

AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Sähkötekniikan laitos

Olli Vaittinen

Pienvoimantuotannon aggregointi virtuaaliseksi voimalaitokseksi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.10.2010

Työn valvoja

Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja

Professori Matti Lehtonen

Tekijä:	Olli Vaittinen	
Työn nimi:	Pienvoimantuotannon aggregointi virtuaaliseksi voimalaitokseksi	
Päivämäärä:	4.10.2010	Sivumäärä: 10 + 65
Tiedekunta:	Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta	
Laitos:	Sähkötekniikan laitos	
Professori:	S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka	
Työn valvoja:	Professori Matti Lehtonen	
Työn ohjaaja:	Professori Matti Lehtonen	
<p>Ilmastonmuutoksen estämiseksi on paineita muuttaa energiantuotantoa ympäristöystävällisempään suuntaan. Suomessakin on sitouduttu vähentämään päästöjä reilusti. Sähköntuotannossa tavoitellaan jopa nol-lapäästöjä pitkällä aikavälillä. Tämä tarkoittaa uusiutuvien energialähteiden lisäämistä. Tyypillisiä uusiu-tuvia energialähteitä ovat tuuli, aurinko ja vesi. Vesivoimaa Suomessa on ollut käytössä jo pitkään ja se on toiminut hyvänä tehotasapainon säätäjänä. Tuuli- ja aurinkovoimaa ei voida säätää muuten kuin alas-päin, mutta sitä ei ole kannattavaa eikä järkevää tehdä. Tarkoituksena on ottaa kaikki irti tuuli- ja aurin-kovoimasta ja muilla keinoilla säätää tehotasapainoa. Työssä perehdytään näihin muihin keinoihin teho-tasapainon säätämiseksi.</p> <p>Työ on kirjallisuuskatsaus hajautetun sähköntuotannon ja kuormien ohjaamisen integroinnista sähköjär-jestelmään. Työn alussa esitellään potentiaalisia pienen mittakaavan CHP-teknologioita sekä ohjattavia kuormia ja kuinka paljon niissä on tehopotentiaalia. Niiden lisäksi järkevät energianlähteet esitellään lyhyesti. Työssä käsitellään myös pienvoimalaitosten verkkoon liittymistä ja sähkömarkkinoita pienvoi-malaitosten kannalta. Lopuksi työssä käsitellään AMR-järjestelmää ja siihen liittyviä asioita sekä virtuaa-linen voimalaitos –konseptia.</p> <p>Virtuaalinen voimalaitos sisältää pieniä tuotantolaitoksia ja ohjattavaa kuormaa. Aggregaattorin välityk-sellä virtuaalinen voimalaitos voi käydä kauppaa sähkömarkkinoilla. Suomessa aggregaattorina toimisi sähkön myyjä, koska se on jo valmiiksi toimijana sähkömarkkinoilla, jolloin kaupankäynnistä ei aiheudu suuria ylimääräisiä kustannuksia. Ainakin kuormien ohjaaminen onnistuu suoraan uuden AMR-järjestelmän avulla. Tuotantolaitosten ohjaamiseen tarvitaan todennäköisesti parempi järjestelmä. Virtuaalinen voimalaitos siis mahdollistaa pienvoimantuottajien pääsyn sähkömarkkinoille. Kun pienvoiman-tuotanto perustuu ympäristöystävälliseen energiaan, vähenevät sähköntuotannon päästöt.</p>		
Avainsanat: CHP, hajautettu sähköntuotanto, kuorman ohjaaminen, aggregaattori		

Author:	Olli Vaittinen	
Title:	Aggregating small-scale generation into a virtual power plant	
Date:	4.10.2010	Number of pages: 10 + 65
Faculty:	Faculty of electronics, communications and automation	
Department:	Department of electrical engineering	
Professorship:	S-18 Power systems and high voltage engineering	
Supervisor:	Professor Matti Lehtonen	
Instructor:	Professor Matti Lehtonen	
<p>In order to avoid climate change, we are under pressure to change energy production to become more environmentally friendly. Finland is committed to dramatically reduce emissions. Even zero emissions is the target for electricity production in the future. This means increasing the usage of renewable energy sources. Typical renewable energy sources are wind, sun and water. Water-power has been in use for a long time in Finland and has been very effective in controlling the power balance. We can only control wind power and solar power downwards but this is not reasonable. The goal is to make the most of wind and solar power and control the power balance by other means.</p> <p>This thesis is a literature survey of the integration of distributed generation and load control into the electricity system. Potential small-scale CHP technologies and controllable loads are presented first, along with how much power potential they have. In addition, reasonable energy sources are briefly reviewed. The thesis also handles the connection of small power plants to the grid and electricity markets for small power plants. Finally, the AMR-system, matters related to it and the Virtual Power Plant concept are presented.</p> <p>A Virtual Power Plant includes both small power plants and controllable load. A Virtual Power Plant can act in the electricity markets through an aggregator. In Finland the best aggregator would be the electricity retailer because it is already active in the markets and imposes no extra cost for trading the Virtual Power Plant's power transfer to the markets. An AMR-system can control loads directly but controlling power plants perhaps needs better a system. A Virtual Power Plant makes possible small-scale generation access to markets. When small-scale generation is based on environmentally friendly energy sources, emissions from electricity production will be significantly reduced.</p>		
Key words: CHP, distributed generation, load control, aggregator		

Esipuhe

Tämä työ on tehty Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun Sähkötekniikan laitoksella. Työ liittyy SGEM-projektiin (Smart Grids and Energy Markets). Haluan kiittää professori Matti Lehtosta mahdollisuudesta tehdä työ hänen tutkimusryhmässään sekä saamastani asiantuntevasta työn opastuksesta.

Isot kiitokset kuuluvat vanhemmilleni, jotka ovat jaksaneet tukea ja kannustaa minua milloin milläkin tavalla koko opiskeluajan. Haluan myös kiittää kollegoitani Leoa ja Jania sekä huonetoveriani Johnia mukavista yhteisistä hetkistä tämän prosessin aikana. Meinasikin unohtua kiittää kihlattuani Hannaa, jolla on ollut ehkä eniten kestämistä kanssani viime vuosina. Yksi projekti päättyy ja seuraava jo kurkistelee aivan nurkan takana.

Espoossa, 4.10.2010

Olli Vaittinen

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	iv
Symboli- ja lyhenneluettelo	viii
1 Johdanto.....	1
2 Pienvoiman tuotantomuodot	3
2.1 Stirling-moottori	3
2.1.1 Robert Stirling.....	3
2.1.2 Toimintaperiaate	3
2.2 Kaasumoottori.....	5
2.2.1 Yleistä.....	5
2.2.2 Toimintaperiaate	6
2.3 Mikroturbiini.....	6
2.4 Polttokenno.....	7
2.4.1 Yleistä.....	7
2.4.2 Toimintaperiaate	8
2.5 Muut	9
2.5.1 Yleistä.....	9
2.5.2 Aurinkovoima	10
2.5.3 Tuulivoima.....	11
2.5.4 Pienvesivoima	12
3 Energialähteet	13
3.1 Yleistä.....	13
3.2 Maakaasu.....	13
3.3 Biokaasu	14
3.3.1 Yleistä.....	14
3.3.2 Biokaasun syöttäminen maakaasuverkkoon	15
3.4 Vety	16

4	Verkkoon liittyminen	19
4.1	Yleistä	19
4.2	Lait ja tarkastukset	19
4.3	Sähkön laatu	20
4.4	Suojaus ja turvallisuus	21
4.4.1	Verkon suojaus ja turvallisuus	21
4.4.2	Pienvoimalaitoksen suojaus	22
4.4.3	Sähkötyöturvallisuus ja merkinnät	22
4.5	Sopimukset	22
5	Sähkömarkkinat	24
5.1	Yleistä	24
5.2	Sähköpörssi	24
5.2.1	Elsport	24
5.2.2	Elbas	25
5.3	Säätösähkömarkkinat	26
5.4	Käyttöreservi	26
5.5	Häiriöreservi	27
6	Ohjattavat pienvoimalaitokset ja kuormat	28
6.1	Pienet CHP-laitokset	28
6.2	Varaavat sähkölämmitysjärjestelmät	28
6.3	Sähköautot	30
7	Virtuaalinen voimalaitos	32
7.1	Yleistä	32
7.2	Virtuaalinen voimalaitos ja aggregaattori	32
7.3	Hyödyt virtuaalisesta voimalaitoksesta eri tahoille	33
7.3.1	Pienvoimantuottajalle	33
7.3.2	Sähköverkkoyhtiölle	33
7.3.3	Sähkönmyyjälle	34
7.3.4	Yhteiskunnalle	34
7.4	Franchise-periaate	35
7.5	Energiameklarit Oy	35
7.6	Tanskan malli	36

8	AMR-mittarit.....	38
8.1	Yleistä mittareista	38
8.2	Ominaisuudet.....	39
8.3	Luotettavuus	41
8.4	Tiedonsiirto.....	42
8.4.1	Tiedonsiirtotekniikat	42
8.4.2	Tietoturva.....	53
8.5	Energiansäästö web-palvelun tai erillisen energianäytön avulla	54
9	Johtopäätökset ja yhteenveto	57
	Lähteet	60
	Liitteet.....	64

Symboli- ja lyhenneluettelo

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
aggregoida	Välittää monen pienvoimantuottajan sähköntuotanto sähkömarkkinoille
akusto	Useasta akusta koostuva kokonaisuus
AMR-mittari	Teknologia sähkömittareiden kaukoluentaan (Automatic Meter Reading)
BE	Best Effort
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto (Combined Heat and Power)
Cold load pickup	Jännitekatkon aikana lämmityskuormat jäähtyvät, jolloin jännitteiden palatessa ne toimivat isommalla teholla.
DSL	Digital Subscriber Line
FLASH-OFDM	Fast Low-Latency Access with Seamless Handoff, Orthogonal Frequency Division Multiplexing
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System Mobile

ISDN	Integrated Services Digital Network
kiehumispiste	Lämpötila, jossa liuoksen höyrynpaine on yhtä suuri kuin nestettä ympäröivän ympäristön paine.
kokonaishyötysuhde	Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sähköhyötysuhteen ja lämpöhyötysuhteen summa
MAC	Media Access Control
muuntopiiri	Yhden muuntajan kattama alue
NRTPS	Non Real-Time Polling Service
OEM	Original Equipment Manufacturer
PLC	Power Line Communication
PSTN	Public Switched Telephone Network
RPM	Kierrosta minuutissa (Revolutions Per Minute)
RTPS	Real-Time Polling Service
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
sähköhyötysuhde	Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa pelkän sähköntuotannon hyötysuhde
tehollinen lämpöarvo	Se lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun sekä polttoaineen vesi että palamisessa muodostunut vesi ovat vesihöyryinä
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

UGS	Unsolicited Grant Service
Vesikastepiste	Lämpötila, jossa savukaasuissa oleva kosteus tiivistyy vedeksi
VPP	Virtuaalinen voimalaitos (Virtual Power Plant)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Acces

1 Johdanto

Perinteisesti sähköntuotanto on perustunut keskitettyyn järjestelmään, jossa isoissa voimalaitoksissa tuotettu sähkö siirretään sähköverkon avulla kuluttajille. Järjestelmä on toiminut hyvin ja se on ollut tehokas. Voimalaitoksien polttoaineena on käytetty pääsääntöisesti fossiilisia polttoaineita pois lukien ydinvoimalaitokset. Ilmastonmuutoksen torjumiseksi on alettu suosimaan uusiutuvia energianlähteitä. Uusiutuvaa energiaa on muun muassa aurinko, tuuli ja biopolttoaineet, kuten biokaasu ja biomassa. Uusiutuvaa energiaa käyttävät voimalaitokset ovat tehoiltaan pieniä verrattuna perinteisiin voimalaitoksiin ja ne ovat lähellä kulutusta, jolloin on alettu puhumaan hajautetusta sähköntuotannosta. Koko sähköjärjestelmä ja sähkömarkkinat on suunniteltu keskitettyyn sähköntuotantoon. Hajautettu sähköntuotanto vaatii siten muutoksia sähköjärjestelmään ja myös sähkömarkkinoihin. Hajautetut sähköntuotantolaitokset voivat heikentää sähkön laatua ja aiheuttaa turvallisuusriskejä, jollei muutoksia tehdä sähköjärjestelmään. Pieniä voimalaitoksia voivat omistaa yksityiset ihmiset, mutta heidän on vaikeaa, ellei jopa mahdotonta myydä sähköä eteenpäin. Sähkömarkkinoille on turha edes haaveilla, sillä kulut kaupankäynnistä ylittävät moninkertaisesti tuotot. Se ei houkuttele hankkimaan laitoksia. Tarvitaan jokin järkevä keino, että pienvoimalaitokset saavat samankaltaisen hyödyn toiminnastaan kuin isommatkin voimalaitokset.

Hajautetun sähköntuotannon lisäksi on eräs toinenkin asia, mikä muuttaa sähköjärjestelmää; sähköautot. Jos sähköautot yleistyvät niin kuin monet tahot ennustavat, ne aiheuttavat sähköverkkoon todella ison kuorman. Isosta kuormasta on sekä haittaa että hyötyä. Hyötynäkökohta onkin yllättävä, mutta sen eteen täytyy nähdä vaivaa, sillä automaattisesti se ei ole hyöty.

Työn tavoitteena on löytää keino tai konsepti, miten pienvoimantuottajien lisäksi osa kulutusta otetaan aktiivisena osana mukaan sähköjärjestelmään ja sähkömarkkinoille. Mitä asioita tulee ottaa huomioon ja mitkä asiat vaikuttavat siihen? Miksi ei voida vain antaa mennä niin kuin tähänkin asti?

Työssä tutkitaan uuden konseptin hyötyjä eri toimijoille ja konseptiin liittyviä teknologioita, mutta rahallista tarkastelua ei tehdä. Rahallinen tarkastelu on laaja kokonaisuus, jota ei tähän työhön otettu mukaan.

2 Pienvoiman tuotantomuodot

2.1 Stirling-moottori

2.1.1 Robert Stirling

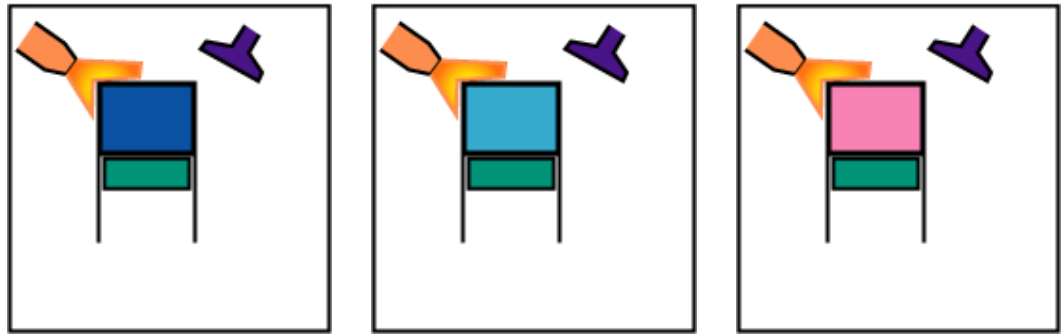
Stirling-moottorin keksijä on Skotlannissa syntynyt Robert Stirling. Hän syntyi vuonna 1790 lähellä Methvenin kylää ja oli kolmas lapsi kahdeksan lapsen perheessä. Robert oli lahjakas poika. Hän aloitti opiskelun 15-vuotiaana Edinburghin yliopistossa, jossa hän luki latinaa, kreikkaa, logiikkaa, matematiikkaa ja oikeustiedettä. [1]

Vuonna 1809 Robert aloitti teologian opinnot Glasgown yliopistossa. Hän menestyi hyvin ja päätti jatkaa teologian opintojaan Edinburghin yliopistossa vuonna 1814. Robertista tuli lopulta pappi. [1]

Robert oli saanut nuorena kosketusta insinöörimaailmaan isänsä kautta. Robert oli aina ollut kiinnostunut koneista. Tammikuussa 1817 hän patentoi keksimänsä koneen, Stirling-moottorin. Robert Stirling kuoli kesäkuussa 1878. Perintönä hän jätti koneensa, jonka täyttää potentiaalia ei ole vielääkään hyödynnetty. [1]

2.1.2 Toimintaperiaate

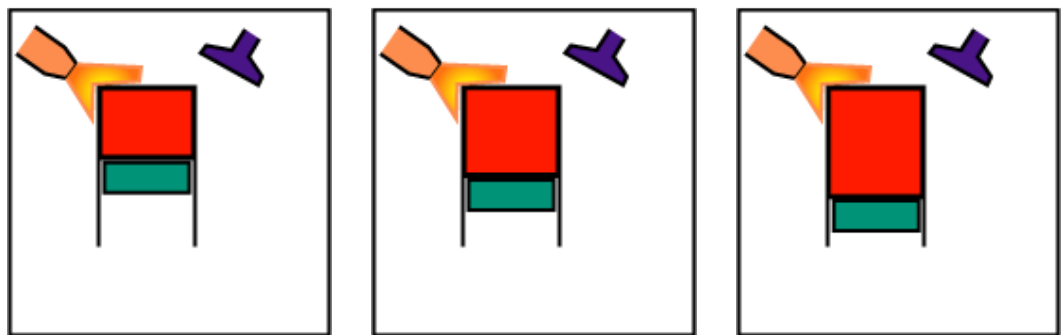
Stirling-moottori koostuu tyypillisesti vähintään yhdestä sylinteristä, männistä, kampaakselista, työkaasusta, generaattorista ja lämmittimestä. Moottorista on muutama eri tyyppiversio, mutta toimintaperiaatteet poikkeavat vähän toisistaan. Palaminen tapahtuu koneen ulkopuolella, joten polttoaineena voidaan käyttää periaatteessa mitä tahansa palavaa materiaalia. Koska palaminen tapahtuu koneen ulkopuolella ja jossain mielessä erillisenä toimintona, palamisolosuhteet voidaan saattaa mahdollisimman optimaalisiksi tehokkuuden ja päästöjen kannalta. Stirling-moottorin toimintaperiaate on yksinkertainen. Se koostuu neljästä perusvaiheesta. Alla olevissa kuvasarjoissa on esitetty Stirling-moottorin toimintaperiaate. [2]



Kuva 1 Isokoorinen lämpeneminen vakiotilavuudessa [2]

Isokoorinen lämpeneminen vakiotilavuudessa

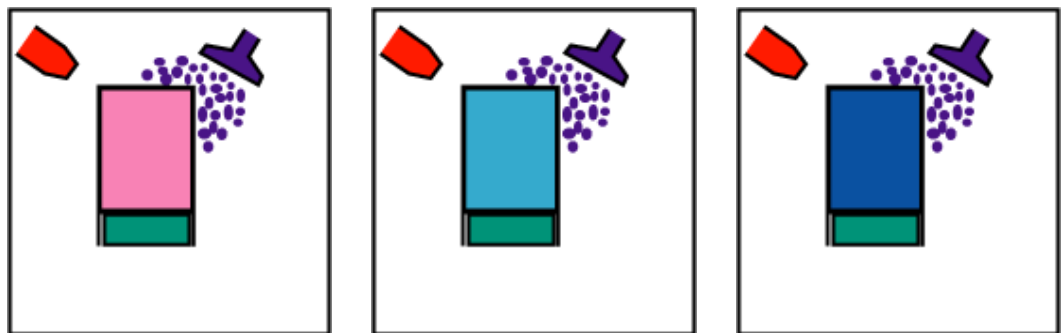
Työkaasua ja sylinteriä lämmitetään. Kaasu lämpenee, jolloin tilavuuden pysyessä vakiona paine sekä lämpötila kasvavat. [2]



Kuva 2 Isoterminen lämpeneminen vakiolämpötilassa [2]

Isoterminen laajeneminen vakiolämpötilassa

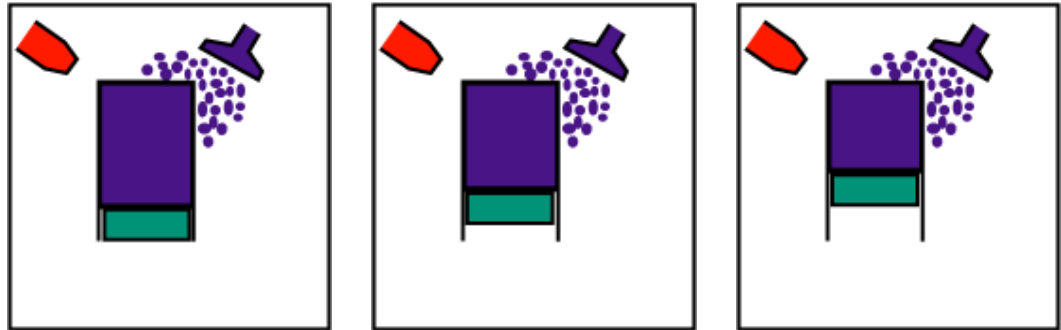
Sylinterissä mäntä painuu alaspäin, sylinterin tilavuus kasvaa ja paine laskee. Tässä vaiheessa sylinterin liike tuottaa mekaanista energiaa. [2]



Kuva 3 Isokoorinen jäähtyminen vakiotilavuudessa [2]

Isokoorinen jäähtyminen vakiotilavuudessa

Sylinteriä ja työkaasua jäähdytetään veden tai jonkun muun kylmän lähteen avulla. Lämpötila ja paine laskevat. [2]



Kuva 4 Isoterminen jäähtyminen vakiolämpötilassa [2]

Isoterminen paineistaminen vakiolämpötilassa

Paineen laskiessa tilavuus pienenee. Tässä vaiheessa mäntää on työnnettävä ylöspäin. [2]

Stirling-moottorin teoreettinen sähköhyötysuhde on 50 % [2]. Käytännön sähköhyötysuhde on kuitenkin paljon alhaisempi. Esimerkiksi Cleanenergy CHP V161 Stirling-moottorin sähköhyötysuhde on esitteen mukaan $25 \% \pm 1$, mutta yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon hyötysuhde eli kokonaishyötysuhde on 92 – 96 % [3]. Hyötysuhteeseen vaikuttaa jäähdytysteho.

2.2 Kaasumoottori

2.2.1 Yleistä

Kaasumoottori toimii tavallisen polttomoottorin tavoin. Polttomoottoreita käytetään paljon liikkuvissa ajoneuvoissa, koska sen tehoa ja kierrosnopeutta voidaan helposti ja nopeasti säätää tilanteen mukaan. Yleisyyden ansiosta polttomoottorit ovat suhteellisen edullisia. Kaasumoottorit ovat nelitahtisia turboahtimella varustettuja ottomoottoreita [4]. Kaasumoottorit käynnistyvät nopeasti. Ne saavuttavat noin 5 - 10 minuutissa täyden tehonsa [4]. Sen puolesta ne sopivat hyvin varavoimaksi häiriöiden varalle.

2.2.2 Toimintaperiaate

Kaasumoottorin perustoimintaperiaate on, että polttoaineena käytettävän kaasun ja ilman seos sytytetään suljetussa tilassa, jolloin kaasu on korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Sytytyksen jälkeen kaasu paisuu ja jäähtyy, josta saadaan mekaanista tehoa ulos.[5]

Nelitahtisen ottomoottorin eri vaiheet ovat imutahti, puristustahti, työtahti ja poistotahti. Imutahdin aikana moottorin sylinteriin imetään kaasu-ilmaseos, jolloin paine sylinterissä on hieman pienempi kuin ulkoilman paine. Puristustahdissa kaasu-ilmaseos puristetaan pienempään tilavuuteen. Sytytyskipinän avulla seos poltetaan. Työtahdissa palaminen on tapahtunut ja korkeapaineinen kuuma palamiskaasu paisuu. Työtahdin aikana paisuminen tuottaa mekaanista työtä männän ja kiertokangen välityksellä kampiakselille. Poistotahdin aikana palamiskaasut poistuvat sylinteristä. [5]

Ahdinta käytetään, jotta moottorista saadaan enemmän tehoa ulos. Ahdin nostaa ilman painetta. Toisin sanoen ilmaa on enemmän, jolloin polttoainettakin voidaan syöttää enemmän. Tämä merkitsee sitä, että tehoa saadaan enemmän akselilta. [5]

Kaasumoottoareiden hyötysuhde liikkuu 35 - 48 prosentin välillä. CHP-tuotannolla kokonaistuotannossa kokonaishyötysuhde voi olla 85 – 90 %. Kierrosnopeus sekä laitoksen koko vaikuttavat hyötysuhteeseen. [6]

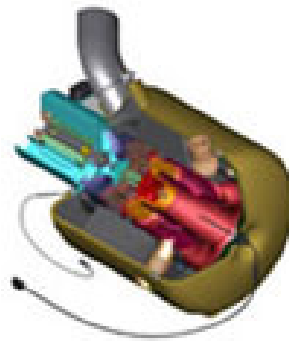
2.3 Mikroturbiini

Mikroturbiinin toimintaperiaate on sama kuin tavallisella kaasuturbiinilla. Turbiini koostuu suuttimista ja siivistä. Kaasun nopeus nostetaan suuttimissa ja kaasu ohjataan turbiinin kehällä sijaitseviin siipiin. Kaasun osuttua siipiin, virtaus muuttaa suuntaansa ja pyörittää pyörää. Kaasuturbiinin tehoa voidaan säätää muuttamalla palokammion tulevan polttoaineen massavirtaa. [5]

Mikroturbiinin polttoaineena voidaan käyttää niin maakaasua kuin biokaasuaakin. Kaasuturbiinit eivät ole niin tarkkoja polttoaineen puhtauden suhteen kuin kaasumoottorit.

Mikroturbiinin sähköhyötysuhde, noin 30 %, on hieman alhaisempi kuin kaasumootorilla [7]. Kokonaishyötysuhde on noin 80 % ja ylikin.

Mikroturbiini eroaa tavallisesta kaasuturbiinista koon puolesta, mikroturbiini on pienempi. Kokonsa takia pyörimisnopeutta on nostettava merkittävästi. Pyörimisnopeus on luokkaa 10 000 rpm. Tämä aiheuttaa omia ongelmia koneen suunnitteluun. Tässä yhteydessä puhutaan suurnopeustekniikasta.



Kuva 5 Capstone C30 (30 kW) Mikroturbiini [7]

Mikroturbiinin investointikustannukset ovat suuremmat kuin kaasumootorilla. Huoltokustannukset ovat kuitenkin pienemmät mikroturbiinilla. Mikroturbiinit ovat kannattavampia isommilla huipunkäyttäjöillä.

Mikroturbiinin käynnistys täyteen toimintakuntoon onnistuu noin kahdessa minuutissa [7]. Nopean käynnistykseen ansiosta mikroturbiini soveltuu myös häiriöreserviksi.

2.4 Polttokenno

2.4.1 Yleistä

Tässä työssä käsitellään vain kiinteäoksidipolttokennoa (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) sen kokonaishyötysuhteen, vähäpäästöisyyden ja polttoainejoustavuuden takia. Kiinteäoksidipolttokennon kokonaishyötysuhde on yli 80 %, kun sähköhyötysuhde on noin 45 – 50 %. SOFC-polttokennon polttoaineena voidaan käyttää monia polttoaineita, tär-

keimpinä mainittakoon maa- ja biokaasu. Kennon toimintalämpötila on noin 600 – 1000 °C, jonka takia sen käynnistäminen on erittäin hidasta. Korkea lämpötila asettaa myös vaatimuksia materiaaleille. [8,9]

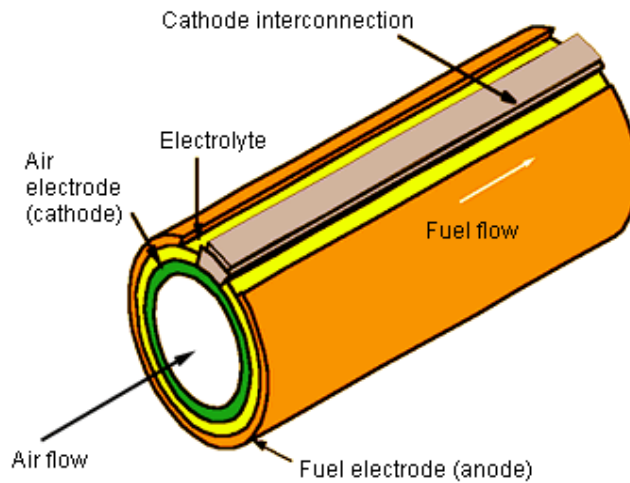
Toistaiseksi hinta on ollut esteenä polttokennojen yleistymiselle. Hinta on korkea jalometallikatalyyttien, elektrolyyttien ja valmistusmenetelmien takia. Polttokennossa on vähän liikkuvia osia, joten se on erittäin hiljainen. Polttokennojen houkuttelevuutta lisää niiden vähäpäästöisyys. Päästöarvot ovat murto-osan siitä, mitä ne ovat polttoon perustuvilla laitoksilla. Polttokenno ei ole kuitenkaan ikuinen. Tämän hetkiselällä tekniikalla SOFC-polttokennon elinikä on noin 69 000 tuntia eli noin 5 - 10 vuotta. [8,9]

Siemens on kehitellyt myös polttokennon ja kaasuturbiinin yhdistelmää. Kaasuturbiinin avulla sähköhyötysuhteen tavoite on 70 %. Kaasuturbiinissa hyödynnetään SOFC-polttokennon kuumat pakokaasut, joista tehdään sähköä. Konstruktiio on erittäin monimutkainen ja siten myös erittäin kallis. Kiinnostusta polttokennon ja kaasuturbiinin yhdistelmälle varmasti löytyy, koska tämänhetkiset tekniikat eivät mahdollista sähkön tekemistä yhtä hyvällä hyötysuhteella. Siemens tutkii tällä hetkellä parhaita ja myös halvempia ratkaisuja yhdistelmän toteuttamiseksi. [8]

2.4.2 Toimintaperiaate

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, jonka toiminta ei perustu polttoon. Polttokenno muuttaa kemiallisen energian suoraan sähköksi ja lämmöksi. Polttokennossa on anodi ja katodi. Polttoaine hapettuu anodilla ja hapetin pelkistyy katodilla. SOFC-teknologialla ilma ionisoituu katodilla ja saa aikaan happi-ionien liikkeen elektrolyytin läpi. Kun ionit saavuttavat polttoaineen anodilla, ne hapettavat vedyn vedeksi ja hiilimonoksidin hiilidioksidiksi. Kun reaktio tapahtuu, vapautuu elektroneja. Jos virtapiiri on suljettu, syntyy vapaiden elektronien virtauksesta tasavirta. Yhden polttokennon tuottama jännite on noin yksi voltti. Sarjaan kytkemällä jännitettä voidaan nostaa. Sarjaan kytketyistä kennoista muodostuu kennosto. SOFC-polttokenno ei tarvitse erillistä polttoaineen reformointia matalan lämpötilan kennojen tapaan. Korkea lämpötila huolehtii reformoinnista eli hiilivedyn hajottamisesta vedyksi, hiilimonoksidiksi, metaaniksi ja inerteiksi kaasuiksi. [8]

Kuvassa 6 on esitetty Siemensin SOFC-polttokennon putkimainen rakenne. Putki on halkaisijaltaan 2 cm ja pituudeltaan 150 cm. Ilmaa syötetään putken sisäosaan ja polttoainetta kuoren ulko-osaan. Putken ulkokuori on anodi ja putken päällä on yhteys anodille. Kun putkia kasataan päällekkäin, on sarjaankytkentä rakenteen vuoksi helppoa. Siemensin yksi putki tuottaa 210 W kennon ollessa normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilan 1000 °C:ssa. [8]



Kuva 6 Siemensin SOFC-kennon putkimainen rakenne [8]

2.5 Muut

2.5.1 Yleistä

Tässä osiossa esitellään lyhyesti muita pienvoiman tuotantomuotoja. Niihin ei perehdytä tarkemmin, koska niiden teho ei ole säädettävissä tai niiden tehoa ei ole järkevää säätää, mikä on tämän työn kannalta oleellista. Esimerkiksi tuulivoimalan tehoa ei voida lisätä, koska teho on riippuvainen tuulesta. Tehon säätö alaspäin ei kuulosta järkevältä, koska silloin hukattaisiin ”ilmaista” ja ympäristöystävällistä energiaa. On järkevää hyödyntää ilmainen energia ja säätää muuta tuotantoa tai kulutusta.

2.5.2 *Aurinkovoima*

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkopaneeleista ja ohjausyksiköstä. Järjestelmissä, joissa aurinkosähköjärjestelmä toimii ainoana sähkönlähteenä, on lisäksi akusto energiavarastona. Aurinkopaneeli on valmistettu puolijohdemateriaalista, tyypillisesti piistä. Paneelissa on p- ja n-tyyppin kerroksia, joista p-tyyppin materiaali on positiivisesti varautunut ja n-tyyppin materiaali negatiivisesti varautunut. Kun auringon säteily osuu n-tyyppin materiaalin elektroneihin, luovuttaa se energiaa elektroneihin ja saa aikaan niihin liikettä. Elektronien liikettä kutsutaan sähkövirraksi. [11]



Kuva 7 Aurinkopaneeleita [10]

Ohjausyksikön tarkoitus on myös valvoa järjestelmää. Koska aurinkopaneelin tuottama sähkö on tasasähköä, tarvitaan invertteri eli vaihtosuuntaaja, jotta paneelin tuottamaa sähköenergiaa voidaan käyttää tavallisissa sähkölaitteissa ja kun järjestelmä halutaan liittää yleiseen sähköverkkoon. [11,12]

2.5.3 *Tuulivoima*

Tuulivoimalaitos muuttaa tuulen liike-energian ensin potkurin avulla mekaaniseksi pyörimisenergiaksi, jonka jälkeen se muutetaan generaattorilla sähköenergiaksi. Laitos voidaan liittää joko suoraan sähköverkkoon tai suuntaajan avulla. Kummassakin tapauksessa pääasia on, että sähkö täyttää sille asetetut vaatimukset, joista on kerrottu kappaleessa 4.3. [14]

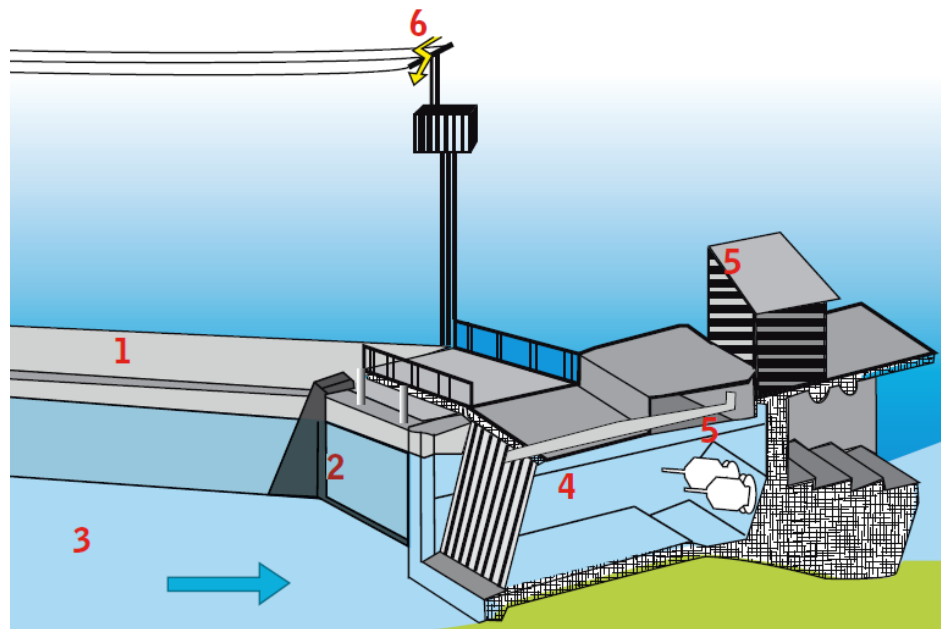


Kuva 8 Tuulivoimalaitos käytössä Porissa [13]

Yleisimmät tuulivoimalaitokset ovat vaaka-akselisia tuuliturbiineja. Napakorkeus uusilla tuulivoimaloilla on yli sata metriä ja lapojen halkaisija noin 130 metriä. Suurimmat tehot ovat luokkaa 5 MW. Tuulivoimalaitos alkaa tuottaa sähköä, kun tuulen nopeus on noin 5 m/s. Suurilla tuulennopeuksilla, yli 25 m/s, tuulivoimalaitos pysäytetään, jotta laitos ei vaurioituisi. Potkurin pyörimisnopeus on tyypillisesti hyvin alhainen. Se ei voi olla korkea, koska meluhaitat kasvavat. [14]

2.5.4 Pienvesivoima

Pienvesivoimalaitos koostuu samanlaisista komponenteista kuin normaali vesivoimalaitos, mutta ne ovat vain kooltaan pienempiä. Vesivoimalaitokseen kuuluu yksinkertaistusti pato, padotusallas, koneasema, muuntamo ja sähköverkko. Vesivoimalaitoksen tarkoitus on muuttaa veden virtaama vesiturbiinin avulla pyöriväksi liikkeeksi. Pyörivä liike muuttuu sähköksi generaattorin avulla. Saatavaan tehoon vaikuttaa suoraan verrannollisesti pudotuskorkeus. [15]



Kuva 9 Pienvesivoimalaitos [15]

3 Energialähteet

3.1 Yleistä

Kaasumainen olomuoto on polttoaineena sekä helppo että vaikea. Polttoteknisesti ja päästöjen kannalta kaasu on helppo. Kaasua on helppo polttaa verrattuna kiinteisiin ja nestemäisiin polttoaineisiin. Kaasun poltossa ei synny juuri lainkaan rikkioksidi-, hiukkas- tai raskasmetallipäästöjä [16]. Kaasun siirtäminen on kuitenkin vaikeaa, se vaatii joko putkiston, kaasun nesteyttämisen tai paineistamisen. Kaasuputki-investoinnit ovat kalliita. Kaasua voidaan myös siirtää nesteytettynä laivoilla ja rekoilla, mutta nesteytyslaitteisto on kallis. Lisäksi vastaanottopäässä nestemäinen olomuoto pitää muuttua jälleen kaasuksi. Jos kaasuputkiverkosto on olemassa, niin kaasun siirto on nopeaa, varmaa, edullista ja turvallista. Kun energia liikkuu putkia pitkin eikä rekoissa ja laivoissa, säästetään luontoa ja lisätään liikenneturvallisuutta vähentyneen liikenteen ansiosta.

3.2 Maakaasu

Suomeen maakaasu tulee Venäjältä Länsi-Siperiasta, jossa on maailman suurimmat maakaasuesiintymät. Maakaasua etsitään gravimetrisin, magneettisin ja seismisin menetelmin. Löydetyt esiintymät varmistetaan koeporauksilla. Maakaasu sijaitsee 1000-4000 metrin syvyydessä. Kaasukentän käyttöönotossa ensin porataan tuotantoreikä, jonka jälkeen reiän päälle asennetaan venttiilit ja rei'iltä rakennetaan keräilyputket käsittelylaitokselle. Kaasu tulee maanpinnalle omalla paineellaan. [16]

Venäjältä tuleva kaasu on erittäin puhdasta. Se sisältää metaania 98 % ja loput 2 % on lähinnä etaania ja typpeä. Runsas metaanipitoinen maakaasu soveltuu hyvin polttoon. Maakaasun poltosta syntyy hiilidioksidia, vesihöyryä ja typenoksideja. Polttamisen hyötysuhde on korkea, koska maakaasu on käytännössä rikitöntä ja savukaasut voidaan jäähdyttää alle vesikastepisteen. [16,17]

Maakaasun tehollinen lämpöarvo on 36 MJ/m³ tai 10 kWh/m³ eli yksi kuutio maakaasua vastaa yhtä litraa kevyttä polttoöljyä. Metaanin kiehumispiste on alhainen; -161,5 °C. Maakaasu on siis kaasumaista kyseisen lämpötilan yläpuolella normaalissa ilmanpaineessa. Maakaasu voidaan nesteyttää, kun se jäädytetään kiehumispisteen alapuolelle. Nesteytetyn maakaasun tilantarve on noin 1/600 kaasumaiseen olomuotoon verrattuna. Nesteytettyä maakaasua voidaan kuljettaa laivoilla tai rekoilla sinne, missä ei ole maakaasuputkea. [17]

Suomen maakaasuverkosto kattaa tällä hetkellä Kaakkois-Suomen, Tampereen alueen, pääkaupunkiseudun ja osan läntistä Uuttamaata. Maakaasuverkosto ei voi kasvaa räjähdysmäisesti, koska kaasuputken rakentamiskustannukset ovat suuret. Maakaasusta puolet käytetään teollisuudessa. Kotitalouksissa maakaasua käytetään Suomessa vähän, pääsääntöisesti vain Helsingissä. [16]

3.3 *Biokaasu*

3.3.1 *Yleistä*

Biokaasua saadaan kerättyä ja tuotettua eri lähteistä muun muassa kaatopaikoilta, maataloilta, mädättämöiltä ja jätevedenpuhdistamoilta. Biokaasua syntyy, kun hapettomissa olosuhteissa bakteerit hajottavat orgaanista ainesta. Biokaasun koostumus on hyvinkin erilainen riippuen, mistä se on peräisin. Pääosin se koostuu metaanista ja hiilidioksidista. Kaatopaikalta peräisin oleva kaasu on tyypillisesti heikkolaatuisinta. Siinä kaasun metaanipitoisuus vaihtelee paljon kaatopaikkakohtaisesti. Ongelmana on eritoten alhainen metaanipitoisuus. [18]

Nykyisin kaatopaikkojen kaasua hyödynnetään lähinnä paikallisesti lämmön- ja sähkön-tuotannossa. Kesäisin lämmöntarpeen ollessa pieni, kaasua joudutaan polttamaan soihduissa, jolloin energiaa menee hukkaan. Metaani on paljon voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi, sen vaikutus on 21-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. Juuri tämän takia kaatopaikoilla mieluummin poltetaan ylimääräinen kaasu soihdussa kuin päästettäisiin sellaisenaan ilmaan. [18]

3.3.2 *Biokaasun syöttäminen maakaasuverkkoon*

Biokaasua voidaan tietyn ehdoin syöttää olemassa olevaan maakaasuverkkoon. Se vähentää suoraan maakaasun käyttöä, joka on fossiilinen polttoaine. Gasumin tekemän selvityksen mukaan Suomessa on kohtuullisen vähän paikkoja, mistä biokaasua voidaan taloudellisesti ajateltuna syöttää maakaasuverkkoon. Potentiaalia on noin 400 – 500 GWh/a, joka on noin prosentti tämän hetkisen maakaasun kulutuksesta. Koska putkiston rakentaminen on suhteellisen kallista, tulisi biokaasun tuotantopaikan sijaita mahdollisimman lähellä olemassa olevaa maakaasuverkkoa. Selvityksen mukaan pienet laitokset eivät ole kannattavia. Biokaasun puhdistus- ja jalostuskustannukset kasvavat merkittävästi, kun laitoksen koko on alle 5 000 MWh/h. [18]

Biokaasua ei voida suoraan syöttää maakaasuverkkoon. Maakaasulle on annettu tiukat rajat eri ominaisuuksille, koska maakaasua käytetään hyvin erilaisissa käyttökohteissa. Erityisesti liikennekäytössä kaasulta vaaditaan puhtautta ja korkeaa lämpöarvoa. Kun biokaasua syötetään maakaasuverkkoon, siltä vaaditaan samoja asioita kuin maakaasulta. Biokaasusta pitää poistaa rikkivedyt, siloksaanit, halogenoidut hiilivedyt, vesi, ammoniakki ja kiinteät partikkelit. Biokaasua myös jalostetaan eli biokaasun metaanipitoisuutta nostetaan ennen maakaasuverkkoon syöttämistä. Puhdistusprosesseja ei ole tarkoituksenmukaista käydä läpi tarkemmin tässä työssä. [18]

Gasumin selvityksessä simuloitiin tilannetta, jossa Suomen maakaasuverkkoon syötettiin biokaasua. Tarkoituksena oli katsoa, että miten paljon se vaikuttaa käyttäjien saamaan kaasun laatuun. Simulointitilanteina käytettiin useampaa erilaista vaihtoehtoa. Kiinnostavimmat vaihtoehdot ovat pahimmat tilanteet eli semmoiset, mistä voi koitua ongelmia. Pahimmassa tapauksessa jotkin käyttäjät biokaasutuotantopaikan läheisyydessä saivat ”raakaa” biokaasua. Tämä tarkoittaa sitä, että maakaasuverkkoon syötettävän kaasun tulee olla suurin piirtein ominaisuuksiltaan maakaasua vastaavaa. Talvella, suuren kulutuksen aikaan, biokaasu sekoittuu hyvin maakaasun kanssa, jolloin biokaasun osuus seoksessa on hyvin pieni ja biokaasusta tulevat haitat ovat hyvin pieniä loppukäyttäjälle. Kesällä tilanne on päinvastainen. Yleisesti ottaen helpoin tilanne on se, että biokaasun tuotantopaikka liittyy sinne, missä maakaasua virtaa paljon, jolloin biokaasun osuus seoksessa on pieni. [18]

Yksi Gasumin huolenaiheista on, että vaikuttaako biokaasu putkistoon. Oletettavasti kaasun jakeluputkissa, jotka ovat muovia, biokaasu ei aiheuta ongelmia. Ulkomailla, joissa jakeluputkistoon on syötetty biokaasua, ei ole havaittu muoviputkien kanssa ongelmia. Kaasun siirtoputket ovat terästä ja vielä ei ole varmaa, heikentääkö biokaasu teräksen ominaisuuksia ja aiheuttaako se lopulta ongelmia. [18]

Selvityksen mukaan on mahdollista syöttää biokaasua maakaasuverkkoon, kunhan biokaasu ensin puhdistetaan ja jalostetaan. Biokaasun osuus kaasun kokonaiskulutuksesta tulee olemaan pieni, jonka johdosta kaasun laatu putkistossa ei juuri heikkene. [18]

3.4 Vety

Tässä kappaleessa kerrotaan yleistä vedyn valmistamisesta, siirtämisestä, käyttämisestä ja kokonaishyötysuhteesta. Vedystä on povailtu ratkaisua hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Tiedot perustuvat Jonna Jääskeläisen tekemään erikoistyöhön [19].

Koska vetyä ei esiinny sellaisenaan luonnossa, se pitää valmistaa muista, vetyä sisältävistä aineista. Tyypillisesti vetyä valmistetaan reformoimalla maakaasua. Maakaasun metaani hajoo korkeassa lämpötilassa vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Hiilimonoksidi reagoi vielä kuumen vesihöyryn kanssa muodostaen lisää vetyä sekä hiilidioksidia. Toinen vaihtoehto tuottaa vetyä on elektrolyysin avulla, joka ei kuitenkaan ole suosittua teollisessa käytössä. Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Elektrolyysi siis tarvitsee merkittävästi sähköä. [19]

Vedyn eräs ongelmista on sen siirtäminen ja varastoiminen, vaikka vedyllä on suuri lämpöarvo kiloa kohti. Vety on molekyylinä erittäin pieni, joka asettaa suuret vaatimukset säiliöiden ja putkien materiaaleille ja tiiveydelle. Pienimolekyylisen rakenteen vuoksi se pääsee pienen pienistä raoista karkaamaan ilmakehään. Hävikit säiliöissä ja putkistoissa ovat suuret verrattuna muihin kaasuihin. Vedyn hävikki säiliössä on noin 0,3 - 3 % päivässä riippuen säiliöstä. Varastoimista ja siirtämistä hankaloittaa myös vedyn pieni tiheys. Ilmanpaineessa sitä on kannattamatonta siirtää ja varastoida suuren tilavuuden vuoksi. Vety pitää siis joko paineistaa tai nesteyttää. Paineistus ja nesteytys kuitenkin vaativat energiaa. [19]

Vety muutetaan sähköksi ja lämmöksi erilaisissa polttokennoissa. Kaikki polttokennot eivät sovellu kaikkiin tarkoituksiin. CHP-tuotantoon on järkevää käyttää joko sulakarbonaattikennoa (MCFC) tai kiinteäoksidikennoa (SOFC), joka on tarkemmassa käsittelyssä tässä työssä. Tässä yhteydessä ei käsitellä tarkemmin polttokennon toimintaperiaatetta. Polttokennossa vety reagoi hapen kanssa muodostaen sähköä, lämpöä ja vettä. [19]

Vetytalouden kokonaishyötysuhdetta arvioitaessa ei saada tarkkoja eikä oikeita arvoja, koska muuttuvia tekijöitä on niin monta. Niitä on muun muassa vedyn valmistus isossa tai pienemmässä mittakaavassa, siirto ja säilytys sekä loppukäyttö. Taulukossa 1 on esitetty hyötysuhteita, jotka on laskettu optimistisista arvoista ja arvioista. [19]

Taulukko 1 Vedyn tuotannon, siirron ja polttokennokäytön hyötysuhteita [19]

Tuotanto	
Maakaasun reformointi	0,9
Maakaasun reformointi, pieni yksikkö	0,7
Elektrolyysi (AC-DC muunnosta ei huomioitu)	0,75
Siirto: Siirron häviöitä, höyrystymistä, haihtumista ei huomioitu	
Nesteytys	0,7
paineistus	0,9
Polttokenno	
Pienet kohteet, pelkkä sähkö	0,6
Suuremmat kohteet, pelkkä sähkö	0,7
Suuremmat kohteet, yhteistuotanto	0,8
Esimerkkejä kokonaishyötysuhteesta	
Reformoitu, paineistettu, tehokas polttokenno	0,57
Reformoitu, nesteytetty, tehokas polttokenno	0,44
Reformoitu, nesteytetty, yhteistuotanto	0,50
Elektrolyysi, nesteytetty, tehokas polttokenno	0,37
Elektrolyysi, nesteytetty, yhteistuotanto	0,42
Paikallinen tuotanto maakaasusta, yhteistuotanto	0,56
Paikallinen tuotanto elektrolyysillä, yhteistuotanto	0,60

Taulukon 1 arvoista puuttuu vedyn siirron aikana tapahtuva haihtuvuus. Se yhdessä optimististen laskujen kanssa pienentää hyötysuhteita jonkun verran. Suurinkin hyötysuh-

de jää todellisuudessa alle 60 %:n, jopa reilusti alle sen. Perinteisen sähköntuotannon kokonaishyötysuhde on CHP:lla noin 80 %. Näyttää siltä, ettei vedyn tuottaminen ja käyttäminen perinteiseen sähkön tuotantoon ole kannattavaa. Toisena tärkeänä asiana mainittakoon järkevyyden. Kannattaako maakaasua ensin muuttaa vedyksi ja sen jälkeen sähköksi, kun se voidaan järkevämminkin muuttaa suoraan sähköksi. Elektrolyysin tapauksessa huomiota herättää se, että siinä sähkön avulla tuotetaan vetyä, joka edelleen muutetaan sähköksi. Sähköä voidaan kuitenkin siirtää voimalaitoksista kuluttajalle noin 96 % hyötysuhteella, kun kokonaishyötysuhde elektrolyysin tapauksessa on noin 40 %. Perinteiseen sähköntuotantoon vetyä ei ole kannattavaa käyttää. [19]

4 Verkkoon liittyminen

4.1 Yleistä

Verkkoon liittyminen vaatii pienvoiman tuottajalta tiettyjen lupien hakemista, laitteiston yhteensopivuuden tarkistamista ja erilaisten sopimusten tekemistä useamman tahon kanssa. Tärkeintä on olla yhteydessä jakeluverkonhaltijaan hyvissä ajoin, jotta voidaan varmistaa, voidaanko laitosta ylipäätään liittää yleiseen sähköverkkoon halutussa paikassa. Erilaiset maksut, mutta myös tuet, vaikuttavat suuresti laitoksen kannattavuuteen. Seuraavassa on lyhyt katsaus huomioonotettavista asioista.

4.2 Lait ja tarkastukset

Sähköturvallisuuslainsäädäntö asettaa vaatimuksia myös pienvoimalaitokselle. Lainsäädännöllä pyritään estämään onnettomuuksia kuten sähköiskuja ja tulipaloja. Laki koskee niin laitteiston asentamista kuin käytönaikaista toimintaa. [20]

Käytönjohtaja tulee nimetä, kun laitoksen laitteistossa on yli 1 000 voltin laitteita tai kun laitos on liittymisteholtaan yli 1 600 kVA ja jännitteeltään alle 1 000 V [20]. Käytönjohtajaksi ei voi nimetä ketä tahansa. Käytönjohtajalla tulee olla riittävä sähköpätevyys [20]. Alle 1 000 voltin järjestelmissä riittää sähköpätevyys S2 [21]. Yli 1 000 voltin järjestelmissä vaaditaan S1 pätevyys [21].

Laitteiston asentamiseen vaaditaan sähköurakointioikeudet. Urakoinnin voi kuitenkin suorittaa joko yritys tai henkilö, kunhan oikeudet löytyvät. Asennuksen jälkeen urakoitsijan tulee suorittaa käyttöönottotarkastus ja laatia siitä käyttöönottopöytäkirja. Isommissa laitoksissa, sulakekoko yli 35 A, tulee suorittaa lisäksi varmennustarkastus. Sähkölaitteistolle on suoritettava määräaikaistarkastus, kun sulakekoko on yli 35 A. Tarkastusväli on joko 10 tai 15 vuotta. 10 vuoden tarkastusväli on laitoksilla, joissa vaaditaan

käytönjohtajaa. Tarkastuksia tekee vain valtuutetut tarkastuslaitokset ja valtuutetut tarkastajat. Laki velvoittaa laitteiston haltijan tilaamaan määräaikaistarkastuksen. [20]

Laki ei kuitenkaan ota kantaa mahdollisiin pienvoimalaitoksen ja sähköverkon välisiin yhteensopivuusongelmiin. Yhteensopivuudesta on varmistuttava esimerkiksi toimintakokeiden tai koestuksien avulla. [20]

4.3 Sähkön laatu

Sähkön laatua koskee standardi SFS-EN 50160, joka määrittelee tarkat arvot jakeluverkon sähkön laadulle. Siihen kuuluu laatukriteerit jännitteelle, taajuudelle ja yliaalloille. Pienvoimantuottajan on käytännössä huomioitava jännitteen ja yliaaltojen laatukriteerit. Taajuudesta huolehtii järjestelmävastaava Fingrid. Liitteen A taulukoissa 1-4 on esitetty standardien mukaiset laatukriteerit. Suomessa kuitenkin on halukkuutta laadukkaampaan sähköön, joten taulukoissa on mainittu myös vaativammat arvot, joihin Suomessa pyritään.

Sähkönlaadulle annetaan vaatimuksia, jotta verkkoon kytkeytyneet laitteet sekä verkon komponentit toimisivat oikein eivätkä rikkoutuisi. Pienvoimalaitoksen vaikutus verkon sähkönlaatuun on isompi, kun verkon ”jäykkyys” on alhainen. Jäykkä verkko tarkoittaa suurta oikosulkuvirtatasoa. Mitä kauempana ollaan sähköasemasta, sitä heikompi verkko on. Verkon jäykkyyttä voidaan lisätä johdinpinta-aloja kasvattamalla, mikä puolestaan lisää kustannuksia. [20]

Pienvoimalaitos voi vähentää verkon häviöitä, mutta myös lisätä häviöitä. Jos laitos kuluttaa paljon loistehoa, voivat häviöt kasvaa. Loistehoa kannattaakin kompensoida joko kompensointiparistoilla tai tahtigeneraattorin tapauksessa generaattorin magnetointivirtaa säätämällä. Kokonaisuuden kannalta on kannattavaa, jos pienvoimalaitos toimii mahdollisimman pienellä loisteholla lähellä kulutusta, jolloin häviöt pienenevät. Pienvoimalaitos voisi ainakin periaatteessa tukea jakeluverkon jännitettä loistehoa säätämällä, mutta yleensä ne ovat tarkoitettu toimivan mahdollisimman pienellä loistehokuormalla. [20]

Pienvoimalaitoksen irrottaminen verkosta ja kytkeminen verkkoon voi aiheuttaa kytkentähetkellä jännitteen muutoksen. Tästä syystä generaattoreiden pyörintänopeudet tulee olla oikealla tasolla ennen kytkentähetkeä. Loistehoa säätämällä jännite pysyy rajoissa. Välkyntä aiheutuu myös jännitteen muutoksista, mutta muutoksia on useampi tietyn ajan sisällä. Esimerkiksi tuulivoimalaitokset voivat aiheuttaa välkyntää, koska tuulen nopeus voi vaihdella paljon ja nopeasti. [20]

Harmonisia yliaaltojännitteitä aiheutuu epälinearisista kuormista, mutta myös tuotannosta voi niitä aiheutua. Jos pienvoimalaitos on kytketty yleiseen sähköverkkoon invertterin avulla, se aiheuttaa yliaaltojännitteitä. [22]

4.4 Suojaus ja turvallisuus

4.4.1 Verkon suojaus ja turvallisuus

Pienvoiman liittäminen verkkoon vaatii lähes yhtä suuren huomion suojaukselle ja turvallisuudelle kuin isompikin laitos. Suojauksen peruseriaatteena on, että verkon laitteistolla ja komponenteilla ei ole rikkoutumisvaaraa sekä tärkeimpänä ihmisten turvallisuus. Tähän mennessä sähköä on tuotettu isoissa voimalaitoksissa ja tehoa on siirretty käytännössä yhteen suuntaan. Myös oikosulkuvirrat ovat kulkeneet yhteen suuntaan. Tilanne muuttuu, kun pienvoimalaitoita liitetään useammalle jännitetasolle. Se muuttaa oikosulkuvirtojen suuruutta ja joissakin tapauksissa myös suuntaa. Verkon suojaukseen on tehtävä muutoksia. [20,22]

Verkon suojauksen tulee toimia selektiivisesti. Se tarkoittaa sitä, että vian sattuessa vain viallinen verkon osa irtoaa verkosta. Selektiivisyyteen kuuluu myös, että mikään verkon osa ei irtoa turhaan. Pienvoimalaitoksen on siis irrottava verkosta, kun siihen liittyvässä verkon osassa on vika. Muuten pienvoimalaitos jää syöttämään verkkoa yksinään. Tämä voi olla jopa vaarallista, jos sähkömiehet menevät korjaustöihin ja pienvoimalaitos edelleen syöttää sähköä verkkoon. Verkonhaltijalla on tästä syystä oltava pääsy pienvoimalaitoksen kytkimelle tai vaihtoehtoisesti kaukokytkentämahdollisuus. Jos pienvoimalaitoksia on paljon jakeluverkon haltijan alueella, kaukokytkentä on järkevä toteutusvaihtoehto nopeuden takia. [20,22]

4.4.2 Pienvoimalaitoksen suojaus

Pienvoimalaitoksen perussuojaukseen kuuluu yli- ja alijännitesuojat, yli- ja alitaajuus-suojat sekä ylivirtasuojat. Niin kutsutun Loss of Mains –suojan käyttö on suositeltavaa, koska se estää saarekekäytön. Pienvoimalaitoksen käyttäminen saarekekäytössä voi kokea ongelmia, sillä sähkön laatu ei välttämättä pysy standardien rajoissa. Siitä voi seurata laiterikkoja ja sen takia saarekekäyttöä ei voida sallia. [22]

Pienvoimalaitoksen suojaus tulee myös estää sähkönsyöttö jännitteettömään verkkoon. Avojohtoverkoissa on käytössä pikajälleenkytkentä sekä aikajälleenkytkentä ohimenevien vikojen varalta. Jos pienvoimalaitos jää vian sattuessa syöttämään vikavirtaa, pikajälleenkytkentä ei onnistu, koska valokaari ei sammuu. Tästä seuraa aivan turha aikajälleenkytkentä, josta tulee kustannuksia verkkoyhtiölle ja haittaa asiakkaille. Tulisi pyrkiä mahdollisimman pieniin katkojen määriin. Jos valokaari ei heti sammuu, se voi aiheuttaa laiterikkoja sekä turvallisuusriskin. Vaikka pienvoimalaitos irtoaisikin, voi laitoksen irtoaminen olla liian hidas, jottei valokaari ehdi sammua. On ehkä syytä muuttaa sähköaseman releen aika-asetteluja myöhemmäksi. [22]

4.4.3 Sähkötyöturvallisuus ja merkinnät

Voimalaitos tulee huoltaa ja asentaa valmistajan ohjeiden mukaisesti. Asennuksissa tulee lisäksi noudattaa standardia EN 50438, SFS 6000 sarjaa sekä työturvallisuusstandardia SFS 6002. [20]

Turvallisuuden kannalta merkittävä asia on oikeanlainen merkitseminen. Varoituskilpiä pienvoimalaitoksesta tulee olla niin verkon puolella kuin pienvoimalaitoksen päässä. Varoituskilvet auttavat takajännitevaaran tiedostamisessa. Verkonhaltija merkitsee pienvoimalaitokset lisäksi omaan seurantajärjestelmään. [22]

4.5 Sopimukset

Pienvoimalaitoksen on tehtävä jakeluverkkoyhtiön kanssa liittymissopimus sekä verkkopalvelusopimus. Liittymissopimuksen tarkoituksena on jakeluverkon ja voimalaitoksen fyysinen yhdistäminen. Verkkopalvelusopimus käsittää sähkön siirtoon liittyvät asiat. Jos sähköä siirretään verkkoon päin eli tuotanto ylittää kulutuksen, pitää tehdä

sähkön myyntisopimus. Verkkoon siirretylle sähkölle pitää aina löytyä ostaja. Poikkeuksena kuitenkin tilanteet, joissa sähköä syötetään verkkoon hyvin vähän tai satunnaisesti. Tällaisissa tilanteissa verkkoyhtiö voi antaa toimijalle luvan sähkön siirtämiseksi verkkoon ilman ostajaa, mutta toimija ei saa korvausta syötetystä sähköstä, vaan verkkoyhtiö laskee sen kuuluvan verkon häviöihin.

Jakeluverkkoyhtiön kanssa sovittavassa liittymissopimuksessa sovitaan muun muassa liittämiskohdasta, sähköntuotantolaitteistolle asetettavista vaatimuksista, laitteiston suojauksesta ja käytöstä. Lisäksi sovitaan vastuuhenkilöistä sekä teho- ja energia-arvojen rajoista. Näiden ja Sähköntuotannon liittymisehtojen (TLE 05) perusteella määritetään liittymismaksu. Liittymismaksu on aina liittymäkohtainen. [20]

Liittymissopimuksen jälkeen tehdään verkkopalvelusopimus. Kun verkkopalvelusopimus on tehty, voimalaitos voi toimia rinnan jakeluverkon kanssa. Verkkopalvelun aloittaminen vaatii vielä sähkönmyyntisopimuksen avoimen toimittajan kanssa. Avoin toimittaja vastaa yli- ja alijäämästä. [20]

Verkkoon syötetylle sähkölle tulee olla ostaja, poikkeuksena aikaisemmin mainittu tapaus. Pienvoimalaitoksen on siis tehtävä sähkönmyyntisopimus sähkönostajan kanssa. Sähkön myyminen pienellä volyyymilla voi olla vaikeaa. Tämän takia kysyntää tulee aggregoijalle, joka myy eteenpäin usean pienvoimalaitoksen sähkön esimerkiksi sähkömarkkinoille. Aggregoinnista on kerrottu enemmän työn loppupuolella. Sähkönmyyntisopimuksessa sovitaan sähkön hinnasta, toimituksen määrästä ja tasesähköstä. [20]

5 Sähkömarkkinat

5.1 Yleistä

Suomi kuuluu Pohjoismaiseen sähköjärjestelmään, joka yhdistää maat niin teknillisesti kuin kaupallisesti. Pohjoismainen sähköjärjestelmä kattaa Suomen lisäksi Ruotsin, Norjan ja Tanskan. Yhteyksiä on myös muualle, mutta ne eivät varsinaisesti kuulu Pohjoismaiseen sähköjärjestelmään. Esimerkiksi Suomella on siirtoyhteys Venäjälle, josta tuodaan sähköä. Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä toimii sähköpörssi, jota ylläpitää Nord Pool –konserni. Sähköä voi ostaa ja myydä sähköpörssissä tai kahdenvälisillä kaupoilla.

Norjalla on käytössään paljon vesivoimaa, johon sen sähköntuotanto käytännössä perustuu. Ruotsi tuottaa sähköä pääasiassa ydinvoimalla, CHP-laitoksilla ja vesivoimalla. Tanskalla ei ole ollenkaan ydinvoimaa. Sen sähköntuotanto perustuu tuulienergiaan ja lämpövoimaan, josta suurin osa on CHP-tuotantoa.

Sähköjärjestelmän perusasioihin kuuluu tehotasapainon hallinta. Vastuu siitä on annettu järjestelmävastaaville. Suomessa järjestelmävastaavana toimii kantaverkkoyhtiö Fingrid. Järjestelmävastaava valvoo muun muassa taajuutta, joka kuvaa tuotannon ja kulutuksen suhdetta. On olemassa primäärisäätö, joka automaattisesti hoitaa pienet taajuuspoikkeamat ja sekundaarisäätö, jota tarvitaan kun primäärisäätö ei riitä. Säätosähkömarkkinat ovat osa tehotasapainon hallintaa.

5.2 Sähköpörssi

5.2.1 Elspot

Elspot-markkinoilla seuraavan päivän myynti- ja ostotarjoukset jätetään jokaisena arkipäivänä aamupäivän aikana. Tarjoukset tehdään 12 - 36 tuntia ennen käyttötuntia. Jo-

kainen tunti käsitellään omana tuntina. Tarjoukset koskevat tiettyä tuntia ja niissä määritellään hinta ja määrä, jolla ollaan valmiita myymään tai ostamaan. Osto- ja myyntitarjousten perusteella määrittyy kunkin tunnin systeemihinta. Hinnan kasvaessa myyntitarjouksien määrä yleensä kasvaa ja ostotarjouksien vastaavasti pienenee. Systeemihinta on hinta, jonka kaikki ostajat maksavat ja myyjät saavat. Osapuolen myymä tai ostama määrä tulee tarjouksen hinta-määrä profiilista. [23]

Systeemihinta on kaikkialla sama, jos ei synny pullonkauloja. Jos pullonkauloja syntyy, se jakaa alueen eri hinta-alueisiin. Ylitarjonta-alueella hinta määräytyy niin, että rajoittavan siirtoyhteyden sallima teho otetaan mukaan varmasti toteutuvana kysyntänä. Tämän jälkeen hinta määräytyy osto- ja myyntitarjousten perusteella. Ylikysyntäalueella hinta määräytyy muuten samalla tavalla, mutta siirtokapasiteetin sallima teho otetaan huomioon varmasti toteutuvana myyntinä. Kun pullonkauloja syntyy, hinta ylitarjonta-alueella laskee ja ylikysyntäalueella nousee. [23]

Elspot-markkinoilla on myös mahdollista tehdä blokkitarjouksia. Blokkitarjous koskee useita peräkkäisiä tunteja ja se joko toteutuu kokonaan tai ei ollenkaan. Tämä tietysti monimutkaistaa kaupankäyntiä, mutta tarjoaa mahdollisuuksia sellaisille voimalaitoksille, joilla on korkeat käynnistyskustannukset. [23]

5.2.2 Elbas

Elspot-markkinoita tukemaan on luotu Elbas-markkinat. Elbas-markkinoilla kaupankäynti loppuu vasta 2 tuntia ennen käyttötuntia, kun Elspotin kohdalla se oli 12 - 36 tuntia. Koska kulutusta on vaikea ennustaa tarkasti esimerkiksi päivää ennen käyttötuntia, Elbas-markkinoilla voidaan vielä hallita hankinnan ja tarpeen tasapainoa. Elbas-markkinoilla kaupat syntyvät heti, kun osto- ja myyntitarjous kohtaavat. [23]

Hajautettu sähköntuotanto sopii hyvin Elbas-markkinoille aggregaattorin välityksellä, koska hajautettu sähköntuotanto voi vaihdella päivittäin ja muutoksia tuotantoon voi tulla nopealla syklillä. Esimerkiksi kerrostalojen ja rivitalojen CHP-laitokset tuottavat sähköä lämmöntarpeen mukaan. Lämmöntarve määrää täysin kuinka laitosta ajetaan, mutta varaava systeemi tuo joustavuutta. Lämmöntarpeeseen vaikuttaa muun muassa ulkolämpötila, tuuli ja asukkaiden lämpimän veden käyttötottumukset.

5.3 Säätosähkömarkkinat

Säätosähkömarkkinat ovat sähkötaseen tasapainottamista varten kehitetty markkina- paikka. Säätosähkömarkkinoille voivat osallistua ketkä tahansa, joilla on säätökykyistä kapasiteettia. Kapasiteetti voi olla joko tuotantoa tai kulutusta. Tarjoukset voivat olla joko ylössäätö- tai alassäätötarjouksia. Ylössäätötarjous tarkoittaa tuotannon lisäämistä tai kulutuksen pienentämistä. Alassäätötarjous puolestaan tarkoittaa tuotannon pienentämistä tai kulutuksen lisäämistä. Tasevastaavilla on automaattisesti oikeus osallistua säätosähkömarkkinoille. Muiden täytyy osallistua joko tasevastaavan kautta tai tekemällä erillinen säätosähkösopimus Fingridin kanssa. [24]

Säätosähkötarjouksia voi tehdä käyttötuntia edeltävän päivän alusta lähtien. Tarjousta voi muokata tai kokonaan peruuttaa puoli tuntia ennen käyttötuntia, jonka jälkeen ne muuttuvat sitoviksi. Tarjouksen alatehoraja on 10 MW ja säätökapasiteetin tulee olla käytettävissä 10 minuutin kuluessa tilauksesta ja kestää koko käyttötunnin ajan. Ylössäätötarjoukset laitetaan järjestykseen niin, että halvin käytetään ensin. Alassäätötarjoukset menevät järjestykseen, jossa kallein tarjous on ensimmäisenä. Joskin Fingrid voi priorisoida tarjouksia nopean käyttöönoton ja suuren kapasiteetin perusteella. [24]

Säätosähkön hinta riippuu siitä, onko kyseinen tunti ylössäätö- vai alassäätötunti sekä tietenkin säätötarjouksista. Ylössäätötunnin säätosähkön hinta on korkein toteutunut ylössäätöhinta, kuitenkin vähintään Nord Pool spotin hinta. Alassäätötunnin säätosähkön hinnaksi muodostuu halvin toteutunut alassäätötarjous, kuitenkin korkeintaan kyseisen tunnin spot-hinta. Säättöön osallistuneet toimijat saavat kaikki saman hinnan säätötarjouksista riippumatta. Tunnin määrittäminen alassäätö- tai ylössäätötunniksi tapahtuu sen mukaan, kumpaan suuntaan on säädetty enemmän energiamääräisesti. [24]

5.4 Käyttöreservi

Suomessa käyttöreservi on taajuudesta aktivoituvaa tehoa. Fingrid hallinnoi käyttöreserviä. Pohjoismaissa käyttöreservien ylläpitovelvollisuudet on jaettu maiden vuosienenergioiden perusteella. Suomen käyttöreservin velvollisuus on 139 MW. Kapasiteetti on suurimmalta osin helposti säädettävää vesivoimaa. Viipurin ja Viron siirtoyhteisistä on myös varattu kapasiteettia. Käyttöreservi toimii taajuusvälillä 49,9 – 50,1 Hz. [24]

Pienvoimalaitokset ja ohjattavat kuormat eivät voi järkevästi toimia käyttöreservinä, koska niiden tehonsäätö ei ole niin nopeaa ja helppoa verrattuna vesivoimalaitoksiin. Pienvoimalaitoksille ja kuormille voisi olla enemmän haittaa käyttöreservinä olemisesta kuin sähköjärjestelmälle hyötyä.

5.5 Häiriöreservi

Sähköjärjestelmässä tapahtuvan häiriön varalta on olemassa häiriöreservi. Häiriö voi olla esimerkiksi voimalaitoksen putoaminen verkosta. Suomessa häiriöreservejä on kah- ta eri tyyppiä: taajuusohjattu häiriöreservi ja nopea häiriöreservi. Taajuusohjattu häiriö- reservi on aktiivisena taajuusvälillä 49,5 – 49,9 Hz. Suomen velvoite taajuusohjatuksi häiriöreserviksi on noin 240 MW. Kapasiteettia on voimalaitosten pätötehoreservit (520 MW) ja irtikytettävät kuormat (90 MW). [24]

Nopea häiriöreservi pitää aktivoida manuaalisesti. Fingridillä on käyttösopimuslaitoksia (204 MW) ja irtikytettäviä kuormia (425 MW) sekä omia varavoimalaitoksia (615 MW). Suomen velvoite nopeita häiriöreservejä on 865 MW. Irtikytettävät kuor- mat ovat metalli-, puunjalostus- ja kemianteollisuusyrityksiä. [24]

6 Ohjattavat pienvoimalaitokset ja kuormat

6.1 Pienet CHP-laitokset

Suomessa kaukolämmön markkinaosuus lämmityksessä oli noin 50 % vuonna 2007 [25]. Kaukolämmön tuotanto perustuu pääasiassa, osuus lähes 80 %, sähkön ja lämmön yhteistuotantoon [25]. CHP-laitokset ovat siis merkittävässä asemassa lämmöntuotannossa. Myös sähköntuotannossa CHP:n osuus, 34 %, on merkittävä [26].

CHP-laitosten, jotka käyttävät polttoaineenaan biopolttoaineita, turvetta tai maakaasua, potentiaalia on arvioitu olevan vuonna 2000 seuraavasti:

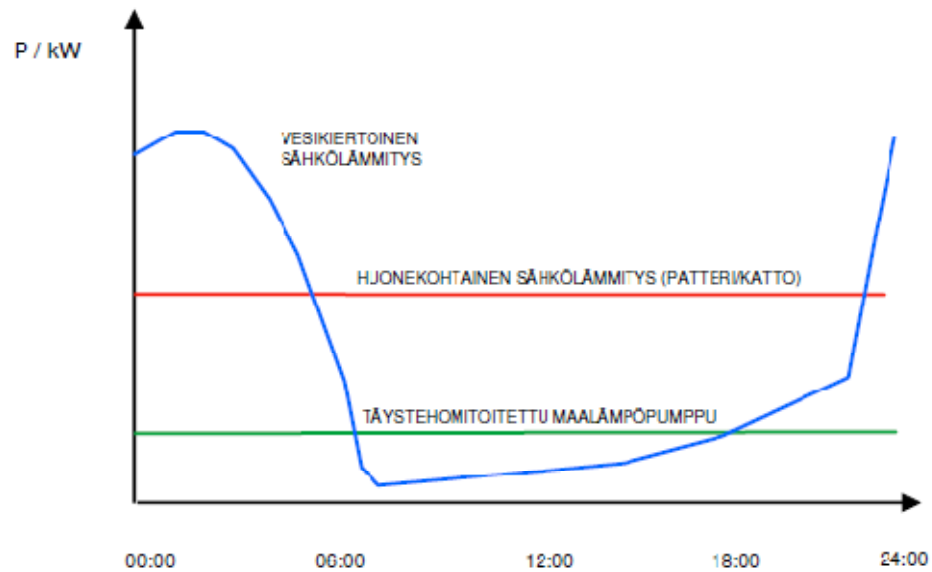
- 611 MW sähkötehoa ja 1044 MW lämpötehoa huipunkäyttöajan ollessa 6000 h/a
- 3685 MW sähkötehoa ja 5010 MW lämpötehoa huipunkäyttöajan ollessa 2000 h/a

Kappalemäärällisesti CHP-laitoksia on eniten alle 2 MW_{el}-luokassa, johon kuuluu hieman yli puolet laitoksista. Alle muutaman sadan kilowatin luokassa laitosten määrä on kuitenkin pieni. [27]

6.2 Varaavat sähkölämmitysjärjestelmät

Suomessa oli vuonna 2004 varaava sähkölämmitys 37 358 pientalossa ja 1250 rivitalossa [28]. Luku on todennäköisesti suurempi vuonna 2010, koska vesikeskuslämmitys on kasvattanut suosiotaan uusissa pientaloissa. Näiden yhteenlaskettu energiankulutus vuositasolla on noin 0,8 TWh, josta suurin osa (0,7 TWh) on pientalojen kulutus. Laskennassa on käytetty keskimääräisiä kulutustietoja ja asuntojen kokoja. Suomen sähkönkulutus vuonna 2008 oli 87,2 TWh [29]. Varaavan sähkölämmityksen osuus Suomen sähkönkulutuksesta on siis yhden prosentin luokkaa.

Energiamäärällisesti varaavan sähkölämmityksen kulutus ei ole suuri suhteessa Suomen koko kulutukseen, mutta teho on merkittävämpi. Tehon laskennassa käytetään pahinta mahdollista tilannetta eli $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ talvivuorokautta. Huipputeho ajoittuu noin kello 22.00 - 23.00 ajalle, jolloin yösähköaika alkaa. Huipputeho on noin 660 MW. Suomessa huipputeho vuoden 2010 alussa oli 14 320 MW, joka oli 28. päivä tammikuuta klo. 8.00 - 9.00 [24]. Varaavan sähkölämmityksen huipputeho ei osu kuitenkaan samaan ajankohtaan, mutta suhteutetaan sen teho kyseisen päivän klo. 22.00 tehoon. Klo 22.00 - 23.00 välillä teho oli Suomessa noin 13 500 MW [24], jolloin varaavan sähkölämmityksen osuus on noin 5 %. Teho on siis merkittävämpi luku kuin energia tässä tapauksessa. Huomioitavaa laskussa on, että se on tehty pahimman mahdollisen tilanteen mukaan eli kovan pakkasen aikaan. Toisaalta, tämän kaltaisessa tilanteessa kipeimmin tarvitaan kuormien ohjausta.



Kuva 10 Lämmitykseen käytetyn sähkön vuorokautinen tehoprofiili [28]

Kuvassa 10 on esitetty eri lämmitysjärjestelmien tehoprofiilit. Nähdään, että varaava sähkölämmitys kuluttaa sähköä käytännössä vain öisin halvemman sähkön, yösähkön takia. Kulutus voidaan ohjata mihin ajankohtaan tahansa ilman, että kuluttajan mukavuus heikkenee yhtään. Riittää, että päivän sisällä varaava lämmitys on päällä tietyn ajan. Kuvasta nähdään myös, että muiden lämmitysjärjestelmien tehoprofiili on tasainen. Niissä ei esiinny samanlaista vaihtelua kuin varaavassa lämmitysjärjestelmässä. Jos esimerkiksi huoneistokohtaista sähkölämmitystä kytkettäisiin pois päältä ja takaisin

päälle, eivät hyödyt olisi merkittäviä. Ensinnäkin, huoneen lämpötila laskee vähitellen, mutta kohtalaisen nopeasti, joten pitkää aikaa lämmitystä ei ole mahdollista pitää pois päältä mukavuuden kärsimättä. Toisekseen, kun lämmitysjärjestelmä kytketään takaisin päälle, termostaatti ohjaa lämmityksen täydelle teholle saavuttaakseen huoneen tavoitelämpötilan. Tästä seuraa korkea kulutushuippu juuri kytkemishetkestä eteenpäin ja se saattaa aiheuttaa uusia ongelmia verkon tehotasapainoon.

6.3 Sähköautot



Kuva 11 Mitsubishin sähköauto i MiEV [30]

Tällä hetkellä Suomessa ei ole kuin kourallinen sähköautoja. Eri tahot ovat tehneet ennusteita ja arviota sähköautojen määrästä tulevaisuudessa. Tällä hetkellä ei siis voida puhua, että sähköautoissa olisi potentiaalia hajautetuiksi energiaresursseiksi. Sähköautojen yleistyessä niiden potentiaali on merkittävä.

Minkä suuruinen potentiaali sähköautoissa tulevaisuudessa on? Ajatellaan tilannetta, että Suomessa olisi 10 % henkilöautoista sähköautoja. Sähköautoja olisi silloin noin 280 000 kappaletta. Vuoden 2009 lopussa henkilöautoja oli rekisterissä 2 776 664 kappaletta [31].

Yleisimmäksi latausmuodoksi muodostuu varmasti niin sanottu hidas lataaminen, jossa autoa ladataan pienellä teholla useamman tunnin ajan. Tällä hetkellä hidas lataaminen tarkoittaa lataamista noin 3 kW teholla, jolloin latauksen kesto on noin 8 tuntia. Latausaikaan vaikuttaa akuston varausaste ennen latausta ja akuston kapasiteetti. Jos sähköautot lataisivat samaan aikaan hitaalla lataustavalla, olisi latausteho noin 830 MW. Kyseisen sähköautomäärän vuosittainen energia yhteensä on noin 0,6 -1,3 TWh. Laskennassa on käytetty vuoden 2009 henkilöautojen henkilöliikennesuoritetta eli kuinka monta kilometriä henkilöautoilla on ajettu yhteensä vuonna 2009 [32]. Sähköauton energiankulutus on noin 10 – 20 kWh/100 km.

7 Virtuaalinen voimalaitos

7.1 Yleistä

Pienvoimantuotannon saattamiseksi sähkömarkkinoille tarvitaan aggregaattoria, joka välittää sähkön markkinoille. Pienvoimantuottajalla ei ole mahdollisuuksia yksin toimia sähkömarkkinoilla, koska maksut ovat korkeat suhteessa sähköstä saatavaan tuloon. Aggregaattori on siis sellainen, joka välittää usean pienvoimantuottajan tuotannon markkinoille. Sähköpörssissä aggregaattori näkyy virtuaalisena voimalaitoksena. Näin erilaiset maksut, jotka liittyvät sähköpörssiin ja muihin sähkön kaupantekopaikkoihin, jakautuvat pienemmiksi maksuiksi pienvoimantuottajalle. Suomessa on yksi yritys, joka toimii aggregaattorina, vaikka ei sillä nimellä itseään mainosta.

7.2 Virtuaalinen voimalaitos ja aggregaattori

Virtuaalisen voimalaitoksen tarkoituksena on saattaa näkyviin pienet sähköntuotantolaitokset. Verkossa on tälläkin hetkellä pieniä tuotantolaitoksia, joista sähkönmyyjä tai sähköverkonhaltija ei tiedä mitään. Tarkoituksena on koota pieniä tuotantolaitoksia sekä ohjattavia kuormia yhdeksi virtuaaliseksi voimalaitokseksi eli ne näkyvät tällöin sähköverkkoon ja sähkömarkkinoille yhtenä voimalaitoksena; virtuaalisena voimalaitoksena. Virtuaalinen voimalaitos ei periaatteellisesti eroa konventionaalisesta voimalaitoksesta, muuten kuin, että se sisältää useampia voimalaitoksia ja ohjattavia kuormia. Virtuaalinen voimalaitos voi olla mukana sähköpörssissä, säätösähkömarkkinoilla sekä reservinä. Koska virtuaalinen voimalaitos koostuu erilaisista palasista, se on joustava. Joustavuutta tarvitaankin, sillä virtuaalinen voimalaitos voi sisältää komponentteja, jotka eivät ole joustavia. Joustamattomilla komponenteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä tuuli- ja aurinkovoimalaitoksia, joiden tuotantoa ei voida ohjata tai tuotantoa ei ole järkevää ohjata. Joustamattomia komponentteja kompensoimaan tarvitaan joustavia komponentteja, joita ovat muun muassa CHP-laitokset ja ohjattavat kuormat.

Aggregaattori liittyy olennaisesti virtuaaliseen voimalaitokseen. Aggregaattori on se, joka hallinnoi virtuaalista voimalaitosta. Virtuaalinen voimalaitos pääsee toimimaan sähkömarkkinoilla nimenomaan aggregaattorin välityksellä. Aggregaattori tekee tarjoukset sähkön myynnistä esimerkiksi sähkön spot-markkinoille ja ohjaa laitosten tuotantoa sen mukaan. Tuotantolaitosten lisäksi aggregaattori ohjaa tiettyjä kuormia, joista on kerrottu tarkemmin aikaisemmin tässä työssä.

Kuka tai mikä olisi hyvä aggregaattori tai voisi ylipäätään olla sellainen? Hyvät edellytykset aggregaattorina toimimiseen on sellaisella taholla, joka jo ennestään toimii sähkömarkkinoilla. Tällainen toimija maksaa joka tapauksessa kaupankäyntiin liittyvät kiinteät maksut. Välittämällä virtuaalisen voimalaitoksen sähkömarkkinoille, se vain lisää omaa volyymiaan. Looginen valinta aggregaattoriksi olisi siis sähkönmyyjä eli sähköyhtiö. Mikään ei estä perustamasta erillistä aggregaattoriyhtiötä, mutta Suomen kokoisessa maassa volyymi saattaa jäädä liian pieneksi tämän kaltaisen yritystoiminnan harjoittamiseen. Tosin Suomessa on yksi aggregaattoria muistuttava yritys, jota on käsitelty tarkemmin tässä luvussa myöhemmin. Aggregaattoritoiminta on huomattavasti yleisempää USA:ssa, mutta jonkun verran aggregaattoreita löytyy myös Euroopasta.

7.3 *Hyödyt virtuaalisesta voimalaitoksesta eri tahoille*

7.3.1 *Pienvoimantuottajalle*

Koska pienvoimantuottajan on vaikea löytää ostajaa tuottamalleen sähkölle, voi aggregaattori olla ainoa kanava sähkön myymiselle. Aggregaattorin välityksellä pienvoimantuottaja saa sähköstään markkinahinnan. Aggregaattori veloittaa pienvoimantuottajalta jonkun suuruisia palvelumaksuja tai välityspalkkioita.

Jos pienvoimantuottajalla on myös kulutusta, tulisi aggregaattorin olla myös avoin toimittaja. Avoin toimittaja vastaa ylijäämä- ja alijäämäsihköstä.

7.3.2 *Sähköverkkoyhtiölle*

Verkkoyhtiö hyötyy pienvoimantuotannosta muun muassa pienentyneiden häviöiden ansiosta. Kunhan pienvoimantuotantolaitos on sellainen, mikä tuottaa vähintään oman loistehon. Jos laitos ottaa loistehoa verkosta, häviöt voivat itse asiassa kasvaa. On tärke-

ää, että huolehditaan myös loistehosta. Häviöt pienentyvät, koska tuotanto tapahtuu lähempänä kulutusta ja sähkön siirtoa tapahtuu vähemmän.

Kuormien ohjaamisella saavutetaan myös isoja hyötyjä. Kun kuormia ohjataan sellaiseen ajankohtaan, jolloin muuta kulutusta on vähän, saavutetaan häviöiden pienentymistä sekä huipputehon pienentymistä. Yleensä myös sähkön hinta on pienempi alhaisen kulutuksen aikaan. Huipputehon pieneminen voi joissakin tapauksissa tarkoittaa verkon vahvistamisinvestointien lykkäämistä tai jopa hylkäämistä kokonaan. Tästä on hyötyä myös asiakkaille, sillä asiakkaat lopulta maksavat verkon investoinnit sähkönsiirtomaksuina. Lähellä kulutusta oleva tuotantolaitos pienentää myös huipputehoa, jolloin sen vaikutukset ovat samanlaiset kuin kuormien ohjaamisella.

7.3.3 Sähkönmyyjälle

Sähkönmyyjälle ei ole mitään hyötyä aggregaattoritoiminnasta, jollei se itse ole aggregaattori. Aggregaattorin ominaisuudessa se pystyy tarjoamaan asiakkailleen palvelun, josta se saa lisää tuloa. Pienvoimantuotanto pienentää sähkön myyntiä, jolloin sähkön myynnistä saatavat tulot pienenevät, mutta välityspalkkiot kasvavat.

Jos aggregaattori pystyy tarjoamaan säätösähkömarkkinoille ohjattavaa kuormaa, se saa säätösähkömarkkinoilta suoraan tuloa. Kuorman ohjaamisesta se joutuu kuitenkin maksamaan osan tuloista asiakkaalle.

7.3.4 Yhteiskunnalle

Koska virtuaalinen voimalaitos tekee hajautetun sähköntuotannon näkyväksi ja optimoi kuormien kytkeytymisiä sopiviin ajankohtiin, systeemi toimii mahdollisimman tehokkaasti. Tehokkuus tuo mukanaan muita etuja, kuten sähkön hinta ei kasva tarpeettomasti, sähköntuotanto on ympäristöystävällisempää ja pienemmät sähköntuottajat saavat parhaan mahdollisen hyödyn tuotantolaitoksestaan. Kun Suomessa otetaan käyttöön virtuaalinen voimalaitos – konsepti, se todennäköisesti kannustaa ihmisiä investoimaan hajautettuun sähköntuotantoon. Sähköntuotannon ja kulutuksen ollessa hyvässä kontrollissa sähköverkon luotettavuus ja sähkön toimituksen varmuus kasvaa.

7.4 Franchise-periaate

Franchise-periaatteen voisi tuoda myös hajautettuun sähköntuotantoon. Tämä tarkoittaisi sitä, että olisi yksi yritys, joka markkinoisi, antaisi teknistä tukea ja huolehtisi asennuskoulutuksesta. Franchising-systeemiä käyttää Suomessa moni ketju esimerkiksi McDonald's, Kotipizza ja Top Sport. Olennaista franchise-systeemissä on hajautetun sähköntuotannon kannalta, että olisi olemassa joukko asennusliikkeitä, jotka pystyisivät hoitamaan laitteiston asennuksen ja tarvittaessa myös elinaikaisen huollon. Asiakkaan ei tarvitse silloin huolehtia muusta kuin, että hänellä on rahaa investointiin. Asiakas tilaa esimerkiksi biokaasulla toimivan CHP-laitoksen ”avaimet käteen” – periaatteella ja kaikki muu hoidetaan hänen puolestaan. Tämän kaltainen systeemi on kustannustehokas ja ennen kaikkea asiakkaalle helppo. Kustannustehokkuus tulee pääasiassa yhteishankinnoista. Laitteiston toimintavarmuuden varmistamiseksi tulee laitteisto huoltaa säännöllisesti. Kun huollon hoitaa valtuutettu huoltoliike, laitteisto on toimintavarma ja, mikä ennen kaikkea asiakkaan näkökulmasta on tärkeää, laitteisto pysyy käyttökunnossa pitkään.

7.5 Energiameklarit Oy

Energiameklarit Oy on 24:n suomalaisen sähköyhtiön omistama yritys. Yrityksen palveluihin kuuluu sähkön välityspalvelu Pohjoismaisille sähkömarkkinoille. Se tarjoaa myös avoimen toimituksen sekä asiantuntijapalveluksia liittyen sähkömarkkinoihin. [33]

Energiameklarit välittävät markkinoille pienempien toimijoiden tuotantoa, koska heillä ei ole itsenäisesti mahdollisuuksia toimia sähkömarkkinoilla, johtuen suurista kaupan- käynti- ja muista sähkömarkkinoihin liittyvistä maksuista. Energiameklarit Oy toimii siten aggregaattorina. Se välittää useamman pienehkön sähköyhtiön tuotannon sähkömarkkinoille. Energiameklareiden pienin asiakas on vuodessa vajaa 10 GWh tuottava asiakas [34]. Toimitusjohtaja Esko Kytömäen mukaan pienemmän asiakkaan välittämisestä markkinoille ei ole periaatteessa mitään esteitä, mutta Energiameklarit Oy perii asiakkailtaan palvelumaksuja, jotka voivat tehdä pienen asiakkuuden kannattamattomaksi [34].

7.6 *Tanskan malli*

Tanska on ollut Euroopassa yksi edelläkävijöistä tuulivoiman tuottamisessa. Tanskan tavoite vuodelle 2025 on tuottaa 50 % sähkön kulutuksesta tuulivoimalla [35]. Näin massiivinen tuulivoiman tuotanto vaatii paljon kulutukseen joustoa. Ensisijaisena kulutuksen joustomahdollisuutena Tanskassa nähdään lämmityksen ohjaus. Tanskassa halutaan enemmän sähköä käyttäviä lämminvesivaraajia ja lämpöpumppuja. Seuraavana ohjauksen kohteeksi tulee liikennesektori eli käytännössä sähköautojen lataukseen tulee optimointia tuulivoiman tuotannon mukaan. Seuraavana askeleena on mietitty erilaisten energiavarastojen hyödyntämistä, esimerkkinä mainittakoon vety ja akut. [35]

Tanskassa on otettu jo askeleita joustavamman järjestelmän suuntaan. Siellä on yhdistetty kaksi erillistä valvontakeskusta yhdeksi sekä olemassa olevia sähkölinjoja on vahvistettu ja uusia linjoja tullaan rakentamaan. Lisäksi Tanskassa tutkitaan useita eri vaihtoehtoja joustavamman järjestelmän parantamiseksi. Esimerkkinä Tanskassa tutkitaan kahden eri synkronialueen yhdistämistä yhtenäiseksi synkronialueeksi sekä virtuaalinen voimalaitos – konseptin kehittämistä. Periaatteena on, että joustava järjestelmä toimisi hyvin teknisesti ja taloudellisesti sekä niin, että sähkön saatavuus olisi taattu. [35]

Yli 50 % Tanskan lämpövoimasta on tuotettu yhdistetyllä lämmön ja sähkön tuotannolla, loput lauhdevoimalla. Suurin osa paikallisten CHP-laitoksien tuotannosta on aikataulutettu spot-hintojen mukaan. Ne myös osallistuvat tehoreservimarkkinoille. Tämänkaltaisen tariffijärjestelmä laittaa hajautetun CHP-tuotannon osallistumaan joustavaan järjestelmään. Se on toiminut Tanskassa hyvin. Lisäksi on rakennettu sähköllä toimivia lämpökattiloita, jotka toimivat CHP-laitosten kanssa yhteistyössä. Näin ollen, kun tuulivoimaa on liikaa saatavilla, sähkölämpökattilat kuluttavat ylimääräsähköä ja sekä sähkö- että lämpöjärjestelmä pysyy tasapainossa. [35]

Tanskassa on asennettu paljon uusia mittareita, jotka mittaavat tunneittain kulutusta. Tarkoituksena on ollut, että ihmiset valitsevat sähkön spot-hintaan perustuvan sähkösovimuksen, mutta niin ei kuitenkaan ole käynyt. Näin ollen kuluttajat eivät ohjaa omaa kulutustaan sähkön hinnan mukaan, eikä kulutusjousto tapahtu. Kulutusjouston ideana on kuluttaa sähköä silloin kun sitä on hyvin saatavilla ja se on halpaa sekä toisinpäin eli

sähkön ollessa kallista sitä kulutettaisiin vähemmän. Kulutusjousto lisää uusiutuvan energian, tässä tapauksessa tuulivoiman käytön tehokkuutta. [35]

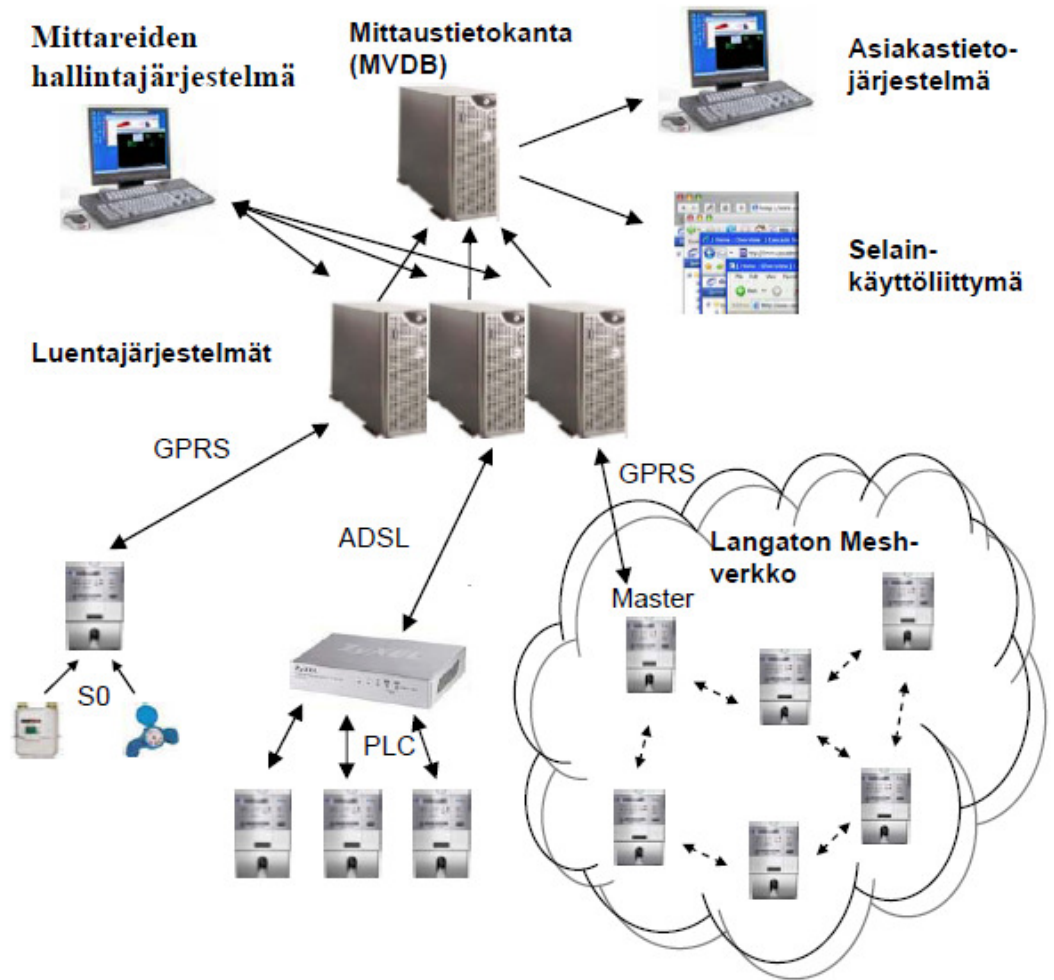
NordPool spot-markkinoille ollaan suunnittelemassa negatiivisia spot-hintoja. Se lisäisi joustavuutta systeemiin merkittävästi. Kuluttajat saisivat korvauksia kuluttamastaan sähköstä, kun tuulivoiman tuotantoa on saatavilla ylimääräisesti. [35]

8 *AMR-mittarit*

8.1 *Yleistä mittareista*

AMR-järjestelmän periaatteellinen toiminta on esitetty kuvassa 12. Järjestelmä sisältää etäluettavat mittarit, joita voi olla paljon pienellä alueella tai sitten yksittäisiä siellä täällä. Sen takia kuvassa on eri tavalla liitetty mittareita luentajärjestelmään. Eri tiedonsiirtoteknologioista on kerrottu tarkemmin myöhemmin tässä luvussa. Luentajärjestelmä lukee tiedot mittarilta. Huomioitavaa on, että sähköyhtiöllä voi olla eri mittarimalleja käytössä useita, joihin tarvitaan oma luentajärjestelmänsä. Mittaustietokanta on järjestelmän ydin. Sinne varastoidaan mittaustiedot ja sieltä muut järjestelmät saavat mittaustiedot käyttöön. Muita järjestelmiä ovat muun muassa asiakastietojärjestelmä, mittareiden hallintajärjestelmä, verkkotietojärjestelmä, tasehallinta sekä mahdollisesti myös selainkäyttöliittymä, jonka avulla asiakas pystyy seuraamaan omaa kulutustaan ja laskutustaan. Hajautettua tuotantoa varten tulee olla joko oma järjestelmänsä tai se tulee integroida muihin järjestelmiin. [36]

Tiedonsiirto mittarilta luentajärjestelmään voidaan toteuttaa monella eri tavalla riippuen vallitsevista olosuhteista. Nyrkkisääntöinä voidaan pitää, että haja-asutusalueella on taloudellisesti kannattavaa käyttää poin-to-point-tiedonsiirtoa esimerkiksi GPRS:n avulla. Kun mittareita on paljon tiheämmässä, kannattavampaa on käyttää keskitintä, joka välittää mittaustiedot luentajärjestelmään. Kuvassa 12 mittarit ovat liitetty keskitimeen PLC-tekniikalla ja keskittimeltä luentajärjestelmään laajakaistalla. Lisäksi kuvassa 12 on esitetty lyhyen kantaman langattomalla tekniikalla liitetty mesh-verkko. Mesh-verkossa yksi päätelaite toimii liityntänä verkon ulkopuolelle. Mesh-verkko voidaan liittää luentajärjestelmään esimerkiksi GPRS:n tai UMTS:n avulla. Kuvan vasemmassa alareunassa näkyy myös vesi- ja lämpömittarit liitettynä pulssilähdöllä sähkömittariin. [36]



Kuva 12 Periaatekuva mittarijärjestelmästä [36]

8.2 Ominaisuudet

Sähköenergiamittarilta vaaditaan jo tänä päivänä paljon enemmän kuin aikaisemmin, tulevaisuudessa vaatimukset vain kovenevat. Hyvällä energiamittarilla on seuraavat ominaisuudet. Ominaisuudet on poimittu lähteestä [37] listan viimeisintä lukuun ottamatta.

- sähkön kulutuksen rekisteröinti ajan tasalla tai lähes ajan tasalla
- sähkön tuotannon rekisteröinti
- mahdollisuus lukea mittari sekä paikallisesti että etälukuna

- etäluku on voitava tehdä myös tarpeen käynnistämänä
- etäohjauksena tapahtuva mittarin läpi kulkevan tehon rajoittaminen ja ääritapauksessa katkaiseminen
- tiedonsiirto paikallisten tietoverkkojen ja järjestelmien kanssa
- kyky lukea muita läheisyydessä sijaitsevia mittareita, esimerkiksi kaukolämpö, kaasu tai vesi
- mahdollisuus mitata tuntitehoja ja vaihtelevilla aikaresoluutioilla kuormituskäyriä
- mahdollisuus etävalvoa mittareiden oikeaa toimintaa
- kyky identifioida mittari yksikäsitteisesti käymättä paikalla
- sähkön toimitusvarmuuden ja joidenkin sähkönlaatusuureiden seuranta
- tehon kaksisuuntainen mittausta eli mitataan erikseen kulutus ja tuotanto

Tärkeimmät mittarin ominaisuudet tämän työn kannalta ovat tehon mittausta, kaksisuuntainen tiedonsiirto sähköyhtiön kanssa, kuormituksen etäohjausta, ja mahdollisesti myös tehon kaksisuuntainen mittausta sekä hajautetun CHP-laitoksen etäohjausta. Tehon mittausta on oleellista tehoreservinä toimimisen takia. On tiedettävä kuinka paljon tehoa on ohjattavissa niin alas- kuin ylöspäinkin. Tämän ominaisuuden mahdollistaa vain kaksisuuntainen tiedonsiirto sähköyhtiön kanssa ja etäohjausta. Tärkeänä mittarin ominaisuutena voitaisiin mainita myös toimintakyky jännitekatkon aikana, joka tarkoittaa akun lisäämistä järjestelmään. Esimerkiksi jos ennen jännitekatkoa ohjauksen piirissä oleva kuorma on päällä ja sen oletetaan olevan päällä kun jännite palaa, niin voi olla tarpeen myöhäistää kuorman kytkeytymistä, jolloin ilmiö nimeltä ”Cold load pickup” ei olisi niin voimakas. Myös mittaustietojen säilyvyyden kannalta on hyvä, että järjestelmään kuuluu akku.

Mittarin ohjelmiston päivitettävyyden on myös erittäin hyödyllinen ominaisuus. Kun ohjelmisto pystytään päivittämään, ei tarvitse koko mittaria vaihtaa. Se säästää ennen kaikkea rahaa, mutta myös aikaa. Jos ohjelmiston päivitys pystytään tekemään tietoliikenneverkon yli, käynti mittausta paikalla tulee tarpeettomaksi. Ohjelmiston päivitys saattaa tulla ajankohtaiseksi, kun mittariin halutaan uusia ominaisuuksia tai toimintoja. [37]

8.3 *Luotettavuus*

Mittarijärjestelmän tulee ennen kaikkea olla luotettava. Tarkoitukselta katoaa pohja, jos mittarijärjestelmä ei toimi niin kuin sen on ajateltu toimivan. Esimerkiksi kuormien ohjaamisista voi koitua enemmän harmia kuin hyötyä, jos järjestelmä ei toimi tai se toimii väärin. EFFLOCOM-nimisessä projektissa on raportoitu mittarijärjestelmän ongelmista, joita on tullut esiin pilottihankkeissa [38].

Kokemukset perustuvat Norjassa oleviin pilottihankkeisiin. Niissä huomattiin, että teknologia on epäkypsää. Jopa isommilla toimittajilla oli ongelmia laitteidensa kanssa. Yksi syy ongelmiin on laitteiden suuri määrä. Laitteita on testattu pienemmässä ympäristössä onnistuneesti, mutta siirryttäessä useamman tuhannen yksilön laitteistoon, on syntynyt ongelmia. Sama teknologia voi toimia toisella käyttäjällä, kun taas toisella käyttäjällä se ei toimi. [38]

Jos tiedonsiirrossa käytetään langatonta tekniikkaa, tulisi muun muassa geologiset seikat ottaa huomioon. GSM-tekniikkaa käyttävissä järjestelmissä oli havaittu vakavia ongelmia. GSM-modeemit olivat menneet sellaiseen tilaan, että ne piti uudelleenkäynnistää manuaalisesti, jotta ne saatiin jälleen toimintakuntoon. GSM-verkko oli myös välillä varattu niin, ettei tiedonsiirto mittarin kanssa onnistunut. [38]

Ongelmia voi myös tulla, sillä niin laitteiston toimittajille kuin verkkoyhtiölle suuren mittakaavan laitteiston käyttöönotto on uutta. Toimittajilla ei välttämättä ole kapasiteettia toimittaa suurta määrää ajallaan. Toimittajat eivät ole myöskään tajunneet aikataulun tärkeyttä verkkoyhtiölle. Verkkoyhtiön tilaamat asentajat ovat joutuneet odottamaan mittareita ja se on tullut kalliiksi verkkoyhtiölle. Verkkoyhtiöiden kokemattomuus isoista ICT-projekteista johtaa helposti siihen, että ne eivät osaa käsitellä eteen tulleita ongelmia ja virheitä tai ainakin niiden selvittäminen vie paljon aikaa. Verkkoyhtiöiden tulisi osata määritellä tarkat spesifikaatiot siitä, mitä he haluavat teknologialta. Tiedonsiirtoa mittarilta ei ole standardisoitu, joten laitteistojen valmistajat pystyvät tekemään omia systeemejä, jotka eivät välttämättä vastaa verkkoyhtiön tarpeita. [38]

8.4 Tiedonsiirto

8.4.1 Tiedonsiirtotekniikat

8.4.1.1 Yleistä

Tässä yhteydessä tiedonsiirtotekniikoita esitellään vain periaatteellisessa mielessä sekä miten hyvin ne soveltuvat mittarin ja sähköyhtiön väliseen tiedonsiirtoon. Todennäköisesti on järkevää ja kustannustehokasta käyttää useita eri tiedonsiirtotekniikoita. Esimerkiksi kuluttajan mittarin ja muuntamon väli toteutetaan yhtä tekniikkaa käyttäen ja muuntamolta eteenpäin käytetään toista tekniikkaa. Kussakin tekniikassa on omat hyötynsä ja haittansa, ja niitä käytetään hyväksi kokonaisuudessa. Ratkaisuja on kuitenkin mietittävä alue- ja tapauskohtaisesti.

8.4.1.2 Kiinteät tiedonsiirtotekniikat

PLC

PLC tulee sanoista Power Line Communication ja tarkoittaa tiedonsiirtoa sähköverkkoa pitkin [38]. Tiedonsiirrossa käytetään kantoaaltoa, jonka taajuus on välillä 3 – 148 kHz [38]. Vaikka sähköverkko kattaa jokaisen kuluttajan, tiedonsiirto kuitenkin katkeaa muuntajan kohdalla. Pienjänniteverkossa yksi PLC-laitteisto kattaa yhden muuntopiirin. Muuntajan luona on luonnollinen paikka tietojen keskittimelle, josta tiedot siirtyvät eteenpäin joko toista PLC-laitteistoa tai jotain muuta tiedonsiirtoteknologiaa käyttäen. Tällä tavalla kuluttajat ovat ryhmiteltynä muuntopiirikohtaisesti.

PLC-tekniikka on ollut käytössä jo vuosikymmeniä sähköyhtiöllä. Tiedonsiirtonopeus on ollut kuitenkin alhainen. Viime vuosina on kehitetty tekniikkaa ja samalla tiedonsiirtonopeuksia on pystytty nostamaan. PLC-tiedonsiirtoa on kapeakaistaista ja laajakaisistaista, jolloin tiedonsiirtonopeusluokat ovat <100 kbit/s ja <200 Mbit/s. Kapeakaistaista tiedonsiirtoa on käytetty automaatio-sovelluksissa ja mittarinluvussa. Laajakaisistaista PLC-tekniikkaa on käytetty Internet-yhteyksissä ja sisäverkoissa.[39]

Pienjänniteverkossa signaali heikkenee paljon eri syistä ja maksimikantamaksi on ilmoitettu 500 metriä laitteiden välillä. Vaimenemista kompensoimaan voidaan verkkoon

asentaa toistimia. Signaalin vaimenemiseen vaikuttaa pienjänniteverkon fyysinen rakenne ja kunto, verkon kuormitus sekä verkossa esiintyvät häiriöt. Signaalin vaimeneminen vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen ja luotettavuuteen, sillä signaali ei välttämättä pääse perille asti. Signaalia ei voida vahvistaa lisäämällä lähetystehoa, koska siitä voi aiheutua muille järjestelmille häiriötä, esimerkiksi radioliikenteelle. [39]

PLC-tekniikan hyödyt [38]:

- Kattaa kaikki kuluttajat
- Kaksisuuntainen tiedonsiirto mahdollinen
- Kustannustehokas järjestelmä luoda ja käyttää
- Verkon elinikä ei ole rajoitettu
- Sähköverkkoyhtiö omistaa verkon ja hallinnoi sitä.

PLC-tekniikan haitat [38,39]:

- Erilaiset verkkoon kytketyt PLC-yksiköt voivat generoida kohinaa ja täten heikentää tiedonsiirron laatua
- Standardoinnin puute, joka aiheuttaa yhteensopivuusongelmia eri järjestelmien kesken
- Jos sähköverkon rakennetta muutetaan, esimerkiksi häiriötilanteessa käytetään varayhteyttä muuntamolle, voi esiintyä ongelmia saada yhteys kuluttajien mittareille.
- Lyhyt kantama

PLC-tekniikan ympärillä pyöriviä uusimpia nimiä ovat Modbus, LonWorks, LonTalk ja Maxim. Modbus on standardi tiedonsiirtoprotokolla, LonWorks on tiedonsiirtoväylä ja LonTalk siinä käytetty protokolla sekä yritys Maxim, jolla on oma sähköverkkotiedonsiirto piiriratkaisu. Ratkaisut eroavat toisistaan muun muassa kommunikaatiomenetelmän osalta. Maxim lupaa omalle piiriratkaisulleen jopa 32 kbit/s tiedonsiirtonopeuden, kun muut jäävät selvästi alle 10 kbit/s. [39]

Laajakaista

Kiinteitä laajakaistateknologioita ovat DSL, kaapelimodeemi, valokuitu ja datasähkö, eli PLC, joka on jo mainittu ylempänä. Näistä DSL ja kaapelimodeemi ovat yleisimmät

kuluttajien käytössä. Valokuitu ei tänä päivänä ole yleinen kuluttajille asti, mutta runkoyhteyksissä sitä käytetään suuren kapasiteetin vuoksi. [40]

DSL on laajakaistateknologia, joka hyödyntää olemassa olevaa puhelinliikenneverkkoa. DSL toimii eri taajuusalueella kuin puheliikenne, joten ne eivät häiritse toisiaan. Kullekin DSL-yhteydelle varataan oma taajuuskaista, jolloin muut saman alueen DSL-yhteydet eivät vaikuta yhteyden tiedonsiirtonopeuteen. Tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavia seikkoja ovat puhelinkaapelin paksuus, DSL-teknologian tyyppi ja etäisyys paikallisvaihteesta. Yleisin kuluttajien DSL-teknologian tyyppi on ADSL (Asymmetric DSL), jossa tiedonsiirtonopeus on eri alavirtaan ja ylävirtaan, alavirtaan nopeampi. [40]

Kaapelimodeemi hyödyntää kaapelitelevisioverkkoa. Televisio ei käytä verkon koko kaistaa, joten muulle liikenteelle jää kapasiteettia. Kaapelimodeemi eroaa DSL-teknologiasta siinä, että kaapelimodeemi ei varaa yhteydelle taajuuskaistaa kuten DSL. Kaapelimodeemin tapauksessa tietyn alueen yhteydet jakavat koko kapasiteetin keskenään. Käyttäjämäärien ollessa vähäisiä tiedonsiirtonopeudet ovat korkeita. Ruuhka-aikaan tiedonsiirtonopeudet ovat puolestaan alhaisemmat. [40]

8.4.1.3 Laajan alueen langattomat tietoverkot

GSM

GSM (Global System Mobile) on kehitetty 1980-luvun alkupuolella. Siitä tuli yleinen standardi digitaaliselle viestinnälle Euroopassa ja myöhemmin maailmanlaajuinen standardi matkapuhelinviestinnälle. [38]

GSM on piirikytkentäinen datapalvelu. Se tarkoittaa sitä, että yhteys muodostetaan ja sitä pidetään yllä, vaikkei tiedonsiirtoa tapahtuisikaan. Se varaa siis kapasiteettia, vaikkei yhteys olisi aktiivisessa käytössä. Yhteydestä maksetaan sen keston perusteella. [39]

GSM-verkossa tukiasemat muodostavat soluja. Yhdellä solulla on oma peittoalueensa ja solut yhdessä muodostavat koko GSM-verkon peittoalueen. Vierekkäiset solut käyttävät eri taajuusalueita, mutta samoja taajuuksia voidaan uudelleenkäyttää soluissa, jotka ovat riittävän kaukana toisistaan. Solujen koot vaihtelevat. Yleensä tiheästi asutulla alueella

joudutaan käyttämään pieniä soluja suuremman kapasiteetin tarpeen takia. Harvaan asutulla alueella voidaan käyttää suurempia soluja. [36]

GSM:n tiedonsiirto on rajoitettu 9,6 kb/s. Pienestä kapasiteetista johtuen se ei sovellu suuren tietomäärän siirtämiseen. Eräissä lähteissä on arvioitu GSM-tekniikan olevan liian kallis toteutettavaksi kaikille kuluttajille. Myös GSM:n eliniän kritisoidaan aiheuttavan suurta riskiä. Kokemukset GSM:n käytöstä ovat osoittaneet, että GSM verkko ei ole aina saatavilla. Tästä johtuen GSM ei välttämättä sovi kuormien ohjaamiseen. [38]

GPRS

GPRS on kehittyneempi versio GSM:stä, joka on pakettikytkentäinen datapalvelu. Pakettikytkentäisessä tiedonsiirrossa yhteys käyttää tiedonsiirtokapasiteettia vain, kun tietoa lähetetään tai vastaanotetaan. Yhteys on kuitenkin ensin muodostettava, jonka jälkeen se voi jäädä valmiustilaan. Valmiustilasta siirtyminen aktiiviseen tilaan tapahtuu huomattavasti nopeammin kuin uuden yhteyden luominen. [39]

GPRS toimii samoilla taajuuksilla kuin GSM, joten ne jakavat kapasiteetin. GSM on kuitenkin priorisoitu ensimmäiseksi. Tämä voi johtaa välillä tilanteisiin, jossa GSM käyttää jopa koko kapasiteetin, jolloin GPRS ei toimi. GPRS:lle annetaan kuitenkin hieman kapasiteettia, jotta tiedonsiirto ei katkea kokonaan. Kun GSM-liikennettä on paljon, niin GPRS toimii hitaammalla tiedonsiirtonopeudella. [39]

GPRS:llä on käytössä neljä eri kanavakoodausluokkaa. Ne eroavat toisistaan suojaustasoiltaan ja tiedonsiirtonopeuksiltaan; mitä suurempi suojaus, sen pienempi tiedonsiirtonopeus ja päinvastoin. Parempi suojaus kestää paremmin häiriöitä, mutta alentaa tiedonsiirtonopeutta. Käytännössä tukiasemalla käytetään useampaa koodausluokkaa, joilla kullakin on oma peittoalueensa. Koska häiriöt ovat pienet lähellä tukiasemaa, voidaan siinä käyttää alhaisempaa suojausta ja tiedonsiirto on nopeampaa. Kauempana tukiasemasta häiriöt kasvavat ja joudutaan käyttämään korkeampaa suojaustasoa, jolloin tiedonsiirtonopeus on alhaisempi. Yllä olevista asioista johtuen tiedonsiirtonopeus on suurempi, mitä lähempänä tukiasemaa ollaan. [39]

UMTS

3G eli UMTS on kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä. Se on GPRS:n tapaan pakettipohjainen, mutta pystyy paljon suurempaan tiedonsiirtonopeuteen. Lisäksi tietoturva on parannettu GPRS:stä. Tällä hetkellä Suomessa UMTS-verkot kattavat pääasiassa isoimmat asutuskeskukset ja tärkeimmät liikenneväylät. [36]

UMTS:n ja GPRS:n yksi eroista on se, että UMTS-järjestelmässä tukiasemien vierekkäiset solut voivat käyttää samoja taajuusalueita. Se kuitenkin vaatii tarkkaa lähetystehojen säätämistä ja laitteiden lähetystehoja säädetään 1500 kertaa sekunnissa. Etuna on taajuusalueiden tehokas uudelleenkäyttö. [36]

FLASH-OFDM

Suomi on yksi ensimmäisistä FLASH-OFDM -verkon käyttöönottajista. Se on täysin IP-pohjainen langaton laajakaistatekniikka. FLASH-OFDM ei perustu yleisiin standardeihin, vaan on Yhdysvaltalaisen Qualcommin patentein suojattu. FLASH-OFDM (Fast Low-Latency Access with Seamless Handoff, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) on myös nimen perusteella alhaisen viiveen verkko sekä se mahdollistaa liikkuvien päätelaitteiden saumattoman tukiaseman vaihdon. [36]

NMT-matkapuhelin järjestelmä poistui Suomessa käytöstä vuonna 2002, jolloin vapautuneet taajuuskaistat varattiin FLASH-OFDM -verkon käyttöön. Verkko-operaattoriluvat kuuluvat Digita Oy:lle, mutta se ei itse toimi palveluoperaattorina, vaan myy verkon kapasiteettia eteenpäin muille operaattoreille. Verkko on otettu käyttöön 1.4.2007 ja tällä hetkellä verkko kattaa 99,9 % väestöstä [41]. Liittymämäärien jäädessä odotettua alhaisemmiksi, Digita on päättänyt, ettei se tule jatkamaan @450 laajakaistaliiketoimintaa [41]. Kirjoittamishetkellä ei ollut varmaa jatkaako joku muu toimija toimintaa.

NMT-verkko oli tunnettu siitä, että se kuului Pohjoisessa syrjäisemmilläkin seuduilla matalan taajuuden ansiosta. Sama ominaisuus säilyy FLASH-OFDM -verkossa. 450 MHz:in taajuusalueella signaali etenee paremmin kuin muut korkeamman taajuu-

den omaavat tekniikat. Monesti sisätiloihin kuuluvuus on huono, jolloin tarvitaan lisä-antenneja. [36]

WiMAX

WiMAX on langattoman laajakaistan teknologia ja se perustuu yleisiin standardeihin. Se on tarkoitettu kaupunkialueille sekä harvemmin asutuille alueille. WiMAX toimii myös liikkuvissa laitteissa eli niin kutsutuissa mobiileissa laitteissa. WiMAX pystyy tarjoamaan ratkaisun esimerkiksi haja-asutusalueen UMTS-tukiaseman runkoverkolle, jolloin johdotuksen vetämisen sijaan käytetään langatonta WiMAX-teknologiaa. Laitteiden yhteensopivuudesta vastaa WiMAX Forum. [36]

WiMAX toimii 2 – 66 GHz:n taajuusalueella, mikä on erittäin laaja alue. Suomessa kuitenkin on käytössä pääasiassa 3,410 – 3,590 GHz: taajuusalue sekä 10 GHz:n ja 25 GHz:n taajuusalueet tukiasemien runkoyhteyksissä. Korkean taajuuden takia käytännön kantama jää alle kymmeneen kilometriin. Lisäksi yhteyden laatu vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen. WiMAX:n suurin teoreettinen tiedonsiirtonopeus on 75 Mbit/s. Käytännössä nopeus jää maksiminopeudesta selvästi, jollei tukiasemalle ole suoraa näköyhteyttä ja etäisyys tukiasemalle on lyhyt. Liittymän tiedonsiirtonopeutta yleensä rajoitetaan muutenkin, sillä päätelaitteet jakavat tukiaseman kapasiteetin keskenään. [36]

WiMAX:ssa on käytössä niin kutsuttu dynaaminen modulointi. Modulointimahdollisuuksia on useita ja ne mukautuvat siirtotien ominaisuuksien mukaan. Todennukseen käytetään 48-bittistä MAC-osoitetta, joka on laitekohtainen. Lisäksi yhteyden tunnistamiseen päätelaitteen ja tukiaseman välillä käytetään yhteyskohtaista CID-tunnusta. [36]

WiMAX-yhteydet ovat priorisoitu kiireellisyyden mukaan palvelunlajiluokkiin, joita on neljä [36]:

- UGS (Unsolicited Grant Service), tiedonsiirtoa vakionopeudella
- RTPS (Real-Time Polling Service), tiedonsiirtoa vakioviiiveellä. Tiedonsiirtonopeus voi vaihdella.
- NRTPS (Non Real-Time Polling Service), takaa siirtoaikaa kapasiteetin puitteissa. Ei sovi aikakriittisiin sovelluksiin.

- BE (Best Effort), alin luokka. Jäljelle jäänyt kapasiteetti jaetaan BE-luokan yhteyksien kesken.

WiMAX:in tietoturva on korkealla tasolla. Yhteyksissä ja päätelaitteissa käytetään todennusta. Salauksia on kahta erilaista: toinen, pakollinen on 3DES-salaus ja toinen, vapaaehtoinen on AES-salaus joko 128- tai 256-bittisellä salausavaimella. Salausavainten hallintaan käytetään PKM-protokollaa, joka estää avaimien valumisen muille. [36]

Laajan alueen langattomien tietoverkkojen vertailu

Taulukko 2 Laajan alueen langattomien tietoverkkojen ominaisuuksia [36]

	GPRS	UMTS	Flash-OFDM	WiMAX
Taajuusalue [MHz]	900 1800	2000 900	450	2000 – 66 000
Tiedonsiirtonopeus alavirtaan, teoreettinen max	236,8 kbit/s	14,4 Mbit/s	3,2 Mbit/s	75 Mbit/s
Tiedonsiirtonopeus ylävirtaan, teoreettinen max	26,8 kbit/s	5,8 Mbit/s	0,9 Mbit/s	
Kuuluvuus	Kansainvälinen	Kansainvälinen	Valtakunnallinen	Alueellinen
Tukiasemaetäisyys, max	35 km	35 km	< 50 km	< 10 km

Table 1 Laajan alueen langattomien tietoverkkojen plussat ja miinukset AMR-käytössä [36]

	Plussat	Miinukset
GRPS	-Hinta -Verkon kattavuus -Kypsä tekniikka -Olemassa olevat AMR-laitteet ja järjestelmät	-Suorituskyky -Verkkojen elinkaari?
UMTS	-Suorituskyky -Käytön hinta	
Flash-OFDM	-Suorituskyky -Verkon kattavuus (Suomessa) -450 MHz:n taajuuden läpäisykyky ja kuuluvuus	-Päätelaitteiden hinta -Poistuu käytöstä?
WiMAX	-Suorituskyky	-Päätelaitteiden hinta -Korkeataajuisen signaalin voimakas vaimeneminen esteissä

8.4.1.4 Lyhyen kantaman radiotekniikat

Keskittin pohjaisissa järjestelmissä kuluttajan ja keskittimen välinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa niin kutsutulla lyhyen kantaman radiotekniikalla. Maailmalla on muutamia suosittuja ratkaisuja, jotka esitellään lyhyesti.

ZigBee

ZigBee on standardoitu tekniikka, jonka kehittämisestä vastaa ZigBee-allianssi. Allianssiin kuuluu sekä pieniä että isoja yrityksiä ja siihen voi liittyä jäseneksi. Jäsenyyksiä on eritasoisia. Maksamalla isomman jäsenmaksun, pääsee myös vaikuttamaan enemmän ZigBeen kehittämiseen. Suunnittelun kulmakiviä ovat [36]:

- Alhainen hinta
- Erittäin alhainen energiankulutus
- Kansainvälisten luvasta vapaiden radiotaajuuksien käyttö

- Helppo ja edullinen asennus OEM-tuotteeseen
- Joustava ja helposti laajennettava verkko
- Älykäs verkon käyttöönotto ja viestien reititys

MeshNET

Tritech Technonoly AB on kehittänyt AMR-järjestelmiä varten MeshNET teknologian. MeshNET:in etu on sen vikojensietokyky. MeshNET-verkossa kaikki solmut toimivat reitittiminä, jolloin reititysvaihtoehtoja on paljon. Verkon käyttöönotto on helppoa, sillä se osaa tehdä sen itse. Lisäksi laitteisiin pystytään päivittämään ohjelmisto etänä. [36]

Wavenis

Wavenis:n on kehittänyt Yhdysvaltalainen yritys nimeltä Coronis Systems. Wavenis on menestynyt Euroopassa paremmin kuin Yhdysvalloissa. Wavenis soveltuu AMR-järjestelmien lisäksi talo- ja teollisuusautomaatioon sekä RFID- ja jäljityssovelluksiin. Wavenis on mahdollista ostaa valmistuslisenssinä tai valmiina tuotteena. Teknologian suunnittelussa on käytetty seuraavia lähtökohtia [36]:

- Alhaiset kustannukset
- Alhainen energiankulutus
- Luotettavuus
- Kantama

Lisäksi valmistaja tarjoaa muita Wavenis-laitteiden toimintaa tukevia laitteita ja toimintoja [36]:

- Keskitin: kerää, varastoi ja välittää dataa jopa 100 päätelaitteelta
- Toistin: 5 km kantama 500 mW lähetysteholla
- GSM/GPRS -yhdyskäytävä: välittää jopa 2000 Wavenis-laitteen dataa muihin verkkoihin
- Energianäyttö: langattomasti kulutusmittariin liitetty näyttö kertoo kuluttajalle reaaliaikaisesti esimerkiksi kulutuksen
- USB-, PCMCIA- ja sarjaporttisoittimet: tietokoneen liitäntä Wavenis-verkkoon

Z-Wave

Z-Wave on avoin teollisuusstandardi, jonka on kehittänyt yritys nimeltä Zensys. Zensys-allianssiin on liittynyt joukko yrityksiä, jotka ovat hyväksyneet Z-Waven teollisuusstandardiksi. Ne saavat käyttää Z-Wavea vapaasti, mutta kuitenkin niin, että ne edistävät eri Z-Wave – laitteiden yhteensopivuutta. Laitteet myös testataan Zensysin vaatimusten mukaan ennen markkinoille pääsyä. Z-Waven käyttökohteita AMR-järjestelmien lisäksi ovat talon turvallisuus- ja kulunvalvontalaitteet, valaistus, ilmastointi- ja lämmityslaitteet sekä viihde-elektronikka. [36]

Z-Wave -verkko koostuu päätelaitteista ja reitittimistä, joista yksi tai useampi voi toimia yhdyskäytävänä muihin verkkoihin. Sähkömittarit ovat verkossa reitittämiä ja muut mittarit, kuten vesimittarit, ovat päätelaitteita. Päätelaitteet kuluttavat vähän energiaa, koska ne voivat olla suurimman osan ajasta lepotilassa, jolloin ne voivat olla pariston tai akun varassa. Reitittimet vaativat enemmän energiaa, koska ne välittävät viestejä verkossa jatkuvasti. Yksi verkko voi sisältää enintään 232 laitetta. Jos järjestelmä vaatii kuitenkin enemmän laitteita, verkkojen silloitusmahdollisuus laajentaa verkkoa. [36]

INSTEON

INSTEON ei ole pelkästään langatonta teknologiaa hyödyntävä ratkaisu, vaan se käyttää myös sähköverkkoa tiedonsiirtoon. Alun perin INSTEON on tarkoitettu käskyjen välittämiseen laitteelta toiselle, mutta sillä on mahdollista siirtää myös dataa. INSTEON:in on kehittänyt Yhdysvaltalainen SmartLabs ja se on myös suunniteltu pelkästään Yhdysvaltojen markkinoille. SmartLabs aikoo tarjota Eurooppaan oman version. [36]

INSTEON-verkko on hyvin yksinkertainen, sillä siinä ei hyödynnetä reititystä. Verkon jokainen solmu toimii välittäjänä. Viesti välitetään eteenpäin, jos viesti ei ole tarkoitettu kyseiselle solmulle. Oikean viestin solmu tunnistaa 24-bittisestä osoitteestaan viestin otsikkotiedoissa. Oikean viestin saanut solmu kuittaa viestin vastaanotetuksi. Jos kuitausta ei saada, viesti lähetetään uudelleen. Koska viestit lähetetään kaikille solmuille, tuhlaa tekniikka tiedonsiirtokapasiteettia ja energiaa. Toisaalta verkko on hyvin yksinkertainen ja solmujen lisääminen on helppoa. Viestin salaaminen on myös mahdollista

muutamalla eri salausalgoritmilla ja INSTEON-verkko voidaan yhdistää muihin verkkoihin, esimerkiksi ZigBee:hen, sillalla tai tietokoneeseen USB-väylän avulla. [36]

Vaikka INSTEON-verkon solmut ovat yksinkertaisia, niitä voi olla erilaisia [36]:

- Radiosolmu: lähettää ja vastaanottaa viestejä ainoastaan radioteitse
- Sähköverkkosolmu: lähettää ja vastaanottaa viestejä ainoastaan sähköverkon välityksellä
- Radio/sähköverkkosolmu: pystyy käyttämään kumpaakin tekniikkaa, jolloin sähköverkkosolmun viesti voidaan välittää radiosolmulle. Tämä mahdollistaa myös eri muuntopiirien välisen viestittelyn.

EnOcean

Saksalainen EnOcean on kehittänyt samannimisen langattoman tiedonsiirtoteknologian. Sillä on joko kiinteällä energiansyötöllä varustettuja laitteita tai paristolla toimivia laitteita. EnOcean-allianssi vahvistaa teknologiaa kehittämällä laitteiden yhteensopivuutta. Allianssiin kuuluu Eurooppalaisia ja Pohjois-Amerikkalaisia yrityksiä. [36]

EnOcean-verkko koostuu reitittimistä, toistimista ja päätelaitteista. Verkon topologia valitaan verkon koon sekä muiden erikoisolosuhteiden mukaan [36]:

- Älykäs verkon reititys: valmiiden reittien manuaalinen ohjelmointi tai automaattinen toistimien määrittämä reitti, jossa toistimet juttelevat keskenään sopivista reiteistä. Toimii vain pienemmissä verkoissa, koska reittien automaattinen määrittäminen vie liian paljon tiedonsiirtokapasiteettia.
- Mesh-topologia. Sopii isompiin verkkoihin, mutta verkko on vaikeampi konfiguroida ja verkon kasvaessa pisteiden lisääminen on työläämpää.
- Kanava-reititys on tarkoitettu korkeiden talojen mittarinlukuun. Signaali ei kanna monien kerroksien läpi, joten toistimien avulla muodostetaan niin sanottu runkolinja, jota pitkin viestit kulkeutuvat eri lattiakerrosten läpi.
- Yhdyskäytävä-topologia: langaton verkko on mahdollista liittää langalliseen automaatiiväylään.

Vertailu

Taulukossa 2 on vertailtu lyhyen kantaman langattomia tiedonsiirtoteknologioita. Taulukkoa luettaessa on huomioita arvot ja millä lähetysteholla ne on saatu. Kantama ei merkittävästi eroa eri teknologioiden välillä, jos otetaan huomioon lähetysteho, mutta tiedonsiirtonopeuksissa on eroja. Ne voivat johtua muun muassa erilaisista salaus- ja modulaatiomenetelmistä.

Taulukko 3 Langattomien lyhyen kantaman tiedonsiirtoteknologioiden ominaisuudet [36]

	ZigBee	MeshNet	Wavenis	Z-Wave	INSTEON	EnOcean
Taajuus [MHz]	868 915 2400	868	433 868 915 2400	868	904	868
Tiedonsiirtonopeus [kbit/s]	20 40 250	9,6	100	40	38,4	125
Kantama sisällä [m] (lähetysteho)	30 (1 mW)		200 (25 mW)	30 (1 mW)		30 (-)
Kantama ulkona [m] (lähetysteho)	2000 (100 mW)	1000 (50 mW)	1000 (25 mW)	100 (1 mW)	50 (-)	300 (-)
Verkkotopologiat	Mesh Puu Tähti	Mesh Tähti	Mesh Puu Tähti	Mesh	Dual-mesh	Mesh
Verkon maksimi koko [kpl solmuja]	65536	10500		232		

8.4.2 Tietoturva

Uudet etäluettavat energiamittarit keräävät paljon tietoa kuluttajista ja tiedoista voi päätellä paljon. Sen takia on erittäin tärkeää, että tiedot eivät leviä muualle. Varkaat näkevät kulutustiedoista suoraan onko asukkaita paikalla. Vakuutusyhtiöt voivat tarkastaa

kulutustiedoista mahdollisia väärinkäyttöjä epäselvissä korvaustilanteissa. Tämänkaltaiset luvattomuudet tulee estää.

Tietoturvariskit laitteissa ehkäistään palomuurilla ja virustorjunnalla. Ne estävät laitteisiin kohdistetut hyökkäykset. Tiedonsiirron tietoturvariskit tulee myös ehkäistä. Tiedonsiirrossa käytetään salausta. Tietoturvaominaisuudet ovat erilaiset riippuen tiedonsiirrotekniikasta. On kyse sitten langallisesta tai langattomasta tiedonsiirrosta, tulee varmistua riittävästä suojauksesta. Langallisessa järjestelmässä voi olla fyysinen suojaus eli kukaan ei pääse fyysisesti kaapelin tai laitteiden lähelle. Langattoman verkon suojaukseen tarvitaan myös riittävät suojaukset ja salaukset. [36]

8.5 Energiansäästö web-palvelun tai erillisen energianäytön avulla

Toistaiseksi etäluettavissa energiamittareissa ei ole laajempaa energianäyttöä, vaan niissä on pääasiassa vain kWh-näyttö. Energianäyttö on erillinen näyttö, joka näyttää kuluttajan sähkönkulutukseen liittyviä numeerisia arvoja, diagrammeja, merkkivaloja tai äänimerkkejä. Se antaa siis palautetta kuluttajan energiankäytöstä. Etäluettavat mittarit mahdollistavat erilaisen sähkön hinnoittelun, esimerkiksi reaaliaikaisen hinnoittelun, joka perustuu sähkömarkkinoiden spot-hintoihin. Tämänkaltaisen hinnoittelu antaa kuluttajalle mahdollisuuden vaikuttaa omaan sähkölaskuun. Kuluttaja voi siirtää omaa kulutustaan halvempaan ajankohtaan tai jopa pienentää kulutustaan.



Kuva 13 Landis+Gyr ecoMeter P350 [42]

Erillinen energianäyttö voi olla turhan kallis investointi yksityiselle kuluttajalle, joten halvempi vaihtoehto olisi web-pohjainen ”energianäyttö”. Uudet etäluettavat mittarit antavat sähköyhtiölle jokaisen kuluttajan tunnitaisen sähkötuloksen, joten sähköyhtiö voisi tarjota palvelun, joka antaa myös kuluttajalle nämä tiedot. Palvelu voisi olla sellainen, että kuluttaja vain kirjautuu tietokoneellaan palveluun sisään, jossa hän voi tarkastella omaa sähkötulostaan kWh:ssa ja euroissa. Palvelussa olisi hyvä, jos kuluttaja voisi valita ja muokata näkymää esimerkiksi niin, että kuluttaja voisi valita tietyn päivän tai kuukauden tarkasteltavaksi sekä hän voisi valita haluaako hän tarkastella tulostaan numeerisena vai graafisena. Palvelusta voisi saada myös seuraavan päivän spot-hinnat, jos laskutus perustuu niihin.

Moni sähköyhtiö on ilmoittanut Internet-sivuillaan, että tulevat tarjoamaan web-pohjaisen palvelun, jossa asiakas voi seurata omaa sähkötulostaan [43-47]. Tällaisen palvelun tuottaminen ei todennäköisesti ole kallista, koska tarvittavat tiedot ovat saatavilla uusien sähkömittareiden myötä. Omasta mielestäni palvelu on askel spot-hintoihin perustuvaan laskutukseen, joka tulee olemaan kirjoittajan mielestä vallitseva laskutusmuoto tulevaisuudessa. Se on kokonaistehokkuuden kannalta tärkeää, koska silloin to-

dennäköisesti asiakas kuluttaa järkevämmiin eli vähentää kulutustaan, kun sähkömarkkinoilla on korkea hinta. Kulutusjouston lisääminen vähentää huippuvoimalaitosten käytön määrää, joka edelleen vähentää sähköntuotannon päästöjä.

Japanissa on tehty eräs tutkimus, jossa tutkittiin energianäyttöjen vaikutusta kuluttajien energian käyttöön. Tutkimuksessa mitattiin eri laitteiden kulutuksia ja kaasun kulutusta kokonaiskulutuksen lisäksi. Tutkimuksen tuloksia on esitelty taulukossa 3. Taulukosta huomataan, että lämmityksessä on säästetty eniten ja siinä on eniten säästöpotentiaalia. Yleisesti ottaen kulutuksen seuraaminen saa ihmiset vähentämään kulutustaan. [48]

Taulukko 4 Sähkösäästö jaoteltuna loppukäyttökohteittain [48]

Loppukäyttökohde	Jakso I (Wh/päivä)	Jakso II (Wh/päivä)	Vähennys (%)
TV	1017	948	6,8
Jääkaappi	1447	1404	3,0
Ruoanvalmistus	896	836	6,6
Tilojen lämmitys	13045	9417	29,9
Käyttöveden lämmitys	783	659	15,9
Muut laitteet	460	319	30,7
Laitteet, josta ei annettu kuluttajapalautetta	11283	10468	7,2
Yhteensä	28930	23780	17,8

9 Johtopäätökset ja yhteenveto

Työn tarkoituksena oli löytää ratkaisu helpottamaan pienvoimantuottajien sähkömarkkinoille pääsyä, koska yksin se on käytännössä mahdotonta korkeiden maksujen takia. Virtuaalinen voimalaitos on ratkaisu siihen. Virtuaalinen voimalaitos hyödyntää myös kulutuksen ohjaamisen. Aikaisemmin on vain säädetty tuotantoa kulutuksen mukaan. Nyt otetaan enemmän myös kulutusta mukaan säädettävänä elementtinä.

Virtuaalinen voimalaitos tarvitsee niin kutsutun aggregaattorin, joka hallitsee ja ohjaa virtuaalista voimalaitosta sekä käy kauppaa valitsemillaan sähkön kauppapaikoilla. Paras vaihtoehto aggregaattoriksi Suomessa on sähkön myyjä. Sähkön myyjä käy kauppaa sähkömarkkinoilla jo entuudestaan, joten sille ei tule lisäkustannuksia markkinoiden liittymis- ja kuukausimaksuista. Suomessa on pieni volyyymi pienvoimantuotannossa sekä ohjattavassa kuormassa ainakin tällä hetkellä, ettei pelkäsi aggregaattoriksi ole kannattavaa ryhtyä. Kun sähkön myyjä ottaa pienvoimantuottajan tuotannon välittääkseen sen markkinoille, täytyy sähkön myyjä olla lisäksi kyseisen tuottajan avoin toimittaja. Olisi hyvin ristiriitaista, jos asiakas kävisi kauppaa kahden eri toimijan kanssa. On helpompaa pitää tase tasapainossa, kun hallinnoi koko pakettia.

Suomessa ohjattavat pienvoimantuotantolaitokset ovat käytännössä CHP-laitoksia ja ohjaamattomat tuulivoima- ja aurinkovoimalaitoksia. CHP-laitos tuottaa taloon tai kiinteistöön tarvittavan lämmön kokonaan sekä osittain sähkön. Joissakin tapauksissa sähköä tuotetaan enemmän kuin sitä itse tarvitaan, joten ylimäärä syötetään yleiseen sähköverkkoon. Huomioitavaa on, että CHP-laitos tuottaa sähköä lämmön tarpeen mukaan. Aggregaattorin on arvioitava päivittäinen tuotanto lämmön tarpeen kautta. Toisaalta sähkön myyjä joutuu arvioimaan sähkölämmittäjän kulutuksenkin lämmön tarpeen mukaan, joten tilanne ei sinällään ole uusi.

Ajoitus on myös erittäin tärkeää. Pienet CHP-laitokset eivät ole käynnissä 24 tuntia vuorokaudessa, vaan ajoajat riippuvat lämmöntarpeesta eli muun muassa vallitsevasta

ulkolämpötilasta. Jotta tasehallinta ei menisi ihan mahdottomaksi, tulisi aggregaattorilla olla mahdollisuus määrätä ajankohta, jolloin CHP-laitos olisi käynnissä. Esimerkiksi tietyn päivän lämmöntarve voi olla 50 kWh ja, jos laitos toimii rakennusasteella 1 eli tuottaa saman verran sähköä ja lämpöä, tuottaa se myös 50 kWh sähköä sen päivän aikana. Kun järjestelmässä on lämminvesivaraaja, ei ole väliä mihin aikaan päivästä lämpö tuotetaan, kun se voidaan varastoida. Samoin myös ohjattavan kuorman tapauksessa aggregaattori päättää, jolloin kuorma kytkeytyy päälle. Aggregaattorin toimintaan voi vaikuttaa tehty sopimus asiakkaan kanssa, sähkön spot-hinta tai tehoreservinä käyttäminen. CHP-laitoksien tehoa ei ole tarkoitus säätää, vaan käytössä ne ovat ”täysillä”. Laitteet on suunniteltu tiettyyn toimintapisteeseen, jossa muun muassa hyötysuhde ja päästöt ovat optimaaliset. Pienet CHP-laitokset toimivat siis ON/OFF -periaatteella. Kun aggregaattori voi päättää, milloin on tuotantoa ja kulutusta, sillä on edellytykset toimia markkinoilla ja tase on helpommin hallittavissa.

Kuormien ja tuotantolaitosten ohjaamiseen tarvitaan yhteys niistä aggregaattorille. Mittareiden ja luentajärjestelmän tiedonsiirtoon voidaan käyttää useita eri tiedonsiirtoteknologioita. Kullakin tiedonsiirtoteknologialla on omat vahvuudet ja heikkoudet, eikä ole olemassa yhtä ainoata teknologiaa, joka sopii kaikkiin järjestelmiin. Tiedonsiirtoteknologia valitaan tilanteen mukaan. Joitain nyrkkisääntöjä kuitenkin on. Keskitinpohjaisia ratkaisuja on kannattavaa käyttää, kun kuluttajia on paljon pienellä alueella. Hajautettua systeemiä eli point-to-point -yhteyksiä kannattaa puolestaan käyttää haja-asutusalueilla. Tällä hetkellä keskitinpohjaisissa järjestelmissä on suosittu PLC-teknologiaa, koska se saavuttaa hyvin asiakkaat, on edullinen ja antaa riittävän tiedonsiirtonopeuden. Point-to-point -yhteydet toteutetaan tyypillisesti GPRS-teknologialla, sillä se on edullinen ratkaisu tämän tyyppisessä käytössä. Tässä työssä ei kuitenkaan oteta kantaa, mitä tiedonsiirtoteknologioita olisi syytä käyttää tai suosia.

Kuormien ohjaamiseen uudet mittarit sopivat hyvin, koska ne ovat myös siihen tarkoitukseen suunniteltu. Mittareissa on vähintään yksi rele, jota pystytään etänä ohjaamaan sähköyhtiön toimesta. Sähköyhtiöllä on oltava järjestelmä, joka pystyy ohjaamaan kuormaa. Kuorman ohjaaminen voi olla spot-hintaan sidottua tai ohjaaminen voi perustua johonkin muuhun. Kuorman ohjaamisesta voidaan tehdä erilaisia sopimuksia asiakkaan kanssa riippuen myös ohjattavasta kuormasta: varaava sähkölämmitys tai sähköauton lataus.

AMR-mittarin avulla pystytään ainakin teoriassa ohjaamaan pientä CHP-laitosta. Käytännön toteutus voi olla hankala. AMR-mittareissa on kauko-ohjattava rele, mikä pystyy antamaan ON/OFF -tyyppisen signaalin CHP-laitokselle. Teoriassa se pystyy antamaan laitokselle käynnistyskäskyn, mutta ei muuta. Jos CHP-laitos saa ainoastaan käynnistyskäskyn, se on käynnissä siihen asti kunnes lämpöä on tuotettu riittävä määrä eli esimerkiksi lämminvesivaraaja on saavuttanut tavoitelämpötilan. Jos tarvitaan enemmän älyä systeemiin ja ohjaus halutaan mittarin kautta, tulee äly lisätä CHP-laitokseen. Toinen toteutusvaihtoehto on, että ohjaukseen ei käytetä AMR-mittaria vaan CHP-laitoksella olisi oma yhteys verkkoyhtiöön esimerkiksi GPRS:n avulla toteutettu point-to-point -yhteys. Se mahdollistaa älykkäämmän ohjauksen ja esimerkiksi joidenkin mitaustietojen välittämisen, mutta on kalliimpi vaihtoehto. AMR-mittareita ei ole varsinaisesti suunniteltu tuotantolaitosten ohjaamiseen, mutta soveltamalla se voi olla mahdollista.

Virtuaalisen voimalaitoksen sisältö vaikuttaa siihen, millä markkinoilla se voi olla toimijana. Sisällöllä tarkoitetaan tässä sitä, minkä tyyppisiä voimalaitoksia tai ohjattavaa kulutusta virtuaalinen voimalaitos sisältää. Virtuaaliset voimalaitokset tulevat todennäköisesti koostumaan useista erityyppisistä voimalaitoksista sekä ohjattavista kuormista. Esimerkiksi virtuaalinen voimalaitos voi sisältää tuulivoimaa, kaasumoottori-CHP -laitoksia sekä varaavaa sähkölämmitystä. Sisältö määrittelee pitkälti millä markkinoilla VPP voi toimia. Jos VPP sisältää nopeasti ohjattavaa tuotantoa tai kulutusta, se voi osallistua tehoreservimarkkinoille. Käytännössä paras ja eniten käytetty kauppapaikka tulee todennäköisesti olemaan spot-markkinat. Muut markkinat täydentävät toimintaa. Paras hyöty tulee nimenomaan spot-markkinoista, koska siellä kaupankäynti on päivittäistä ja jatkuvaa. Muilla markkinoilla kauppojen toteutuminen ei ole yhtä varmaa. Tuotanto kuitenkin pyörii ja sille on löydyttävä ostaja, muuten tase ei pysy tasapainossa. Kukin aggregaattori itse arvioi, miten hän virtuaalista voimalaitostaan käyttää.

Lähteet

- [1] Lynch J. *Robert Stirling*. [Viitattu 11.2.2010]. Saatavissa http://www.electricscotland.com/history/men/stirling_robert.htm.
- [2] Gras P. *Stirling Engine*. [Viitattu 11.2.2010]. Saatavissa <http://www.stirlingengine.fr/>.
- [3] Cleanenergy AB. *Combined Heat and Power Unit, Stirling VI61*. [Viitattu 25.3.2010] Verkkoesite. Saatavissa http://www.cleanenergyindustries.com/produktbeskrivningar/Cleanergy_Combined_Heat_and_Power_Unit.pdf
- [4] *Sähköhuolto*. [Viitattu 12.2.2010]. Saatavissa <http://www.energianet.fi/index.php?page=sahkokuolto&osa=4>.
- [5] Wiksten R. *Virtauskoneet*. 2. korjattu painos. Teknillinen korkeakoulu: Espoo, 2003. ISBN 951-22-6328-9
- [6] Äijälä O, Muuttomaa E, Kari M. *Bioenergia - verkkopalvelu*. [Viitattu 25.3.2010]. Saatavissa <http://www.bioenergia.fi/>.
- [7] *Capstone Turbine Corporation*. [Viitattu 12.2.2010]. Saatavissa <http://www.capstoneturbine.com/>.
- [8] *Siemens Fuel Cells*. [Viitattu 15.2.2010]. Saatavissa <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/fuel-cells/>.
- [9] Mikkola M. *Mikko Mikkola - Tfy-56.4332 k2009 1. luento - Polttokennojen perusteet*. Teknillinen korkeakoulu : Espoo, 2009.
- [10] Seppälä J. *Espoo kaupunki alkaa ladata autojaan aurinkosähköllä*. [Viitattu 19.3.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://www.tekniikkatalous.fi/duuniauto/article386656.ece?s=r&wtm=-21032010>
- [11] Lund P. *Aurinkoenergiatekniikan kurssi*. Luentomonisteet. Teknillinen korkeakoulu : Espoo, 2010.
- [12] Naps Systems Oy. *Sähköä auringosta*. [Viitattu 30.3.2010]. Saatavissa <http://www.napssystem.fi/>.
- [13] Motiva Oy. *Suomen Tuulivoimayhdistys*. [Viitattu 30.3.2010]. Saatavissa <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/>.

- [14] Haapanen E, Holttinen H, Holttinen E, et al. *Tuulivoiman tietopaketti*. [Viitattu 30.3.2010]. Saatavissa <http://www.tuulivoimatieto.fi/>.
- [15] Pienvesivoimayhdistys ry. *Pienvesivoimalaopas*. [Viitattu 31.3.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://server.perlasoft.fi/vesivoima/images/Pienvesivoimaopas.pdf>
- [16] *Gasum Oy*. [Viitattu 17.2.2010]. Saatavissa <http://www.gasum.fi/>.
- [17] *Maakaasukäsikirja*. Maakaasuyhdistys, 2004.
- [18] Pulsa M. *Biokaasun syöttö maakaasuverkostoon*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta. Lappeenranta. 2008. 119 s.
- [19] Jääskeläinen J. *Vetytalouden hyötysuhde*. Erikoistyö. Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo. 2009. 14 s.
- [20] Pöyry Energy Oy. *Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon*. 2006. [Viitattu 4.3.2010] Opas. Saatavissa http://www.motiva.fi/files/232/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf
- [21] Seti Oy. *Sähköpätevyudet*. [Viitattu 4.3.2010]. Saatavissa <http://www.seti.fi/Sahkopatevyydet.aspx>.
- [22] Lehto I. *Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo. 2009. 109 s.
- [23] Pirilä P. *Energiatalous - energiamarkkinat*. Opetusmoniste. Teknillinen korkeakoulu. Espoo, 2008.
- [24] Fingrid Oyj. *Fingrid*. [Viitattu 6.4.2010]. Saatavissa <http://www.fingrid.fi/>.
- [25] Energiateollisuus. *Kaukolämpö*. [Viitattu 6.5.2010]. Saatavissa <http://www.energia.fi/fi/kaukolampo/kaukolampo>.
- [26] Tilastokeskus. *Sähkön ja lämmön tuotanto 2007*. [Viitattu 6.5.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa http://www.stat.fi/til/salatuo/2007/salatuo_2007_2008-09-26_kat_001.html
- [27] Sipilä K. *Small-scale biomass CHP plant and district heating*. VTT; Espoo, 2005. ISBN 951-38-6722-6.
- [28] Lehtonen M, Heine P, Kallonen M, et al. *IT-sovellukset ja energiatehokkuuden kehittäminen Elektroninen aineisto*. Teknillinen korkeakoulu; Espoo, 2007. ISBN 978-951-22-8835-9
- [29] Timonen L. *Energiankulutus 2008*. [Viitattu 16.4.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa http://tilastokeskus.fi/til/ekul/2008/ekul_2008_2009-12-14_fi.pdf.

- [30] The Colt Car Company Ltd. *i MiEV Mitsubishi Electric Car*. [Viitattu 12.5.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://www.mitsubishi-cars.co.uk/images/wallpapers/i-MiEV-intraffice-1024x768.jpg>.
- [31] Lahtinen S, Keränen K, Segerholm I. *Moottoriajoneuvokanta 2009*. [Viitattu 14.4.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa http://tilastokeskus.fi/til/mkan/2009/mkan_2009_2010-02-26_fi.pdf
- [32] Prokkola R. *Tieliikenteen suoritteet vuonna 2009*. [Viitattu 14.4.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://www.tiehallinto.fi/pls/wwwedit/docs/25815.PDF>
- [33] Kytömäki E. *Energiameklarit Oy*. [Viitattu 27.4.2010]. Saatavissa <http://www.energiameklarit.fi/>.
- [34] Kytömäki E. Toimitusjohtaja. Energiameklarit Oy. Kankaanpää, PL 12, 38701. Haastattelu 27.4.2010.
- [35] Orths A, Eriksen P. *European test field: VPP Denmark*. [Viitattu 27.4.2010]. IEEE Xplore. ISSN 1944-9925
- [36] Piispanen M. *Langaton tiedonsiirto multi-utility-ympäristössä*. Raportti. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 2009.
- [37] Kärkkäinen S, Koponen P, Martikainen A, et al. *Sähkön pienkuluttajien etäluettavan mittaroinnin tila ja luomat mahdollisuudet*. [Viitattu 14.5.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://www.tem.fi/files/16745/Raportti-lopullinen.pdf>
- [38] Graabak I, Kofod C, Uuspaa P. *EFFLOCOM Energy efficiency and load curve impacts of commercial development in competitive markets, Description of Technology for Direct Communication*. [Viitattu 14.5.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://www.ffflocom.com/>
- [39] Valtonen P. *Interaktiivisen asiakasrajapinnan mahdollistamat energiatehokkuutta tukevat toiminnot ja niiden kannattavuus*. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen Tiedekunta. Lappeenranta. 2009.
- [40] Laajakaistainfo. *Laajakaistainto.fi Kansallinen laajakaistatyöryhmä*. [Viitattu 12.8.2010]. Saatavissa <http://www.laajakaistainfo.fi/>.
- [41] Digita Oy. *@450 Langaton laajakaista*. [Viitattu 28.7.2010]. Saatavissa <http://www.450laajakaista.fi/>.
- [42] Landis+Gyr. *Personal Energy Management*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa http://www.landisgyr.eu/files/pdf1/D000028271_ecoMeter_en.pdf.
- [43] Fortum Oyj. *Fortum Älyboksi*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa <http://fortum.fi/fi/alyboksi/index.html>.
- [44] Vantaan Energia Oy. *Älykkäitä sähkömittareita vantaalaisille sähkökäyttäjille*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa http://www.vantaanenergia.fi/uutiset/uutiset/2010/fi_FI/alykkaita_sahkomittareita/.

- [45] Vattenfall Oy. *Energiaraportointipalvelut*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa
<http://www.vattenfall.fi/fi/energiaraportointi.htm?WT.ac=Flashenergiaraportointi>.
- [46] Helsingin Energia. *Etäluenta*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa
<http://www.helen.fi/palvelut/etaluenta.html>.
- [47] Kymenlaakson Sähkö Oy. *Kymenlaakson Sähkö ja Empower sopivat kattavista etäluentapalveluista*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa
[http://www.kymenlaaksonsahko.fi/tietoa-yrityksesta/media/tiedotteet/tiedotearkisto/kymenlaakson-sahko-ja-empower-sopivat-kattavista-etaluentapalveluista/\(offset\)/10](http://www.kymenlaaksonsahko.fi/tietoa-yrityksesta/media/tiedotteet/tiedotearkisto/kymenlaakson-sahko-ja-empower-sopivat-kattavista-etaluentapalveluista/(offset)/10).
- [48] Ueno T, Inada R, Saeki O, et al. *Effectiveness of displaying energy consumption data in residential houses. Analysis on how the residents respond*. [Viitattu 19.7.2010] Verkkodokumentti. Saatavissa
http://www.ce.cmu.edu/~gdrg/readings/2006/02/21/Tsuji_EnergyDisplays.pdf
- [49] Standardi SFS-EN 50160. 2008. *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. Suomen standardisoimisliitto.

Liitteet

Liite A Sähkön laatukriteerit

Taulukko 1 Taajuuden laatukriteerit [49]

Hyvä laatu	50 Hz ± 1%
Normaalilaatu	50 Hz ± 1%
Standardilaatu	95 % mittauksista välillä 50 Hz ± 1% ja kaikki 50 Hz + 4% / -6 %. Saareke- tai varavoimakäytössä 95 % välillä 50 Hz ± 2 % ja kaikki 50 Hz ± 15 %.
Mittaus	10 s jaksoina viikon ajan. Mittausjaksoille lasketaan keskiarvo.

Taulukko 2 Jännitteen laatukriteerit [49]

Hyvä laatu	$U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$
Normaalilaatu	$U_n \pm 10 \%$
Standardilaatu	95 % välillä $U_n \pm 10 \%$
Mittaus	10 min jaksoina viikon ajan

Taulukko 3 Nopeiden jännitteenmuutosten laatukriteerit [49]

Hyvä laatu	$P_{st,3max} \leq 1$ $P_{lt,max} \leq 0,74$
Normaalilaatu	$P_{lt,max} \leq 1$
Standardilaatu	95 % mitatuista P_{lt} - arvoista $\leq 0,74$
Mittaus	Manuaalisesti
Laskenta	$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$ <p>P_{st} = Lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi. Mitataan kymmenen minuutin aikaväleihin.</p> <p>P_{lt} = Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi. Lasketaan kahdentoista kahden tunnin mittausaikaväliltä saadusta P_{st} - arvosta.</p>

Taulukko 4 Harmonisten yliaaltojännitteiden laatuksiteerit [49]

Hyvä laatu	$THD \leq 3 \%$
Normaalilaatu	$THD \leq 3 \%$
Standardilaatu	$U_{nsh} \leq$ taulukon 2 arvot ja $THD \leq 6 \%$
Mittaus	Tehollisarvot U_{nsh} mitataan 1 tai 5 min jaksoina, joista jälkilaskennalla johdetaan 10 min jaksot viikon ajalle.
Laskenta	$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}$ <p> THD = harmoninen särö h = harmonisen järjestysluku U_h = yksittäisen harmonisen suhteellinen amplitudi verrattuna perustaajuiseen jännitteeseen u_1 </p>