



Peetu Jakonen

Älykkäät sähköverkot ja uusiutuvan energian integroiminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

17.4.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Peetu Jakonen
Otsikko:	Älykkäät sähköverkot ja uusiutuvan energian integroiminen
Sivumäärä:	40 sivua
Aika:	17.4.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Jukka Karppinen

Insinööriyössä avataan älykkään sähköverkon käsitettä ja luodaan yleiskuva älykkään sähköverkon rakenteesta, komponenteista ja eduista. Työssä tutkitaan myös, miten älykkäitä järjestelmiä voidaan hyödyntää uusiutuvan energian integraatiosta syntyviin haasteisiin, kuten vaihtelevaan tuotantoon. Työn tavoitteena on luoda yleiskuva älykkäistä sähköjärjestelmistä ja uusiutuvan energian integroimisesta sähköverkkoon.

Työssä tarkastellaan älykkäiden sähköverkkojen rakennetta, älylaitteita, etävalvontajärjestelmiä ja reaaliaikaista tiedonsiirtoa. Työssä tarkastellaan myös uusiutuvan energian tarjoamia hyötyjä ja haasteita sekä uusiutuvalla energialle vaihtoehtoisen fossiilisen energiantuotannon ympäristöllisiä ja terveydellisiä haittavaikutuksia.

Työn tuloksena saavutettiin yleiskuva älykkään sähköjärjestelmän käsitteestä ja toiminnasta sekä sen komponenteista. Lisäksi työssä saavutettiin yleiskuva uusiutuvan energian integraatioon liittyvistä haasteista sekä ratkaisuista, kuten kysyntäjoustopuusta ja energian varastointijärjestelmistä.

Avainsanat: älykäs sähköverkko, kysyntäjoustopuusta, energian varastointi, uusiutuva energia, yleiskuvaus, älykkäät teknologiat

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Peetu Jakonen
Title: Smart Grids and Renewable Energy Integration
Number of Pages: 40 pages
Date: 17 April 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Jukka Karppinen, Senior Lecturer

This thesis explores the concept of a smart grid and provides an overview of the structure, components, and benefits of smart grids. The thesis also examines how smart systems can be used to help in addressing the challenges arising from the integration of renewable energy, such as fluctuating production. The goal of this thesis is to provide an overview of smart grid systems and the integration of renewable energy into the electrical grid.

The thesis examines the structure of smart grids, smart devices, remote monitoring systems, and real-time data transmission. The benefits and challenges associated with renewable energy are also examined, along with the environmental and health impacts of fossil fuel-based energy production alternatives.

As a result, the thesis provides an understanding of the concept and operation of smart grids and their components. Additionally, it offers an overview of the challenges associated with renewable energy integration and potential solutions, such as demand response and energy storage systems.

Keywords: smart grid, demand response, energy storage, renewable energy, overview, smart technologies

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Älykkäiden sähköverkkojen rakenne	2
2.1	Perinteinen sähköverkko	2
2.2	Älykkään sähköverkon määritelmä	2
3	Älykkäät teknologiat	5
3.1	Sähköjärjestelmäkerros	6
3.2	Viestiliikennekerros	7
3.3	Tietotekniikkakerros	8
3.4	Älykkään sähköverkon edut	9
4	Olellaiset komponentit	9
4.1	Älylaitteet	10
4.2	Etäluettavat sähkömittarit ja PMU-järjestelmät	10
4.3	Hajautettu tuotanto	11
4.4	Älykkäät sähköasemat	11
4.5	Hallinta ja tarkkailu	12
5	Uusiutuvan energian integroimisen haasteet	15
5.1	Laitteisto	16
5.2	Synkronisaatio	17
5.3	Kysyntäjousto	17
5.4	Energian varastointi	19
5.4.1	Akkuvarastointijärjestelmät	20
5.4.2	Pumppuvarastointijärjestelmät	21
6	Uusiutuvan energian integroimisen edut	23
6.1	Ympäristövaikutukset	24
6.2	Terveysvaikutukset	27
7	Pohdintaa	28
	Lähteet	30

Lyhenteet

- DMS: *Distribution management system*. Usean järjestelmän luoma kokonaisuus, jonka tarkoituksena on valvoa ja kontrolloida sähköjakeluverkkoa.
- HAN: *Home Area Network*. Tietoliikenneverkko, joka toimii pienellä alueella, kuten omakotitalossa.
- NAN: *Neighbourhood Area Network*. Tietoliikenneverkko, joka toimii keskitetyllä alueella, kuten naapurustossa.
- PLC: *Programmable logic controller*. Logiikkaohjain, joka voidaan ohjelmoida kontrolloimaan prosesseja usealla eri tekniikan osa-alueella.
- PLL: *Phase locked loop*. Ohjausjärjestelmä, joka generoi lähtösignaalin jonka vaihe on sama kuin tulosignaalilla.
- PMU: *Phasor measurement unit*. Laite, jota käytetään taajuuden ja vaihekulman arviointiin sähkövirrasta tai jännitteestä.
- SCADA: *Supervisory control and data acquisition*. Valvonta- ja hallintajärjestelmä, joka pitää sisällään tietokoneita, sensoreita viestiyhteyksiä ja käyttöliittymiä.
- SPOT: Energiamaksu, jossa hinnoittelu seuraa sähkön pörssihintaa.
- WAMS: *Wide area monitoring system*. Valvonta- ja hallintajärjestelmä, joka integroi PMU-laitteita.
- WAN: *Wide Area Network*. Tietoliikenneverkko, joka levittyy laajalle maantieteelliselle alueelle.

1 Johdanto

Sähköverkon energian kokonaiskulutus on viimeisten vuosien aikana kasvanut. Syitä tähän ovat esimerkiksi sähköautojen räjähdemäinen yleistyminen ja tekniikan nopea kehittyminen. Kohonnut energian tarve ja kulutus aiheuttavat rasitteen myös ympäristön kannalta. Fossiilisilla polttoaineilla tuotettu energia aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä, jotka ilmakehään joutuessaan aiheuttavat ilmaston lämpenemistä ja merenpinnan nousua. Tämän ongelman ratkaisuksi on Euroopan alueella alettu hyödyntämään yhä enemmän uusituvia energianlähteitä, kuten aurinko- ja tuulivoimaa.

Huomiota on myös alettu kiinnittämään sähköverkkojen luotettavuuteen sekä sähkönlaatuun. Tekniikan kehityksen myötä nykyaikana sähköverkkoon on kytkettyä laitteita, jotka ovat alttiita sähkönlaadun vaihteluille. Myös esimerkiksi sairaaloissa ja tuotantolaitoksilla on käytössään järjestelmiä, jotka ovat riippuvaisia sähkönsaannin luotettavuudesta. Uusiutuvan energian kasvaneen integraation asettamat haasteet ja tarve verkon varmuuden ylläpitämiselle tarkoittaa sitä, että sähköverkkoa on jouduttu sekä joudutaan yhä uusimaan.

Uudesta parannetusta verkosta käytetään nimeä ”Älykäs sähköverkko” tai ”Smart Grid”. Nimi juontaa juurensa verkossa käytettävistä älykkäistä teknologioista ja automaatiosta. Tämän työn tavoitteena on avata älykkään sähköverkon käsitettä ja luoda laajempi kuva siitä mitä se pitää sisällään sekä mitä etuja siitä mahdollisesti voi olla. Työssä tarkastellaan myös uusiutuvan energian integraatiota verkkoon, sen mahdollisesti luomia haasteita sekä etuja ja miten uusiutuvan energian integraatiota voidaan parantaa hyödyntäen älykkäitä teknologioita.

2 Älykkäiden sähköverkkojen rakenne

2.1 Perinteinen sähköverkko

Sähköverkko on moniosainen kompleksi, jonka tarkoituksena on sähköenergian tuottaminen, jakelu ja siirto [1]. Se on kriittinen osa lähes jokaisen länsimaalaisen elämää, ja sen toiminta ja vakaus on yhteiskunnallisesti merkittävä asia [2].

Vaikka uusiutuvat energianlähteet ja ydinvoima ovatkin kasvattaneet suositaan tasaisesti Euroopassa, on nykyinen järjestelmä vieläkin monissa Euroopan maissa hyvin riippuvainen fossiilisista polttoaineista – maakaasusta, hiilestä ja öljystä. EU:n kansilian mukaan vuonna 2022 38,7 % EU:ssa tuotetusta energiasta oli peräisin fossiilisista polttoaineista. Suomessa tämä luku oli 11 %. [3.]

Vaikka nykyinen sähköverkko pystyykin vielä vastaamaan kuluttajien tarpeeseen, on siinä parantamisen varaa. Monet nykyisin käytettävistä sähköverkoista on ns. ”tyhmiä” sähköverkkoja. Ne eivät kykene lähettämään informaatiota takaisin verkon operaattoreille, mikä tekee verkon optimoinnista haasteellisempaa. Sähköverkko ilman Smart Grid -teknologiaa ei kykene vastaamaan riittävästi tulevaisuuden kasvavalle uusiutuvan energian tarpeelle sen tehokkuuden, turvallisuuden, luotettavuuden tai uusiutuvan energian integroimisen osalta. [4.]

2.2 Älykkään sähköverkon määritelmä

Älykäs sähköverkko eli ns. Smart Grid on käytännössä parannus vanhempaan 1900-luvulla rakennettuun perinteiseen sähköverkkoon. Älykäs sähköverkko hyödyntää kaksisuuntaista tiedonsiirtoa ja erinäisiä älykkäitä laitteita ja sensoreita sähköverkon parantamiseksi. Keskeistä älykkäälle järjestelmälle on, että eri laitteet kommunikoivat keskenään muodostaen yhtenäisen järjestelmän. [5.]

Informaatiotekniikkaa hyödyntämällä Smart Grid kykenee tehokkaampaan energian siirtoon ja vastaamaan erinäisiin verkossa mahdollisesti esiintyviin tapahtumiin ja ongelmiin. Älykäs sähköverkko voisi esimerkiksi vaikuttaa tapahtumiin

missä tahansa vaiheessa sähköverkkoa valiten oikeat menettelytavat esimerkiksi sähköntuotannon, jakelun tai sähkönsiirron osalta. [5.]

Älykkään sähköverkon tunnuspiirteiksi voitaisiin listata kaksisuuntainen tiedonsiirto, etäohjaus, verkon joustavuus, kuluttajien osallistuminen, verkon joustavuus, kuluttajien osallistuminen, uusiutuvan energian integraatio ja verkon valvonta.

Kaksisuuntainen tiedonsiirto

Kaksisuuntainen tiedonsiirto mahdollistaa kuluttajien ja verkon operaattorin välisen tiedon jakamisen. Se mahdollistaa kuluttajille reaaliaikaisen laskutuksen ja tiedon sähkön hinnoista. Operaattorit saavat tietoa esim. kulutetun energian määrästä reaaliajassa. Luotettava reaaliaikainen tiedon liikkuminen sähköverkon eri osien kanssa luo perustan älykkään sähköverkon onnistuneelle toiminnalle. [6.]

Verkon tiedonsiirto voidaan toteuttaa joko langattomasti tai verkkokaapelien välityksellä. Molemmissa järjestelmissä on omat etunsa ja haittansa. Langaton yhteys kustantaa vähemmän, ja se voidaan yhdistää kätevästi myös pitkien välimatkojen tai vaikeasti tavoitettavien paikkojen välille. Kääntöpuolena langattomissa järjestelmissä ovat häiriöt muiden signaalien ja sähkömagneettisten kenttien kanssa sekä riippuvuus akuista. [6.]

Etäohjaus

Älykäs sähköverkko hyödyntää erilaisia sensoreita ja automaatiota verkon tilan tarkkailuun. Käytössä on myös ohjelmia, jotka voivat analysoida dataa automaattisesti ja ennustaa kohtia verkossa, jotka ovat alttiita vioille. Verkon valvonta etätyökalujen avulla vähentää tarvetta manuaalisille tarkastuksille, mikä vähentää riskiä ja huoltohenkilökunnan tarvetta työskennellä mahdollisesti vaarallisissa tiloissa. Vikatilanteen ilmetessä etäohjaus mahdollistaa nopean reagoimisen, mikä minimoi vahinkoja sähköverkolle. [7.] Ohjausjärjestelmät ovat

avainasemassa älykkäiden sähköverkkojen toiminnassa, varsinkin kun verkkoon halutaan lisätä uusiutuvia energian lähteitä [8].

Verkon joustavuus

Uusiutuvat energianlähteet ovat avainasemassa älykkäässä sähköverkossa. Niiden määrä kasvaa jatkuvasti ja verkon on oltava tarpeeksi joustava kestääkseen uusiutuvan energian luonteesta johtuvan vaihtelun tuotannossa ja muut mahdolliset muutokset verkossa tai sähkön kulutuksessa. Verkon joustavuutta voidaan lisätä esim.

- hyödyntämällä uusiutuvia energianlähteitä, jotka eivät ole alttiita vaihtelulle kuten maalämpöä.
- suuren mittaluokan varastointijärjestelmillä, kuten pumppuvoimalaitoksilla.
- pienemmässä mittakaavassa akustojärjestelmillä.
- älylaitteilla, jotka reagoivat kysynnänhuippuihin, kuten älykkäät termostaatit. [9.]

Kuluttajien osallistuminen

Älykkäät energiajärjestelmät tarvitsevat toimiakseen kuluttajien aktiivista osallistumista. Kuluttajan täytyy hyväksyä uudet järjestelmät, osin asentaa ne sekä käyttää älykkäitä tuotteita sekä palveluita. Kuluttajan tulee myös olla valmis jakamaan tietoa ja olemaan aktiivisempi osallistuja sähköverkon kokonaisuudessa. Jopa hyvin automatisoidut järjestelmät tarvitsevat jonkin verran käyttäjän osallistumista. Mitä vähemmän järjestelmä on automatisoitunut, sitä enemmän osallistumista kuluttajalta vaaditaan toimivan järjestelmän takaamiseksi. [10.]

Kuluttaja hyötyy älysähköverkosta saamalla reaaliaikaista tietoa sähkön hinnoista ja omasta kulutuksestaan. Tämän tiedon avulla kuluttaja pystyy esimerkiksi ajoittamaan kulutustaan niihin aikoihin, kun sähkön hinta on matalampaa ja näin ollen vähentämään huippukuormitusta koko verkolle. [10.]

Uusiutuvan energian integraatio

Uusiutuvan energian integroiminen verkkoon on tärkeä osa tulevaisuuden visiota puhtaasta hiilidioksidipäästöttömästä energiasta. Älykkäässä sähköverkossa voidaan hyödyntää erilaisia sähkön varastointijärjestelmiä tasaamaan kulutuspiikkejä ja varastoimaan tuotettua energiaa tulevaisuuden piikkien varalle. [11.]

Verkon valvonta

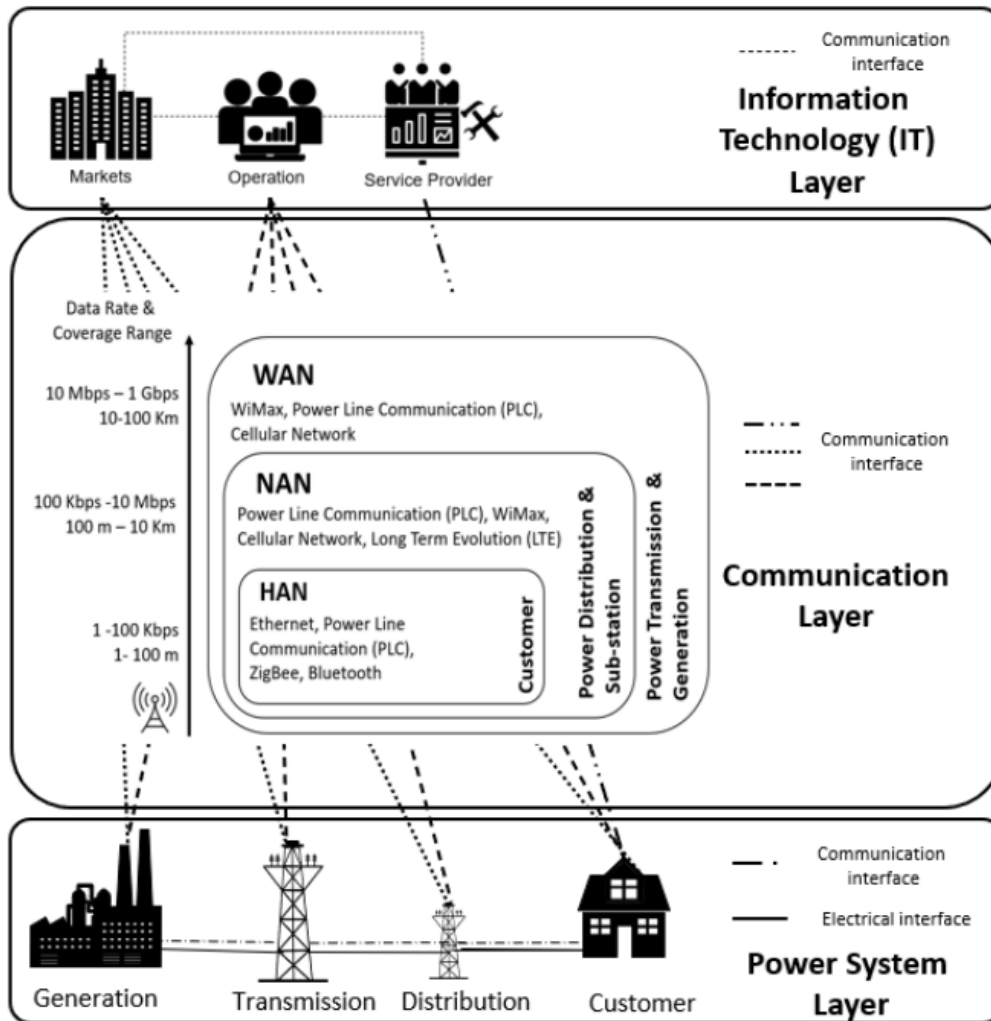
Verkon valvontatyökalujen avulla voidaan havaita vikoja, häiriöitä sekä poikkeavia jännitteen vaihteluja verkossa. Työkalut auttavat myös valvomaan kuorman tasapainotusta, jännitettä ja sähkön laatua. Tiedon avulla verkon operattorit voivat suorittaa korjaustoimia ja ennakoida kohtia verkossa, jotka tarvitsevat kunnossapitoa. [12.]

3 Älykkäät teknologiat

Älykäs sähköverkko yhdistää useita teknologioita, jotka parantavat verkon turvallisuutta, toimintavarmuutta ja tehokkuutta. Yhdessä toimiessaan nämä teknologiat mahdollistavat kaksisuuntaisen tiedonsiirron sähköverkossa, mikä taas mahdollistaa verkon paremman tarkkailun ja hallinnan. Kaikki tämä teknologia kuitenkin tekee älykkästä sähköverkosta entistä verkkoa kompleksisemmän järjestelmän. [13.]

Yksinkertaistettuna älykäs sähköverkko voidaan jakaa kolmeen pääkerrokseen: sähköjärjestelmäkerrokseen, viestiliikennekerrokseen ja tietotekniikkakerrokseen. Jokainen kerros hoitaa omaa tehtäväänsä verkossa. Kerrokset on kuvattu

tarkemmin kuvassa 1.



Kuva 1. Viestiliikennekerrokset ja yhteydet. Loppukäyttäjät (Customer) välittävät tietoa kotiverkkoon. Sähkönjakelu ja sähköasemat (Power Distribution & Sub-station) kommunikoivat lähiverkossa ja sähkönsiirto sekä tuotanto (Power Transmission & Generation) kommunikoivat laajassa verkossa. Data kootaan yhteen, jota koko verkko voi hyödyntää. [13.]

3.1 Sähköjärjestelmäkerros

Sähköjärjestelmäkerros koostuu sähköverkon fyysisistä ja tutuista osista. Siihen kuuluu sähkönsiirtoverkko, sähköasemat, älykkäät sähkölaitteet kuluttajan puolella, sekä energianvarastointijärjestelmät. [13.]

Sähkö liikkuu voimalinjoja pitkin voimalaitokselta korkea- ja keskijännitteisesti sähköasemille. Prosessi on monituroitu reaaliaikaisesti. Kommunikaatiota tapahtuu sähkölaitosten, jakelujärjestelmän, sähköyhtiöiden ja verkon operaattoreiden välillä. [13.]

Jakeluverkko jakaa tämän jälkeen sähkön keski- ja pienjännitteisesti kuluttajille, ja ottaa vastaan myös kuluttajien itsetuottaman ylijäämänsähköä esim. mahdollisista aurinkojärjestelmistä. Kommunikaatiota tapahtuu suurjänniteverkon operaattorien, loppukäyttäjien, sähköyhtiöiden ja jakeluverkon operaattorien välillä. Jotta järjestelmä toimisi mahdollisimman tehokkaasti, on älykkäässä sähköverkossa automatisoitu sähköasemien ja sähkösiirtoverkon toimintoja. Verkossa voidaan hyödyntää myös hajautettua tuotantoa, jotta sähkönsiirron välimatkat saadaan minimoitua ja näin ollen parannettua järjestelmän luotettavuutta ja vähennettyä häviöitä. [13.]

Loppukäyttäjät voivat omalta osaltaan vaikuttaa jakeluverkon tehokkaampaan toimintaan ottamalla käyttöön kulutusta seuraavia järjestelmiä. Kuluttaja voi asentaa erilaisia älylaitteita kuten liiketunnistimilla toimivia valoja, näin ollen minimoiden kustannuksia ja kulutusta. Kommunikaatiota loppukäyttäjien tasolla tapahtuu jakeluverkon, sähköyhtiöiden ja verkon operaattorien välillä. [13.]

3.2 Viestiliikennekerros

Toimiakseen älykäs sähköverkko vaatii laajan viestiliikenneverkon. Älykkäät sähköverkot hyödyntävät useita viestintäteknologioita eri nopeuksilla, toiminoilla ja vahvuuksilla että heikkouksilla. Viestiliikenneverkko on tärkeässä roolissa älykkään sähköverkon ylläpidossa varmistaen, että eri osa-alueet kommunikoivat keskenään. [13.]

Datan välitys eri ohjausjärjestelmien ja älykkäiden laitteiden välillä vaatii paljon tiedonsiirtokapasiteettia. Tulevaisuudessa voidaan odottaa tiedonsiirron tarpeen kasvavan entisestään, kun järjestelmiin lisätään yhä enemmän automaatiota,

tuotantoa hajautetaan ja tiedonkeruunlaitteiden näytteenoton taajuuksia tihennetään. [13.]

Älykkään sähköverkon viestintäjärjestelmät voidaan jakaa yleisesti ottaen kolmeen verkkoon: kotiverkkoon (Home Area Network, HAN), lähialueen verkkoon (Neighborhood Area Network, NAN) ja laajaan verkkoon (Wide Area Network, WAN). Verkot toimivat eri tiedonsiirtonopeuksilla, kantamilla ja tekniikoilla. Verkot hyödyntävät sekä langallisia, että langattomia yhteyksiä. [13.]

Kotiverkko toimii loppukäyttäjien puolella ja tarjoaa viestiliikenne yhteyksiä esim. kodin älyjärjestelmän ja tietokoneiden tai matkapuhelimien välillä. Älykkäistä kodin laitteista data voidaan välittää älykkäisiin sähkömittareihin lähiverkkoyhteyden avulla. Useat eri kotiverkot ovat yhteydessä lähiverkkoon, joka kokoaa tiedot ja välittää ne laajaan verkkoon. Laaja verkko on yhteydessä useaan lähiverkkoon ja taas kokoaa niiden välittämän tiedon, jonka se välittää sähköverkon eri osa-alueilla ja älykkäille järjestelmille. [13.]

3.3 Tietotekniikkakerros

Tietotekniikkakerros koostuu tietojenkäsittelyjärjestelmistä, käyttöjärjestelmistä, järjestelmän operaatiosta, sähkömarkkinoista ja datankäsittelytyökaluista. Älykäs sähköverkko tarvitsee viestintärajapinnan tuotantolaitosten, voimalinjojen, sähköasemien, DMS-järjestelmien, asiakkaiden ja sähköverkkoyhtiöiden välille. Sähköverkon operaattorien on oltava yhteyksissä eri palveluntarjoajien kanssa älykkään sähköverkon toiminnan varmistamiseksi. [13.]

Sähköverkon operaattorit hyödyntävät tiedonvaihtoa sähkömarkkinoiden toimijoiden kanssa suorittaessaan mittausta, toimintojen ohjausta, ja reaaliaikaista kuormituksen valvontaa. Sähkömarkkinoiden toimijoilla on myös käytössään tiedonsiirto-rajapinta sähköntuotantoon, siirtoon, jakeluun sekä kuluttajiin, jotka osallistuvat DMS-järjestelmään tarjoamalla tietoa sähkön hinnoitteluun liittyen. [13.]

3.4 Älykkään sähköverkon edut

Älykäs sähköverkko tarjoaa operaattoreille ja kuluttajille monia etuja. Näistä eduista voidaan listata seuraavat:

- Älykäs sähköverkko on korkea hyötysuhteinen sen käyttämien älykkäiden teknologioiden ansiosta. Se pystyy reagoimaan tapahtumiin nopeasti ja luotettavasti automaation, sensoreiden ja kaksisuuntaisen tiedonvaihdon ansiosta.
- Älykäs sähköverkko mahdollistaa uusiutuvien energianlähteiden integroimisen sähköverkkoon nykyistä laajemmin pienentäen sähköverkon hiilijälkeä.
- Tarjoaa nopeamman reagoinnin vikatilanteisiin verkon valvonta -ja ohjaus järjestelmien ansiosta.
- Tarjoaa kuluttajille parempaa tietoa sähkön reaaliaikaisista hinnoista ja kulutuksesta, vähentäen kulutuspiikkejä ja parantaen käyttäjäkokemusta.
- Sähkömarkkinoiden kehittäminen lisäämällä kokonaistarjontaa, siirtoiteitä ja kysyntävastetta.
- Sähkönlaadun ylläpitäminen, varsinkin kun järjestelmään lisätään uusiutuvaa energiaa.
- Sähköverkon luotettavuuden parantaminen, sekä sen toimintavarmuuden varmistaminen ennakoimalla järjestelmän häiriöihin ja vikoihin. [14.]

4 Olennaiset komponentit

Älykkään sähköverkon komponentit koostuvat älykkäistä laitteista ja sähköntuotantoon käytettävästä raskaammasta kalustosta [15]. Älykkään sähköverkon pääkomponentteja ovat:

- älylaitteet
- etäluettavat älykkäät mittarit
- hajautettu tuotanto
- PMU-mittarit (Phasor Measurement Unit)
- älykkäät sähköasemat

- integroidut viestintä, tarkkailu ja mittausjärjestelmät
- uusiutuva energia. [16.]

4.1 Älylaitteet

Älylaitteilla tarkoitetaan kodin laitteita, kuten jääkappeja, pesukoneita, paahtimia yms., jotka voidaan kytkeä internettiin ja pystyvät suorittamaan älykkäitä toimintoja. Älykkäillä toiminoilla voidaan tarkoittaa esimerkiksi laitteen etäohjausta, automaatiota ja tekoälyä. [15; 17.]

Älylaitteet mahdollistavat niiden paremman tarkkailun ja kontrollin. Käyttäjä pystyy esimerkiksi ajoittamaan laitteen käytön riippumaan energian hinnasta tai käynnistymään kun aurinkosähköä on tarjolla. [15; 17.]

4.2 Etäluettavat sähkömittarit ja PMU-järjestelmät

Etäluettavat sähkömittarit mahdollistavat edistyneen mittausinfrastruktuuriin älykkäässä sähköverkossa, jonka avulla tietoa pystytään keräämään enemmän ja tehokkaammin. Älykkäät mittarit keräävät tietoa minuutin välein, kun vanhemmalla teknologialla tiedot kerättiin tunneittain tai kuukausittain. [18.]

Dataa, kuten jännitteen ja virran osoittimia, voidaan parantaa myös käyttämällä ns. PMU:ta (Phasor measurement unit). PMU on WAMS-järjestelmän (Wide Area Monitoring Systems) osa, joka pystyy mittaamaan jännitteen suuruuden ja vaihekulman sähköjärjestelmän jokaisessa järjestelmäväylässä sekä virran suuruuden ja vaihekulman jokaisessa haarassa (johdot, muuntajat ja muut sarjalelementit) samanaikaisesti ja jatkuvasti. [19.]

PMU-järjestelmien käyttö älykkäässä sähköjärjestelmässä lisää sen hallittavuutta ja turvallisuutta. Nykyaikaiset PMU-järjestelmät keräävät tietoa jopa 60 eri pisteestä sekunnissa, kun taas edeltävät SCADA-järjestelmät (Supervisory Control and Data Acquisition) keräävät tietoa vain 1–2 pisteestä sekunnissa. [18.]

Kun etäluettavat sähkömittarit yhdistetään PMU-järjestelmään, saadaan paljon tarkempaa tietoa sähköverkon suorituskyvystä kuin vastaavalla vanhemmalla SCADA-järjestelmällä. [18.]

4.3 Hajautettu tuotanto

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan erinäisiä teknologioita, jotka tuottavat sähköä sen käyttöpaikalla tai sen lähellä, kuten aurinkopaneelit tai lämpövoimalaitokset. Sijoittamalla tuotantolaitokset lähelle lopullista kulutuspistettä minimoidaan sähkönsiirrosta aiheutuvat häviöt. [20.]

Hajautettu tuotanto voi palvella yksittäistä rakennusta, esimerkiksi kotia tai yritystä. Se voi olla myös mikroverkkoa eli pienempää verkkoa, joka on yhteydessä laajempaan sähköverkkoon. Mikroverkkoa voi olla käytössä esimerkiksi yliopistokampuksella tai teollisuuslaitoksessa. Hajautettu tuotanto voidaan liittää jakeluverkkoon, jolloin se pystyy edistämään puhtaan sähkön toimitusta useammille asiakkaille sekä vähentää sähkösiirto- ja jakeluhäviöitä. [20.]

4.4 Älykkäät sähköasemat

Älykkään sähköaseman toiminnan perustana ovat sen toisiojärjestelmät. Ne hallinnoivat aseman suojausta, ohjausta ja valvontaa antamalla käskyjä ensiolaitteille ja välittämällä informaatiota sähköasemalta käytönvalvontaan. [21.]

Sähköasemien toisiojärjestelmät ovat avainasemassa verkon käyttövarmuuden kannalta. Ne valvovat verkon tilaa ja ohjaavat ensiojärjestelmiä kuten katkaisijoita sekä muita sähköaseman toiminnallisia laitteita. Järjestelmä pitää huolen, että vikatilassa vikaantunut verkon osa saadaan tunnistettua ja erotettua verkosta. [21.]

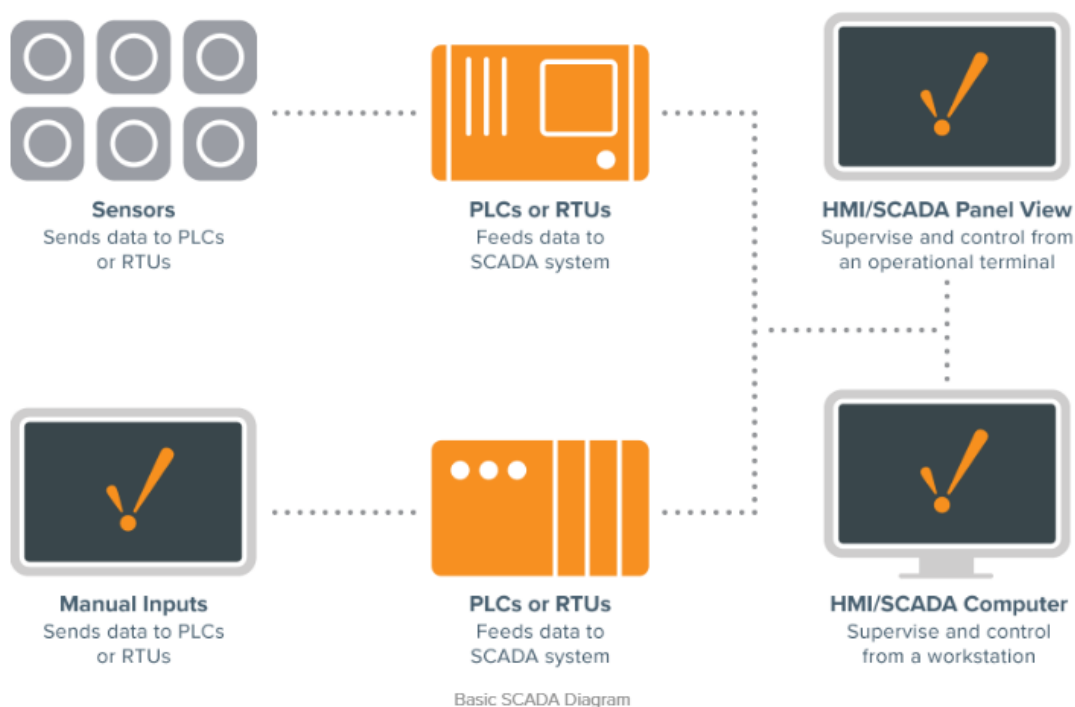
Sähköasemien toiminta ilman paikalla olevaa henkilöstöä on pitkälti toisiojärjestelmien automaation ansiota. Järjestelmät pystyvät itsenäisesti käsittelemään mittausdataa, tekemään päätelmiä ja tulkitsemaan tietoa. Asemilla on yleensä

satoja toisiokomponentteja. Suomessa järjestelmien valvontaa etänä hoitaa Fingridin kantaverkkokeskus. [21.]

4.5 Hallinta ja tarkkailu

Yleisin käytetty järjestelmä älykkäiden sähköverkkojen valvontaan on SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (kuva 2). Järjestelmillä valvotaan sähköverkon eri osia, kuten generaattoreita, muuntajia ja sähkösiirtoverkkoa reaaliaikaisesti. SCADA-järjestelmät ovat tärkeässä roolissa, kun sähköverkon toimintoja halutaan automatisoida. SCADA toimii prosessinohjausjärjestelmänä ja kerää sekä analysoi dataa esimerkiksi tuuli -ja aurinkovoimaloista. Näihin järjestelmiin voi kuulua myös tiedonkeruulaitteita, kuten etäterminaalilaitteita ja loogikkaohjaimia, jotka pystyvät kommunikoimaan sähköverkon muiden osien kuten suojarleiden tai sensoreiden kanssa. [22; 23.]

SCADA-järjestelmä kokoaa keräämänsä tiedon, jota voidaan tarkkailla verkon hallinnan tueksi. Vikatilanteen sattuessa SCADA pystyy havaitsemaan sen nopeasti ja eristää vika-alueen minimoiden vian vaikutuksen sähköverkkoon. [22; 23.]



Kuva 2. Yksinkertaistettu diagrammi SCADA-järjestelmän eri osien suhteesta. Etäterminaalilaitteet ja ohjelmoitavat logiikkalaitteet (PLC ja RTU) saavat tietoa sensoreilta sekä käyttäjien lisäämänä. SCADA kokoaa ja analysoi tiedon, jota verkon operaattorit voivat tarkkailla. [23.]

SCADA-järjestelmä voidaan jakaa seuraaviin pääkomponentteihin:

Etäterminaalilaitteet (RTU)

Etäterminaalilaitteet (Remote terminal unit, RTU) ovat hallintalaitteita, joita sähköverkoissa käytetään kontrolloimaan verkon fyysisiä osia esimerkiksi kytkimiä ja sensoreita. Etäterminaalilaitteet pystyvät lukemaan vain yhtä syötettä samanaikaisesti. Etuna etäterminaalilaitteissa on se, että ne eivät aiheuta signaalihäviöitä, mikä tekee niistä ideaalisia kohteisiin, joissa vaaditaan tarkkuutta. [44,42]. SCADA-järjestelmässä etäterminaalilaitteet muodostavat yhteyden SCADAN ohjelmistojen ja sähköverkon fyysisten komponenttien kanssa. [25.]

Ohjelmoitavat logiikkaohjaimet (PLC)

Ohjelmoitavat logiikkaohjaimet ovat mikroprosessoripohjaisia ohjaimia, joita käytetään kompleksien prosessien automatisointiin ja tarkkailuun. PLC-ohjaimet voidaan ohjelmoida lukemaan useaa syötettä samanaikaisesti ja prosessoidaan monimutkaisia laskutoimituksia, sekä tekemään päätöksiä sen saamien tietojen avulla. [24]. Kuten etäterminaalilaitteetkin, ohjelmoitavat logiikkaohjaimet yhdistävät verkon fyysiset osat SCADA-ohjelmistoon.

Viestintäverkko

SCADA-järjestelmät käyttävät erilaisia kommunikaatioprotokollia kommunikointiin järjestelmän eri osien välillä. Kommunikaatioprotokolla on käytännössä kieli, jota kaikki järjestelmän osat ymmärtävät. Käytettyjä protokollia on esimerkiksi Modbus, DNP3 ja SNMP. Yleinen toimintamalli protokollissa on ns. Master-Slave malli. Mallissa yksi pääasema (Master) hallitsee tietoliikennettä usean etäterminaalilaitteen (Slave) kanssa. [26.]

Käyttöliittymä (Human-Machine Interface, HMI)

Käyttöliittymällä tarkoitetaan näkymää, jonka avulla käyttäjät pystyvät kommunikoimaan SCADA-järjestelmän kanssa. Käyttöliittymän avulla verkon operaattorit pystyvät tarkkailemaan verkon ja verkkoon kytkettyjen laitteiden tilaa sekä kontrolloimaan niitä manuaalisesti. Käyttöliittymä sisältää usein graafisia elementtejä kuten diagrammeja, karttoja ja säätimiä, jotka helpottavat vuorovaikutusta operaattorien ja järjestelmän välillä. [27.]

Tietokannat

SCADA-järjestelmät hyödyntävät tietokantoja keräämänsä tiedon arkistointiin. Järjestelmät keräävät reaaliaikaista ja historiallista tietoa, joka varastoidaan tietokantoihin. Tietokannat ovat hyödyllinen apuväline, kun dataa halutaan analysoida pitkällä aikavälillä. [28.]

5 Uusiutuvan energian integroimisen haasteet

Uusiutuva energia on olennainen osa tulevaisuuden sähköverkkoa. Sen integraatio aiheuttaa kuitenkin haasteita, joista suurin on sen skaalautuvuus. Tuuli- ja aurinkoenergian kohdalla energian tuotto on hyvin riippuvaista sääolosuhteista. Tämä johtaa tarpeeseen rakentaa energian varastointiratkaisuja, jotta tasainen sähkön toimitus voidaan varmistaa ja verkko pitää tasapainossa. [18.]

Tuoton vaihtelevuus

Iso syy fossiilisten polttoaineiden suosioon ja niiden käytön yleisyyteen historiassa on varmasti ollut niiden tasainen energian tuotto ja luotettavuus. Valitettavasti uusiutuvat energiat ovat sen sijaan luonteeltaan epävakaita ja alltiita sääolosuhteiden vaihtelulle. Tämä vaihtelevuus asettaa haasteita sähköverkon toiminnalle. Näitä haasteita ovat esimerkiksi tarve energian varastointiin, kulutuksen ennustaminen, sähköverkon vakaana pitäminen sekä jännitteen- ja kysynnän hallinta. [18.]

Tuulivoima

Tuulivoima on energianlähde, jonka tuotanto on hyvin vaihtelevaa. Tuulen nopeus ja sen suunta ovat ennalta-arvaamattomia ja säästä riippuvaisia. Sään ääri-ilmiöt voivat myös aiheuttaa turbiinien vaarallisen nopeuden, jolloin ne joudutaan pysäyttämään hetkellisesti. Hankaluuksia voi myös syntyä tuulen nopeuden ennustamisessa. [29.]

Aurinkovoima

Kuten tuulivoiman tapauksessa myös aurinkovoiman tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan. Esimerkiksi pilvinen sää vaikuttaa tuotetun sähkön määrään. Vaihtelua voi syntyä lyhyessäkin ajassa jopa 80 %. Aurinkovoimassa vaihtelua syntyy myös päivän ja yön välillä. [30.] Auringon energian hyödyntämiseksi tärkeää on optimoida paneelien suunta ja koko. Paneelien tuotantoon vaikuttaa myös esimerkiksi ilmanpaine ja lämpötila. [31.]

Sähkönlaatu

Uusiutuva energia muodostaa haasteita myös sähkönlaadulle. Näistä voidaan mainita esimerkiksi jännitteen vaihtelut, loisteho, harmoniset yliaallot, sähkömagneettiset häiriöt, matalat tehokertoimet ja kuorman hallintaan liittyvät ongelmat. [32.]

Jännitteen vaihtelut

Jännitteen vaihtelut ovat ongelma erityisesti aurinko- ja tuulivoiman kohdalla. Jännitepiikit, yli- ja alijännitteet ja matala signaali-kohinasuhde ovat ongelmia, joita voi esiintyä, kun uusiutuvaa energiaa integroidaan. [33.] Tuoton vaihtelevuus vähentää useiden laitteiden käyttöikä, sillä heilahtelut häiritsevät herkempiä elektronisia komponentteja. [18.] Alijännitteet voivat myös vaurioittaa kodinkoneita ja järjestelmiä kuten pesukoneita ja lattialämmitysjärjestelmiä kuluttajien puolella. [34.]

Harmoninen särö

Harmoninen särö on yksi yleisimmistä ongelmista, joita voi esiintyä erityisesti suuremmissa tuulivoimaloissa. Tämä johtuu korkeasta kytkentätaajuudesta taajuusmuuttajissa ja mahdollisesta epälinearisesta toiminnasta voimalaitoksen generaattoreissa tai muuntajissa. [35.]

5.1 Laitteisto

Verkkoon voidaan liittää useita laitteita ja ohjausjärjestelmiä parantamaan sähkönlaatua. Tärkeää on tehomuuntajien suunnittelu siten, että ne ottavat huomioon yksittäisten energianlähteiden ominaisuudet. Invertterit tulee suunnitella siten että ne ottavat huomioon hajautetun tuotannon ja täyttävät samalla sähkönlaadulle asetetut laatustandardit. [36.]

Invertterien huolimaton suunnittelu voi aiheuttaa verkkoon harmonisia säröjä. Kun elektroniikka suunnitellaan ohjausjärjestelmiä hyödyntäen, voidaan

sähkönlaatua parantaa vähentäen jännitteen vaihteluita ja harmonista säröä. Viimeisimpiä kehityksiä tällä alueella ovat esimerkiksi sarja-aktiivisuodattimet, shunttiaktiivisuodattimet ja näiden hybridit, jotka korjaavat virta- että jänniteongelmia pidättämällä kuormituksen tai kompensoimalla harmonista säröä ja loistehoa. [36.]

5.2 Synkronisaatio

Verkon vaiheen, taajuuden ja jännitteen synkronointi on yksi vaihtoehtoista sähkönlaadun parantamiseksi. Yleinen menetelmä on esimerkiksi vaihekoherentti silmukka (phase locked loop, PLL). PLL on ohjausmenetelmä, jossa tulo- ja lähtösignaalit ovat yhteydessä toisiinsa. [18.]

Muita synkronointitekniikoita on esimerkiksi verkon nollakohdan havaitseminen tai useiden suodattimien käyttö yhdessä epälineaaristen muunnoksen kanssa. PLL on usein kuitenkin parempi tekniikka. Suodatuksen käyttö voi aiheuttaa takaisinkytkentäviiveitä ja nollakohdan havaitseminen voi aiheuttaa virheellisiä signaaleja kohinan takia. [18.]

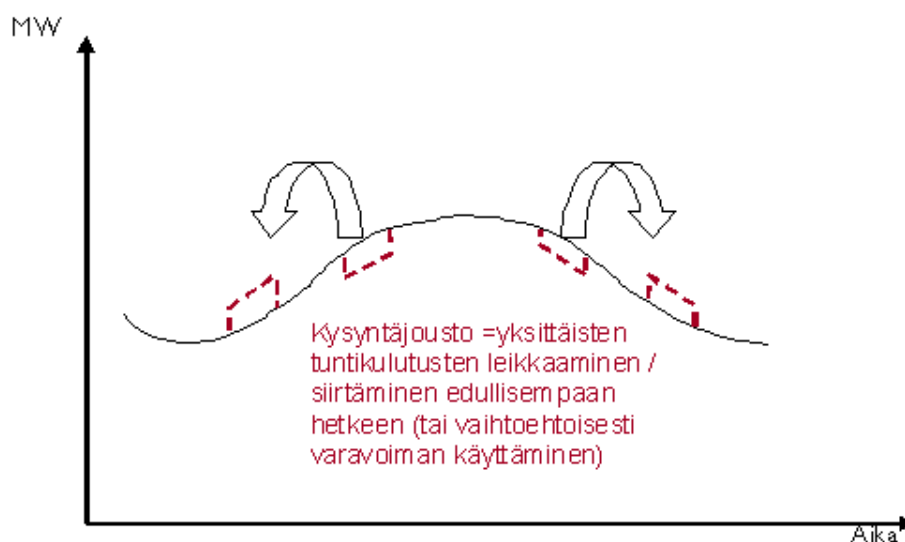
Sähkönlaadun parantamiseksi älykkäässä sähköverkossa on olemassa useita ratkaisuja. Yksi vaihtoehto on joustavien vaihtosähkön siirtojärjestelmien (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) käyttö sähkönlaadun parantamiseksi. On havaittu myös, että hajautetut FACTS-järjestelmät parantavat sähkönlaadun lisäksi myös tehohyötysuhdetta, loistehon kompensointia ja energiatehokkuutta. Aurinkoenergian ja sähköajoneuvojen aiheuttamia harmonisia häiriöitä sähköverkossa voidaan vähentää passiivisilla suodattimilla kummassakin järjestelmässä. Suodattimet pienentävät harmonista spektriä ja parantavat jänniteaaltojen laatua. [18.]

5.3 Kysyntäjousto

Tuoton vaihtelevuus aiheuttaa haasteita myös riittävän sähkönsaannin ylläpitämiseksi. Kuormituksen hallintajärjestelmällä voidaan parantaa järjestelmän

kokonaistehokkuutta ja laatua, mikä saavutetaan siirtämällä kysyntää tai vähentämällä sitä. Kysynnän vähentäminen auttaa madaltamaan huippukuormitusta, mikä johtaa tasaisempaan kysyntäprofiiliin, pienempiin kustannuksiin ja parempaan luotettavuuteen. [18.]

Suomessa kulutuksen vaihtelu on suurempaa kuin monissa muissa maissa johdettujen lämmityksen tarpeesta talvella. Tämä aiheuttaa suurta vaihtelua sähkönkulutuksessa kesän ja talven välillä. Myös uusiutuvan energian lisääntymisen ja sen aiheuttaman tuotannon vaihtelun lisääntyminen muodostaa tarpeen kysynnän laajemmalle joustolle. Kysyntäjouston määritelmällä tarkoitetaan toimintaa tai järjestelmiä, joilla voidaan vaikuttaa sähkönkulutuksen määrään eri aikoina. Kysyntäjouston pääasiallisena hyötynä on kulutushuippujen ja taajuuden vaihteluiden tasaus. [37; 38.] Kulutushuippujen tasausta on havainnoitu kuvassa 3.



Kuva 3. Kysyntäjouston periaatetta havainnoiva kaavio. Sähkönkulutusta pyritään siirtämään edullisempaan hetkeen, jolloin kokonaiskulutus on pienempää. [39.]

Kysyntäjousto hyödyttää toimijoita sähkömarkkinoiden koko osa-alueella. Tasaamalla kysyntää voimalaitosten huipputuotantokapasiteetin, sekä varavoiman tarve vähenee. Kun sähköverkkoa ei tarvitse ylikuormittaa, paranee sen toimintavarmuus ja sähkön taajuus pysyy hyvällä tasolla. [38.] Kuluttajalle etu ilmenee sähköhinnassa. Spot- ja tasesähkökustannukset vähenevät kysyntäjoustoa

hyödynnettäessä. Kysyntäjousto vaikuttaa myös sähkön alhaisempiin johdanneishintoihin ja sähköyhtiöiden hinnoittelussa alempina profiili- ja tasesähkökustannuskomponentteina. [39.]

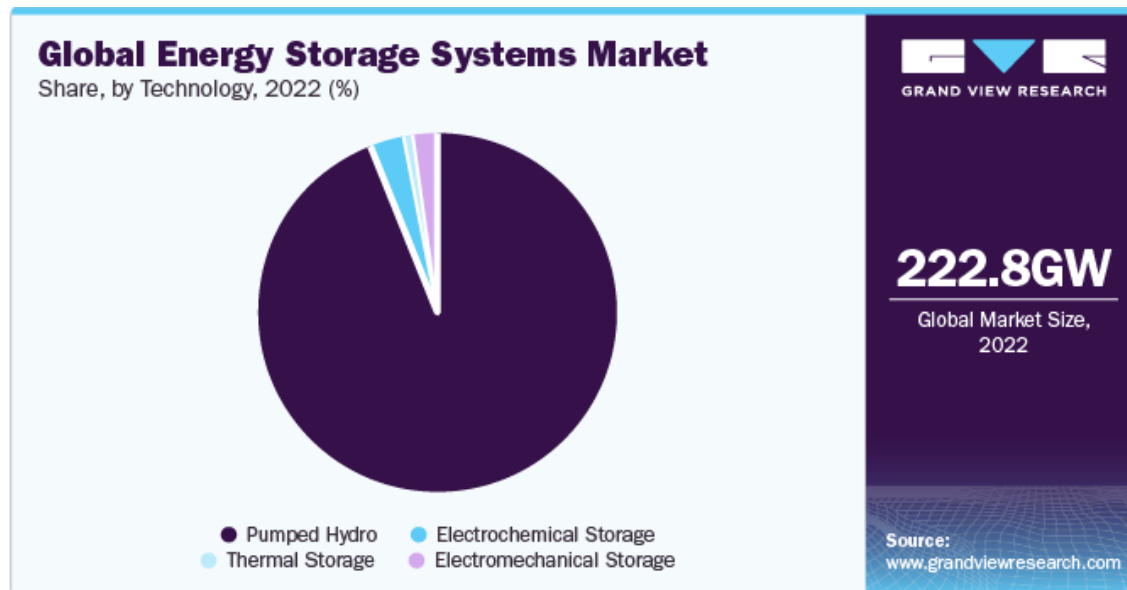
Useat kysyntäjoustomenetelmät perustuvat kulutuksen ennustamiseen sekä kuluttajien kannustamiseen käyttää sähköä kulutushuippujen ulkopuolisina aikoina. Menetelmiä tähän on esimerkiksi Gopen ja Sikdarin [40.] esittämä järjestelmä, joka käyttää kulutuksen ennustamiseen peittopohjaista alueellista tiedonkeruuta. Etuna järjestelmässä on Sikdarin mukaan parannettu laskennallinen tehokkuus ja yksityisyyden suoja. [40.]

Ratkaisuja on kehitetty myös koneoppimista hyödyntäen. Koneoppimista hyödyntävä malli voisi esimerkiksi ennustaa sähkön kulutusta ja hintaa nykyisiä järjestelmiä paremmin. [18.]

5.4 Energian varastointi

Verkonlaajuisella energian varastoinnilla tarkoitetaan verkkoon teknologioita, jotka voivat varastoida tuotettua energiaa myöhempää käyttöä varten. Eniten käytetty varastointijärjestelmä maailmanlaajuisesti on pumppuvesivoima. Muita käytössä olevia järjestelmiä ovat esimerkiksi akkujärjestelmät. [41.]

Energian varastointi on tarpeellista, kun halutaan saada kaikki tuuli- ja aurinkovoimalaitosten tuottamasta energiasta käyttöön. Varastoidulla energialla voidaan myös tasapainottaa verkkoa ja vastata kulutukseen silloin, kun sähköntuotanto on alentunut sääolosuhteiden takia. Erilaisia varastointijärjestelmiä on useita, mutta eniten käytetyt järjestelmät maailmanlaajuisesti ovat kuitenkin akkuvarastointijärjestelmät ja pumppuvoimalaitokset (kuva 4). [42.]



Kuva 4. Varastointijärjestelmien kapasiteettien osuus maailmanlaajuisesti. Pumppuvoimalat (Pumped Hydro) johtavat selvästi jonka jälkeen eniten kapasiteettia on akkujärjestelmillä (Electrochemical Storage). [42.]

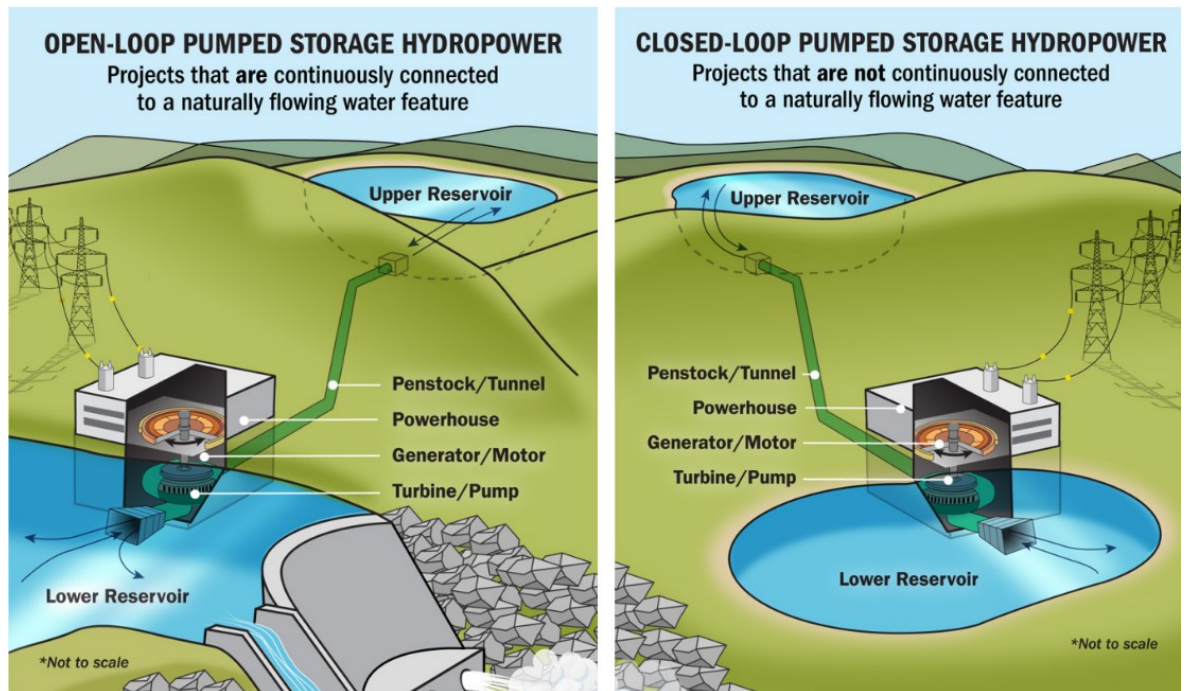
5.4.1 Akkuvarastointijärjestelmät

Akkujärjestelmät ovat yksi vaihtoehto uusiutuvista energianlähteistä saadun energian varastointiin. Käytössä on olemassa monia erilaisia akkujärjestelmiä, kuten Li-ioni-akkuja, natriumioniakkuja, rauta-ilma-akkuja, nestemetalliakkuja ja redox-virtausakkuja. [43]

Vaihtoehtoista selvästi yleisin on Li-ioni-akusto, jonka toiminta perustuu litiumionien varauskierteeseen. Käytössä olevaa Li-akkukapasiteettia vuonna 2018 maailmanlaajuisesti oli 1629 MW. Akkujen kaupallistaminen alkoi 1990-luvun alussa, jonka jälkeen Li-ioni-akuista on tullut yleisiä useilla toimialoilla korkean hyötysuhteen, tehon ja suorituskyvyn vuoksi. Erityisesti Li-ioni-akut ovat tarjonneet ratkaisun sähköautoteollisuuden ja kulutuselektronikkamarkkinoiden lisääntyneeseen kysyntään. Ennusteiden mukaan kapasiteetti tulee kasvamaan viisinkertaisesti vuoteen 2030 mennessä. [43.]

5.4.2 Pumppuvarastointijärjestelmät

Pumppuvesienergian varastointi perustuu painovoimaan ja korkeammalla sijaitsevan veden potentiaalienergiaan. Kun sähköä tarvitaan ja sähkön hinta on korkea, voidaan ylemmässä altaassa olevaa vettä laskea alas voimalan turbiinin läpi, jolloin generaattori tuottaa sähköä. Kun sähkön tarve vähenee ja sähkön hinta laskee, voidaan vettä pumpata takaisin yläaltaaseen. Tällöin turbiini toimii pumppuna ja generaattori sähkömoottorina. Käytössä on ns. avoimia ja suljettuja järjestelmiä. Avoimissa järjestelmissä pumpun alapää on yhteydessä virtaavaan veteen, ja kyseessä onkin usein vesivoimalaitos. Suljetussa järjestelmässä virtaavaa vettä ei ole, ja järjestelmän tarkoituksena on toimia varavoiman lähteenä tai se on osa esim. tuulivoimalaitosta (kuva 5). [44.]



Kuva 5. Avoin ja suljettu pumppuvesienergian varastointijärjestelmä [44].

Pumppuvarastoitua vesivoimaa voidaan käyttää myös ylimääräisen energian varastointiin ja kulutuspiikkien tasaukseen, kun käytetään säästä riippuvaisia lähteitä esim. aurinko, tuuli, sekä muista uusiutuvista energialähteistä tai jatkuvatoimisista peruskuormituslähteistä kuten kivihiiiltä tai ydinvoimaa.

Pumppuvarastoinnin yhteydessä käytettävät altaat voivat olla melko pieniä verrattuna perinteisten, teholtaan samankaltaisten vesivoimaloiden järviin, ja tuotantojaksot ovat usein alle puolen vuorokauden. [44.]

Pumppuvarastointi on ylivoimaisesti yleisin käytössä oleva verkkoenergian varastointimuoto (taulukko 1). Vuodesta 2020 lähtien Yhdysvaltain energiaministeriön Global Energy Storage Database -tietokanta raportoi, että pumppuvarastoinnin osuus on noin 98 % kaikista aktiivisista jäljitetyistä 36 varastointijärjestelmästä maailmanlaajuisesti (taulukko 1). [43.]

Taulukko 1. Vuonna 2018 käytössä olevien energianvarastointijärjestelmien tuotantokapasiteetti. Taulukosta voidaan nähdä Li-ioniakuston (Lithium-ion) ja pumppuvarastoinnin (PSH) osuudet. [43.]

Teknologia	Kapasiteetti (MW)
NaS akusto	189
Li-ioni akusto	1629
Lyijy akusto	75
Flow akusto	72
Pumppuvarastointi	169557
Paineilmavarastointi	407
Vauhtipyörät	931

Asennettu kokonaiskapasiteetti on yli 181 GW, josta noin 29 GW on Yhdysvalloissa, ja asennettu kokonaisvarastointikapasiteetti on yli 1,6 TWh, josta noin 250 GWh on Yhdysvalloissa. Hyötysuhde järjestelmissä vaihtelee välillä 70–80 %. [43.]

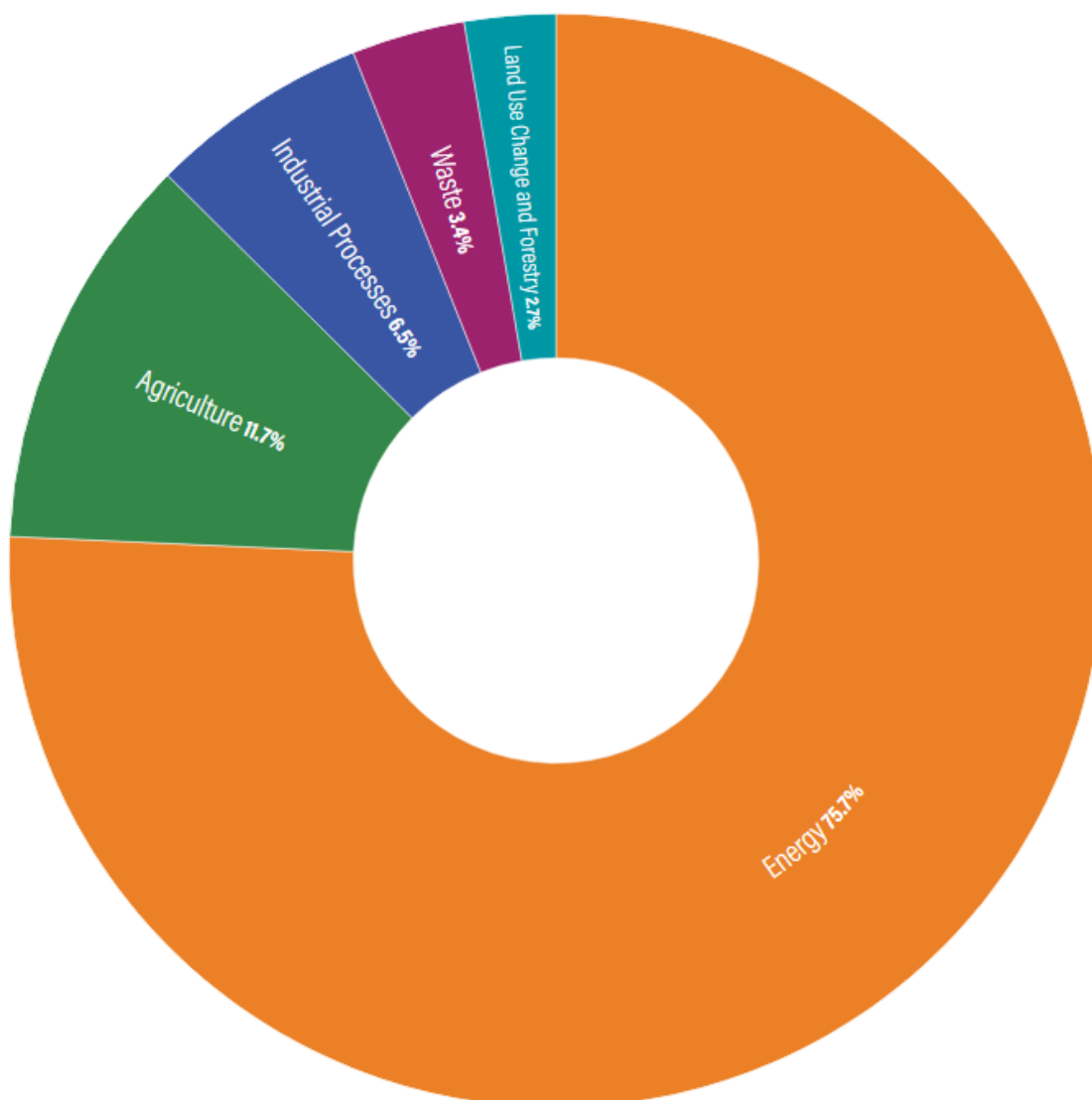
6 Uusiutuvan energian integroimisen edut

Suurimpana etuna uusiutuvan energian integraatiossa on sen myönteinen ympäristövaikutus. Uusiutuvien energianlähteiden integraatio mahdollistaa siirtymisen pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä vähentäen hiilidioksidipäästöjä. Ympäristöllisiä haittavaikutuksia pystytään minimoimaan tekemällä uusiutuvan energian lisäämisestä verkkoon mahdollisimman helppoa. Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi automaatiota, käyttödataa ja kaksisuuntaista tietoliikennettä. Verkonkäyttäjät pystyvät myös hyötymään heille henkilökohtaiseen käyttöön asennetusta uusiutuvasta energiasta kuten aurinkopaneeleista. Itsetuotetusta energiasta ei tarvitse maksaa, ja se tarjoaa mahdollisuuden omavaraisuuteen energian suhteen esimerkiksi sähkökatkon aikana. [18.]

6.1 Ympäristövaikutukset

Fossiilisten polttoaineiden käyttö kuormittaa ilmakehäämme liiallisella hiilidioksidilla. Kaasut toimivat kuten kasvihuone vangiten lämmön hiilidioksidipeitteen sisälle. Kohonneet lämpötilat tuovat mukanaan useita ei-toivottuja ilmiöitä, kuten myrskyjä, merenpinnan nousua, kuivakausia sekä eläin- ja kasvikuntien sukupuuttoja. [45.]

Global greenhouse gas emissions by sector and end use, 2021

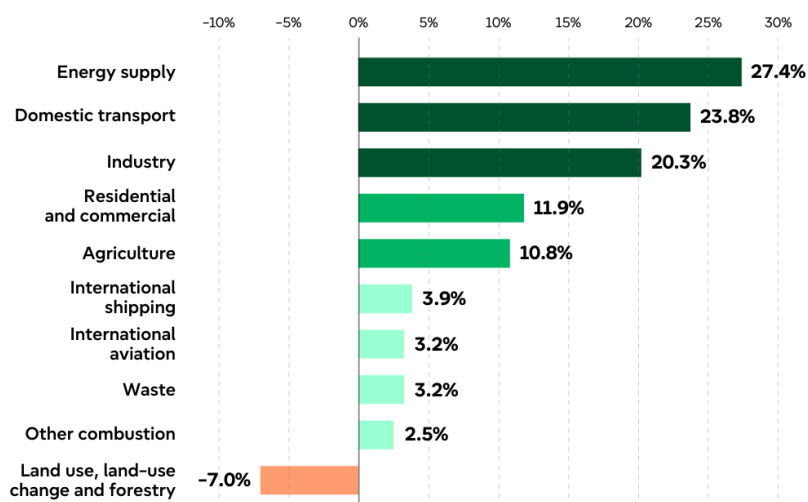


Kuva 6. Kasvihuonepäästöjen osuus sektoreittain maailmanlaajuisesti. Energia-teollisuus vastaa yli 75% tuotetuista päästöistä [48].

Maailmanlaajuisesti vuonna 2021 75.7% kasvihuonekaasuista oli peräisin energia-alalta (kuva 6). Euroopassa energiateollisuuden osa päästöistä oli 27.4 % vuonna 2022 (kuva 7) [46]. Yhdysvalloissa vastaava osuus oli 31 % [47].

Greenhouse gas emissions in the EU by sector

share of total emissions estimated
in CO2 equivalent (2022)



Source: European Environment Agency

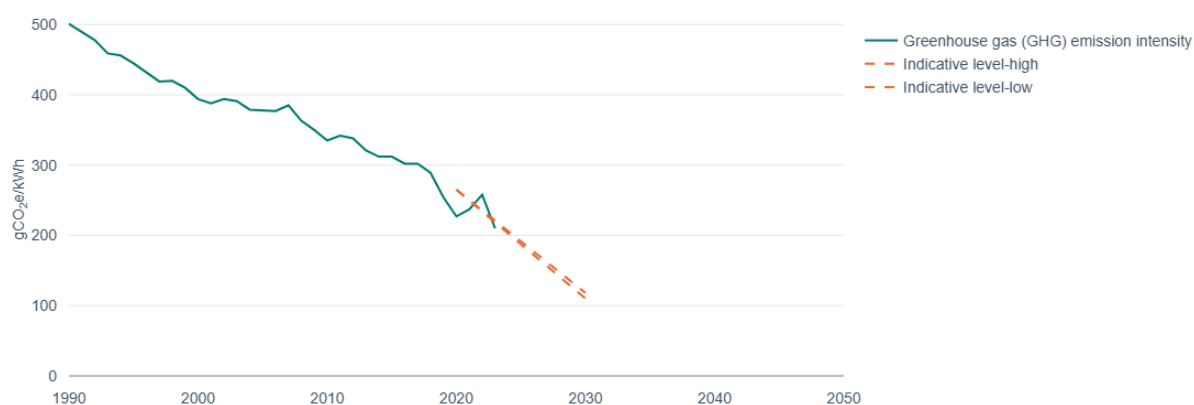


Kuva 7. Kasvihuonepäästöjen arvioitu osuus eri sektorien osalta EU-alueella vuonna 2022. Energiateollisuus on Euroopassakin suurin kasvihuonepäästöjen aiheuttaja [46].

Fossiilisten polttoaineiden sijaan uusitutvat energiat tuottavat vain vähän tai eivät ollenkaan kasvihuonepäästöjä. Kokonaispäästöt uusiutuvan energian kohdalla jäävät vähäisiksi myös, vaikka mukaan laskettaisiinkin koko elinkaaren aikana syntyneet, eli teknologian valmistuksen, asennuksen, käytön ja käytöstä poistamisen synnyttämät päästöt. [49.]

Sähkön tuottaminen polttamalla maakaasua vapauttaa 0,27–0,9 kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia kilowattituntia kohden ($\text{CO}_2\text{e/kWh}$), kun taas kivihiili tuottaa 0,64–1,63 kg $\text{CO}_2\text{e/kWh}$. Tuuli puolestaan aiheuttaa vain 0,01–0,02 kg $\text{CO}_2\text{e/kWh}$ elinkaarensa aikana, aurinko 0,03–0,1, geoterminen energia 0,05–0,1 ja vesivoima 0,05–0,23 kg $\text{CO}_2\text{e/kWh}$. [50.]

Suunta Euroopassa on ollut kuitenkin lupaava. Kasvihuonepäästöjen määrä on yli puolittunut 1990-luvun 501 g $\text{CO}_2\text{e/kWh}$ vuoden 2023 210 g $\text{CO}_2\text{e/kWh}$ verrattuna (kuva 8). [50.]



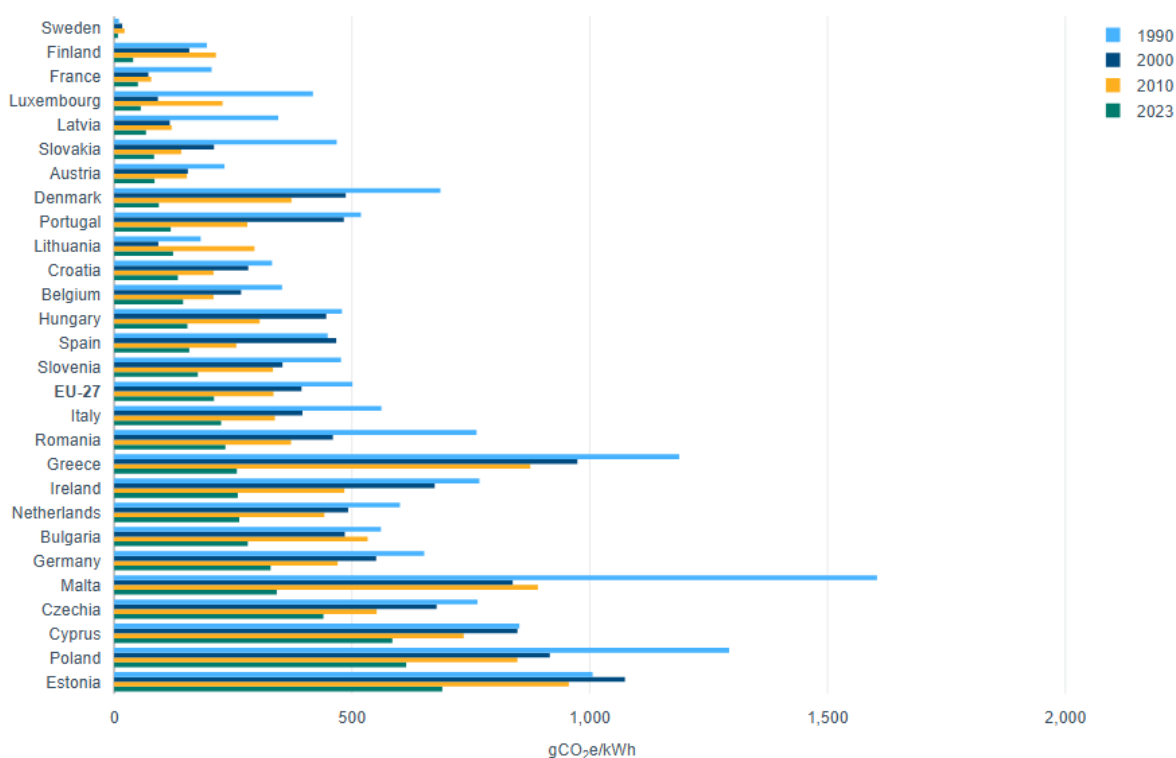
Kuva 8. Hiilidioksidipäästöjen määrä Euroopassa vuosien 1990 ja 2023 välillä. Oranssit katkoviivat kuvastavat kehitystä, joka vaadittaisiin hiilineutraaliuden saavuttamiseen vuoteen 2050 mennessä. [50.]

EU-pyrkii rajoittamaan ilmastonmuutosta tavoitteenaan saavuttaa ilmastoneutraalisuus vuoteen 2050 mennessä. Vaikka suunta onkin ollut positiivinen, on päästövähennysten EU:n European Environment Agencyn mukaan nouseva vielä, että asetettu hiilineutraaliuden tavoite voidaan saavuttaa. [50.]

Kiristyneet välit Venäjään ja sota Ukrainassa korostavat myös tarvetta siirtymiseen pois maakaasusta ja öljystä sähköntuotannossa. Monet maat ovat vieläkin riippuvaisia Venäjän tuottamasta maakaasusta, jonka saatavuus nykyisessä maailmantilanteessa on kyseenalaista. Laajempi siirtyminen Euroopan tasolla

uusituvan energian hyödyntämiseen parantaisi sähkösaannin takaamista ja alentaisi sähkön hintoja.

Suomessa uusituvan energian käyttö ja hiilidioksidipäästöjen määrä ovat selvästi Euroopan keskiarvoa paremmat. Eniten päästöjä Euroopan tasolla tuottavat Viro, Puola, Kypros ja Tšekin tasavalta (kuva 9). [50.]



Kuva 9. Hiilidioksidipäästöjen määrä Euroopan Unionin alueella vuosina 1990, 2000, 2010 ja 2023 [50].

6.2 Terveysvaikutukset

Ympäristölle haitallisten hiilidioksidipäästöjen lisäksi hiili- ja maakaasulaitoksien päästöt vaikuttavat negatiivisesti myös ihmisten terveyteen. Laitosten saastuttama vesi ja ilma on yhteydessä esimerkiksi hengitysvaikeuksiin, neurologisiin sairauksiin, sydänkohtauksiin ja syöpään. Esimerkiksi Yhdysvalloissa, jossa fossiilisten polttoaineiden käyttö on Suomea yleisempää, on arvioitu, että hiilen

elinkaarikustannukset ja kansanterveydelliset vaikutukset vuodessa maksavat noin 74,6 miljardia dollaria (n. 70 mrd. euroa) vuodessa. [45; 51.]

7 Pohdintaa

Älykkäät sähköverkot tulevat olemaan normi länsimaissa lähitulevaisuudessa. Nykyinen teknologian suunta, sähköautoilun yleistyminen ja uusiutuvan energian laajamittainen lisääminen tulevat takaamaan sen, että sähköverkkoa tullaan uudistamaan älykkäämmäksi. Voi olla jopa, että länsimaissa käsite alkaa myös vaipua hämärään niin kuin on käynyt älypuhelimien kanssa, kun niiden yleistyminen on tehnyt niistä useimmiten puhekielessä vain puhelimia.

Uusiutuvan energian kasvu tulee synnyttämään haasteita sähköverkon toimintavarmuudelle, mutta uskon että nykyisellä teknologialla niihin vastaaminen on mahdollista, ellei jopa pakollista. Paluuta fossiiliseen tuotantoon ei länsimaissa enää ole. Suomessa suunta on selvästi oikea. Kirjoittaessani tätä työtä viimeinen kivihiehellä toimiva tuotantolaitos lakkautettiin 1.4.2025 Helsingissä.

Tässä työssä keskityttiin paljon uusiutuvan energian haasteisiin, mutta mielestäni on hyvä pitää mielessä, että ne ovat ratkaistavissa. Siirtymä uusiutuvaan energiaan on vain ajan kysymys, sillä fossiiliset polttoaineet tulevat loppumaan. Mielestäni on järkevää tehdä siirtymä pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä ennemmin kuin myöhemmin ja minimoida tulevaa vahinkoa ilmakehän ja ympäristön saastumisen kannalta.

Älysähköverkon teknologiat ja menetelmät, kuten kysyntäjousto yhdistettynä etäluettaviin/älykkäisiin sähkömittareihin, tulee helpottamaan tavallisen sähkönkäyttäjän kulutuksen seurantaa ja pienentämään sähkölaskuja. Erityisesti Suomessa kysyntäjouston merkitys nousee suurten sähkön kulutuksen vaihteluiden takia. Kulutusjoustolle osittain vaihtoehtoinen energianvarastointi on Suomessa hankalampaa. Vesipumppuvoimalat ovat kalliita, ja Suomessa tarpeeksi

korkeita paikkoja niiden asennukselle on vain Pohjois-Suomessa, kaukana sieltä, missä sähkön kulutus on suurinta. Akkujärjestelmät toimivat huonosti pakkasessa, joten Suomessa niiden täytyy olla lämmitettyjä.

Mielenkiintoista on nähdä, miten tekoälyn yleistymisen tulee vaikuttamaan sähköverkkoon. Sillä on paljon potentiaalia esimerkiksi kysynnän ja vianhallinnan ennakoimisessa ja järjestelmien älykkäässä sopeutumisessa muuttuviin olosuhteisiin.

Lähteet

- 1 Moretti, M. & Djomo, S. N. & Azadi, H. & May, K. & De Vos, K. & Van Passel, S. & Witters, N. 2017. A systematic review of environmental and economic impacts of smart grids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 s. 888–898.
- 2 Härö, Eero & Järvensivu, Sanna-Maria & Alilehto, Jussi & Haravuori, Pasi. Report: Electricity how long could we survive without it? Verkkoaineisto. <<https://www.swecogroup.com/urban-insight/energy/report-electricity-how-long-could-we-survive-without-it/#:~:text=On%20lower%20floors%2C%20water%20availability,basis%20would%20also%20stop%20working>>. Luettu 15.2.2025.
- 3 European Council. How is EU electricity produced and sold? Verkkoaineisto. <<https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/#:~:text=At%20EU%20level%2C%20renewables%20make,different%20in%20each%20EU%20country>>. Luettu 12.4.2025.
- 4 Shafiullah, Gm & A Oo, Aman Than & Shawkat Ali, A.B.M & Wolfs, Peter. 2012. Smart Grid for a Sustainable Future. Artikkele. School of Engineering and Technology, Central Queensland University, Rockhampton, Australia.
- 5 Xi, Fang & Satyajayant, Misra & Guoliang, Xue & Dejun, Yang. 2012. Smart Grid - The new and Improved Power Grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- 6 Baimel, Dmitry & Tapuchi, Saad & Baimel, Nina. 2016. Smart Grid Communication Technologies. Shamoon College of Engineering, Be'er Sheva, Israel.
- 7 Empowering the grid: Empowering the Grid: IoT Substation Monitoring. Verkkoaineisto. <<https://www.iotforall.com/empowering-the-grid-iot-substation-monitoring>>. Luettu 15.2.2025.
- 8 Awal, J. & Khairil Rahmat, M. 2020. A Recent Development of Monitoring Devices on Smart Grid. *Universiti Kuala Lumpur, British Malaysian Institute*.
- 9 Cochran, Jaquelin & Miller, Mackay & Milligan, Michael & Arent, Doug & Palmintier, Bryan & O'Malley, Mark & Mueller, Simon & Lannoye, Eamonn & Tuohy, Aidan & Kujala, Ben & Sommer, Morten & Holttinen, Hannele &

- Kiviluoma, Juha & Soonee, S.K. 2014. Flexibility in 21st Century Power Systems. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- 10 Schweiger, Gerald & Eckerstorfer, Lisa V. & Hafner, Irene & Fleischhacker, Andreas & Radl, Johannes & Glock, Barbara & Wastian, Matthias & Rößler, Matthias & Lettner, Georg & Popper, Niki & Corcoran, Katja. 2020. Active consumer participation in smart energy systems. Graz University of Technology, Institute of Software Technology.
 - 11 Jackson, Holly. 2024. The Role of Smart Grids in Enhancing Renewable Energy Efficiency: How ZPN Energy is Leading the Way. Verkkoaineisto. <<https://www.zpnenergy.com/the-role-of-smart-grids-in-enhancing-renewable-energy-efficiency-how-zpn-energy-is-leading-the-way>>. Luettu 18.2.2025.
 - 12 Gangaadharan, Anoop. Seitsemän tapaa, joilla valvontaratkaisu tehostaa sähköverkon hallintaa. Verkkoaineisto <<https://eu.landisgyr.com/blog-fi/seitsem%C3%A4n-tapaa-joilla-valvontaratkaisu-tehostaa-s%C3%A4hk%C3%B6verkon-hallintaa>>. Luettu 18.2.2025.
 - 13 Smart Grid LAB Hessen. 2022. Smart Grid Components: Functionalities and Benefits. Julkaisu.
 - 14 Al-Kaabi, Murtadha & Al Igeb, Bahaa & Ali, Sarah. 2023. An Overview of the Smart Grid Attributes, Architecture and Components. 10.1007/978-3-031-25274-7_38.
 - 15 Molla, Tesfahun & Khan, Baseem & Moges, Bezabih & Haes Alhelou, Hassan & Zamani, Reza & Siano, Pierluigi. 2019. Integrated energy optimization of smart home appliances with cost-effective energy management system. 5. 249-258. 10.17775/CSEEJPES.2019.00340.
 - 16 Vacca, John. 2020. Solving Urban Infrastructure Problems Using Smart City Technologies: Handbook on Planning, Design, Development, and Regulation. Elsevier.
 - 17 Why Smart Appliances? Silicon Labs. Verkkojulkaisu. <[https://www.silabs.com/applications/smart-home/appliances#:~:text=What%20are%20Smart%20Appliances%3F,learning%20\(AI%2FML\)](https://www.silabs.com/applications/smart-home/appliances#:~:text=What%20are%20Smart%20Appliances%3F,learning%20(AI%2FML))>. Luettu 13.3.2025.
 - 18 Powell, Jadyne & McCafferty-Leroux, Alex & Hilal, Wadeed & Gadsden, Andrew. 2024. Smart Grids: A Comprehensive Survey of Challenges, Industry Applications, and Future Trends.. Katsastusartikkeli. Western University, London, Canada & McMaster University, Hamilton, Canada.

- 19 Phasor Measurement. Verkkoaineisto. Hitachi Energy. <[https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/protection-and-control/phasor-measurement#:~:text=Phasor%20Measurement%20Unit%20\(PMU\)%20is,other%20series%20elements\)%2C%20simultaneously%20and](https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/protection-and-control/phasor-measurement#:~:text=Phasor%20Measurement%20Unit%20(PMU)%20is,other%20series%20elements)%2C%20simultaneously%20and)>. Luettu 3.3.2025.
- 20 Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. 2025. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <<https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>>. Luettu 3.3.2025.
- 21 Hakanpää, Lotta. 2021. Älykkään sähköaseman takana ovat niiden aivot, toisiojärjestelmät. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingridlehti.fi/alykkaan-sahkoaseman-takana-ovat-niiden-aivot-toisiojarjestelmat/>>. Luettu 3.3.2025.
- 22 Abioye, Helen. 2024. SCADA and Smart Energy Grid Control Automation. Verkkoaineisto. <<https://helendarmi-hd.medium.com/scada-and-smart-energy-grid-control-automation-1f319a179be2>>. Luettu 9.4.2025.
- 23 What is SCADA, Who Uses it and How SCADA Has Evolved. 2018. Verkkoaineisto. <<https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada>>. Luettu 8.4.2025.
- 24 What are the Differences Between PLC and RTU? Verkkoaineisto. <<https://www.mikrodev.com/what-are-the-differences-between-plc-and-rtu/>>. Luettu 9.4.2025.
- 25 Armenta, Antonio. 2021. What is a Remote Terminal Unit (RTU)? Verkkoaineisto. <<https://control.com/technical-articles/what-is-a-remote-terminal-unit-rtu/>>. Luettu 9.4.2025.
- 26 Siggins, Morgan. 2020. What Is SCADA Protocol And Communication Transport? Verkkoaineisto. <<https://www.dpstele.com/blog/what-is-scada-protocol-and-communication-transport.php>>. Luettu 9.4.2025.
- 27 What are HMI and SCADA systems and how are they used in industrial automation? 2024. Verkkoaineisto. Vakioms. <<https://vakioms.com/blog/what-are-hmi-and-scada-systems-and-how-are-they-used-in-industrial-automation/>>. Luettu 9.4.2025.
- 28 Awati, Rahul & Loshin, Peter. What is SCADA (supervisory control and data acquisition)? Verkkoaineisto. <<https://www.techtarget.com/whatis/definition/SCADA-supervisory-control-and-data>>.

- 38 Kainulainen, Riina. 2015. Älykäs pienjännitejakeluverkko. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Aaltodoc.
- 39 Sähkökäytön kysyntäjousto. ELFI Suomen sähkökäyttäjät. Verkkoaineisto. <<https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto>>. Luettu 22.3.2025.
- 40 Kumar, Girraj & Gope, Prosanta & Kumar, Neeraj. 2021. PF-DA: Pairing Free and Secure Data Aggregation for Energy Internet-Based Smart Meter-to-Grid Communication. IEEE Transactions on Smart Grid. PP. 1-1. 10.1109/TSG.2021.3138393
- 41 Grid-Scale Storage. Verkkoaineisto. <<https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>>. Luettu 22.3.2025.
- 42 Energy Storage Systems Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Pumped Storage, Electrochemical Storage, Electromechanical Storage, Thermal Storage), By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030. Grand View Research. Verkkoaineisto. <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/energy-storage-systems-market>>. Luettu 24.3.2025.
- 43 Mongird, Kendall & Viswanathan, Vilayanur & Balducci, Patrick & Alam, Jan & Fotedar, Vanshika & Koritarov, Vladimir & Hadjerioua, Boualem. 2020. An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics. Energies. 13. 3307. 10.3390/en13133307. U.S. Department of Energy.
- 44 What is Pumped Storage Hydropower? Verkkoaineisto. U.S. Department of Energy. <<https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>>. Luettu 24.3.2025.
- 45 Benefits of Renewable Energy Use. 2017. Verkkoaineisto. Union of Concerned scientists. <<https://www.ucs.org/resources/benefits-renewable-energy-use#references>>. Luettu 25.3.2025.
- 46 Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic). 2024. Artikkel. European Environmental Agency.
- 47 How much of U.S. carbon dioxide emissions are associated with electricity generation? 2023. U.S. Energy Information Administration. <<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=77&t=11>>. Luettu 24.3.2025.

- 48 Ge, Mengpin & Friedrich, Johannes & Vigna, Leonardo. 2024. Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector. Verkkoaineisto. <<https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>>. Luettu 24.3.2025
- 49 Seyboth, Kristin & Eickemeier, Patrick & Matschoss, Patrick & Hansen, Gerrit & Kadner, Susanne & Schlömer, Steffen & Zwickel, Timm & von Stechow, Christoph. 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Raportti. Cambridge University Press.
- 50 Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe. 2024. European Environment Agency. Verkkoaineisto. <<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>>. Luettu 9.4.2025.
- 51 Epstein, P.R. & Buonocore, J. J. & Eckerle, K. & Hendryx, M. & Stout B. M. & Heinberg, R. & Clapp, R. W. & May, B. & Reinhart, N. L. & Ahern, M. M. & Doshi, S. K. & Glustrom, L. 2011. Full cost accounting for the life cycle of coal in "Ecological Economics Reviews." Ann. N.Y. Acad. Sci.