

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TIETOLIIKENNETEKNIikka

Matti Tuomaala

**ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TIETOLIIKENNERATKAISUT
PALVELUNTARJOAJAN NÄKÖKULMASTA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Vaasassa 18.9.2013.

Työn valvoja

Professori Timo Mantere

Työn ohjaajat

Jari Nikko ja Reino Virrankoski

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
1. JOHDANTO	12
1.1 Työn tausta	13
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaus	15
1.3 Tutkimusmenetelmät ja raportin rakenne	16
2. ANVIA OYJ	17
2.1 Yleisesittely	17
2.2 Taloudelliset tunnusluvut	17
2.3 Nykytila	19
3. PERINTEINEN SÄHKÖVERKKO	20
3.1 Perinteisen sähköverkon rakenne	20
3.2 Nykyinen sähköverkko Suomessa	22
4. ÄLYKKÄÄT SÄHKÖVERKOT	25
4.1 Visio ja tutkimusstrategia	27
4.2 Älykkään sähköverkon sovelluksia	29
4.2.1 Edistynyt mittausinfrastruktuuri	30
4.2.2 Edistynyt jakeluautomaatio ja mikroverkot	31
4.2.3 Sähköasema-automaatio ja valvomojärjestelmät	33
4.2.4 Hajautettu energiantuotanto	34
4.3 Älykkään sähköverkon toteutus	35
4.3.1 Olemassa oleva älykäs sähköverkko	36
4.3.2 Edistynyt älykäs sähköverkko	38
4.3.3 Edistyneen älykkään sähköverkon tulevaisuus	38
5. MAHDOLLISET TIETOLIIKENNETEKNIIKAT	40
5.1 SG:n langalliset tietoliikennetekniikat	41
5.1.1 Optiset runkoyhteydet	42

5.1.2	Optiset liityntäteknikat	43
5.1.3	Datasähkö	45
5.1.4	Digitaaliset tilaajayhteydet	46
5.2	SG:n langattomat tietoliikennetekniikat	47
5.2.1	Lähialueen langattomat mesh-verkot ja langaton liityntäpiste	48
5.2.2	Langattomat liityntä- ja laajaverkot	50
6.	ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TIETOLIIKENNE	54
6.1	Älykkään sähköverkon jakaminen käsitteellisiin tasoihin	54
6.2	Tietoliikenneyhteyksien laatuvaatimuksia	57
6.2.1	Korkea saatavuus	58
6.2.2	Viive ja tiedonsiirtonopeus	60
6.2.3	Synkronointi	62
6.2.4	Yhteensopiva ja IP-pohjainen tietoliikenne	62
6.2.5	Yleisiä vaatimusmäärittämiä	63
6.3	Tietoturva	65
6.4	Standardoitu ja yhteen toimiva	65
6.4.1	IEC 61850	66
6.4.2	IEC 61850-90-x	66
6.5	Älykkään sähköverkon sovellusten integrointi	67
6.6	Ulkoistaminen	70
6.7	Pohdintoja eri tietoliikennetekniikoiden soveltuvuudesta	71
7.	ANVIAN TIETOLIIKENNEVERKKO JA PALVELUT	75
7.1	Tietoliikenneverkko	75
7.1.1	Anvian aluedataverkko	75
7.1.2	Anvian liityntäyhteydet	77
7.1.3	Mastot ja WiMAX verkko	78
7.2	Anvian valvomopalvelut ja konesalit	79
7.2.1	Anvian valvomo	79
7.2.2	Anvian konesalit	80
7.3	Anvian palvelutasosopimus	81

8.	ESIMERKKITAPPAUS VAASAN SÄHKÖVERKOT SÄHKÖPÄÄASEMIEN TIETOLIIKENNE YHTEYDET	OY:N 82
8.1	VSV:n vaatimuksien tarkastelu Anvian verkon suhteen	83
8.1.1	Saatavuus ja palvelutaso	84
8.1.2	Viiveherkkyys	85
8.1.3	Sähkökatkot	85
8.1.4	Datamäärät ja skaalautuvuus	86
8.1.5	Synkronointi	87
8.1.6	Vastuutaho	87
8.1.7	Tietoturva	88
8.2	Torkkolan sähköpääaseman tietoliikenneyhteys	88
8.3	Valvomo ja konesali palveluntarjoajalta	90
8.3.1	Älykkään sähköverkon integrointi palvelinsalissa	91
8.3.2	Sähköverkon valvomopalveluiden ulkoistaminen	92
8.4	Huomioita Anvian verkon soveltuvuudesta ja kehitysideoita	93
8.4.1	Langaton liityntäverkko	93
8.4.2	Synkronointi	94
8.5	Triple Play- ja SG-palveluiden yhdistäminen	95
9.	TULOSTEN ARVIOINTI JA PÄÄTELMÄT	97
	LÄHTEET	98
	LIITTEET 1. Työn aikana tehdyt haastattelut ja tapaamiset	105

LYHENTEET

AES	Advanced Encryption Standard
ADA	Advanced distribution automation, edistynyt jakeluverkonautomaatio
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line, epäsymmetrinen tilaajalinja
AMI	Advanced Metering Infrastructure, edistynyt mittaus infrastruktuuri
AMR	Automatic Meter Reading, etäluettava sähkömittari
ASG	Advanced Smart Grid, edistynyt älykäs sähköverkko
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIS	Customer Information Systems, asiakastietojärjestelmä
DA	Distribution Automation
DC	Data Center, konesali
DCS	Distributed Control System, hajautettu ohjausjärjestelmä
DER	Distributed Energy Sources, hajautetut energianlähteet
DMS	Distribution Management System, tuotantolaitoksien ohjausjärjestelmä
DSM	Demand Side Management, kysyntäjoustop ja pientuotannon hallinta
DoE	Department of Energy
DR	Demand Response, kysyntäjousto
DSL	Digital Subscriber Line, digitaalinen tilaajayhteys
EMS	Energy Management System, energian hallintajärjestelmä
EPRI	Electric Power Research Institute
FAN	Field Area Network, toimialueverkko
FTTX	Fiber to the x, kuitu päätepisteeseen asti
GIS	Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä
GPRS	General Packet Radio Service, GSM-verkon pakettikytkentäinen tiedonsiirto
HSR	High-availability Seamless Redundancy, korkean saatavuuden huomaamaton kahdennus
IaaS	Infrastructure as a Service, Infrastruktuuri palveluna

ICT	Information and Communication Technology, tieto- ja viestintäteknologia
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device, älykäs elektroninen laite
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization, Independent Systems Operator
IT	Information Technology
LAN	Local Area Network, lähiverkko
LTE	Long Term Evolution of UMTS, neljäs mobiilisukupolvi
MDMS	Meter Data Management System
MG	Micro Grid, mikroverkko
Micro-CHP	Micro Combined Heat and Power, paikallinen lämmön- ja sähköntuotantolaitos
NIST	National Institute of Standards and Technology
OMS	Outage Management System, vikatilanteiden hallintajärjestelmä
PLC	Power Line Communication, kapeakaistainen sähköjohdon yhteystekniikka
PMP	Point-to-Multipoint, useampi laite voi olla yhteydessä yhteen tukiasemaan
PMU	Phasor Measurement Unit, vaiheenmittauslaite
PRP	Parallel Redundancy Protocol, rinnakkaisen kahdennus protokolla
PTP	Point-to-Point, kahden pisteen välinen tietoliikenneyhteys
QoS	Quality of Service, palvelun laatu määritelmiä
RF-Mesh	Wireless ad-hoc network with mesh topology, langaton meshverkko
RTU	Remote Terminal Unit, etäterminaali
SaaS	Software as a Service, Sovellus palveluna
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, etäohjaus ja -valvontajärjestelmä
SDH	Synchronous Digital Hierarchy, synkroninen hierarkia

SE	Switched Ethernet, kytkimillä yhdistetty Ethernet
SG	Smart Grid, älykkäät sähköverkot
SGOE	Smart Grid Optimization Engine, älykkään sähköverkon optimointimoottori
SLA	Service Level Agreement, palvelutasosopimus
SM	Smart Meters, älykäs mittari
SP	Synchrophasor, vaiheensynkronointilaite
UWB	Ultrawide-band, hajaspektritekniikka
WAN	Wide Area Network, laajaverkko
WASA	Wide Area Situational Awareness, laajan alueen tilannetietoisuus
VHDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line, Erittäin nopea tilaajalinja
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, langaton laajakaistatekniikka
WPAN	Wireless Personal Area Network, Langaton likiverkko
VPN	Virtual Private Network, virtuaalinen yksityisverkko
VPP	Virtual Power Plant, virtuaalivoimala
WSN	Wireless Sensor Network, langaton anturiverkko
VVC	Volt-VAR control, Verkon jännitesuojaus ja -ohjaus

KUVAT	sivu
Kuva 1. Siirto- ja jakeluverkon periaatteellinen topologia.	20
Kuva 2. Suurin osa jakeluverkosta jää automaation ja tietoverkon ulkopuolelle (Farhangi 2010:22).....	21
Kuva 3. Suomen sähkönsiirtoverkko (Fingrid 2012).	23
Kuva 4. Älykkään sähköverkon toiminta (EPRI 2009).....	26
Kuva 5. Älykkään sähköverkon kehitys (IEA 2011: 6).	27
Kuva 6. Sähköverkon evoluution ensimmäinen askel otetaan jakeluverkon puolella. Se mahdollistaa sovelluksia ja toiminnallisen tehokkuuden (Farhangi 2010: 20).....	28
Kuva 7. Älykkään sähköverkon tekninen pyramidi (Farhangi 2010: 21).....	29
Kuva 8. Mikroverkon osat: kommunikaatio- ja sähköverkkotasot (Fang et al. 2012: 8).....	32
Kuva 9. Älykkään mikroverkon topologia (Farhangi 2010: 24).....	33
Kuva 10. Älykkään sähköverkon versiot (Carvallo & Cooper 2011: 8).	35
Kuva 11. SG 1.0 sovellusten siiloutuminen (Carvallo & Cooper 2011: 33).....	37
Kuva 12. Esimerkki hybridiyhteyden SCADA-päätteen ja RTU:n välillä.....	40
Kuva 13. Tekniikan muutos kohti Carrier Ethernetiä (Asif 2010:169).....	42
Kuva 14. Optisen liityntäyhteyden eri menetelmät.....	44
Kuva 15. Langattomien tekniikoiden tiedonsiirtonopeus suhteessa kantamaan (Electronics Lab 2013).....	48
Kuva 16. Mesh-verkon topologia ja toimintaperiaate.	49

Kuva 17. Älykkään sähköverkon osa-alueet ja niihin vaikuttavat sovellusosa-alueet (IEA 2011: 17).....	54
Kuva 18. Älykkään sähköverkon käsitteellinen kuvaus (NIST 2010: 35).	55
Kuva 19. Jakeluverkkotason yhteyksien kuvaus (NIST 2012: 224).	56
Kuva 20. Asiakasverkkotason yhteyksien kuvaus (NIST 2012: 211).....	57
Kuva 21. Älykkään sähköverkon suorituskykyvaatimukset (Lima 2010: 17). ...	62
Kuva 22. SG 1.0 integrointi sovellustasolla (Carvallo & Cooper 2011: 35).....	68
Kuva 23. ASG:ssa integrointi verkkotasolla (Carvallo & Cooper 2011: 38).	69
Kuva 24. Alcatel Lucentin ehdottama älykkään sähköverkon sovellukset ja tietoliikennetekniikat (Alcatel Lucent 2012a: 1).	74
Kuva 25. Anvian aluedataverkon ja liityntäyhteyksien periaatekuva.....	76
Kuva 26. Anvian GPON-liityntäverkon periaatekuva.....	78
Kuva 27. Vaasan sähköverkot Oy:n sähkönjakeluvastuualue.	82
Kuva 28. Torkkolan sähköaseman yhdistäminen Anvian verkon kautta sähköverkon valvomoon.	89
Kuva 29. Torkkolan aseman varayhteys ja metroverkon uudelleen reititys vikatilanteessa. Anvian konesali ja valvomo on yhdistetty suoraan runkoverkkoon.....	90

TAULUKOT	sivu
Taulukko 1. Anvia Oyj:n keskeiset tunnusluvut (Anvia 2011: 21).....	18
Taulukko 2. Anvia ICT:n keskeiset tunnusluvut (Anvia 2011: 11).....	18
Taulukko 3. Perinteisen ja älykkään sähköverkon eroavaisuudet (Farhangi 2010: 20).....	25
Taulukko 4. Älykkäiden sähköverkkojen skenariot.....	39
Taulukko 5. Nines-tila: Saatavuus prosentin vastaavat katkosajat.....	59
Taulukko 6. IEEE-standardin 1646 määrittämät viivevaatimukset (Lavery et al. 2010: 2).....	61
Taulukko 7. ABB:n määrittelemät eri sovellusten viive ja saatavuus sekä soveltuvat tekniikat (ABB haastattelu).....	64
Taulukko 8. Alcatel Lucentin esittämät tiedonsiirto, viive, luotettavuus ja turvallisuusvaatimukset (Alcatel Lucent 2012: 2).....	64
Taulukko 9. Ulkoistamisen hyödyt ja haitat.....	71

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Matti Tuomaala	
Tutkielman nimi:	Älykkään sähköverkon tietoliikenne- ratkaisut palveluntarjoajan näkökulmasta	
Valvojan nimi:	Prof. Timo Mantere	
Ohjaajan nimi:	Jari Nikko (Anvia Oyj), Reino Virrankoski	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Koulutusohjelma:	Tietotekniikan koulutusohjelma	
Suunta:	Tietoliikennetekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2002	
Tutkielman valmistumisvuosi:	2013	Sivumäärä: 106

TIIVISTELMÄ:

Diplomityö selvittää älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksien tarvetta ja niiden vaatimuksia. Niiden perusteella esitellään sähköjakeluverkon automaatiolle soveltuvia tietoliikennetekniikoita.

Tietoliikenneverkot suunnitellaan täyttämään sovelluksen vaatimat tarpeet. Älykkään sähköverkoille näiden vaatimusten löytäminen oli haasteellista. Kaksi merkittävintä vaatimusta tietoliikenneverkolle on tiedonsiirtonopeus ja viive. Sähköjakeluverkon automaation tiedonsiirtonopeutta voidaan pitää pienenä, mutta se on suojaus toimintojen ja mittauksen osalta hyvin viivekriittistä.

Työn osana toteutettiin suunnitelma Vaasan sähköverkot Oy:n sähköasemien liittämistä Anvia Oy:n kuitupohjaiseen alueverkkoon käyttämällä passiivista optista liityntäyhteyttä. Sen avulla voidaan tarjota sähköasemien ja valvomon välille nopea, viiveetön ja luotettava yhteys, jota älykkään sähköverkon sähköasema-automaatio vaatii.

Tämän lisäksi työn lopussa pohditaan Anvian mahdollisuutta tarjota kattavat tietoliikenneyhteydet ja palvelut älykkään sähköverkon tarpeisiin. Kuituyhteys ei ole taloudellinen jakeluverkon pienemmille yksiköille, joten työ ehdottaa WiMAX-verkon käyttöä sähköjakeluverkon langattomaksi liityntäyhteydeksi.

AVAINSANAT: Älykkäät sähköverkot, sähköaseman liittäminen kuituun, sähköjakeluverkon automaatio, tietoliikennetekniikat, lähitulevaisuus

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Matti Tuomaala
Topic of the Thesis: Smart Grid telecommunication techniques from the service provider point of view
Supervisor: Prof. Timo Mantere
Instructor: Jari Nikko (Anvia Oyj), Reino Virrankoski
Degree: Master of Science in Technology
Degree Programme: Degree Programme in Information Technology
Major of Subject: Telecommunications Engineering
Year of Entering the University: 2002
Year of Completing the Thesis: 2013 **Pages:** 106

ABSTRACT:

This master thesis research smart grid telecommunication needs and requirements. By the result of that research thesis will introduce suitable telecommunication technologies and recommendations.

Telecommunication networks are designed to fill their requirements, but for a moment it seems to be difficult to find strict requirements for Smart grid telecommunication. Two most significant requirements for a telecommunication network are speed and delay. For distribution grid automation for a smart grid the requirements for now is low speed but small delay.

Four Finnish electricity grid companies, global grid automation company and global automation communication company was interviewed to get better idea of the smart grid situation in Finland at a moment. Plan to connect substations of Vaasan sähköverkot Oy to the fiber optic network of Anvia Oy is made as an experimental part of the work. The connection from substation to Metropolitan area network is decided to be done with passive optical connection for reliable, fast and inexpensive fixed solution.

Also the work research possibilities of Anvia Oyj to offer telecom services to smart grid solutions. For smaller devices of distribution automation Anvia need to have Wimax or LTE network to offer full scale solution.

KEY WORDS: Smart Grid, Substation to Fiber, Distribution Automation, Telecommunication Techniques, Near Future

1. JOHDANTO

Diplomityössä tarkastellaan älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksien tarpeita tällä hetkellä, lähitulevaisuudessa ja tulevaisuudessa. Löydettyjen yhteystarpeiden vaatimukset on pyritty määrittämään, minkä jälkeen mahdollisesti soveltuvia tietoliikennetekniikoita tarkastellaan. Älykkäät sähköverkot (Smart Grid, SG) on vakiintunein nimi suunnitteilla olevalle sähköverkon uudistukselle, jolla pyritään vastaamaan sähköverkon kohtaamiin haasteisiin. SG ei siis ole yksittäinen tekniikka vaan kokoelma monia verkon älykkyyttä lisääviä sovelluksia ja tekniikoita. SG ei ole asia vaan visio. Älykkyys sähköverkoissa tarkoittaa pääasiassa hajautetun tosiaikaisen automaation ja niiden välisen kommunikaation lisäämistä. Tämä luo uusia haasteita sähköverkon tietoliikenteelle.

Suurin osa nykyisten älykkään sähköverkolle visioiduista sovelluksista ja tekniikoista on vielä kehitteillä, siksi työssä tarkastellaan myös eri tahojen älykkäälle sähköverkolle tekemiä tutkimusstrategioita ja agendoja. Pääpiirteissään nämä haasteet ovat jatkuvasti kasvava energiantarve, yhä sähköriippuvaisempi yhteiskunnan infrastruktuuri sekä hiilineutraalin energiantuotannon vaatima uusiutuvien energiamuotojen hajautettu tuotanto, tuotannon mukainen kulutusjousto ja energian varastointi. (DoE 2009; ETP 2006.)

Edellä mainittu sähköverkon kehitys vaatii hyvin kattavaa lähes tosiaikaista kaksisuuntaista tietoliikenneinfrastruktuuria, jonka avulla sähköverkon ohjausta ja tarkkailua tullaan parantamaan sekä kuluttajakäyttäytymistä ohjaamaan energiatehokkaaksi. On siis mielekäästä kysyä, miten tietoliikenneinfrastruktuuri, datanvarastointi ja tieto- ja sähköverkon valvonta tullaan

toteuttamaan ja kenen toimesta. (Mohagheghi, Stoupis & Wang 2009; Farhangi 2010.)

Älykkään sähköverkon tarpeellisuutta valaistaan tarkastelemalla ensin, minkälainen nykyinen sähköverkko on ja mitkä ovat sen ongelmat. Tämän jälkeen esittelemme lyhyesti näihin ongelmiin suunniteltuja ratkaisuja.

Selvitystyön pohjalta pohditaan, voiko ulkopuolinen operaattori tarjota älykkään sähköverkon tarvitsemat tietoliikenneyhteydet vai onko sähköverkkoyhtiöiden rakennettava oma tietoliikenneverkko sähkönjakeluverkon automaatiolle, hajautetun energiantuotannon ohjaukselle ja edistyneen mittaustekniikan infrastruktuurille.

1.1 Työn tausta

Työn tilasi tietoverkko- ja palveluoperaattori Anvia Oyj, jossa oli halu kartoittaa älykkäiden sähköverkkojen tietoliikenneyhteyksien tarpeita ja vaatimuksia. Tarkoituksen on selvittää, voiko Anvian kaltainen tietoverkko- ja palveluoperaattori tarjota sopivia ja kilpailukykyisiä älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksiä sekä mahdollisesti valvomo- ja konosalipalveluita. Yhtiön erityispiirteenä on, että sillä ei nykyisellään ole omaa langatonta verkkoa, vaikka Anvia vuokraa tietoverkkoalueellansa radiomastoja ja kuituverkkoinfrastruktuuriaan mobiilioperaattoreille. Yhtenä Anvian tietoverkkopuolen tulevaisuuden päävisiona on "kuitu joka kotiin".

Ilmastonmuutoksen luoma uhka on pakottanut valtiot tekemään sitoumuksia hiilipäästöjen alentamiseksi. Tärkeänä osana tässä on energiateollisuus, jonka kaavaillaan olevan täysin hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Suoraviivaisimpana keinona hiilipäästöjen alentamiseen on energian

kulutuksen vähentäminen. Energiatehokkuutta ja verkon häviöitä voidaan vähentää sähköverkon älykkyydellä ja optimoinnilla. Lisäksi käyttöön on laajamittaisesti tulossa hajautettu uusiutuvien energialähteiden käyttö. Koska sähköverkon laitteiden uusiminen on hidasta ja kallista, energiatehokkuutta ja uusiutuvan energian käyttöönottoa parannetaan nopeimmin tieto- ja viestintäteknologian (information and communication technology, ICT) uusilla sovelluksilla. Sähköverkon laitteet on hitaammin uusittavia. Nyt on niidenkin kannalta otollinen aika, koska viime vuosisadan puolivälin jälkeen valmistetut laitteet ovat elinkaarensa päässä. Toisaalta nykyisen tietoverkon ei tarvitse suunnitella kestävän seuraavaa sähköverkonlaitteiden sykliä, koska niiden elinkaari on huomattavasti lyhyempi. (Energiateollisuus 2012: 5-8; ETP 2012: 7-8 & 13-21.)

Nykytekniikan luomat mahdollisuudet kattavammasta automaatiosta mahdollistavat aivan uudenlaisen sähköverkon. Vyöryvät ylikuormitus sähkökatkokset pystytään ehkäisemään ja myrsky ja muiden tuhojen vauriot rajaamaan täsmällisemmin pois verkosta ja korjaamaan nopeammin. Myös sähköverkon laitteiden kunnon seuranta helpottuu erilaisten sensorien ja mahdollisten sensoriverkkojen avulla. Kaksisuuntainen rengastopologialla toteutettu jakeluverkko mahdollistaa hajautettujen tuotantolaitosten lisäämisen verkkoon sekä reaaliaikaisen verkon parantuvuuden ilman sähkökatkosta.

Älykkäät sähköverkot on tällä hetkellä kuuma tutkimusaihe. Tietoliikennetekniikan puolella tutkimuksien aika on otollinen, sillä suurin osa älykkään sähköverkon tulevaisuuden ratkaisuista on vielä tekemättä, mutta tulossa lähiaikoina sähköverkkoyhtiöiden ratkaistavaksi.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaus

Työn tavoitteena on perehtyä älykkään sähköverkon nykytilanteeseen ja tulevaisuuteen sekä sen avulla hahmottaa, mitä erilaisia tietoliikenneyhteyksien tarpeita siinä on ja miten ne ovat yhteydessä toisiinsa. Eri kommunikaatio- ja palvelutarpeiden vaatimukset selvitetään nykyisten visioiden perusteella ja niiden tietoliikenneyhteyksille asettamia vaatimuksia pohditaan.

Yhtenä diplomityön pääkysymyksenä on, voidaanko jo olemassa olevia ja rakenteilla olevia julkisia tietoverkkoja käyttää osana sähköverkkoyhtiöiden älykkään sähköverkon tiedonsiirtoa. Tämän takia työssä selvitetään, täyttävätkö ne muun muassa sähköverkkoyhtiöiden ja muiden älykkäiden sähköverkkojen toimintaosapuolien vaatimukset turvallisuudessa, luotettavuudessa ja viiveessä.

Diplomityön lopussa tarkastellaan Anvian nykyistä tietoliikenneverkkoa ja sen valmiutta tarjota alueella toimiville sähköverkkoyhtiöille älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksiä, valvomo- ja konosalipalveluita. Osana tarkastelua esitellään Vaasan sähköverkot Oy:n kanssa toteutettu esimerkkitapaus sähköasemien liittämisestä Anvian kuituverkkoon.

Älykkään sähköverkon ala muuttuu ja kehittyy nopeasti. Sen vuoksi työssä on keskitytty pääasiassa tarkastelemaan mahdollisia lähitulevaisuutta (0-5v.). Käytännössä tämä tarkoittaa Kuva 7 esitetyn kolmen alimman kerroksen tarkastelua. SG:n pidempi aikaista kehitystä on pääasiassa tarkasteltu Carvallo & Cooperin (2011) esittämän Austin Energyn hahmotteleman kehittyneen älykkään sähköverkon ja kehittyneen jakeluautomaation perusteella.

Nopean kehityksen takia myös laaja, monen sovelluksen kannalta kehittyntä ICT-infrastruktuuria vaativa kotiautomaatio on jätetty tarkastelun ulkopuolella, mahdolliseksi tulevaksi tutkimukseksi. Myös useille pienemmille jakeluverkosta huolehtivalle sähköverkkoyhtiölle harvinaisempi voimalaitos ja siirtoverkon automaatio on rajattu työn ulkopuolelle.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja raportin rakenne

Työn aikana tiedonkeruun tueksi haastateltiin neljää suomalaista sähköverkkoyhtiötä. Tämän lisäksi haastateltiin kansainvälisesti toimivaa sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä ABB Oy:tä sekä kansainvälisesti kriittisten tietoverkko toteutusten suunnitteluun ja Suomessa laite maahantuontiin erikoistunut yritystä NDC Networks Oy:tä. Haastattelut on pidetty vapaamuotoisina ja niitä ei nauhoitettu vaan ovat purettu pelkästään haastattelijan muistiinpanojen pohjalta.

Työn alun luvut 3-5 muodostuvat kirjallisuuskatsauksesta, jonka avulla selvitetään älykkäiden sähköverkkojen tilannetta, sovelluksia ja niiden tarvitsemia yhteyksiä sekä esitellään näihin yhteyksiin mahdollisesti soveltuvia tietoliikennetekniikoita.

Luvuissa 6 esitellään älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksille löytyneitä vaatimuksia ja tarkastellaan eri tietoliikennetekniikoiden soveltuvuutta. Lisäksi luvussa esitellään lyhyesti yhteensopivuutta ja sovellusten integroimista verkkotasolla.

Lopuksi luvussa 7 esitellään Anvian tietoverkko-, valvomo- ja konosalipalvelut. Näiden soveltuvuutta ja kehittymismahdollisuuksia tarkastellaan luvussa 8 Vaasan sähköverkot Oy:n kanssa tehdyn esimerkkitapauksen yhteydessä.

2. ANVIA OYJ

Diplomityön tilaaja on Anvia Oyj (myöhemmin Anvia). Se on kasvava tieto-, viestintä- ja turvateknologian palveluita ja tuotteita tarjoava konserni, joka tarjoaa nykyaikaiset ja korkealaatuiset ratkaisut kuluttajien ja yritysten viestintään, tietohallintoon ja turvallisuuteen. Anvia panostaa merkittävästi uusiin tietoverkkopalveluihin, -laitteisiin ja valokuituyhteyksiin.

2.1 Yleisesittely

Monialaisena, viestintään erikoistuneena konsernina Anvia tarjoaa palveluita kuluttajien, yritysten ja julkisyhteisöjen yhteydenpitoon, tietotekniikkaan ja turvallisuuteen sekä liikkuvan kuvan välittämiseen. Nämä muodostavat Anvian 3 päätoiminta-aluetta Anvia ICT, Anvia Secure ja Anvia TV.

Tieto- ja viestintäteknologian palveluita tarjoava Anvia ICT on konsernin suurin toimialue, jossa työskentelee yli 400 henkilöä. Anvia ICT tuottaa IT- ja tietoliikennepalveluita kuluttajille, yrityksille ja julkisyhteisöille, sekä muille operaattoreille. Sen alle sijoittuu mm. yhtiön tietoverkko toiminta, jonka yksi päästrategia on tietoverkkotoimintansa alueella ”kuitu joka kotiin (Fiber to the x, FTTX)”. Entuudestaan Anvialla on alueellaan kupariyhteys lähes kaikkiin kiinteistöihin.

2.2 Taloudelliset tunnusluvut

Anvia Oyj muodostuu entisestä Vaasan läänin puhelimesta ja sen tytäryhtiöistä. Anvian henkilöstö on yli 700 työntekijää ja konsernin liikevaihto vuonna 2011

oli 116,5 M€. Taulukko 1 ja Taulukko 2 esitetään konsernin keskeiset tunnusluvut vuosilta 2010–2011.

Taulukko 1. Anvia Oyj:n keskeiset tunnusluvut (Anvia 2011: 21).

Keskeiset tunnusluvut	2010	2011
Liikevaihto, k€	108 564	116 563
Liikevaihdon muutos, %	5,1	7,4
Liikevoitto, k€	10 036	9 202
Liikevoitto/liikevaihto, %	9,2	7,9
Tilikauden tulos, k€	8 888	7 000
Omavaraisuusaste, %	82,0	81,6
Tulos / osake, €	103	81
Henkilöstön lukum. keskimäärin	696	735

Anvia ICT liiketoiminnan aikaisemmin erillinen osa Anvian Telecom liikevaihto vuonna 2011 oli 67 M€ ja henkilöstö 444 työntekijää.

Taulukko 2. Anvia ICT:n keskeiset tunnusluvut (Anvia 2011: 11).

Anvia Telecom	2010	2011	Liittymien määrä	2010	2011
Liikevaihto, k€	66 221	67 354	Puhelinliittymät, kpl	67 495	65 708
Käyttökate, k€	21 628	20 445	Kaapeli TV -palvelut, kpl	67 103	67 814
Henkilöstö	459	444	Laajakaistaliittymät, kpl	61 802	62 086

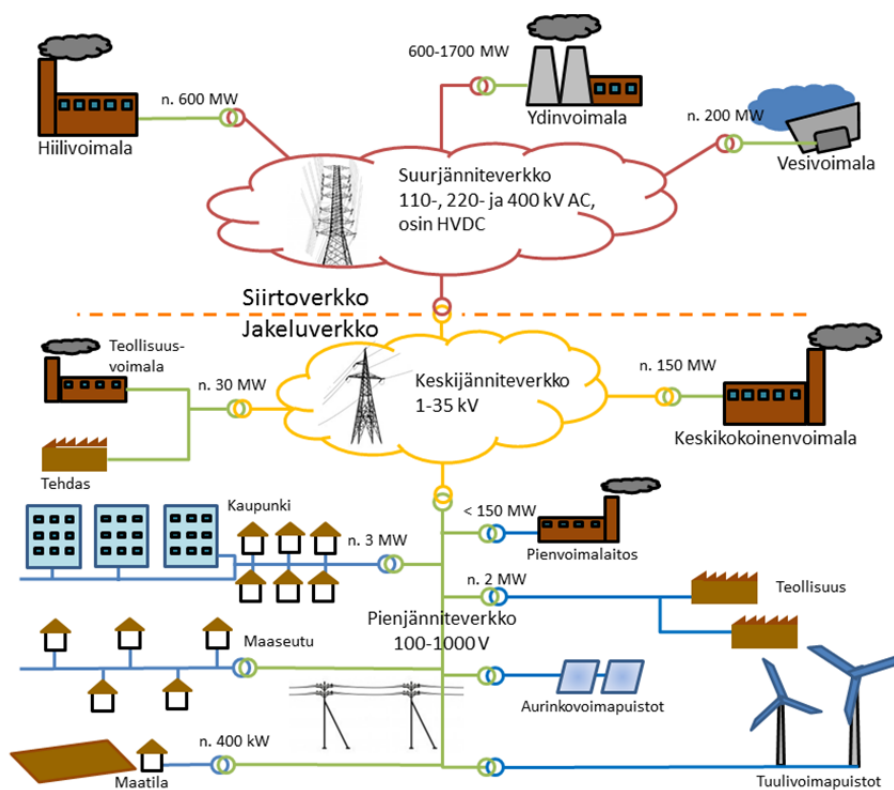
2.3 Nykytila

Anvia on aloittanut perinteisenä lankapuhelinoperaattorina. Internetin ja nopeampien yhteystarpeiden ilmennyttyä, se on alkanut tarjoamaan laajakaistaliittymiä olemassa olevan kuparikaapeli-infrastruktuurinsa kautta.

Anvia ICT tarjoaa langallisia laajakaistaliittymiä yksityisille ja yritysasiakkaille. Näiden lisäksi palveluina myydään muun muassa Triple Play- ja pilvi-, IPTV-, Software as a Service (SaaS), Infrastructure as a Service (IaaS), konesali-, valvomo- sekä turvapalveluita. Laajakaistaliittymäasiakkaita Anvialla on yli 62 000. Uudet asiakkaat pyritään liittämään verkkoon kuitutekniikalla ja samaan aikaan nykyisiä kupariliittymiä uusitaan kuituliittymiksi.

3. PERINTEINEN SÄHKÖVERKKO

Ymmärtääksemme älykkään sähköverkon tarpeita tarkastelemme ensin perinteistä sähköverkkoa, jota voidaan sanoa niin sanotusti 1900-luvun verkoksi. Seuraavissa kappaleissa esitetään perinteisen sähköverkon rakennetta ja sen haasteita.

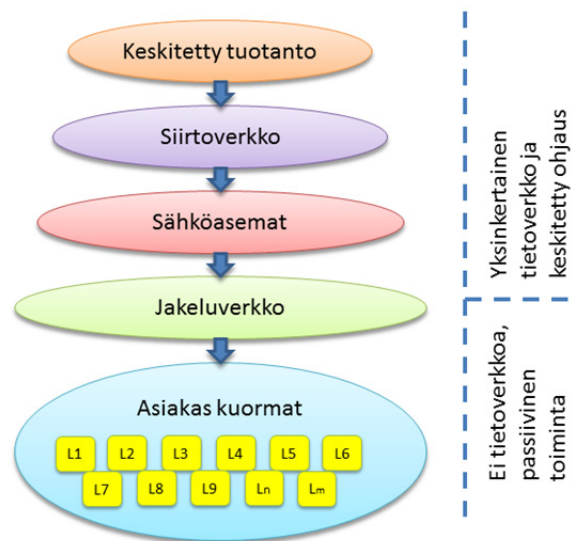


Kuva 1. Siirto- ja jakeluverkon periaatteellinen topologia.

3.1 Perinteisen sähköverkon rakenne

Perinteisen sähköverkon topologia on kuin puu, jonka juurilta eli suurilta tuotantolaitoksilta siirretään energiaa kuluttajille. Kuva 1 esitellään sen periaatteellinen rakenne. Punaisella ja keltaisella merkitty korkea- ja

keskijänniteverkko muodostaa hyvin suojatun pitkän matkan redundantin siirtoverkon, mistä sähkö siirretään sädemäisiä jakeluverkkoja pitkin asiakkaille. Suuremmat kuluttajat, kuten teollisuus voi olla suoraan kiinni korkea- tai keskijänniteverkossa. Siirtoverkossa käytetään korkeaa jännitettä, tehohäviöiden minimoimiseksi.



Kuva 2. Suurin osa jakeluverkosta jää automaation ja tietoverkon ulkopuolelle (Farhangi 2010:22).

Perinteisessä sähköverkossa sen tilanvalvonta ja automaation etäohjaus hoidetaan sähköverkon valvomosta. Tietoliikenneyhteys verkon laitteille on yleensä toteutettu varmistamattomin kapeakaistayhteydellä tai langattomalla linkillä. Ohjaukseen käytetään tehtävään tarkoitettuja sovelluksia kuten etäohjaus ja -valvonta järjestelmiä (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA), vikatilanteiden hallintajärjestelmiä (Outage Management System, OMS) ja tuotantolaitoksien ohjausjärjestelmiä (Distribution Management System, DMS). Lisäksi automaatiota voidaan hallita sähköasemilla olevien etäterminaalien (Remote Terminal Unit, RTU) kautta. Verkon automaatio on

paikallista ja se keskittyy sähköverkon kriittisimpiin osuuksiin: keskitettyyn tuotantoon, siirtoverkkoon ja sähköasemiin. **Kuva 2** osoittaa, kuinka suurin osa jakeluverkosta jää kokonaan automaation ulkopuolelle. Näin jakeluverkon vikatilanteiden havaitseminen ja vianpaikantaminen on usein hidasta ja vaivanloista kenttätöitä. (Farhangi 2010:22–25.)

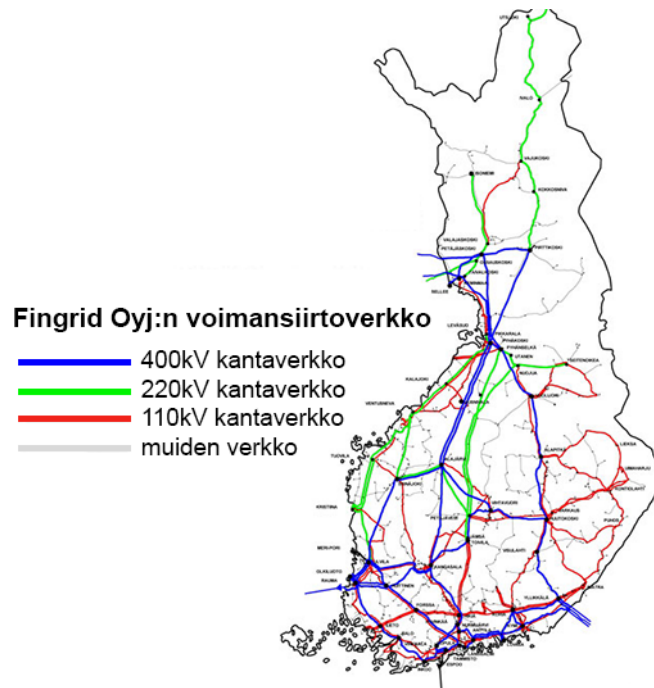
Etävalvonnan ja -ohjauksen tietoverkko on valvomokeskeinen tähtitopologia, jossa eri säteiden päässä olevat automaatiot eivät kommunikoi keskenään. SCADA-järjestelmästä saadut tiedot tallennetaan sähköverkkoyhtiön intranettiin tai täysin erotettuun tietokantaan myöhempää käyttöä kuten vikatilanteen syyn selvittämistä varten.

3.2 Nykyinen sähköverkko Suomessa

Suomen sähkönsiirtoverkko muodostuu Fingridin omistamasta runkoverkosta, josta on liittymiä eri maihin (kuva 3). Tämän lisäksi siirtoverkkoon kuuluu reilun 20 eri toimijan luvanvaraisesti ylläpitämä alueverkko. (Energiateollisuus 2012.)

Se on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Venäjältä ja Virosta on Suomeen tasasähköyhteydet, joilla nämä eri periaattein toimivat järjestelmät voidaan yhdistää. (Fingrid 2012.)

Paikallisen sähköjakelun asiakkaille hoitaa Energiamarkkinaviraston myöntämällä luvalla sähköverkkoyhtiö, joka toimii luonnollisen monopolin hengessä. Verkon haltijan tulee ylläpitää ja kehittää verkkoa sekä vastata sen kunnosta ja sähkön laadusta. (Energiamarkkinavirasto 2012.)



Kuva 3. Suomen sähkösiirtoverkko (Fingrid 2012).

Suomessa on hyvin erikokoisia sähköverkkoyhtiöitä, joilla on käytössä hyvin erilaisia tietoliikenneyhteyksiä. Nykyisiä ratkaisuja on lähes yhtä monta kuin on tekijöitä ja eri tarpeita. Tämä on ollut melko toimiva ratkaisu aikaisemmin, kun yhteyksien tarve on ollut vähäinen. Vanhimmat tämänkin päivän toteutukset ovat omaa sarjaliikennekaapelia pitkin hoidettavat sähköasemien etäohjaukset. Tietoliikenneverkon vaatimukset eivät myöskään ole olleet kovin kriittisiä, koska paikallinen automaatio toimii ilman etäohjaustakin eli vain ohjaus- ja korjaustilanteessa asentajan on mentävä tekemään ohjaukset paikanpäälle, jos yhteys ei toimi.

Vuoden 2013 alusta Suomessa viranomaismääräysten mukaan lähes kaikilla asiakkailla tulee olla etäluettava sähkömittari (Automatic Meter Reading, AMR), jonka avulla asiakkaan sähkönkulutustiedot mitataan tunneittain ja tiedot kerätään sähköverkkoyhtiön tietokantoihin keskitetysti käyttäen matalan

siirtonopeuden tekniikoita kuten matkapuhelinverkon pakettikytkentäinen tiedonsiirto (General Packet Radio Service, GPRS).

Sähköverkon perusidea ei ole merkittävästi muuttunut sen alkuajoilta. Nykypäivänä se on kohdannut uusia haasteita, joihin se ei enää pysty vastaamaan ilman merkittäviä muutoksia. Suurimmat ongelmat muodostaa yhteiskunnan energiariippuvuus, kasvava energian tarve, sekä hiilineutraalin energian tuotannon vaatimus. Uusiutuvan energian tuominen sähköverkkoon aiheuttaa lisää tehtäviä sähköverkon automaatiolle, jonka pitää pystyä tasapainottamaan verkon kuormitusta mukailemaan heikosti säädettävien uusiutuvien energianlähteiden tuotantoa. Lisäksi sähköautojen integroiminen osaksi älykästä sähköverkkoa tuo sähköverkkoyhtiöille uusia haasteita. (Meisel, Leber, Ornetzedery, Stachuraz, Schiffleitnerz, Kienesberger, Wenninger & Kupzog 2011: 2-4.)

4. ÄLYKKÄÄT SÄHKÖVERKOT

Älykäs sähköverkko (Smart Grid, SG) yhdistää sähköverkon, tietoliikenneverkon sekä sovellukset ja laitteet sähköverkon tarkkailuun, ohjaamiseen, ylläpitoon. SG:n on tarkoitus kokonaisvaltaisesti hallita sähkön tuotanto, jakelu, varastointi ja kulutus. Tulevaisuuden älykäs sähköverkko on interaktiivinen, hajautettu, itse korjaava ja se kommunikoi kaikkien verkon laitteiden kesken. (Carvallo & Cooper 2011: 1.) Varsinkin jakeluautomaation kohtaamat haasteet - tarpeen kasvu, luotettavuuden vaatimus (power quality) ja hajautetut energianlähteet - vaativat edistynyttä jakeluautomaatiota (McGranaghan & Goodman 2005: 1).

Taulukko 3. Perinteisen ja älykkään sähköverkon eroavaisuudet (Farhangi 2010: 20).

Olemassa oleva sähköverkko	Älykäs sähköverkko, SG
Sähkömekaaninen	Digitaalinen
Yksisuuntainen tietoliikenne	Kaksisuuntainen tietoliikenne
Keskitetty energiantuotanto	Hajautettu energiantuotanto
Hierarkkinen	Verkottunut
Muutamia antureita	Antureita kaikkialla
Sokea	Itsetarkkaileva
Manuaalinen palautuminen	Itseään korjaava
Vikoja ja sähkökatkoja	Mukautuva ja saarekkeinen
Manuaalinen tarkistus ja testaus	Etätarkistus ja -testaus
Rajattu ohjaus	Läpätunkeva ohjaus
Harvoja asiakaan valintoja	Lukuisia asiakaan valintoja

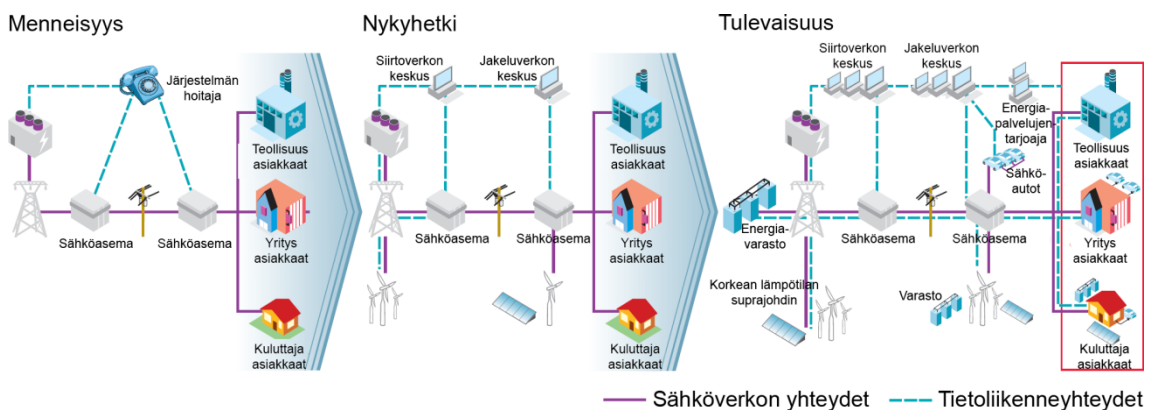
Taulukko 3 esittelee periaatetasolla perinteisen ja älykkään sähköverkon eroavaisuuksia. Vaikka osin itse sähköverkko vaatii suuriakin muutoksia, mainitsemisen arvoista lienee, että älykäs sähköverkko ei tarkoita nykyisen sähköverkon purkamista ja älykkään sähköverkon rakentamista tilalle, vaan nykyisen sähköverkon muokkaamista vastaamaan tulevaisuuden sille asettamat vaatimukset.

Sähköverkon rakenne tulee siis muuttumaan ja uuden rakenteen mukainen älykkään sähköverkon toteutus tarkoittaa näin ollen nykyisen sähköverkon hajautetun automaation ja mittausautomaatiikan lisäämistä sekä niiden tehostamista nykyaikaisella nopeilla ja luotettavilla tietoliikenneyhteyksillä ja sovelluksilla. **Kuva 4** esittelee SG:n periaatteellista toimintaa.



Kuva 4. Älykkään sähköverkon toiminta (EPRI 2009).

Kuva 5 on International Energy Agency (IEA) esittämä näkemys sähköverkon kehityksestä nykypäivään ja kehityksen tulevaisuuden suunta. Siinä tulee esille, kuinka nykypäivänä tietokoneohjaus keskittyy siirtoverkkoon ja sähköasemiin. Tulevaisuudessa paljon laajempi siirtoverkon, pientuottajien ja asiakastahojen mittausta, optimointi ja ohjaus tulevat mahdolliseksi kattavamman tietoliikenneverkon avulla.



Kuva 5. Älykään sähköverkon kehitys (IEA 2011: 6).

Älykäs sähköverkko ei siis ole mikään yksittäinen tekniikka, vaan yhdistelmä erilaisia energia-, sähkö-, tieto ja tietoliikennetekniikan sovelluksia. Niiden avulla pyritään ratkaisemaan edessä oleva hajautetun uusiutuvan energian valjastaminen käyttöön sekä turvaamaan laadukas energian jakelu. Esittelemme erilaisia SG:n sovelluksia luvussa 4.2.

4.1 Visio ja tutkimusstrategia

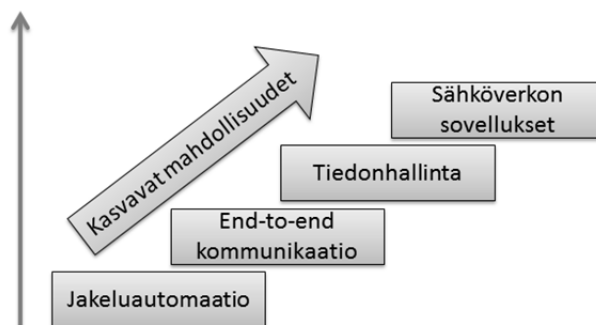
Hiilineutraali energiantuotanto ja uusiutuvat energianlähteiden laajamittainen käyttöönotto on edellytys tulevaisuuden energian tuotannolle. Kansainvälisessä sopimuksessa on sovittu maapallon energiantuotannon olevan lähes

hiilineutraalia vuoteen 2050 mennessä. Lähimmät päästötavoitteet on asetettu jo vuodelle 2020, jolloin päästövähennyksiä tulisi olla 20 %. (Energiateollisuus ry 2010.)

Jotta tiukassa aikataulussa pysytään useat viranomaistahot kuten USA Department of Energy (DoE 2009), EU:n European Technology Platform (ETP 2006 & 2012) ja Suomen teknologia teollisuus ry (Energiateollisuus ry 2010) on tehnyt omat tutkimusagendansa ja -strategiansa, kuinka älykkäiden sähköverkkojen tavoitteet saavutetaan.

ETP:n (2006: 4) SG-visio määrittelee älykkäiden sähköverkkojen toiminnallisuuden. Sen mukaan verkon tulee olla:

- Joustava,
- saatavilla ja saavutettava,
- luotettava sekä
- taloudellinen, energiatehokas ja kilpailukykyinen.



Kuva 6. Sähköverkon evoluution ensimmäinen askel otetaan jakeluverkon puolella. Se mahdollistaa sovelluksia ja toiminnallisen tehokkuuden (Farhangi 2010: 20).

ETP (2012) esittelee SG:n haasteet, joista työn kannalta merkittäviä ovat:

- Pienen mittakaavan sähköntuotantojärjestelmien harmoninen toiminta järjestelmässä,
- tiedonvälitysinfrastruktuurin luominen, joka mahdollistaa potentiaalisesti miljoonien osapuolten toimimisen samoilla markkinoilla,
- mahdollistaa kaikkien kuluttajien aktiivisen osallistumisen järjestelmän toimintaan,
- parhaiden menettelytapojen löytäminen epäsäännöllisen tuotannon integroimiseksi järjestelmään sekä
- tuotannon, kysynnän ja erityisesti verkon kasvava älykkyys.

4.2 Älykkään sähköverkon sovelluksia



Kuva 7. Älykkään sähköverkon tekninen pyramidi (Farhangi 2010: 21).

Kuva 7 esittelee kanadalaisen energiayhtiö BC-Hydron hierarkkisen näkemyksen älykkään sähköverkon sovelluksista. Alimpana kuvassa on sähköverkkoyhtiön resurssit, joiden tehokkaan käytön SG mahdollistaa. Seuraavassa kerroksessa on jakeluverkon lisäksi IT- ja tietoliikenneinfrastruktuuri. Näiden kolmen perustavan osa-alueen päälle rakentuvat älykkään sähköverkon tekniikat ja sovellukset.

Älykkään sähköverkon perustavat tekniikat ovat edistynyt mittausinfrastruktuuri, jakeluautomaatio, sähköasema-automaatio ja hajautetun tuotannon hallintajärjestelmä. Näiden avulla on mahdollista muun muassa kulutusjousto, hajautettu energian tuotanto ja varastointi, ja mikroverkot/optimointi. Esittelemme tässä lyhyesti näiden tekniikoiden periaatetta, jotta saamme käsityksen näiden sovellusten perustana olevan tietoliikenteen ja tietotekniikan tarpeista. (ETP 2006: 6-7; ABB 2010b: 4)

4.2.1 Edistynyt mittausinfrastruktuuri

Suuri osa älykkään sähköverkon toiminnoista perustuu verkon eri osista saataviin mittaustuloksiin mm. kulutuksesta, tuotannosta, tilasta. Näiden mittaamiseen ei riitä yksistään **etäluettavat mittarit** (Automatic Meter Reading, AMR), vaan tarvitaan paljon kattavampaa ja **edistyneempää mittausinfrastruktuuria** (Advanced Metering Infrastructure, AMI). Mittausten käsittelyyn tarvitaan jonkinlainen tietojärjestelmä (**Meter Data Management System, MDMS**). (Cleveland 2008: 1-2.)

Interaktiivisempi systeemi voi toimia esimerkiksi **mikroverkon** (Micro Grid, MG) mahdollistajana yhdistäen mikroverkon tuotanto-, kulutus- ja varastointikapasiteetin verkon optimoinnin kannalta yhdeksi kokonaisuudeksi, jota kutsutaan **virtuaalivoimalaksi** (Virtual Power Plant, VPP).

Kehittynyt mittausinfrastruktuuri mahdollistaa myös pientuottajien sähkön myynnin takaisin verkkoon, jos oma tuotanto ylittää tarpeen. **Kulutusrjousto**, tarkoittaa sähköverkon kulutuksen sovittamista tuotantoon ja sekin perustuu kehittyneelle mittaustekniikalle. Toimiakseen älykkään sähköverkon tavoitteiden mukaisesti on todennäköistä, että AMR-asiakasmittarit muuttuvat monipuolisemmiksi **älykkäiksi mittareiksi** (Smart Meters, SM), joiden tietoliikenne keskenään ja tietovarastojen (Data Center, DC) välillä tulee lisääntymään merkittävästi.

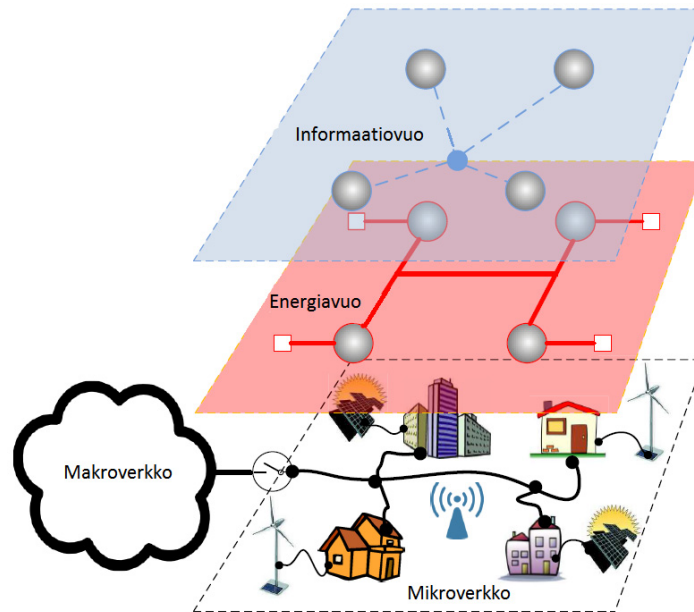
Suomessa lain ja säädösten mukaan asiakkaiden kulutus on mitattava tuntipohjaisesti ja etäluettavissa vuoden 2013 loppuun mennessä. Samanlainen mittari on ollut pakollinen verkkoon liitetyille sähköpientuottajille jo vuodesta 2010. Mikäli sama taho sekä tuottaa että kuluttaa sähköä, voidaan ne mitata samalla mittarilla (Valtioneuvosto 2009).

4.2.2 Edistynyt jakeluautomaatio ja mikroverkot

Sähkön saatavuutta parannetaan kehittyneellä jakeluautomaatiolla (Advanced Distribution Automation, ADA). Älykkäiden kytkimien ja erotinasemien (Smart Switch, SW) avulla verkon vialliset osat saadaan eristettyä tehokkaasti. ADA:n avulla jakeluverkosta tulee itsestään parantuva ja saavutetaan täysin ohjattava ja automatisoitu jakeluverkko. **Jakeluverkon hallintajärjestelmä** (Distribution Management System, DMS), johon integroidut hajautetut resurssit auttaa optimoimaan sähköverkon toimintaa ja suorituskykyä. (McGranaghan & Goodman 2005:1; Carvallo & Cooper 2011:18.)

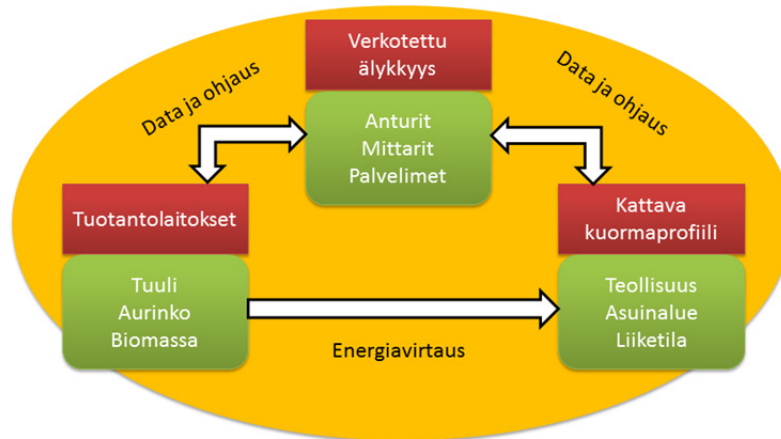
Mikroverkko (Micro grid, MG) on yksi ajatus, miten jakeluverkon älykkyys, optimointi ja riippumattomuus sähköverkon vikatilasta voidaan toteuttaa. MG toimii omana saarekkeena, joka on erotettavissa makroverkosta. Sillä on omaa

tuotantoa, energiavarastoja ja ohjausjärjestelmä. (Fang, Misra, Xue, & Yang 2012: 8.)



Kuva 8. Mikroverkon osat: kommunikaatio- ja sähköverkkotasot (Fang et al. 2012: 8).

Kuva 8 esitetään mikroverkon sähkönsiirto- ja tiedonsiirtotasot erillään. Kuvan esimerkissä tiedonsiirto tapahtuu langattomasti keskitetylle lähiverkon tukiasemalle, joka kokoaa alueen sähköverkon mittaustiedot ja palauttaa niiden perusteella ohjaustietoja. Koska suuren alueen optimoinnista voi tulla hyvin monen muuttujan raskas toiminto, mikroverkon optimointi voi olla osa koko verkon optimointia, jolloin ylempi verkon optimointi ohjaa mikroverkon toimintoa vain keskitetysti. Mikroverkko tekee sisäiset päätöksensä itse. (Farhangi 2010: 23–24.)



Kuva 9. Älykkään mikroverkon topologia (Farhangi 2010: 24).

Itsestään parantuva jakeluverkko (Self Healing Grid). Yhtenä merkittävänä parannuksena älykkäissä sähköverkoissa on sähkön toimitusvarmuuden parantuminen. Verkkoa korjaava automaatio ja sen tarvitsema tietoliikenne on lisääntymässä myös jakeluverkossa. Yhtenä älykkään verkon jakeluvarmuutta lisäävät tekijät on älykkäät kytkimet joiden avulla viallisia tai ylikuormittuneita osia voidaan erottaa ja uudelleen ohjata, niin ettei ns. vyöryviä sähkökatkoja pääse tapahtumaan. Tämän lisäksi nykyisen jakeluverkon toimivuutta voidaan huomattavasti parantaa rengasmaisella verkolla. (Farhangi 2010: 23–24.)

4.2.3 Sähköasema-automaatio ja valvomojärjestelmät

Verkon jännitesuojaus ja -ohjaus (Volt-VAR control, VVC) on menetelmä, jolla verkon jännitetason ja reaktiivisen voiman pyritään hallitsemaan koko verkon alueella. Reaktiivisen kuorman ongelma on yli- ja alijännitteet, jotka aiheuttavat ongelmia jänniteherkille laitteille. (Carvallo & Cooper 2011: 193; ABB 2010b: 5). Lisäksi verkossa käytetään vaiheenmittauslaitteita (Phasor Measurement Unit, PMU) ja vaiheensynkronointilaitteita (Synchrophasor, SP), joiden avulla

voidaan ohjata suojalaitteita ja hajautettua tuotantoa. PMU:t ja SP:t tarvitsevat tarkan synkronoinnin. (Pegoraro, Tang, Liu, Ponci, Monti & Muscas 2012:1.)

SCADA on valvomojärjestelmä, jonka avulla sähköasemien (automaation) toimintaa voidaan etävalvoa ja -ohjata paikallisen terminaaliyksikön (remote terminal unit, RTU) kautta. Valvonta- ja ohjausjärjestelmän on laajennuttava, sillä sähköverkon älykkyys jakautuu. Sen kriittisyys myös lisääntyy, sillä toisistaan riippuvainen hajautettu automaatio tarvitsee kattavaa tietoverkkoa ja järjestelmää yhteistoiminnallisuuteen. SCADA-järjestelmän lisäksi valvomossa on käytössä muun muassa OMS, asiakastietojärjestelmät (Customer Information Systems, CIS), paikkatietojärjestelmä (Geographic Information System, GIS). Jakeluverkon automaatio on tulossa saman järjestelmän piiriin. (Carvalho & Cooper 2011:18; ABB 2010b: 5.)

4.2.4 Hajautettu energiantuotanto

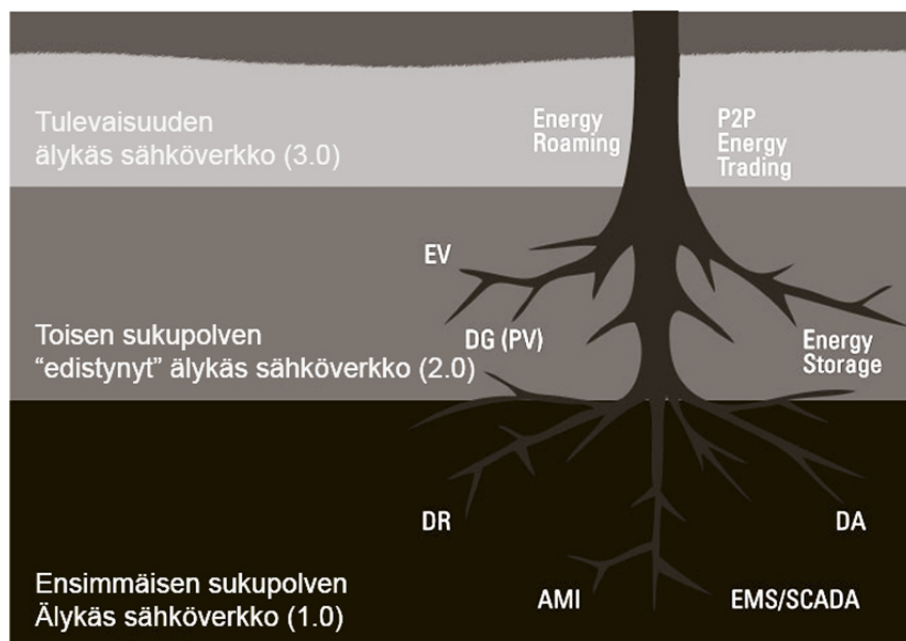
Uusiutuvaa energiaa hyödyntävät hajautetut tuotantolaitokset (Distributed Energy Sources, DER) kuten pienet yhdistetyt lämmön ja sähköntuotantolaitokset (Micro Combined Heat and Power, Micro-CHP), tuulivoimalat, aurinkopaneelit ym. (Carvalho & Cooper 2011:67–69). Pientuotannon lisäksi verkkoon tulee myös kookkaampia tuotantolaitoksia kuten tuulipuistot, isommat biopolttolaitokset, vesivoimalat, aaltovoimalat. Tämän lisäksi niihin lasketaan erikokoiset hajautetut sähkövarastot kuten vauhtipyörät, akut, vesivarastot, vetysäiliöt, ilmasäiliöt, lämpösäiliöt. Hajautetulla ohjausjärjestelmällä (Distributed Control System, DCS) ohjataan suurempien tuotantolaitosten toimintaa (Carvalho & Cooper 2011:28).

Näiden optimaalinen ohjaus on hahmoteltu suoritettavan VPP:llä, joka kerää useita tuotanto-, kysyntäjousto- ja varastointimahdollisuuksia suuremmaksi

optimointiyksiköksi, jolloin niiden vaikutus verkkoon on merkittävä. VPP hyödyttää asiakkaitaan myymällä tuotettua sähköä, kun verkossa on kysyntää ja varastoimalla verkossa olevaa ylitarjontaa. Toimintalaajuudesta riippuen VPP:llä on oltava laaja pääsy käyttäjätietoihin sekä DER ja ADA mittaustuloksiin. (Ekanayake, Liyanage, Wu, Yokoyama & Jenkins 2012: 9.)

4.3 Älykkään sähköverkon toteutus

Älykkäistä sähköverkoista keskusteltaessa voidaan sanoa, että älykkäät sähköverkot ovat jo osittain nykyhetkeä. Tämän takia työssä jaotellaan älykkään sähköverkon kehitysvaiheet Carvallo & Cooperin (2011) esittämään SG:n versioihin, joista ensimmäinen on tämän hetken tilanne. Kuva 10 esitellään versio jaottelu, jossa SG 1.0 ja 2.0 esitetään juurina, mistä SG 3.0 lähtee kasvamaan.



Kuva 10. Älykkään sähköverkon versiot (Carvallo & Cooper 2011: 8).

4.3.1 Olemassa oleva älykäs sähköverkko

Austin Energy (AE) oli yksi ensimmäisistä joka määritteli ja otti käyttöön jotakin, mitä voidaan kutsua älykkääksi sähköverkoksi. Carvallo & Cooper (2011: 83) kutsuvat tätä kirjassaan älykkään sähköverkon versioksi 1.0 (SG 1.0). Se sisälsi uusien tekniikoiden ja sovellusten käyttöönoton: kuitu joka sähköasemalle, langaton AMI, langaton kysynnänjousto älykkäillä termostaateilla, rajatun langattoman jakeluautomaation ja jakeluverkon optimoinnin. (Carvallo & Cooper 2011:84.)

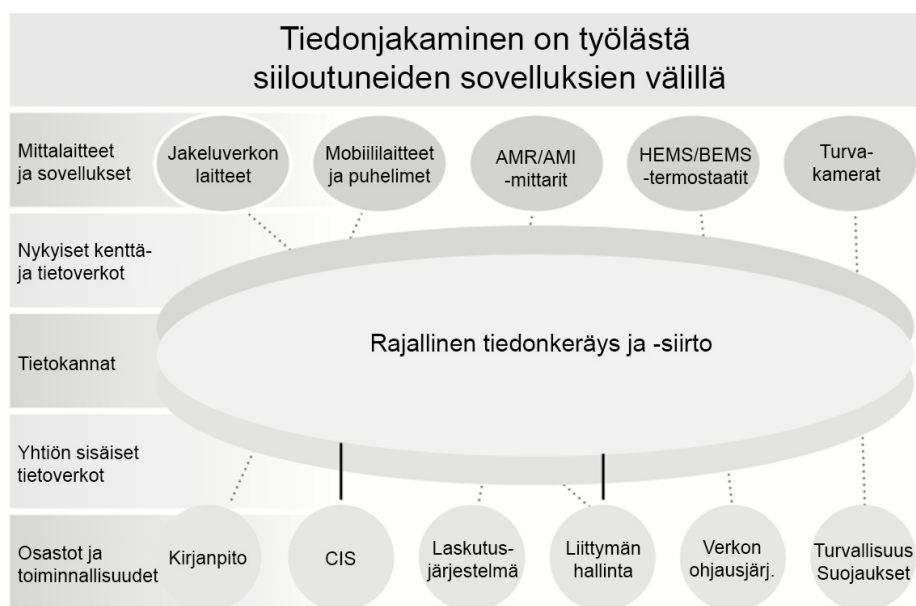
SG 1.0:n rakennuspalikat ovat tietoverkko, joka yhdistelmä kuituverkkoa ja langatonta verkkoa, älykkäät elektroniset laitteet (Intelligent Electronic Device, IED) kuten mittarit, sensorit, tietoverkkolaitteet, tietokoneet, palvelimet sekä ohjelmistot, sovellukset, tietokannat, integrointi- ja hallintatyökalut.

Carvallo & Cooper (2011) mainitsee kaksi merkittävintä AE:n SG 1.0 projektissa opittua läksyä. Ensinnäkin sähköyhtiön tai ulkoistetun IT-osaston tulee olla vankalla pohjalla. Toisena havaintona oli, että aloittamalla SG-projekti hankkimalla tarvittavat verkko-ominaisuudet, sen sijaan että lisäisi sovellusten ominaisuuksia antaa mittaamattoman edun.

Suurena haasteena SG 1.0 projektissa oli sähköverkkoyhtiön tietoverkon avaaminen. Aikaisemmin täysin suljettuun intranetin tietoihin oli päästävä käsiksi myös ulkoa päin. Uutta tietoverkkoarkkitehtuuria suunnitellessa todettiin, että sen tulee olla monitasoista (multilayer), monipääsyistä (multiaccess), profiiliohjattua. (Carvallo & Cooper 2011:92-93.)

Toisena haasteena on Kuva 11 esitetty eri sovellusten ns. siiloutuminen, eli eri ohjelmat eivät ole kykeneviä vaihtamaan tietoja keskenään tarpeeksi

tehokkaasti. Tämän korjaamiseksi sovelluksiin on SG 1.0:ssa tehty sovellustason integrointia, joka on hyvin vaivalloista ja kallista. Älykkään sähköverkon versio 2.0 tulee esittämään tähän ratkaisun. (Carvallo & Cooper 2011:92–93.)



Kuva 11. SG 1.0 sovellusten siiloutuminen (Carvallo & Cooper 2011: 33).

Myös Suomessa on käytössä erilaisia älykkään sähköverkon sovelluksia. Fortum on ensimmäinen energiayhtiö Suomessa, joka tarjoaa asiakkaille tuntihinnoiteltua sähköä. Kyse ei ole vielä mistään tosiaikaisesta kulutusjoustosta, sillä palvelussa seuraavan päivän sähköhinnat lähetetään älykkäälle mittarille etukäteen. Näin mittari voi ohjata esimerkiksi lämminvesivaraajan toimimaan halvimpien tuntien aikana. (Fortum 2012). Lisäksi ABB:n (2009:10–14), esittelee jutussa Suomen SG 1.0:n, jonka osia on muun muassa automaattinen vianpaikannus ja -erotus. Uusien älykkäiden mittareiden avulla keskijänniteverkolle ominainen suojaus on tuotu jakeluverkkoon.

4.3.2 Edistynyt älykäs sähköverkko

Koska AE:n kehittämä SG 1.0 ei riittänyt tyydyttämään sähköverkkoyhtiön todellista päästä päähän (End-to-end) SG-toteutusta, Carvallan & Cooperin (2011: 120) esittää Austin Energyn älykkään sähköverkon toisen vaiheen SG 2.0. Projekti on nimeltään "Pecan Street Project". Se jakaa SG 1.0:n tavoitteet, mutta uudelleen asettelee vision. Siinä SG suunnitellaan alhaalta ylös, aloittaen ADA:n ja AMI:n alapuolelta rakentamalla verkko, joka yhdistää dynaamisesti hajautetun energialähteet sisältäen myös alueen vesijohtoverkoston ja kuljetusinfrastruktuurin. Pääajatuksena, että integroimalla saavutetaan merkittäviä etuja.

SG 2.0 kutsutaan edistyneeksi älykkääksi sähköverkoksi (Advanced Smart Grid, ASG), jonka tärkein ominaisuus on yhdistää kaikki sähköverkkoyhtiön sovellukset jo verkkotasolla. Sovellukset integroivaa tasoa kutsutaan projektissa älykkään sähköverkon optimointimoottoriksi (Smart Grid Optimization Engine, SGOE), joka esitellään tarkemmin luvussa 6.5. Verkkotasolla toteutettu integrointi antaa SG 2.0:lle tehokkaan tietoturvan, luotettavuuden, skaalautuvuuden ja nopean vasteajan. SGOE:n avulla sovellukset pystyvät tyydyttämään 100 ms vasteaika vaatimukset. Lisäksi sovellusten integrointi helpottuu ja kustannukset vähenevät.

4.3.3 Edistyneen älykkään sähköverkon tulevaisuus

Carvallo & Cooper (2011) esittelee kirjassaan myös pidemmän aikavälin silmäyksen älykkään sähköverkon tulevaisuuteen, mutta tämä on diplomityöni rajauksen ulkopuolella. Voidaan todeta, että olettamuksena on täysin integroitu älykäs sähköverkko, jossa tietoliikenneyhteyksien ja tiedonhallinnan merkitys vain kasvaa. Kattava läpätunkeva IP-verkko ja tietotekniikka mahdollistavat

verkosta kerättävän runsaasti tietoa, joka avulla voidaan toteuttaa aivan uudenlaista energian myyntiä. Taulukko 4 on esitelty älykkään sähköverkon tulevaisuuden skenaariot AE:n mukaan.

Taulukko 4. Älykkäiden sähköverkkojen skenaariot.

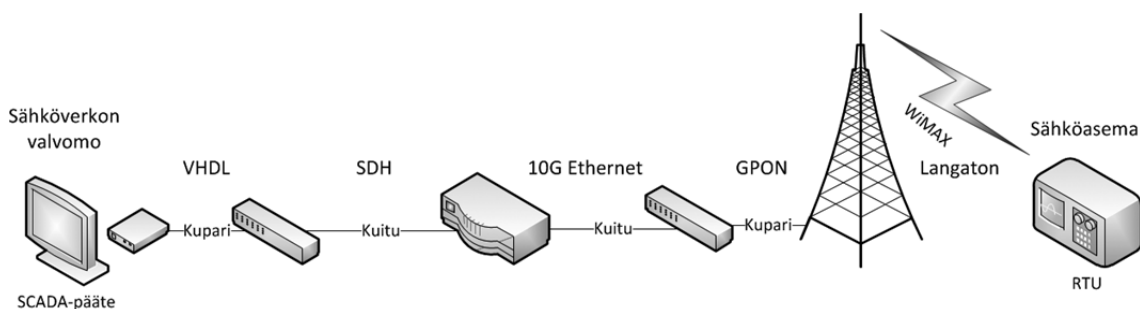
	Nykyhetki	Lähitulevaisuus	Tulevaisuus
Kulutuksen mittaaminen ja sähkön hinnoittelu	Tuntipohjainen sähköhinnoittelu vuorokausi etukäteen	Tuntipohjainen hinnoittelu	Reaaliaikainen hinnoittelu
Tietovirrat	Yksisuuntainen tietoliikenne	Kaksisuuntainen tietoliikenne	Kaiken kattava tietoverkko
DA	Etäohjaus	Älykkäät kytkimet	Jakeluverkko rengastopologiassa
Siirrettävät datamäärät	Vähän dataa	Megan yhteydet	Gigan yhteydet
Viiveherkkyys	Ei viiveherkkä	Osa suojalaitteista viiveherkkiä	Suuriosa suojalaitteista ja osa sovelluksista hyvin viiveherkkiä
Laitteiden määrä	Muutamia etäohjattavia automaation osia	Älykkäitä kytkimiä ja -termostaatteja.	Sähköverkon internet (internet of things)

5. MAHDOLLISET TIETOLIIKENNETEKNIIKAT

Sovellusten monimutkaistuessa automaation älykkyyden hajauttamisen tarve korostuu. Automaation ja älykkyyden hajauttaminen edellyttää tarkoitukseen sopivaa tietoliikenneverkkoa. Edellisessä luvussa esiteltujen älykkään sähköverkon sovellusten takia sähköverkon automaatio hajaantuu ja sen tietoliikenneyhteyksien ja kapasiteetin tarve lisääntyy merkittävästi.

Tässä luvussa esitellään kirjallisuuskatsauksessa esille tulleita älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksien toteutustekniikoita. Työn rajauksen mukaan perehdymme tarkemmin vain liityntäverkon tekniikoihin, mutta esittelemme myös runkotekniikan toteutusvaihtoehtoja, koska ne ovat välttämättömiä eri liityntäpisteiden yhdistämisessä ja näin vaikuttavat kokonaisuuteen.

Tämän lisäksi mainitaan paikallisen verkon muodostamiseen käytettäviä tekniikoita likiverkko (Personal Area Network, PAN) ja langaton mesh-verkko (RF-MESH tai Wireless Sensor Network WSN), mutta ne ovat ajankohtaisia vasta asiakasmittareiden kautta toimivissa taloautomaation sovelluksien yhteyksissä ja sähköasemien sisäisissä verkoissa.



Kuva 12. Esimerkki hybridiyhteys SCADA-päätteen ja RTU:n välillä.

Yksittäisiä tietoliikennetekniikoita tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että kahden pisteen välinen tietoliikenne on harvoin toteutettu pelkästään yhtä tekniikkaa käyttäen. Yksinkertaistettuna esimerkkinä Kuva 12 esitetään erilaisten verkkojen yli toimiva valvomon ja sähköaseman yhteys, jonka toteuttamiseen on käytetty useita eri kiinteitä ja langattomia laaja- ja liityntäverkon tekniikoita.

On lukuisia tapoja lajitella tietoliikennetekniikoita. Koska tiedetään, että kiinteä verkko päihittää langattoman luotettavuudessa ja sen käyttö on suotavaa silloin kun se on taloudellisesti sekä liikuteltavuuden ja lisättävyyden kannalta mahdollista, tekniikat jaetaan ensisijaisesti langattomuudenperusteella. Tämän lisäksi tekniikat lajitellaan käyttötarkoituksena ja kantamansa mukaan.

Langattomuuden etuna on siis se, että tiedonsiirto ei tarvitse erillistä siirtotien rakentamista. Hyötynä on helppo laitteiden lisääminen verkkoon sekä hankalien paikkojen ja liikkuvien laitteiden johdottomuus. Haasteina on muun muassa: antennien sijoittaminen, suunnittelu, häiriöisyys, siirtotien päällekkäisyys ja kaistan rajallisuus.

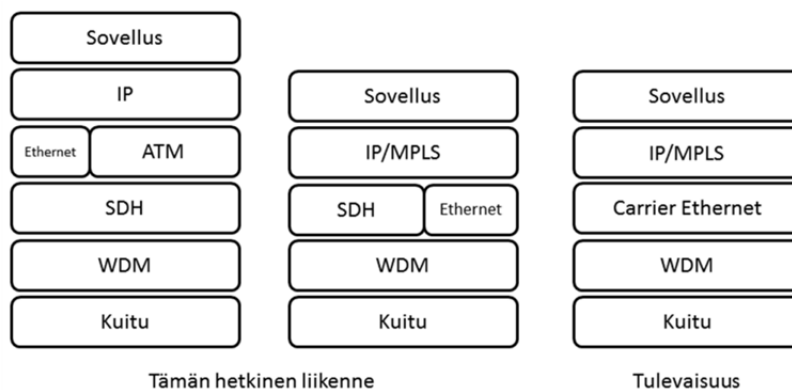
5.1 SG:n langalliset tietoliikennetekniikat

Langallisessa tietoliikenteessä valokuidun etuna verrattuna kupariin on signaalin nopeampi eteneminen, pienempi heikkeneminen, joten sillä saavutetaan huomattavasti pidempi kantama. Lisäksi suurena etuna on se, että signaali on immuuni sähkömagneettisille häiriöille, joten valokuitu toimii moitteetta hyvin häiriöisessäkin ympäristössä. Fyysisesti valokuitukaapeli on herkempi kuin kupari, mutta oikein asennettuna sen arvioitu elinikä on noin 50 vuotta.

Valokuitu on kuparikaapelia haasteellisempi liittää, mutta nykyisellä tekniikalla ja kuparin hinnan jatkuvasti kallistuessa, kuitu on pidemmällä matkalla kuparia edullisempi vaihtoehto. Valokuitu on siis paikallisia asennuksia lukuun ottamatta selvästi käyttökelpoisempi tulevaisuuden kaapelina, joten jätämme kupariyhteyksien tarkastelun vähemmälle. Älykkään sähköverkon kannalta kiinnostavin kuparitekniikka on sähköjohtoja siirtotienä käyttävä PLC, koska siirtotie on aina olemassa IED:lle.

5.1.1 Optiset runkoyhteydet

Siirtääkseen tietoa pidempiä matkoja tarvitaan yleisesti suuren kapasiteetin nopeita yhteyksiä. Nykyisen sähköverkon automaation tiedonsiirtonopeuden tarve ei ole vielä suuri, mutta runkoverkon tulee olla luotettava, joten se ei voi olla yksittäisellä kuidulla toteutettu. Nykyiset kuitulaajaverkot on yleisesti toteutettu joko kytketyllä Ethernetillä (Switched Ethernet, SE) tai synkronisella hierarkialla (Synchronous Digital Hierarchy, SDH). Runkoverkkototeutukset ovat lähitulevaisuudessa siirtymässä hyvin nopeaan ja luotettavaan, puhtaasti Ethernet-pohjaiseen toteutukseen, ns. Carrier Grade Ethernetiin. Tekniikoiden rakentumista esitellään Kuva 13. (Asif 2010:169.)



Kuva 13. Tekniikan muutos kohti Carrier Ethernetiä (Asif 2010:169).

SDH on ITU-T:n standardoima protokolla, joka on nykyään käytössä lähes kaikissa pitkän matkan runkoyhteyksissä. Synkroninen menetelmä kuljettaa useita puheluita ja dataa saman kuidun yli ilman synkronointiongelmia. SDH on protokollaneutraali, joten se sopii hyvin kuljettamaan ATM-soluja, TCP/IP-paketteja ja Ethernet-kehysiksiä. SDH:ssa koko verkko on synkronoitu saman atomikellon mukaan, jolloin puskuroinnin tarve huomattavasti vähenee. Sen taajuusjakorakenteella datapaketeille voidaan luoda omia kehysnopeuksia, minkä avulla saavutetaan matala latenssi. (Tanenbaum & Wetherall 2011: 176–177.)

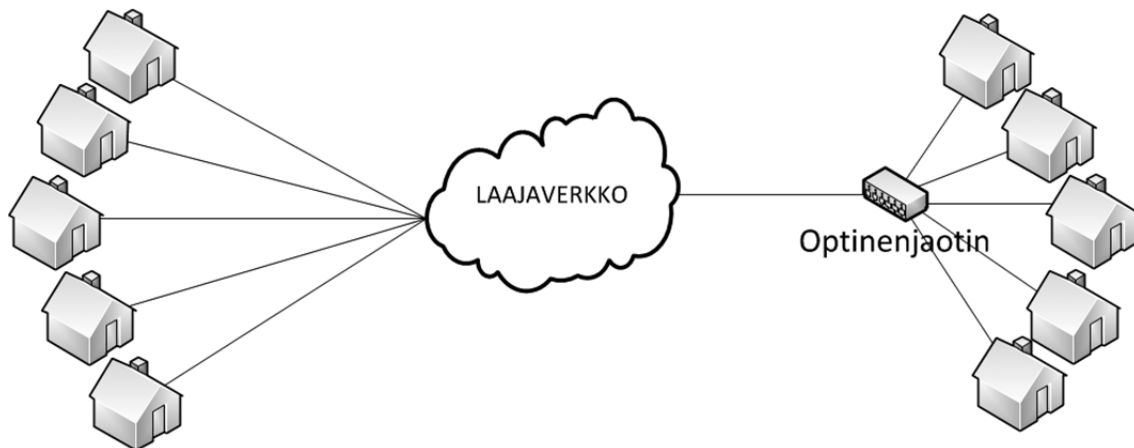
Ethernet (IEEE 802.3) on OSI-mallin Medium Access Control -tason (MAC-layer) standardi. Kahdenlaista Ethernet tekniikkaa esiintyy: Classinen Ethernet, joka ratkaisee kuinka yhdistää useamman laitteen samaan fyysiseen siirtotiehen (lähiverkkoon) ja Switched Ethernet, missä useamman laitteen yhdistäminen tapahtuu välissä olevilla kytkimillä. Ne ovat siis hyvin erilaisia tekniikoita, vaikka niihin viitataan samalla nimellä. (Tanenbaum & Wetherall 2011:298.)

Koska internetprotokolla (Internet Protocol, IP) sopii hyvin yhteydettömän Ethernet-kerroksen päälle, se on yleistymässä edullisena runkoverkon tekniikkana. Ethernet on kasvattanut suosiotaan ja kaatanut jopa ”nopeammat” kilpailuehdotukset sen yksinkertaisuuden ja yhteensopivuuden ansiosta. (Tanenbaum & Wetherall 2011: 316.)

5.1.2 Optiset liityntäteknikat

Asiakkaan liittäminen laajaverkkoon (Wide Area Network, WAN) optisella kaapelilla tapahtuu käytännössä kolmella eri tavalla: liityntä suoritetaan asiakkaalle omistetulla kuidulla, liityntäverkon kuitu jaetaan asiakkaan lähellä aktiivisella jakamolla tai liityntäkuidun jakamiseen käytetään passiivista

jaotinta. Koska yksittäisen kuidun tarjoaminen on kallista ja yleisesti ylittävät käyttäjän tarpeet, on kustannustehokkaampaa tuoda kuitu Kuva 14 mukaisesti liityntäpisteeltä lähemmäs asiakasta ennen sen jakamista. (Stallworth 2012.)



Kuva 14. Optisen liityntäyhteyden eri menetelmät.

Aktiivinen optinen liitântäteknikka (Active Ethernet, AE) jakaa kuituyhteyden aktiivisella reitittimellä, tämän takia jakamo tarvitsee virransyötön ja jonkinlaisen varavirta-akuston, jotta lyhyet sähkökatkot eivät aiheuta haittaa. Enimmäiskantama alueverkolta jakamolle on 70 km ja jakamolta asiakkaalle 20 km. (Stallworth 2012.)

Passiivinen optinen liitântäteknikka (Passive Optical Network, PON) toimii AE:n kaltaisesti, mutta siinä kuitu jaetaan passiivisella teho- tai taajuusjaottimella, jolloin kenttä laite on riippumaton sähkön syötöstä. Näin ollen GPON on yleisesti edullisempi ratkaisu kun AE.

Passiivista taajuusjaotintekniikka käyttävä WDM-PON jakaa kuidussa olevat taajuudet käyttäjille prismojen avulla. Näin saadaan aikaiseksi virtuaalisesti oma kuitu, jonka nopeus on hyvin korkea. Tekniikka on vielä standardoimaton

ja huomattavasti kalliimpi kuin samaa taajuutta aikajakoisesti (TDM) käyttävä TDM-PON -tekniikka. Siinä yhteys jaetaan optisilla tehojaottimilla. (Cale, Salihovic & Ivekovic 2007.)

Yleisesti käytössä oleva TDM-PON tekniikka on ITU-T:n standardoima G.984 eli **Gigabit-capable Passive Optical Networks** (GPON). Sillä voidaan tarjota 2,4 Gbps alasuuntainen ja 1,2 Gbps yläsuuntainen tiedonsiirtonopeus, joka jakautuu verkkoon liitetyn 2–64 käyttäjän kesken. Laajaverkosta asiakkaille menevät viestit jakautuu kaikille käyttäjille, joten ne on suojattu Advanced Encryption Standardilla (AES) käyttäen joko 128-, 192- tai 256-bitin avainta, jota turvallisuuden lisäämiseksi vaihdetaan jaksollisesti. (Cale et al. 2007: 680–681.)

GPON käyttää 12-bitin portti ID:tä, joka on yhteensopiva Ethernetin virtuaalisen lähiverkon (Virtual Local Area Network, VLAN) kanssa, joten sen liikenne voidaan projisoida SDH-laajaverkon yli. Lisäksi käytössä on Forward Error Correction -tekniikkaa (FEC), jonka avulla siirtovirheitä voidaan tunnistaa ja korjata käyttäen vähäistä lisäkuormaa. (Cale et al. 2007: 680&684.)

5.1.3 Datasähkö

Sähköjohtoja tiedonsiirtotienä käyttävää tekniikkaa sanotaan yleisesti datasähköksi (Powerline Communications, PLC). Koska sähköjohto on suojaamaton, se ei ole suotuisa tiedonsiirtotie ja se säteilee ympärilleen häiriöitä. Sähköyhtiöt ovat kuitenkin pitkään käyttäneet sitä kapeakaistaiseen tiedonsiirtoon. Varsinkin sähköverkon automaation kannalta sen hyöty on, että siirtotie on valmiiksi olemassa. Lisäksi sähköjohtoja on käytetty laajakaista liityntäyhteytenä (Broadband over Powerline, BPL). Sähköjohto toimii laajakaistan siirtotienä paljon huonommin kuin tiedonsiirtoon tarkoitettut kaapelit, mutta toimii vaihtoehtona alueilla, missä ei ole asennettuna muuta

kaapelia. PLC:n häiriönpoistoalgoritmien kehittymisen ansiosta datasähkön käyttö liityntäyhteytenä on tietoliikenneverkottomilla alueilla yleistynyt.

Sähköjohto on huono siirtotie kriittiselle datalle, koska siihen vaikuttaa vahvasti ulkoiset ja sähköverkon sisäiset häiriöt. Lisäksi niiden tiedonsiirtonopeus on yleensä matala ja niissä käytettävät tehot on tarkkaan rajattu, koska ne aiheuttavat häiriötä ympäristöönsä. Lisäksi kaikki sähköverkon muuntajat on kierrettävä erillisillä laitteilla. (Alcatel Lucent 2012: 3.)

European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) määrittämä standardi EN 50065 sallii EU:ssa käytettävän neljää eri taajuusaluetta: 3–95 kHz on varattu sähköverkkoyhtiöille, 95–125 kHz on vapaa, 125–140 kHz on varattu kodin sisäisille verkoille ja 140–148,5 kHz on varattu hälytys ja suojajärjestelmille. (Tonello, D'Alessandro, Versolatto & Tornelli 2011:149.)

Kapeakaistaisen tiedonsiirron lisäksi sähköverkon yli on kokeiltu lähettää dataa ultra-wideband (UWB) tekniikalla lupaavin tuloksin. Sen avulla häiriöiden sietoisuus paranee ja siirtonopeus kasvaa. Tekniikkaa ei ole kuitenkaan vielä standardoitu. (Tonello et al. 2011.)

5.1.4 Digitaaliset tilaajayhteydet

Dataliikenteen lisääntyessä puhelin- ja televisiokaapeleiden käyttämättömiä taajuuksia pitkin tarjottiin koteihin laajakaistayhteyksiä. Nykyisen sähköasema-automaation käytössä on DSL-yhteyksiä.

Digitaalinen tilaajayhteys (Digital Subscriber Line, DSL) käyttää puhelinkaapelin käyttämättömiä taajuuksia laajakaistayhteyden tarjoamiseen.

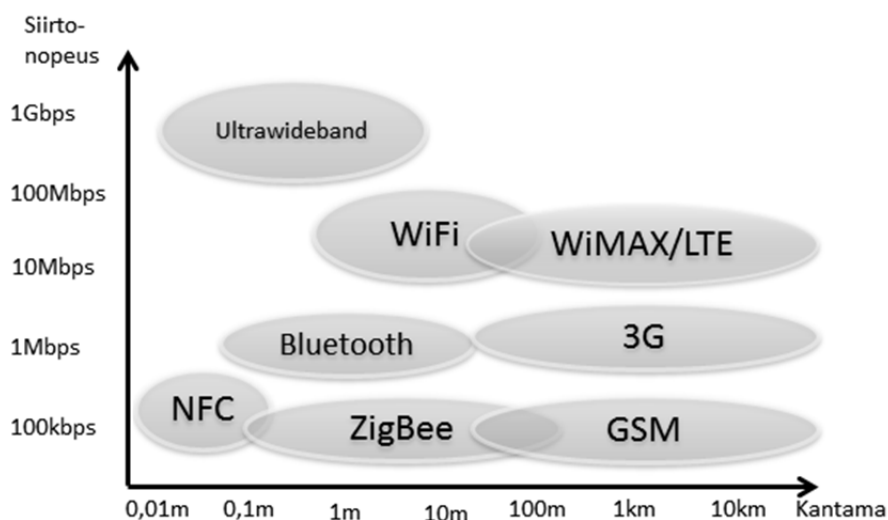
Suosituimmaksi kuluttuja liittymäverkon DSL yhteyden tyyppi on selvästi noussut epäsymmetrinen DLS (Asymmetric DSL, ADSL), jonka maksiminopeus uusimman version ADSL2+ alasuuntaan 24 Mbps ja yläsuuntaan 3,5 Mbps. Lisäksi tarjolla on muun muassa erittäin nopealla DSL (Very high speed DSL, VDSL) tekniikan uusimmalla versiolla VDSL2, päästään 100 Mbps symmetriseen nopeuteen yhdellä puhelinparilla lyhyillä n. 100 m etäisyyksillä.

5.2 SG:n langattomat tietoliikennetekniikat

Langattomien tietoliikennetyhteyksien lyömätön etu on siirtotien olemassaolo. Sen julkisuus ja häiriöherkkyys myös aiheuttaa niille suuria haasteita eivätkä tekniikat ainakaan nykyisellään pysty samaan luotettavuuteen kuin tietoliikennekaapelit (Tanenbaum & Wetherall 2011: 330–331). Langattomat yhteydet jakautuvat tarkoituksensa mukaan kolmeen kategoriaan:

- liityntäyhteyksiin, jotka tarjoavat langattomille laitteille liittymän laajaverkkoon yleensä tukiaseman (Point-to-Multipoint, PMP) kautta,
- runkoyhteyksiin, jotka tarjoavat kahden pisteen välisiä (Point-to-Point, PTP) yhteyksiä kahden etäisen verkon välille tai aliverkon langattoman liitännän sekä
- langattomiin mesh-verkkoihin, jotka toimivat langattomien toimilaitteiden lyhyen kantaman yhdistävänä verkkona.

Jos haluttuun paikkaan tai halutulle laitteelle on jo kiinteä yhteys, on langattoman yhteyden käyttäminen vaikeaa perustella. Koska uuden maanalaisen kaapeloinnin kaivaminen on kallista, langaton liityntäverkko on houkutteleva vaihtoehto varsinkin liikkuvuutta tarvitseville laitteille ja syrjäisille paikoille. Selvänä etuna on myös, että verkkoon on helppo lisätä uusia laitteita, koska kaapelointia ei tarvitse tehdä.

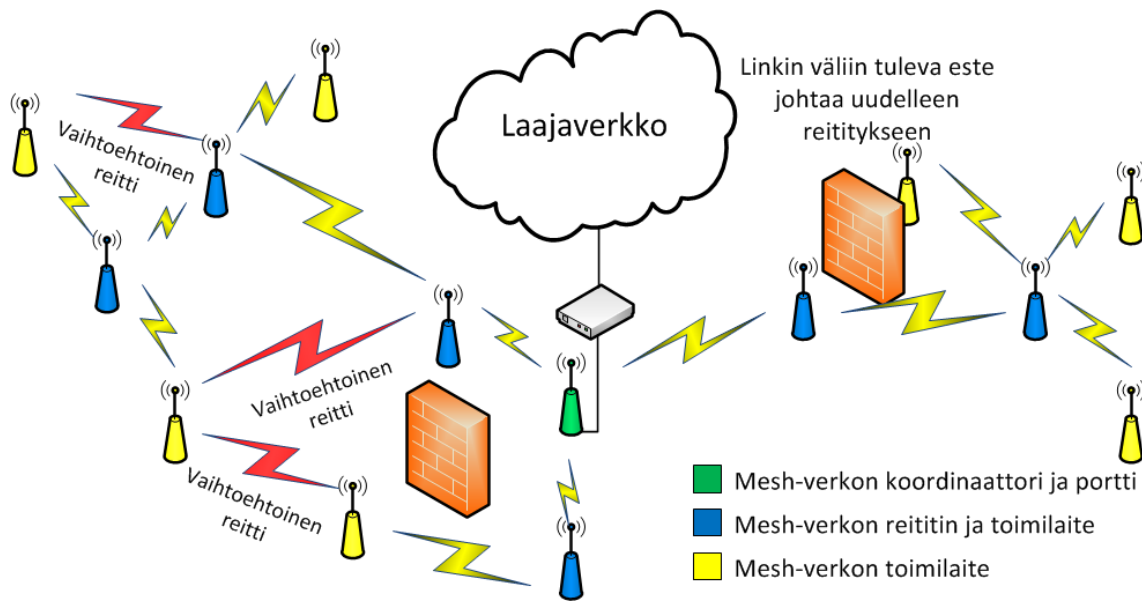


Kuva 15. Langattomien tekniikoiden tiedonsiirtonopeus suhteessa kantamaan (Electronics Lab 2013).

5.2.1 Lähialueen langattomat mesh-verkot ja langaton liityntäpiste

Langattomia likiverkkoja (Wireless Personal Area Network, WPAN) käytetään muodostamaan paikallisia laitteiden välisiä verkkoja. Sen etuna on verkon dynaaminen muodostuminen ja reititys, minkä ansiosta verkkoon on helppo liittää uusia laitteita. Niissä käytetty mesh-topologia antaa laitteille korkean saatavuuden sekä toisten toimilaitteiden yli reitittävä multihop-tekniikka mahdollistaa kahden yhteisen kantoalueen ulkopuolella olevan laitteen kommunikaation, mikäli välissä on toimilaitteita. Koska lähialueen langattomat mesh-verkot ovat suurimmalta osin työn rajauksen ulkopuolella, niiden toimintaa esitellään tässä hyvin lyhyesti.

Mesh-verkon etuna on sen verkon sinnikkyys. yksittäisen laitteen tai linkin katoaminen ei katkaise yhteyttä vaan dynaaminen reititys mahdollistaa moninkertaisen siirtotien. (Alcatel Lucent 2012: 8.)



Kuva 16. Mesh-verkon topologia ja toimintaperiaate.

6LoWPAN on RFC 4944 standardoima tekniikka jolla voidaan toteuttaa IPv6 reititys langattoman mesh-verkon yli. Kapselointi ja otsikon tiivistys menetelmä, joka mahdollistaa IPv6 pakettien lähettämisen ja vastaanottamisen IEEE 802.15.4 mukaisissa verkoissa. (Castellani, Ministeri, Rotoloni, Vangelista & Zorzi 2012: 1-2.)

Zigbee on matalan energiankulutuksen, siirtonopeuden ja lyhyen kantaman langaton tietoliikennetekniikka, joka perustuu IEEE 802.15.4 standardiin. Se muodostaa toimilaitteiden välille mesh-verkon, jossa voi olla yli 65 000 laitetta. Maksimi kantama on n. 100 metriä. ZigBee-laite kytkeytyy nopeasti verkkoon noin 20 millisekunnissa. Viestien suojaukseen käytetään AES-128 salausta. (Zhang, Sun & Cui 2010: 1-2.)

Ultra Wideband (UWB) on radioteknologia, jossa tieto lähetetään äärimmäisen lyhyinä ja pienitehoisina pulsseina lyhyellä kantamalla hyvin laajalla taajuuskaistalla. UWB:n hyötyjä on matala energiankulutus ja korkea

kaistanleveys. Sen käyttämä hajaspektritekniikka ei aiheuta muille häiriötä, joten sitä voi teoriassa käyttää varatuilla taajuuskanavilla (Ahmad & Rahman Pir 2011). UWB-tekniikkaa ollaan standardoimassa IEEE 802.15.3a standardissa.

Lähteessä Salehinejad, Talebi, Rashidinejad & Rashidinejad (2012) esitellään esimerkiksi merellä olevien tuulipuistojen paikallista verkkoa toteutettavaksi PPM-UWB tekniikalla. Se pystyy tarjoamaan 1km säteellä SCADA-ohjaukseen riittävän paikallisen verkon. Liityntäyhteytenä toimisi kuitu tai langaton linkki.

WiFi on IEEE 802.11 standardin langattoman lähiverkkotekniikka (Wireless Local Area Network, WLAN) kaupallinen nimitys. Se tarjoaa kaksi eri kommunikaatiotilaa joista yleisemmin käytössä on liityntäpiste-tila. Sen avulla lähialueen laitteet voidaan liittää langattomasti lähiverkkoon. Toisena tilana on AdHoc-tila, minkä avulla kaksi tai useampi laitetta voi keskustella keskenään. WiFi-verkko voi myös muodostaa, mesh-verkon, jolloin voidaan tarjota laajemman alueen WLAN. (Tanenbaum & Wetherall 2011:317; Meraki 2012.)

Suojattu WiFi-verkko vaatii WiFi Protected Access (WPA2) -autentikoinnin, jonka varmistus toimii autentikointikeskuksen tai esijaetun salasanan avulla. Datan kryptaaminen hoidetaan AES-algoritmillä. Koska WiFi:n mallina on Ethernet, ei yli menevä liikenne ole täysin taattua. Eri prioriteetteja pystytään luomaan QoS:n liikenteen aikataulutus palvelulla (traffic scheduling), jossa ääni ja video ovat etusijalla. (Tanenbaum & Wetherall 2011: 329–330.)

5.2.2 Langattomat liityntä- ja laajaverkot

Langattomat liityntäverkot yhdistävät paikallisia verkkoja ja laitteita WAN:iin. WAN voi olla toteutettu joko kiinteällä tai langattomalla verkolla. Älykkään

sähköverkon kannalta merkittävät langattomat liityntäverkon tekniikat ovat WiMAX ja mobiiliverkot.

WiMAX on IEEE 802.16 standardin määrittelemä tekniikka, jolla voidaan toteuttaa sekä laajankantaman PTP- ja PMP-liityntäyhteyksiä että pitkänkantaman PTP- tai PTM-linkkejä. Oikeastaan tekniikka yhdistää 802.11:sen ja 3G:n, tehden siitä hyvin neljännen sukupolven mobiiliverkon kaltaisen. Sen etuna on 2G ja 3G mobiiliverkkoon verrattuna se, että standardin tarkoituksena oli alusta alkaen tarjota IP-pohjainen datayhteys. WiMAX Perustuu OFDM-tekniikkaan, jolla on muun muassa hyvä monitie-etenemisen (multipath) sietokyky. WiMAX:in yhteydessä voidaan käyttää useampaa antennia parantamaan yhteyden laatua ja tiedonsiirtonopeutta. WiMAX mahdollistaa hyvän QoS tuen. (Tanenbaum & Wetherall 2011: 331–332.)

WiMAX voidaan käyttää lisensoidulla tai lisensoimattomalla 5 GHz taajuudella. Suomen viestintävirasto on lisensoimassa 1,5 Ghz kanavaa energia-teollisuuden käyttöön. Radiotaajuusmääräys odottaa vielä EU:n tarkistusta. Siihen asti Ficora myöntää taajuudelle vuoden kokeilulupia. (NDC 2012.)

Long Term Evolution (LTE) on mobiiliverkon uusin eli neljäs sukupolvi (4G), joka on vielä vähäisessä käytössä. Tekniikan tarkoitus on parantaa verkon QoS-mahdollisuuksia, vähentää viivettä ja lisätä yhteensopivuutta tarjoamalla kaikki palvelut IP-pohjaisina. Teoreettinen huippunopeus on 100 Mbps alasuuntaan. Pienen IP-paketin viive käyttäjätason kuormittamattomassa on alle 5ms. LTE käyttää 5 MHz kaistanleveyttä. Esimerkiksi 200 käyttäjällä lähetysaika (transmission time) yhteyden muodostamisella on (idle to active) alle 100 ms sekä valmiustilasta (dormant to active) alle 50 ms. Kantama on 5–100 km, jossa yhteyden vaatimustasoja joudutaan laskemaan 30 km jälkeen. (Motorola Inc. 2007: 3; Mishra 2010: 142.)

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) on mobiiliverkon kolmas sukupolvi (3G). Sen teoreettinen tiedonsiirtonopeus High-Speed Packet Access (HSPA) tekniikalla on 14 Mbps. Sen koodaustekniikka on WCDMA. (Mishra 2004: 515.)

Global System for Mobile Communications (GSM) eli mobiiliverkon toinen sukupolvi (2G) tarjoaa datakytkentäiseen liikenteeseen GPRS-yhteyttä, jonka teoreettinen nopeus on 170 kbps sekä 2,5G päivityksellä nopeampaa EDGE-yhteyttä, jonka teoreettinen nopeus on 270 kbps. 2G:n etuna on sen hyvin laaja peitto, mutta pakettikytkentäinen data on siinä hyvin ontuvaa, eikä viiveherkkiin yhteyksiin päästä. Tiedonsiirtonopeus ja -viive riippuvat verkon kuormasta, joten älykkäässä sähköverkossa sillä ei voida toteuttaa kriittisiä yhteyksiä. (Sauter 2011: 65.)

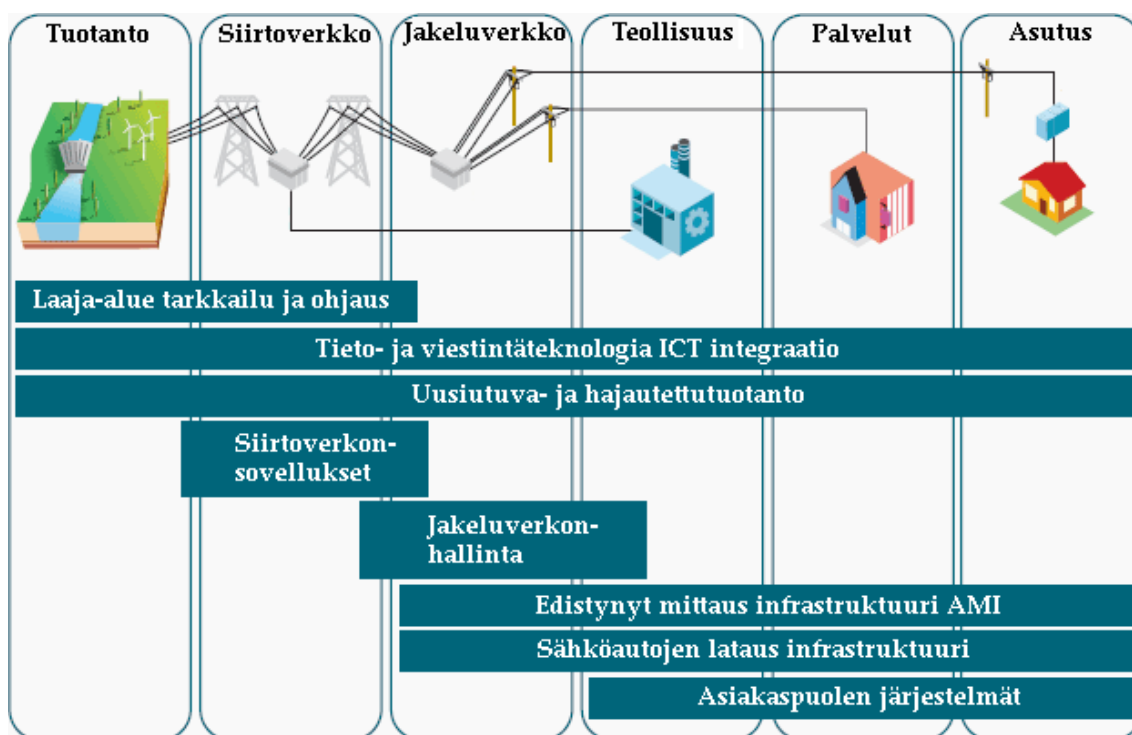
@450 on entiselle NMT-taajuudelle 450MHz perustettu FlashOFDM tekniikalla toteutettu langaton laajakaistaverkko, jonka tarkoituksena oli saada katettua koko Suomi 1Mbps-yhteydellä. Verkon pystyttämisessä on ollut ongelmia. Alun perin verkkoluvan saanut DIGITA on myynyt toimiluvan Datamelle, joka on 2012 vuoden lopussa muuttanut verkon CDMA-tekniikalla toimivaksi. Tämän on tarkoitus tarjota luotettavampi palvelu ja laajempi tuki, jotka Flash-OFDM:ltä puuttuivat. Teoreettisen nopeuden luvataan pystyvän jopa 3Mbps alasuuntaan ja 512 yläsuuntaa, mutta käytännön testejä ei vielä löytynyt. Teknologiateollisuus ry:n (2010: 129–130) raportin mukaan Vattenfall on ottanut @450-verkon sähköverkon langattomaksi toimintajärjestelmäksi. (Datame Oy 2012.)

Näiden lisäksi teollisuudessa on monenlaisia standardoimattomia kapeakaistaisia radiolinkkejä. Niillä voidaan tarjota lisensoituja tai lisensoimattomia yhteyksiä teollisuuden ja sähköverkkoyhtiöiden

tehtäväkriittisiin yhteyksiin, mutta koska älykkään sähköverkon tietoliikenteen tulee olla standardoitua ja yhteensopivaa, jätetään niiden tarkastelu tässä yhteydessä pois. (Alcatel Lucent 2012: 4.)

6. ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TIETOLIIKENNE

Älykkään sähköverkon ohjaus-, mittaus- ja seurantarpeet ovat moninaiset. Eri sovellusten vaikutus osa-alueisiin on esitetty Kuva 17. Lisäksi kuva havainnollistaa, että ICT:n tulee olla koko systeemin kattava. Tarkastelemme tässä luvussa työn aikana löytyneitä eri tietoliikenneyhteyksientarvetta ja niiden vaatimuksia. Keskitymme työn rajauksen mukaan pääasiassa jakeluverkon ja edistyneen mittausinfrastruktuurin (AMI) yhteyksiin.

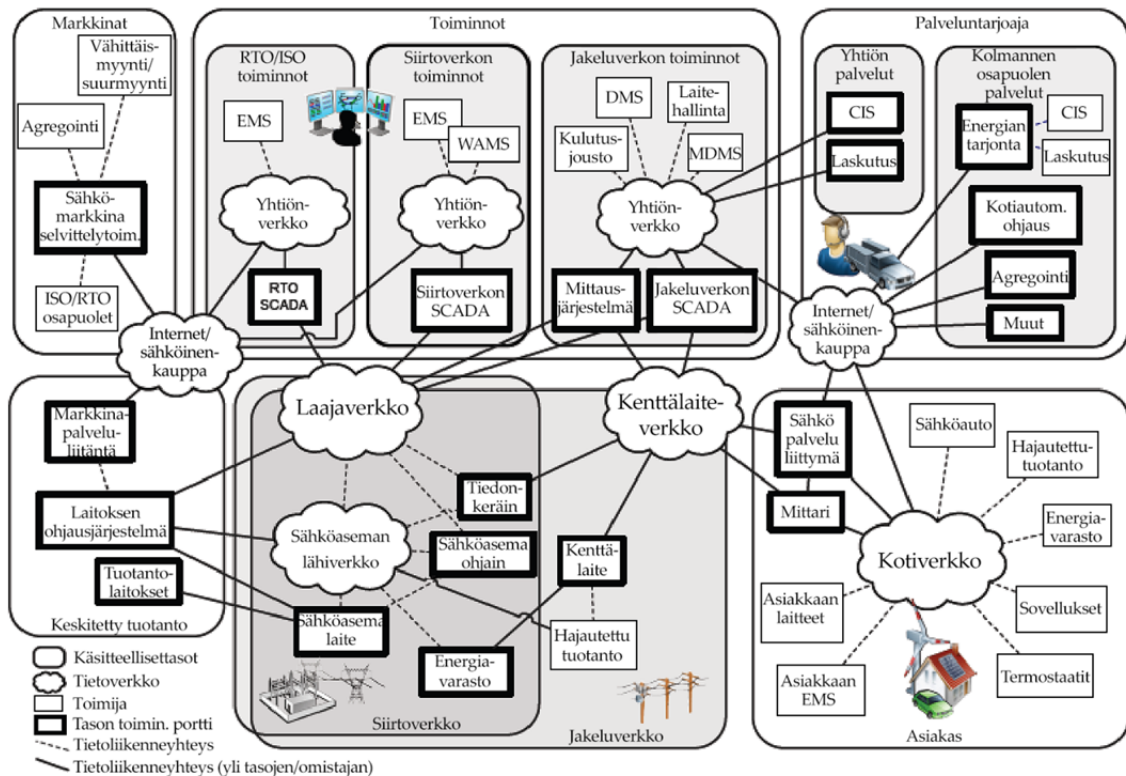


Kuva 17. Älykkään sähköverkon osa-alueet ja niihin vaikuttavat sovellusosa-alueet (IEA 2011: 17).

6.1 Älykkään sähköverkon jakaminen käsitteellisiin tasoihin

Esittääkseen älykkään sähköverkon eri toimijat ja niiden välisen vuorovaikutuksen NITS (2010: 32–43) esitteli seitsemän SG:n käsitteellistä tasoa.

Niiden väliset kommunikaatioyhteydet esitellään Kuva 18. Pääasiassa käsitteelliset tasot jakautuvat kahteen eri tyyppiin: suoraan sähkönsiirtoa hoitaviin tasoihin ja sähkönsiirtoa tukeviin tasoihin.

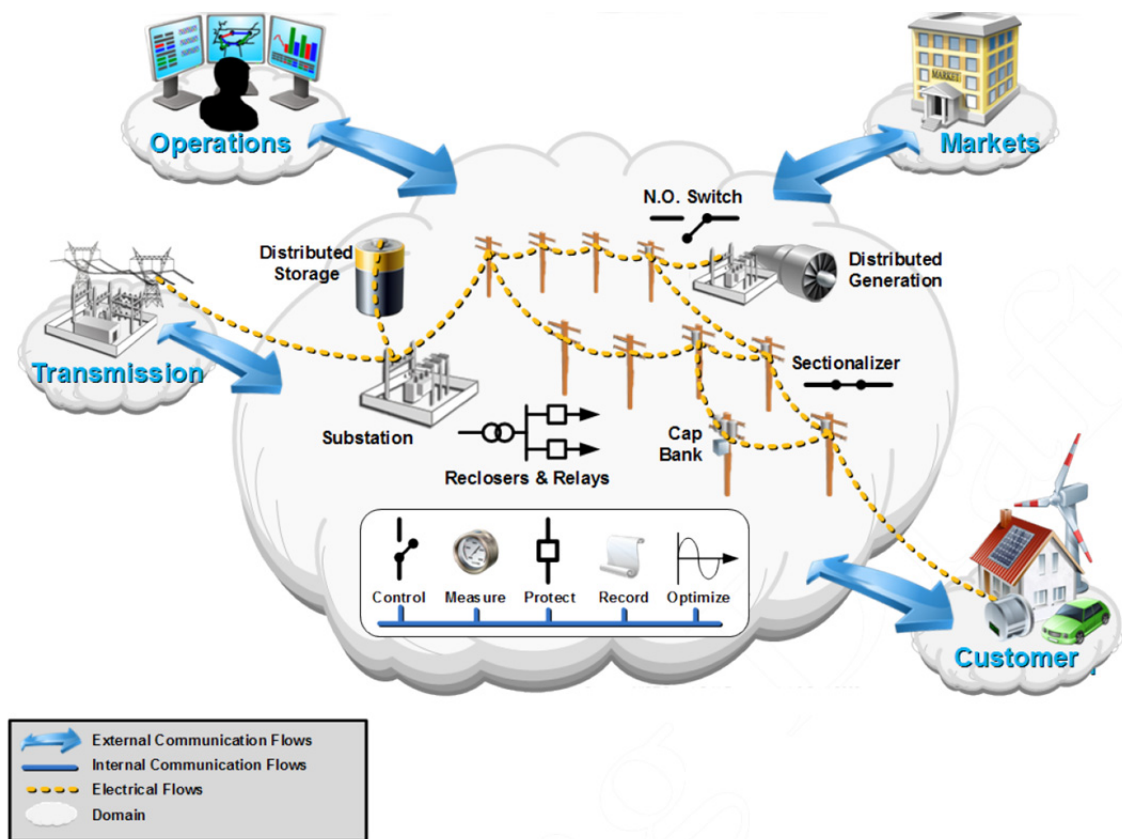


Kuva 18. Älykään sähköverkon käsitteellinen kuvaus (NIST 2010: 35).

Jakeluverkonautomaatio sijoittuu tietoliikenteen osalta niin sanottuun toimialueverkkoon (Field Area Network, FAN), joka yhdistää jakeluverkon IED:t (älykkäät elektroniset laitteet), sähköasemat ja asiakkaiden älykkäät mittarit.

Kuva 19 esittämä jakeluverkkotasot sisältää hajautetun energiantuotannon, hajautetut energiavarastot, sähköasemat, sekä niitä suojaavat ja ohjaavat IED:t. Siitä on kaksisuuntainen kommunikaatio ja energiavirta sekä

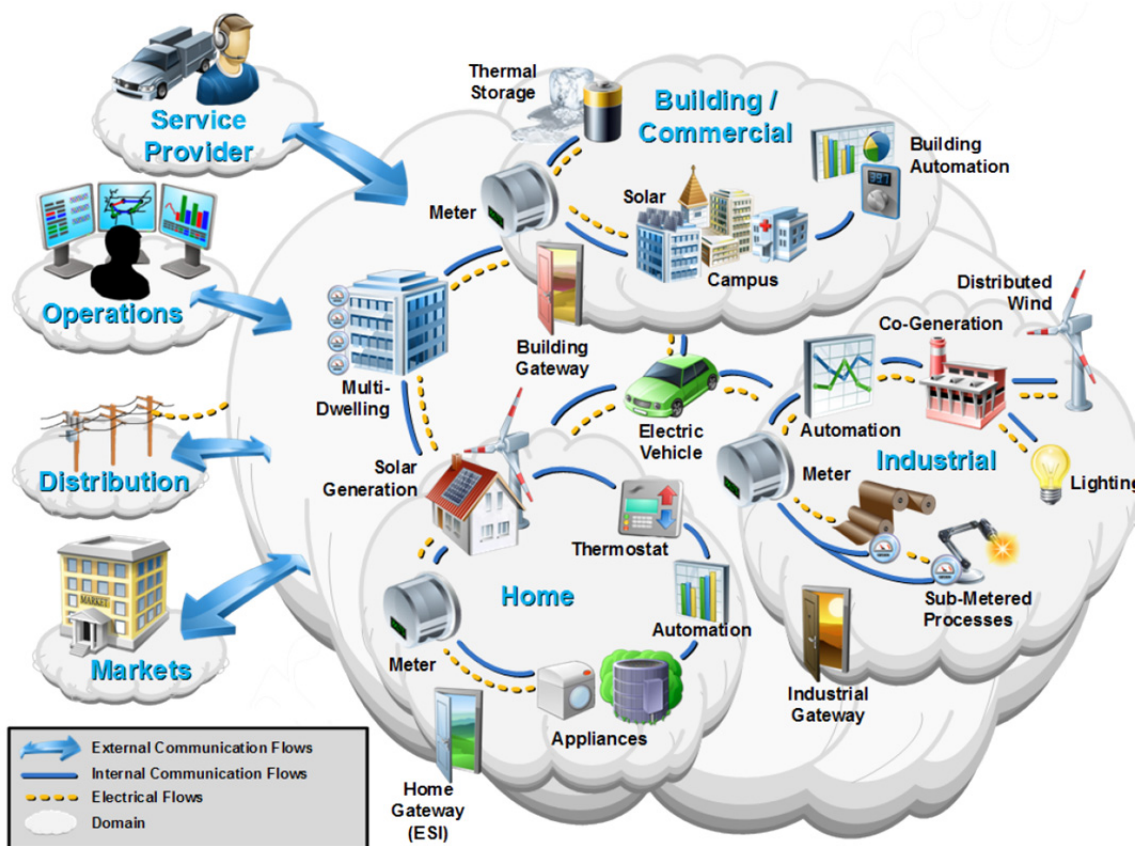
sähkösiirtoverkkotasolle että asiakastasolle. Näiden lisäksi kaksisuuntainen kommunikaatiovirta operationaalisen- ja energiamarkkinatason tukee sähkönjakeluverkon optimointia ja automaatiota. (EPRI 2009: 117; NIST 2012: 224–225.)



Kuva 19. Jakeluverkkotason yhteyksien kuvaus (NIST 2012: 224).

Kuva 20 asiakastaso sisältää hyvin monenlaisia sovelluksia. Näistä kuitenkin työn kannalta kiinnostavimpia ovat älykkäät mittarit, joiden kautta asiakkaat liittyvät edistyneeseen mittausinfrastruktuuriin (AMI). AMI:n kautta ohjataan kaikkia asiakastason kolmea osaa: liikerakennuksia, teollisuutta ja koteja. Koska asiakkaat toimivat myös energian tuottajina ja varastoina heidän toimintaa tulee ohjata jonkinlaisella energianhallintajärjestelmällä (Energy Management

System, EMS) AMI yhteytenä muihin tasoihin voi toimia kuluttajan internet-yhteys. Asiakkaan aliverkko voi muodostua PLC-yhteyden yli tai langattomasti sensoriverkon yli. Mikäli asiakkaalla ei ole internet-yhteyttä ovat WiMAX- tai LTE-yhteys varteenotettavia tietoliikenneyhteyksiä muihin verkkoihin. (EPRI 2009:119; NIST 2012: 211–212.)



Kuva 20. Asiakasverkkotason yhteyksien kuvaus (NIST 2012: 211).

6.2 Tietoliikenneyhteyksien laatuvaatimuksia

Älykäs sähköverkko vaatii luotettavan, skaalantuvan, tehokkaan, ja kustannustehokkaan tietoliikenneverkon FAN-verkokseen. palvelun laatu (Quality of Service, QoS) määritellään useilla mittareilla, kuten luotettavuus, viive ja tiedonsiirtonopeus. (Gungor & Lambert 2006: 878–882.)

Tietoliikennesysteemit pystytään suunnittelemaan siten, että ne täyttävät tekniset suorituskyky- ja luotettavuusmääritelmät. Haasteena on, kuinka pystytään määrittelemään nämä vaatimukset varsinkin laajentuvalle sovellukselle kuten älykäälle sähköjakeluverkolle. (Lavery, Morrow, Best & Crossley 2010: 2.) Vaatimuksia voidaan toki liioitella, mutta esimerkiksi kännykkäverkkoa suunniteltaessa on huomattavan edullista hyväksyä jonkinlainen mahdollisuus sille, että verkko kapasiteetti ylitetään. Näin resurssit saadaan tehokkaampaan käyttöön ja verkon kustannukset ovat huomattavasti kohtuullisemmat.

Tietoliikennesysteemin suunnittelussa kaksi merkittävintä vaatimusta ovat tiedonsiirtonopeus (throughput) ja kanavan viive (latenssi, delay). Jos ne eivät täyty, systeemillä ei ole mitään mahdollisuutta toimia. Tämän lisäksi on myös tärkeää huomioida vähintään luotettavuus ja turvallisuus. (Lavery et al. 2010: 2.)

6.2.1 Korkea saatavuus

Koska sähköverkoille on asetettu erittäin korkeat saatavuusmääritelmät, myös sitä ohjaavalle tietoliikenteelle korkea saatavuus on tärkeää (Xiao 2012: 219). Koska langattomat yhteydet eivät ole riippuvaisia siirtotiestä, niiden redundantius on yleensä hyvin korkea, mutta siirtotien ennustamattomuus mahdollistaa hetkellisiä, joskus jopa pidempiä saatavuusongelmia. Monet tahot arvelevat tulevaisuuden älykkään sähköverkon vaativan vähintään 5-yhdeksikön (5-nines) saatavuuden.

Aikaa, jolloin jokin verkon laite on saavuttamattomissa, kutsutaan katkosajaksi (down time). Yhteyden katkos voi olla tarkoituksen mukainen huoltokatko tai odottamaton vikatilanne. Jälkimmäiseen voi olla kaksi pääsyytä: jokin verkon

laite on rikki tai tiedonsiirtotie fyysisesti poikki. (Piedad & Hawkins 2001: 18–19.)

Taulukko 5. Nines-taulukko: Saatavuus prosenttien vastaavat katkosajat.

Ysejä	2	3	4	5	6
Prosenttia	99,0%	99,9%	99,99%	99,999%	99,9999%
Seisokit vuodessa	3,65 päivää	8,75 tuntia	52 minuuttia	5 minuuttia	31 sekuntia

Saatavuuden parantamiseksi verkon laitteet voidaan kahdentaa virtuaalisesti sekä yhteydet rakentaa renkaaksi tai mesh-topologiaksi, jolloin yhteys ei ole yksittäisen reitin varassa. Hyvin kriittisessä tapauksessa koko verkko voidaan kahdentaa, jolloin kaikki laitteet on fyysisesti kahdennettu ja sijoitettu fyysisesti eri paikkaan tai vaihtoehtoisesti käytetään kahta eri tekniikkaa esimerkiksi kiinteää ja langatonta yhteyttä. Samaan tapaan kuin sähköverkossa WAN:n saatavuustason nostaminen on kannattavampaa, koska sen vaikutus ja kulut jakautuvat useammalle asiakkaalle, mutta tarvittaessa yksittäiset kriittiset liityntäverkon yhteydet voidaan varmistaa kahdella yhteydellä.

Luvussa 6.4.1 esitelty IEC 61850 standardin saatavuus perustuu IEC 62439-3 standardiin, joka määrittelee sähköaseman sisäisille yhteyksille kahdenusvaihtoehtoina joko huomaamatonta korkeansaatavuuden (High-Availability Seamless Redundancy, HSR) protokollaa tai rinnakkaisen kahdennuksen protokollaa (Parallel Redundancy Protocol, PRP). Näiden avulla turvataan sähköasemien sisäinen kriittinen tietoliikenne, mutta yhteyden kahdennusvaatimus on IEC 61850 laajenemisen myötä mahdollisesti laajenemassa sähköasemien väliseen ja sähköasemien ja valvomon väliseen tietoliikenteeseen. (ABB 2010a: 58–61.)

Yhteyden saatavuuteen vaikuttaa myös tietoliikenneverkon laitteiden sähkönsyöttö. Varsinkin SG:n suojaus- ja mittauslaitteiden tulee pystyä kommunikoidaan myös sähkökatkon aikana, joten tällaisten yhteyksien sähkönsyöttö on turvattava varavoimalla. Sähköverkon huoltotöiden sujuvuus edellyttää toimivaa tietoliikennettä ja näin ollen tietoverkon osien tulee kestää useiden päivien sähköttömyys.

Palvelutasosopimus (Service-Level Agreement, SLA) on palvelun tarjoajan ja asiakkaan välinen sopimus muun muassa palvelun saatavuuden takuusta sekä huoltovelvoitteesta ja -ajoista. Lisäksi niissä voidaan määritellä erilaisia sovellus- tai laitekohtaisia palvelutasoja, priorisointeja ja profiileja. (Piedad & Hawkins 2001: 13.)

Saatavuuden ja hinnan välillä on selvä korrelaatio, korkeampi saatavuus on kalliimpaa ja se näkyy hinnassa suoraan tai epäsuorasti. Tämän takia saatavuusmääritelmä on hyvä määrittää (Piedad & Hawkins 2001: 13). Korkean saatavuuden hintaa voidaan alentaa jakamalla sama korkean tason verkko mahdollisimman monen kesken ja priorisoimalla asiakkaiden vaatimuksia, tämä tarkoittaa käytännössä luotettavan julkisen tietoverkon käyttöä. (Piedad & Hawkins 2001: 5-6.)

6.2.2 Viive ja tiedonsiirtonopeus

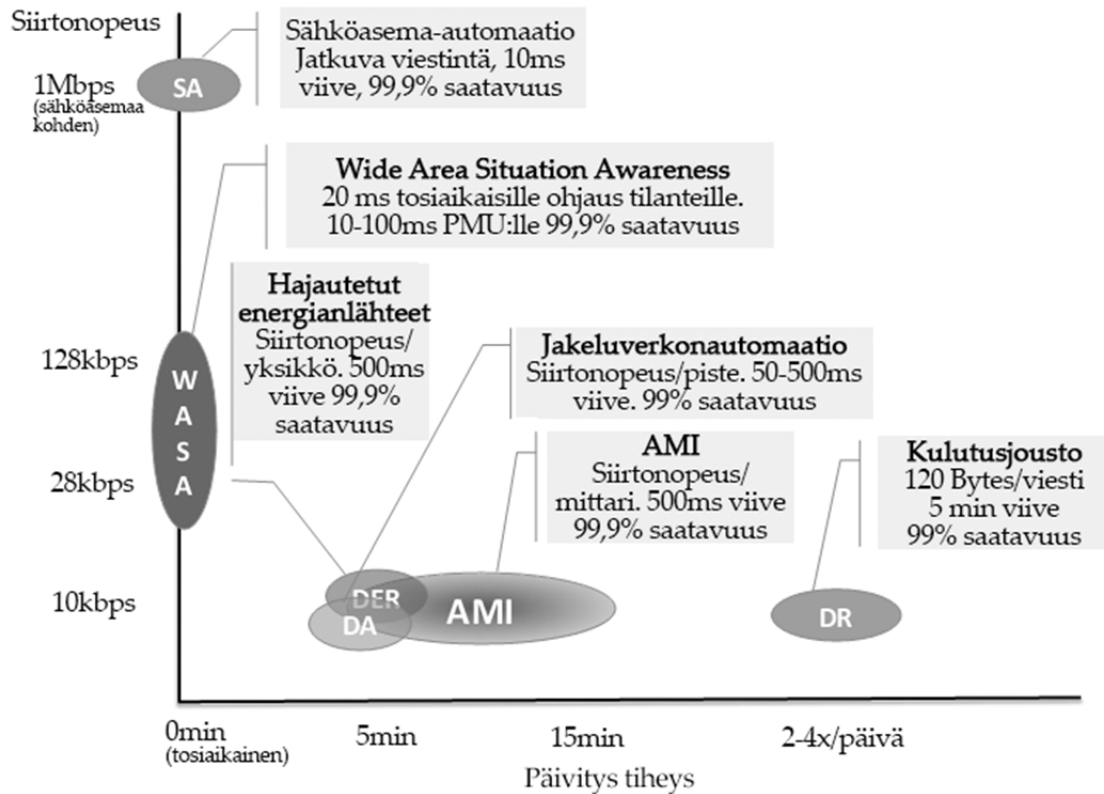
Sovelluksen ajantasaisuuden voidaan katsoa määrittelevän viestin välittämisen viivevaatimuksen. Taulukko 6 esitetään IEEE 1646 standardin määrittämiä SG:n älykkäiden elektronisten laitteiden (IED) viivevaatimuksia. Se on jaoteltu neljään eri kategoriaan yksisuuntaisen viiveen perusteella. (IEEE 2004.)

Taulukko 6. IEEE-standardin 1646 määrittämät viivevaatimukset (Lavery et al. 2010: 2).

Nopeusvaatimus	sovellus	Yhdensuuntainen viive
Erittäin korkea	jännite ja virtamittausten suoratoisto kytkinvaihteille	korkea: alle 2ms
Korkea	tapahtumatiedotus suojaukselle	2ms-10ms
Keskinkertainen	ei kriittisen tiedon vaihto suojalaitteiden välillä, ohjaustoiminnot ja PMU (= Synchrophasors)	10ms-100ms
Matala	viestien välitys sähköasemalta valvomoon ja IED:lle	yli 100 ms

Lisäksi viestinnän ajantasaisuuteen vaikuttaa laitteen oma prosessointiaika ja mahdollinen heräämisaika sekä se vaatiiko käytetty tietoliikenneyhteys alkuun yhteyden muodostamista tai erilaisia kättelyitä. Mobiiliverkoissa yhdistäminen saattaa aiheuttaa pitkiäkin viiveitä, sensoriverkoissa heräämisajat on 20 ms. Luvun lopussa esitellään muita viivevaatimusmääriä.

Tietoliikenneverkon tulee pystyä täyttämään sovelluksen tiedonsiirtotarve. Automaation ohjausdata on yleensä matalan viiveen ja tiedonsiirtotarpeen omaavaa, joten sen tiedonsiirtonopeuden vaatimukset ovat yleisesti täytettävissä. SG:n hajautetun ohjauksen myötä tiedonsiirtonopeuden tarve tulee kuitenkin huomattavasti kasvamaan. Kuva 21 esitellään SG-sovellusten nykyisiä viivevaatimuksia ja tiedonsiirtonopeuden vaatimuksia. (Lima 2010.)



Kuva 21. Älykkään sähköverkon suorituskykyvaatimukset (Lima 2010: 17).

6.2.3 Synkronointi

Viestin ajantasaisuuteen vaikuttaa viiveen lisäksi myös sen lähetyssajan tunnistaminen aikaleimasta. Aikaleimaaminen vaatii laitteiden yhteistä synkronointia. Sähköverkon suojauksessa toimivien laitteiden tarkkuus tulisi olla alle 4 ms. Luvussa 6.3 esitetty IEC 61850 esittelee protokollan SG:n synkronointiin Ethernetin yli. (NDC 2012: 15-16.)

6.2.4 Yhteensopiva ja IP-pohjainen tietoliikenne

EPRI:n raportissa todetaan, että älykkäiden sähköverkkojen tietoliikenneyhteyksien tulee tukea IP:tä. IP-pohjaiset verkot sisältävät hyvin monia kypsiä standardeja ja mahdollistavat kaistan jakamisen monen

sovelluksen kesken ja parantavat luotettavuutta dynaamisen reitityksen avulla. SG sovellusten QoS vaatimuksia, kuten minimum access delay, maximum packet loss tai minimum bandwidth voidaan toteuttaa IP verkon päällisillä tekniikoilla kuten esimerkiksi MPLS. IP-pohjaisia saatavilla olevia sovelluksia voidaan käyttää SG ympäristössä. IP-verkko on hyvin skaalautuva, joten uusien laitteiden liittäminen on siihen helppoa. (NIST 2010: 39.)

Koska IPv4 osoiteavaruus on loppumassa, SG-sovellusten on suotavaa tukea IPv6:ta. Tämä on edellytys varsinkin (Internet of Things, IoT) ajatuksen kannalta. IPv6 tulee olemaan kiinteästi laitteessa, jolloin laite voidaan helpommin yksilöidä. (Cisco 2011: 4.)

6.2.5 Yleisiä vaatimusmäärittämiä

Suunniteltaessa verkkoa tulee muistaa, että SG:n vaativammalle tietoliikenteelle tulee pystyä tarjoamaan yksittäisen linkin laatumäärittämiä sijaan koko yhteyden kattava (End-to-End) -palvelun laatumäärittämiä (QoS) (Chakravorty, Pratt & Crowcroft 2003:1). Suurin osa sähköverkon suojauksesta tarvitsee matalaa tiedonsiirtonopeutta, mutta kommunikaatio on hyvin aikariippuvaista. Tulevaisuudessa myös tiedonsiirtonopeuden tarve kasvaa, kun verkkoon tulee uusia tosiaikaisia jakeluverkon suoja- ja mittalaitteita. Esimerkiksi laitetietojen lähettäminen (telemetry) ja PMU:t kasvattaa verkon viive- ja kaistavaatimukia merkittävästi. Taulukko 7 esittelee ABB:n haastattelussa esille tulleita viive- ja saatavuusvaatimukia eri sovelluksille. Taulukko 8 taas esittelee Alcatel Lucentin näkemyksen asiasta.

Taulukko 7. ABB:n määrittelemät eri sovellusten viive ja saatavuus sekä soveltuvat tekniikat (ABB haastattelu).

Sovellus	viive	saatavuus	tietoliikennetekniikka
Teleprotection	<10ms	erittäin korkea	kuitu
Teleinterlocking (GOOSE)	~20ms	korkea	kuitu, RF mesh, LTE (ehkä 3G, Latenssi!)
SCADA	~100ms (=käyttäjä vaste odotukset)	matala/ei kriittinen	LTE/3G/GPRS, RF Mesh/mesh radio
Videovalvonta	100-500ms	kaistaa, ei kriittinen	LTE/3G mesh radio

Taulukko 8. Alcatel Lucentin esittämät tiedonsiirto, viive, luotettavuus ja turvallisuusvaatimukset (Alcatel Lucent 2012: 2).

Sovellus	Tiedonsiirtotarve	viive (yhteen suuntaan)	Luotettavuus	Turvallisuus
Älykkäät mittarit	matala/ erittäin matala	korkea	keskin- kertainen	korkea
SCADA	kesk./matala	matala	korkea	korkea
Jakeluverkon automaatio	matala	matala	korkea	korkea
Hajautettu energiantuotanto	matala	erittäin matala	korkea	korkea
Hajautettu energianhallinta ja -valvonta	kesk./matala	matala	korkea	korkea
Videovalvonta	korkea/kesk.	kesk.	korkea	korkea
Liikkuvan työvoiman yhteys	korkea/kesk.	kesk.	korkea	korkea

6.3 Tietoturva

Sorebo & Echols (2012: 269) muistuttaa älykään sähköverkon tietoturvakirjassaan, että mikään systeemi ei ole 100 % varma. Myös täysin suljettuun yksityiseen verkkoon on mahdollista murtautua. Sorebo & Echols muistuttaa, että tietoturvallisuus on siis matka, eikä määränpää. Tulee myös muistaa, ettei normaali elämässäkään yleensä käytetä sataa euroa kymmenen euron arvoisen esineen suojaamiseen.

Tietoturva on haastattelujen mukaan yksi tärkeimmistä kysymyksistä varsinkin pohdittaessa, voidaanko sähköverkon tietoliikenne ulkoistaa julkiseen verkkoon (NDC 2012). Kuitenkin, jotta älykkään sähköverkon idea voi toteutua, asiakkaalla ja kolmannella osapuolella on oltava pääsy julkisesta verkosta sähköverkkoyhtiön mittaustietoihin. SG siis vaatii huolellisesti suunnitellun ja jatkuvan tietoturvastrategian. (Sorebo & Echols 2012: 270.)

Tietoturvallisuus on erittäin laaja aihe ja älykkään sähköverkon tietoturvallisuuteen on paneuduttava huolella SG-sovellusten toteutuksessa. SG-ratkaisujen tarjoajan tulee toteutuksessa ottaa huomioon muun muassa yksityisyyden suoja, salausalgoritmit, tietoturvaprotokollat, salausavaimen hallinta (Crypto Key Management). Lisäksi tietoturvatoteutusten tulee olla avoimia, standardipohjaisia, tehokkaita, todennettuja, mukautuvia, ja laajennettavia. (Carvallo & Cooper 2011:23; Schneider 2000: 85–86.)

6.4 Standardoitu ja yhteen toimiva

Standardien tärkein ominaisuus on yhteensopivuus ja avoimuus. Standardien avulla erivalmistajat voivat suunnitella ja toteuttaa yhteensopivia laitteistoja ja mahdollisimman moni taho voi osallistua uusien innovaatioiden kehittelyyn.

SG:ssä keskeisinä tavoitteina on parantaa jakeluverkon toiminta varmuutta, säästää energiaa ja mahdollistaa paikallinen uusiutuva energiantuotanto. On mahdotonta käsitellä työssä kaikkia SG:hen liittyviä standardeja laajemmin, mutta laaja kirjo standardeja löytyy muun muassa NIST (2010:50–73) raportista. Käsittelemme tässä luvussa tälle työlle merkittävintä älykkään sähköverkon kommunikaatiota määrittävää standardia IEC 61850.

6.4.1 IEC 61850

IEC 61850 on sähköasema-automaation suunnitteluun luotu standardi. Sen pääasiallisena tarkoituksena on luoda yhtenäinen ja avoin tiedonsiirto-protokolla, jonka avulla eri valmistajien sähköasemalaitteet ovat yhteensopivia. IEC 61850 määrittely perustuu seuraaville standardeille: IEC 62439 High Availability Networks, IEC 62351-6 Security for IEC 61850, IEC 61400-25 Wind power plants (Siemens AG 2008: 12). Koska IEC 61850 ensimmäinen versio on tarkoitettu vain sähköaseman sisäiseen tietoliikenteeseen, sen määritelmää ei käydä tarkemmin läpi, vaan tutustumme seuraavassa luvussa sen toiseen versioon.

6.4.2 IEC 61850-90-x

IEC61850 on otettu hyvin vastaan ja sen uskotaan yleistyvän de facto standardiksi sähköaseman sisällä, mutta myös laajemmin kattamaan älykkään sähköverkon tietoliikennettä. Standardin ensimmäinen versio määrittelee pääasiassa kommunikaation muodon ja erilaisten vanhempien protokollien sovittamisen uuteen yhteistoimivaan protokollaan.

Standardin uudempi julkaisu IEC 61850 edition 2. lisää standardiin muutamia täysin uusia osuuksia IEC 61850-90-x, jotka kuvaavat tarkemmin niin sanotusti kuinka standardia käytetään. IEC 61850-90-1: määrittää standardin käytön sähköasemien välisessä tietoliikenteessä sekä IEC 61850-90-2 määrittää standardin käytön sähköaseman ja valvomon välisessä tietoliikenteessä. (ABB 2010a: 48.)

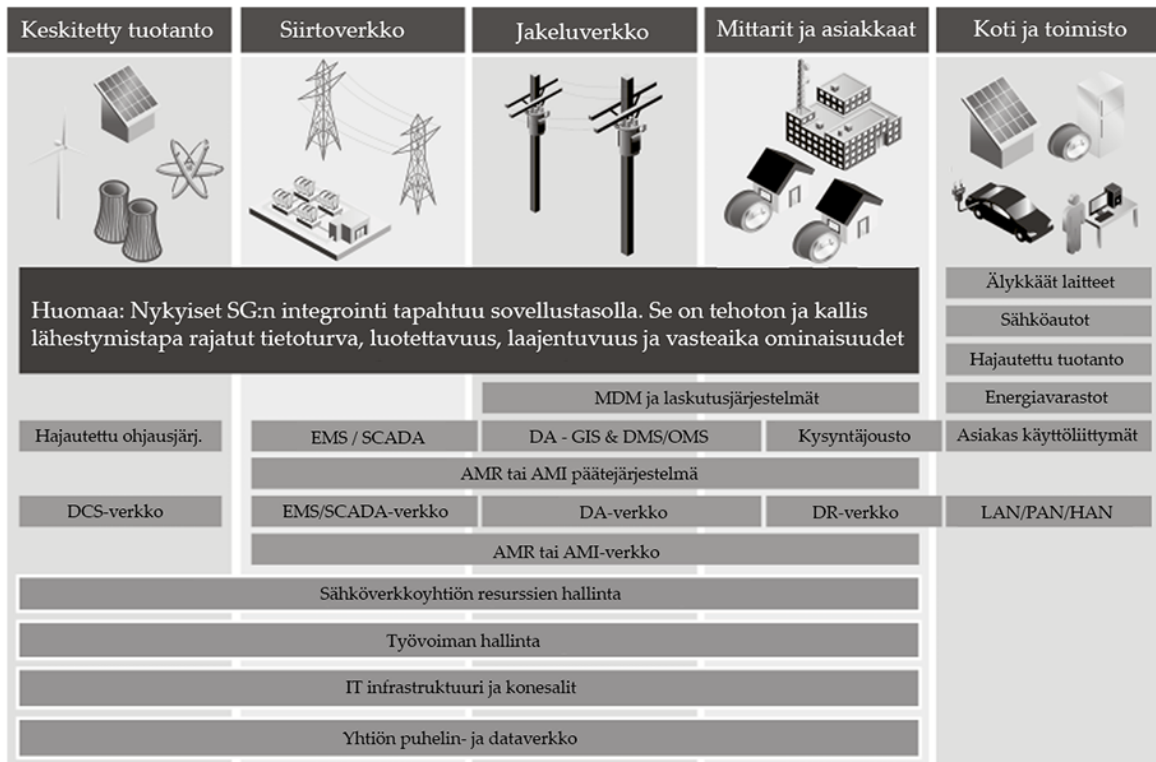
IEC 61850 toiseen versioon on sisällytetty Ethernetin yli toimiva synkronointi-standardi IEEE1588v2 (Precision Time Protocol, PTP). Se pystyy synkronoimaan verkon laitteet parhaimmillaan alle mikrosekunnin tarkkuudella. Verkon kaikkien laitteiden ei tarvitse tukea IEEE1588v2 standardia, mutta ilman tukea olevat laitteet lisäävät synkronoinnin epätarkkuutta. (ABB 2010a: 49.)

Tämän lisäksi standardi määrittelee kaksi erilaista redundantiusprotokollaa HSR ja PRP, joiden avulla on mahdollista saavuttaa katkeamaton saatavuus. Nopea palautumisaika laite- tai siirtotieviasta johtuneesta yhteyden katkeamisesta on erittäin merkittävä varsinkin jakeluverkon suojalaitteiden (IED) tosiaikaisessa ohjauksessa. (ABB 2010a: 57-59.)

6.5 Älykkään sähköverkon sovellusten integrointi

Niin kuin NIST (2010: 35) käsitetasoselvityksestä käy ilmi, vuorovaikutuksella on tärkeä rooli. Tasojen helpommaksi integroitavuudeksi ja yhteensopivuudeksi Carvallo & Cooper (2011: 200-202) esittää koko tietoliikenneverkon toteuttamista IP-pohjaisena, jolloin integrointi voidaan suorittaa jo verkkotasolla ja investointi kustannukset laskevat huomattavasti. Carvallo & Cooper kutsuu tätä integrointielementtiä älykkään sähköverkon optimointimoottoriksi (Smart Grid Optimization Engine, SGOE).

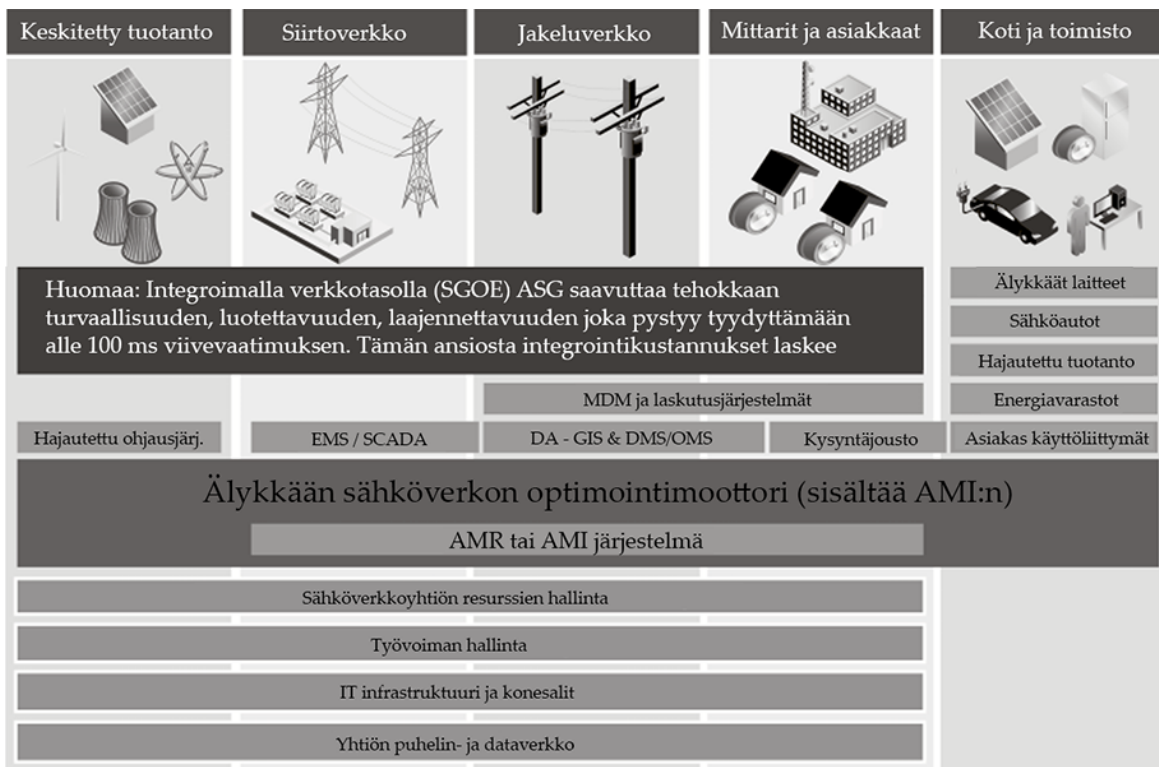
Nykyaikainen sähköverkon valvonta suoritetaan usean eri järjestelmän kuten DCS, EMS/SCADA, OMS, AMI ja DR kautta. Näiden yhteistulkinta on valvomossa toimivan ihmisen varassa. Tämän tulkinnan antaman informaation varassa verkon hallinta suoritetaan. Kyseinen järjestely on toiminut tähän asti, mutta homma karkaa käsistä, kun hajautetut kaksisuuntaiset ”kuormat” lisääntyvät mahdollistaen kaksisuuntaisen energiavirran. (Carvallo & Cooper 2011: 41.)



Kuva 22. SG 1.0 integrointi sovellustasolla (Carvallo & Cooper 2011: 35).

SGOE ei ole yleisesti SG kirjallisuudessa esitetty ajatus, mutta se on mielenkiintoinen ja kirjallisuuskatsauksen perusteella kokoaa yleisesti esitettyjä ajatuksia. SGOE:n on siis tarkoitus poistaa erilaisten sovellusten siiloutuneisuus, jotta voidaan mahdollistaa koko sähköverkon edistynyt

optimointi ja tehokas ohjaaminen. Se toimii Kuva 23 (vrt. kuva 22) esittämällä tavalla kaikkien sovellusten alla kooten sisäänsä koko edistyneen mittausinfrastruktuurin (AMI). SGOE toimii ASG:n sydämenä ja IP-pohjainen verkko on sen toiminnan kannalta kriittinen. Joten sen tarpeellisuudesta on Carvallo & Cooperin (2011:14) mukaan turha kiistellä, mutta aikataulusta halutessaan voi.



Kuva 23. ASG:ssa integrointi verkkotasolla (Carvallo & Cooper 2011: 38).

Carvallan & Cooperin (2011: 41) mukaan SGOE:n tulee:

- pystyä toimimaan kaikissa IP-verkoissa,
- täyttää täydellinen tietoturva (NIST, NERC, CIP ja FIPS),
- pystyä operoimaan lähes tosiaikaisesti 100 ms tai alle,

- oltava superyhteensopiva (muuntajat, jakelumuuntajat, kytkimet, erottimet, kapasitoripankit, mittarit, invertterit) ja
- pystyä sopeutumaan tulevaan kasvavaan tarpeeseen.

6.6 Ulkoistaminen

Verkon julkisuus on sähköverkon turvallisuuden kannalta merkittävää. Mikäli tietoliikenneverkko on täysin erillään muista verkoista, siihen hyökkääminen on hankalampaa. Tämä ei kuitenkaan vapauta tietoverkkoa tietoturva-ongelmasta. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää Iranin ydinvoimalan suljettua järjestelmää, johon onnistuneesti murtauduttiin käyttämällä USB-tikun avulla levitettyä haittaohjelmaa.

Tähän asti sähköverkkoyhtiöt ovat käyttäneet vähäisissä yhteyksissään usein omia verkkoja, mutta tietoliikenneyhteyksien tarpeen laajeneminen on tehnyt julkisen verkon taloudellisesti kannattavammaksi. Riippumatta siitä, kulkeeko sähköverkon automaation tietoliikenneyhtiön omassa verkossa vai julkisessa verkossa, suurimman osan tietoliikenteestä joka tapauksessa tulee olla julkisessa verkon kautta saatavilla.

Vertaillen oman verkon ja ulkoistetun tietoverkkopalvelun kustannuksia, sähköverkkoyhtiön on hyvä muistaa, että tietoliikenneverkko sisältää paljon muutakin kuin sen hankinta ja rakentaminen. Se vaatii asiantuntevaa ylläpitoa, valvomista, huoltoa ja monia muita palveluita. Jos nämä unohtuvat, voi oman verkon rakentaminen tuntua edulliselta ratkaisulta. Totta on kuitenkin, että luotettavan, turvallisen ja korkeansaatuavuuden verkon rakentaminen ei ole halpaa, eivätkä sen kustannukset sijoitu pelkästään rakennusvaiheeseen.

Kokonaistaloudellisesti on järkevää jakaa yhtä laadukasta ja kallista tietoliikenneverkkoa kuin rakentaa useita rinnakkaisia verkkoja

Työn aikana tehdyissä haastatteluissa nousi selvästi esille yhtenä pääkysymyksenä ulkoistamiselle se, että tietoverkkopalveluiden tulisi olla ainoastaan yhden vastuutahon takana, jotta mahdollisessa vikatilanteessa ei ilmaannu vastuun pompottelua eri tietoverkko-osapuolten välillä.

Taulukko 9. Ulkoistamisen hyödyt ja haitat.

Hyödyt	Haitat
Luotettavampi tietoliikenne verkko taloudellisemmin	Verkko ei ole täysin omassa hallinnassa
Ammattitaitoinen ylläpito ja huolto	Ei tiedetä, mitä laitteita verkossa on ja mitkä ovat sen heikot kohdat
Monipuoliset yhteydet	Verkon laitteiden sijoittelua ei voida suunnitella itse
Ei tarvitse maksaa turhasta kaistasta	

6.7 Pohdintoja eri tietoliikennetekniikoiden soveltuvuudesta

Yleisenä periaatteena voidaan pitää, että mikäli SG:n osana toimiva laite ei vaadi liikuteltavuutta ja sille on kiinteä yhteys helposti saatavilla, se otetaan käyttöön luotettavana ja nopeana yhteytenä. Mikäli yhteyttä ei ole valmiina, on tutkittava, pystytäänkö vaatimukset täyttävä liityntäyhteys tarjoamaan langattomasti. Kriittiselle yhteydelle langaton voi tarjota etuna mahdollisesti useamman reitin verkkoon, mikäli se on useamman liityntäpisteen kantaman alueella, mutta langattomissa yhteyksissä on omat haasteensa. Mikäli saatavuusvaatimus on hyvin korkea, voidaan liityntäverkko tarjota useampaa

tekniikkaa käyttäen, jolloin luotettavuus kasvaa. Kuituverkko tarjoaa virtuaalisesti rajattoman kapasiteetin ja parhaan mahdolliseen latenssin. Merkittävin osa kuituyhteyden hinnasta muodostuu kuidun maahan kaivamisesta. Kuituyhteyden korkea hinta on ainoa asia, miksi sitä ei voi perustellusti käyttää älykkäässä sähköverkossa joka paikassa.

Todennäköisesti taistelu pidemmän kantaman langattomasta liityntäteknikasta käydään WiMAX:n ja LTE:n välillä. LTE:n suuri ongelma on sen kalliit lisenssit, jolloin sähköverkkoyhtiö ei voi vaikuttaa peittoalueeseen suoraan ostamatta itselleen lisenssiä, eli on vain odotettava, millä tahdilla mobiilioperaattorit verkkonsa rakentavat. WiMAX on mahdollista toteuttaa paikallisin lisenssein. Tämä antaa sille edun, minkä takia sähköverkkoyhtiöiden kannattaa tarkemmin tutkia sen soveltuvuutta koko jakeluverkon tietoliikenneyhteydeksi. Tähän parhaiten soveltuvana kaistana kannattaa huomioida tuleva 1,5 GHz:n varaus sekä sille saatavilla olevat koekäyttöluvut (NDC 2012). Lisäksi tekniikan soveltuvuudessa tulee ottaa huomioon se, että sähköverkon tietoliikennetarve on internet liittymistä poiketen symmetrinen.

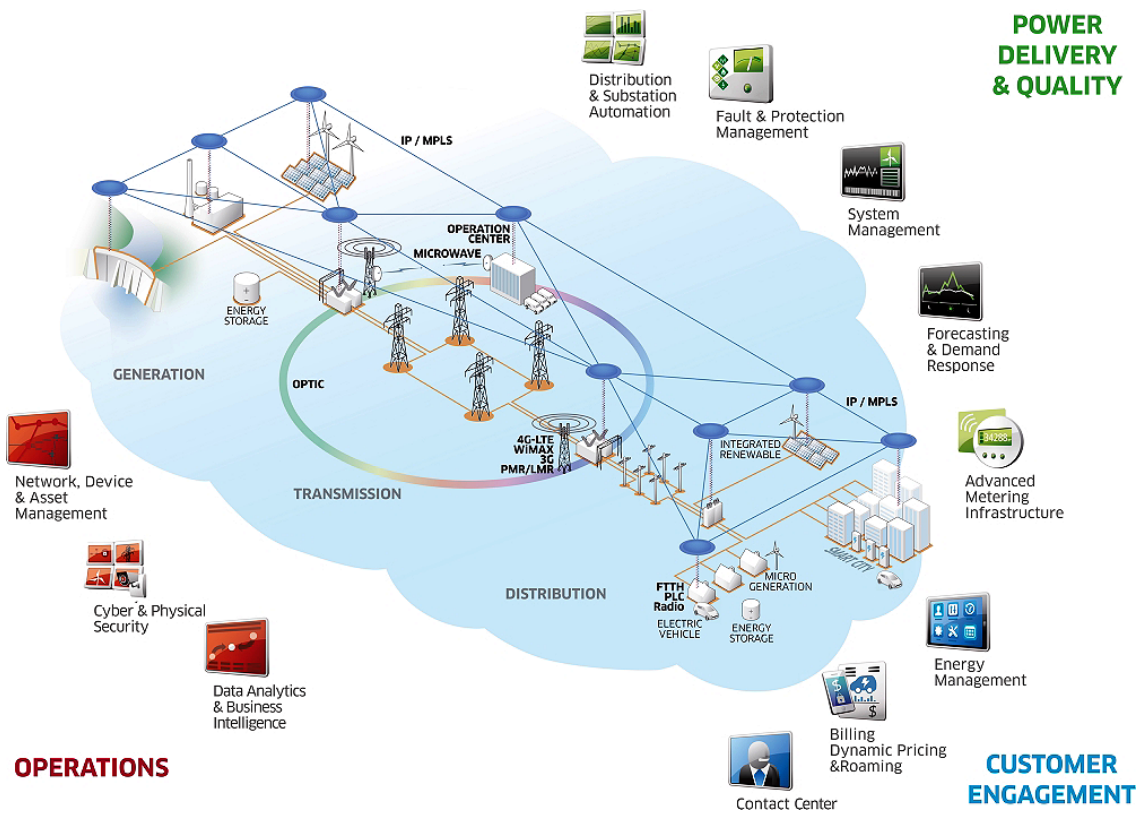
PLC on esitetty yhtenä mahdollisena yhteytenä sen olemassa olevan siirtotien ansiosta. NDC Oy:n kanssa käydyn haastattelun perusteella on kuitenkin epätodennäköistä, että se olisi sähköverkon automaatiolle paras, edullisin ja toimivin ratkaisu. Hänen mukaansa kaksi pääasiaa, jotka puhuvat PLC:tä vastaan ovat, että se ei pysty nykyisellään luotettavaan tiedonsiirtoon eikä sille ole tarvetta kattavan tietoliikenne infrastruktuurin takia. PLC voi kuitenkin olla käyttökelpoinen tekniikka esimerkiksi kotiautomaatiossa, yhdistämään kotiverkon laitteet sähköverkon yli. Tulee kuitenkin muistaa, että osassa julkaisuja, kuten Laverty et al. (2010: 2), PLC nähdään potentiaalisena jakeluverkon IED-mittaustulosten kapeakaistaisena tiedonsiirtona. Ongelmana on kuitenkin kaistan riittämättömyys laitteiden lisääntyessä, joten vähintäänkin

jakeluverkosta sähköasemille kerätty tieto tulee siirtää eteenpäin muilla keinoilla. Riippuen jakeluverkon laitteiden määrästä pullonkaula voi tulla jo aikaisemmin vastaan.

PLC:tä käytetään Suomessa sovelluksiin, kuten etäluettavien mittareiden tiedonkeruuseen, joka ei ole kriittistä eikä aikariippuvaista. Samaan sovellukseen on käytössä myös GPRS-yhteyksiä, jotka ovat nykyiselle AMR:lle riittäviä. PLC:n tulevaisuus älykkään sähköverkon yhteyksissä on vielä epäselvä, mutta nykyisellään tekniikka on vielä liian epävarma kriittisten sovellusten tietoliikenteelle.

Mobiiliverkkojen etuna voidaan yleisesti pitää sitä, että yhteys haluttuun pisteeseen voidaan saada monen tukiaseman kautta. Tällöin toimimaton tukiasema ei estä yhteyttä. VTT:n (2012) Raaseporissa tekemä tutkimus osoitti, että sähköverkon vikatilanteessa 2G- ja 3G-mobiiliverkon redundantius on yhteiskäytössä korkea jopa useamman sähköaseman ollessa alhaalla.

Kuva 24 on esitetty hyvin työn aikana saatu käsitys älykkään sähköverkon sovelluskentästä ja niiden tarvitsemien yhteyksien toteutusvaihtoehdoista. Kuvassa tehtävät on jaettu kolmeen osaan: sähkön jakeluun ja laatuun, asiakkaan hallintaan sekä toiminnan hallintaan. Suurtuotantolaitokset, siirtoverkon suojaus ja tarkkailu sekä sähköasemat ovat yhdistetty sähköverkkoyhtiön toiminnalliseen keskuksen laajan kuituverkon avulla. Sähkönjakeluverkon automaation, paikallinen pientuotannon, sähköautojen lataus pisteiden sekä asiakkaiden kulutuksen ohjaaminen tapahtuu kuitu- ja langattomien liityntäyhteyksien avulla.



Kuva 24. Alcatel Lucentin ehdottama älykkään sähköverkon sovellukset ja tietoliikennetekniikat (Alcatel Lucent 2012a: 1).

7. ANVIAN TIETOLIIKENNEVERKKO JA PALVELUT

Anvian tietoliikenneverkko kattaa suurimman osan vanhan Vaasan läänin alueesta. Se tarjoaa oman verkkonsa alueella kuluttaja-asiakkaille laajakaistayhteyksiä ja niiden mukana niin sanottuja Triple Play- ja pilvipalveluita. Yritysasiakkaille tarjotaan yhteyksiä ja palveluita laajemmallekin alueelle.

Kiinteät laajaverkot toimivat Suomessa luonnollisena monopolina, jotta vältetään turha infrastruktuurin päällekkäisyys. Näin taloudellisesti järkevä tila saavutetaan yhdellä toimijalla. Laajaverkon omistaja voi siis toimia internetyhteyden tarjoajana, mutta muillekin osapuolille on tarjottava tasapuoliset olosuhteet. Langaton tietoliikenne haastaa langallisen siirtoverkon ja tietoliikennepalveluille on aitoa kilpailua.

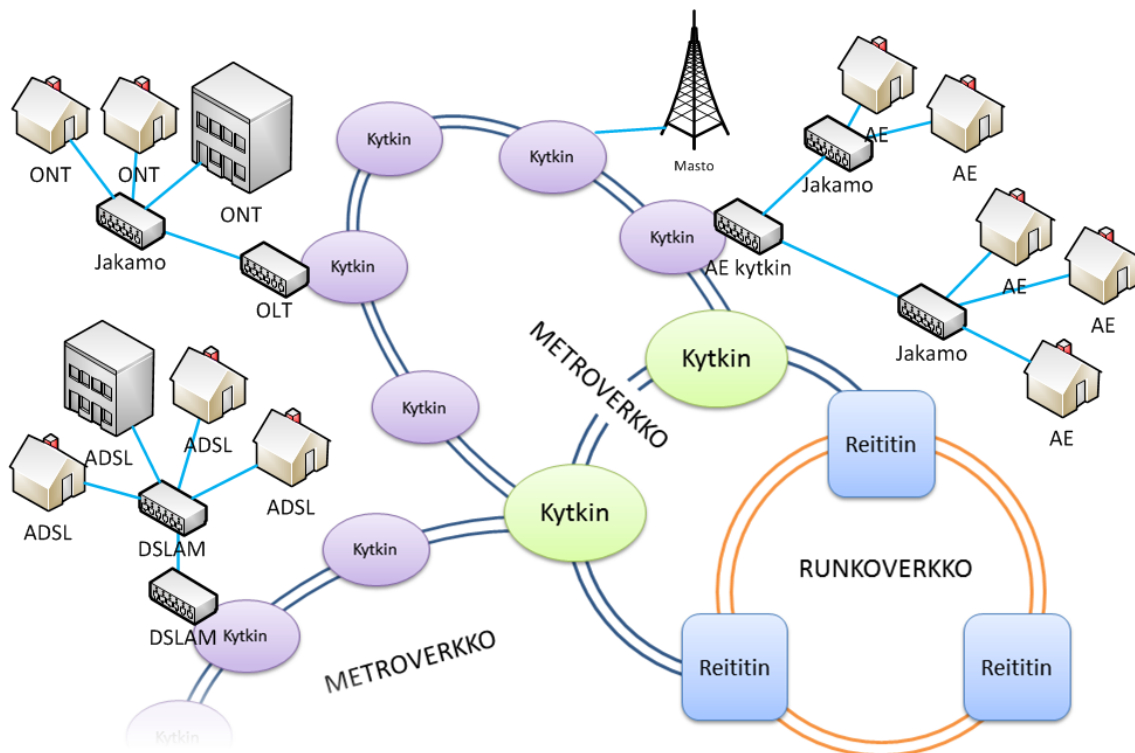
7.1 Tietoliikenneverkko

Anvian tietoliikenneverkon selkärangan muodostaa aluedataverkko, jotka on toteutettu laadukkailla Carrier Grade Ethernet -reitittimillä ja kytkimillä. Niiden välisenä siirtotienä toimii musta kuitu, joiden avulla muodostetaan korkean saatavuuden takaavia rengasverkkoja. Anvian tietoliikenneverkko on yhdistetty maailmanlaajuiseen tietoverkkoon ja sen alueella toimivat konesalit on liitetty suoraan aluedataverkkoon.

7.1.1 Anvian aluedataverkko

Kuva 25 mukaisesti Anvian aluedataverkko muodostuu runkoverkosta ja metroverkoista, jotka muodostavat useita maakuntia kattavia rengasverkkoja.

Aluedataverkko pystyy tarjoamaan jopa terabitin yhteyden käyttäen 100 Gb Full Duplex -portteja. Runkoverkon reitittimistä lähtevät metroverkot muodostavat ensin järeämpien kytkimien avulla renkaita reitittimien välille. Niistä lähtee laajemman alueen metroverkot, joiden liityntäpisteinä toimivat kytkimet ovat varavoimalla turvatuissa laitetoissa.



Kuva 25. Anvian aluedataverkon ja liityntäyhteyksien periaatekuva.

Runko ja metroverkko muodostavat IP/MPLS-kokonaisuuden, jossa asiakkaille voidaan luoda omat QoS-profiilit, joissa liikenne on priorisoitu vaatimusten mukaisesti. Lisäksi IP/MPLS mahdollistaa Ethernet-pohjaisten yksityisten virtuaaliverkkojen (VPLS) luomisen, jonka sisällä tieto kuljetetaan PTP käyttäen hyväksi yhteys kohtaisia tunneleita. Aluedataverkko tukee laajasti internet protokollan tietoturvaominaisuuksia (IPsec) ja on IPv6-yhteensopiva.

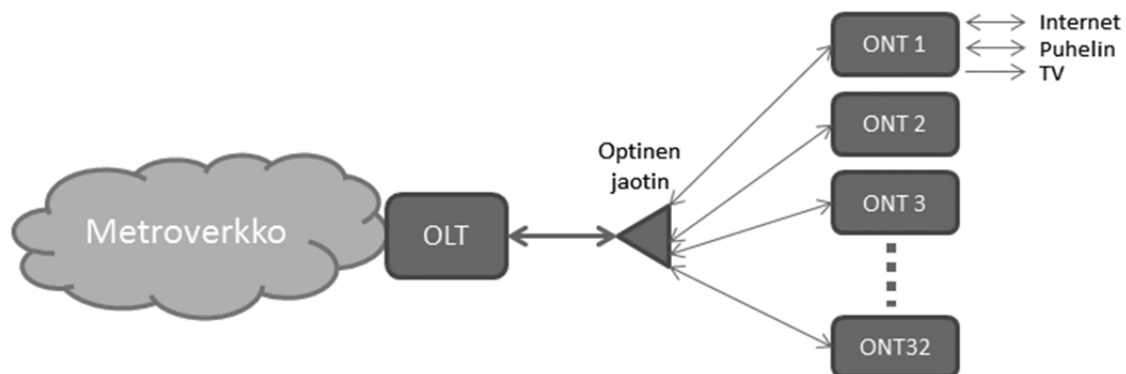
Aluedataverkko mahdollistaa palvelukohtaisen QoS-määrittelyn, jonka avulla yksittäisten palveluiden priorisointi alkupisteeltä päätepisteelle on mahdollista. Palvelumääritykset ja nopeusmääritykset voidaan tehdä valvomosta käsin. Nopeus voidaan muuttaa valvomosta ilman katkoja ja laitteistomuutoksia 1 Mbps:sta 100 Mbps:iin ja 100 Mbps:stä 1 Gbps:iin välillä.

7.1.2 Anvian liityntäyhteydet

Anvia tarjoaa asiakkailleen erilaisia vaihtoehtoja liittyä laajaverkkoonsa, jonka liityntäpisteinä toimivat metroverkon kytkimet. Nykyään uusissa liityntäyhteyksissä siirtotienä käytetään lähes poikkeuksetta kuitua, jonka lisäksi käytössä on paljon olemassa olevaa puhelin- ja kaapelitelevisioverkon kupariyhteyksiä. Anvian visiona on saada kuitu joka kotiin. Anvia tavoitteena alueellaan FTTX.

Liityntäverkon tekniikoina Anvialla on käytössä xDSL, Docsis, Active Ethernet ja GPON. Tulevaisuudessa valtaosa liityntäverkoista pyritään toteuttamaan passiivisella optisella verkolla, jonka kautta asiakkaalle pystytään tarjoamaan lukuisia IP-pohjaisia palveluita kilpailukykyiseen hintaan.

Anvian vision "Kuitu joka kotiin" mukaan se rakentaa noin 5000 uutta kuituliittymää vuodessa. Koska GPON on kapasiteettiinsa nähden edullinen tapa toteuttaa kuituliityntöjä asiakkaille, Anvia käyttää sitä uusien ja uudistettavien liityntäverkkojen tekniikkana. Tavoitteena on korvata koko kupariverkko kuidulla 10 vuoden aikana. GPON-liityntäverkkoa käytetään myös esimerkkitapauksessa tutkittuun sähköasemien kuituyhteyden tekniikkana, joten se esitellään tässä tarkemmin.



Kuva 26. Anvian GPON-liityntäverkon periaatekuva.

Kuva 26 on esitelty Anvian GPON-liityntäverkon periaatekuva. Optinen linjaterminaali (Optical Line Terminal, OLT) on liitetty Anvian metroverkkoon. OLT:lta liityntäverkko jaetaan enintään 32 asiakkaan kesken optisella jaottimella mahdollisimman lähellä asiakkaita. OLT:n ja Optisen verkkopäätteen (Optical Network Terminal, ONT) välinen etäisyys voi olla enimmillään noin 20 km. Jako tapahtuu joko erottamalla yksi asiakas kuidusta epäsymmetrisellä jakajalla tai yleisemmin jakamalla se kaikkien asiakkaiden kesken samassa pisteessä symmetrisellä tehojaottimella. GPON-verkon viestintä on suojattu 128-bittisellä AES-salauksella.

GPON-verkon projisointi hoidetaan metroverkon yli ja profiili on muokattavissa asiakkaan tarpeen mukaan.

7.1.3 Mastot ja WiMAX verkko

Anvialla on alueellaan kattava mastoverkko. Kaikista mastoista on kuituliityntä metroverkkoon. Anvia ei tarjoa asiakkailleen langatonta liityntäverkkoa, joten

mastot ovat pelkästään mobiilioperaattoreiden käytössä. Ne vuokraavat mastoista antennitilaa.

Anvia on aloittamassa vuonna 2013 PTM WiMAX -liityntäverkon testauksen Kokkolassa. Se tukee 32 pisteen liittämistä yhteen tukiasemaan. Anvialla on 3,5 GHz WiMAX lupa vuoteen 2015 asti.

7.2 Anvian valvomopalvelut ja konesalit

7.2.1 Anvian valvomo

Anvialla on valvomo, jossa valvotaan oman tietoverkon toimintaa sekä tarjotaan päiväsaikaan helpdesk-palveluita. Tämän lisäksi erityyppisiä valvomopalveluita tarjotaan ulkopuolisille tahoille, muun muassa muille teleyrityksille. Valvomopalveluihin on yhdistettävissä vikailmoitusten, hälytystarkkailun, vikojenselvitys sekä -korjaustoimintojen lisäksi erilaisia raportointi ja tiedottamispalveluita. Valvomo työllistää noin 20 henkilöä kolmivuorotyössä. Yöllä valvomo keskittyy kriittisten asioiden valvomiseen ja yön aikana tuleviin hälytyksiin.

Uuden palvelun liittäminen valvontajärjestelmään on helppoa, jos valvottava järjestelmä tukee yleisiä hälytysprotokollia kuten Simple Network Management Protocol (SNMP) Valvomossa on käytössä Anvian luoma monipuolinen reagointijärjestelmä, jolla pystytään hallitsemaan useampia eri valvontajärjestelmiä ja yhdistämään niiden tiedot. Tämän avulla pystytään hallitsemaan suuremmatkin vikatilanteet ja käynnistämään niiden selvitys ja korjaus. Mikäli uusi valvontajärjestelmä tuodaan mukaan, se on integroitava osaksi reagointijärjestelmää tai sille on tarpeen luoda valvomoon oma

valvontaympäristö. Valvonnan lisäksi reagointijärjestelmä kykenee hoitamaan asiakkaille tiedotettavan häiriöviestinnän tehokkaasti.

Palvelukeskuspalvelu: Anvian valvomon yhteydessä toimiva palvelukeskus voi toimia ulkopuolisen tahon palvelukeskuksena ottaen vastaan yhteydenottoja. Palvelun tilaaja määrittää muun muassa palveluajat ja palvelun piirissä olevat henkilöt. Osana palvelua voi olla asiakkaille tiedottaminen.

7.2.2 Anvian konesalit

Anvialla on konesaleja, joiden kautta asiakkaille voidaan tarjota monipuolisia ja turvallisia konesalipalveluita. Ne täyttävät valtionhallinnon tietoturvallisuuden johtoryhmän ja julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunnan asettamat vaativat viranomaismääräykset. Ne ovat fyysisesti korkean turvatason omaavia ja niissä on oma varavoimalaitteisto, jonka avulla konesali ei ole riippuvainen ulkoisesta energian syötöstä. Konesaleja valvotaan ympäri vuorokauden.

Tämän lisäksi konesalit täyttävät tietoturvallisuus määräykset ja jatkuvaa tietoturva valvonta ehkäisevät palvelimien kohtaamat tietoturvauhat. Palvelimille tallennetut tiedot kahdennetaan ja varmuuskopioidaan suunnitelmallisesti, jotta tietojen menetysmahdollisuus minimoidaan. Nopean yhteyden takaamiseksi konesalit on yhdistettynä Anvian runkoverkkoon. Niiden kautta asiakkaille tarjotaan monipuolisia palveluita, joita ovat palvelinhotelli, laitetilaa, virtuaalipalvelimet, infrastruktuuri palveluna (IaaS) ja sovellus palveluna (SaaS).

7.3 Anvian palvelutasosopimus

Tavallinen kuluttajille suunnattu laajakaistaliittymä ei sisällä erillistä palvelutasosopimusta (Service Level Agreement, SLA). Se tarkoittaa, että käyttäjälle pyritään tarjoamaan mahdollisimman korkeatasoinen laajakaistayhteys, mutta ei erillisiä saatavuusmääritelmiä, yhteydenvalvontaa tai raportointimekanismeja.

Anvia tarjoaa yritysasiakkailleen mahdollisuuden erilliseen palvelutasosopimukseen. Palvelutasosopimus määrittää palvelulle erilaisia vaatimuksia, kuten palvelun valvonta, vianhallinta, palveluaika ja vikaluokitus. Palvelutasojen sisällöstä sovitaan asiakkaan kanssa niin, että niiden avulla pystytään takaamaan asiakkaan määrittämät saatavuus, vasteaika, mittaus, raportointi, valvonta, vianselvitystyön vastaanottoaika, korjausaika vaatimukset.

8. ESIMERKKITAPPAUS VAASAN SÄHKÖVERKOT OY:N SÄHKÖPÄÄASEMIEN TIETOLIIKENNE YHTEYDET

Vaasan sähköverkot Oy (VSV) on Vaasan kaupungin liikelaitos, joka on vastuussa sähkönjakelusta Kuva 27 esittämällä alueella. Vuoden 2013 alussa kuntaliitoksen myötä myös Vähäkyrö siirtyy VSV:n vastuualueeksi. Vastuualueella VSV:llä on reilu kaksikymmentä sähköpääasemaa, joiden kautta jakeluverkkojen syöttö tapahtuu. Sähköasemien etähallintaan valvomosta käytetään ABB:n Micro-SCADA järjestelmää. Nykyiset tietoliikenneyhteydet ovat rakennettu uuden yhteystarpeen tullessa parhaaksi katsotulla tekniikalla. Toteutukset ovat hyvin erilaisia ja niistä suurin osa kulkee jossain vaiheessa Anvian metroverkon kautta.



Kuva 27. Vaasan sähköverkot Oy:n sähkönjakeluvastuualue.

DI-työn osana on tutkittu Anvian tietoliikenneverkon sopivuutta älykkään sähköverkon tarpeisiin. Esimerkkitapauksen vaatimusten määrittämiseksi käytiin sähköpostikeskustelua sekä järjestettiin kaksi tapaamista. Haastattelujen perusteella todettiin, että sähköasemien liittämiseksi metroverkkoon soveltuu parhaiten GPON-liityntätekniiikka. Osana esimerkkitapausta tehtiin selvitys kaikkien VSV:n sähköpääasemien liittamisestä Anvian kuituverkkoon GPON:in avulla. Tarkemman teknisen kuvauksen antamiseksi esitellään Vähänkyrön alueella sijaitsevan Torkkolan sähköaseman yhteys tarkemmin.

8.1 VSV:n vaatimuksien tarkastelu Anvian verkon suhteen

Vaasan sähköverkot Oy:n yhteyshenkilöiden kanssa käydyissä tapaamisissa ja sähköpostikeskustelussa kävi ilmi, että VSV:n sähköverkon nykyinen tietoliikenne sisältää Vaskiluodon voimalan ja sieltä tulevan suurjännitelinjan differentiaalitarkkailua, jakeluverkon sähköasemien etäohjausta ja tarkkailua sekä etäluettavien mittarien päivittäistä tiedonkeruuta. Voimalaitoksen toiminnan ja sen siirtojohdon differentiaalitarkkailun kriittisyyden takia yhteys on toteutettu kuidulla. Etäluettavien mittareiden arvot luetaan joka yö. Suurin osa mittareista luetaan keräämällä mittaustulokset PLC:n kautta muuntokaapin keskittimeen, josta ne siirretään GPRS-yhteyden yli tietokantoihin, mutta osa mittareista on suoraan GPRS-yhteydessä. Sähköpääasemien yhteydet on rakennettu tarpeen mukaan ja niissä on käytössä hyvin erilaisia ratkaisuja sarjaliikenteestä lähtien. Suurin osa on kuitenkin nykyisellään toteutettu ADSL-liittymällä Anvian laajaverkon yli.

Etätarkkailuun ja ohjaukseen käytetty SCADA-järjestelmä toimii ikään kuin sähköaseman kaukosäätimenä siten, että paikallinen automaatio ei ole siitä riippuvainen, mutta etäyhteyden katketessa mahdollinen automaation ohjaus on tehtävä paikanpäällä. Tämän takia nykyisen järjestelmän saatavuus- ja

viivevaatimus ei ole kriittinen, mutta verkon vikatiloissa yhteyden katkeaminen tarkoittaa huomattavaa lisätyötä ja viivettä. Sen lisäksi SCADA-järjestelmästä saatavia sähköverkon tilatietoja käytetään hyväksi verkkosivuilla toimivan vikatilannekartan kautta toimivaan asiakastiedottamiseen. Verkon toiminta on nähtävissä melko tosiaikaisesti VSV:n verkkosivujen kautta. Vaikka viimeisin usean päivän sähkökatkoja aiheuttanut talvimyrsky ei vaikuttanut vakavasti VSV:n alueella, on jakeluverkon automaation ja sähkönjakelun parantaminen yhtiöllä jo suunnitteilla. Lisäksi alueella on jo useampia pientuottajia, jotka syöttävät sähköä verkkoon. Nykyisellään niiden energiasta ei makseta todellista kWh-hintaa, vaan paikkakohtaisten sopimusten mukainen kiinteä hinta.

Seuraavissa aliluvuissa esitellään keskusteluissa esille tulleita sähköaseman ja valvomon välisen tietoliikenneyhteyden vaatimuksia ja tarpeita.

8.1.1 Saatavuus ja palvelutaso

Korkea saatavuus, mutta ei nykyisellään kriittinen. Yhteyksien **jatkuva valvonta** ja vikailmoitusten vastaanotto. Vioittuneen yhteyden **korjaus alle 24 h**. Tietoliikenteen **priorisointi kriittiseksi** verrattuna kuluttajalaajakaistayhteyksiin.

Anvian runko- ja metroverkossa on erinomaiset palvelun projisointi mahdollisuudet, jonka avulla halutut yhteydet ja sovellukset on priorisoitavissa. Samat priorisoinnit ovat tehtävissä GPON-liityntäyhteyteen, joka tukee metroverkon projisointia. Kriittisimpänä saatavuuden kannalta on liityntäverkko, jonka mahdollinen poikki kaivaminen aiheuttaa pidemmän viiveen. Tätä pyritään ehkäisemään tiedottamalla, kaapeloinnin karttapalvelulla ja merkitsemällä kaapelit maahan.

Valvonta, vian käsittely ja korjauksen priorisointi määritellään SLA-sopimuksessa. VSV:n toivomiin vaatimuksiin päästään vain Anvian korkeimman SLA-tason avulla, jolloin korkea saatavuus ja 24/7 viankorjaus voidaan taata.

8.1.2 Viiveherkkyys

Ei aikariippuvainen. Yhteyden viivevaatimus SCADA-järjestelmän osalta on valvovan ihmisen vasteaika odotus eli n. 100 ms–500 ms. **Tulevaisuudessa** SG:n tietoliikenne vaatii alle **100 ms** viiveen täyttymistä ja kriittisille IEC 61850 -viesteille alle **10 ms**, jopa alle **2 ms** viivettä.

Älykkään sähköverkon yleiseksi viivevaatimukseksi on asetettu 100ms (mm. SGOE), jonka ulkopuolelle jää täysin aikariippumaton viestintä. Tietyille suojalaitteiden viestinnälle ja ohjaukselle on asetettu tarkempia viivevaatimuksia, niin kuin luvussa 6 on esitetty.

Anvian kuituverkko on hyvin viivevarma, siinä käytetään End-to-End IP/MPLS -reititystä, jonka avulla viestit voidaan priorisoida ja kuljettaa hyvin nopeasti vastaanottajalle. Se pystyy ongelmitta täyttämään 100 ms vaatimuksen liityntäverkot mukaan lukien.

8.1.3 Sähkökatkot

Tietoliikenneyhteyksien on toimittava erityisesti **sähköverkon vikatilanteessa**. Myrskytuhojen aikaan sähkökatkot voi kestää useamman päivän.

Sähköverkkoyhtiöiden erityisvaatimuksena on, että kriittisten tietoliikenneyhteyksien tulee toimia pitkänkin sähkökatkon aikana. Anvian runko- ja metroverkko ovat hyvin toimintavarmoja myös sähköverkon vikatilanteissa, koska lähes kaikki sen laitetilat ovat varustettu kiinteällä varavoimageraattorilla. Muutamat pienemmät tilat on varustettu 3-24 h akuilla ja niihin on lisäksi liitettävissä varavoimakone, jollainen löytyy alle yhden tunnin siirtomatkan säteellä.

Esimerkkitapauksen liityntäverkoiksi valittiin GPON, jossa ei tarvita sähkökatkoille alttiita aktiivisia kentälaitteita. GPON-verkon OLT on samassa laitetilassa metroverkon laitteiden kanssa, joten sillä on sama varavoima. Asiakaspään toiminta sähkökatkon aikana on kiinni paikallisesta virransyötöstä. Sähköasemilla tämä ei ole ongelma, koska niillä on omat akustot ja jonka lisäksi syöttövirta tulee myrskyvarmasta siirtoverkosta.

8.1.4 Datamäärät ja skaalautuvuus

Nykyiset **datamäärät** ovat **pieniä**, mutta tarve tulee kasvamaan. Sähköverkon automaation tietoliikenne on **symmetristä**. Lisäksi tulevaisuudessa ollaan kiinnostuneita kaistaa vaativista palveluista kuten mekaanisten erotinlaitteiden valvontakuvien ja turvakameroiden videokuvan siirtämisestä.

GPON-yhteydellä voidaan helposti tarjota usean palvelun kattava liityntäyhteys, joten nykyiset datamäärät eivät ole ongelma. Tulevaisuudessa kaistan tarpeen lisääntyessä sähköasemayhteydelle voidaan projisoida suurempi kaista ilman laitteiston vaihtamista. Metro- ja runkoverkolle suuretkaan datamäärät eivät ole ongelma. Anvian metroverkon kattavuus ja jatkuva liityntäverkkojen lisääntyminen mahdollistaa uusien yksiköiden kytkemisen verkkoon tulevaisuudessa.

8.1.5 Synkronointi

Eri sähköasemien sisäverkon laitteiden keskinäinen **synkronointi** on tarpeen, jotta vikatilanteiden analysointi paranee. Synkronoinnin tulisi pystyä reilusti **alle vaihtosähkön jakson** (20 ms).

GPON OLT on synkronoitavissa metroverkon kautta, mutta IEC 61850:ssa ehdotettu PTP-synkronointi ei ole siirrettävissä GPON yhteyden yli sellaisenaan, koska GPON toimii TDM-pohjaisena toisin kuin Ethernet. Calix (2010) esittelee kuitenkin mahdollisia tapoja PTP-synkronoinnin siirtämiseen GPON-yhteyden yli. Vaihtoehtoisesti sähköasemien synkronointi on mahdollista hoitaa GPS-kellon avulla (Xiao 2012:197).

8.1.6 Vastuutaho

Tietoliikenneyhteyksillä tulisi olla ainoastaan **yksi vastuutaho**, jolloin mahdollisissa vikatilanteissa vastuuta ei voida siirrellä taholta toiselle vaan vastuuoperaattori keskittyy ongelman ratkaisemiseen.

Yleisesti kaikissa haastatteluissa kävi ilmi, että yhtenä vaatimuksena on, että tietoliikenneyhteyksille on vain yksi vastuutaho. Anvia pystyy tarjoamaan täyden tietoliikennepalvelun sähköasemien tietoliikenteelle. Jakeluverkkoon hajasijoitettavien IED:n yhteyksien tarjoamista varten tulee tutkia esimerkiksi WiMAX-liityntäyhteyden tarjoamismahdollisuuksia. Mikäli mobiiliverkon käyttö näyttää tarpeelliselta, huomionarvoista on, että suurin osa mobiiliverkon liikenteestä VSV:n alueella kulkee Anvian metroverkon kautta, joten se on joka tapauksessa vahvasti riippuvainen Anvian verkon toiminnasta.

8.1.7 Tietoturva

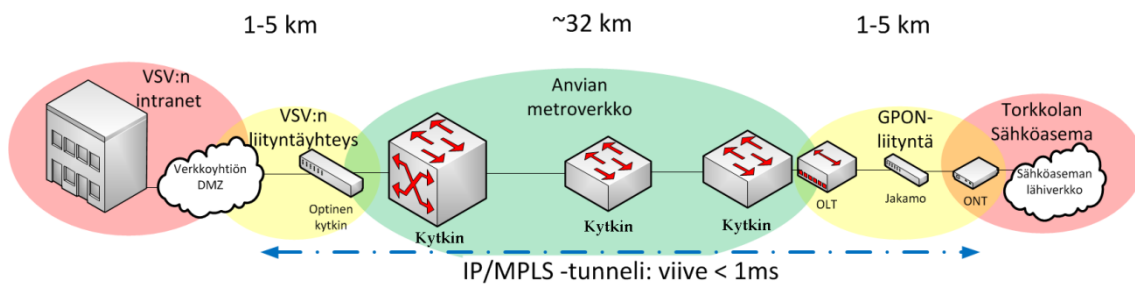
Tämä on sähköverkkoyhtiön kannalta kriittisin kysymys, joka vaikuttaa siihen, että voidaanko yhteyksissä käyttää julkista verkkoa. **Tietoturvan** on aktiivisesti **estettävä tietomurrot ja varmistettava tiedon manipuloimattomuus**. Kommunikaation osapuolet on pystyttävä **varmistamaan ja tunnistamaan**.

GPON-liityntäverkkossa viestit on salattu käyttäen vahvaa AES-128 -salausta. Tämä estää viestien manipuloinnin ja salakuuntelun. Lisäksi verkon laitteet kättelevät yhteyden avaamisen yhteydessä, minkä avulla asiakkaan laite tunnistetaan. Lähetetty viesti siirretään metro- ja runkoverkkoa käyttäen vastaanottajalle, kuten valvomolle tai muille sähköasemille. Metro- ja runkoverkossa yhteydet on priorisoitu ja niiden siirtämiseen käytetään MPLS-tekniikkaa, minkä avulla halutut suojaukset ja muut vaatimukset täytetään. MPLS on pitkään käytössä ollut ja yleisesti erittäin turvalliseksi todettu protokolla. Sen tarjoaman IP tason tietoturvatekniikat (IPsec) toimii sovelluksesta riippumatta mahdollistaen useamman verkon tai laitteen suojatun yhdistämisen jaetun verkon yli. Näin liikenne on täysin eristetty muusta verkon liikenteestä. MPLS pystyy tarjoamaan paremman turvallisuuden kuin sovellustason VPN, joka ainoastaan salaa erillään olevien verkkojen välisen liikenteen. (Laverty et al. 2011: 3.)

8.2 Torkkolan sähköpääaseman tietoliikenneyhteys

Esimerkkitapauksen tarkasteltavaksi valittiin pikaisesti tietoliikenneyhteyttä tarvitseva Vähänkyrön uudella toimialueella sijaitseva Torkkolan sähköpääasema. Valvomon ja sähköaseman välinen ensisijainen tietoliikenneyhteys kulkee metroverkossa kolmen kytkimen kautta. Koko yhteys on esitetty Kuva 28. Sähköverkon valvomoon on kuituyhteys, mutta koska tarkka

tekniikka ei ole tiedossa, teemme oletuksen suorasta kuituyhteydestä. Eteisverkon (Demilitarized Zone, DMZ) viive on riippuvainen toteutuksesta, eikä työssä tutustuttu tarkemmin VSV:n DMZ:taan. Se voi kuitenkin toteutuksesta riippuen lisätä merkittävästi End-to-End -viivettä. (Schneier 2000: 193). Kytkimien aiheuttama viive on ylimitoitettu ja arvona käytetty 25 μ s/kytkin (CISCO 2007: 2).

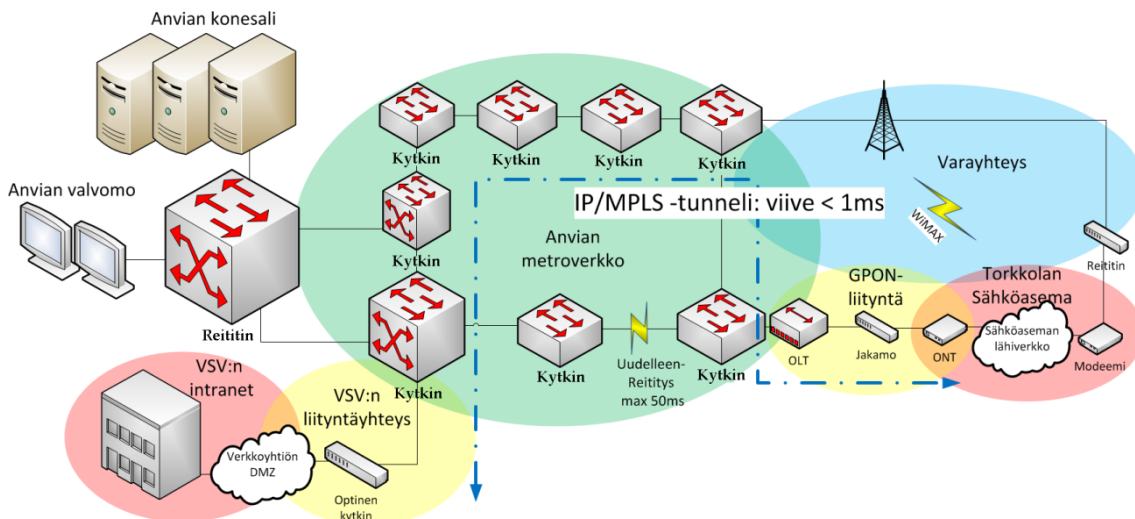


Kuva 28. Torkkolan sähköaseman yhdistäminen Anvian verkon kautta sähköverkon valvomoon.

Sähköaseman liittymäyhteyden nopeudeksi on ehdotettu 1 Mbps:a, joka on tarvittaessa nostettavissa aina 100 Mbps:iin ilman laitteiden fyysisiä muutoksia. Esitellyn yhteyden RTT jää verkon osalta huonoimmillaankin alle 1 ms. Koska yhteys täyttää hyvin tiukan viivevaatimuksen, ei käytännön testaamista nähty työn kannalta merkittäväksi.

Mikäli GPON-liittyttyähteyden kuitu kaivetaan poikki, on yhteyden korjaus mekaanista ja siten aikaa vievää. Tämän takia sähköasemien yhteys tulee kahdentaa kuidulla tai langattomalla yhteydellä, mikäli yhteyden kriittisyys tulevaisuudessa kasvaa. VSV:n nykyinen vaatimus, että yhteys tulee korjata alle 24 tunnissa, pystytään takaamaan Anvian SLA-3 -tasolla.

Koska metroverkko on rengastettu, sen yksittäisestä viasta johtuva uudelleenreititys MPLS-tekniikalla enimmillään 50 ms. Kuva 29 on esitetty Torkkolan aseman uudelleen reititys, mikäli välillä oleva kuitu tai laite vikaantuisi.



Kuva 29. Torkkolan aseman varayhteys ja metroverkon uudelleen reititys vikatilanteessa. Anvian konesali ja valvomo on yhdistetty suoraan runkoverkkoon.

8.3 Valvomo ja konesali palveluntarjoajalta

Tarkastelemme hieman tarkemmin mahdollisuutta yhdistää sähköverkon valvomotoimintoja Anvian valvomopalveluihin ja konesalien siirtämistä Anvian konesaleihin. Kuva 29 on lisäksi esitelty Anvian konesalin ja valvomon suhde metroverkkoon.

8.3.1 Älykkään sähköverkon integrointi palvelinsalissa

Luvun 6.5 kaltainen SG:n sovellusten tietoliikenneverkon tasolla mahdollistettu integrointi takaa nykyisten järjestelmien kustannustehokkaan yhdistämisen ja uusien sovellusten toteuttamisen. Sovellusten keräämien tietojen tulee olla tarkkaan rajattujen määritelmien avulla muiden sovellusten käytössä, mahdollistaen SG:n optimoinnin ja automaattisen ohjauksen. Tietovarastona käytettävän konosalin tulee olla suojattu fyysisiltä uhkatekijöiltä ja korkean tieturvaton täyttävä, mutta kuitenkin monipuolisten ja nopeiden julkisten yhteyksien takana.

Mikäli käytetään Anvian nopeita ja rengastettuja kuituyhteyksiä on luonnollista käyttää Anvian verkossa olevia tehokkaita konesaleja, joihin on aina pääsy verkosta käsin ja ne on tarpeen mukaan kahdennettu vähintään kahteen eri paikkaan. Näin tietojen katoaminen voidaan estää ja pääsy palvelimelle on turvattu, vaikka jotain odottamatonta tapahtuisi. Tällä tavalla voidaan taata huomattavasti parempi saatavuus verrattuna yksittäisen liityntäyhteyden ja sähköverkkoyhtiön DMZ-verkon takana sijaitsevaan tietojärjestelmään.

Kriittisintä on Kronmanin (ABB haastattelu) mukaan se, miten käytettävyys voidaan taata erinäisissä vikatilanteissa. Anvian konesalit on fyysisesti suojattu sekä niiden toiminta ja jäähtytys on turvattu varavoimageneraattoreilla, joten tiedot on saatavilla sähkökatkostenkin aikana.

Monipuolisten SG-sovellusten kannalta olisi hyvin järkevää sijoittaa vähintään SGOE:n kaltainen optimointimoottori korkean turvallisuuden ja saatavuuden tarjoavaan konesaliin, jonne on pääsy julkisesta verkosta. Anvian konesalipalvelut ovat tähän tarkoitukseen erinomaisesti sopiva vaihtoehto. Sovellusten kannalta Anvian SaaS- ja IaaS-palvelut olisivat myös ajankohtaisia. Erona näiden välillä on, että IaaS-palvelussa sovelluksen runko on sijoitettu

Anvian konesaliin, mutta käyttäjällä on omalla koneella asennettuna sovelluksen käyttöliittymä. SaaS-palvelussa koko sovellus on palvelimella, jolloin sen käyttö ei ole riippuvainen käyttäjän koneesta vaan se on laajemmin autentikoitujen henkilöiden käytettävissä.

8.3.2 Sähköverkon valvomopalveluiden ulkoistaminen

VSV:n tapaamisissa tuli esille, että valvomotyöskentely on yleisesti mekaanista toimintaa, jossa tarkkaillaan vikatilanteita, otetaan vastaan vikailmoituksia, käynnistetään tarvittavat huoltotoimenpiteet ja raportoidaan verkon tilasta. Tapaamisissa pohdittiin olisiko mahdollista siirtää valvomopalvelut virka-ajan ulkopuolella Anvian valvomopalveluksi.

Mahdollisesta sähköverkon valvomisesta on tehtävä tarkempi selvitys. Ensisijaisesti on syytä selvittää, minkälaisia erityisvaatimuksia sähköjakeluverkon valvomotyöskentelylle on ja onko Anvian valvomossa mahdollista täyttää ne vaatimukset. Lisäksi tulee selvittää, ovatko sähköverkon hälytykset tuotavissa valvomon reagoitijärjestelmään sopivassa muodossa, vai onko niitä varten kehitettävä oma rajapinta tai erillinen valvontaympäristö.

Valvomon yhdistäminen on ainakin tehokkuusmielessä houkutteleva ajatus. Anvia tarjoaa tällä hetkellä ympärivuorokautista valvontaa useille ulkoisille tahoille ja on kehittänyt omaa hälytysjärjestelmää, joka lisää hälytysten automaattista korjaamista, ohjeistaa tarvittavien huolto- ja korjaustoimien aloittamisessa, opastaa huoltohälytyksissä ja pitää yllä ”huoltorinkiä”, josta virka-ajan ulkopuolella saadaan huoltomiehet korjaamaan verkon ongelmat.

8.4 Huomioita Anvian verkon soveltuvuudesta ja kehitysideoita

Suurena etuna voidaan pitää, että Anvian verkko kattaa lähes täydellisesti VSV:n toimialueen. Ainoastaan yksi sähköasema on Anvian kuituverkon ulkopuolella. Siinä puuttuva yhteys on mahdollista vuokrata paikalliselta toimijalta.

Yleisesti DI-työn aikana tehtyjen haastattelujen aikana ei tullut esillä mitään tarkkoja vaatimuksia SG:n tietoliikenneyhteyksille. Tämä oli yleinen piirre kaikille haastatteluille, eli sähköverkon toimijoilla ei tunnu vielä olevan tarkkaa käsitystä, mitä tulevaisuuden älykäs sähköverkko tarkalleen sisältää ja miten sen toiminnallisuus toteutetaan. Yleinen asenne yhteyksiin oli, että sähköasemat yhdistetään kuituyhteydellä ja jakeluverkon hajautetut IED:t langattomasti.

8.4.1 Langaton liityntäverkko

Täyttääkseen tulevaisuuden älykkään sähköverkon tarpeet on Anvian pystyttävä tarjoamaan langaton liityntäyhteys jakeluverkon yksittäisille hajautetuille laitteille, joihin langallisen liityntäyhteyden tarjoaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Edellä mainittu yhteys on yleisesti ajateltu tarjottavan LTE-, WiMAX- tai sensoriverkkotekniikalla.

LTE:n ongelma on, että se on vasta tuloillaan ja on mahdotonta arvioida, koska se on sähköverkon kannalta kattavasti käytettävissä. Lisäksi LTE-lisenssi on maan kattava ja siten erittäin kallis joten sen ostaminen sellaisenaan ei näytä kannattavalta vaihtoehdolta. LTE voi tulevaisuudessa olla Anvialle mahdollinen liityntäteknikka, jos mobiiliverkkoihin tulee kiinteiden verkkojen tapaan velvollisuus tasapuolisesta kaistan vuokraamisesta.

Anvialla on alueellaan kattava kuidutettu mastoverkko, jonka avulla metroverkkoon kytketty WiMAX-liityntäverkko olisi mahdollista toteuttaa. Ficora on lisensoimassa 1,5 GHz taajuutta sähköverkkoautomaation käyttöön ja sille on tällä hetkellä haettavissa vuoden koelupia. Luvussa 6.7 on esitetty lupaavia koetuloksia WiMAX-tekniikan toimivuudesta sähköverkkoautomaation liityntäyhteytenä. Testin mukaan WiMAX-yhteydellä on mahdollista päästä alle 10 ms viiveisiin, jolloin myös vaativia suojatoimintoja voisi toteuttaa langattomasti. Sen perusteella WiMAX-liityntäverkko soveltuisi myös sähköasemien varayhteydeksi mahdollisen GPON-liityntäyhteyden poikkikaivuun varalta, jolloin sähköasemien saatavuus tae voitaisiin nostaa entisestään.

Tulevaisuuden skenaarion kannalta WiMAX-liityntäverkko parantaisi Anvian riippumattomuutta, sillä kaikki yhteydet olisivat tarjottavissa omien laitteiden kautta, jolloin langattoman liityntäverkon osaltakin riippuvaisuus muista operaattoreista poistuisi.

Anvian kannattaa myös tutkia sensoriverkon ja Wifi-mesh verkon mahdollisuuksia älykkään sähköverkon kotiautomaation käytössä. Ne jätetään kuitenkin tulevaisuuden tutkimukseksi. Mesh-verkon avulla toteutettu etäluku voisi kerätä mittaritiedot taloyhtiön kuituliitintään, mistä ne siirtyisi metroverkkoon. Tämän avulla toimisi myös nopea kaksisuuntainen ohjaus ja hintaprofiilien syöttö.

8.4.2 Synkronointi

VSV:llä oli toive tarkasta sähköasemien välisestä synkronoinnista, jolloin esimerkiksi sähköverkon hälytysten aikaleiman avulla saadaan tietää missä järjestyksessä eri vikatilanteet on havaittu. GPON-verkko ei pysty sellaisenaan

siirtämään IEC 61850:n ehdottamaa PTP-synkronointia. PTP-tuki ei tällä hetkellä ole vaatimuksena sähköaseman tietoliikenteelle, mutta sen mahdollisuutta on hyvä tutkia. Vaihtoehtoina on esimerkiksi käyttää sähköasemilla GPON:n tarjoamaa omaa synkronointia tai GPS-kelloa. Mikäli PTP tulee vaatimukseksi sähköasemien välille, kannattaa tutustua Calix (2010) esittelemiin mahdollisuuksiin siirtää Ethernet synkronointi GPON:n yli.

8.5 Triple Play- ja SG-palveluiden yhdistäminen

Vaasan sähköverkko Oy:n älykkään sähköverkon- ja Anvian Triple Play palveluiden yhdistäminen käyttäen kuituverkkoa ei ole ainutlaatuinen ajatus. Chattanooga kaupungin energiayhtiö Electric Power Board of Chattanooga (EPB) päätti rakentaa alueelleen täysin kattavan kuituverkon (FTTX), jonka avulla se tarjoaa asukkailleen Triple Play -palveluiden lisäksi SG-palvelut. Alue on 1600 km² ja asiakkaita on 170 000. Kuituverkon ja älykkäiden kytkimien asentaminen sähköjakeluverkon suojaksi maksoi yli 200 M\$ (1200 \$/asiakas), johon USA:n valtio antoi lähes puolet tukea. (DoE 2011.)

Alueelle on asennettu 1500 älykästä erotinasemaa, eli yksi erotin jokaista 113:a asukasta kohden. Niiden avulla myrskyistä ja tornadoista kärsivän alueen asukkaiden ja yritysten on laskettu säästävän 35 M\$ sähkökatkojen vähentyessä merkittävästi. Lisäksi FTTX:n on laskettu lisäävän alueen vetovoimaisuutta huomattavasti yritysten silmissä tuoden alueelle lisää työpaikkoja. (DoE 2011.)

Samankaltaista tietoliikenneverkkoratkaisua SG:lle esittää Lévesque & Maier (2012) artikkelissaan, jossa älykkään sähköverkon tietoliikennetoteutukseksi ehdotetaan yleisesti kuitupohjaista runkoverkkoa ja passiivista ethernet-liityntäverkkoa (Ethernet Passive Optical Network, EPON). Paikallinen tietoliikenneverkko muodostetaan WSN:n avulla. Syrjäisille kenttälaitteille,

jotka ovat WSN verkon ulkopuolella, ehdotetaan WiMAX tai LTE-yhteyttä. Tärkeimpänä tekijänä pidetään kuituverkon tarjoamaa korkeaa laatua, matalaa viivettä ja QoS-takuuta.

Vaasan sähköverkoilla on Anvian kanssa hyvä mahdollisuus tarjota alueellaan edistyneen älykkään sähköverkon mahdollistava infrastruktuuri ja palvelut. Sen toteuttamista voitaisiin pitää merkittävänä käytännön pilottihankkeena, johon olisi mahdollista hakea tutkimus- ja kehitysrahoitusta. Yhtenä mahdollisuutena olisi yhtiöittää useamman sähköverkkoyhtiön tietoliikenne omaan yhtiöönsä, jossa Anvia olisi mukana ja näin edistää alueellisen älykkään sähköverkon suunnittelua ja toteutusta sekä jakaa kuluja.

9. TULOSTEN ARVIOINTI JA PÄÄTELMÄT

Diplomityö esittelee älykkään sähköverkon tulevia sovelluksia ja niille sopivia tietoliikenneyhteyksien tekniikoita. Työn edetessä kävi selväksi, että jokainen tietoliikenneyhteys on ainutkertainen ja eri tekniikoiden yleistä soveltuvuutta tietyille sovelluksille on mahdotonta tarkasti selvittää. Varmuudella voidaan kuitenkin todeta, että mikäli tekniikan teoreettiset ominaisuudet eivät pysty täyttämään sovelluksen vaatimia tiedonsiirtomääriä ja viivevaatimusta on tekniikka käyttökelvoton.

Työn aikana Vaasan sähköverkkojen kanssa tehty esimerkkitapaus osoittaa, että Anvialla on hyvät mahdollisuudet tarjota älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksiä laajemminkin. Jakeluautomaation yhdistäminen Anvian verkkoon vaatii kuitenkin langattoman liityntätekniiikan käyttöä, mitä Anvialla ei tällä hetkellä ole tarjota. Tarjotakseen täyden palvelun tietoliikenneyhteydet älykkäälle sähköverkolle tulee Anvian tutkia eri mahdollisuuksia. Työ osoittaa, että lähitulevaisuudessa parhaiten soveltuva tekniikka olisi WiMAX.

Työssä on esitetty, että edistyneen älykkään sähköverkon eri sovellusten integrointi tulee tapahtua verkkotasolla. Mikäli Anvian tietoliikenneverkko toimii älykkään sähköverkon yhteytenä, soveltuisivat Anvian konesalit erittäin hyvin integroimiseen tarkoitettun optimointimoottorin sijoituspaikaksi.

LÄHTEET

- ABB (2009). *Energian internet pian todellisuutta*. ABB:n asiakaslehti Power & automation 2/2009. s.10-14.
- ABB (2010a). *ABB review special report: IEC 61850* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/ba5c0d1cacc015a7c12577840033f1a2/\\$file/abb_sr_iec_61850_72dpi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/ba5c0d1cacc015a7c12577840033f1a2/$file/abb_sr_iec_61850_72dpi.pdf)>. ISSN 1013-3119.
- ABB (2010b). *Toward a Smarter Grid: ABB's Vision for the Power System of the Future* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:[http://www02.abb.com/db/db0003/db002698.nsf/0/e30fc9d5f79d4ae8c12579e2002a4209/\\$file/Toward_a_smarter_grid_Jul+09.pdf](http://www02.abb.com/db/db0003/db002698.nsf/0/e30fc9d5f79d4ae8c12579e2002a4209/$file/Toward_a_smarter_grid_Jul+09.pdf)>.
- Ahmad, Jakaria & Rumel M. S. Rahman Pir (2011). *UWB- The Technology for Short-Range High-Bandwidth Communications*. International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS) volume 2 numero 1.
- Alcatel Lucent (2012). *Architecting Wireless Field Area Networks* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://enterprise.alcatel-lucent.com/docs/?id=21370>>.
- Alcatel Lucent (2012b). *Dynamic Communications for the Smart Grid* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://enterprise.alcatel-lucent.com/private/images/public/si/pdf_powerUtilities.pdf>.
- Anvia Oy (2011). *Vuosikertomus 2011* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.anvia.fi/fi-FI/Konserni/sijoittajat/hallinnointi/yhtiokokous/Documents/Vuosi2011_web.pdf>.
- Asif, Saad Zaman (2010). *Next Generation Mobile Communications Ecosystem : Technology Management for Mobile Communications*. Wiley:Hoboken. ISBN: 9780470747469.

- Cale, Ivica; Aida Salihovic & Matija Ivekovic (2007). *Gigabit Passive Optical Network - GPON*. Proceedings of the ITI 2007 29th Int. Conf. on Information Technology Interfaces, Croatia.
- Calix (2010). *Asymmetric Networks (xPON etc.) - Timing Solutions* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.chronos.co.uk/files/pdfs/itsf/2010/Day3/02-Asymmetric_Network_Timing_Solutions.pdf>.
- Carvalho, Andres & John Cooper (2011). *The Advanced Smart Grid : Edge Power Driving Sustainability*. Norwood: Artech House. 267 s. ISBN 978-1-60807-127-2.
- Castellani, Angelo; Giulio Ministeri, Marco Rotoloni, Lorenzo Vangelista & Michele Zorzi (2012). *Interoperable and globally interconnected Smart Grid using IPv6 and 6LoWPAN*. 3rd IEEE International Workshop on Smart Communications in Network Technologies.
- Chakravorty, Rajiv; Ian Pratt & Jon Crowcroft (2003). *A Framework for Dynamic SLA-based QOS Control for UMTS*. IEEE Wireless Communications, October 2003. s. 30-37.
- Cisco (2007). *Design Best Practices for Latency Optimization* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Financial Services Technical Decision Maker White Paper. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns407/c654/ccmigration_09186a008091d542.pdf>.
- Cisco (2011). *A Standardized and Flexible IPv6 Architecture for Field Area Networks* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Cisco white paper. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.cisco.com/web/strategy/docs/energy/ip_arch_sg_wp.pdf>.
- Cleveland, F. M. (2008). *Cyber Security Issues for Advanced Metering Infrastructure (AMI)*. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
- Datame Oy (2012). *Ota langaton laajakaista mukaasi* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.datame.fi/ota-langaton-laajakaista-mukaasi.html>>.

- Ekanayake, Janaka; Kithsiri Liyanage, JianzhongWu, Akihiko Yokoyama & Nick Jenkins(2012). *Smart Grid: technology and applications*. ISBN 978-0-470-97409-4.
- Electric Power Research Institute, EPRI (2009). *Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.nist.gov/smartgrid/upload/Report_to_NIST_August10_2.pdf>.
- Electronics Lab (2013). *Will the NFC unify all wireless technologies?* [online] [siteerattu 15.3.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.electronics-lab.com/blog/?p=21281>>.
- Energiamarkkinavirasto (2012). *Sähköverkonhaltijat* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/alasivu.asp?gid=40&languageid=246>>.
- Energiateollisuus (2012). *Sähköverkkoyhtiöt* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/sahkoverkkoyhtiöt>>.
- Energiateollisuus ry (2010). *Haasteista mahdollisuuksia – sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050*. Energiateollisuus ry. ISBN 978-952-5615-31-9.
- European technology platform ETP (2006). *Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. European Communities. ISBN 92-79-01414-5.
- European technology platform ETP (2012). *SmartGrids SRA 2035: Strategic Research Agenda Update of the SmartGrids SRA 2007 for the needs by the year 2035*. European Communities.
- Fang, Xi; Misra, Satyajayant ; Xue, Guoliang ; Yang, Dejun (2012). *Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey*. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, Volume 14 Issue 4 s. 944-980.

- Farhangi, Hassan (2010). *The Path of the Smart Grid*. IEEE power & energy magazine january/february 2010. s.18-28.
- Fingrid (2012). *Voimansiirtoverkko* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>>.
- Fortum (2012). *Fortum fiksu, uuden ajan yösähkö* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.fortum.com/countries/fi/yksityisasiakkaat/energiansaasto/fortum-fiksu/pages/default.aspx>>.
- Gungor, V.C. & F.C. Lambert (2006). *A survey on communication networks for electric system automation* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Elsevier: Computer Networks 50 s.877-897. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/papers/2006/j4.pdf>>.
- IEEE (2004). *IEEE Std 1646: Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation*. Approved 23 September 2004 IEEE-SA Standards Board.
- International Energy Agency (2011). *Technology Roadmap: Smart Grids* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf>.
- Lavery, D. M.; J. O'Raw, D. J. Morrow, M. Cregan & Robert Best (2011). *Practical Evaluation of Telecoms for Smart Grid Measurements, Control and Protection*. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition.
- Lavery, David; John Morrow, Robert Best & Peter Crossley (2010). *Telecommunications for Smart Grid: Backhaul solutions for the Distribution Network*. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE 25-29 July 2010.
- Lévesque, Martin & Martin Maier (2012). *The Über-FiWi Network: QoS Guarantees for Triple-Play and Future Smart Grid Applications*. 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2012.

- Lima, Claudio (2010). *Enabling a Smarter Grid: Smart Grid Communications* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Smart Grid Series September 2010, Silicon Valley. Saatavana Internetistä: <URL:http://ewh.ieee.org/r6/scv/comsoc/Workshop_092510_EnablingSmarterGrid.pdf>.
- McGranaghan, M. & F. Goodman (2005). *Technical and system requirements for advanced distribution automation*. 18th International Conference on Electricity Distribution 6-9.6.2005. Session No 5.
- Meisel, Marcus; Thomas Leber, Michael Ornetzedery, Marek Stachuraz, Andreas Schiffleitnerz, Georg Kienesberger, Joseph Wenninger & Friederich Kupzog (2011). *Smart Demand Response Scenarios*. IEEE Africon 2011 - The Falls Resort and Conference Centre, Livingstone, Zambia, 13 - 15 September 2011.
- Meraki (2012). *Meraki langaton Mesh verkko* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.siptune.com/manuals/meraki-tuotteet.pdf>>.
- Mishra, Ajay (2004). *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation : 2G/2.5G/3G- Evolution To 4G*. Wiley: Hoboken. ISBN:9780470862674.
- Mishra, Ajay (2010). *Cellular Technologies for Emerging Markets 2G, 3G and Beyond*. Wiley: Hoboken. ISBN:9780470779477.
- Mohagheghi, Salman; James Stoupis & Zhenyuan Wang (2009). *Communication Protocols and Networks for Power Systems-Current Status and Future Trends*. Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES 15-18 March 2009.
- Motorola Inc. (2007). *Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Technical White Paper. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/LTE/_Document/Static%20Files/6834_MotDoc_New.pdf>.
- National Institute of Standards and Technology NIST (2010). *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf>.

- National Institute of Standards and Technology NIST (2012). *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf>.
- NDC Oy (2012). *Tietoliikennehaasteet sähköverkoissa. Käyttöpäivä (sähköverkko) 11.10.2012 Hämeenkyllän kartano, Vantaa.*
- Pegoraro, Paolo; Junjie Tang, Junqi Liu, Ferdinanda Ponci, Antonello Monti & Carlo Muscas (2012). *PMU and Smart Metering Deployment for State Estimation in Active Distribution Grids*. 2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 / ICT for Energy Symposium.
- Piedad, Floyd & Michael Hawkins (2001). *High Availability: Design, Techniques, and Processes*. Prentice Hall:Upper Saddle River. ISBN: 0130962880.
- Salehinejad, Hojjat; Siamak Talebi, Masoud Rashidinejad & Amir Rashidinejad (2012). *PPM-UWB Channel Modeling for SCADA Communications in Offshore Wind Farms*. Conference on Smart Grids (ICSG), 2012 2nd Iranian 24-25 May 2012.
- Sauter, Martin (2011). *From GSM to LTE : An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. Wiley: Hoboken. ISBN: 9780470667118.
- Schneier, Bruce (2000). *Secret & Lies: Digital security in a Networked World*. Wiley: New York. ISBN: 0471253111.
- Siemens AG (2008). *Aspects on IEC 61850 Edition 2.0 & Current Activities* [online] [siteerattu 31.1.2013]. IEEE / PES T&D 2010 - Latin America. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.ieee.org.br/t-d/america2010/T_D_2010_Brasil_paineis_PDF/on%2008_11/room%202/afternoon/IEC61850%20Edition2_OK_rev01.pdf>.
- Sorebo, Gilbert N. & Michael C. Echols (2012). *Smart Grid Security : An End-to-End View of Security in the New Electrical Grid*. CRC Press: Boca Raton. ISBN:9781439855874.
- Stallworth, David (2012). *PON (versus) Plus Active Ethernet* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Broadband communities 7/2012 s.24-26. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.bbpmag.com/2012mags/july/BBC_July12_PONPlusActEthernet.pdf>.

- Tanenbaum Andrew & David Wetherall (2011). *Computer Networks*. 5th edition (Person Education Inc) Prentice Hall: Boston. ISBN:0132553171.
- Teknologia teollisuus ry (2010). *Digitaalinen Suomi 2020: Älykäs tie menestykseen*. Teknologia-teollisuus ry:Helsinki. ISBN: 9789522380616.
- Tonello, Andrea M.; Salvatore D'Alessandro, Fabio Versolatto & Carlo Tornelli (2011). *Comparison of Narrow-Band OFDM PLC Solutions and I-UWB Modulation over Distribution Grids*. IEEE SmartGridComm: Communication Networks for Smart Grid
- U.S. Department of energy DoE (2009). *A Vision for the Smart Grid* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.netl.doe.gov/smartgrid/>>
- U.S. Department of Energy, DoE (2011). *A Smarter Electric Circuit: Electric Power Board of Chattanooga Makes the Switch* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Case Study - EPB Smart Grid Investment Grant. Saatavana Internetistä: <URL:<http://energy.gov/sites/prod/files/Case%20Study%20-%20Electric%20Power%20Board%20of%20Chattanooga%20-%20A%20Smarter%20Electric%20Circuit%20-%20June%202011.pdf>>
- Valtion teknillinen tutkimuslaitos VTT (2012). *Langattoman tietoliikenneverkon käytettävyys suurhäiriötilanteessa* [online] [siteerattu 31.1.2013]. Sähkötutkimuspoolin tutkimusseminaari 18.10.2012 Hilton Helsinki-Vantaa Airport, Vantaa. Saatavana Internetistä: <URL:http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/energiateollisuus/Tutkimus/ST-pooli/esitys_horsmanheimo.pdf>
- Valtioneuvosto (2009), *Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta*. Annettu Helsingissä 5 päivänä helmikuuta 2009.
- Xiao, Yang (2012). *Communication and Networking in Smart Grid*. CRC Press:London. ISBN: 9781439878736
- Zhang, Qiang; Yugeng Sun & Zhenhui Cui (2010). *Application and Analysis of ZigBee Technology for Smart Grid*. International Conference on Computer and Information Application ICCIA 2010.

LIITTEET 1. Työn aikana tehdyt haastattelut ja tapaamiset

- 19.8.2012 Tapaaminen Vaasan sähköverkot Oy:n kanssa. Paikalla Vaasan sähköverkot Oy:n toimitusjohtaja Juha Rintamäki ja järjestelmäpäällikkö Stefan Ingman sekä Anvialta liiketoiminnan kehitysjohtaja Reino Lähdemäki ja verkkokehityspäällikkö Jari Nikko.
- 9.10.2012 Haastattelu Helen Sähköverkko Oy kehitysyksikön päällikkö Markku Hyvärinen.
- 11.10.12 Haastattelu NDC Networks Oy:n myynti-insinööri Vesa Karppi.
- 12.10.12 Tapaaminen Vaasan sähköverkot Oy kanssa. Paikalla järjestelmäpäällikkö Stefan Ingman ja Jaakko Yliaho sekä Anvialta Operaattoripalvelut yksikönpäällikkö Niklas Granholm.
- 22.10.2012 Puhelinhaastattelu Kokkolan Energia käyttötekniikko Veli-Pekka Kinnunen.
- 23.10.2012 Haastattelu Cleen/SGEM/Vaasan yliopisto Tekniikan professori Kimmo Kauhaniemi.
- 25.10.2012 Haastattelu ABB:n liiketoiminnan kehitysjohtaja Dick Kronman.

- 13.11.2012 Haastattelu Seiverkot Oy Yksikön johtaja Antti Koskela
(ja DI-työntekijä A-P Kyykkä).
- 25.9.-7.11. 2012 Sähköpostikeskustelut ja puhelut Vaasan sähköverkot
Oy järjestelmäpäällikkö Stefan Ingman.