

Jouni Sivonen

Jakelumuuntamoiden kauko-ohjauksen ja -valvonnan kehitysnäkymät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

21.1.2016

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Jouni Sivonen Jakelumuuntamoiden kauko-ohjauksen ja -valvonnan kehitys- näkökymät 43 sivua 21.1.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Jarno Varteva
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Tässä insinöörityössä selvitettiin jakelumuuntamon tulevaisuuden kauko-ohjaus ja -valvontajärjestelmiä sekä jakelumuuntamon tulevaisuudennäkymiä.</p> <p>Työ toteutettiin perehtymällä älykkäiden sähköverkkojen kirjallisuuslähteisiin. Työssä käsitellään aluksi sähkölaitteistojen automaatiota ja älykkäitä elektronisia laitteita (Intelligent Electronic Devices, IED). Tämän jälkeen käsitellään mikroverkkoja ja älykkäitä sähköverkoja sekä niiden ominaisuuksia.</p> <p>Työssä saatiin selvitettyä, että tulevaisuuden älykäs sähköverkko tarvitsee uudenlaisia mittaus- ja valvontateknologioita. Modernit älykkäät elektroniset laitteet muodostavat rungon, joilla mahdollistetaan älykkään sähköverkon mittaustekniikat, yksi tärkeimmistä mittauslaitteista on osoitinmittalaite (Phase Measurement Unit, PMU).</p> <p>Työssä selvitettiin myös jakelumuuntamon roolia älykkäissä sähköverkoissa. Jakelumuuntamo on perinteisesti muuntanut keskijänniteverkon jännitteen pienemmäksi, mutta tulevaisuudessa jakelumuuntamon rooli on merkittävämpi yhdistettäessä pienjänniteverkon mikrotuotantoa keskijänniteverkkoon.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin pienimuotoinen katsaus älykkään sähköverkon ohjaus- ja valvontajärjestelmistä sekä älykkään sähköverkon ominaisuuksista, ja sen antamista mahdollisuuksista.</p>	
Avainsanat	IED, smart grid, jakelumuuntamo, PMU, WAMS, WAMPAC

Author(s) Title Number of Pages Date	Jouni Sivonen Distribution transformer substation monitoring and control prospects 43 pages 21 January 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor(s)	Jarno Varteva, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was performed for Metropolia University of Applied Sciences. This thesis studies the future remote control and monitoring systems of distribution substations, as well as distribution substation future prospects.</p> <p>The study is based on professional literature of smart grids. The work deals first with electrical equipment's automation and intelligent electronic devices (Intelligent Electronic Devices IEDs). After this microgrids and smart grid, as well as their properties, are dealt with.</p> <p>The study found out, that the future smart grids require new kind of measurement and control technologies. Modern intelligent electronic devices (IEDs) form a frame, to enable the smart grid metering technologies, and one of the most important measuring instruments is a phase measurement unit (PMU) device.</p> <p>The thesis also examined the role of distribution transformers in smart grids. Distribution transformers traditionally convert the medium-voltage network to a lower voltage, but in the future the role of distribution transformers will be prominent in connecting the low-voltage network of micro-production to the medium-voltage network.</p> <p>The result of this study is a small-scale overview of smart grid control and monitoring systems, as well as smart grid properties, and the opportunities that it offers.</p>	
Keywords	IED, smart grid, PMU, WAMS, WAMPAC

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kaukokäyttö ja automaatio	2
3	Sähkölaitteiden ja -järjestelmien digitalisointi	5
4	Älykkäät elektroniset laitteet IED	6
4.1	Älykkään elektronisen laitteen hyödyt sähköjärjestelmissä	8
4.2	Älykkään elektronisen laitteen rakenneperiaate	8
4.3	Älykkään elektronisen laitteen liittäminen käytönvalvontajärjestelmään	9
4.4	Jakelumuuntamon sisäinen väylä IEC 61850	11
5	Mikroverkot ovat askel kohti älyverkkoja	13
5.1	Mikroverkon ominaisuuksia	14
5.2	Mikroverkot ovat älykkäiden sähköverkkojen rakennuspalikoita	15
5.3	Hajautettu tuotanto ja virtuaalinen voimalaitos	16
6	Sähkönjakelun tulevaisuus kohti älykkäitä sähköverkkoja	17
6.1	Älykkäiden sähköverkkojen tarvitsemia teknologioita	20
6.2	Älykkäiden sähköverkkojen tavoitteet	20
6.3	Älykkäät sähköverkot ja niiden tuomat mahdollisuudet	21
6.4	Älyverkkojen toteutukseen tarvittavien teknologioiden kehittyminen	22
6.5	Älykkään sähköverkon mittaukset ja ohjaukset	23
6.6	Automaattinen mittarinluenta AMR	24
6.7	Edistynyt automaattinen mittarinluenta infrastruktuuri AMI	25
6.8	Osoitinesityksen mittalaite PMU	26
6.9	Vaiheosoittimen IEEE C37.118 - standardi	28
6.10	Laajan alueen mittausjärjestelmä WAMS	29
6.11	Havainnointi, paikallistaminen, eristäminen, uudelleen kytkentä FDIR	31
6.12	Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt WAMPAC	33
6.13	Älykkään sähköverkon teknologiat ja sähkönjakelun osa-alueet	34
7	Jakelumuuntamoiden nykytilan selvitys	36
7.1	Työn aikana heränneitä uusia kysymyksiä	37

7.2	Itävallan päästötön osavaltio	37
8	Yhteenveto	39
	Lähteet	41

Lyhenteet

ADC, A/D	Analog-to-Digital Converter, analogia-digitaalimuunnin, on mikropiiri, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi signaaliksi.
AMI	Advanced Metering Infrastructure, automaattinen mittarinluentainfrastruktuuri on etäluettavista mittareista rakennettu järjestelmä.
AMR	Automatic Meter Reading, on etäluettava tai automaattisesti luettava sähkönkulutusmittari.
DMS	Distribution Management System, jakelujärjestelmän hallintajärjestelmä on sovellus, joka tarjoaa käytöntukipalveluita.
DNP3	Distributed Network Protocol, on kentälaitteiden tiedonsiirtoon käytetty protokolla ja on käytössä yleisesti Pohjois-Amerikassa.
FDIR	Fault Detection, Isolation and Restoration, on älykkäissä sähköverkoissa määritetty toiminto, jolla parannetaan järjestelmän luotettavuutta.
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events, on IEC 61850 -standardissa käytetty suojalaitteiden välinen viesti.
GPS	Global Positioning System, on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
HAN	Home Area Network, kotiverkko, on kotitalouden sisäinen verkko.
HMI	Human-Machine Interface, käyttöliittymä, jonka kautta käyttäjä käyttää laitetta.
IEC	International Electrotechnical Commission, on kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.

IED	Intelligent Electronic Devices, älykäs elektroninen laite, on sähkölaitteistoissa käytettävä kehittynyt valvonta-, suojaus- ja ohjauslaite.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, on standardeja määrittelevä kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
P2P	Peer-to-peer, vertaisverkko, on verkko, jossa jokainen verkkoon kytketty laite toimii sekä palvelimena että asiakkaana muille verkon laitteille.
PDC	Phasor Data Concentrator, tiedonkeruulaite, on laitteisto, joka kerää osoitinmittalaitteista mitatut suureet.
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka, on tietokone, jolla ohjelmoidaan loogisia toimenpiteitä ja jota käytetään reaaliaikaisten prosessien ohjauksessa.
PMU	Phasor Measurement Unit, osoitinmittalaite, on mittalaite, joka mittaa virtojen ja jännitteiden vaihekulmat, sekä aikaleimaa ne GPS-signaalin avulla.
RTDMS	Real-Time Dynamics Monitoring System, on visuaalinen, reaaliaikainen esitys voimajärjestelmän tilasta.
RTU	Remote Terminal Unit, tiedonsiirtoyksikkö, on laite, jolla huolehditaan tiedon lähettamisestä käytönvalvontajärjestelmään.
SAIDI	System Average Interruption Duration Index, keskeytysten keskimääräinen yhteenlaskettu kesto aika tietyllä aikavälillä, on sähkönjakelun luotettavuutta kuvaava tunnusluku.
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index, keskeytysten keskimääräinen lukumäärä tietyllä aikavälillä, on sähkönjakelun luotettavuutta kuvaava tunnusluku.
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä, valvomo-ohjelmisto, on sähkö-, prosessiteollisuus- ja automaatiojärjestelmissä yleisesti käytetty käytönvalvontajärjestelmä.

TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol, on Internet-liikennöinnissä käytetty tietoliikenneprotokollan yhdistelmä.
VPP	Virtual Power Plant, virtuaalinen voimalaitos, on pienistä hajautetuista energiantuotantolaitoksista koottu energiantuotantoyksikkö, joka toimii perinteisen voimalaitoksen tapaan.
WAC	Wide Area Control, laajan alueen ohjaus, termi liittyy osana WAMPAC-termiin.
WAM	Wide Area Monitoring, laajan alueen valvonta, termi liittyy osana WAMPAC-termiin
WAMPAC	Wide Area Monitoring Protection and Control, järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt, on laaja-alainen synkronoitu ohjaus-, valvonta- ja suojausjärjestelmä sähkönsyötön varmuuden parantamiseen.
WAMS	Wide Area Monitoring System, laajan alueen mittausjärjestelmä, on reaaliaikainen mittausjärjestelmä, jolla saadaan voimajärjestelmästä reaaliaikainen tilannekuva.
WAP	Wide Area Protection, laajan alueen suojaus, termi liittyy osana WAMPAC-termiin.

1 Johdanto

Muutokset sähkömarkkinalaissa johtavat siihen, että sähkökatkokset saavat kestää enintään 6 tuntia kaavoitetulla alueella ja 36 tuntia kaavoittamattomilla alueilla. Vaatimukset sähkönjakelulle kasvavat, muutokset on toteutettava vaiheittain vuoden 2028 loppuun mennessä. Jotta vaatimukset olisivat täytettävissä ja sähkökatkojen aika minimoidaan, sähköverkkoon tarvitaan uusia teknologioita, kuten automatisoitu valvonta ja -ohjaus, automaattisia kytkentöjä, nopeaa vianpaikantamista ja vian eristämistä.

Sähköenergian jatkuvasti lisääntyvä tarve, ilmastopoliittiset tavoitteet, fossiilisista polttoaineista syntyvät hiilidioksidipäästöt ja fossiilisten polttoaineiden rajallisuus pakottavat käyttämään hyväksi hajautettuja uusiutuviin energiantuotantomenetelmiin pohjautuvia lähteitä. Hajautettu energiantuotanto tuo myös uusia teknologisia haasteita nykyiseen sähkönjakelujärjestelmään.

Älykkäisiin elektronisiin laitteisiin pohjautuva infrastruktuuri muodostaa perustan, joilla mahdollistetaan verkon itsenäinen ja luotettava toiminta sekä hajautettujen energialähteiden integroiminen ympäröivään sähkönjakeluverkkoon. Hajautettu energiantuotanto ja energian mikrotuotanto muuttavat myös jakelumuuntamon perinteistä roolia passiivisesta yksisuuntaisesta sähköenergiansiirrosta kaksisuuntaiseen energiansiirtoon.

Mittaukset ja niistä saatava informaatio muodostaa perustan älykkään sähköverkon valvonnalle, ohjauksille ja suojuuksille. Työn tavoitteena on valaista älykkään verkon ominaisuuksia, kehitykseen tarvittavia teknologioita, älykkäiden elektronisten laitteiden roolia jakelumuuntamoissa ja toimia joilla, pyritään minimoimaan sähkökatkoksista aiheutuvia keskeytyksiä. Älykkäiden sähköverkkojen teknologiat ja ominaisuudet ovat avainasemassa pyrkimyksessä pienentää hiilidioksidipäästöjä sekä minimoitaessa sähkökatkoksista aiheutuvia keskeytyksiä.

2 Kaukokäyttö ja automaatio

Sähkönjakeluverkostot ja sähkölaitteistot jakautuvat laajalle maantieteelliselle alueelle. Sähköjärjestelmiä ja sähköverkkoa ohjataan ja valvotaan suurelta osin kauko-ohjauksin ja -mittauksin. Kaukokäytössä sähköverkostoja ja -laitteistoja ohjataan ja valvotaan keskitetyn käytönvalvonnan kautta. Kaukokäyttö-käsitettä käytetään keskitetystä ja osin automatisoidusta valvonnasta ja ohjauksesta. [1, s. 385.]

Kaukokäyttö sisältää myös muitakin tehtäviä, kuten laskentaa, raportointia ja tietojen tallennusta. Verkon käytön tehokkuutta, teknistä laatutasoa ja toimintavarmuutta voidaan parantaa käyttämällä hyödyksi kauko-ohjausta, -mittausta, -säättöä, -asettelua ja -ilmoittamista. [1, s. 385.]

Sähköverkon valvontajärjestelmä on hierarkkinen järjestelmä. Suomessa kantaverkko-yhtiö valvoo kantaverkkoa ja alueverkkoyhtiöt huolehtivat alueverkkojen valvonnasta. Verkkojen toiminnan ja valvonnan kannalta on kuitenkin oleellista kerätä tietoja alemman jännitetaso verkkojen tilasta olevaa informaatiota. Ohjaus- ja valvontatoimia toteutetaan niin paikallisesti kuin kaukokäyttöjärjestelmillä, vaikka ohjaus ja valvonta onkin monitasoinen hierarkkinen järjestelmä. [1, s. 385.]

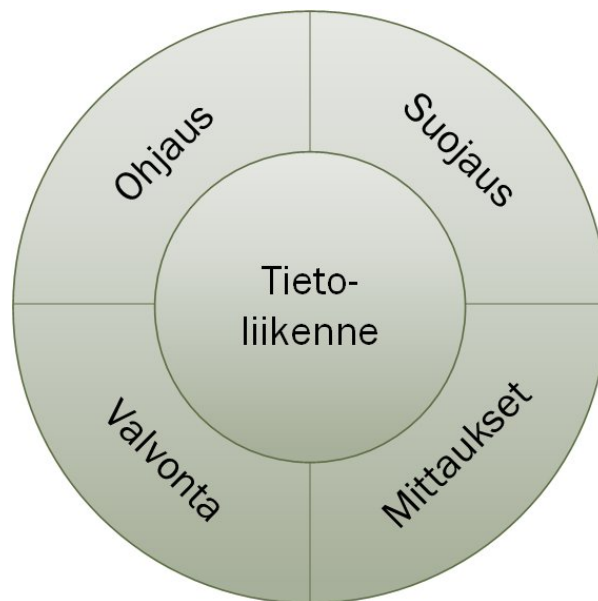
Automaatio sähköjärjestelmissä

Muuntamoautomaatiojärjestelmät tarjoavat sähköjärjestelmän ohjauksen ja suojauksen sekä reaaliaikaisen tiedon järjestelmän tilasta. Sähköautomaatiojärjestelmä tarjoaa myös paikallisesti tai kaukokäyttöjärjestelmän kautta pääsyn sähköjärjestelmään. Muuntamoautomaatio voidaan rakentaa viidestä perusrakennenosasta. Muuntamoautomaation perusrakennneosat esitetään kuvassa 1. [3, s. 1.]

Sähköjärjestelmien automaatiolla parannetaan sähköjärjestelmien hyötysuhdetta, palvelun laatua, turvallisuutta ja järjestelmien toimintaa normaali- ja häiriötilanteissa. Automatisointi on kokonaisvaltainen järjestelmä, joka sisältää älykkäitä järjestelmiä, optimointia ja järjestelmien välistä kommunikointia. [27, s. 5.]

Muuntamoautomaation muodostavat pääosat

- sähkölaitteistojen suojaus
- sähkölaitteistojen ohjaus
- sähköisen järjestelmän mittaukset
- sähkölaitteistojen valvonta
- tiedonsiirto.



Kuva 1. Muuntamoautomaation perusrakennneosat. Mukailten [3, s. 2.]

Sähkölaitteistojen suojaus

Sähkölaitteistojen suojaustoiminto on edelleen tärkein toiminnallinen osa-alue sähköjärjestelmissä. Suojaustoiminto on paikallinen toimenpide, jolla rajoitetaan tai estetään henkilö- ja materiaalivahinkojen syntyminen vika- ja häiriötapausten ilmentyessä. Laitteistojen suojaustoiminnon on aina toimittava, eikä automatisoinnilla saa koskaan estää, ohittaa tai muutoinkaan vaikuttaa suojalaitteiden toimintaan, esimerkiksi hidastaen. [3, s. 2.]

Sähkölaitteistojen ohjaus

Ohjaus on paikallinen tai kaukokäyttöinen toimenpide. Ohjaustoimenpide voi olla katkaisijan tai erottimen ohjaus. Paikallisen ohjauksen on toimittava, vaikka muu ympäröivä järjestelmä olisikin jostain syystä alhaalla. [3, s. 2.]

Sähköisen järjestelmän mittaukset

Sähköjärjestelmistä kerätään runsaasti reaaliaikaista tietoa. Mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi jännite, virta, pätöteho, loisteho, harmoniset yliaallot ja tehokerroin. Analogisia mitattavia suureita sähköisten suureiden lisäksi voi olla esimerkiksi muuntajan lämpötila. Binäärisiä tilatietoja ovat esimerkiksi kytkinten, katkaisijoiden ja releiden tilatiedot. Vika- ja häiriötilanteista saatavat mittaukset ovat tärkeitä analysoitaessa vian luonnetta ja etsittäessä vian lähteitä. [3, s. 3.]

Sähkölaitteistojen valvonta

Valvontatoimenpiteitä ovat esimerkiksi tapahtumaloki, tilatapahtumat ja releiden asetus. Sähkölaitteistojen valvonnasta saatava informaatio on tärkeä häiriöanalyseissa, sillä se kertoo, mitä tapahtui, kun tapahtui, missä järjestyksessä. Valvontatoimenpiteistä saatua informaatiota voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi, kun parannetaan järjestelmän suojaus- ja toimintavarmuutta. Kaukovalvonnasta saatavalla informaatiolla voidaan tehdä myös ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä. [3, s. 3.]

Tietoliikenne automatisoinnissa

Tietoliikenne muodostaa rungon sähkö- ja muuntamolaitteistojen automaatiojärjestelmiin. Ilman tietoliikennettä suojaus- ja ohjaustoimenpiteet jatkavat toimintaa paikallisesti, mutta ne eivät saa ulkopuolelta tulevaa informaatiota muun verkon tilasta, eivätkä välitä sitä muualle verkkoon. Paikallinen tallennustila voi tallentaa paikallisia tapahtumia ja mittaustietoa rajallisen määrän, mutta voimajärjestelmän automaatio ei voi toimia täysimääräisesti ilman tietoliikenneyhteyksiä. [3, s. 3.]

3 Sähkölaitteiden ja -järjestelmien digitalisointi

Digitaaliset releet yleistyivät 1980-luvun alussa ja niillä korvattiin siihen saakka yleisesti käytössä olleita staattisia releitä (elektroninen rele). Digitaalisilla mikroprosessoripohjaisilla releillä on mahdollista hajauttaa sähköverkko ja -laitteistot aiempaa laajemmalle alueelle. Mikroprosessoripohjaisten releiden ja digitaalisen prosessoinnin kehittyessä, voidaan muuntamoautomaation antaa huolehtia itsenäisesti aiempaa suuremmasta osasta muuntamon automaattisista toiminnoista, sekä antaa automaation tehdä valvonta- ja tarkastustehtäviä itsenäisesti. Itsenäisellä toiminnalla parannetaan sähkölaitteistojen toimintavarmuutta, saadaan kustannustehokkuutta ja vapautetaan henkilöstöresursseja korjaus- ja huoltotoimintoihin. [1, s. 388.]

Digitalisoinnin tuomat edut

Digitaalinen tieto on jono ykkösiä ja nollia. Digitaalisten laitteiden vanheneminen ei muunna tai vääristä itse digitaalisessa muodossa olevaa tietoa. Mitattava ja tarvittava tieto on mahdollista saada aikaisempaa tarkempana nopeimpien ja tarkempien ADC-muuntimien avulla. ADC-muunnin (Analog-to-Digital Converter), eli analogia-digitaalimuunnin on mikropiiri, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseen muotoon. Sarjamuotoista digitaalista tietoa on yksinkertaista siirtää sarjamuodossa kaapelia tai ilmatietä pitkin. Lisääntyvällä prosessoriteholla voidaan myös lisätä monipuolisempia ja tarkempia toimintoja suojaus- ja mittauslaitteistoihin. [1, s. 387.]

Digitalisoinnin varjopuolia

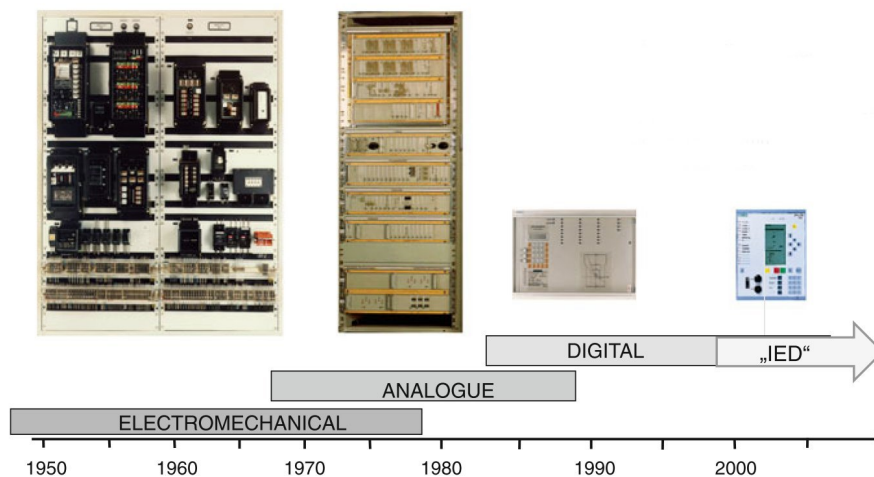
Sähkölaitteet synnyttävät sähkökenttiä ja sähkömagneettisia aaltoja. Sähkömagneettiset häiriöt ovat sähkömagneettista vuorovaikutusta sähkölaitteiden välillä. Sähkömagneettiset häiriöt saattavat aiheuttaa ei-toivottua käyttäytymistä herkissä sähkölaitteissa. Sähkölaitteiden on oltava sähkömagneettisesti yhteensopivia, eli niiden on toimittava luotettavasti ja tarkoituksenmukaisesti käyttöympäristössään. Sähkömagneettiset aallot aiheuttavat häiriöitä niin digitaalisiin kuin analogisiinkin laitteistoihin. [1, s. 388.]

Sarjamuotoisessa tiedonsiirrossa jokainen tiedonsiirtobitti siirretään jonossa. Sarjamuotoinen tiedonsiirto aiheuttaa tiedonsiirtoon viiveitä, koska tarvittava tieto on prosessoitava ja siirrettävä bitti kerrallaan määräpaikkaansa. Vaikka tiedonsiirtonopeutta kasvatettaisiin, niin viiveet eivät automaattisesti pienene. [1, s. 388.]

Digitaalisille laitteistoille ohjelmisto- ja laitteistopäivitykset voivat muodostaa ongelmallanteita. Päivitettäessä edellisen sukupolven laitteistoja ne eivät välttämättä ole yhteensopivia vanhempien ohjelmistoajureiden kanssa ja päinvastoin. [1, s. 388.]

4 Älykkäät elektroniset laitteet IED

Sähkömekaanisia releitä käytettiin sähkölaitteistojen suojauksessa 1980-luvun lopulle asti. Staattiset eli elektroniset releet olivat käytössä pääosin 1970- ja 1990-luvun välisenä aikana ja 1980-luvulla mikroprosessoripohjaiset digitaaliset releet alkoivat korvata staattisia releitä. Kuvassa 2 esitetään eri reletyyppien käytössä oleva aikajana, josta ilmenee, että älykkäät elektroniset laitteet alkoivat yleistyä sähkölaitteistojen suojaus-, ohjaus- ja mittauskäytöissä 2000-luvun vaihteessa.



Kuva 2. Sähköjärjestelmien suojausteknologioiden aikajana [4, s. 76].

Älykkäiden elektronisten laitteiden (Intelligent Electronic Devices, IED) kehitys alkoi 1980-luvulla mikroprosessoripohjaisilla ohjausominaisuuksilla. Tietoliikenneinfrastruktuurin laajeneminen ja tietoliikenneprotokollien standardoiminen olivat myös vaikuttamina älykkäiden elektronisten laitteiden käytön lisääntymiseen. [9, s. 35-36.]

Älykkäät elektroniset laitteet määritellään niin, että niissä on yksi tai useampi mikroprosessori. Älykkäät elektroniset laitteet kommunikoivat käytönvalvontajärjestelmän kanssa ja niissä on useampi yleisimmin käytetty tietoliikenneprotokolla tiedon lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Älykkäällä elektronisella laitteella voidaan korvata muuntamon tiedonsiirtopäätelaite RTU. RTU-päätelaite (Remote Terminal Unit) on tiedonsiirtoyksikkö, jolla on huolehdittu tiedon muuttamisesta oikeaan muotoon ja tiedon lähettämisestä valvontajärjestelmään. [9, s. 35-36.]

Älykkäiden elektronisten laitteiden käyttöönotto muuntamoissa ja sähkölaitteistoissa uudisti muuntamoiden suojauksen, automaation, tiedon tallennuksen ja analysoinnin. Suojalaitteet eivät olleet enää yksitoimisia, vaan ne muuntuivat perinteisistä yksitoimisista sähkömekaanisista ja staattisista releistä, mikroprosessoripohjaisiksi monitoimiseksi suojalaitteiksi, tallentaen ja prosessoiden mitattua tietoa. Prosessointitekniikoiden kehittyessä ja laskentatehojen lisääntyessä saatiin entistäkin luotettavampia ja tarkempia mittaustuloksia mitattavista suureista. [9, s. 35-36.]

Älykkäät elektroniset laitteet voivat olla yksi- tai monitoimisia ohjaus- ja valvontalaitteita. Yksitoimisissa älykkäissä elektronisissa laitteissa on yksi suojaustoiminto, esimerkiksi valokaari- tai muuntajasuojaus. Monitoimisissa älykkäissä elektronisissa laitteissa on useita suojaustoimintoja sekä useita mittaustoimintoja. Mittaustoimintoja voivat olla jännite, virta, tehokerroin, lois- ja pätöteho, sekä virran ja jännitteen aaltomuodon piirturiominaisuus. Kehityksen suunta on kuitenkin vienyt älykkäitä elektronisia laitteita yksitoimisista monitoimisiin laitteisiin, jolloin voidaan korvata useampi sähkömekaaninen kytkin-, ohjaus- tai suojalaite yhdellä laitteella. [9, s. 37-38.]

Ohjaus- ja suojaustoimintoihin on käytetty ohjelmoitavia logiikoita PLC (Programmable Logic Controller), joilla on tehty kytkinten ja releiden loogisia ohjaustoimenpiteitä. Ohjelmoitava logiikka on pieni tietokone, jota käytetään tosiaikaisten loogisten prosessien ohjaukseen. Älykkäillä elektronisilla laitteilla voidaan korvata myös ohjelmoitavat logiikat. [9, s. 42.]

4.1 Älykkään elektronisen laitteen hyödyt sähköjärjestelmissä

Puolijohdeteknologioiden kehittyessä ovat mikroprosessorien koot pienentyneet niiden laskentatehojen kuitenkin kasvaessa. Samalla on myös mikroprosessorien tehontarve pienentynyt. Elektronisten komponenttien koon pienentyessä sähkölaitteistot ja muuntamot voidaan valmistaa kooltaan pienempiin laitteistokokonaisuuksiin ja antaa tilaa järjestelmän vaatimille muille teknologioille ja lisälaitteille. [9, s. 35-36.]

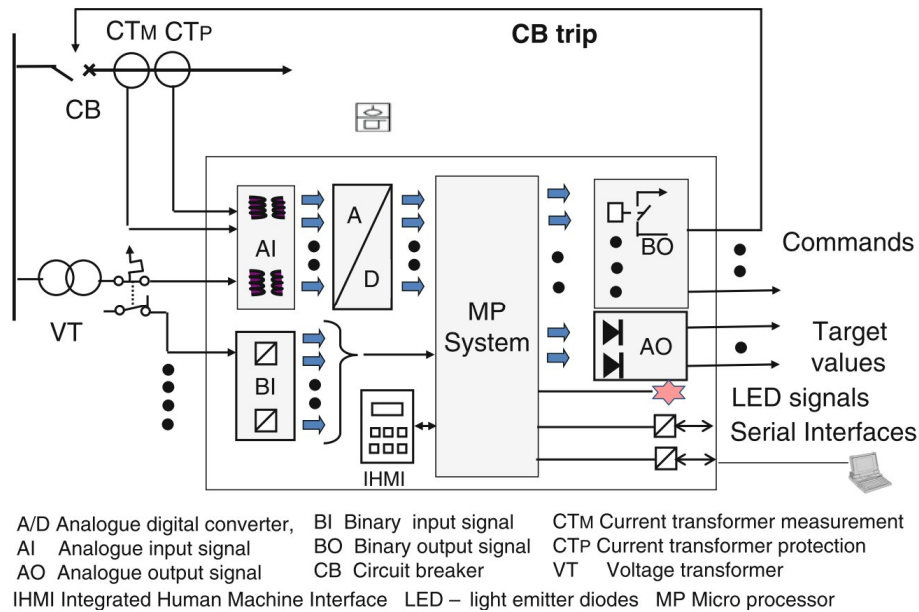
Älykkäillä elektronisilla laitteilla parannetaan laitteiston käyttöastetta ja pienennetään laitteistojen palautumisaikaa vian ilmentymisen jälkeen. Aiemmin epäyhteensopivat virta- ja jännitemuuntajat oli sovittava sovitusmuuntimilla releeseen tai vaihdettava virta- ja jännitemuuntajat releeseen sopivaksi. Älykkäillä elektronisilla laitteilla virta- ja jännitemuuntajien sovittaminen onnistuu ilman ulkoisia muuntimia. Älykkäät elektroniset laitteet voidaan asettaa muuntajiin sopiviksi ohjelmallisesti. [9, s. 41.]

4.2 Älykkään elektronisen laitteen rakenneperiaate

Kuvassa 3 esitetään älykkään elektronisen laitteen rakenneperiaate. Älykäs elektroninen laite on kuin tietokone, mutta niiden toiminnot ovat erikoistuneet toimimaan sähköisten suureiden mittauksiin, analysointiin sekä kytkinten, releiden ja suojalaitteiden ohjaukseen. Laitteisto rakentuu yhdestä tai useammasta mikroprosessorista, jotka tekevät erilaisia lasku- ja päättelytehtäviä.

Analogia-digitaalimuunnin (A/D tai ADC) muuntaa esimerkiksi jännitemuuntajalta tulevan analogisen jännitesignaalin digitaaliseen mikroprosessorin ymmärtämään ja käsittelemään muotoon. Digitaaliset sisään- ja ulostulot on tarkoitettu esimerkiksi kytkinten ja releiden ohjaamiseen sekä kytkinten ja releiden tilatietojen tunnistamiseen.

Älykkäässä elektronisessa laitteessa on myös käyttöliittymä HMI (Human-Machine Interface). Käyttöliittymä on laitteen osa, josta laitetta voidaan ohjata ja muuttaa laitteen parametreja paikanpäällä. Tietoliikenneväylät ovat tarkoitettu laitteen ulkoiseen kommunikointiin toisten laitteiden tai käytönvalvontajärjestelmän kesken, ja laite voi sisältää useamman yleisemmin käytetyn kommunikointiprotokollan. Tietoliikenneväylien kautta voidaan tehdä laitteelle myös ohjelmisto- ja parametripäivityksiä.



Kuva 3. Älykkään elektronisen laitteen rakenneperiaate [4, s. 78].

4.3 Älykkään elektronisen laitteen liittäminen käytönvalvontajärjestelmään

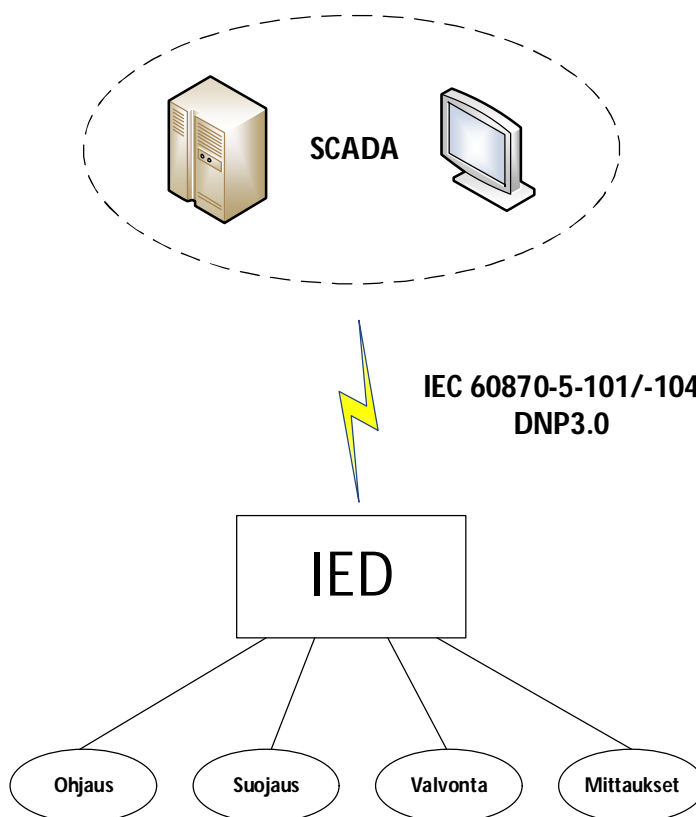
SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) on yleisesti käytetty käytönvalvontajärjestelmä, valvomo-ohjelmisto, sähkö-, prosessiteollisuus- ja automaatiojärjestelmille. SCADA välittää prosessijärjestelmälle tilatietoja sekä ohjauksia laajalta maantieteelliseltä alueelta. SCADA jaetaan kahteen tyyppiin eli valmistajakohtaiseen ja avoimeen SCADA:aan. Valmistajakohtainen SCADA toimii lähinnä valmistajien omien laitteistojen ja sähköjärjestelmien kanssa. Avoimempi SCADA on kasvattanut suosiotaan, koska se ei ole laitevalmistajaan sidoksissa, vaan avoimen SCADA:n ympärillä voi käyttää useiden eri laitevalmistajien sähköjärjestelmiä ja -laitteistoja. [2, s. 4.]

SCADA on perinteisesti kytketty RTU-päätelaitteisiin, jotka ovat keränneet tarvittavan informaation, ja lähettäneet ne käytönvalvontajärjestelmään. Moderneissa älykkäissä elektronisissa laitteissa on useampi yleisimmin käytetty tiedonsiirtoprotokolla, jolla älykäs elektroninen laite yhdistetään SCADA-käytönvalvontajärjestelmään. Älykkäillä elektronisilla laitteilla voidaan korvata aiemmin käytetyt RTU-päätelaitteet. [9, s. 5.]

DNP3- (Distributed Network Protocol) ja IEC 60870-5 -protokollat (*International Electrotechnical Commission*) kehitettiin 1990-luvulla, ne ovat kaksi yleisimmin kenttälaitteiden tiedonsiirtoon käytettyä tiedonsiirtoprotokollaa. DNP3-protokolla on käytössä yleisesti

Pohjois-Amerikassa ja IEC 60870-5 -protokollaa käytetään yleisesti Euroopassa ja Lähi-idässä. DNP3- ja IEC 60870 -protokollat eivät ole toistensa kanssa yhteensopivia, mutta modernit älykkäät elektroniset laitteet tukevat molempia protokollia. [13, s. 283-285.]

IEC 60870-5-104 on moderneissa TCP/IP-verkoissa (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) toimiva tiedonsiirtoprotokolla, joka mahdollistaa tiedonsiirron Ethernet-verkon välityksellä [2, s. 171.] Kuvassa 4 esitetään periaatekytkentä älykkään elektronisen laitteen ja SCADA:n välillä. Älykäs elektroninen laite on yksinkertainen kytkeä käytönvalvontajärjestelmään.



Kuva 4. Älykkään elektronisen laitteen liittäminen SCADA:n.

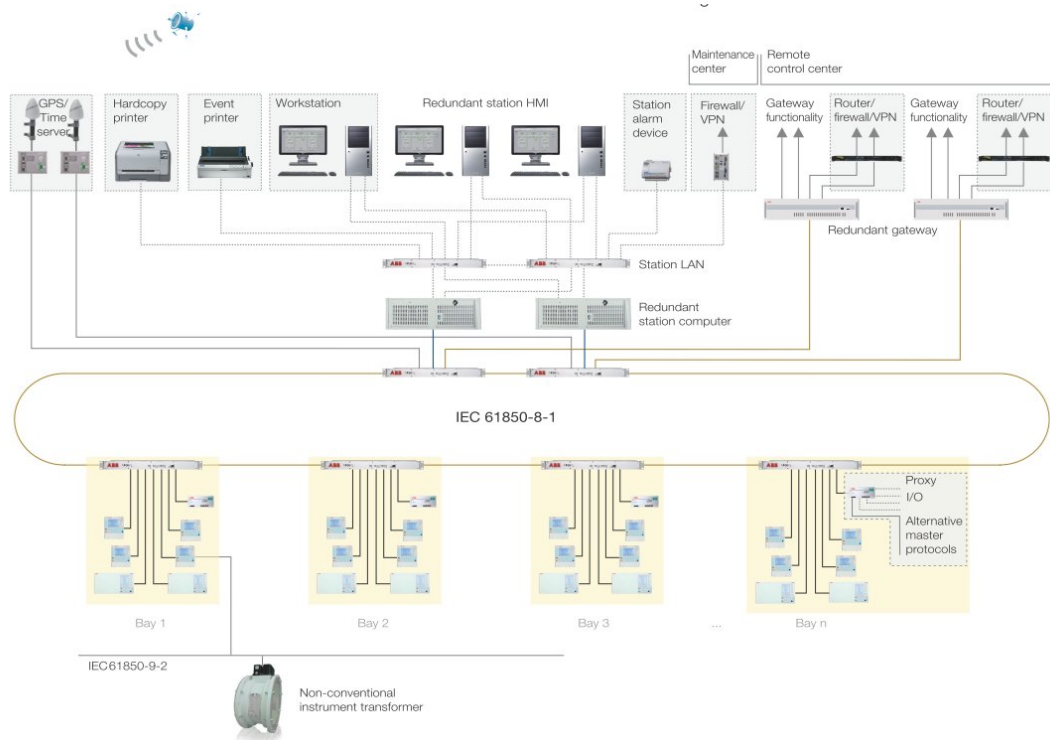
4.4 Jakelumuuntamon sisäinen väylä IEC 61850

IEC 61850 -standardi on älykkäiden elektronisten laitteiden väliseen kommunikointiin standardoitu tietoliikenneprotokolla. IEC 61850 -standardi on valmistajasta riippumaton avoin tietoliikennestandardi. IEC 61850 -standardilla on mahdollista käyttää eri laitevalmistajien laitteistoja ja liittää niitä esimerkiksi muuntamon paikallisverkkoon plug and play -menetelmällä. Plug and play -menetelmällä uudet laitteistot asennetaan ilman erillisiä tietoliikennemuuntimia ja ilman valmistajakohtaisten laitteistoajureiden asentamista. [13, s. 136-137.]

Älykkäät elektroniset laitteet kommunikoivat keskenään vertaisverkon (peer-to-peer, P2P) avulla. Vertaisverkossa jokainen laite toimii sekä palvelimena että asiakkaana, eikä kiinteitä erillisiä palvelimia tarvita. IEC 61850 -standardia käytetään voimalaitoksiin, sähköasemien ja muuntamoiden sisäisessä verkossa. Standardi on soveltuva käytettäväksi myös tuulivoimaloiden, sähköajoneuvojen, sähkömittareiden ja sähkövarastojen väliseen tietoliikennekommunikointiin ja kommunikointiin, jossa tarvitaan nopeaa aikakriittistä toimintaa. [13, s. 136-137.]

Perinteiset kuparikäämiset mittamuuntajat voidaan korvata uusilla elektronisilla anturiteknologioilla, jotka pohjautuvat IEC 61850 -standardin teknologioihin. Uudet anturiteknologiat voidaan kytkeä älykkäisiin elektronisiin laitteisiin valokuitukaapeloinnilla, ja näin vältetään sähkömagneettisten häiriöiden indusoituminen kaapelointiin. Virran ja jännitteen mittaukseen perustuvat elektroniset anturiteknologiat pohjautuvat Hall-ilmiö teknologioihin [22, s. 4; 22, s. 8]. IEC 61850 -standardiin pohjautuvilla virtamuuntajilla vältetään virtamuuntajan avoimesta piiristä syntyvä magneettivuon kasvu, joka kasvat-
taa rautahäviöitä ja indusoi toisiopiiriin hengenvaarallisen jännitteen. [13, s. 141.]

Kuvassa 5 esitetään IEC 61850 -standardiin pohjautuva sähköaseman tietoliikenneverkko. Älykkäät elektroniset laitteet kytketään IEC 61850 -standardin mukaisiin kytkimiin, joiden kautta IEC 61850 -standardiin pohjautuvat laitteistot kommunikoivat keskenään.



Kuva 5. Muuntamon sisäinen IEC 61850 -väylä [19 s. 2].

Älykkäiden elektronisten laitteiden suojarleiden väliseen kommunikointiin käytetään IEC 61850 -standardissa määriteltyä GOOSE-viestiä (Generic Object Oriented Substation Events). GOOSE-viesti välittää sähkölaitteistoissa, esimerkiksi suojarleiden laukaisun, keskenään kommunikoiville älykkäille elektronisille laitteille tapahtumat alle 3 ms:ssa. Älykkäät elektroniset laitteet vastaanottavat tapahtumatietoja toisiltaan hyvin nopeasti, joten älykkäiden elektronisten laitteiden uudelleenasettelu ja suojarlaitteiden toiminta on nopeaa. GOOSE-viesti on hyvin soveltuva työkalu mikroverkkojen älykkäiden elektronisten laitteiden kommunikointiin ja toiminnan ohjaukseen. [11, s. 227.]

5 Mikroverkot ovat askel kohti älyverkkoja

Sähkönjakelu on muuttunut passiivisesta verkosta aktiiviseksi verkoksi. Sähköenergiaa ei tuoteta vain suurissa sähkölaitoksissa, vaan monimuotoisesti lähellä kuluttajaa siirtäen sähköenergiaa tarvittaessa takaisin jakeluverkkoon. Aktiivisella verkolla pyritään vastaamaan kuluttajien energiantarpeisiin saamalla reaaliaikaista tietoa energiankulutuksesta ja verkon tilasta. Aktiivinen mikroverkko mahdollistaa myös uudenlaisten palvelujen tuomisen kuluttajille. Kuluttajille mikroverkko mahdollistaa sekä sähkön että lämmön yhteistuotannon ja parantaa sähkönjakelun laatua ja sähkösaannin luotettavuutta. [7, s. 2.]

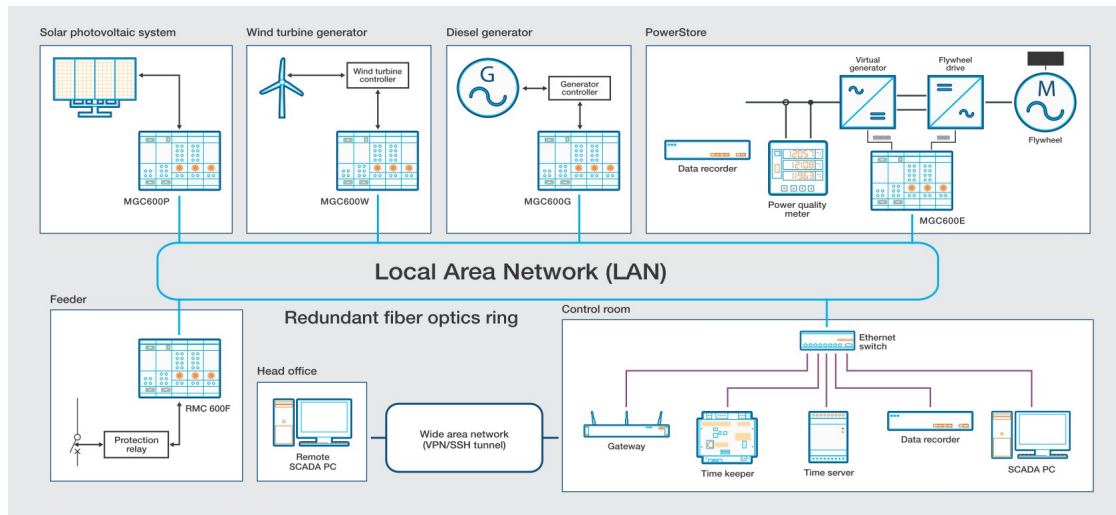
Energiajärjestelmät ovat nyt ja lähitulevaisuudessa suuressa muutoksessa. Pienimuotoisen, hajautetun ja uusiutuvaan energiaan pohjautuva sähköntuotanto on yhä suurenevassa määrin merkittävämmässä roolissa tulevaisuudessa. Mikroverkoissa sähköenergia tuotetaan enimmäkseen hajautetuista energianlähteistä. Mikroverkkona mielletään sähköenergiantuotanto, jonka tyypillinen koko on 500 kW-15 MW [11, s. 214].

Hajautettu tuotanto määritellään energiantuotantona, joka on liitettyä jakeluverkkoon lähellä kuluttajaa tai liitettyä verkkoon kuluttajan puolella olevaa sähköenergiaa mittaavaa energianmittaria. [5, s. 196.]

Hajautettuja energianlähteitä ovat esimerkiksi

- aurinkovoima
- tuulivoima
- bioenergia
- mikroturbiinit
- polttokennot
- maalämpö
- aalto- ja vuorovesienergia.

Mikrotuotanto vaikuttaa siirto- ja jakeluverkon teho- ja taajuustasapainoon, joten mikro- tuotannon ohjaus ja valvonta on tärkeässä roolissa integroitaessa hajautettuja mikro- tuotantoja muuhun jakeluverkkoon [7, s. 3]. Kuvassa 6 esitetään esimerkki mikro- tuotannon ohjausjärjestelmästä. Hajautettujen järjestelmien ohjaimet on liitetty yhteen lähiverkkotekniikkaa käyttäen, jonka kautta mikroverkkojärjestelmän tilaa esittävä tieto kulkee mikroverkon valvonta- ja ohjausjärjestelmään. Ohjausjärjestelmä kytkee myös mikroverkon saarekekäytön tai verkkokäytön.

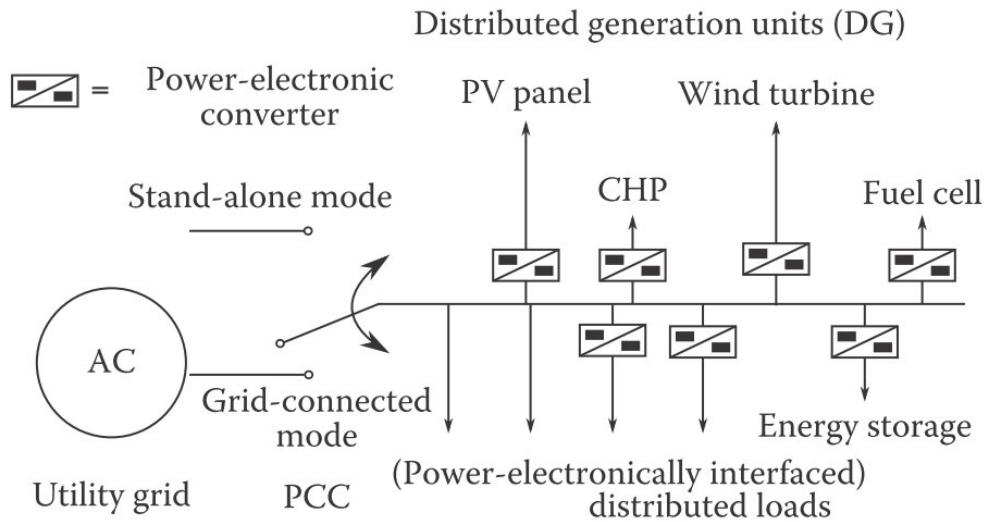


Kuva 6. Esimerkki mikroverkon ohjausjärjestelmästä [17, s. 6].

5.1 Mikroverkon ominaisuuksia

Mikroverkko voi toimia vikatilanteessa itsenäisesti saarekekäytössä olevana verkkona ja näin se mahdollistaa sähköjakelun kriittisille kohteille, vaikka valtakunnallisessa sähköjakelussa olisi häiriöitä [7, s. 6]. Normaalitilanteessa ja tarvittaessa virtuaalivoimalaitos (ks. luku 5.3) syöttää energiaa olemassa olevaan sähköjakeluverkkoon.

Kuvassa 7 esitetään mikroverkon periaatteellinen rakenne. Sähköntuotanto on kuvan 7 esimerkissä pienimuotoisista hajautetuista energianlähteistä ja energianvarastoista, jotka on kytketty mikroverkkoon tehoelektronikalla toteutettujen muuntimien kautta. Kuvassa 7 esitetään myös, kuinka mikroverkko on kytkettynä saareke- ja verkkokäyttöön. Saarekekäytössä kytkin on kytkettynä stand-alone eli itsenäisesti toiminta-asentoon.



Kuva 7. Mikroverkon periaatteellinen rakenne [11, s. 192].

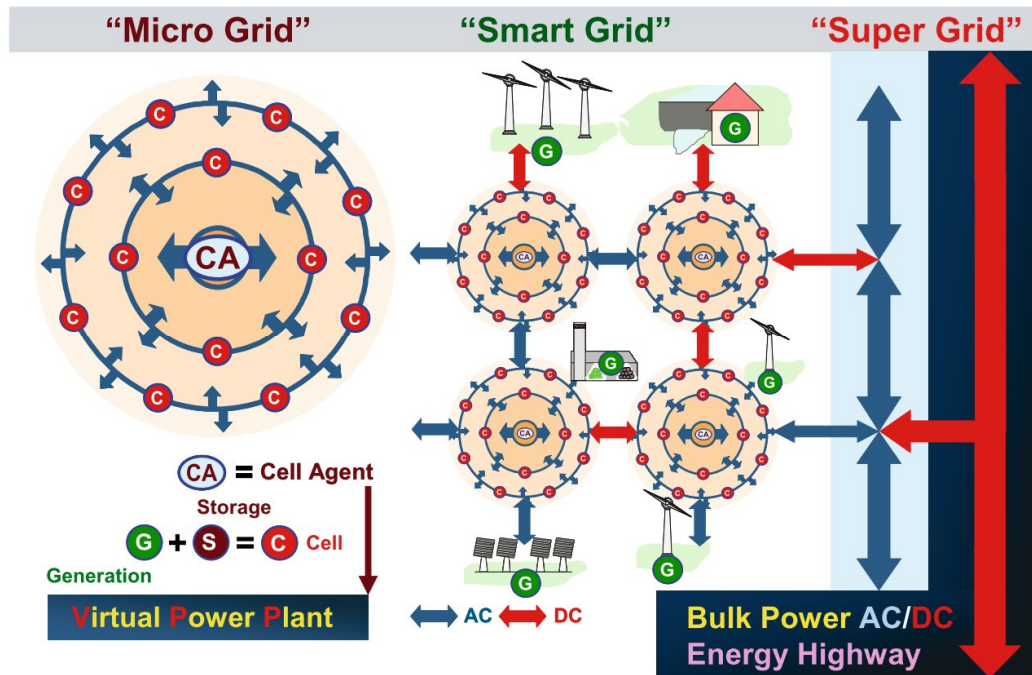
5.2 Mikroverkot ovat älykkäiden sähköverkkojen rakennuspalikoita

Tyypillisesti hajautettu energiantuotanto on liitetty suur- ja keskijänniteverkkoon. Keski- ja suurjänniteverkkoon liittäminen on mahdollistanut vain kuluttajien suuntaan kulkevan sähköenergian siirron sähköasemien kautta. Suuntauksena on kuitenkin, että hajautettu mikrotuotanto liitetään pienjänniteverkkoon. Mikrotuotannon teknologiat, kuten mikroturbiinit, aurinkoenergia, polttokennot ja tuuliturbiinit, joiden teho on alle 100 kW, voidaan liittää suoraan pienjänniteverkkoon. [7, s. 3.]

Kuvassa 8 esitetään mikroverkon periaatteellinen rakenne. Solut koostuvat hajautetuista sähköenergiantuotannosta ja -varastoinnista. Älykäs solun hallintayksikkö (cell agent, CA) toimii ohjauksen, suojauksen ja valvonnan ohjausyksikkönä. Agentti on tekoälyssä käytetty määritelmä oliolle, joka toimii rajatussa ympäristössä ja havainnoi ympäristöä antureiden ja toimilaitteiden avulla [26, s. 4].

Virtuaalinen voimalaitos (ks. luku 5.3) on energiantuotantoyksikkö, joka koostuu hajautetuista energianlähteistä, jotka yhdistetään verkkoon keskitetyn hallintayksikön kautta. Hallintayksikkö tarjoaa jakeluverkolle voimalaitospalveluita hallitsemalla hajautettua energiantuotantoa.

Mikroverkkoja voidaan pitää älykkäiden verkkojen rakennuspalikoina. Kuvassa 8 esitetään mikroverkon soluja (cell), jotka on liitetty virtuaalisina voimalaitoksina jakeluverkkoon. Joustavat ja älykkäät mikroverkon solut ovat älykkäiden sähköverkkojen rakennuspalikoita.



Kuva 8. Mikroverkko osana älyverkkoa [20, s. 11].

5.3 Hajautettu tuotanto ja virtuaalinen voimalaitos

Virtuaaliseen voimalaitosjärjestelmään voidaan liittää erilaisia hajautetun tuotannon energiantuotantomuotoja, mutta myös perinteisiä lämpöä ja sähköä tuottavia laitoksia. Virtuaalinen voimalaitos toimii kuten tavanomainen voimalaitos vastaa tarvittavaan energian tarpeeseen. [4, s. 249-250.]

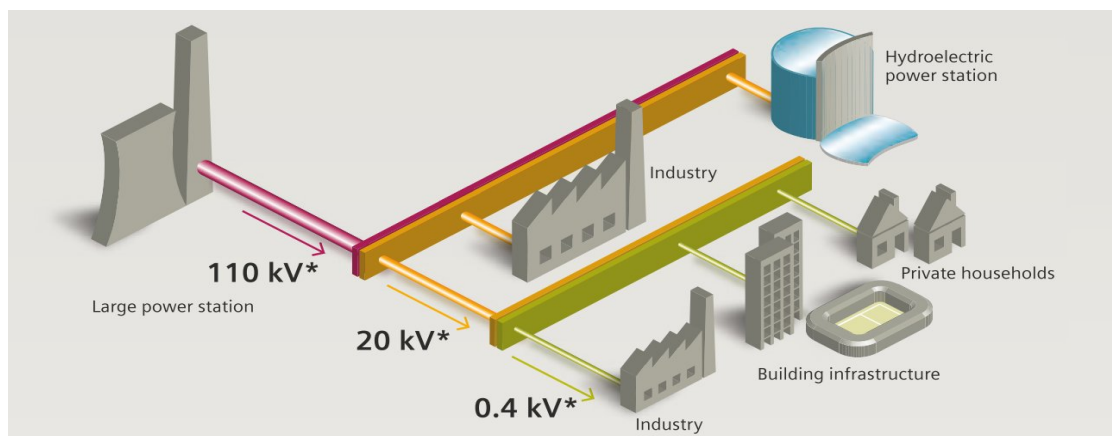
Virtuaalinen voimalaitos tarkkailee sähköenergian kysyntää ja tarjontaa, ottaa käyttöön tarvittavia tuotantoyksiköitä sekä vähentää tuotantoa tarvittaessa. Sähkönkulutuksen ennustettavuudella pyritään optimoimaan virtuaalisen voimalaitoksen sähköntuotanto. Ennustettavuutta tarvitaan varsinkin tuuli- ja aurinkoenergian tuotannossa. Aurinko- ja tuulienergia ei ole tasaista energiantuotantoa, vaan vaihtelee säätilan ja vuorokausirytmien muuttuessa. [4, s. 249-250.]

6 Sähkönjakelun tulevaisuus kohti älykkäitä sähköverkkoja

Nykyistä jakeluverkkoa ei suunniteltu ja rakennettu älykästä sähköverkkoa silmällä pitäen. Se suunniteltiin ja rakennettiin kustannustehokkaaksi, nopeasti sähköistystä tarvitseviin talouksiin ja teollisuuteen. Älykkäiden sähköverkkojen tarpeet ovat toisenlaiset, ja siksi uudelleen suunnittelua nykyiselle verkolla tarvitaan. Jakeluverkon runko siirtolinjoihin, muuntamoihin ja sähköasemineen tulee olemaan jatkossa osa jakeluverkon runkoinfrastruktuuria. [13, s. 67-68.]

Nykyinen sähkönjakelu on passiivinen järjestelmä, jossa suuret sähkölaitokset tuottavat ja syöttävät tarvittavaa sähköenergiaa sähkönkuluttajille. Sähköverkon suojaukset ja ohjaukset on suunniteltu passiiviseen yhden suuntaiseen sähköenergian siirtoon voimalaitokselta kuluttajalle. Kuvassa 9 esitetään perinteinen sähkönjakelujärjestelmä, jossa suuri voimalaitos syöttää sähköenergiaa sähkönkuluttajille. [12, s. 541.]

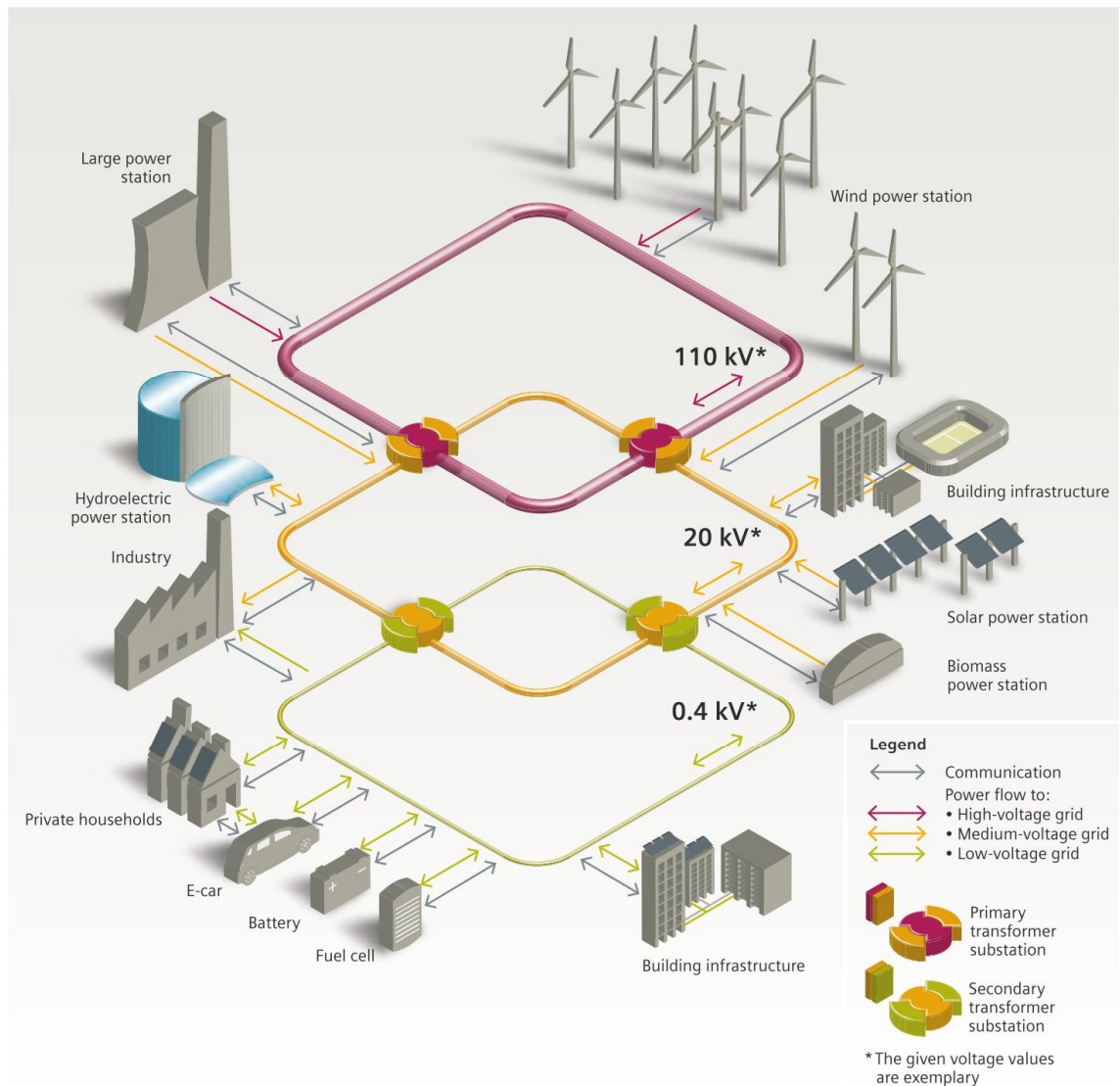
Älykkäät sähköverkot ovat tulevaisuuden sähköverkkoja, jotka muuntuvat passiivisesta toiminnasta aktiiviseen toimintaan. Passiivinen toiminta on ollut yhdensuuntaista sähköenergian siirtoa, mutta aktiivisella toiminnalla sähköenergian siirtoa on kuluttajalta sähköverkon suuntaan. Älykkäillä sähköverkoilla mahdollistetaan kuluttajien mahdollisuutta osallistua sähköenergian tuotantoon hajautettujen energialähteiden avulla. [12, s. 541.]



Kuva 9. Perinteinen sähkönjakelu [16, s. 4].

Kuvassa 10 esitetään älykkään sähköverkon rakenne. Hajautetut uusiutuvaan energiaan perustuvat energianlähteet, energiavarastot täydentävät keskitettyä sähköenergiantuotantoa ja ovat tasaamassa mahdollisia verkon kulutushuippuja. [12, s. 544.]

Kuvan 10 esimerkissä esitetään, kuinka suuret voimalaitokset ja tuulivoimalaitokset syöttävät sähköenergiaa siirtoverkkoon. Keski- ja pienjänniteverkoissa sähköenergia kulkee molempiin suuntiin, kuluttajille verkkoon ja verkosta kuluttajille.



Kuva 10. Älykkään sähköverkon rakenne, sähköntuotanto ja varastointi [16, s. 4].

Hajautettujen energiantuotantojen lisääntyessä perinteinen passiivinen sähköverkko muuttuu aktiivisemmaksi. Sähköverkon ohjaus ja valvonta muuttuvat paikallisesta ohjauksesta ja rajoittuneesta automaatiosta itseään valvovaksi ja ohjaavaksi järjestelmäksi, jolla pyritään pienentämään sähkökatkoksista aiheutuvaa haittaa ja aikaa. [15, s. 9.]

Suurimmassa osaa sähkönjakelua sähköenergiaa ei voida varastoida, vaan se on tuotettava tarvittaessa. Älykkäässä sähköverkossa pyrkimyksenä on myös käyttää sähköenergian varastoja tasoittamaan kulutushuippuja, ne toimivat sähköenergian lähteinä mahdollisissa häiriötilanteissa. [15, s. 4.]

Perinteisen ja älykkään sähköverkon energiantuotannossa, ohjauksessa, suojauksessa ja valvonnassa on ominaisuuksia, jotka poikkeavat toisistaan. Taulukossa 1 esitetään perinteisen ja älykkään verkon ominaisuuksia [10, s. 28].

Taulukko 1. Perinteisen ja älykkään sähköverkon vertailu.

Ominaisuus	Perinteinen sähkönjake- lu	Älykäs sähköverkko (Smart Grid)
Reletekniikat	Sähkömekaaniset releet ja staattiset releet	Digitaaliset mikroprosessoriohjatut releet ja älykkäät elektroniset laitteet
Tietoliikennekommunikointi	Yhdensuuntainen tietoliikennöinti ja paikallisesti kaksisuuntainen	Laajalle alueelle levittäytyvä kaksisuuntainen tietoliikennöinti ja tietoliikenneinfrastruktuuri
Sähköntuotanto	Suuret keskitetyt voimalaitokset	Hajautetut energiantuotantomenetelmät
Sähköjärjestelmän ohjaus ja suojaus	Rajoitetut ohjaus ja valvonta, sekä suojausmenetelmät. "Sokea" muulle verkolle	Synkronoidut järjestelmätason säädöt ja mittaukset (WAMPAC)
Palautuminen häiriötilanteista	Käsi käyttöinen palauttaminen	Automaattinen itseään korjaava
Sähkölaitteiston valvonta	Laitteiston paikallinen tai manuaalinen tarkastaminen ja valvonta	Laitteistoa valvotaan kaukokäyttöisesti
Sähkölaitteistojen vikadiagnoosit	Laitteistojen tilastollinen vikaantumistiheys	Laitteistojen ennakoiva ilmoittaminen

6.1 Älykkäiden sähköverkkujen tarvitsemia teknologioita

Nykyinen sähkönjakelujärjestelmä on uusien haasteiden edessä. Sähkönjakeluinfrastruktuurin vanheneminen, jatkuvasti kasvava sähköenergian tarve, sähköajoneuvojen ja hajautettujen energialähteiden lisääntyminen luovat painetta sähköverkon uusimiseen ja laajentamiseen. Älykkäiden sähköverkkujen tarkoituksena on vastata näihin haasteisiin ja tarjota ympäristöystävällisempää ja häviöttömämpää sähköenergiaa. [6, s. 5.]

Jakeluverkkoihin tarkoitettuja älykkäiden sähköverkkujen teknologioita on jo käytössä. Laajamittainen uusien teknologioiden käyttöönotto ei ole kuitenkaan kertaheitolla valmis. Tarvitaan laajamittaisia uudistuksia nykyiseen jakeluverkkoon ja uusien teknologioiden käyttöönottoa. Älykkäät sähköverkot käyttävät kehittyneitä digitaalisia teknologioita suojaukseen, ohjaukseen ja valvontaan. Moderneja ja älykkäitä digitaalisia teknologioita käytetään myös sähköverkossa tapahtuvaan monimuotoisen hajautetun energiansiirron ohjaukseen. [6, s. 5.]

6.2 Älykkäiden sähköverkkujen tavoitteet

Älykkäiden sähköverkkujen tarkoituksena on helpottaa kuluttajien sähkönsaantia hajautetuista energianlähteistä, lisätä sähkönjakelun joustavuutta uusilla teknologioilla sekä vastata kuluttajien energiantarpeisiin. Älykkäillä sähköverkoilla parannetaan sähkönjakelun varmuutta. Tavoitteena on varmennetumpi energian saatavuus ja järjestelmän turvallisuus. Kuluttajille tarjotaan pienempää sähköenergian hintaa sekä tehostetaan energiankäytön hallintaa. [12, s. 543.]

Ilmasto- ja energiapoliittiset tavoitteet ovat myös viemässä sähköntuotantoa kohden hajautettua energiantuotantoa. Rajalliset fossiiliset polttoaineet ja ydinpolttoainevarannot eivät riitä tulevaisuudessa kattamaan maailman tarvitsemaa energiantarvetta. Aasiassa ja Etelä-Amerikassa tapahtuva taloudellinen kasvu lisää merkittävästi maailman energiantarvetta. Energiantarve on tyydytetty fossiilisilla polttoaineilla, mutta ne ovat merkittävä hiilidioksidipäästöjen lähde. Älykkäillä sähköverkoilla pyritään lisäämään hajautettujen energiamuotojen käyttöä ja vähentämään hiilidioksidipäästöjä. [4, s. 1-2.]

6.3 Älykkäät sähköverkot ja niiden tuomat mahdollisuudet

Älykkäiden sähköverkkojen käyttöönotto, niille asetetut tavoitteet ja tavoitteisiin pääseminen antavat suuren hyödyn niin sähkönjakelulle kuin kuluttajillekin. [12, s. 543-544.]

- Kun sähköntuotanto sijaitsee lähellä kulutuspisteitä, häviöt ovat pienempiä ja hajautetulla tuotannolla pienennetään jakeluverkon kuormitusta.
- Lähellä kulutuspisteitä olevat energiantuotantojärjestelmät mahdollistavat katkeamattoman sähkönsyötön, vaikka kantaverkossa olisikin sähkönjakeluongelmia.
- Sähkönsyöttöjärjestelmä on jatkuvan tarkkailun alaisena, mutta mittaukset eivät kata koko jakelujärjestelmää. Kehittyneellä valvonnalla on mahdollista ennustaa järjestelmissä ilmeneviä häiriöitä. Kun häiriö ilmenee, järjestelmä pystyy nopeasti paikallistamaan ongelman lähteen. Kehittyneet algoritmit mahdollistavat järjestelmän itsediagnostiikan.
- Paremmalla valvonnalla ja lisäämällä verkon automaatiota verkon on mahdollista palautua ja asetella itsensä uudelleen häiriötilanteiden ilmentyessä.
- Itseään korjaava verkko palauttaa toimintansa automaattisesti ja lyhyemmässä ajassa kuin manuaalisesti aseteltava verkko.
- Sähköisten ajoneuvojen yleistyessä ne saattavat aiheuttaa kulutuspiikkejä sähköverkkoon ja tämä asettaa suuria haasteita verkon kantokykyyn. Hajautetut älykkääseen sähköverkkoon kytketyt energianlähteet tasaavat tätä kulutuspiikkiä.

6.4 Älyverkkojen toteutukseen tarvittavien teknologioiden kehittyminen

Perinteisestä sähköjakelusta älykkääksi sähköverkoksi kehittyäkseen on joidenkin teknologia-alueiden kehityttävä, jotta älykkään sähköverkon rakentaminen olisi mahdollinen. [12, s. 544-545; 10, s. 38.]

- Kun sähköenergiantuotanto ei vastaa kulutusta, tarvitaan sähköenergiaa varastoista tai on lisättävä energian tuotantoa. Varastoidulla energialla voidaan syöttää energiaa sähköverkkoon kulutushuippujen aikana, jolloin tuotantolaitokset, jotka toimivat ylärajoilla, eivät kuormitu ylimääräisesti. Esimerkiksi tuulienergia tuottaa energiaa myös niinä aikoina, jolloin huippukulutukseen ei ole tarvetta ja tuolloin tuulienergian tuottamaa sähköenergiaa voisi hyödyntää varaamalla sähköenergiavarastoja.
- Kehittyneitä mittareita ja antureita tarvitaan kaikille sähköjakelun osa-alueille, jotta verkosta saadaan reaaliaikainen sähköjärjestelmän tila. Älykkäät, kehittyneet mittarit ja anturit valvovat kulutuspisteiden tapahtumia.
- Kehittyneet älykkäät algoritmit mahdollistavat informoimaan järjestelmän tilasta ja mahdollistavat itseään diagnosoivan ja itseään uudelleen ohjaavan sähkönsyötön.
- Lisääntyvä sähköisten ajoneuvojen markkinoille tulo saattaa aiheuttaa verkon ylikuormitusta. Kehittämällä sähköajoneuvojen lataustekniikoita älykkäisiin verkkoihin soveltuviksi voidaan välttää mahdollisia ylikuormitustilanteita.
- Perinteisten käsi- ja kauko-ohjattavien järjestelmien sijaan muuntamon ja sähköverkon ohjauksen ja valvonnan on kehityttävä automaattisempaan suuntaan. Kytkinlaitteiden ohjausta ja valvontaa automatisoimalla parannetaan sähköjakelun luotettavuutta.
- Automaatiojärjestelmien lisääntyessä tietoliikennejärjestelmille tarvitaan lisää tiedonsiirtokapasiteettia.

- Sähköjärjestelmien tietoliikenneprotokollien standardointi mahdollistaa eri laitevalmistajien laitteistojen käytön ja laitteistot voidaan kytkeä plug and play -menetelmällä.
- Ohjelmistojen ja ohjelmistoalgoritmien on pystyttävä käsittelemään tiedot reaaliajassa ja näyttämään sähköverkon tarvittavat tiedot reaaliaikaisena.
- Hajautettujen energialähteiden tehokkaaseen sulauttamiseen tarvitaan myös sääennusteiden integrointia ohjelmisto- ja algoritmitasolle. Tuuli- ja aurinkoenergia tarvitsee ennustettavuutta niin paikallisestikin kuin laajoilta alueilta kerätyistä ennusteista.
- Avoimet laitteistoarkkitehtuurit ja standardit, joilla voidaan eri sähkölaitteet, sähköiset ajoneuvot ja mikrotuotanto kytkeä plug and play -menetelmällä.
- Älykkäät elektroniset laitteet, jotka mahdollistavat kehittyneet suojaus-, mittaus- sekä ohjaus- ja automaatioiminnot.

6.5 Älykkään sähköverkon mittaukset ja ohjaukset

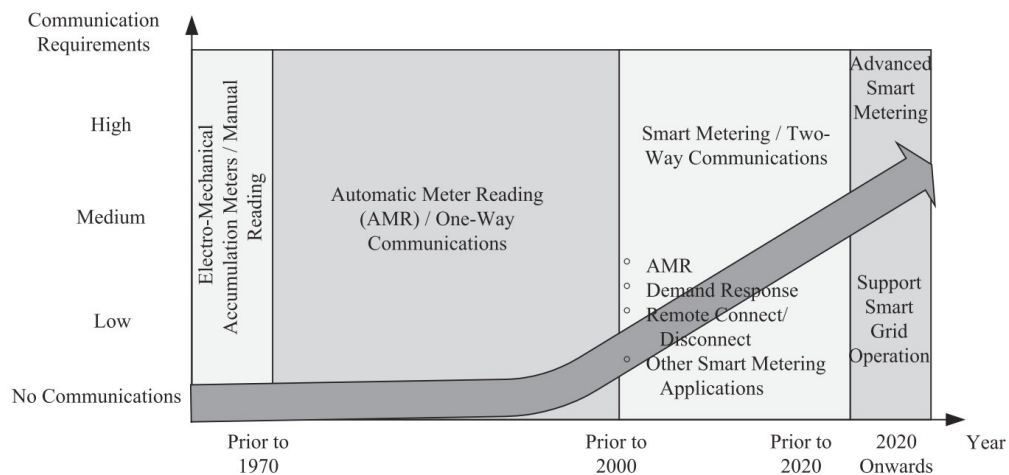
Älykäs sähköverkko antaa energiantuotantoon ja -siirtoon uusia mahdollisuuksia. Älykäs sähköverkko tarvitsee kuitenkin moderneja elektronisia laitteita, ohjaus- ja suojaussovelluksia, mittaustekniikoita ja -rakennelmia. Automaattiset ja uudelleen ohjaavat toiminnot tarvitsevat uudenlaisia sähkösiirtoon tarkoitettuja mittauslaitteita ja -menetelmiä, jotta älykäs sähköverkko voi toimia automaattisesti. Älykkään sähköverkon tavoitteena on syötön ja kuorman kytkeminen uudelleen vaihtoehtoisia reittejä käyttäen, jolla voidaan pienentää sähkönsyötön häiriöistä aiheutuvaa aikaa.

6.6 Automaattinen mittarinluenta AMR

Sähkönkulutusmittareita käytetään sähköenergian mittaamiseen kulutuspisteissä. Perinteisesti sähkönkulutusmittarit ovat olleet sähkömekaanisia, joiden lukemat on käyty paikallisesti lukemassa. Teknologioiden kehittyessä on kulutusmittareista saatu etäluettava, vaikka ne aluksi olivat vain yhteen suuntaan tietoa välittäviä. [14, s. 84.]

2000-luvulla alkoivat etäluettavat mittarit teknisesti kehittyä ja yleistyä laajempaan käyttöön kuin aikaisemmin, ne saivat kaksisuuntaisen tiedonsiirto-ominaisuuden. Kuvassa 11 esitetään älykkäiden mittarien kehityksen aikajana. Kaksisuuntainen tiedonsiirto mahdollistaa kulutuksen reaaliaikaisen seurannan. Älykkäillä mittareilla voidaan seurata myös sähkönsiirron tariffeja ja säätää sähkölaitteistojen käyttöä tariffimuutosten mukaan. [14, s. 84.]

Automaattisesta mittarinluennasta käytetään arkipäiväistä ja vakiintunutta nimitystä 'etäluettava sähkömittari' [28, s. 24]. Etäluettava mittari nimitystä käyttävät niin energia-yhtiöt kuin valmistajatkin viitatessaan automaattiseen mittarinluentaan ja siinä käytettäviin mittareihin.



Kuva 11. Automaattisten sähkönkulutusmittareiden kehitys [14, s. 84.]

Sähkönkulutuksen mittaamiseen voidaan käyttää digitaalisia tai analogisia kulutusmittareita, mutta edellä mainitut ominaisuudet eivät tee niistä automaattisesti älykkäitä mittareita. Älykkäiden mittareiden tyypillisiä toimintoja ovat [13, s. 356]

- Sähkön etäkytkentä ja katkaisu
- Jännitteen laadun mittaus
- Mittaustietojen rekisteröinti 15-60 minuutin aikavälein
- Mitattu tieto lähetetään vähintään päivittäin
- HAN-liityntä (Home Area Network)
- Kaksisuuntainen tiedonsiirto.

Älykkäillä sähkömittareilla voidaan ohjata sähkölaitteistojen päälle- ja poiskytkemistä. Kaksisuuntaisella tiedonsiirrolla voidaan seurata sähkönkulutusta reaaliaikaisesti, ja sähköenergian hinnanmuutoksia sekä valita taloudellisin kulutusajankohta. Älykkäistä mittareista saatua informaatiota voidaan siirtää muihin älykkään sähköverkon käytönvalvontajärjestelmiin. [14, s. 84.]

6.7 Edistynyt automaattinen mittarinluenta infrastruktuuri AMI

Älykäs mittausinfrastruktuuri AMI (Advanced Metering Infrastructure) on rakennettu älykkäiden etäluettavien mittareiden verkostosta. Älykäs mittausinfrastruktuuritekniikka rakennetaan älykkäistä mittareista, tietoliikenne- ja ohjelmistoteknologioista, se mahdollistaa kulutuspisteiden mittaustietojen välittämisen sähköjärjestelmän ympärillä. [13, s. 356.]

Älykäs mittausinfrastruktuuri on tärkeä osa älykästä sähköverkkoa, koska se mittaa energiankulutusta ja tarvetta sekä sähkönlaatua sähköverkon eri kulutuspisteissä. Kaukomittauksilla kerätään automaattisesti tietoja energiankulutuksesta eri kohteista ympäri sähköverkkoa. [13, s. 356.]

Älykäs mittausinfrastruktuuri pohjautuu voimakkaasti laitteissa oleviin kaksisuuntaisiin tietoliikenneominaisuuksiin, kun etäluettavassa mittarissa on yleisesti vain yksisuuntainen tiedonsiirto. Taulukossa 2 esitetään automaattisen mittariluennan ja kehittyneemmän mittausinfrastruktuurin eroavaisuuksia. [9, s. 274.]

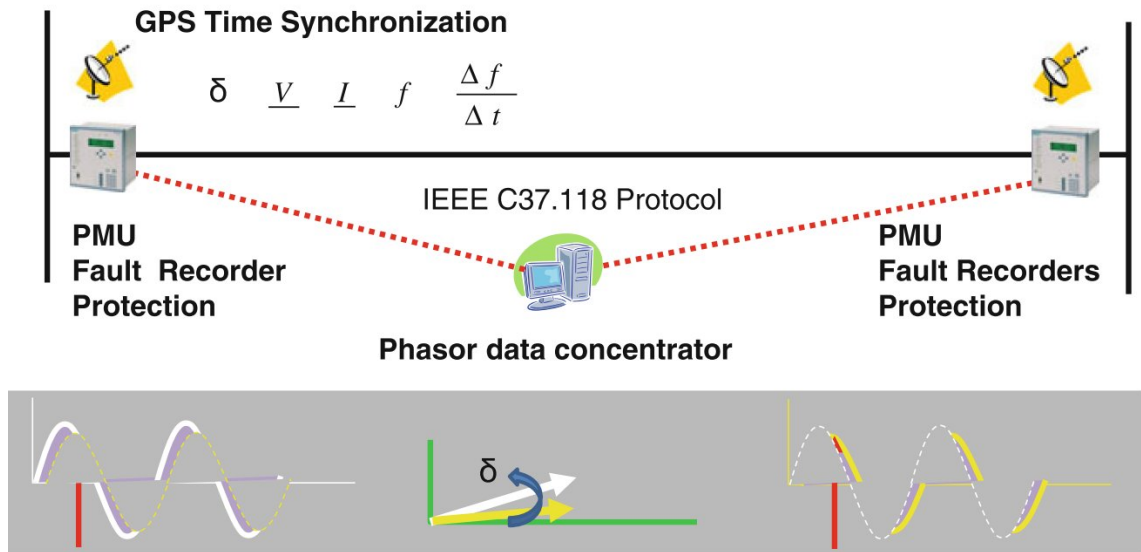
Taulukko 2. Automaattinen mittarinluenta ja automaattisen mittarinluennan infrastruktuurin vertailu.

	Automaattinen mittarinluenta / sähkönkulutusmittari (AMR)	Automaattinen mittarinluenta infrastruktuuri (AMI)
Mittarit	Elektroniset tai digitaaliset mittarit	Elektroniset tai digitaaliset mittarit paikallis- tai kotiverkko tietoliikenneliitännällä
Tiedonkeruu	Kuukausittainen	Kaukoluenta verkon kautta
Kulutuksen seuranta	Kumulatiivinen kWh	Kulutuksen seuranta reaaliaikaisesti
Asiakkaalle informaatio	Ei ole tai on rajoitettu	Kuluttajalla oleva reaaliaikainen kulutuksen seuranta
Lisälaitteet	Ei ole	Älykkäät lämpötilan ja valaistuksen säätimet
Vikatilanteet	Asiakkaan puhelinsoitto	Automaattinen vikailmoitus

6.8 Osoitinesityksen mittalaite PMU

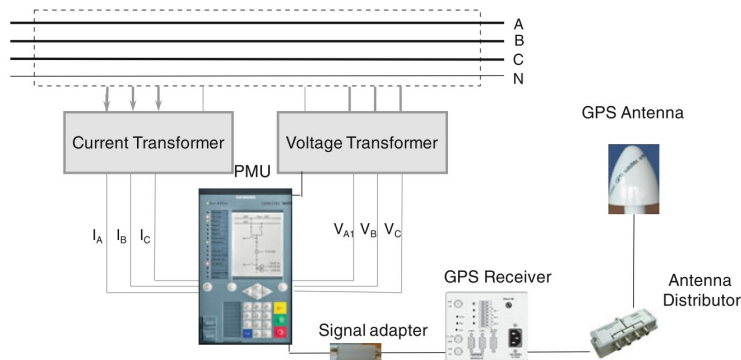
PMU (Phasor Measurement Unit) on osoitinmittalaite, joka pohjautuu digitaalisiin älykkäisiin elektronisiin laitteisiin. Osoitinmittalaitteet voivat sisältää muitakin älykkään elektronisen laitteen mittaus-, tallennus- ja suojausominaisuuksia kuin ainoastaan jännitteiden ja virtojen vaihekulmien sekä amplitudien mittaukset. Osoitinmittalaite on yksi tärkeimmistä moderneista mittauslaitteista, joita tarvitaan moderniin ja älykkääseen sähköverkkoon. [13, s. 189; 4, s. 211.]

Kuvassa 12 esitetään osoitinmittalaitteen mittauksen toimintaperiaate. Osoitinmittalaite mittaa eri solmupisteistä jännitteen, virran ja taajuuden sekä niiden vaihekulmat ja aikaleimaa ne GPS-signaalin avulla ja tekee mitattavista suureista analogisen osoitinesityksen (synchrophasors). Osoitinesityksellä on kulma ja pituus. GPS (Global Positioning System) on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka aika pohjautuu atomikellon aikaan. [4, s. 211; 13 s. 188-189.]



Kuva 12. PMU-mittauksen periaate [4, s. 212].

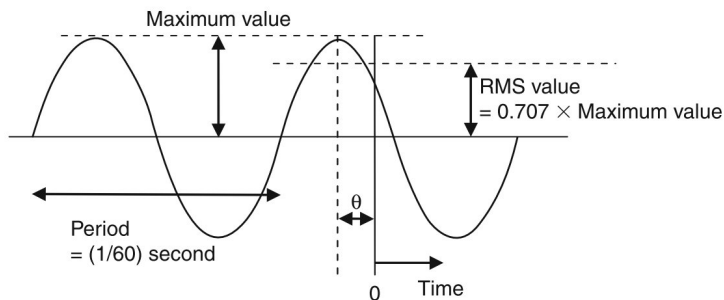
Kuvassa 13 esitetään 3-vaiheisen osoitinmittauslaitteen kytkentä. Osoitinmittauslaitteeseen kytketään jännite- ja virtamuuntajat, jotka mittaavat mitattavat suureet ja niiden taajuuden. Osoitinmittalaitteet voidaan kytkeä yksivaiheiseen tai kolmivaiheiseen syöttöön. Sähkölaitteistossa on oltava GPS-antenni ja -vastaanotin, jotta aikaleimaus GPS:n avulla on mahdollinen.



Kuva 13. Vaiheosoittimen mittausyksikön kytkentä voimajärjestelmään [4, s. 245].

6.9 Vaiheosoittimen IEEE C37.118 - standardi

Siniaalto on jaksollinen harmonisen värähtelyn perusmuoto ja sähkötekniikassa pyörivässä generaattorissa muodostuva vaihtosähkön aaltomuoto. Siniaallon perusmuoto esitetään kuvassa 14. Käytettäessä Eulerin lauseketta (1) tai ajan funktiolla olevaa matemaattista esitystä (2) siniaallosta voidaan muodostaa vektori, jolla on pituus ja kulma. Kulma voidaan esittää radiaaneina, jossa täyttä ympyrää esittää tasokulma $0-2\pi$ radiaania ja kulma asteina on $0-360^\circ$.



Kuva 14. Siniaallon perusmuoto [15, s. 132]

Osoitin voidaan ilmaista Eulerin lauseen avulla:

$$\text{osoitin} = X \times e^{j\theta} = X \times \cos \theta + jX \times \sin \theta \quad (1)$$

X on jännitteen tehollisarvo
 θ on vaihekulma radiaaneina
 e on Neperin luku.

tai sinikäyrän matemaattisena muotona:

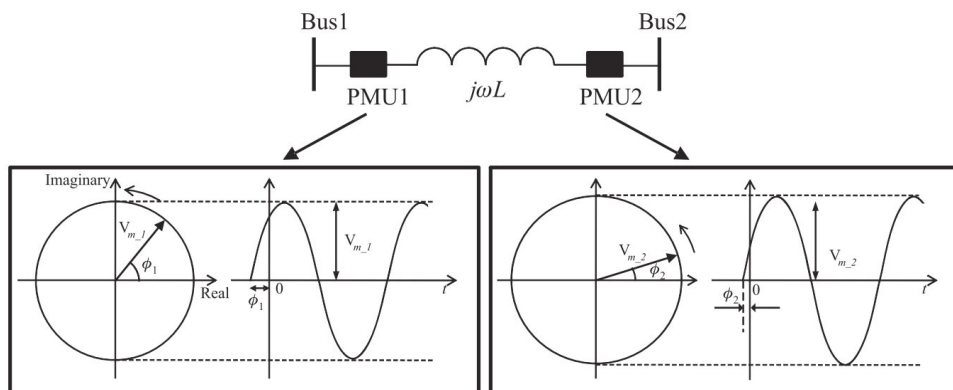
$$\text{osoitin} = X \times \cos(\omega t + \theta) \quad (2)$$

X on jännitteen tehollisarvo
 t on aika
 ω on kulmataajuus
 θ on vaihekulma radiaaneina.

Osoitinmittauslaite ottaa näytteitä solmupisteissä olevista jännitteistä, virrasta ja taajuudesta. IEEE C37.118 -standardi on osoitinmittauslaitetta varten standardoitu protokolla, jolla esitetään mitattujen suureiden ominaisuudet käytönvalvontaan analogisella osoitinesityksellä. [13, s. 285.]

Nykyisin IEEE C37.118 -standardi on käytössä synkronoiduissa järjestelmätason säädöissä ja mittauksissa, WAMPAC:ssa. IEEE C37.118 -standardi määrittää myös kommunikoinnin osoitinmittalaitteen ja tiedonkeruulaitteiston välillä. Jotta IEEE C37.118 -standardista saadaan kaikki tarvittava hyöty, on huolehdittava, että osoitinmittalaitteiden mittauspisteet valitaan oikein ja huomioidaan tietoliikenteen siirtoviiveet. [13, s. 285.]

Kuvassa 15 esitetään osoitinmittalaitteen mitaamat kahden solmupisteen mitatut jännitteet ja niiden vaihe-erot. Jännitteiden amplitudien ja vaihekulmien osoitinesitykset on esitetty yksikköympyrään havainnollistamaan solmupisteiden tilaa. Jännitteiden ja virtojen amplitudien ja vaihekulmien osoitinesitykset on yleisesti käytössä oleva esitysmuoto käytönvalvontajärjestelmissä.



Kuva 15. Jännitteen vaiheosoittimet [14, s. 175].

6.10 Laajan alueen mittausjärjestelmä WAMS

Voimajärjestelmä on jatkuvan muutoksen alaisena järjestelmän koon kasvaessa ja monimutkaistuessa. Voimajärjestelmiin tarvitaan dynaamisten prosessien ennustettavuutta kuten yhtä aikaa olevien sähköisten ajoneuvojen latauksesta aiheutuva kuormitus-

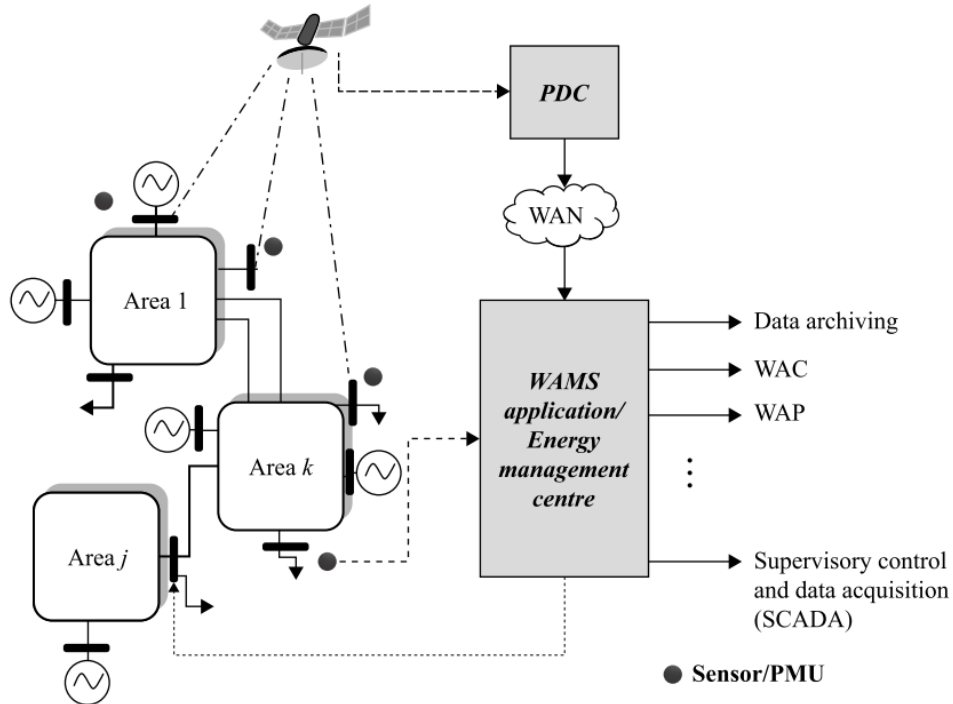
vaihtelu. Reaaliaikaisella valvonnalla voidaan vastata ennustettavuutta vaativiin prosesseihin. [16, s. 1.]

Laajan alueen mittausjärjestelmä (Wide Area Measurement System, WAMS) on hierarkkinen, monimutkainen ja laaja mittausjärjestelmä, joka rakentuu mm. taajuusmuuttuvien häiriöiden tallentimisesta, osoitinmittalaitteista, tiedonkeruulaitteistoista (Phasor Data Concentrator, PDC), digitaalisista releistä, tietoliikennelinkeistä ja signaalinprosessointitekniikoista. [16, s. 2.]

Laajan alueen mittausjärjestelmä perustuu tarkkoihin jännitteen, virran, vaihekulman ja taajuuden mittauksiin sekä pätö- ja loistehon mittaamiseen. Järjestelmä mittaa useasta verkon pisteestä reaaliaikaisesti solmupisteiden virrat, jännitteet ja niiden vaihekulmat. Osoitinmittalaitteella ja GPS-signaalin avulla saadaan määriteltyä tarkka ja reaaliaikainen voimajärjestelmän tila. [4, s. 211.]

Kuvassa 16 esitetään laajan alueen mittausjärjestelmän periaatteellinen rakenne. Osoitinmittalaitteet mittaavat mitattavat suureet. Tiedonkeruulaitteet keräävät tiedon ja jakavat niitä voimajärjestelmän eri osiin, jotta voimajärjestelmän tilasta oleva kuva on tarkka ja reaaliaikainen. Paikallisella tasolla osoitinmittalaitteella mitattu informaatio luetaan, aika synkronoidaan ja lähetetään tiedonkeruulaitteistolle. Tiedonkeruulaitteistolla oleva informaatio jaetaan laajemmalle valtakunnallisella alueella sijaitsevalle reaaliaikaiselle valvontajärjestelmälle (Real-Time Dynamics Monitoring System, RTDMS). RTDMS on visuaalinen ja reaaliaikainen esitys voimajärjestelmän tilasta [13, s. 158]. Tiedonkeruulaitteistolla olevaa informaatiota käytetään myös laajan alueen ohjaustarkoituksiin (Wide Area Control, WAC) ja laajan alueen suojaustarkoituksiin (Wide Area Protection, WAP). [16, s. 2.]

Tiedonkeruulaitteisto kerää osoitinmittalaitteista saadut mittausarvot. Tiedonkeruulaitteisto tarkastaa tiedon oikeellisuuden ja ilmoittaa väärästä tai puutteellisesta tiedosta [13, s. 190]. Tiedonkeruulaitteistolta vaaditaan suurta tallennuskapasiteettia. Jotta laajan alueen mittausjärjestelmä olisi tarkka, luotettava ja reaaliaikainen, niin se vaatii tarkoitukseensa nopean ja pienen viiveisen tiedonsiirtoverkon.



Kuva 16. Laajan alueen mittausjärjestelmän arkkitehtuuri [16, s. 2].

6.11 Havainnointi, paikallistaminen, eristäminen, uudelleen kytkentä FDIR

Jakelujärjestelmän hallintajärjestelmä (Distribution Management Systems, DMS) on yksinkertainen SCADA:n laajennus. Jakeluverkon hallintajärjestelmä tarjoaa käytönpalveluja sähköverkon valvontaan, suunnitteluun, ylläpitoon, verkkotopologian valvontaan ja vianhallintaan. FDIR on yksi jakelujärjestelmän hallintajärjestelmän sovelluksista. [13, s. 216; 14, s. 141-142; 11, s. 359-360.]

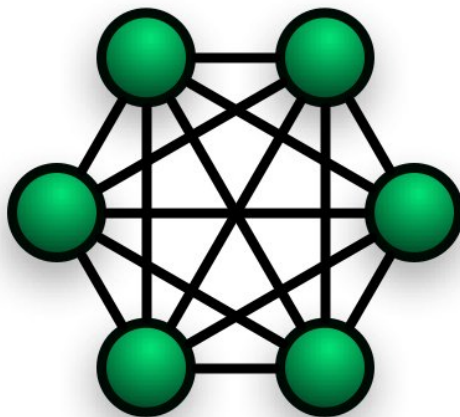
FDIR (Fault Detection, Isolation and Restoration) on älykkäissä sähköverkoissa määritelty automaattinen toiminto. FDIR on suunniteltu parantamaan sähköjärjestelmän luotettavuutta ja toiminnallisuutta. FDIR eristää nopeasti viallisen johtolähdön ja kytkee sen uudelleen toimivaan syöttöön. Toiminnolla voidaan pienentää järjestelmän palautumisaikaa tunneista minuutteihin. Vian sijainti paikallistetaan automaattisesti ja nopeasti, joten toiminto auttaa korjaushenkilöstöä aloittamaan korjaustoimenpiteet nopeasti ja näin pienennetään sähkökatkokkien aikaa. [15, s. 12; 13, s. 216.]

FDIR sisältää neljä toimintajaksoa

- vian havainnointi
- vian paikallistaminen
- vian eristäminen
- syötön ja kuorman uudelleen kytkeminen vaihtoehtoisia reittejä käyttäen.

Sähkönjakelun luotettavuutta kuvataan tunnusluvuilla SAIFI ja SAIDI. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) on keskeytysten keskimääräinen lukumäärä tietyllä aikavälillä. SAIDI (System Average Interruption Duration Index) on keskeytysten keskimääräinen yhteenlaskettu kesto aika tietyllä aikavälillä. FDIR:n automaattisella toiminnolla parannetaan järjestelmän luotettavuutta, katkosten kesto aikaa ja parannetaan SAIFI- ja SAIDI-tunnuslukujen arvoja. [15, s. 12.]

Pienjänniteverkot on yleensä rakennettu säteittäisinä [24, s. 13]. Syötön ja kuorman uudelleen kytkeminen vaihtoehtoisia reittejä käyttäen vaatii varmennettua verkkotopologiaa, jossa mahdollisimman moni sähkönsyötön piste on solmukohtana [13, s. 219]. Kuvassa 17 esitetään esimerkkinä solmuverkko (Mesh-verkko), joka on ideaalinen täysin varmennettu verkkotopologia ja jonka kaikki pisteet ovat tavalla tai toisella kytkettyinä toisiinsa.



Kuva 17. Varmennettu solmuverkotopologia [23].

6.12 Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt WAMPAC

Sähköverkot kehittyvät yhä monimutkaisemmiksi. ne toimivat toimintarajojensa ylärajoilla. Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt (Wide Area Monitoring Protection and Control, WAMPAC) on tärkeä sovellus verkon hallintaan. WAMPAC pitää sisällään termit WAM (Wide Area Monitoring), WAP (Wide Area Protection) ja WAC (Wide Area Control), jotka ovat laajan alueen valvonta, laajan alueen suojaus ja laajan alueen ohjaus. [13, s. 204.]

Uudet synkronoitavat mittausteknologiat ja kehittyneet älykkäät elektroniset laitteet ovat mahdollistaneet järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt sekä kehityksen ja käyttöönoton. [15, s. 122.]

Aikasynkronoidut mittaukset ovat avainasemassa, kun tarvitaan laajalta alueelta mittaustietoja. Mittaukset ovat aikasynkronoituja näytteitä voimajärjestelmän jännitteistä ja virroista koko verkon alueelta. Näytteenotetut signaalit aikaleimataan GPS-signaalin avulla ja ne esitetään osoitinesityksenä. [13, s. 188-189.]

Aikasynkronointi on järjestelmätason mittausten, suojausten ja säätöjen perustana. Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt luottavat tarkkaan aikaleimattuihin, osoitinmittalaitteelta saataviin mittaustuloksiin, joilla valvotaan, ohjataan ja suojataan sähköverkkoa ja sen laitteistoja. [13, s. 189.]

Mikroprosessoripohjaiset älykkäät releet, älykkäät elektroniset laitteet ja kehittynyt tietoliikenne muuttavat voimansiirron valvontaa. Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt on vaihtoehtoinen ratkaisu sähköjaka- luvon luotettavuuden hallitsemiseen parannetun sähköasema- ja muuntamoautomaation avulla. [13, s. 191.]

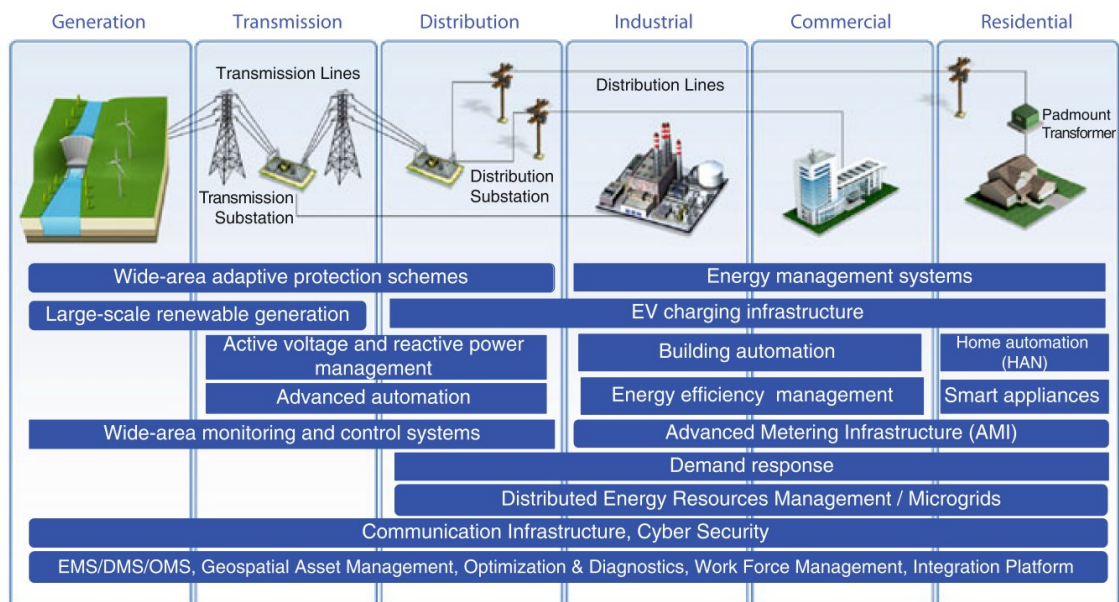
Älykkäiden verkkojen oletetaan olevan itse kytkentöjään korjaavia. Häiriötilanteiden, sähkölaitteistovian tai kyberhyökkäyksen jälkeen verkon oletetaan palautuvan itsestään normaaliin tai ennen häiriötä olevaan tilaan. Järjestelmätason mittaukset, suojaukset ja säädöt käyttöönotto vaatii laajamittaista sähköasema- ja muuntamoautomaation ja älykkäiden digitaalisten teknologioiden käyttöönottoa. [13, s. 189-192.]

6.13 Älykkään sähköverkon teknologiat ja sähköjakelun osa-alueet

Sähköjakelujärjestelmä voidaan jakaa eri osa-alueisiin siirrettävän jännitetason mukaan selkeyttämään ja havainnollistamaan paremmin laajaa ja monimutkaista jakelujärjestelmää. Kuvassa 18 esitetään sähköjakelu kuutena vertikaalisena kerroksena. Sähköntuotanto- ja -siirtoinfrastruktuuria ovat sähköntuotanto (generation), -siirto (transmission) ja -jakelu (distribution). Loppukäyttäjiä ja kulutuspisteitä ovat teollisuus (industrial), päivittäistavara- ja toimistokiinteistöt (commercial) sekä asuinkiinteistöt (residential).

Älykkäissä sähköverkoissa on käytössä useita eri sähköjakelujärjestelmän osa-alueisiin liittyviä teknologioita, joista osa on jakautunut koko älykkään sähköverkon kattavaksi järjestelmäksi.

Järjestelmätason mittauksia, suojauksia ja säätöjä käytetään lähinnä sähköntuotannon, -siirron ja -jakelun osa-alueisiin. Automaattista mittarinluentainfrastruktuuria käytetään kulutuspisteiden energiankulutuksen tarkkailuun. Tietoliikennekommunikaatio ja energianhallintajärjestelmät kattavat älykkään sähköverkon kaikki osa-alueet.



Kuva 18. Sähköjakelun osa-alueet ja älyverkon teknologiat [15, s. 58].

Jakelumuuntamo on liityntä keski- ja pienjänniteverkon välillä. Jakelumuuntamon pääasiallinen tehtävä on muuntaa suurempi jännite pienemmäksi kuluttajille ja kulutuspiisteille sopivaan tasoon. Suomessa on käytössä yleisesti yksivaiheisena 230 V ja kolmivaiheisena 400 V. Pelkän jännitteen alentamisen ja muuntajan suojauksen lisäksi jakelumuuntamo voi sisältää energiamittaukseen, valvontaan ja ohjaukseen tarkoitettuja laitteistoja. [25, s. 140.]

Sähkönsiirrolla ja -jakelulla on pitkä historia takanaan. Monet käytössä olevista sähköverkkoteknologioista on todistanut toimintansa pitkän historiansa aikana, mutta monien teknologioiden on todistettava toimivuutensa suuren mittakaavan älykkäissä sähköverkoissa. Rakenteilla olevissa älykkäiden sähköverkkojen projekteissa on havaittu, mitkä teknologioista soveltuvat käyttöön, mitkä kehittyvät ja mitkä ovat vanhentuneita teknologioita. Teknologioiden soveltuvuudet esitetään taulukossa 3. [6, s. 20.]

Taulukko 3. Älykkäisiin sähköverkkoihin soveltuvien teknologioiden kehittyminen.

Teknologia	Teknologian vanheneminen	Kehityksen nopeus
Laajan alueen mittaus ja ohjaus	Kehittyy	Kehitys on nopeaa
Tietoliikenne teknologioiden integrointi	Vanhentunut	Kehitys on nopeaa
Hajautettujen ja uusien energiamuotojen integrointi	Kehittyy	Kehitys on nopeaa
Energiansiirto (siirtolinjojen kaapelointi)	Vanhentunut	Kehitys on maltillinen (korkean lämpötilan suprajohdaviain materiaalien teknologiat)
Mittausinfrastrukturi	Vanhentunut	Kehitys on nopeaa
Sähköajoneuvojen latausinfrastrukturi	Kehittyy	Kehitys on nopeaa
Kuluttajan käytössä olevat älykkäät ja automaattiset järjestelmät	Kehittyy	Kehitys on nopeaa

7 Jakelumuuntamoiden nykytilan selvitys

Insinööriyöni yhtenä tavoitteena oli selvittää jakelumuuntamoiden nykytilaa. Jakelumuuntamoiden nykytilaa selvitin energiayhtiöiltä pienellä kyselylomakkeella. Lähetin kyselyn yhdeksääntoista energiayhtiöön ja neljästä vastattiin. Pienestä vastaajamäärästä ei saada kattavaa kuvaa muuntamoiden nykytilasta, mutta karkea ja suuntaa antavan näkemyksen. Seuraavassa esitän nykytilaa selvittävät tulokset niiltä osin, mitä vastauksista sain selville.

Vastanneiden verkkoyhtiöiden piiriin kuuluu noin 960 000 asiakasta, asiakasmäärät vaihtelevat 74 000:sta 415 000:n asiakkaaseen. Asiakasmäärät selvitin yhtiöiden verkkosivuilta ja saatavilla olevista vuosikatsauksista.

Kyselyyn vastanneiden verkkoyhtiöiden muuntamoautomaatio on yli 90-prosenttisesti 2000- ja 2010-luvuilta. Kaupunkialueella käytettävistä muuntamoista noin 20 % on älykkäiksi muuntamoiksi määriteltäviä.

Muuntamon, älykkään elektronisen laitteen ja käytönvalvontajärjestelmän väliseen kommunikointiin on käytetty pääsääntöisesti IEC 60870-5-101 - ja 60870-5-104 - tietoliikenneprotokollaa.

Kaupunkialueella muuntamotilat sijaitsevat osin kiinteistöjen omissa tiloissa ja kiinteistön omistaja saattaa vaihdattaa ovien lukituksia ilmoittamatta niistä energiayhtiölle. Lukossa olevat ovet hidastavat paikan päälle pääsyä häiriö- ja vikatilanteessa, jolloin muuntamoautomaatiolla voitaisiin mahdollisesti eliminoida tai ainakin merkittävästi vähentää häiriöistä aiheutuvia keskeytyksiä.

Hajautettujen energialähteiden hidas käyttöönotto Suomessa ei toistaiseksi ole vaikuttanut uusien muuntamokoneistojen valintaan ja käyttöönottoon, vaan luotetaan perinteisiin kaukokäyttömenetelmiin. Merkittävä syy uusien muuntamokoneistojen ja kehitettyneen muuntamoautomaation käyttöönottoon olisi KAH-perusteinen (keskeytyksestä aiheutuva haitta) kustannussäästö.

7.1 Työn aikana heränneitä uusia kysymyksiä

Insinööriyöni edetessä myös uusia kysymyksiä heräsi, joita voisi esittää verkkoyhtiöille

- Kuinka paljon kyseisellä verkkoyhtiöllä on käytössä hajautettua tai mikroenergiantuotantoa? Mitkä ovat verkkoyhtiön tulevaisuudennäkymät näiltä osin?
- Kun muuntamo on kyllin vanha, niin voidaanko se modernisoida taloudellisesti kannattavasti. Onko taloudellisempaa rakentaa uusi muuntamo uusilla teknologioilla?
- Tehoelektroniikkaa käytetään joidenkin hajautettujen energialähteiden jännitteiden muuntamiseen. Minkälaiset vaikutukset tehoelektroniikalla on mikroverkon harmonisiin yliaaltoihin ja muuntajan kuormituskestävyyteen?
- Tulevaisuudessa sähköisten ajoneuvojen käyttö lisääntyy nopealla tahdilla. Riittääkö Suomen kantaverkon kapasiteetti siirtämään kaiken tarvittavan energian, vai pyritäänkö mikroverkoilla tasaamaan kyseinen energiankulutus?
- Millä laajuudella osoitinmittalaitteita on käytössä? Mikä on verkkoyhtiöiden näkemys osoitinmittalaitteen oikeasta mittauspisteestä?
- Jos verkkoyhtiöillä on käytössä älykkäisiin sähköverkkoihin perustuvia järjestelmiä, minkälaisia verkkotopologioita on käytössä?

7.2 Itävallan päästötön osavaltio

Tämän insinööriyöni loppuun on hyvä tehdä katsaus onnistuneesta hajautettujen ja uusiutuvien energialähteiden käytöstä. Maailmalla ja Euroopassa on jo käytössä huomattavasti hajautettuihin, uusiutuviin ja hiilineutraaleihin tuotantomenetelmiin pohjautuvia energiantuotantomuotoja. Insinööriyön tekijällä ei ole ollut mahdollisuutta perehtyä seuraavassa esitettyyn Itävallan päästöttömän osavaltion sähköntuotannon ja -jakelun teknillisiin yksityiskohtiin, joten esitetyt tiedot pohjautuvat uutisointeihin kyseisestä aiheesta.

Itävallassa panostetaan vahvasti uusiutuvaan eli päästöttömään energiantuotantoon. Itävallan suurin osavaltio, 1,65 miljoonan asukkaan Ala-Itävalta (Niederösterreich), tuottaa kaiken sähköenergian uusiutuvista energianlähteistä. [29; 30; 31; 32; 33.]

Osavaltion sähköenergiantuotanto koostuu 63 % vesivoimasta, 26 % tuulivoimasta, 9 % biomassasta ja 2 % tuotetaan aurinkoenergiasta. Uusiutuvilla energiantuotantotavoilla katetaan 75 % Itävallan koko energiantarpeesta ja loput 25 % katetaan fossiililla energiantuotantotavoilla. [29; 30; 31; 32; 33.]

Itävalta on investoinut voimakkaasti energiatehokkuuteen ja uusiutuvaan energiaan. Uutisoinnin mukaan puhtaan teknologian piiriin on syntynyt 200 000 työpaikkaa ja alan liikevaihto on 30 miljardia euroa. Itävallan hallitus arvioi, että seuraavan 10 vuoden aikana puhtaan teknologian piiriin saadaan 100 000 työpaikkaa lisää. [29; 30; 31; 32; 33.]

Itävallassa aurinkolämpöä käytetään arviolta 15 % maan energiankulutuksesta, mikä on eniten asukasta kohden koko Euroopassa. Itävalta on pitkällä aurinkoenergian kehittämisessä, esimerkiksi Wienissä parkkimittarit on varustettu aurinkokennoilla ja ne toimivat aurinkoenergialla. [29; 30; 31; 32; 33.]

Itävalta on voittamassa kilpailun päästöttömän energian käytöstä. Muita kehittyneitä valtioita ovat Ruotsi, Portugali, Latvia ja Tanska. Maailmalla nähdään, mistä uudet innovaatiot ja työpaikat syntyvät, eikä kyse ole vain rahasta, vaan Itävallan päästötön osavaltio on hyvä esimerkki visioista ja uskalluksesta. [29; 30; 31; 32; 33.]

8 Yhteenveto

Tämän lopputyöni innoittajana on ollut mahdollisuus kurkistaa sähköverkkojen ja jakelumuuntamoiden tulevaisuuden kehityssuuntaan. Lopputyöhöni olen käyttänyt kirjallisuustutkimusta, mutta varsinaisesti tutkimukseeni ei ollut saatavilla laajaa kirjallisuutta liittyen jakelumuuntamoiden automatisointiin ja rooliin älykkäissä sähköverkoissa. Kirjallisuudessa älykkäiden sähköverkkojen automatisoinnissa viitataan lähinnä sähköasemien automatisointiin enemmän kuin jakelumuuntamoiden automatisointiin. Sähköasema ja jakelumuuntamo ovat kuitenkin toiminnaltaan samankaltaisia jännitemuunnetaan käyttöön sopivaksi, mutta niissä käytettävät jännitetasot ovat erilaiset. Sähköasemiin ja jakelumuuntamoihin voidaan käyttää kuitenkin samoja suojaus-, ohjaus- ja valvontamenetelmiä huomioiden kuitenkin jännite- ja virtatasot.

Tulevaisuuden suunta on kuitenkin hajautetuissa energiantuotannoissa, jotka liitetään mikroverkkoina ja virtuaalisina voimalaitoksina jakelumuuntamon kautta keskijänniteverkkoon. Jakelumuuntamon rooli on tulevaisuudessa osana älykästä sähköverkkoa huomattavasti merkityksellisempi kuin nykyään.

Tulevaisuuden älykäs sähköverkko tarvitsee toimiakseen luotettavasti, paljon mittaus-tietoa useasta verkon tuotanto- ja kulutuspisteestä. Mittaustietojen on oltava aiempaa tarkempia. Älykäs sähköverkko tarvitsee tehokkaasti toimiakseen moderneja digitaalisilla teknologioilla toimivia älykkäitä elektronisia laitteita. Perinteisillä käsikäyttöisillä ohjaus- ja valvontamenetelmillä ei voida automatisoida sähkönjakelua.

Jakelumuuntamo on kuvien 10 ja 18 mukaisesti sähköntuotannon ja kulutuksen solmupisteessä. Siksi jakelumuuntamolla on keskeinen rooli tiedon keräämisessä ja välittämisessä eteenpäin. Osoitinmittalaite on yksi tärkeimmistä modernin sähköverkon mittalaitteista. Synkronoitaessa mikrotuotantoa keskijänniteverkkoon tarvitaan reaaliaikainen tieto muun verkon tilasta ja muista keskijännitteen solmupisteistä. Jotta osoitinmittalaite antaa oikean tilatiedon mikroverkosta syötettävästä jännitteestä, niin osoitinmittalaitteen luonnollinen mittauspiste voisi olla jakelumuuntamo.

Insinööritöni tavoitteena oli selvittää jakelumuuntamon kauko-ohjausta ja -valvontaa, älykkäitä elektronisia laitteita ja näiden tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Selvitettäessä tulevaisuuden näkymiä on selvitettävä sähkönjakelun tulevaisuus. Sähkönjakelun tulevaisuus on älykkäissä sähköverkoissa ja hajautetuissa energiantuotannoissa.

Jakelumuuntamoiden rooli tulevaisuudessa on merkityksellisempi älykkäissä sähköverkoissa. Perinteisesti jakelumuuntamo on ollut liityntä keski- ja pienjänniteverkon välillä alentaen suuremman jännitteen pienemmäksi. Hajautettujen energiatuotantojen lisääntyessä jakelumuuntamon kautta syötetään sähköenergiaa keskijänniteverkkoon.

Jakelumuuntamo on keskeisessä asemassa kerättäessä ja välitettäessä mittaustietoja pienjänniteverkon tilasta sekä mikroverkon sähköntuotannosta. Älykkäät ja kehittyneet mittauslaitteet ja -menetelmät antavat mahdollisuuden kerätä mittaustietoja aiempaa tarkemmin ja monipuolisemmin.

Insinööriyössäni olen onnistunut tuomaan esille teknologioita ja menetelmiä, joilla mahdollistetaan jakelumuuntamon integroiminen älykkääseen sähköverkkoon ja selvittämään jakelumuuntamon roolia laajalle alueelle ulottuvassa ja modernissa tulevaisuuden älykkäässä sähköinfrastrukturissa.

Lähteet

- 1 Elovaara, Jarmo. 2010. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto.
- 2 Clarke, Gordon; Reyanders, Dean. 2004. Practical modern SCADA protocols: DNP3, 60870.5 and related systems. Burlington: Elsevier.
- 3 Strauss, Cobus. 2003. Practical electrical network automation and communication systems. Perth: Elsevier.
- 4 Buchholz, Bernd M; Styczynski, Zbigniew. 2014. Smart grids - fundamentals and technologies in electricity networks. Berlin: Springer.
- 5 Ackermann, Thomas; Andersson, Göran; Söder, Lennart. 2001. Electric power systems research 57. Elsevier.
- 6 International Energy Agency. 2011. Technology roadmap smart grids. Paris: International Energy Agency.
- 7 Hatziargyriou, Nikos. 2014. Microgrids architectures and control. Chichester: Wiley, IEEE Press.
- 8 Momoh, James. 2012. Smart grid fundamentals of design and analysis. Hoboken: Wiley, IEEE Press.
- 9 Thomas, Mini S; McDonald, John D. 2015. Power system SCADA and smart grids. Boca Raton: CRC Press.
- 10 Shawkat, Ali. 2013. Smart grids opportunities, development, and trends. London: Springer.
- 11 Bahhen, David. 2014. Smart grids clouds, communications, open source, and automation. Boca Raton: CRC Press.
- 12 El-Sharkawi, Mohammed A. 2013. Electric energy an introduction third edition. Boca Raton: CRC Press.
- 13 Borlase, Stuart. 2013. Smart grids infrastructure, technology, and solutions. Boca Raton: CRC Press.
- 14 Ekanayake, Janaka; Liyanage, Kithsiri; Wu, Jianzhong; Yokoyama, Akihiko; Jenkins, Nick. 2012. Smart grid technology and applications. Chincester: Wiley.

- 15 Begonic, Miroslav M. 2013. Electrical transmission systems and smart grids. Selected entries from the encyclopedia of sustainability science and technology. New York: Springer.
- 16 Messina, Arturo Roman. 2015. Wide-area monitoring of interconnected power systems. London: The Institution of Engineering and Technology.
- 17 Siemens. 2013. Verkkodokumentti. Intelligent transformer substations for future-proof power distribution.
<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/Transformers/Distribution%20Transformers/fitformer-reg/intelligent-transformer-substation_en.pdf>. Luettu 19.11.2015.
- 18 ABB. 2013. Renewable microgrid controller MGC600. Verkkodokumentti.
<http://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/microgrid-controller-600_en_lr%28dic2013%29.pdf?sfvrsn=2>. Luettu 19.11.2015.
- 19 ABB. 2011. Substation automation systems smart, IEC 61850-compliant solutions. Verkkodokumentti.
<[http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/9a690e7daa8286c5c1257a620046037f/\\$file/Substation+Automation+Systems+-+Smart,+IEC+61850-compliant+solutions.pdf](http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/9a690e7daa8286c5c1257a620046037f/$file/Substation+Automation+Systems+-+Smart,+IEC+61850-compliant+solutions.pdf)>. Luettu 19.11.2015.
- 20 Siemens. 2008. Solutions for smart and super grids with HVDC and FACTS. Verkkodokumentti.
<<http://www.energy.siemens.com/br/pool/br/transmissao-de-energia/facts/Solutions-for-Smart-and-Super-Grids-using-FACTS-&-HVDC.pdf>>. Luettu 19.11.2015.
- 21 ABB. 2010. Special report IEC 61850. Verkkodokumentti.
<https://library.e.abb.com/public/a56430e1e7c06fdcf12577a00043ab8b/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf>. Luettu 19.11.2015.
- 22 ABB. 2015. Technical catalog, current sensors, voltage sensors. Verkkodokumentti.
<https://library.e.abb.com/public/05e94529bfab4388c1257df600558bb3/1SBC140152C0207_TechnicalCatalog%20Current-Voltage%20sensors.pdf>. Luettu 19.11.2015.
- 23 Wikipedia. 2015. Network topology. Verkkodokumentti.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Network_topology>. Luettu 19.11.2015.
- 24 Lakervi, Erkki; Partanen, Jarmo. 2013. Sähköjaketekniikka. Helsinki: Otatieto.
- 25 Hadjsaid, Nauredine; Sabomadiere, Jean-Claude. 2012. SmartGrids. London: Wiley, ISTE.

- 26 Russell, Stuart; Norvig, Peter. 2010. Artificial intelligence an modern approach third edition. New Jersey: Prentice Hall.
- 27 Momoh, James A. 2007. Electric power distribution, automation, protection and control. Boca Raton: CRC Press.
- 28 Sarvaranta, Anni. 2010. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Harjoitustyö. Aalto-Yliopisto.
- 29 Phys.org. 2015. Austria's largest state goes 100% renewable. Verkkodokumentti. <<http://phys.org/news/2015-11-austria-largest-state-renewable.html>>. Luettu 26.11.2015.
- 30 YLE. 2015. Itävallan energiapolitiikka on täysin vastakkainen Suomelle. Verkkodokumentti. <http://yle.fi/uutiset/itavallan_energiapolitiikka_on_taysin_vastakkainen_suomelle/6099384>. Luettu 26.11.2015.
- 31 YLE. 2015. Itävalta jättää fossiilisähkön, yksi osavaltio jo täysin päästötön. Verkkodokumentti. <http://yle.fi/uutiset/itavalta_jattaa_fossiilisahkon_yksi_osavaltio_jo_taysin_paastoton/8435394>. Luettu 26.11.2015.
- 32 The Mind Unleashed. 2015. Austria's largest state is running on 100% renewable energy. Verkkodokumentti. <<http://themindunleashed.org/2015/11/austrias-largest-state-is-running-on-100-renewable-energy.html>>. Luettu 26.11.2015.
- 33 The Guardian. 2015. All electricity in Austria's largest state now produced from renewables. Verkkodokumentti <<http://www.theguardian.com/world/2015/nov/06/all-electricity-in-austrias-largest-state-now-produced-from-renewables>>. Luettu 26.11.2015.