vahvistusoppimista optimaalisen tehokkuuden löytämiseksi. Ajan kuluessa algoritmi oppii ja korjaa strategiaa (Lin ym., 2020). Tutkimuksessa algoritmia testattiin muita malleja vastaan ja se vaati vähemmän aikaa ja sopi paremmin energian internetille. Tulokset olivat selkeitä, mutta niissä oli merkittäviä oletuksia energiantuotannon rakenteesta.

Koneoppiminen viittaa järjestelmään, joka oppii ja tekee ennusteita datan perusteella (Hossain ym., 2019). He jatkavat sen koostuvan useista ennakolta ohjelmoiduista algoritmeista, jotka tuottavat dataan perustuvia ennusteita. Myös Fang ym. (2020) kuvaavat koneoppimisen olevan sopiva keino suurien datamäärien prosessointiin. Lisäksi he esittävät tekoälyn yhdistämistä reuna-laskentaan kutsuen metodia reunaälyksi. Metodi suoriutui parhaiten hyödyntäessään Actor-Critic-algoritmia. Algoritmin tarvitsemat syötteet voivat sisältää esimerkiksi dataa energiantuotannosta, akkujen varauksesta, jakeluverkosta ja sähkömarkkinoiden kaupoista (Fang ym., 2020). Nämä tiedot ovat olennaisia sähkömarkkinan tasapainottamiseksi. Hossain ym. (2019) esittää koneoppimistekniikan hyödyntämistä SCADA-järjestelmän tietojen analysoimiseksi verkon vikojen havaitsemiseksi. Lisäksi tekoälyä voidaan heidän mukaansa käyttää tiivistämään dataa ihmiskäyttäjälle luettavaan muotoon.

Big data viittaa massiivisiin datamääriin, joiden käsittely vaatii kehittyneitä keinoja (Hossain ym., 2019). Heidän mukaansa tarkkaa datan määrää rajausta ei ole vaan massadataa kuvaa datan voimakkaasti kasvava määrä, monimuotoisuus ja syntymisnopeus. Termillä viitataan myös tuon datan analysointiin, jo-



hon on useita eri keinoja, kuten Markovin malli, Random matrix -teoria ja tekoälypohjaiset menetelmät (Hossain ym., 2019).

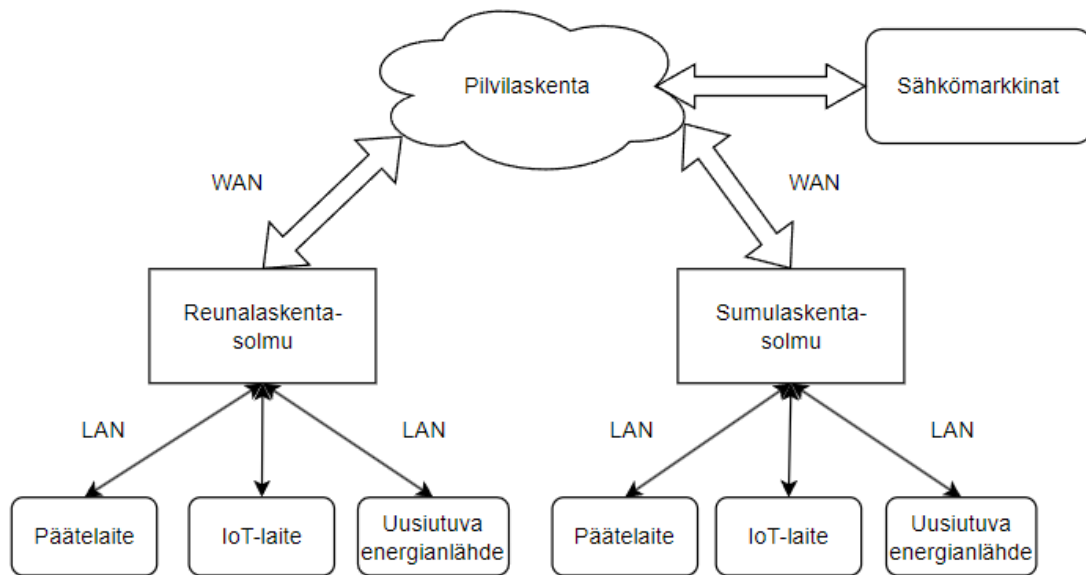
Tekoälyn rooli tulee kasvamaan tiedonsiirrossa (Babbar ym., 2023). Lisäksi energian internet on sille potentiaalinen käyttökohde, sillä älykkäämmät mallit päihittivät perinteiset tilastolliset menetelmät ennustemäärissä, vinoumassa ja tarkkuudessa useissa tapauksissa (Hossain ym., 2019). Malleilla laskennallista monimutkaisuutta pystytään laskemaan niin, että algoritmi pystyy ratkaisemaan ongelmia millisekunneissa. Näin pystytään tekemään esimerkiksi tarkkoja alueellisia ennusteita sähkönkulutuksesta.

## 4.5 Pilvilaskenta ja reunalaskenta

Pilvilaskenta ja reunalaskenta (tai sumulaskenta) ovat keskeisiä teknologioita energian internetin keräämien tietojen käsittelylle. Kuten tutkielmassa aiemmin on esitetty, energian internet tulee toimimaan ympäröivässä internetissä. Verkon rakenne voidaan toteuttaa keskitetyillä pilvipalvelimilla tai hajautetulla reunalaskennalla tai näiden yhdistelmällä (Schaefer ym., 2020). Molemmat rakenteet pyrkivät tarjoamaan resursseja ja palveluita tietojenkäsittelyyn ja tallennukseen, mutta niillä on erilaiset ominaisuudet ja sovellusalueet. Fang ym. (2020), Yaghmae Moghaddamin ja Leon-Garcian (2018) ja Babbarin ym. (2023) tutkimusten perusteella hahmoteltiin eri laskentatapoja yhdistävä malli (kuvio 4). Mallissa sensorien ja laitteiden tuottama tieto käsitellään reuna- tai sumulaskentasolmussa. Olennainen tieto siirretään pilvipalvelimeen, joka saa internetin kautta tietoa energiamarkkinoista. Kuvio havainnollistaa myös ylätasolla tiedonsiirtoon käytettäviä verkkoja.

Pilvilaskenta voi energian internetissä toimia keskeisenä alustana monille suurta laskentakapasiteettia tarvitseville energianhallintajärjestelmille. Pilvilaskennan avulla voidaan toteuttaa monimutkaisia optimointialgoritmeja, joilla parantaa energiatehokkuutta ja resurssien hyödyntämistä (Siluk ym., 2023). Heidän systemaattisen kirjallisuuskatsauksensa mukaan juuri pilvipalvelupohjaisuus on energian internetin määrittelyssä olennaista ja toimi yhdistävänä nimityksenä termien välillä. Fangin ym. (2020) mukaan perinteiset tavat energialähteiden integroimiseksi ja toiminnallisten kustannusten optimoimiseksi ovat hyödyntäneet pilvilaskentaa. Keskitetty laskenta aiheuttaa kuitenkin taakkaa, jota voidaan pienentää reunalaskennalla (Fang ym., 2020).

Pilvipalvelut ovat olleet keskeisessä osassa tekoälyn kehityksessä ja ovat mahdollistaneet skaalautuvan tekoälyn käytön myös energiatehokkuutta edistäviin ratkaisuihin (Himeur ym., 2023). Lisääntyvä tiedonsiirto verkon reunoilta pilvipalvelimiin kuluttaa kuitenkin yhä enemmän energiaa. Pilvilaskentaa tarjoavat suuret datakeskukset voivat olla energiatehokkaimpia ratkaisuja skaalautujen ja uusimpien teknologioiden ansiosta (Himeur ym., 2023). Näillä on yleensä parhaat mahdollisuudet investoida energiatehokkaaseen teknologiaan, mutta myös energiayhtiöt voisivat hyödyntää teknologiaa.



KUVIO 4 Reuna- ja sumulaskentaa hyödyntävä malli energian internetin datan käsittelyyn eri tasoilla

Himeur ym. (2023) nostavat lisäksi esiin pilvipalveluiden aiheuttaman huolen tietojen turvallisuudesta ja yksityisyydestä. Tämä on ymmärrettävää, sillä henkilöiden energiankulutustiedoista voidaan päätellä paljon heidän elintavoistaan ja rytmistään. Pilvipalveluiden keskittynyt rakenne myös lisää viivettä verkossa. Tämä vaikeuttaa verkon reunalla olevien sensorien tietojen arviointia sekä huonontaa niiden energiatehokkuutta (Babbar ym., 2023).

Reunalaskenta tarjoaa laskentaresursseja lähellä käyttäjiä tai laitteita, kuten älymittareita. Tämä mahdollistaa nopean tiedonkäsittelyn ja reagoinnin reaaliaikaisiin tapahtumiin, mikä on kriittistä monissa energianhallinnan sovelluksissa (Babbar ym., 2023). Heidän tutkimuksensa perusteella reunalaitteissa on ongelmallista analysoida ja tallentaa valtava määrä tietoa, joka on kerätty IoT-laitteista. Useimmat IoT-laitteista toimitetut tiedot sisältävät päällekkäistä ja tarpeetonta tietoa, mikä lisää reunalaitteen laskennallista monimutkaisuutta ja vähentää ennustamisen suorituskykyä (Babbar ym., 2023).

Ratkaisuna tähän Babbar ym. (2023) hahmottelemassa verkkoarkkitehtuurissa on web-palvelin, joka toimii rajapintana IoT-laitteiden ja kaukaisempien laskentalaitteiden välillä. Palvelin vastaanottaa tietoja IoT-laitteista, käsittelee niitä ja jakaa tehtäviä eri laskentalaitteille. Tämä mahdollistaa tehokkaan tiedonsiirron ja tehtävien jakamisen minimoiden samalla viivettä ja energiankulutusta. Datan siirrossa energiankulutus määräytyy käytetyn laskenta- ja siirtoenergian perusteella (Babbar ym., 2023). Tällaisessa verkossa resurssien avoimuus siis määrittäisi, prosessoidaanko tieto pilvessä, reunalla vai mahdollisesti sumussa.

Sumulaskenta on toinen mahdollinen hajautetun laskennan malli. Se sisältää hajautettujen laskentaresurssien verkoston, jolloin laskentaa suoritetaan lähellä hajallaan olevia tietolähteitä, kuten IoT-laitteita (Yaghmaee Moghaddamin & Leon-Garcian 2018). Heidän mukaansa sumulaskenta skaalautuu paremmin

käsiteltäessä Big Dataa ja voi tarjota matalampaa viivettä ehkäisten kaistan käyttöä. He esittävät luomansa sumulaskennan optimointiohjelman hyödyttävän sekä asiakasta että energianjakeluyhtiötä. Heidän ehdottamansa verkkorakenne koostuu kolmesta erillisestä datan käsittelykerroksesta, mikä vastaa Fang ym. (2020) tutkimuksessa ehdotettua rakennetta. Fang ym. (2020) mallissa laskenta jaetaan pilvilaskentaan, reunalaskentaan ja viestintäverkon reunalla olevassa päätelaitteessa tapahtuvaan laskentaan. Mallit siis vastaavat kerroksien osalta kuviota 4.

## 5 YHTEENVETO

Energian internetiä (IoE) voidaan pitää tapana tai mallina muodostaa sähköverkko. Energian internet -konsepti kuvaa tietotekniikan, kuten hajautetun laskennan, esineiden internetin ja langattoman verkon, hyödyntämistä energia-verkon tehostamiseksi. Toisaalta sitä voidaan pitää äly sähköverkkojen seuraajana. Tässä kandidaatintutkielmassa tutkittiin tietoteknisiä ratkaisuja energian internetissä. Ratkaisuiden soveltuvuudessa keskityttiin etenkin sähköverkkoihin, sillä energiamurroksen myötä energiasta yhä suurempi osa tulee olemaan sähköenergiaa.

Energiamurrokseen ja sähköistymiseen johtaa maailman väestön kasvava energiantarve, jota ei voida tyydyttää ikuisesti fossiilisilla polttoaineilla. Fossiilisten energialähteiden päästöt kuormittavat maapalloa, minkä takia energiantuotannossa on alettu hyödyntämään uusiutuvia energialähteitä. Sähköenergian käytön merkittävä kasvu vaatii sähköverkolta uudenlaista joustavuutta. Tätä joustavuutta voidaan parantaa tuotannon ja kulutuksen optimoinnilla. Optimointi voidaan toteuttaa ratkaisemalla taloudellista optimointiongelmia algoritmeilla ja tekoälyllä.

Tekemällä uusiutuvista energialähteistä pitkäjänteisesti kilpailukykyisempiä kuin fossiiliset energialähteet saadaan niillä vanhaa tuotantoa korvattua. Energian internetin ratkaisut lisäävät niiden kilpailukykyä ja soveltavuutta laajaan käyttöön. Esimerkiksi langattomat viestintäyhteydet parantavat verkon skaalautuvuutta ja hajautettu energiantuotanto vähentää siirtohävikkiä. Esiteytistä hyödyistä havaitaan energian internetin olevan laaja käsite, joka ei koske pelkästään energiajärjestelmän datan siirtoa.

Tutkielman tavoitteena oli selvittää, millainen on tulevaisuuden sähköverkko energian internetin näkökulmasta. Lisäksi selvitettiin, mitä tietoteknisiä ratkaisuja energian internet tarvitsee. Tutkielma pyrki esittelemään IoE:n olennaisimmat osat, jotta se olisi ymmärrettävä myös itsenäisenä kokonaisuutena. Tutkielma keskittyi esittelemään alan tutkimuksesta esiin nousevia tietoteknisiä ratkaisuja sekä arvioimaan niiden soveltavuutta energian internetiin. Arvioinnissa tuli huomioida erityisvaatimukset, kuten toimintavarmuus ja eri valmistajien laitteiden välinen yhteentoimivuus.

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka aineistona hyödynnettiin alan vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja, tunnettujen organisaatioiden tilastolähteitä sekä muutamia yritysmaailman esimerkkejä. Akateemisia lähteitä etsittiin SCOPUS- ja Web of Science -tietokannoista sekä JYKDOK-kirjastosta. Alan tutkimus on monialaista, joten haut aloitettiin rajaamalla tulokset "Computer science" -kategorian tai sitä vastaavaan rajaukseen. Yksittäisten aiheiden tarkentamiseksi hakua laajennettiin tarpeen mukaan. Lisäksi aihetta on tutkittu runsaasti "Engineering"-kategorian alla, mikä kuvaa konseptin poikkitieteellisyyttä. IoE-konsepti on syntynyt 2010-luvun alussa, mutta lähteinä on hyödynnetty tuoreimpia julkaisuja. Lähteiden arvioinnissa on lisäksi hyödynnetty julkaisukanavan tunnettavuutta ja julkaisuaikaa.

Tutkielman tulokset kuvaavat energian internetin mukaisen sähköverkon rakentuvan älysähköverkoista, moderneista kommunikaatioteknologioista ja uusiutuvista energianlähteistä. Tarvittavien teknologioiden tunnistamiseen ja jaotteluun ovat hyödyllisiä alan tutkimuksessa esitellyt kerrosmallit energiajärjestelmien viestinnästä. Kerrosmallit sisältävät vähintään (fyysisen) havaintokerroksen, verkkokerroksen ja sovelluskerroksen. Jotkin mallit jakavat kerrokset vielä tätä tarkempiin osiin. Lisäksi teknologioiden tarpeellisuutta arvioitiin niiden lähdemateriaalissa esiintyvyyden perusteella.

Tutkielmassa tunnistettiin energian internetin muodostamiselle olennaisimmat teknologiat, joita ovat langattomat verkot, IoT-laitteet, algoritmit sekä pilvi- ja reunalaskenta. IoT-sensorien kehitys mahdollistaa massamaisen datan keruun, mikä vaatii uusia langattomia teknologioita, joiden soveltuvuutta IoE-kontekstiin arvioitiin. Reuna- ja sumulaskenta osoittautuivat tehokkaaksi tavaksi suorittaa IoE:n laskennallisia tehtäviä. Näiden yhdistelmästä luotiin tutkielmassa malli, jossa useiden tutkimusten tapaan laskenta on jaettu eri tasoille. Välttämättömien teknologioiden lisäksi lähdemateriaalin perusteella voidaan päätellä, että parhaita ratkaisuja verkon laskennan suorittamiseen olisivat muun muassa koneoppimisen sovellukset, joita voitaisiin hyödyntää virtuaalissa voimalaitoksessa.

Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin myös, että tietotekniikan yhdistämistä sähköverkkoon kuvataan monilla eri termeillä. Näistä kokonaisvaltaisimpana voidaan pitää energian internetiä, joskin määrittelyt vaihtelevat jopa alan lähteiden välillä. IoE-tutkimus on vähäistä verrattuna älysähköverkkoihin, mutta sen ratkaisuja hyödynnetään jo menestyksekkäästi.

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että olemassa olevien sähkö- ja tietoverkkojen kehittäminen on kustannustehokkain tapa tavoitella energian internetiä. Näitä omistavilla yrityksillä on myös parhaat resurssit tähän kehitystyöhön, minkä takia tulevaisuuden energian internet pysyy luultavasti isojen yhtiöiden hallinnoitavana. Lähdemateriaalista nousee kuitenkin ilmi tavoite muuttaa verkon keskittynyt rakenne yksilölähtoisemmäksi. Tavoiteltaessa kustannustehokkuutta tekniikat tulevat pohjautumaan muualla kehitettyihin ratkaisuihin, kuten standardoituihin IoT-protokolliin.

Lähdeaineistosta havaittiin, että aihepiirin tutkimus on enimmäkseen peräisin länsimaiden ulkopuolelta. Konkreettisimmat tutkimukset ovat kuitenkin

tulleet länsimaista, mikä voi olla merkki siitä, että niissä sähköverkko on valmiimpi energian internetille. Länsimaiden ulkopuolinen tutkimus esittelee samoja ratkaisuja kuin energian internetin alkuaikana on nostettu esiin. Vaikuttaa, että alan tutkimus ei ole edennyt konkreettisiin tuloksiin, vaikka sitä tehdään jatkuvasti. Koska Suomen sähkö- ja tietoliikenneverkko on eräs maailman kehittyneimmistä, sen nykyaikaisimpia ratkaisuja voitaisiin käyttää tulevaisuuden energianverkon hahmotelmana.

Jatkotutkimuksessa olisikin syytä luoda uusia konkreettisia ratkaisuja ja kaupallisesti toimivia järjestelmiä. Tutkimuksessa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää enemmän yritysmaailman innovaatioita. Jatkotutkimuskohteena voisi olla tarkempi paneutuminen eri esitettyihin teknologioihin. Etenkin tiedon siirto IoT-laitteista reunalaitteille tulee todennäköisesti olemaan avainasemassa. Tässä tutkimuksessa ei käsitelty ehdotettujen teknisten ratkaisujen turvallisuutta, jota on tarpeen tutkia. Myös kuluttajakäyttämiseen vaikuttamista on tärkeä tutkia energiakulutuksen kontekstissa. Vaikka energian internetin ratkaisuilla on potentiaalia pystyä luomaan ihmisille ja ympäristölle kestävämpi sähköverkko, liittyy siihen monia seurannaisvaikutuksia, joita ei vielä tiedetä.

## LÄHTEET

- Abrahamsen, F. E., Ai, Y., & Cheffena, M. (2021). Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey. *Sensors*, 21(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/s21238087>
- Babbar, H., Rani, S., Bouachir, O., & Aloqaily, M. (2023). From Massive IoT Toward IoE: Evolution of Energy Efficient Autonomous Wireless Networks. *IEEE Communications Standards Magazine*, 7(2), 32–39. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100116>
- Bhandari, B. (2023). Industrial scale electricity storage solutions and feasibility in Finnish market environment. *Pro gradu -tutkielma, Aalto-yliopisto*. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/121635>
- Biegańska, M. (2024). Energy Internet – Decentralized systems contributing to reduction of greenhouse gas emissions. *Journal of Autonomous Intelligence*, 7(1). <https://doi.org/10.32629/jai.v7i1.1078>
- Borenus, S., Hämmäinen, H., Lehtonen, M., & Ahokangas, P. (2021). Smart grid evolution and mobile communications – Scenarios on the Finnish power grid. *Electric Power Systems Research*, 199, 107367. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107367>
- Bui, N., Castellani, A. P., Casari, P., & Zorzi, M. (2012). The internet of energy: A web-enabled smart grid system. *IEEE Network*, 26(4), 39–45. <https://doi.org/10.1109/MNET.2012.6246751>
- Caballero, V., Vernet, D., & Zaballos, A. (2019). Social Internet of Energy – A New Paradigm for Demand Side Management. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(6), 9853–9867. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2932508>
- Cisco. (9.3.2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Cisco. Haettu 10.4.2024, osoitteesta <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Department of Energy. (1.12.2023). Declaration to Triple Nuclear Energy Capacity by 2050, Recognizing the Key Role of Nuclear Energy in Reaching Net Zero. Haettu 26.4.2024, osoitteesta <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key>
- Etherden, N., Vyatkin, V., & Bollen, M. H. J. (2016). Virtual Power Plant for Grid Services Using IEC 61850. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), 437–447. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2414354>
- Euroopan parlamentti. (31.10.2023). Internal energy market | Fact Sheets on the European Union. European Parliament. Haettu 8.3.2024, osoitteesta

<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/45/internal-energy-market>

- Fang, D., Guan, X., Lin, L., Peng, Y., Sun, D., & Hassan, M. M. (2020). Edge intelligence based Economic Dispatch for Virtual Power Plant in 5G Internet of Energy. *Computer Communications*, 151, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.12.021>
- Ghiasi, M., Wang, Z., Mehrandezh, M., Jalilian, S., & Ghadimi, N. (2022). Evolution of smart grids towards the Internet of energy: Concept and essential components for deep decarbonisation. *IET Smart Grid*, 6(1), 86–102. <https://doi.org/10.1049/stg2.12095>
- Gu, Q., & Qu, Q. (2022). Towards an Internet of Energy for smart and distributed generation: Applications, strategies, and challenges. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(5), 1789–1816. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac087>
- Hannan, M. A., Faisal, M., Ker, P. J., Mun, L. H., Parvin, K., Mahlia, T. M. I., & Blaabjerg, F. (2018). A Review of Internet of Energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations. *IEEE Access*, 6, 38997–39014. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2852811>
- Himeur, Y., Sayed, A. N., Alsalemi, A., Bensaali, F., & Amira, A. (2024). Edge AI for Internet of Energy: Challenges and perspectives. *Internet of Things*, 25, 101035. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101035>
- Hossain, E., Khan, I., Un-Noor, F., Sikander, S. S., & Sunny, Md. S. H. (2019). Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review. *IEEE Access*, 7, 13960–13988. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894819>
- IEA = International Energy Agency. (2021). Final consumption – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis. IEA. Haettu 13.3.2024, osoitteesta <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>
- IEA = International Energy Agency. (2022). World Energy Outlook 2022 – Analysis. IEA. Haettu 13.3.2024, osoitteesta <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IEA = International Energy Agency. (2024). Executive summary – Electricity 2024 – Analysis. IEA. Haettu 13.3.2024, osoitteesta <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary>
- Joseph, A., & Balachandra, P. (2020). Smart Grid to Energy Internet: A Systematic Review of Transitioning Electricity Systems. *IEEE ACCESS*, 8, 215787–215805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041031>
- Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., & Blaabjerg, F. (2019). Internet of Things Applications as Energy Internet in Smart Grids



- and Smart Environments. *Electronics*, 8(9), Article 9.  
<https://doi.org/10.3390/electronics8090972>
- Karnouskos, S., & Terzidis, O. (2007). Towards an information infrastructure for the future Internet of energy. *Communication in Distributed Systems 15th ITG/GI Symposium*, 1-6
- Lin, L., Guan, X., Peng, Y., Wang, N., Maharjan, S., & Ohtsuki, T. (2020). Deep Reinforcement Learning for Economic Dispatch of Virtual Power Plant in Internet of Energy. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 6288–6301.  
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2966232>
- Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., & Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 102701.  
<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102701>
- Nokia. (2023). Smart grids vital to green energy drive. Haettu 6.3.2024, osoitteesta <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/smart-grids-vital-to-green-energy-drive/>
- Nokia. (2024). Nokia adds Virtual Power Plant to its leading energy efficiency solution portfolio. Haettu 4.3.2024, osoitteesta <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2024/02/22/nokia-adds-virtual-power-plant-to-its-leading-energy-efficiency-solution-portfolio/>
- Rifkin, J. (2011). *The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. Macmillan.
- Ritchie, H., & Rosado, P. (2024). Energy Mix. *Our World in Data*. Haettu 31.1.2024, osoitteesta <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- Schaefer, J. L., Siluk, J. C. M., Carvalho, P. S. de, Renes Pinheiro, J., & Schneider, P. S. (2020). Management Challenges and Opportunities for Energy Cloud Development and Diffusion. *Energies*, 13(16), Article 16.  
<https://doi.org/10.3390/en13164048>
- Siluk, J. C. M., de Carvalho, P. S., Thomasi, V., Pappis, C. A. de O., & Schaefer, J. L. (2023). Cloud-based energy management systems: Terminologies, concepts and definitions. *Energy Research & Social Science*, 106, 103313.  
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103313>
- Tsoukalas, L. H., & Gao, R. (2008a). From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements. 94–98.  
<https://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523385>
- Tsoukalas, L. H., & Gao, R. (2008b). Inventing an energy internet: The role of anticipation in human-centered energy distribution and utilization. 399–403. <https://doi.org/10.1109/SICE.2008.4654687>
- Wang, K., Zhang, Y., Guo, S., Dong, M., Hu, R. Q., & He, L. (2018). *IEEE Access Special Section Editorial: The Internet of Energy: Architectures, Cyber*

Security, and Applications. *IEEE Access*, 6, 79272–79275.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885194>

World Bank. (ei pvm). World Bank Open Data. Haettu 17.4.2024, osoitteesta  
<https://data.worldbank.org>

Yaghmaee Moghaddam, M. H., & Leon-Garcia, A. (2018). A fog-based internet of energy architecture for transactive energy management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 1055–1069.  
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2805899>

Zhang, G., Jiang, C., & Wang, X. (2019). Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(2), 145–156. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5880>