



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TUUKKA PIIRTO

HAJAUTETUN TUOTANNON JA SAAREKEVERKON TEHOTASA-
PAINON YLLÄPITÄMINEN AKUSTOLLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Heikki Tuusa
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Auto-
maatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9.3.2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

PIIRTO, TUUKKA: Hajautetun tuotannon ja saarekeverkon tehotasapainon ylläpitäminen akustolla

Diplomityö, 70 sivua

Joulukuu 2011

Pääaine: Sähkökäyttöjen tehoelektroniikka

Tarkastaja: professori Heikki Tuusa

Avainsanat: Saarekeverkko, saarekekonvertteri, simulaattori, tehotasapaino, energiavarasto, tuuliturbiini

Hajautetun tuotannon ja tehoelektroniikan kehittyminen mahdollistavat mikroverkot, jotka ovat suurempaan sähköverkkoon liitetyjä aliverkkoja ja kykenevät tarvittaessa toimimaan erillisinä saarekkeina. Saarekeverkkoja käytetään jo nykyään, mutta toistaiseksi suurin osa niistä on toteutettu polttomootorilla pyöritetyillä generaattoreilla.

Suurissa sähköverkoissa tuotannon ja kulutuksen välinen tehotasapaino toteutetaan säätämällä tuotantoa tarpeen mukaan. Uusiutuvilla energialähteillä ylläpidetyssä saarekeverkossa tehotasapainon hallinta on haasteellisempaa kuin kantaverkossa, koska esimerkiksi käytettäessä tuuli- ja aurinkoenergiaa sääolosuhteet aiheuttavat tuotantoon suuria vaihteluita. Lisäksi saarekeverkossa kulutuksen muutokset voivat olla suurempia suhteessa verkon nimellistehoon kuin kantaverkossa, jolloin tarvitaan esimerkiksi energiavarastoa tasaamaan tuotannon ja kulutuksen välisiä eroja.

Diplomityön teoriaosuudessa tutustutaan saarekeverkon toimintaan, pohditaan erilaisten sähköverkkojen tehotasapainon ylläpitämiseen liittyviä laitteisto- ja säätövaatimuksia sekä tarkastellaan laitteistojen välisen kommunikoinnin tuomia etuja järjestelmän hallinnassa. Lisäksi esitellään saarekeverkkoihin ja energian varastointiin liittyvää aikaisempaa tutkimusta, mietitään saarekeverkon käyttökohteita sekä etsitään valmiita kaupallisia tuotteita, joilla saarekeverkko voidaan toteuttaa.

Osana diplomityötä rakennetaan ABB:n käyttämään simulointiympäristöön laboratoriojärjestelmää mallintava simulaattori, joka koostuu käyttöliittymästä ja C-ohjelmointikielellä toteutetusta ytimestä, jossa mallien laskenta suoritetaan. Simulaattorin toiminta verifioidaan laboratoriolaitteistolla, joka koostuu tuuliturbiinia kuvaavasta kestromagneettigeneraattorista, energiavarastosta, DC/DC-hakkurista ja saarekekonvertterista.

Työn tavoitteena on selvittää, mitä teknisiä vaatimuksia täytyy ratkaista, jotta hajautettu tuotanto ja tehoelektroniikalla toteutettu saarekeverkko saadaan toimimaan yhdessä. Lisäksi selvitetään, voidaanko tällainen yksikkö toteuttaa ilman tehoelektroniikkalaitteiden välistä kommunikointia. Tulokset osoittavat, että kuvattu laitteisto saadaan toimimaan luotettavasti ilman kommunikaatiota myös kaikissa tutkituissa erikois-tilanteissa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Engineering

PIIRTO, TUUKKA: Power balancing between distributed energy and island mode network with a battery

Master of Science Thesis, 70 pages

December 2011

Major: Power electronics

Examiner: Professor Heikki Tuusa

Keywords: Island mode network, island mode converter, simulator, power balancing, energy storage, wind turbine

Creation of microgrids is made possible by the development of distributed energy production and power electronics. The microgrids are sub networks which are connected to bigger grids. If necessary, they can be operated in an island mode. Island mode networks are already in use but so far most of them are built using a generator and an internal combustion engine.

Power balancing between energy production and consumption is realised by controlling the production to respond with consumption in bigger grids. Power balancing is more difficult in an island mode network than in a normal grid. For example weather circumstances create variations to energy production when using photovoltaic or wind power. Furthermore changes in consumption can be relatively bigger in island mode network than in normal grid. In this case an energy storage is required to compensate differences between production and consumption.

In the theory part of this master's thesis the operation of the island mode networks are explored and requirements of apparatus and controls for power balancing in different kinds of grids are considered. Also the advantages of the communication between devices to the system control are examined. Earlier researches about the island mode networks and energy storages have been included. Uses of island mode networks are thought and commercial products which can make an island mode network are searched in thesis.

A simulator about the laboratory apparatus is built to ABB simulating environment as a part of the master's thesis. The simulator consists of a user interface and a core which is built with C- programming language. Function of the simulator is verified by laboratory apparatus which consists of a permanent magnet generator for representing a wind turbine, an energy storage with DC/DC- chopper and an island mode converter.

The goal of the thesis is to find out technical requirements that have to be solved in order to combine distributed energy production and island mode network that is made with power electronics. Furthermore is found out if this kind of unit can be built without communication between power electronic devices. Results indicate that represented apparatus works reliably without communication also in all examined special situations.

ALKUSANAT

Tämä työ liittyy SGEM-tutkimusohjelmaa (Smart Grids and Energy Markets) ja se on tehty TTY:n tukisäätiön stipendillä. SGEM-tutkimusohjelmaan osallistuu useita suomalaisia yrityksiä ja tutkimuslaitoksia. Hankkeen tavoitteena on löytää uusia ratkaisuja, tuotteita ja palveluita, joilla voidaan toteuttaa tulevaisuuden älykkäästä sähköverkoihin liittyviä visioita. Yritysten osuus on yli puolet koko projektista ja lisäksi tutkimusohjelmalle on saatu rahoitusta TEKESiltä.

Haluan kiittää professori Heikki Tuusaa työn tarkastamisesta sekä mahdollisuudesta käyttää sähköenergiatekniikan laitoksen tiloja ja laitteita, mikä mahdollisti työn tekemisen Tampereella. Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajaa Reijo Komsia erittäin mielenkiintoisesta aiheesta sekä hyvästä ohjauksesta ja neuvoista diplomityön aikana. DI Juha Jokipiitä ja DI Antti Virtasta haluan kiittää saamastani avusta testilaitteiston kokoamisessa ja mittauksissa.

Vanhempiani Marttia ja Onervaa haluan kiittää saamastani suuresta tuesta diplomityön ja koko opiskeluajan aikana. Siskoani Irmeliä haluan kiittää hänen tarjoamastaan yösjasta Espoossa diplomityön yhteydessä tekemiäni matkojen aikana.

Tampereella 18.11.2011

Tuukka Piirto

SISÄLLYS

Termit ja niiden määritelmät	VI
1. Johdanto	1
2. Saarekeverkko	3
2.1 Hajautettu tuotanto	4
2.1.1 Tuulivoima.....	6
2.1.2 Aurinkoenergia	7
2.1.3 Pienvesivoima.....	9
2.2 Tehotasapaino	10
2.3 Energian varastointi	11
2.3.1 Akut	12
2.3.2 Superkondensaattori.....	13
3. Saarekeverkon käyttö	15
3.1 Tehtyjä tutkimuksia.....	15
3.1.1 Tehotasapainon säätäminen energiavaraston avulla.....	15
3.1.2 Akkujen käyttö saarekeverkossa.....	17
3.2 Kaupallisia saarekekonverttereita	20
3.2.1 ABB PCS100 ESS	20
3.2.2 Ingeteam Ingecon Hybrid	21
3.2.3 Zigor HIS/HIT T	21
3.3 Saarekeverkon käyttökohteita	23
3.3.1 Saarekeverkko Gaidouromantrassa.....	24
3.4 Heikon verkon tukeminen	26
3.4.1 Verkkoon tahdistuminen vikatilanteen jälkeen.....	26
3.4.2 Tahdistumisen asettamat vaatimukset kommunikoinnille.....	29
4. Tehotasapaino hajautetun tuotannon ja saarekeverkon välillä.....	31
4.1 Tuotannon ja kulutuksen balansointi	31
4.2 Toiminta ilman kommunikointia	32
4.3 Kommunikoinnin tuomat edut	32
4.4 Eri tuotantomuotojen hallinta.....	33
5. Simulaattori	35
5.1 Simulaattoriohjelma	36
5.1.1 Mallien parametrisointi ja simulaattorin alustus.....	36
5.1.2 Sisään menevät ja ulos tulevat arvot.....	36
5.1.3 Kuvaajat	37
5.2 Simulointimalli.....	39
5.2.1 DC/DC-hakkuri.....	39
5.2.2 Akusto.....	41
5.3 Simulaattorin verifiointi	43
5.3.1 Ramppimuotoinen kuormitus sykli.....	43
5.3.2 Tuotantocykli	46

6.	Testilaitteisto ja mittaukset	50
6.1	Testeissä käytetyn laitteiston komponentit	50
6.1.1	Saarekekonvertteri ja tuuliturbiinin suuntaaja	50
6.1.2	DC/DC-hakkuri.....	51
6.1.3	Energiavarasto	52
6.1.4	Tuuliturbiini	53
6.1.5	Saarekeverkon kuorma	55
6.1.6	dSPACE-reaaliaikasimulaattori	56
6.2	Testilaitteiston kytkennät	57
6.2.1	Suuntaajat.....	58
6.2.2	Energiavarasto	58
6.2.3	Koneikot.....	58
6.2.4	Mittaukset	59
6.3	Suoritettut testit erikoistilanteissa	59
6.3.1	Toiminta ilman energiavarastoa.....	60
6.3.2	Toiminta energiavaraston täytyessä.....	61
6.3.3	Toiminta energiavaraston tyhjentyessä.....	63
6.3.4	Saarekeverkon negatiivinen teho	64
7.	Yhteenveto	66
	Lähteet.....	67

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Muuttujat

A	Akkumallin eksponentiaalisen alueen amplitudi
B	Akkumallin eksponentiaalisen alueen aikavakion inverssi
C_1	Akkumallin kapasitanssi
C_c	Kondensaattorin kapasitanssi
$\cos\varphi$	Tehokerroin
E	Akkumallin kuvainnollinen jännitelähde
E_0	Akkumallin akun vakiojännite
E_c	Kondensaattorin sähkökenttä
i	Akkumallin akun virta
i_c	Kondensaattorin virta
I_{SC}	Short circuit current, Oikosulkuvirta
K	Akkumallin polarisaatiojännite
P_c	Kondensaattorin teho
P_{Max}	Maksimitehon sijainti aurinkokennon virta-jännite -kuvaajassa
Q	Akkumallin akun kapasiteetti
Q_c	Kondensaattorin varaus
R_1, R_2	Akkumallin resistanssit
R_{esr}	Kondensaattorin sisäinen resistanssi
t	Aika
u_A, u_B, u_C	Vaiheiden A, B, C jännite
\bar{u}_s^s	Saarekeverkon jännitevektori stationäärisessä koordinaatissa
\bar{u}_v^s	Jäykän sähköverkon jännitevektori stationäärisessä koordinaatissa
V_{akku}	Akkumallin akun napajännite
V_c	Kondensaattorin napajännite
V_{OC}	Open circuit voltage, avoimen piirin jännite
$\int idt$	Akkumallin akun todellinen varaustila

Symbolit

AC	Vaihtojännite
C	Akun lataus- tai purkausvirran suhteellisen suuruuden yksikkö
CHP	Combined Heat and Power, tuotantomuoto jossa tuotetaan sähköä ja lämpöä.
DC	Tasajännite
ESS	Energy Storage System, Energiavarastojärjestelmä
MPPT	Maximum power point tracking, suurimman tehon pisteen etsintään käytetty algoritmi
NiMH	Nikkeli-metallihydridi, akkuteknologia
pu	per unit, skaalattu yksikkö, jossa arvo 1 vastaa nimellistä arvoa
PV	Photovoltaic, Sähkövirran tuottamista valon avulla

1. JOHDANTO

Nykyaikainen sähköverkko koostuu pääasiassa suurista sähköntuotantoyksiköistä, siirtolinjoista sekä useista suuri- ja pienitehoisista kulutuskohteista, jolloin sähkö tuotetaan pääasiassa keskitetysti, mutta kulutus on levinnyt laajalle alueelle. Tämä tarkoittaa sitä, että tarvitaan kattava sähkön siirto- ja jakeluverkosto, jotta energia voidaan siirtää tuotantolaitoksilta kuluttajille. Kehittyvässä yhteiskunnassa kulutus kasvaa jatkuvasti, joten myös tuotannon täytyy vastata kasvua, mikä nykyisellä mallilla tarkoittaa sitä, että myös sähköjakeluverkkoa täytyy vahvistaa. Pitkissä sähkölinjoissa ja useissa muuntamoissa syntyy myös siirtohäviöitä sitä enemmän mitä pidemmälle sähköä siirretään. Lisäksi siirtohäviöiden osuus kasvaa, jos sähköverkko on rakennettu liian pienitehoiseksi.

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan pieniä tuotantolaitoksia, jotka on sijoitettu lähelle kulutusta. Nykyaikainen tehoelektroniikka on mahdollistanut pienempien hajautettujen tuotantoyksiköiden rakentamisen taloudellisesti kannattavasti, koska tehoa ei tarvitse siirtää, jolloin myös siirtohäviöt vähenevät oleellisesti.

Energiantuotantoon ja -käyttöön liittyvien ympäristöasioiden ja ilmastonmuutoksen jatkuva esilläolo on lisännyt kiinnostusta tuottaa ympäristöystävällisempää sekä nopeammin uusiutuvaa energiaa. Tällä hetkellä nopeasti uusiutuvista energiamuodoista aurinko- ja tuulisähkön osuus kuten myös niiden uusien käyttömahdollisuuksien tutkimustoiminta kasvaa jatkuvasti.

Aurinko- ja tuulienergian tuotantoa vaikeuttaa kyseisen energian saannin epävarmuus ja huono ennustettavuus. Koska nykyisellä sähköverkkorakenteella kulutuksen säätely on erittäin rajallista, täytyy tuotannon pystyä vastaamaan kulutuksen muutoksiin. Uusiutuvan energian tuotantotehoon vaikuttaa pääasiassa tarkasteluhetkellä vallitsevat ympäristön olosuhteet. Aurinko- ja tuulivoiman tapauksessa tuotantotehoa voidaan tarvittaessa laskea, mutta sääolosuhteista riippuvaa hetkellistä tehoa ei voida ylittää. Esimerkiksi vesivoimalla tilanne on parempi, koska käyttämätön energia voidaan yleensä jättää voimalan padon taakse varastoon.

Hajautettu tuotanto ja tehoelektroniikan kehittyminen voivat parantaa sähköverkon viansietokykyä, koska esimerkiksi tuuliturbiini kykenee tukemaan verkkoa häiriötilanteessa. Toisaalta tehoelektroniikan avulla voidaan rakentaa aliverkko, joka kykenee tarvittaessa toimimaan saarekemoodissa eli eristäytymään omaksi sähköverkokseen. Tällaisella järjestelmällä on siirtoverkon vikaantuessa mahdollista turvata kuluttajien sähkösaanti hyödyntämällä lähialueen hajautettua tuotantoa.

Hajautetun tuotannon syöttämässä saarekeverkossa tehotasapainon hallinta on haasteellisempaa kuin kantaverkossa, jossa sähköä tuotetaan pääasiassa säädettävillä voimaloilla, joissa käytetään suoraan verkkoon kytkettyjä generaattoreita. Uusiutuviin

energiälähteisiin perustuvan tuotannon teho taas riippuu sääolosuhteista ja toisaalta kuormatehon vaihtelut saarekeverkossa voivat olla suuria suhteessa verkon nimellistehoon. Jos kulutusta ei voida kontrolloida ja saatavilla oleva tuotantoteho on epävarmaa, täytyy tehtasapainon ylläpitäminen varmistaa esimerkiksi energiavarastojen avulla. Käytännössä energiavarastoon ladataan energiaa, jos tuotanto ylittää kulutuksen, ja energiavarastosta taas puretaan energiaa, jos tuotanto ei pysty vastaamaan kulutukseen.

Tässä työssä tutkitaan hajautetun tuotannon yksikköä, joka pystyy luomaan saarekeverkon sekä ylläpitämään sitä. Järjestelmään kuuluu tuuliturbiinia mallintava keskomagneettigeneraattori ja sen suuntaaja, energiavarasto ja DC/DC-hakkuri sekä saarekekonvertteri ja siihen kytketty ohjattava kuorma.

Työn tavoitteena on selvittää, saadaanko tutkittava laitteisto toimimaan luotettavasti ilman laitteiden välistä kommunikaatiota. Lisäksi työn tavoitteena on kehittää simulaattori, joka kykenee mallintamaan laitteiston käyttäytymistä, sekä verifioida simulaattorin toiminta laboratoriolaitteistolla tehtävillä testeillä.

Järjestelmän laitteiden on tarkoitus toimia itsenäisesti ilman keskinäistä kommunikointia, jolloin tehtasapainon säätö toteutettaisiin mittaamalla tasajännitteen vaihtelua ja ohjaamalla sen perusteella energiavaraston yhteydessä olevaa DC/DC-hakkuria. Saarekekonvertterin tehtävä on muodostaa tarvittava saarekeverkko ja syöttää sinne kulutuksen tarvitsema teho. Tuotantopuolella olevalla moottoriparilla on tarkoitus mallintaa tuuliturbiinia, josta tuuliturbiinin suuntaaja ottaisi kulloinkin saatavilla olevan tehon.

Luvuissa kaksi ja kolme keskitytään saarekeverkon rakenteeseen ja siihen liittyviin eri osa-alueisiin sekä käydään läpi saarekeverkkoon liittyviä tutkimuksia, kaupallisia laitteita ja käyttökohteita. Neljännessä luvussa käsitellään tehtasapainoa ja sen laitteistolle aiheuttamia vaatimuksia. Kehitetty simulaattori ja sillä simuloitut tulokset esitellään viidennessä luvussa, jossa simuloituja tuloksia myös verrataan vastaaviin, testilaitteistosta mitattuihin. Kuudennessa luvussa esitellään laboratoriotiloihin koottu testilaitteisto sekä sen toiminta erilaisissa erikoistilanteissa. Seitsemäs luku on opinnäytetyön yhteenveto.

2. SAAREKEVERKKO

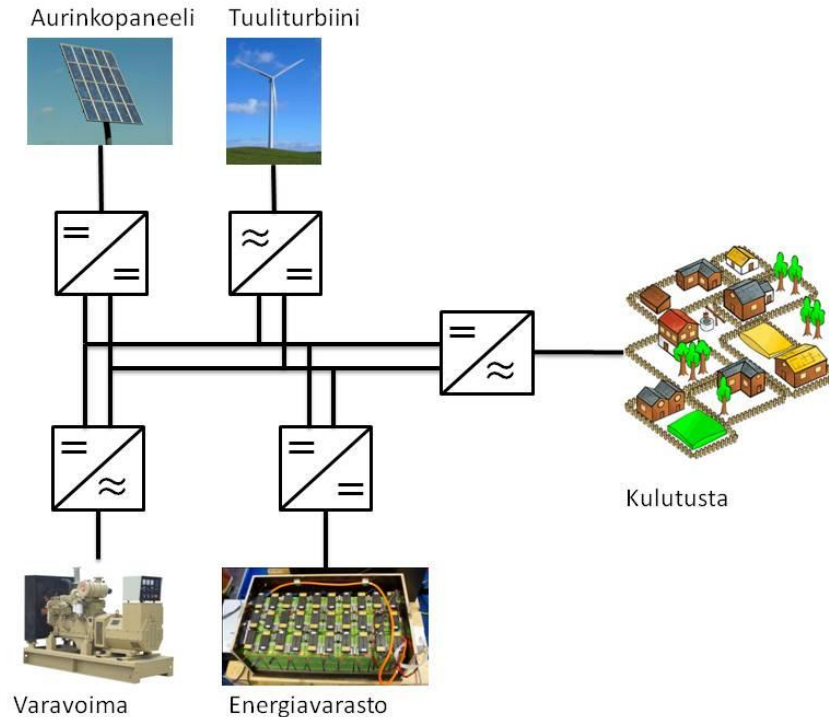
Saarekeverkoksi kutsutaan sähköverkkoa, joka ei ole kytketty suurempaan kokonaisuuteen, kuten esimerkiksi valtakunnan sähköverkkoon. Sähköverkon toiminnan edellytyksenä on, että verkossa vallitsee tehotasapaino, mikä tarkoittaa sitä, että sähköverkossa oleva tuotanto riittää kattamaan kulutuksen, mutta ylimääräistä energiaa ei tuoteta. Jos saarekeverkon tuotantoon käytetään uusiutuvia energialähteitä, joilla ei aina pystytä tuottamaan haluttua tehoa, voidaan kulutuksen ja tuotannon eroa tasapainottaa energiavaraston avulla.

Suurissa sähköverkoissa ei yleensä tarvita energiavarastoja tehotasapainon ylläpitämiseksi, koska niissä on paljon suoralla verkkoonkytkennällä syötettäviä pyöriviä moottoreita ja generaattoreita. Pyörivissä koneissa ja niiden mukana pyörimissä laitteissa on paljon mekaanista hitausmassaa, joka osaltaan auttaa pitämään sähköverkon taajuuden stabiilina. Jos sähköverkko on riittävän suuri, jolloin yksittäisten laitteiden aiheuttaman kulutuksen muutokset eivät vaikuta jännitetasoon tai taajuuteen merkittävästi, voidaan sähköverkkoa kutsua jäykäksi verkoksi.

Saarekeverkon ylläpitäminen vaatii nopeaa jännitteen ja taajuuden säätöä, koska verkon kuluttajat voivat olla pääosin kotitalouksia, jolloin verkossa ei todennäköisesti ole merkittävästi suoraan verkkoon kytkettyjä sähkömoottoreita. Lisäksi sähköverkon nimellisteho voi olla niin pieni, että yksittäisten laitteiden aiheuttamat kulutuksenmuutokset näkyvät verkon jännitteessä. Tehoelektroniikan ja sen mahdollistaman nopean säädön avulla saarekeverkon jännite ja taajuus kuitenkin saadaan pidettynä stabiilina.

Jos saarekeverkkoa syötetään pelkästään tehoelektroniikalla, esimerkiksi ilman pyörivää generaattoria ja siihen liittyviä hitausmassoja, voi verkon maksimi oikosulkuvirta pienentyä huomattavasti ja aiheuttaa siten ongelmia suojauksien kanssa. Tässä työssä tutkitaan pelkästään tehoelektroniikalla syötettyä saarekeverkkoa.

Kuva 2.1 esittää tehoelektroniikalla syötetyn saarekeverkon periaatteellista kytkentää, jossa on hajautettua tuotantoa. Verkon kaikki teho pyritään tuottamaan uusiutuvilla energialähteillä, joita kuvassa esittää tuuli- ja aurinkoenergiavoimalat. Energiavarastona toimii akusto, jonka tehtävänä on pitää yllä tuotannon ja kulutuksen välistä tehotasapainoa. Dieselgeneraattoria voidaan lisäksi käyttää varavoimalähteenä turvaamaan verkon energiansaanti, jos uusiutuvilla energialähteillä ei pystytä tuottamaan riittävästi tehoa ja energiavarasto on tyhjä.



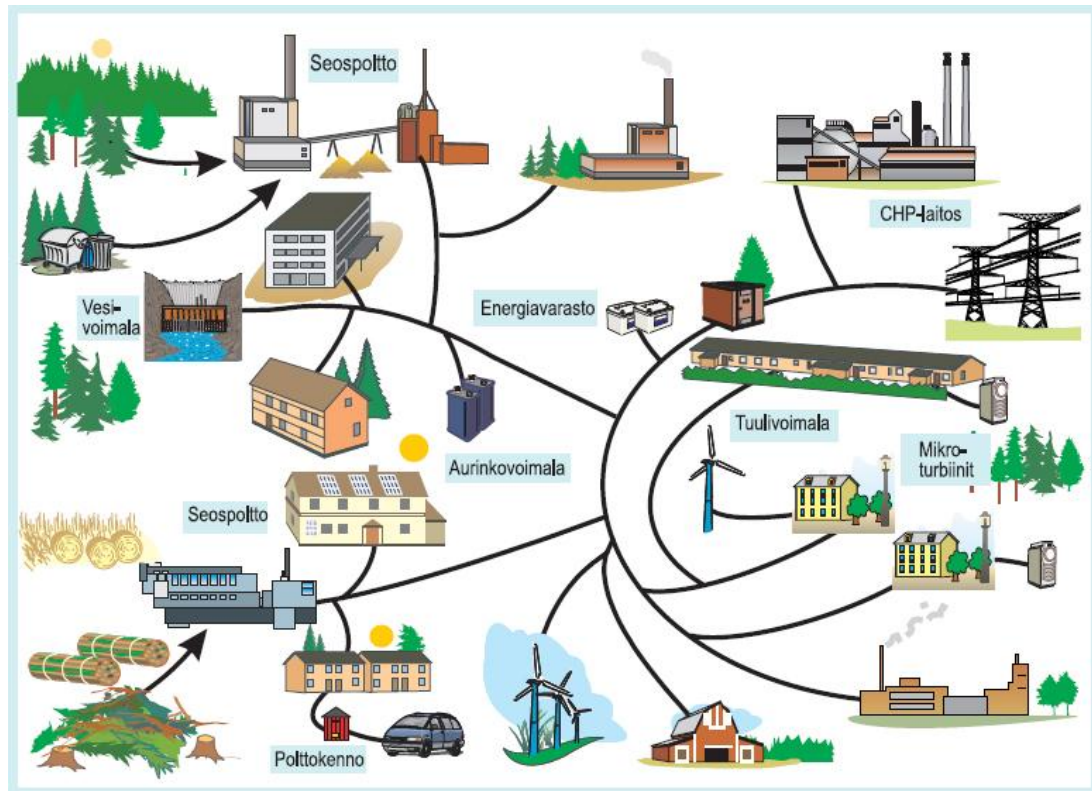
Kuva 2.1. Tehoelektroniikalla toteutettu saarekeverkko

Saarekeverkko voidaan myös toteuttaa käyttämällä pyörivää generaattoria, joka on kytketty suoraan verkkoon. Käytettäessä saarekeverkon sähköntuotantoon generaattoria liittyy järjestelmään hitausmassoja, joilla saadaan aikaan tarvittaessa suuria oikosulkuvirtoja. Pyörivällä koneella syötetyssä saarekeverkossa verkon taajuuden ja jännitteen säätö on hitaampaa kuin tehoelektroniikalla syötetyssä saarekeverkossa, mikä voi aiheuttaa tilanteen, jossa verkon jännite pääsee nousemaan vaarallisen suureksi tai taajuus kasvamaan voimakkaasti, jos verkosta putoaa pois suhteellisen suuri määrä kuormaa.

Mikroverkko toimii pääsääntöisesti yhdistettynä suurempaan verkkoon, mutta tarvittaessa se kykenee toimimaan omana saarekkeena (Pasonen 2010). Mikroverkko siirtyy toimimaan saarekeverkkona vain tarvittaessa, jos esimerkiksi siirtolinja vikaantuu ja mikroverkon yhteys suurempaan sähköverkkoon katkeaa.

2.1 Hajautettu tuotanto

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan pieniä tuotantoyksiköitä, esimerkiksi tuuli-, aurinko- ja pienvesivoimaloita, jotka ovat lähellä sähkön kuluttajia. Hajautettu tuotanto ei vaadi pitkiä siirtolinjoja, koska tuotantoyksiköt sijoitetaan lähelle kulutusta toisin kuin esimerkiksi isot hiili- tai ydinvoimalat. Nykyään hajautettua tuotantoa on kytketty suurempaan sähköverkkoon, kuten kuvassa 2.2. Hajautetun tuotannon yksiköt vähentävät siirtoverkon kuormaa, jolloin siirtohäviöt pienenevät ja verkko kestää paremmin suuria kulutuspiikkejä. (NREL 2009)



Kuva 2.2. Sähköverkko jossa on kuluttajia, hajautettua tuotantoa ja energiavarasto (Hirvonen 2003)

Hajautettu tuotanto ei ole uusi asia, sillä varavoimana sitä on ollut käytössä jo kauan, esimerkiksi turvaamassa sairaaloiden sähkönsaantia. Varavoimakäyttöön rakennettua hajautettua tuotantoa käytetään kuitenkin vain silloin, kun varsinaisessa sähkönjakelussa on katkos. Varavoimaa käytettäessä syötetty sähköverkko kytetään irti varsinaisesta sähkönjakelusta eli luotu varavoimaverkko jää omaksi saarekkeekseen. Varavoimana käytettävästä hajautetusta tuotannosta suurin osa on fossiilisilla polttoaineilla toimivia yksiköitä, kuten esimerkiksi dieselgeneraattoreita (NREL 2009). Nykyään on myös saatavilla kattava valikoima pienkuluttajille suunnattuja varavoimalaitteita, joiden toiminta perustuu polttomoottorilla pyöritettävään generaattoriin.

Nykyaikana jatkuvatoimiseen käyttöön tarkoitettu hajautettu tuotanto perustuu suurelta osin uusiutuviin energialähteisiin, mikä sopii hyvin yhteen tämänhetkisen ilmastopolitiikan kanssa. Uusiutuviin energialähteisiin perustuvilla pienellä mittakaavalla toimivilla voimaloilla on helpompi saada rakennuslupa, koska ne ovat pääsääntöisesti hiljaisempia sekä tuottavat vähemmän päästöjä ja ovat siten helpommin sijoitettavissa (NREL 2009). Jatkuvatoimista hajautettua tuotantoa voidaan käyttää tukemaan verkkoa ja tuottamaan puhtaampaa energiaa. Hajautetulla tuotannolla tuotettu teho syötetään tavallisesti suoraan sähköverkkoon eikä sitä yleensä käytetä säätövoimana.

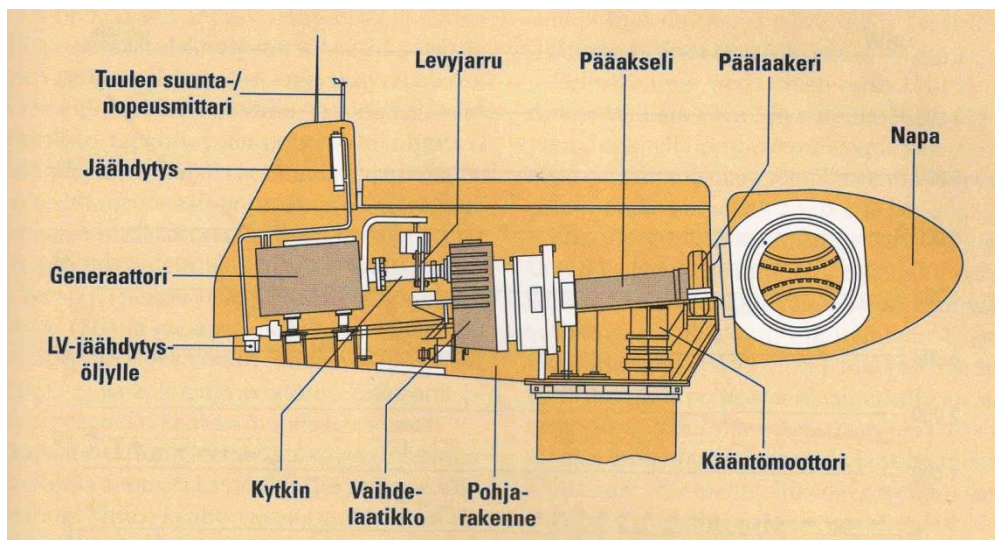
Sähköverkon katkoksesta hajautetun tuotannon voimalaitoksen tulee lopettaa sähkön tuottaminen (Sähköenergiailiitto 2001), koska saarekekäyttö julkisessa keskijän-

niteverkossa on kiellettyä (Repo & Koponen 2007). Kiellolla estetään hallitsemattomien saarekeverkkojen syntyminen esimerkiksi tapauksessa, jossa sähkövoimalan tuotto vastaa mahdolliseen saarekkeeseen jäävää kulutusta.

2.1.1 Tuulivoima

Tuulivoima on suoraan tuulesta saatavaa energiaa, ja näin energialähteen osalta teoriassa ilmaista, mutta tuulivoimalan kannattavuutta rajoittavat kuitenkin kalliit laiteinvestoinnit. Tuotanto tapahtuu tarkoitukseen suunnitellulla tuuliturbiinilla, joka koostuu korkean maston yläpäähän sijoitetusta roottorista ja generaattorista sekä mahdollisesta vaihteistosta ja suuntaajista. Vaihteistoa käytetään, jos generaattorin pyörimisnopeus on suurempi kuin tuuliturbiinin roottorin. (IEA 2006)

Yleensä tuuliturbiinin roottoriakseli sijoitetaan vaakasuuntaisesti (kuva 2.3.), mutta on myös olemassa pystyakselisiä rottoreita. Vaakasuuntaiselle akselille sijoitettu roottori koostuu yleensä kolmesta lavasta, mutta on olemassa myös kaksilapaisia malleja.



Kuva 2.3. Vaaka-akselinen tuuliturbiini, joka sisältää vaihteiston (VTT energia 1999, s. 242.)

Tuuli saa aikaan ilmassa liikkeen, joka muutetaan pyöriväksi liikeenergiaksi tuuliturbiinin roottorin avulla, mistä pyörivä liike johdetaan generaattorille. Lapojen kulman säädöllä saadaan roottorin hyötysuhdetta optimoitua tuulennopeuden muuttuessa sekä parannettua tuuliturbiinin pyörimisnopeuden säätöä.

Tuuliturbiineja on olemassa neljää erilaista perusrakennetta, jolla roottorin mekaaninen pyörimisteho voidaan muuttaa sähkövirraksi ja syöttää verkkoon. Yksinkertaisin tapa on käyttää epätahtigeneraattoria, joka on suoraan kytketty verkkoon, jolloin roottorin pyörimisnopeus on lähes vakio ja se vaihtelee ainoastaan epätahtigeneraattorin jättämän verran. Toinen vaihtoehto on käyttää staattoriipiiristä suoraan sähköverkkoon

kytkettyä liukurengasgeneraattoria ja säätää sen roottorikäymiskyvyn resistanssia, jolloin generaattorin jättämään ja sitä kautta tuuliturbiinin pyörimisnopeuteen voidaan vaikuttaa jonkin verran. Kolmannessa vaihtoehdossa käytetään myös staattoriipiiristä sähköverkkoon kytkettyä liukurengasgeneraattoria, mutta roottoriresistanssin tilalla on taajuudenmuuttaja ohjaamaan liukurengasgeneraattorin roottoriipiirin virtoja. Taajuudenmuuttajan ansiosta tuuliturbiinin pyörimisnopeutta voidaan säätää laajemmalla alueella kuin pelkkää roottoriipiirin resistanssia muuttamalla ja roottoriipiirissä syntyviä häviöitä voidaan siirtää taajuudenmuuttajan kautta sähköverkkoon. Neljäs vaihtoehto on kytkeä generaattori staattoriipiiri taajuudenmuuttajan avulla verkkoon, jolloin generaattorin pyörimisnopeutta voidaan säätää vapaasti sähköverkon taajuudesta riippumatta. (Nyberg 2008) Tällä menetelmällä saadaan paras säädettävyyttä tuuliturbiinille, mutta tuuliturbiinin nimellistehon suuruinen taajuudenmuuttaja on kallis investointi.

Tuuliturbiineja voidaan asentaa maalle tai merelle, joista molemmilla sijainneilla on omat vahvuudet ja heikkoudet. Merelle asennettavat tuuliturbiinit eroavat vastaavista maalle asennettavista tuuliturbiineista jonkin verran, kuten esimerkiksi niiden ruostesuojauksesta on parannettu. Maalla sijaitsevan tuulivoimala käyttöaste on yli 97 % kun taas merelle asennetussa tuulivoimalassa käytettävyyttä laskee 80 % ja 95 % välille, koska tekniikka on vielä uutta. Sähkön tuotannon vaikuttaa kuitenkin paljon vallitsevat sääolosuhteet, kuten esimerkiksi tuulen nopeus, jonka vuoksi merelle sijoitetulla tuuliturbiinilla saatetaan päästä parempaan vuosittaiseen energiantuottoon kuin maalle sijoitetulla. (IEA 2009)

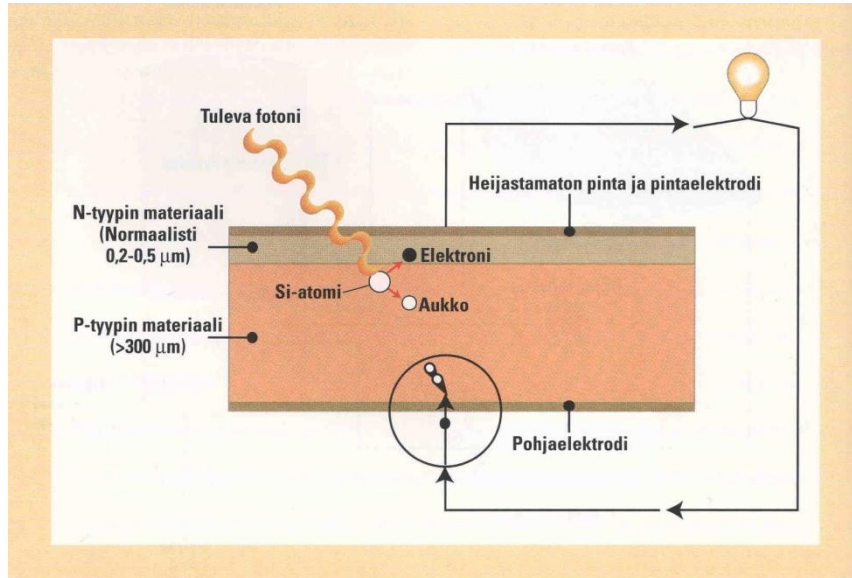
2.1.2 Aurinkoenergia

Suurin osa nykyisin käytettävästä uusiutuvasta energiasta tulee suoraan auringosta, kuten esimerkiksi tuuliturbiininkin tapauksessa, jossa auringon lämmittävä vaikutus saa aikaan maapallon ilmapirtaukset. Auringon suoraa säteilyenergiaa voidaan käyttää energianlähteenä myös perinteisellä höyryturbiinivoimalaitoksella veden höyrystämiseen, jolloin auringonsäteet keskitetään peileillä haluttuun pisteeseen. Kyseiset järjestelmät ovat kuitenkin yleensä suuria laitoksi eikä perinteistä hajautettua tuotantoa. (IEA 2010)

Tässä työssä aurinkoenergialla tarkoitetaan suoraan auringonsäteistä saatavaa energiaa, joka muutetaan sähkövirraksi aurinkokennon avulla. Aurinkokenno on puolijohdekomponentti, jonka napojen välille syntyy tasajännite, kun kennoon kohdistuu auringonsäteilyä (kuva 2.4.). Koska yksittäisten kennojen jännite ja teho on pieni, niitä yhdistetään 50 - 200 W:n tehoisiksi moduuleiksi, joita kytetään rinnan ja sarjaan siten, että saadaan aikaan haluttu kokonaisteho ja -jännite. Aurinkokenno tuottaa tasajännitteen, joten tarvitaan vaihtosuuntaaja, jotta teho voidaan syöttää vaihtosähköverkkoon. (IEA 2010)

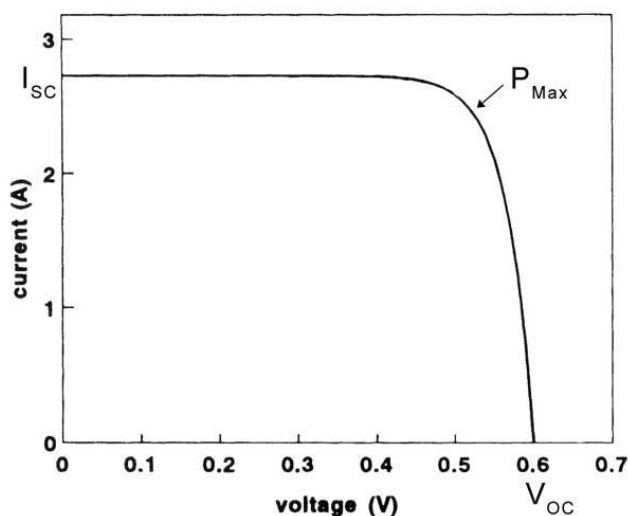
Pii on eniten käytetty materiaali käytössä olevissa aurinkokennoissa, koska nykyisin myytävistä kennoista 85 - 90 % on valmistettu piistä. 10 - 15 % kennoista valmistetaan ohutfilmitekniikalla, jolloin kenno on halvempi valmistaa, mutta vaatii enemmän asennustilaa. Suuremman tilantarpeen vuoksi ohutfilmitekniikalla valmistetun

aurinkokennoston sijoituskustannukset voivat nousta sen verran, että piipohjainen kenno tulee kokonaiskustannuksilta halvemmaksi. (IEA 2010)



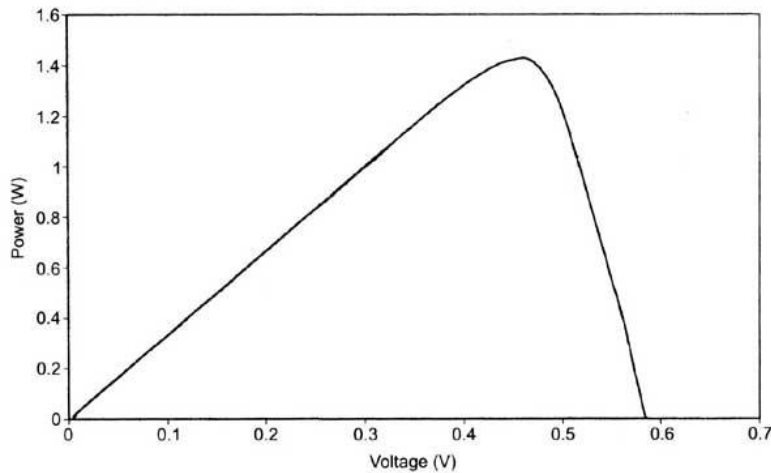
Kuva 2.4. Aurinkokennon periaatteellinen rakenne (VTT energia 1999, s. 240.)

Aurinkokennon jännite on epälineaarisesti riippuvainen auringonsäteilyn intensiteetistä, kennojen lämpötilasta ja kennosta otetusta virrasta (Lapp 2009). Laajalla jännitealueella virta pysyy lähes vakiona, mutta suuremmilla jännitteillä virran arvo laskee nopeasti, kuten kuva 2.5 esittää. Jännite ei myöskään kasva mielivaltaisesti, vaikka virran arvo laskee lähelle nollaa, joten aurinkokenno on säädettävänä prosessina suhteellisen helppo pitää stabiilina. Aurinkokennoston jännitettä voidaan ohjata suoraan säätämällä sähköverkkoon tehoa syöttävän vaihtosuuntaajan välipiirin tasajännitettä tai vaihtosuuntaajan ja aurinkokennoston välissä voidaan käyttää erillistä DC/DC-hakkuria säätämään aurinkokennoston tasajännitettä.



Kuva 2.5. Aurinkokennon tyypillinen virta-jännite – kuvaaja (ITACA 2005)

Jännitealueella, jossa aurinkokennon virta on vakio, aurinkokennon teho on lähes suoraan verrannollinen käytettävään jännitteeseen, joten tehoa on helppo säätää ohjaamalla jännitettä. Tehon maksimipiste löytyy kohdasta, jossa virran arvo alkaa pienentyä nopeasti. Kuvajasta jossa on esitettyä aurinkokennon tehon riippuvuus aurinkokennon jännitteestä (kuva 2.6), voidaan havaita kuinka teho aluksi nousee lineaarisesti ja tehon maksimipisteen jälkeen alkaa laskea nopeasti.



Kuva 2.6. Aurinkokennon tyypillinen teho-jännite – kuvaaja (ITACA 2005)

2.1.3 Pienvesivoima

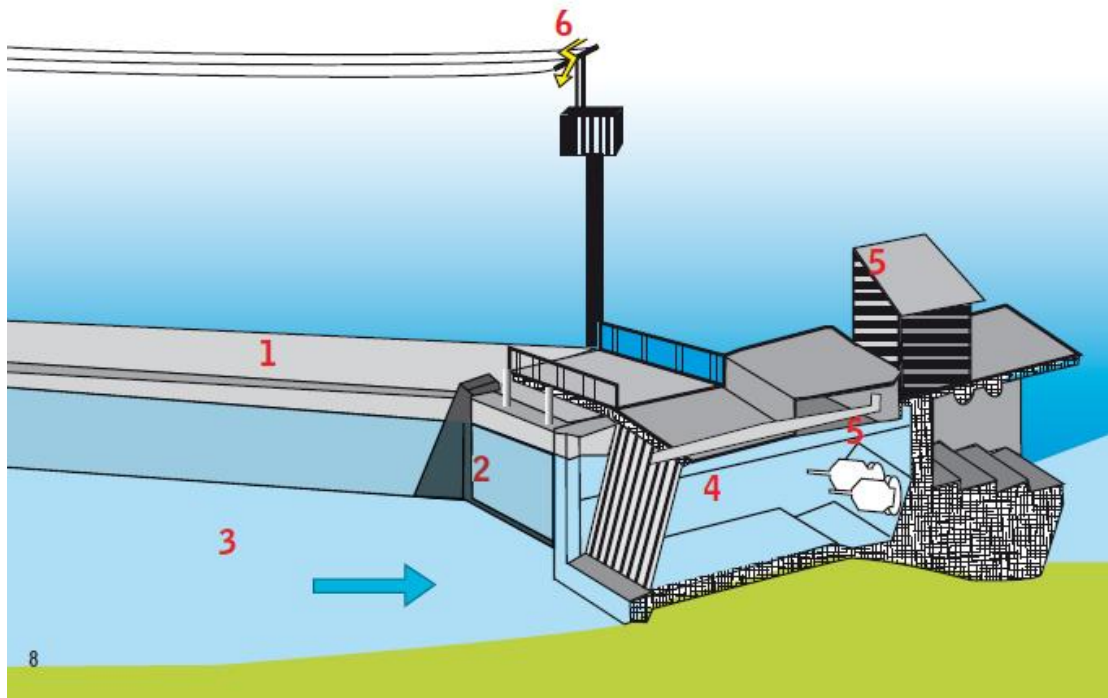
Vesivoima käyttää energianlähteenään veden potentiaalienergiaa, joka on uusiutuvaa veden luonnollisen kiertokulun seurauksena. Vesi höyrystyy vesistöistä pilviksi ja sataa maahan paikassa, jossa maan pinta on vesivoimalan alajuoksun pintaa korkeammalla, jolloin painovoiman vaikutuksesta vesi virtaa esimerkiksi jokea pitkin turbiinipadolle ja edelleen turbiinin läpi pyörittäen generaattoria. Vaikka vesivoima tuottaa puhdasta ja nopeasti uusiutuvaa energiaa, rakennuslupaa vesivoimalalle on kuitenkin vaikea saada, koska joen tai vesistön patoaminen luo rasitteita ympäristölle. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

Vesivoimaa hyödynnettiin sähköntuotantoon jo 1800-luvun loppupuolella ja 1900-luvun alkupuolella Suomessa oli käytössä ainoastaan pienvesivoimaa, johon kuuluu kaikki alle 10 MW tehoiset vesivoimalat, kunnes vuonna 1926 valmistui Imatrankosken ensimmäinen suurvevoimalaitos. Vielä 1950-luvulla kehitettiin pienvesivoimaa, mutta pian sen jälkeen säännösten kiristyessä ja sähkön hinnan alentuessa pienvesivoima muuttui kannattamattomaksi. Nykyisen automaatiotekniikan ja kaukokäyttömahdollisuuksien sekä kehittyneen taajuusmuuttajatekniikan ansiosta pienvesivoiman kannattavuus on taas parantunut. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

Vesivoimalat voidaan jakaa niiden käyttö- ja säännöstelytavan mukaan erityyppisiin laitoksiin, joista tyypillisin pienvesivoimalatyyppi on jokilaitos. Suuren järven tai tekojärven laskujoen suulle rakennettua vesivoimalaitosta kutsutaan säännöstelyvoima-

laitokseksi. Muita mahdollisia laitoksia ovat vuorovesivoimala sekä pumppuvoimalaitos, joka käytännössä ei tuota tehoa, vaan toimii säätövoimana suuren energiavaraston tavoin. Pumppuvoimalaitoksen lisäksi myös muitakin laitostyyppisiä käytetään usein säätövoimana vesivoiman helpon säädettävyyden ansiosta. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

Kuva 2.7. esittää pienvesivoimalan periaatteellista rakennetta, johon on numeroitu vesivoimalan tärkeimmät komponentit. Kuvassa näkyvät pato (1) ja siihen liittyvät rakenneosat (2), padotusallas (3), vesitiet (4), koneasema (5) sekä muuntamo ja sähköverkko (6).



Kuva 2.7. Pienvesivoimalan periaatteellinen rakennekuva (Pienvesivoimayhdistys 2009)

Vesivoimalan teho saadaan, kun lasketaan veden virtaaman (m^3/s), putouskorkeuden (m) ja vesivoimalan tehokertoimen tulo. Vanhalla heikkokuntoisella turbiinilla ja generaattorilla tehokerroin saa arvon viisi, mutta nykyaikaisella hyvällä laitteistolla tehokertoimen arvo lähestyy kahdeksaa. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

2.2 Tehotasapaino

Sähköverkossa vallitsee tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino, josta käytetään termiä tehotasapaino. Suoralla verkkoonkytkennällä syötettyjen sähkömoottoreiden ja generaattoreiden pyörimisnopeudet riippuvat verkon taajuudesta, jolloin niiden ja mukana pyörivien laitteiden hitausmassat pyrkivät kumoavat pienet tehotasapainon muutokset ja auttavat näin ylläpitämään sähköverkon taajuutta. Jos tuotanto ylittää kulutuksen, säh-

kökoneiden pyörimisnopeudet lähtevät kiihtymään, jolloin verkon taajuus kasvaa, ja päinvastoin, minkä vuoksi tuotannon ja kulutuksen epätasapaino näkyy verkon taajuuden muutoksina. (Sederlund 2008)

Pohjoismainen sähköjärjestelmä, johon kuuluu Suomi, Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska, on yhdistetty siirtoverkon kautta toisiinsa ja kantaverkkoyhtiöt säätelevät kokonaistehotasapainoa sovittujen periaatteiden mukaisesti. Suomen sähköverkossa tehotasapainon ylläpidosta vastaa Fingrid, joka tarkkailee verkon tehotasapainoa ensisijaisesti seuraamalla taajuuden muutoksia. Fingridillä on reservissä automaattisesti toimivaa varavoimaa, jolla hienosäädetään verkon taajuutta ja sitä kutsutaan taajuusohjatuksi käyttöreserviksi. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kesken on sovittu, että taajuusohjattua käyttöreserviä löytyy tarvittaessa 600 MW. Vuonna 2008 Suomen osuus tästä reservistä oli 143 MW. (Sederlund 2008)

Suuremmissa tehotasapainon häiriötilanteissa, joissa taajuuden muutos on yli 0,1 Hz, aktivoituu taajuusohjattu häiriöreservi, joka toimii primäärisäätönä, mutta sitä ei käytetä alle 0,1 Hz taajuusmuutoksien kompensoimiseen. Jos taajuusohjatuilla käyttö- ja häiriöreserveillä ei saada taajuuden muutoksia korjattua, otetaan käyttöön manuaalisesti aktivoitavat resurssit, joihin kuuluvat varavoimalat ja mahdollisesti irtikytkettävät kuormat. (Sederlund 2008)

Saarekeverkossa tilanne on haastavampi, koska yksittäisten kuormien liittäminen ja irtikytkentä vaikuttaa huomattavasti enemmän verkon tehotasapainoon. Jos esimerkiksi pienen saarekeverkon tuotanto ja kulutus on 100 – 500 kW, yksittäisen talouden suuren sähkölaitteen kytkentä saattaa vaikuttaa tehotasapainoon huomattavasti. Lisäksi myös taajuuden ylläpitäminen stabiilina on täysin saarekeverkkoa syöttävän laitteen säädön varassa, jos saarekeverkkoa syötetään pelkästään tehoelektroniikkalaitteella ilman suoraan verkkoon kytkettyä generaattoria ja sen hitausmassaa.

2.3 Energian varastointi

Energiavarastoilla on useita erilaisia ominaisuuksia, joista tärkeimpiä ovat suuri energia- ja tehotehitys sekä sovelluksesta riippuen myös hyvä vasteaika. (Alanen et al. 2003) Kuten yleensä niin myös energian varastoinnin hinta ja hyötysuhde merkitsevät paljon, joten toistaiseksi fossiiliset polttoaineet sopivat parhaiten suurimpaan osaan sovelluksia. Niiden ongelmana on kuitenkin uusiutumattomuus ja niiden käytöstä aiheutuvat päästöt. Lisäksi moneen sovellukseen halutaan energiavarasto, johon voidaan ladata ylijäävä tai palaava energia.

Uudelleen ladattavista energiavarastoista yleisin on akku, mutta myös muita tekniikoita käytetään ja tutkitaan jatkuvasti. Akun ja polttokennon toiminta perustuu sähkökemiallisiin ilmiöihin ja myös polttokenno voi olla uudelleen ladattava, jolloin sitä kutsutaan regeneroitavaksi polttokennoksi. Energiavarastona polttokennossa on pääasiassa vetyä, josta syntyy vettä, lämpöä ja sähköä. Käänteisessä reaktiossa polttokenno toimii elektrolysaattorina, jolloin se käyttää sähköä ja muodostaa vetyä. (Alanen et al. 2003)

Superkondensaattorien ja suprajohdavien energiavarastojen toiminta perustuu sähkömagneettisiin kenttiin, jolloin esimerkiksi superkondensaattorin etuna on suuri tehonluovutuskyky. Uudelleen ladattavana energiavarastona voidaan käyttää myös mekaanista vauhtipyörää, paineakkua tai varastoon pumpattavaa vettä. (Alanen et al. 2003)

2.3.1 Akut

Kuluttajalle tutuimpia sähköisiä energiavarastoja ovat paristot, jotka voidaan jakaa kahteen kategoriaan, primääri- ja sekundääriparistoihin. Primääriparistot ovat kertakäyttöisiä kun taas sekundääriparistot voi ladata uudelleen. (Alanen et al. 2003)

Paristojen ohella akut, joista tunnetuin on lyijyaku, ovat vanhimpia olemassa olevia uudelleen ladattavia energiavarastoja. Nikkeli-kadmiumakussa käytetään toista vanhaa ja edelleen laajasti käytössä olevaa tekniikkaa. Nikkeli-metallihydridiakut (NiMH) ja litiumakut ovat uuden teknologian akkutyypeistä ainoat kaupalliset tuotteet, joille löytyi markkinoita jo 1990-luvulla. (Alanen et al. 2003)

Kasvanut energiavarastojen tarve on lisännyt alan tutkimusta ja sen pohjalta on kehitetty uusia akkutyyppejä. Akkujen kehityksessä tavoitteena on kasvattaa niiden energia- ja tehotehyyksiä sekä elinikää. Muita huomioonotettavia ominaisuuksia ovat akun lataus- ja purkukertojen lukumäärä sekä akun hinta ja hyötysuhde. Näiden lisäksi ympäristö- ja turvallisuustekijät sekä toimintaolosuhteet on otettava huomioon. (Alanen et al. 2003)

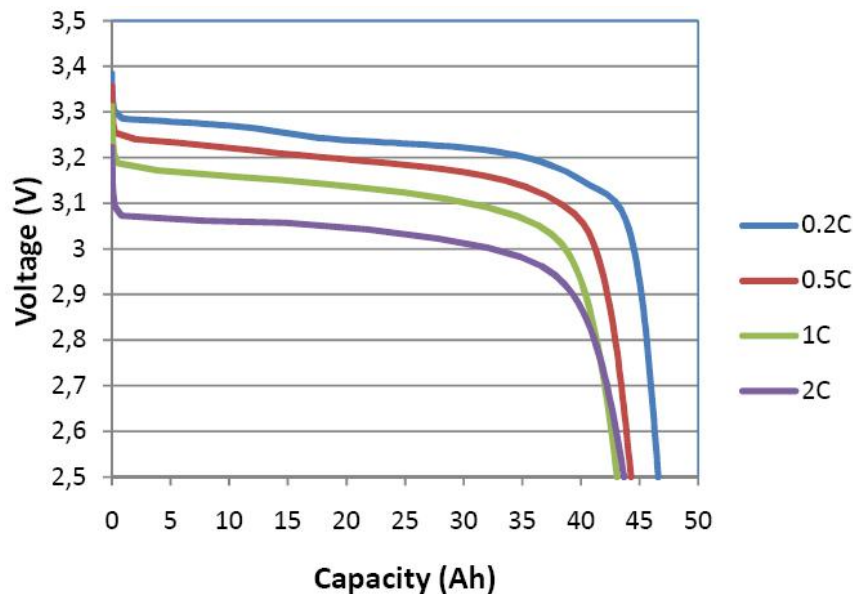
Käytettäessä uutta akkutekniikkaa täytyy akuston yksittäisten kennojen tiloja tarkkailla, koska akustolle on tärkeää, että sen kaikkien kennojen varaus on samalla tasolla, jolloin niissä on keskenään sama jännite. Jos kennot kytketään rinnakkain, on niiden jännitetaso automaattisesti sama, mutta sarjaankytkettyjen kennojen jännitteiden tasapaino ei ole itsestään selvyys, koska jännitetasot pysyvät identtisinä vain, jos kennot ovat täysin identtisiä. Koska kennot eivät koskaan ole täysin identtisiä ominaisuuksiltaan, täytyy kennojen välisiä jännite-eroja tarkkailla ja tasapainottaa tarvittaessa. Toinen akuston keston kannalta tärkeä asia on välttää sen liiallista kuormittamista, koska akuston purkamisen tai lataamisen liian suurilla virroilla lyhentää sen elinikää. Lisäksi on tärkeää tietää akuston tila ja latausaste, koska varsinkin litiumakku kärsii huomattavasti yli- tai alivarauksesta. (Paap et al. 2005).

Yleensä akuston kennoja kytketään sarjaan suuremman käyttöjännitteen saavuttamiseksi, mutta kennojen sarjaankytkentä vähentää osaltaan akuston toimintavarmuutta. Sarjaankytkettyä akustoa ei voida käyttää, jos sen yksikin kenno rikkoutuu, koska tuhoutuneen kennon impedanssi kasvaa rajusti. (Bragard et al. 2010)

Tässä opinnäytetyössä käytetään testilaitteiston energiavarastona litiumioniakustoa, joka on yksi lupaavimmista vaihtoehtoista saarekeverkkosovelluksien energiavarastona. Grafiitti on tyypillinen litium-akuston anodin valmistusmateriaali, mutta katodin valmistuksessa käytetty materiaali vaihtelee akuston tyypistä riippuen. Litium-ionikennolla on hyvä energiatehous (100–150 Wh/kg) sekä hyvä hyötysuhde (>90 %) ja sen elinikä vaihtelee 3000 ja 16000 purkaussyklin välillä riippuen akun tyy-

pistä. Litium-ioniakulla ei ole nikkeliakuista tuttua muistiominaisuutta ja siksi litium-ioniakku saattaa kestää jopa 250 000 osittaista purkaussykliä.

Litium-ioniakustolla kennojännite pysyy lähes vakiona koko purkaussyklin ajan (kuva 2.8), mutta syklin ääripäissä jännite muuttuu eksponentiaalisesti. Myös suuret virran vaihtelut vaikuttavat hetkelliseen kennojännitteeseen, mikä näkyy myös kuvassa 2.8. Kuvaajassa yksi C tarkoittaa virtaa, jolla akku luovuttaa teoreettisen kapasiteettinsa tunnissa. (Alanen & Pasonen 2011)



Kuva 2.8. Litium-ioniakun tyypillinen purkauskäyrä eri virran arvoilla (Alanen & Pasonen 2011)

Litium-ioniakut ovat herkkiä ulkoisille olosuhteille sekä ylikuormittamiselle. Kennojen lämpötila ei saa kohota liian suureksi ja toisaalta kennot saattavat jäätyä liian alhaisissa lämpötiloissa. Myös kennojännitteen täytyy pysyä kennotyypille ominaisten rajojen sisällä, koska litium-ioniakut kärsivät huomattavasti yli- ja alijännitteestä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sarjaan kytkettyjen kennojen kapasiteettieroja täytyy tasata säännöllisesti sekä valvoa jokaisen yksittäisen kennojen jännitettä. Akuston hallintajärjestelmän täytyy myös valvoa akkuvirtoja, jotta kennoille ominaisia virtarajoja ei ylitetä. (Alanen & Pasonen 2011)

2.3.2 Superkondensaattori

Sähkökemiallinen kondensaattori ei ole uusi keksintö, sillä ensimmäinen aiheeseen liittyvä patentti on myönnetty vuonna 1957. Sähkökemiallisen kondensaattorin varaus perustuu ioneihin, kuten akuissakin, mutta perinteisten kondensaattoreiden tapaan mitään kemiallista reaktiota ei kuitenkaan tapahdu. Sähköajoneuvotekniikan kehitys on lisännyt myös superkondensaattoritekniikan tutkimista. (Alanen et al. 2003)

Superkondensaattoreilla on kondensaattoreiden tapaan kyky luovuttaa energiasältönsä erittäin nopeasti ja siitä syystä niillä on suuri tehotehiys. Superkondensaattorista saatavaan tehoon vaikuttaa myös sen lataustila. Tavallisesta kondensaattorista poiketen superkondensaattoria voi käyttää myös energiavarastoina akkujen tavoin. Niihin ei kuitenkaan voi varastoida energiaa pitkiksi ajoiksi, koska superkondensaattorin itsepurkautuvuus on huomattavasti suurempi kuin tavallisella akulla. (Alanen et al. 2003; Vassallo & Paul 1998)

Superkondensaattori sopii käytettäväksi sovelluksiin, jossa tarvitaan nopeaa energian varastointikykyä lyhyeksi aikaa. Vaikka superkondensaattorin tehotehiys on huomattavasti akkua suurempi, sen energiatehiys on selvästi pienempi kuin akulla. Superkondensaattorin energiatehiys voi olla 5 Wh/kg, mikä on huomattavasti vähemmän kuin akulla, jolla vastaava arvo on yli 100 Wh/kg. Superkondensaattorin hyötysuhde purkaussyklin aikana on noin 98 %, joka on akuston vastaavaa arvoa parempi. Superkondensaattori voi tarvittaessa luovuttaa koko energiakapasiteettinsa, mutta sen käytännön varausalue on 25–100 %. Superkondensaattorin varauksen ja jännitteen suhde on lähes lineaarinen, mutta sen energia kasvaa jännitteen neliössä. (Alanen & Pasonen 2011)

Sekä akulla että superkondensaattorilla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Parhaaseen tulokseen päästään, kun niitä käytetään järkevästi yhdessä. Esimerkiksi työkonneissa voidaan superkondensaattoria käyttää varastoimaan suurten ja suuritaajuuksisten virtasyklienergioita ja käyttää superkondensaattorin rinnalle kytkettyä akustoa, varastoitaessa hitaampia tehonvaihteluita vastaavia energioita. Akuston hyötysuhde on parhaimmillaan, kun sitä puretaan pienellä virroilla ja pitkällä purkuajalla, kun taas superkondensaattorin hyötysuhde on suurimmillaan nopeissa ja suurissa virtoja sisältävissä lataus- ja purkaussykleissä, koska superkondensaattorilla on akustoa suurempi itsepurkautuvuus.

3. SAAREKEVERKON KÄYTTÖ

Saarekeverkkoa käytetään nykyään pääasiassa varavoimasovelluksissa sekä muutamissa erikoisemmissä käyttökohteissa, kuten esimerkiksi laivaverkoissa. Siitä huolimatta tehoelektroniikalla toteutettu saarekeverkko ei kuitenkaan ole vielä yleistynyt, vaikka sille löytyy paljon mahdollisia käyttökohteita. Tekniikan kehittyminen sekä jatkuva laitteiden hinnan halpeneminen todennäköisesti aikaansaavat sen, että tehoelektroniikalla toteutetut saarekeverkot yleistyvät tulevaisuudessa.

DC-jakelua on esitetty vaihtoehdoksi nykyiselle sähkönjakelulle keskijännite- ja pienjänniteverkoissa, mikä edellyttää, että kuluttajat siirtyvät käyttämään kuluttajakoh- taisia vaihtosuuntaajia. Tällöin kaikilla kuluttajilla on käytännössä oma saarekeverkkoa vastaava vaihtosähköverkko, mutta energia otetaan suuremmasta tasajännitesiihtover- kosta. DC-jakelulla voidaan siirtokapasiteettia kasvattaa nykyisessä pienjänniteverkossa tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pienempipipoikkipinta-alaisia johtimia. (Alahuhtala et al. 2010)

3.1 Tehtyjä tutkimuksia

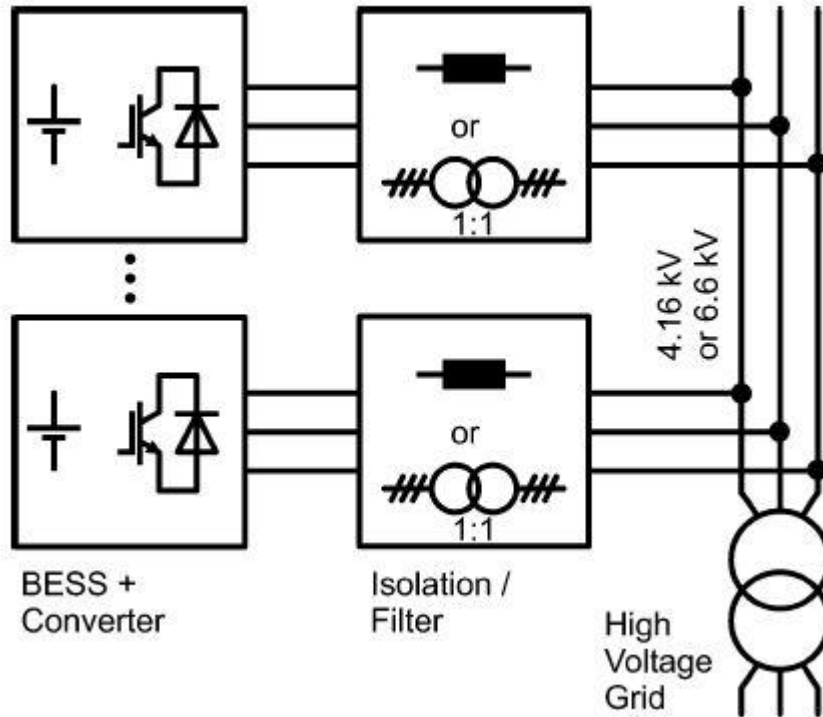
Uusiutuviin energialähteisiin perustuvien tuotantomuotojen lisääntyminen sekä niiden yhteydessä esiintyvät ennustamattomat tehonvaihtelut ovat aikaansaaneet energiavaras- tointiin liittyvän tutkimustoiminnan lisääntymisen. Esimerkiksi siirtoverkon mitoittami- nen suuren tuulipuiston maksimitehon mukaan aiheuttaa huomattavasti kustannuksia, mutta Suomen tuuliolosuhteissa tuuliturbiini kykenee tuottamaan maksimitehonsa vain hyvin pienen osan ajasta, minkä vuoksi myös kyseisen verkon koko siirtokapasiteettia hyödynnetään vain harvoin. Seuraavassa on esiteltynä kaksi tutkimusta (Bragard et al. 2010 ja Paap et al. 2005), jotka liittyvät uusiutuviin tuotantomuotoihin ja energian va- rastointiin.

3.1.1 Tehotasapainon säätäminen energiavaraston avulla

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvat tuotantomuodot aiheuttavat ongelmia sähkö- verkon tehotasapainoon, koska energiansaanti riippuu vahvasti vallitsevista sääolosuh- teista. Tuleva säätila on osittain ennustettavissa, mutta ei täydellisesti, jolloin paikoissa joissa tuuli- ja aurinkovoimalla tuotetaan suuri osa energiasta, saattaa tuotantotehossa esiintyä suuriakin muutoksia lyhyessä ajassa. (Bragard et al. 2010)

Tuotannon yhteyteen liitettävällä energiavarastolla on mahdollista tasapainottaa tehontuotannon vaihteluja, jolloin myös tuotannon ennustettavuus paranee, koska esi- merkiksi sijoittamalla suuri energiavarasto tuulipuiston yhteyteen, pystyy tuulipuisto

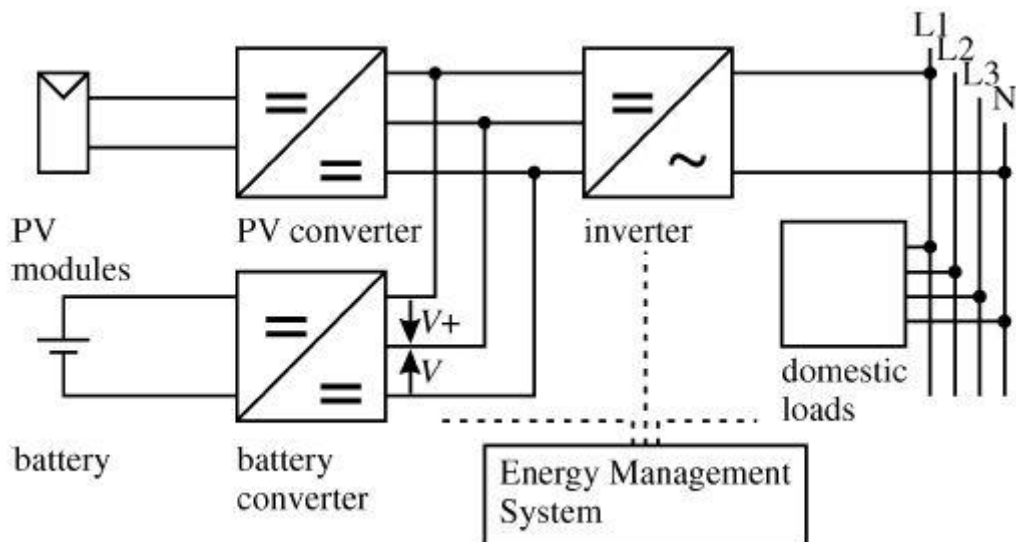
syöttämään energiaa verkkoon hetken aikaa myös tuulen tyyntyessä. Yksi tai useampi energiavarasto voidaan sijoittaa myös keskijännitelinjaan (kuva 3.1), jolloin sillä voidaan yleisesti tasapainottaa energian tuotantoa ja kulutusta.



Kuva 3.1. Energiavarastojen rinnankytkentä keskijänniteverkkoon (Bragard et al. 2010)

Keskijänniteverkon ja nykyään käytettävien akustojen jännitetasoissa on suuri ero, mutta akustojen jännitettä voidaan kasvattaa kytkemällä niitä sarjaan, kuten luvussa 2.3.1 on kerrottu. Jännitetasoerojen ollessa suuret järjestelmän hyötysuhdetta voidaan myös parantaa käyttämällä monitasoisia suuntaajia energiavarastojen yhteydessä. (Bragard et al. 2010)

Energiavarasto voidaan liittää myös lähelle kulutusta, jolloin esimerkiksi latauksessa olevaa sähköauton akustoa on mahdollista käyttää energiavarastona, koska yksityiskäytössä auto seisoo suurimman osan ajasta pysäköitynä. Käytettäessä auton akustoa sähköverkon energiavarastona se kuluu käyttäjälle tarpeettomien purkaus- ja lataus syklien aikana, mutta tätä voidaan kompensoida esimerkiksi sähkön hinnassa. Toinen vaihtoehto on liittää erillinen akusto asunnon sähköjärjestelmään, jolloin akuston yhteyteen on mahdollista liittää myös aurinkokenno ja -invertteri, kuten kuvassa 3.2 ja mitoitettamalla tällainen järjestelmä sopivasti voidaan päästä tilanteeseen, jossa yksittäiset kotitaloudet voisivat hetkittäin olla omavaraisia sähköenergian suhteen. (Bragard et al. 2010)



Kuva 3.2. Akuston ja aurinkovoimajärjestelmän liittäminen kotitalouden sähköverkkoon (Bragard et al. 2010)

Tutkimuksessa selvisi, että energian varastointi osoittautuu hyväksi keinoksi tasata uusiutuviin energialähteisiin perustuvan tuotannon vaihteluita sekä se, että kotitalouskohtaisilla energiavarastoilla ei päästä yhtä hyvin hyötysuhteisiin kuin keskijänniteverkkoon sijoitettavilla monitasoisilla suuntaajilla, mutta kotitalouskohtaisilla ratkaisuilla on etuna se, että ne ovat lähellä vaihtelevaa kulutusta. Tällöin verkon ei tarvitse kuljettaa suuria kulutuspiikkejä ja näin siirtohäviöt pienevät, jolloin käytännön hyötysuhde kotitalouskohtaisilla energiavarastoilla nousee keskijänniteverkkoon sijoitettavien järjestelmien tasolle. (Bragard et al. 2010)

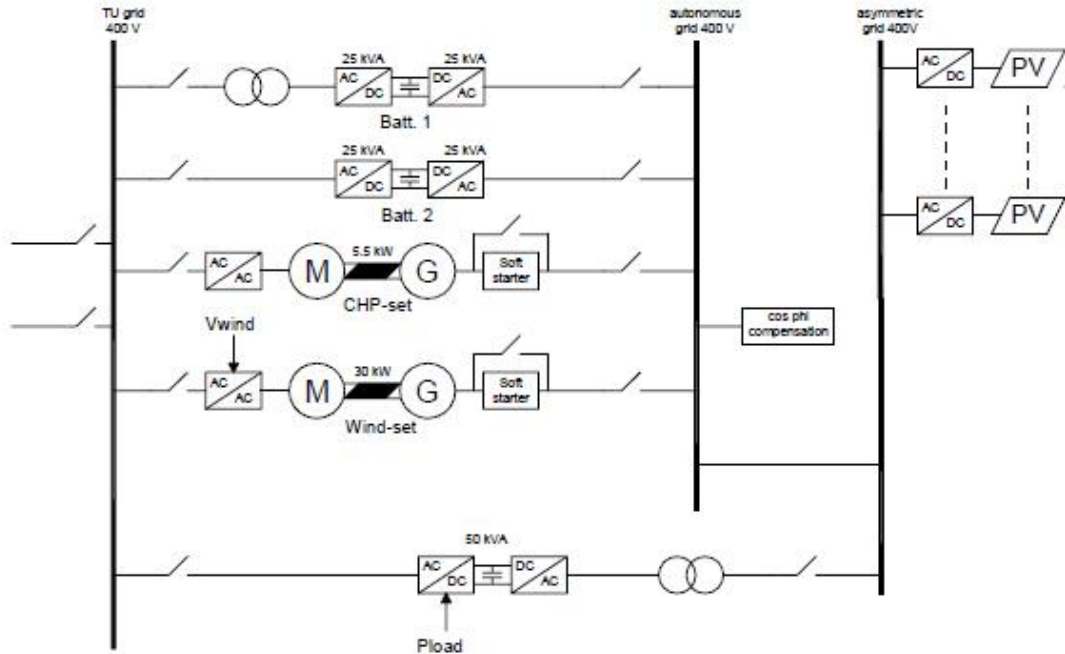
3.1.2 Akkujen käyttö saarekeverkossa

Energiavaraston avulla on mahdollista ylläpitää saarekeverkkojärjestelmää, joka koostuu pelkästään uusiutuvista energialähteistä sekä kulutuksesta, ilman valtakunnan verkkoa. Tällaisen järjestelmän ylläpitäminen ja säätäminen on haastavaa, koska uusiutuvien energiamuotojen epäsäännöllisyys sekä energiavaraston ominaisuudet aiheuttavat hankaluuksia.

Tutkimuksessa tutkittiin tilannetta, jossa kulutus ja tuotanto vaihtelevat, mistä syystä tehotasapainoa ylläpidetään akustolla ja CHP-tuotantoyksiköllä, mikä tarkoittaa yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa. Tarkoituksena on hoitaa järjestelmän tehotasapainon ylläpitäminen pääsääntöisesti akustolla ja käyttää CHP-tuotantoyksikköä vain tarvittaessa. (Paap et al. 2005)

Tutkimusta varten on rakennettu järjestelmä (kuva 3.3), jolla on mahdollista mallintaa erilaisia tuotantomuotoja sekä tutkia tehotasapainon säilymistä. Kulutuksen mallintaminen hoidetaan verkkovaihtosuuntaajalla, joka syöttää energian takaisin verkkoon, jolloin säästytään testiajon aiheuttamilta turhilta energiahäviöiltä. Tuuliturbiinia ja CHP-tuotantoyksikköä on mallinnettu toistensa kanssa samalle akselille kytketyillä

moottoripareilla, joissa generaattoreita pyörittäviä moottoreita ohjataan taajuusmuuttajilla. Näiden lisäksi järjestelmässä on 9 kW:n aurinkokennosto sekä siihen kytketty vaihtosuuntaaja. (Paap et al. 2005)



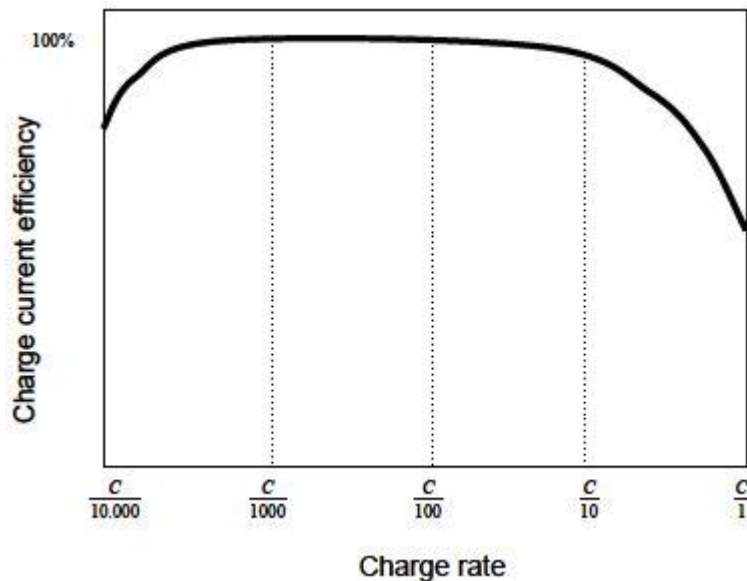
Kuva 3.3. Testijärjestelmä jossa on hajautettua tuotantoa, kulutusta ja energiavarasto (Paap et al. 2005)

Testissä päätarkoituksena on tutkia tehotasapainon säilymistä sekä akuston kunnon valvontaa ja kennojen välisten jännitteiden tasapainoa, koska akuston eliniän ja toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että kaikissa kennoissa pysyy sama jännitetaso. Energiavarastojen määrän kasvaessa on mahdollista, että yksittäisille akustoille voidaan tehdä kennojen taseauslataus muun järjestelmän toimiessa normaalisti. (Paap et al. 2005)

Käytettäessä akustoa saarekeverkon ainoana varavoimälähteenä sen kapasiteetti täytyy mitoittaa huomattavan suureksi, koska tilanteessa, jossa ei ole tuotantoa ja kulutus on huipussaan, täytyy akuston pystyä luovuttamaan saarekeverkon kulutusta vastaava teho. Päinvastaisessa tilanteessa, jossa tuotanto on huipussaan ja kulutus on vähäistä, ongelma on ratkaistavissa siten, että rajoitetaan tuotantoa, mutta siinä tapauksessa energiaa menee hukkaan. Akusto voidaan mitoittaa huomattavasti pienemmäksi, jos sen lisäksi saarekeverkossa on myös toinen varavoimälähde kuten esimerkiksi dieselgeneraattori. (Paap et al. 2005)

Akuston kapasiteettia mietittäessä tulee ottaa huomioon myös, että sen hyötysuhde laskee, jos sitä ladataan liian suurilla tai pienillä virroilla. Kuvassa 3.4 on esitettyä lyijyakun hyötysuhde C :n funktiona, jossa yksi C tarkoittaa sellaista virtaa, joka vastaa akun kapasiteettia yhden tunnin aikana. Eli teoriassa yhden C :n suuruisella virralla ladattaessa täysin tyhjä akku latautuu täyteen yhden tunnin aikana. Käytännössä jär-

kevä hyötysuhde saadaan, kun akkua ladataan alle 10 % virralla suhteessa sen kapasiteettiin. (Paap et al. 2005)



Kuva 3.4. Lyijyakun latauksen hyötysuhde suhteellisen latausvirran funktiona (Paap et al. 2005)

Tutkimuksessa kokeiltiin neljää eri tapaa ylläpitää tehotasapainoa ja ohjata akustoja sekä CHP-tuotantoa yhdessä. Ensimmäisessä ratkaisussa akustolla ylläpidettiin tehotasapaino verkossa ja CHP-tuotanto käynnistettiin akuston varauksen laskiessa tietyn rajan alle. Toinen ratkaisu pyrki optimoimaan akustojen lataus- ja purkuvirtoja käyttämällä kahta rinnankytkettyä akustoa yhden sijaan. Kolmannessa ratkaisussa pyrittiin ennustamaan kulutusta edellisen viikon perusteella ja sen avulla optimoimaan akustojen ja CHP-tuotannon käyttöä. Neljännessä ratkaisussa käytettiin kahta akustoa ja suoritettiin tasaisin väliajoin toiselle akustolle hidaslataus täyteen, jolloin kennojen välisten varaustilojen erot saatiin tasapainotettua. (Paap et al. 2005)

Vertailtaessa uusiutuvista lähteistä sähköverkkoon tuotettua energiaa sekä CHP-tuotannon käyttömäärää kaikki neljä eri ratkaisua osoittautuivat suurin piirtein yhtä tehokkaiksi. Viimeisessä tapauksessa uusiutuvaa energiaa tuotettiin enemmän kuin muissa, mutta ylimääräinen tuotettu energia kului akustojen tasauslataukseen, jonka ansiosta neljäs ratkaisu on kokonaisuudessa parempi kuin kolme ensimmäistä, koska se antaa akustoille pisimmän eliniän. (Paap et al. 2005)

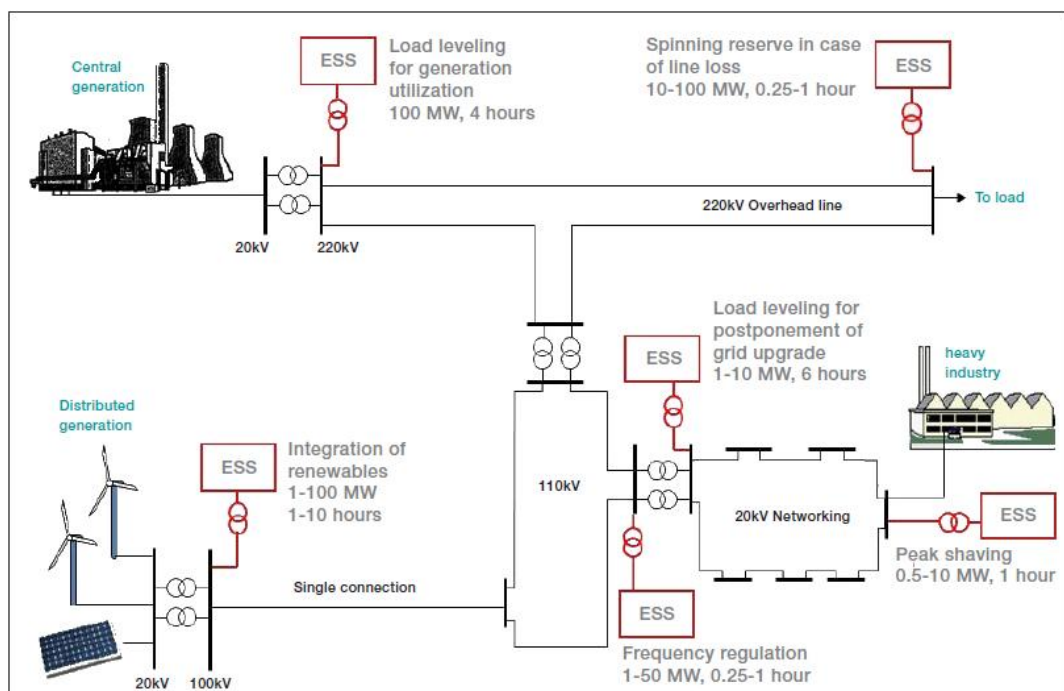
Tutkimuksessa todettiin myös, että toistaiseksi tuotantotehon varmistaminen uusiutuvan tuotannon yhteydessä on järkevämpää toteuttaa ylimitoitettulla tuotantokapasiteetilla kuin akustoihin perustuvalla energiavarastolla, koska energiavarastojen käyttö aiheuttaa todennäköisesti enemmän kustannuksia kuin tuotantokapasiteetin ylimitoittaminen. Energiavarasto on kuitenkin välttämätön, jos halutaan taata katkeamaton energiensaanti. (Paap et al. 2005)

3.2 Kaupallisia saarekekonverttereita

Kaupallisesti on olemassa jo muutamia, perinteistä tietokoneeseen liitettävää UPSia tehokkaampia, energiavaran sisältäviä laitteita, jotka valmistajiensa mukaan kykenevät tarvittaessa luomaan saarekeverkon. Osa näistä laitteista pystyy myös toimimaan vakaasti tilanteessa, jossa yhteys siirtoverkkoon menetetään arvaamattomasti sekä tahdistumaan takaisin verkkoon vian poistuttua.

3.2.1 ABB PCS100 ESS

ABB PCS100 ESS on nimellisteholtaan 100kVA - 10MVA energiavaraa, joka voi olla akusto, superkondensaattori tai vauhtipyörä, hyödyntävä järjestelmä, jolla voidaan tukea sähköverkkoa sekä parantaa sähkön laatua sijoittamalla se lähelle vaihtelevaa kulutusta tai tuotantoa (kuva 3.5). Laitteella voidaan säätää verkon päto- ja loistehoa erikseen sekä tarvittaessa se voi muistuttaa suurta tahtigeneraattoria, jolloin järjestelmä luo virtuaalista inertiaa verkkoon. Vaikka järjestelmässä ei ole pyörivää generaattoria, sitä voidaan emuloida taajuusmuuttajan ohjauksella, jolloin esimerkiksi jännitekuopan aikana akustosta syötetään verkkoon dynaaminen tehopiikki. (ABB)



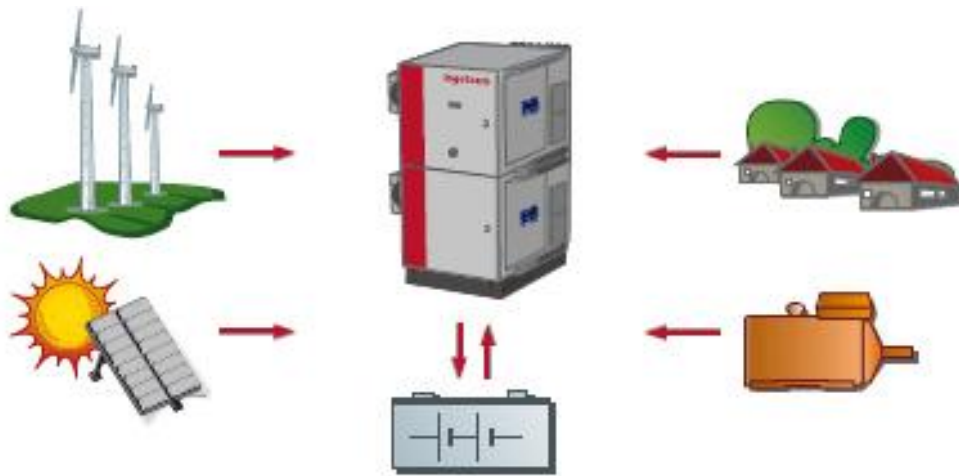
Kuva 3.5. ABB PCS100 ESS -laitteelle soveltuvia käyttökohteita (ABB)

Optiona PCS100 ESS laitteessa on automaattinen saarekekäyttö mahdollisuus, jolloin se tarkkailee verkon tilaa sekä tarvittaessa irrottaa aliverkon suuremmasta sähköverkosta ja jää ylläpitämään saarekeverkkoa kuluttajille. Suuremman sähköverkon toiminnan palautuessa normaaliksi, laite synkronoituu sen kanssa ja kytkee saarekeverkon takaisin suurempaan verkkoon. (ABB)

3.2.2 Ingeteam Ingecon Hybrid

Ingeteam Ingecon Hybrid on maksimissaan 10 kVA:n tehoinen invertteriyksikkö, joka kykenee muodostamaan itsenäisen yksivaiheisen saarekeverkon, missä tarvittu teho tuotetaan ensisijaisesti aurinko- ja tuulivoimalla, sekä ylläpitämään tehotasapainoa luomassaan saarekeverkossa. Kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisen varten järjestelmään voidaan kytkeä energiavarasto sekä sen tueksi järjestelmään on mahdollista kytkeä myös varavoimageneraattori, jos energiansaanti täytyy varmistaa kaikissa tilanteissa. Lisäksi yksikkö sisältää myös suojaukset ylikuormitusta ja oikosulkua vastaan. (Ingeteam)

Suuremmille tehoille on samalla valmistajalla tarjolla Ingecon Hybrid MS (kuva 3.6), joka koostuu moduuleista, joten järjestelmä pystytään mitoittamaan tarpeeseen sopivaksi. Pienemmästä mallista poiketen Hybrid MS muodostaa kolmivaiheisen saarekeverkon. Vaihtoehtoisia moduuleita ovat aurinkokenno-, tuuliturbiini, akusto- ja invertterimoduulit, joista jokaista voidaan kytkeä maksimissaan neljä kappaletta. Aurinkokennomoduulissa löytyy valmiina MPPT-algoritmi, joka osaa hakea aurinkokennon maksimitehopisteen ja tuuliturbiinimoduuli pystyy ajamaan sekä epätahti- että tahti-generaattoreita. Käytettäessä kaikkia neljää saarekekonvertteriyksikköä Ingecon Hybrid MS pystyy luomaan nimellisteholtaan 120 kVA saarekeverkon. (Ingeteam)



Kuva 3.6. Ingeteam Ingecon Hybrid MS ja siihen kytkettävissä olevia energiamuotoja (Ingeteam)

3.2.3 Zigor HIS/HIT T

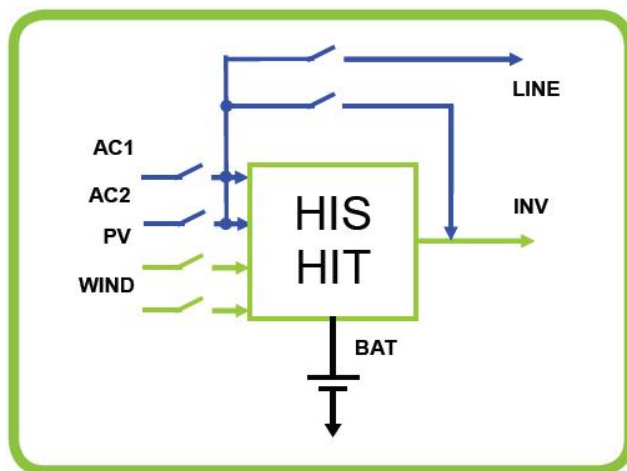
Zigor HIS/HIT ovat yksiköitä, joilla on mahdollisuus tuottaa energiaa uusiutuvista energiamuodoista sähköverkkoon sekä luoda tarvittaessa saarekeverkko. HIS (kuva 3.7) on tarkoitettu yksivaiheisten verkkojen yhteyteen tai paikkaan, jossa ei tarvitse muodostaa kolmivaiheista saarekeverkkoa, kun taas HIT syöttää energiaa kolmivaiheiseen verkkoon tai muodostaa kolmivaiheisen saarekeverkon, jonka maksimiteho on huomattavasti suurempi kuin HIS:n.

tavasti HIS-versiota suurempi. Yksivaiheinen HIS-yksikkö pystyy tarjoamaan maksimissaan 11 kW tehon ja kolmivaiheisen HIT-yksikön maksimiteho ulottuu 100 kW asti. (Zigor)



Kuva 3.7. Zigor HIS-invertteri (Zigor)

Zigor-invertterin energialähteeksi on mahdollista kytkeä aurinkokenno, tuuliturbiini, sähköverkkoliityntä tai varavirtageneraattori sekä energiavarastona toimiva akusto. Kuva 3.8 esittää energialähteiden ja -varaston kytkeytymistä yksikköön, missä AC1 liitännään voidaan kytkeä sähköverkko ja AC2 liitännään on mahdollista kytkeä toinen sähköverkko tai varavirtageneraattori toimimaan varavoimana. Kuitenkin optimoimalla uusiutuvan energiantuotannon käyttöä HIS/HIT-järjestelmä minimoi varavoimageraattori käytön ja siten myös vähentää fossiilisten polttoaineiden kulutusta. (Zigor)



Kuva 3.8. Sähkölaitteiden ja -linjojen kytkeminen Zigor-invertteriin (Zigor)

3.3 Saarekeverkon käyttökohteita

Saarekeverkkojärjestelmä on nykyään käytössä usein varavoimana, jota käytetään vain sähkökatkoksen aikana tai kun muusta syystä ei ole saatavilla sähköverkkoa. Usein tällainen varavoimajärjestelmä koostuu tahtigeneraattorista, jota pyörittää fossiilisella polttoaineella toimiva moottori.

Jos tahtigeneraattori kytketään suoraan saarekeverkkoon, niin verkon taajuus on suoraan verrannollinen generaattorin pyörimisnopeuteen ja sitä kautta myös polttomoottorin pyörimisnopeuteen, jolloin taajuuden säätö on toteutettu pitämällä polttomoottorin pyörimisnopeus vakiona. Saarekeverkon nimellistehoon verrattuna suurissa kuormanmuutoksissa saarekeverkon taajuus ei pysy täysin vakiona, koska polttomoottorin kierrosten säätö ei pysty vastaamaan äkilliseen muutokseen.

Käyttämällä tehoelektroniikkaa tuotannon ja saarekeverkon välissä saadaan taajuus- ja jännitevaihtelut poistettua sekä parannettua järjestelmän hyötysuhdetta. Tahtigeneraattorin ja sähköverkon väliin sijoitettavan taajuudenmuuttajan avulla voidaan generaattorin ja siihen yhdistetyn polttomoottorin pyörimisnopeus pitää haluttuna, jolloin polttomoottoria voidaan ajaa huomattavasti paremmalla hyötysuhteella vaihtelevissa kuormitustilanteissa ja sen pyörimisnopeuden vaihtelut eivät häiritse saarekeverkon jännitettä.

Suomesta löytyy lukemattomia pieniä kesämökkejä, joissa ei ole sähköä, koska sähköliittymä voi olla liian kallis, lähin sähkölinja voi olla liian kaukana tai mökki on saarella, jonne ei ole vedetty sähkökaapelia. Tällaisen mökin sähköistäminen luomalla sinne saarekeverkkko ja käyttämällä saatavilla olevia uusiutuvia energiamuotoja sekä energiavarastoa saattaa olla kustannustehokas vaihtoehto varsinkin, jos samassa kohteessa on useampia kesämökkiläisiä, jotka myös haluaisivat sähköliittymän. Yhdistämällä useamman mökin samaan saarekeverkkoon, saadaan mökkikohtaisia kuluja karistettua. Lisäksi mökkikäytössä sähkön laadulla tai energiansaannin jatkuvuudella ei ole samoja vaatimuksia kuin normaalissa verkossa, mikä myös alentaa järjestelmän kustannuksia.

Joissain paikoissa saattaa olla ongelmia sähkön laadun suhteen, vaikka sähkönjakelu muuten toimii luotettavasti, kuten esimerkiksi heikon ja pitkän linjan päässä, jossa linjan kuormitustilanteiden muutosten vuoksi jännite saattaa vaihdella. Tämän kaltaisessa tilanteessa voidaan kallis kaapelinvaihto välttää, jos käytetään sähköverkon ja kulutuskohteiden välissä saarekekonvertteria, joka luo tasalaatuisen sähköverkon kulutuskohteeseen, kunhan konvertteri on sijoitettu riittävän lähelle kulutusta. Saarekekonvertteri ei poista jännitevaihtelua pitkän siirtolinjan päässä, mutta siirtolinjan jännitevaihtelu ei näy kuluttajalle asti ja saarekekonvertterissa se ei aiheuta häiriöitä.

Edellisen kaltainen saarekeverkkoratkaisu on käytössä Orivedellä, jossa pitkän vesikaapelin päässä sijaitsevat kuluttajat kärsivät jännitteen vaihteluista. Ongelma on ratkaistu sijoittamalla kuluttajien lähelle 120 kVA verkkovaihtosuuntaajasta ja saarekekonvertterista koostuva järjestelmä, jossa on myös langaton tiedonsiirto valvontaa ja etähallintaa varten. Saarekeverkkojärjestelmä on ylimitoitettu huomattavasti saareke-

verkon nimelliskuormaa suuremmaksi, koska järjestelmän on tarvittaessa syötettävä sulakkeen palamiseen tarvittava oikosulkuvirta. (Antila et al. 2010)

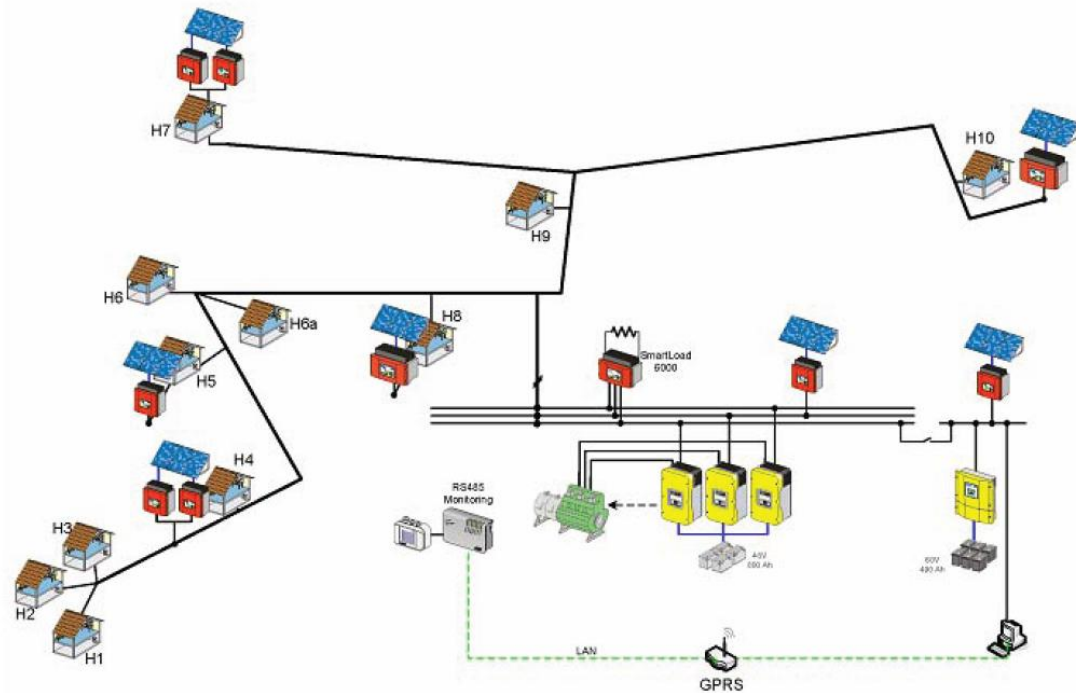
Edellisten käyttökohteiden lisäksi myös kehittyvistä maista löytyy lukemattomia kohteita saarekeverkolle, koska 33 % maailman väestöstä asuu paikoissa, joissa ei ole sähköä, ja varsinkin haja-asutusalueilta ei useinkaan löydy minkäänlaista sähköverkkoa. Kylät voivat myös sijaita alueilla, kuten esimerkiksi vuoristossa tai saaristossa, joihin on liian kallista tai vaikeaa rakentaa sähköverkko, jolloin saarekeverkon rakentaminen saattaa olla ainoa kannattava vaihtoehto. (Bauer et al. 2011)

Monissa paikoissa rakennetaan edelleen uusia polttomoottorikäyttöisiä sähkön-tuotantoyksiköitä, jotka muodostavat päästöjä sekä aiheuttavat paljon kustannuksia polttoaineiden korkean hinnan vuoksi, vaikka monet tämän kaltaiset yksiköt olisivat korvattavissa uusiutuviin energialähteisiin perustuvan hajautetun tuotannon, saarekekonvertterin ja energiavaraston avulla. Monet kehittyvät maat sijaitsevat lämpimissä maanosissa, joissa aurinkoenergiaa on runsaasti saatavilla, jolloin aurinkopaneelin ja saarekekonvertterin käyttökustannukset jäävät melko pieniksi verrattuna polttomoottoriin. Lisäksi aurinkopaneelijärjestelmän huollon tarve on huomattavasti polttomoottorikäyttöistä ratkaisua pienempi. Tehoelektroniikalla toteutettu saarekeverkko on myös tulevaisuudessa helppo liittää suurempaan sähköverkkoon, minkä jälkeen sitä voidaan käyttää mikroverkon tavoin suuremman sähköverkon yhteydessä.

3.3.1 Saarekeverkko Gaidouromantrassa

Hyvä esimerkki saarekeverkon käyttömahdollisuudesta löytyy Kreikasta, Kythnosin saarelta, Gaidouromantrasta, missä saarekeverkko on ollut käytössä vuodesta 2001 lähtien (kuva 3.9). Saarekeverkko koostuu kolmesta 5 kVA:n dieselgeneraattorista, hajautetusta aurinkotuotannosta, akustoa käyttävästä energiavarastosta, ohjattavista kuormista sekä 12 sähköä kuluttavasta loma-asunnosta. Suurin osa tuotanto- ja kulutusyksiköistä on kytketty suoraan vaihtosähköverkkoon, joten saarekeverkon tehotasapainon vaihtelu näkyy verkon taajuudessa. Saarekeverkon on tarkoitus toimia alustana kahdessa Eurooppalaisessa tutkimuksessa, PV-MODE, JOR3-CT98-0244 ja MORE, JOR3CT98-0215 (Tselepis 2010)

Ensimmäisen vaiheen tekninen tavoite oli asentaa saarekeverkojärjestelmä oikeaan ympäristöön sekä saada se toimimaan. Sähköisen puolen tavoitteena oli minimoida dieselgeneraattoreiden käyttö sekä säädellä aurinkoenergian tuottamaa ylimääräistä energiaa ohjattavalla kuormalla. Toisessa vaiheessa konvertterit uusittiin, jotta ne pysyvät paremmin hallitsemaan saarekeverkkoa, minkä lisäksi verkkoon asennettiin monitorointi. (Tselepis 2010)



Kuva 3.9. Gaidouromantran saarekeverkko Kreikassa (Tselepis 2010)

Monitoroinnin avulla pystyttiin keräämään verkosta käyttödataa ja mahdollistettiin verkon etävalvonta sekä laitteiden vikatilanteiden nopea havaitseminen. Kuitenkin taajuuden mittausta häiritsi verkon tehotasapainon säätötapa. Tehotasapainon säätö on suunniteltu toimimaan siten, että aurinkoenergian tuotantoa rajoitetaan taajuuden noustessa yli 51 Hz:n ja että osa kulutuksesta kytkeytyy irti sähköverkosta, jos verkon taajuus laskee alle 49 Hz:n. Mittausdatasta oli myös havaittavissa, että jaksottaisten kuormien, kuten esimerkiksi jääkaappien, kytkeä sekä aurinkoenergian tuotannon säätötapa aiheutti jännitepiikkejä sekä harmonisia yliaaltoja saarekeverkkoon. (Tselepis 2010)

Mittausjakson aikana elokuussa 2008 saarekeverkon hyötysuhde, jolla aurinkokennoista otettavissa oleva energia saatiin hyötykäyttöön, oli 0,2 – 0,6. Hyötysuhdetta voitaisiin parantaa käyttämällä aurinkoenergiaylijäämä hyödyllisesti, kuten veden pumppaamiseen tai suolan poistamiseen merivedestä, jolloin siitä saadaan juomakelpoista. Hyötysuhdetta voitaisiin parantaa myös suurentamalla energiavarastoa, jolloin energiaa voidaan käyttää joustavammin vuorokauden aikana. (Tselepis 2010)

Tutkimuksesta on tähän mennessä ollut apua saarekeverkon simuloinnin kehittämisessä ja tutkimuksen aikana on selvinnyt, että saarekeverkot tarvitsevat omat standardit sähkönlaadun valvonnan suhteen. Gaidouromantran saarekeverkon ylläpitoa ja kehitystä on tarkoitus jatkaa edelleen ja ajatuksena on, että saarekeverkko voidaan tulevaisuudessa liittää Kyhtnosin saaren keskijänniteverkkoon, jolloin se voi toimia mikroverkon tavoin suuremman sähköverkon yhteydessä. (Tselepis 2010)

3.4 Heikon verkon tukeminen

Nykyaikaisissa tuuliturbiininsovelluksissa on toiminto, jonka avulla tuuliturbiini kykenee tukemaan sähköverkkoa jännitekuopan aikana, jolloin tuuliturbiini syöttää verkkoon kapasitiivista virtaa. Lisäksi jännite saattaa pudota jopa muutamaaan prosenttiin normaalitilanteen arvosta ja siitä huolimatta tuotantolaitoksen täytyy pystyä syöttämään virtaa verkkoon. Myös Nordic Grid Code määrittelee, että tuuliturbiinin täytyy pystyä säättämään loistehoa sekä toimimaan myös sähköverkon häiriötilanteessa (Fingrid 2009).

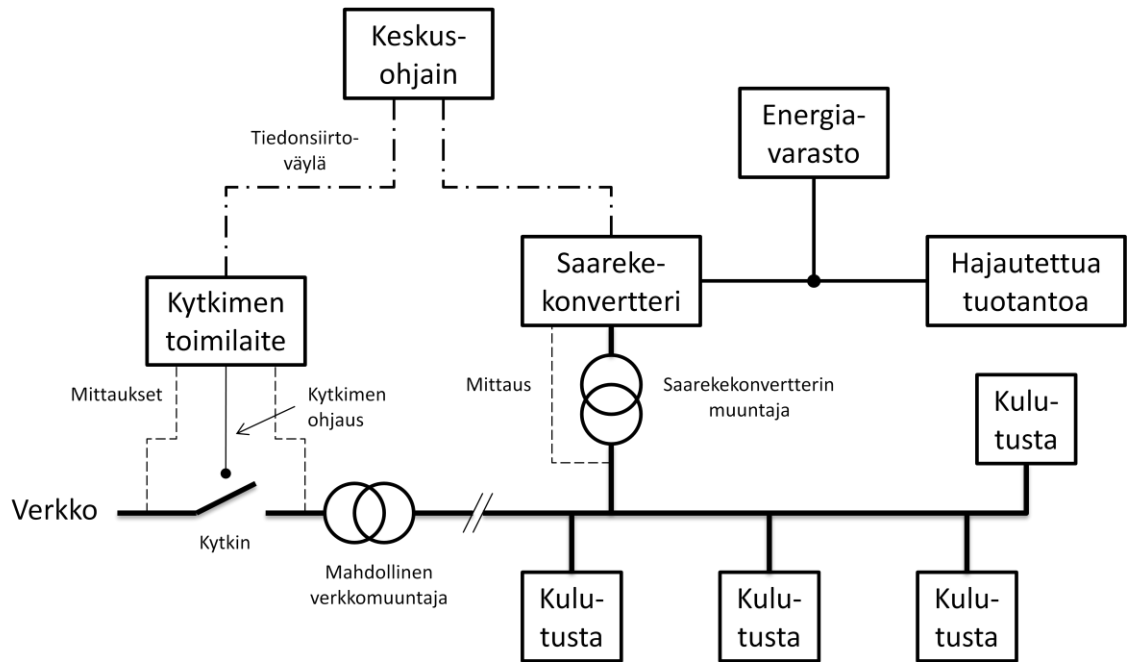
Käytettäessä järjestelmää, joka siirtyy automaattisesti saarekemoodiin ilman sähkökatkoa siirtolinjan vikaantuessa, asettaa siirtyminen järjestelmän suunnittelulle omat haasteensa. Järjestelmän täytyy pystyä erottelemaan toisistaan jännitekuoppa ja todellinen sähkökatko, jolloin järjestelmä siirtyy saarekeverkkotilaan. Sähköverkon turhat irtikytketykset saarekeverkoksi tulee minimoida, koska muulle verkolle aiheutuu häiriöitä siitä, että suuri kuluttaja tai tuottaja, eli tässä tapauksessa aliverkko, irrottautuu verkosta. Lisäksi täytyy estää tilanteet, jossa saarekekonvertteri yrittää luoda tai ylläpitää saarekeverkkoa, vaikka aliverkko on kytkettynä suurempaan sähköverkkoon. Tämä voidaan kuitenkin helposti estää käyttämällä ohjattavaa kytkintä, joka irrottaa aliverkon irti muusta verkosta saareketilanteessa.

3.4.1 Verkkoon tahdistuminen vikatilanteen jälkeen

Jotta katkeamaton sähkönjakelu voidaan turvata, aliverkon täytyy pystyä tarvittaessa automaattisesti eristäytymään saarekkeeksi, ja jos aliverkkoa ei ole suunniteltu pelkäksi saarekeverkoksi, pitää sen myös pystyä kytkeytymään takaisin suurempaan sähköverkkoon ilman katkoa. Jos saarekeverkko halutaan kytkeä suurempaan verkkoon ilman katkoa, täytyy säätöjärjestelmän kyetä ohjaamaan saarekeverkon taajuus, vaihe ja jännite vastaamaan suuremman verkon vastaavia arvoja.

Seuraavassa on pohdiskeltu yhtä mahdollista ohjausratkaisua, jolla saarekeverkko voitaisiin liittää suurempaan verkkoon ilman katkosta. Oletetaan tilanne, jossa normaalisti siirtolinjan päässä toimiva aliverkko on siirtynyt toimimaan saarekkeessa siirtoverkon vian vuoksi, jolloin kuvassa 3.10 esitetty kytkin on auki. Siirtolinjan vian poistuttua keskusohjain saa kytkimen toimilaitteelta tiedon siirtolinjan jännitteen mittauksesta ja havaitsee, että siirtolinja on jälleen toiminnassa. Tällöin on järkevää kytkeä saarekeverkko takaisin suurempaan sähköverkkoon, mutta todennäköisesti saarekeverkon vaihejännitteet eivät enää silloin ole samassa vaiheessa siirtolinjan jännitteiden kanssa, jolloin verkkoja ei voida suoraan yhdistää.

Jotta saarekeverkko voidaan yhdistää takaisin siirtoverkkoon, täytyy saarekeverkko tahdistaa samaan vaiheeseen ja jännitteeseen siirtoverkon kanssa. Siirtoverkon vaihe ja jännite ovat kiinteät, joten niihin ei voi vaikuttaa, mutta saarekeverkon taajuus ja jännite on hallittavissa saarekekonvertterin avulla. Saarekeverkon jännitettä voidaan säätää suoraan saarekekonvertterilla ja vaiheenkin muuttaminen on mahdollista säätämällä hetkellisesti saarekeverkon taajuutta pienemmäksi tai suuremmaksi verrattuna siirtoverkon taajuuteen.



Kuva 3.10. Mikroverkko joka voi siirtyä saarekkeeseen tarvittaessa ja tahdistua verkkoon takaisin

Jos verkot yhdistävä kytkin ei ole saarekekonvertterin vieressä, tarvitaan erillinen mittaus myös kytkimen saarekeverkon puolelle, kuten kuvan 3.10 tilanteessa, koska pitkä johdin saattaa vaikuttaa jännitteeseen. Kytkimen ollessa saarekekonvertterin välittömässä läheisyydessä voidaan käyttää suoraan saarekekonvertterilta saatavaa mittaus-tietoa.

Kolmivaiheisin verkon jännitteet on järkevää esittää avaruusvektorimuodossa, mikä helpottaa eri jännitteiden itseisarvojen ja vaiheiden vertailua. Tahdistusprosessin alussa verrataan jännitteitä eri puolella kytkintä, mikä voidaan toteuttaa laskemalla molemmista jännitteistä avaruusvektoriteorian mukaiset vektorit. Jännitteen avaruusvektori stationäärisessä koordinaatistossa voidaan laskea seuraavalla kaavalla (1) (Salo 2008).

$$\bar{u}^s = \frac{2}{3}(u_A(t) + \bar{a}u_B(t) + \bar{a}^2u_C(t)), \quad (1)$$

missä

$$\bar{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$

Kun molemmille jännitteille on laskettu avaruusvektorit, niiden itseisarvoja, jotka vastaavat jännitteiden huippuarvoja, voidaan verrata keskenään.

Jännitteiden itseisarvojen lisäksi myös niiden vaihekulmat pitää säätää samoiksi kytkimen molemmiin puolin. Jännitteiden avaruusvektoreiden välistä kulmaa voidaan

verrata laskemalla jännitevektoreiden ristitulo. Ristitulo määritellään seuraavasti (Mau-no 2004)

$$\|\bar{a} \times \bar{b}\| = \|\bar{a}\|\|\bar{b}\| \sin(\bar{a}, \bar{b}) \quad (3)$$

Vektorit \bar{a} ja \bar{b} korvataan kaavassa (3) stationääriseen koordinaatistoon muunnetuilla jännitteiden avaruusvektoreilla \bar{u}_s^s (saareke) ja \bar{u}_v^s (siirtoverkko) ja jännitteet skaalataan siirtoverkon jännitteen mukaan, jolloin \bar{u}_v^s saa arvon. Sijoittamalla nämä kaavaan (3) saadaan ristituloksi.

$$\|\bar{u}_s^s \times \bar{u}_v^s\| = \|\bar{u}_s^s\|\|\bar{u}_v^s\| \sin(\bar{u}_s^s, \bar{u}_v^s) \quad (4)$$

Termi $\sin(\bar{u}_s^s, \bar{u}_v^s)$ tarkoittaa jännitevektoreiden välisen kulman siniarvoa, joka saa arvon 0, jos vektorit ovat kohtisuorassa keskenään. Tästä voidaan päätellä, että myös ristitulo saa arvon 0, jos jännitteiden avaruusvektoreiden välinen kulma on 0 tai 180 astetta.

Saarekeverkkoa ei voida kytkeä siirtoverkkoon, jos avaruusvektoreiden välinen kulma on 180 astetta. Kulman todellinen asteluku saadaan selville, kun lasketaan myös jännitteiden avaruusvektoreiden pistetulo, joka määritellään seuraavasti. (Seppänen et al. 2001)

$$\bar{a} \cdot \bar{b} = \|\bar{a}\|\|\bar{b}\| \cos(\bar{a}, \bar{b}) \quad (5)$$

Kun \bar{a} ja \bar{b} vektorit korvataan kaavassa (5) avaruusvektoreilla \bar{u}_s^s ja \bar{u}_v^s saadaan pistetuloksi.

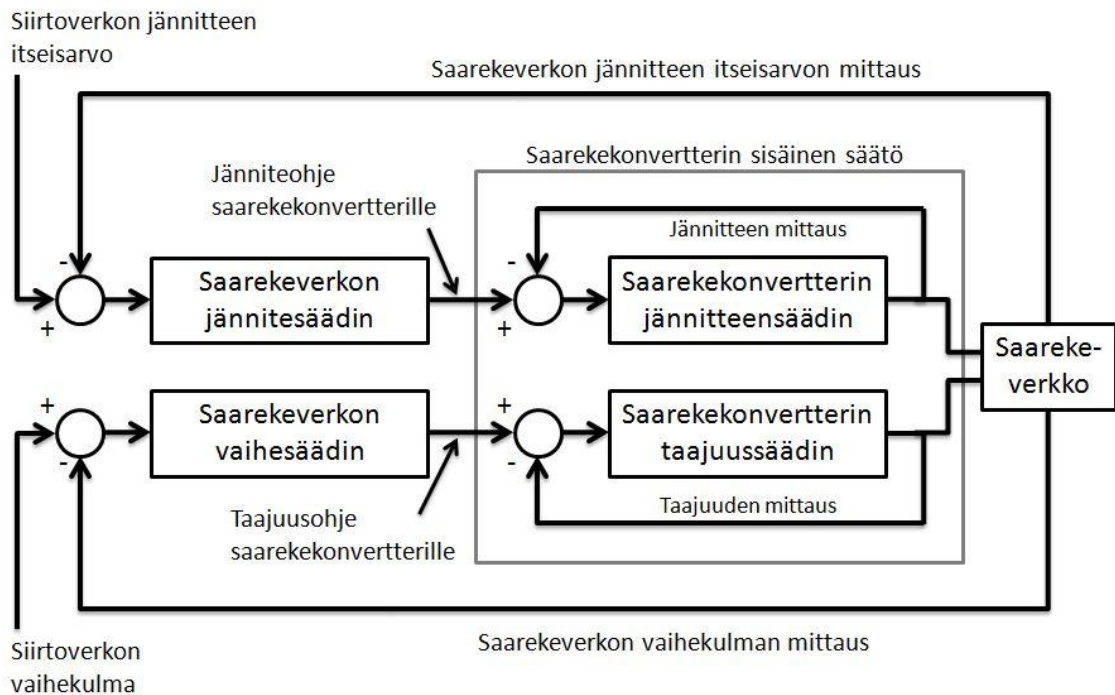
$$\bar{u}_s^s \cdot \bar{u}_v^s = \|\bar{u}_s^s\|\|\bar{u}_v^s\| \cos(\bar{u}_s^s, \bar{u}_v^s) \quad (6)$$

Termi $\cos(\bar{u}_s^s, \bar{u}_v^s)$ saa positiivisen arvon, jos avaruusvektoreiden välisen kulman itseisarvo on alle 90 astetta, ja jos taas kulman itseisarvo on yli 90 astetta, tuloksena tulee negatiivinen arvo.

Tahdistusprosessin aikana saarekekonvertterin jänniteohje saadaan saarekeverkon jännitesäätimeltä eli käytetään saarekekonvertterin jännitesäädintä kaskadisäätöpiirin aläsäätimenä (kuva 3.11). Tällä tavoin saarekeverkon jännitteen itseisarvo ($\|\bar{u}_s^s\|$) ohjataan samaan arvoon siirtoverkon jännitteen itseisarvon ($\|\bar{u}_v^s\|$) kanssa.

Samalla menetelmällä säädetään myös saarekeverkon jännitteen vaihekulmaa suhteessa siirtoverkon jännitteen vaihekulmaan, jolloin saarekeverkon vaihesäädin antaa taajuusohjeen saarekekonvertterin taajuussäätimelle ja näin saarekeverkon jännite ohjataan samaan vaihekulmaan siirtoverkon jännitteen kanssa. Kun siirtoverkon ja saarekeverkon jännitevektoreiden itseisarvot vastaavat toisiaan, vektoreiden ristitulo (4) on nol-

la ja niiden pistetulosta (6) tulee positiivinen arvo, on saarekeverkko tahdistettu siirtoverkon kanssa ja verkot erottava kytkin (kuva 3.10) voidaan sulkea.



Kuva 3.11. Tahdistuspiirin säätöperiaate

Kuten kaskadisäädössä yleensäkin, sisemmät säätöpiirit täytyy virittää ulompia nopeammiksi (Eriksson & Toivonen 2006). Lisäksi tässä tapauksessa on otettava myös huomioon, että vaihesäädön mittaukseen vaikuttaa myös jännitevektoreiden pituudet ristitulon kautta. Tästä syystä vaihesäätö täytyy virittää jänniteensäätöä hitaammaksi, jotta nopeat jännitevaihtelut eivät ehtisi merkittävästi vaikuttamaan vaihesäädön ohjaukseen. Tätä vieläkin parempi vaihtoehto on käyttää myötäkytkentää jännitteiden mittaustuksista, jolloin jännitevaihtelun vaikutukset vaihesäädössä saadaan kompensoitua (Jussila 2010).

3.4.2 Tahdistumisen asettamat vaatimukset kommunikoinnille

Jos aliverkon omaksi saarekkeekseen erottava kytkin on saarekekonvertterin välittömässä läheisyydessä, on mahdollista käyttää saarekekonvertterin mittaustietoa ja rakentaa saarekekonvertterin yhteyteen sähköverkot tahdistava sekä kytkintä ohjaava järjestelmä. Kytkimen ollessa kauempana täytyy luotettava mittaustieto tuoda kytkimen läheisyydestä, jolloin tahdistusta varten voi olla myös kokonaan oma ohjainlaite, joka ohjaa sekä kytkintä että saarekekonvertteria, kuten kuvan 3.10 tilanteessa on esitettyä.

Erillinen tahdistuksen ohjainlaite vaatii kaksisuuntaisen yhteyden kytkinlaitteeseen ja saarekekonvertteriin, jotta laitteet voivat kommunikoida keskenään. Tämä mahdollistaa myös sen, että tarvittaessa ohjainlaitetta voidaan käyttää hallitsemaan saareke-

verkon muitakin toimintoja keskitetysti, kuten esimerkiksi tuotannon tai energiavaraston tilan tarkkailemiseen.

Mikroverkkojen yleistyessä tahdistusta ohjaavien laitteiden täytyy kommunikoida sähköverkkoa operoivan keskuksen kanssa, koska ongelmia voi syntyä esimerkiksi tilanteessa, jossa suuren siirtolinjan päässä on useita pieniä mikroverkkoja. Tällöin siirtolinjan vikaantuessa nämä kaikki pienet mikroverkot siirtyvät toimimaan omina saarekkeinaan ja siirtoverkon jännitteiden palatessa palaavat jännitteet kaikille saarekeverkon erottaville kytkimille yhtä aikaa. Jos kaikkien näiden saarekeverkkojen tahdistumisesta vastaavat samanlaiset järjestelmät, saattaa aiheutua tilanne, jossa kaikki saarekeverkot tahdistuvat yhtä aikaa siirtoverkkoon, mikä pahimmillaan aiheuttaa suuren tuotanto- tai kulutuspiikin verkkoon. Tästä syystä on tärkeää, että tahdistusta ohjaavat laitteet kommunikoiivat verkko-operaattorin laitteiston kanssa, koska kommunikoinnin ansiosta mikroverkot voidaan irrottaa ja kytkeä siirtoverkkoon hallitusti. Lisäksi kommunikointi mahdollistaa mikroverkkojen tilan, tehon kulutuksen ja tuotannon tarkastelun keskitetysti. Kommunikointia voidaan myös hyödyntää, kun kehitetään saarekeverkkojen suojauksia.

4. TEHOTASAPAINO HAJAUTETUN TUOTANNON JA SAAREKEVERKON VÄLILLÄ

Tehotasapainon ylläpito on tärkeää kaikissa sähköverkoissa, mutta erityisesti pienissä saarekeverkoissa, joissa yksittäisten sähkölaitteiden kytkeminen aiheuttaa suhteessa enemmän häiriöitä saarekeverkon tehotasapainoon, täytyy tehotasapainon säätöjärjestelmä olla riittävän nopea.

Kulutuspiikit tai tuotannon nopeat vaihtelut aiheuttavat sähkön laadun heikkenemistä tai sähkökatkoja, mutta vielä pahempi tilanne on, jos suuri kulutuskohde irtikytkentään tai energian tuotantoteho kasvaa äkillisesti. Tällöin jännitteen tehollisarvo voi kasvaa nopeasti, mikä saattaa vaurioittaa sähköverkkoa tai siihen kytkettyjä laitteita.

4.1 Tuotannon ja kulutuksen balansointi

Nykyisin sähköverkon tehotasapainon ylläpitäminen toteutetaan pääasiassa taajuutta tarkkailemalla ja säätämällä tuotantoa sen mukaan, kuten luvussa 2.2 todettiin. Saarekeverkossa sitä ohjaava saarekekonvertteri ylläpitää taajuutta ja jännitettä, mutta saarekeverkon pysyminen stabiilina vaatii, että saarekekonvertterin tasajännitepuolella on käytävissä koko ajan riittävästi energiaa, jota saarekekonvertteri syöttää saarekeverkkoon tarpeen mukaan. Toisin sanoen saarekeverkko pysyy stabiilina, kunhan tehotasapaino säilyy saarekekonvertterin välipiirissä, mihin tässäkin työssä pääsääntöisesti keskitytään.

Hajautettua tuotantoa löytyy yleensä eri puolilta sähköverkkoa, mutta saarekekonvertterin kannalta on paras tilanne, kun kaikki tuotanto sekä energiavarasto kytketään tasajännitepuolelle ennen saarekekonvertteria, jolloin saarekeverkon puolella on pelkästään kulutusta (Bauer et al. 2011). Tällainen kytkentä edellyttää, että saarekekonvertterin teho vastaa koko saarekeverkon tehoa. Todellisuudessa saarekekonvertterin tehon täytyy olla saarekeverkon nimellistä tehoa huomattavasti suurempi, koska mahdollisessa oikosulkutilanteessa saarekekonvertterin täytyy kyetä syöttämään verkon suojausien vaatima oikosulkuvirta.

Tehotasapainon ylläpitäminen onnistuu säätämällä tuotettavaa tehoa, jos käytetään energialähteitä, joista saatava teho on riittävän suuri joka tilanteessa. Uusiutuvat energialähteet aiheuttavat haasteita saarekeverkon tehotasapainon säilymiselle, koska niistä saatava tuotantoteho vaihtelee sääolosuhteiden mukaan. Lisäämällä energiavarasto saarekeverkkoon voidaan sillä kompensoida tuotannon ja kulutuksen tehoerot.

Energiavaraston kapasiteetti määrittelee sen, kuinka pitkään saarekeverkko voi toimia ilman tuotantoa. Jos energiansaanti saarekeverkossa pitää turvata, uusiutuviin

energiälähteisiin perustuvan tuotannon ja energiavaraston lisäksi saarekeverkkojärjestelmässä täytyy olla luotettava varavoimayksikkö. Varavoimayksikön tuotantotehon täytyy vastata koko saarekeverkon kulutusta ja energiavarasto täytyy siinä tapauksessa mitoittaa siten, että sen kapasiteetti riittää varavoimayksikön käynnistyksen ajaksi.

4.2 Toiminta ilman kommunikointia

Saarekekonvertterin, hajautetun tuotannon ja energiavaraston toiminta järkevästi ilman niiden välistä kommunikointia asettaa tiettyjä haasteita laitteiden ohjauksille. Järjestelmän toimiessa ilman keskinäistä kommunikaatiota sen rakentaminen erityyppisistä laitteista helpottuu sekä uusien laitteiden lisääminen tai vaihtaminen myöhemmin on yksinkertaisempaa. Toiminta ilman laitteiden välistä kommunikointia mahdollistaa myös eri valmistajien laitteiden liittämisen samaan järjestelmään ilman, että laitteiden välillä tarvitaan rajapintaa.

Tässä työssä simuloidaan ja testataan laitteiston toimintaa tilanteessa, jossa laitteet eivät kommunikoi keskenään ja jossa osa laitteista myös tulee eri valmistajilta. Tuuliturbiinin suuntaaja sekä saarekekonvertteri tulevat ABB:ltä ja akustoa ohjaavan DC/DC-hakkurin valmistaja on MSc Electronics.

Ilman laitteiden välistä kommunikointia välipiiriin sijoitetut laitteet voivat päätellä järjestelmän tilan pelkästään mittaamalla välipiirin tasajännitettä. Tällöin hakkuri ylläpitää tehotasapainoa pitämällä välipiirin jännitteen asetusarvossaan lataamalla ja purkamalla akustoa. Hakkurin täytyy myös valvoa akuston tilaa mittaamalla sen jännitettä sekä noudattaa akustolle ja hakkurille itselleen määritettyjä virtarajoja.

Energiavarasto ja hakkuri eivät aina välttämättä kykene pitämään saarekekonvertterin välipiirin jännitettä sallituissa rajoissa akuston kapasiteetin tai virtarajojen takia. Tällöin esimerkiksi välipiirin jännite nousee, jos tuotanto on liian suuri verrattuna kulutukseen ja energiavaraston kykyyn ottaa tehoa vastaan. Kun välipiirin jännite nousee asetetun rajan yli, alkaa tuuliturbiinin suuntaaja rajoittaa tuotettua tehoa, mikä estää jännitteen nousun hallitsemattoman korkealle. Tilanteen ollessa päinvastainen, jolloin välipiirin jännite laskee, koska tuotanto ei riitä korvaamaan kulutusta ja energiavaraston kapasiteetti loppuu, saarekekonvertteri ohjaa saarekeverkon jännitteen hallitusti alas.

4.3 Kommunikoinnin tuomat edut

Laitteiden määrän lisääntyessä niiden välinen kommunikointi sekä keskitetty valvonta tuovat järjestelmälle merkittäviä etuja. Esimerkiksi useamman energiavaraston hallinta keskitetysti lisää niiden elinikää, koska yksittäisille akustoille on mahdollista suorittaa tasauslataus muun järjestelmän toimiessa normaalisti. Jopa pelkästään kahden akuston järjestelmässä akustojen tasauslataaminen on mahdollista muun järjestelmän toimiessa normaalisti (Paap et al. 2005).

Keskitetyn hallinnan avulla myös tuotannon säätämistä voidaan ennakoida, kun tiedetään kulutuksen teho sekä energiavarastojen tilat. Tällöin järjestelmää ohjaavan

laitteiston yhteyteen on mahdollista luoda toiminto, joka ennustaa energian kulutuksen ja tuotannon muutoksia. Lisäksi voidaan ennakoida myös mahdollisen varavoimalaitoksen käyttöönoton tarvetta, jolloin sitä voidaan käyttää joustavammin.

Järjestelmän yksittäisen laitteen vikatilanteesta on mahdollista saada tieto nopeasti tai jopa ennen kuin varsinainen vika aiheuttaa merkittäviä häiriöitä järjestelmälle. Tieto viasta antaa aikaa reagoida siihen sekä ajaa vikaantunut laite hallitusti alas muun järjestelmän toimiessa normaalisti. Mahdollisessa siirtoverkon viassa ja sen korjauksen jälkeen tapahtuvassa tahdistusprosessissa laitteiden kommunikointi on välttämätöntä, ja kun kaikki laitteet kommunikoivat keskenään, voidaan mikroverkon siirtoverkosta ottaa tai sinne tuottamaa tehoa ohjata hallitusti.

Monen laitteen järjestelmässä on järkevää hoitaa laitteiden ohjaus erillisellä ohjauslaitteella, jolloin yksi laite antaa pelkästään ohjauskäskyjä ja valvoo kaikkia laitteita. Tällöin laitteet eivät kommunikoi keskenään, vaan ne kaikki noudattavat ohjausjärjestelmästä tulevia komentoja. Lisäämällä etähallinnan ja valvonnan mahdollistava komponentti ohjauslaitteeseen pystytään koko järjestelmää hallitsemaan muualta, jolloin useampia pieniä saarekeverkkoja voidaan valvoa keskitetysti samasta pisteestä. Toisaalta mahdollisessa vikatilanteessa tieto ongelmasta ja viankuvaus tulee myös välittömästi valvojan tietoon.

Keskitettyä kommunikointia voi hyödyntää myös datan keräämiseen, jolloin sähköverkosta pystytään keräämään tuotanto- ja kulutustietoja, joiden avulla voidaan esimerkiksi ennustaa kausiluontoista kulutuksen vaihteluita, tuotantotehoa sekä laitteiston kapasiteettia suhteessa kulutukseen. Mahdollisista vikatilanteista voidaan myös kerätä dataa sekä tarkkailla energiavaraston kuntoa, jolloin voidaan ennakoida huolto- ja korjaustarvetta. Lisäksi tuotanto- ja kulutustietoja keräämällä voidaan myös arvioida koko järjestelmän hyötysuhteita eri tilanteissa.

4.4 Eri tuotantomuotojen hallinta

Aurinkopaneeli on säädettävänä prosessina suhteellisen helppo hallita, koska sen käyttäytyminen on selkeää. Sopivalla jännitealueella toimiva aurinkokennosto voidaan helpoimmillaan kytkeä suoraan välipiirin tasajännitteeseen ilman minkäänlaista ohjauslaitetta. Tämä on mahdollista, koska aurinkopaneelin jännitteen noustessa virran arvo laskee (kuva 2.5) sekä teho putoaa nopeasti tultaessa lähelle kennoston avoimen piirin jännitettä (V_{OC}) (kuva 2.6). Tällöin kulutuksen loppuessa aurinkokennon ja sen mukana välipiirin jännite tai virta ei nouse hallitsemattomasti ja teho rajoittuu automaattisesti.

Tavoiteltaessa aurinkokennoston maksimitehoa eri sääolosuhteissa tarvitaan kennoston jännitettä ohjaamaan laite, joka voi olla esimerkiksi DC/DC-hakkuri. Optimaalinen aurinkokennoston jänniteohje saadaan MPPT-algoritmilla, joka etsii kaikissa tilanteissa maksimitehopisteen, jonka paikka muuttuu käytön aikana, koska auringon intensiteetti ja kennoston lämpötila vaikuttavat kennojen tuottamaan tehoon ja maksimitehopisteen sijaintiin.

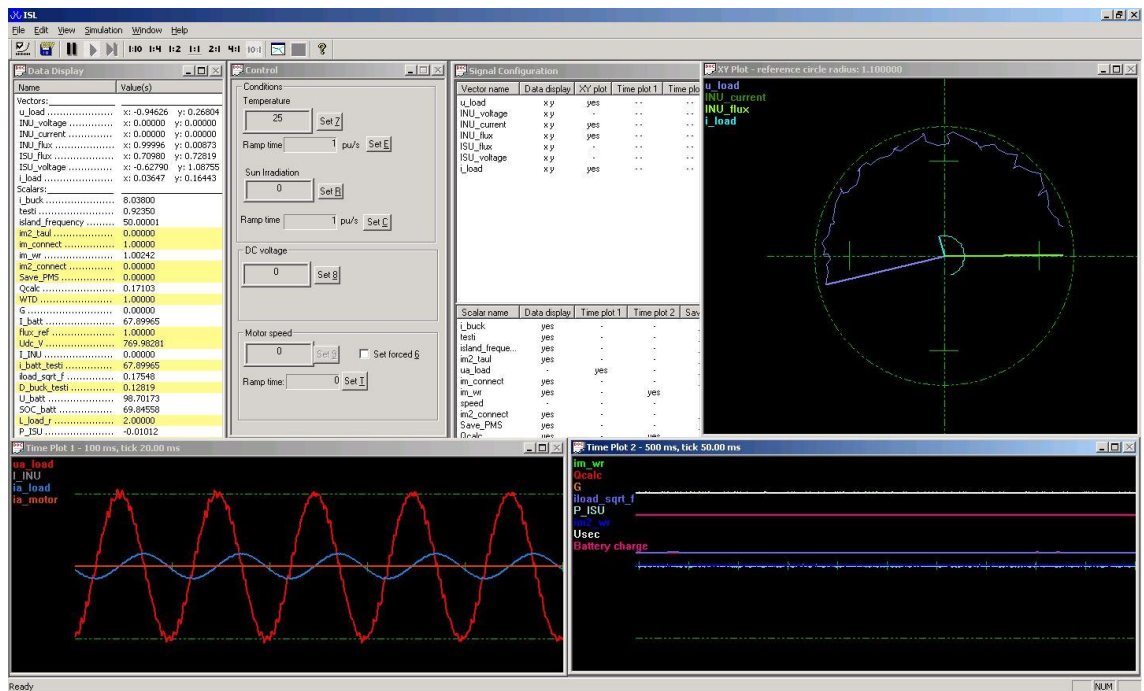
Tuuliturbiini voidaan kytkeä sähköverkkoon monella eri tapaa, kuten luvussa 2.1.1 on kerrottu. Tämän työn yhteydessä käytetään vaihtoehtoa, missä kestopagneetti-generaattoria kytketään suuntaajan avulla suoraan saarekekonverterin välipiiriin. Tällöin tuuliturbiinin tuottamaa tehoa voidaan säätää suoraan muuttamalla generaattorin momenttiohjetta. Tuuliturbiinin on tuotettava momenttiohjetta vastaavan momentti generaattorin akselille, jotta generaattorin pyörimisnopeus pysyy vakiona. Hetkellisesti tuuliturbiinilla voidaan tuottaa kuitenkin enemmän tehoa kuin tuulesta on sillä hetkellä saatavilla, käyttämällä tuuliturbiinin lapojen ja muiden mukana pyörivien komponenttien hitausmassojen energioita.

Tuuliturbiinin generaattorista voidaan ottaa myös pienempi teho kuin tuulesta on sillä hetkellä saatavissa, mutta tällöin generaattorin pyörimisnopeus lähtee kasvamaan, mikä voi aiheuttaa ongelmatilanteita tuuliturbiinin mekaniikalle. Pyörimisnopeuden rajoittaminen jarrun avulla ei ole järkevää jatkuvassa käytössä, mutta sitä vastoin tuuliturbiinin roottorin hyötysuhdetta ja pyörimisnopeutta voidaan muuttaa lapakulmaa säätämällä. Tällöin tuotetun tehon rajoittaminen jatkuvassa käytössä edellyttää, että tuuliturbiinin yhteydessä on luotettava lapakulmasäätöjärjestelmä, joka tarkkailee generaattorin pyörimisnopeutta. Lisäksi lapakulmasäädöllä saadaan parannettua tuuliturbiinin hyötysuhdetta vaihtelevilla tuulennopeuksilla. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009)

5. SIMULAATTORI

Työn yhtenä tavoitteena oli tehdä simulaattori ja suorittaa sillä simulointeja erityyppisissä tilanteissa, joissa tuotanto ja kulutus eivät vastaa toisiaan. Lisäksi haluttiin simulaattorin toiminta verifioida laboratorioon rakennettavalla testilaitteistolla. Simulaattorin pohjana toimii ABB:n itse kehittämä simulointityökalu, joka koostuu C++-ohjelmointikielellä tehdystä käyttöliittymästä (kuva 5.1) sekä itse mallista, joka on toteutettu C-ohjelmointikielellä.

Oman simulointityökalun etuna on sen hinta sekä muokattavuus, koska kaikki muutokset tehdään suoraan koodiin, mikä tosin vaatii simulaattorin kehittäjältä ymmärrystä fyysikaalisten ilmiöiden matemaattisesta mallintamisesta. Lisäksi uutta funktiota tai koodia kirjoittaessa täytyy tuntea koko simulaattori, jotta ei esimerkiksi tule käyttäneeksi samoja muuttujia kuin joku toinen aikaisemmin tehty funktio, koska eri funktiot kommunikoivat globaalien muuttujien avulla.



Kuva 5.1. Simulaattorin käyttöliittymä

Erillisen simulaattorin, jossa simulointimallin yhtälöt ovat sijoitettu suoraan lähdekoodiin, yksi suurimmista eduista on mallin laskennan nopeus verrattuna sellaiseen malliin, jota simuloidaan jonkin kolmannen osapuolen mallinnusohjelman avulla. Nopeudesta johtuen mallin laskenta voidaan tällöin suorittaa huomattavasti lyhyemmällä

aikaväleillä. Käytetty simulaattori käy läpi kaikki mallin sähköisiin ilmiöihin liittyvät yhtälöt puolen mikrosekunnin välein eli 2 miljoonaa kertaa yhden sekunnin mittaisen simuloinnin aikana, jolloin sähköpiireissä tapahtuvia muutoksia pystytään mallintamaan erittäin tarkasti. Kaikkia ohjelman funktioita ei suoriteta joka laskentakerralla, vaan esimerkiksi saarekekonvertterin säätö suoritetaan vastaavilla aikatasoilla kuin oikeassakin laitteessa ja simulaattorin käyttöliittymän päivitysväli on 1 ms.

5.1 Simulaattoriohjelma

Simulaattorin käyttöliittymä on valmis paketti, johon ei pystytä tekemään suuria muutoksia. Käyttöliittymästä löytyy kuitenkin mahdollisuus muokata ulkoasua valitsemalla kuvaajille eri aikavälejä ja akseleita sekä muuttamalla signaalien värejä. Suurimman osan käyttöliittymän ulkoasun asetuksista pystyy myös määrittämään suoraan pääohjelman koodiin.

Käytön aikana simuloinnin nopeutta voidaan muutella käyttöliittymän yläpalkista, mutta simulointi on sen verran raskas, että nopeutta pidetään pääasiassa maksimissa. Simulointihetkestä riippuen simulaattori käyttää minimissään noin 6 - 7 sekuntia prosessin yhden sekunnin mittaisen ajanjakson simulointiin, kun käytössä on Intelin tuplaydinpohjainen kannettava tietokone. Laskentaa voidaan kuitenkin pitää nopeana, kun otetaan huomioon, että simulointimallin kaikkien komponenttien jännitteiden ja virtojen arvot lasketaan kaksi miljoonaa kertaa sekunnissa.

5.1.1 Mallien parametrusointi ja simulaattorin alustus

Simulaattorissa käytetään parametrien syöttämiseen tekstitiedostoa, joka luetaan alustusten yhteydessä simulaattorin käynnistysvaiheessa. Ulkoisen parametritiedoston ansiosta simulaattoria voi käyttää ja parametrusoida myös henkilö, jolla ei ole kokemusta ohjelmoinnista.

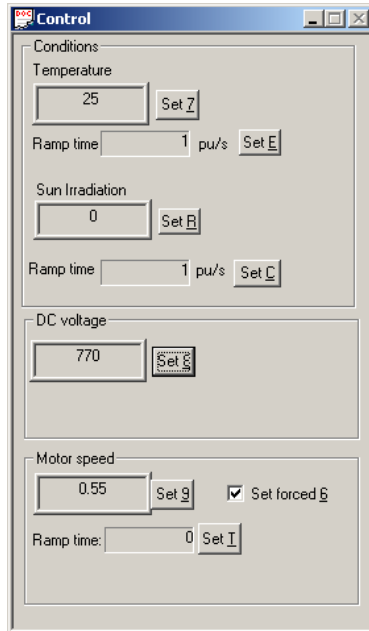
Simulaattorin alustusvaiheessa ohjelma lukee parametritiedoston, minkä jälkeen tarvittaville muuttujille alustetaan joko ennalta määritetty tai parametreihin perustuva alkuarvo sekä lasketaan pu-arvojen skaalauskerroimet, jotka määritetään siten, että arvo yksi vastaa normaalia nimellistä arvoa tai maksimiarvoa parametrusta riippuen.

Koska ohjelma lukee parametritiedoston ja alustaa suuren osan muuttujista vain käynnistysvaiheessa, muutosten tekeminen tiedoston parametreihin vaatii simulaattorin uudelleenkäynnistämisen. Kuitenkin jos simulointi vaatii tiettyjen parametrien muuttamisen ajon aikana, ne täytyy lisätä suoraan käyttöliittymään.

5.1.2 Sisään menevät ja ulos tulevat arvot

Simulointia voi ajon aikana ohjata käyttämällä ohjauspaneelia (kuva 5.2), johon on koottu keskitetysti tärkeimpiä ohjausparametreja, joita ei pystytä vaihtamaan helposti jälkikäteen, koska itse käyttöliittymä on ohjelmoitu ja käännetty valmiiksi. Simulaatto-

rissa on mukana myös aurinkokennoston malli ja ohjauspaneelista löytyy sille ohjausparametreja, minkä lisäksi paneelista löytyy saarekekonvertterin välipiirin DC-jännitteen asetusarvo ja tuuliturbiinikäytössä olevan generaattorin nopeusreferenssi. Ohjausparametreille löytyy DC-jännitteen asetusarvoa lukuun ottamatta arvot, joilla voidaan vaikuttaa parametrien muutosnopeuteen.



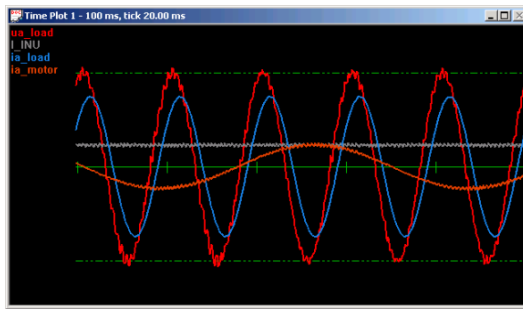
Kuva 5.2. Simulaattorin ohjauspaneeli

Käyttöliittymässä (kuva 5.1) vasemmalla reunalla näkyvä datanäyttö koostuu vektori- ja skalaarimuotoisista muuttujista, jotka voidaan valita muokkaamalla pääohjelman lähdekoodia. Muuttuja voivat olla joko valkoisella pohjalla olevia tarkasteltavia muuttujia tai keltaisella taustalla näkyviä muuttujia, joiden arvoja käyttäjä voi muokata vapaasti simuloinnin aikana.

Käyttöliittymässä on myös mahdollisuus tallentaa csv-tiedostoon rajattu simulointijakso, jolle käyttäjä voi määrittää tallennettavat signaalit, näytteenottitiheyden ja näytteenottoajan pituuden, minkä jälkeen tallennus voidaan aloittaa halutulla ajanhetkellä.

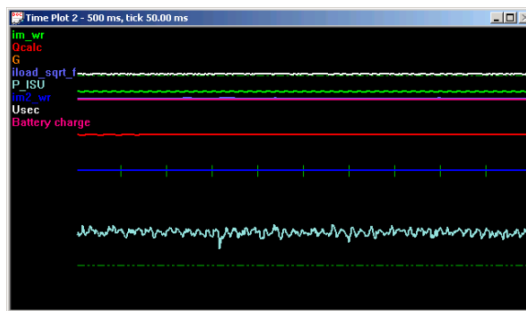
5.1.3 Kuvaajat

Simulaattorin käyttöliittymästä löytyy kolme kuvaajaikkunaa, joista kaksi on varattu skalaarisuureille sekä yksi vektorisuureille. Lyhyempi skalaarisuureille tarkoitettu kuvaaja (kuva 5.3) on suunniteltu jännite- ja virta-aaltojen tarkasteluun ja sen pituus näytöllä on 100 ms, joten 50 Hz taajuudella kuvaajaan sopii näkymään 5 verkkojaksoa. Tästä kuvaajasta näkee esimerkiksi hyvin, onko virta sinimuotoista tai jännite särötynttä sekä myös saarekeverkon kuormituksen tyypin virran ja jännitteen vaihe-eron avulla.



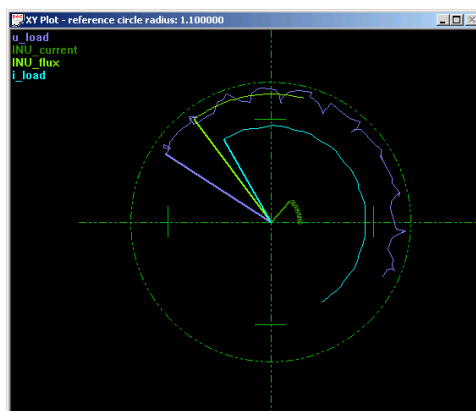
Kuva 5.3. Simulaattorin kuvaajaikkuna käyrämuotoisille skalaarisuureille

Toisessa skalaarisuureille tarkoitetussa kuvaajaikkunassa (kuva 5.4) ajanjakso pituus on puoli sekuntia, koska kuvaajaikkuna on tarkoitettu suureille, jotka eivät muutu prosessin jatkuvuustilassa. Tällaisia suureita ovat esimerkiksi generaattorin pyörimisnopeus sekä jännitteiden tai virtojen tehollisarvot.



Kuva 5.4. Simulaattorin kuvaajaikkuna jatkuvan tilan skalaarisuureille

Kolmannessa kuvaajaikkunassa (kuva 5.5) on esillä tuuliturbiinin suuntaajan sekä saarekekonverterin virtojen ja jännitteiden avaruusvektorit sekä vektoreiden kärkien piirtourat. Kun simulointi etenee yhden verkkojakson, pyörähtää avaruusvektori yhden kierroksen ja sen kärki piirtää näkyviin kulkemansa uran. Esimerkiksi kuormavirran vektorisuureesta näkyy hyvin kuorman epäsymmetrisyys, jolloin kuormavirtavektorin kärki piirtää soikion muotoisen uran.

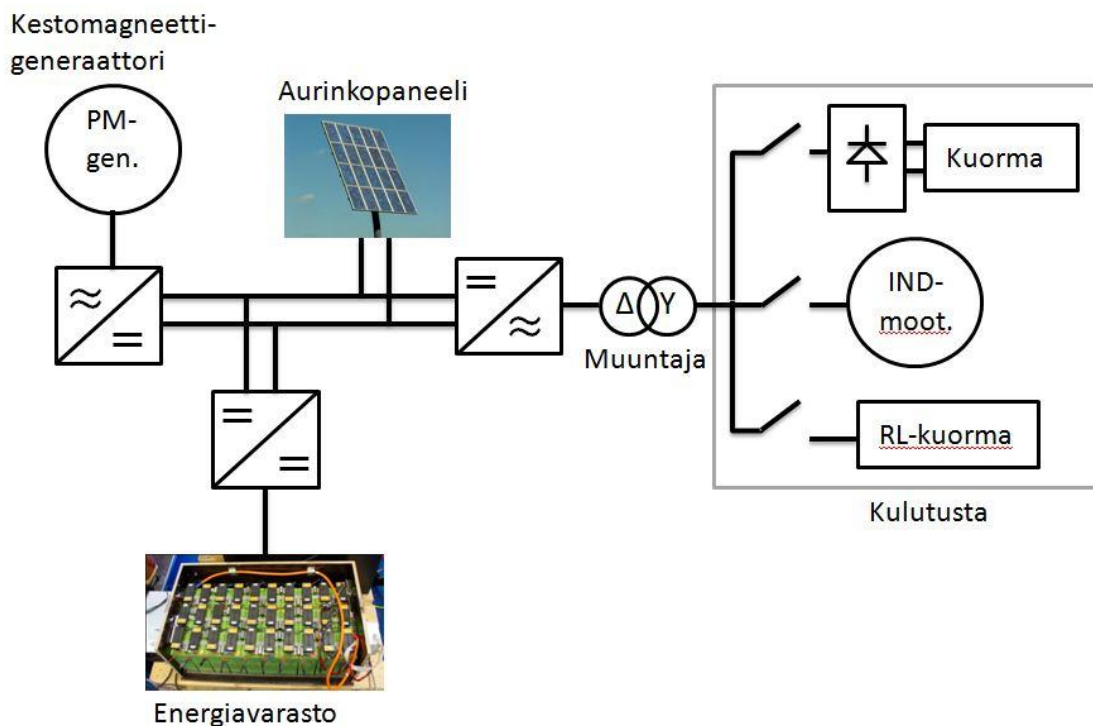


Kuva 5.5. Simulaattorin kuvaajaikkuna vektorisuureille

5.2 Simulointimalli

Tuuliturbiinin ja saarekekonvertterin sekä niihin liittyvien koneiden simulaattorimallit on koottu ABB:n olemassa olevista malleista ja ne on yhdistetty yhdeksi malliksi, johon on lisätty akusto, DC/DC-hakkuri sekä aurinkopaneeli. ABB:n konverttereiden osalta käytetään fysikaalista mallinnusta, jossa kaikki sähköiset ilmiöt lasketaan jokaisen komponentin kohdalla erikseen.

Kuvassa 5.6 on esitettyä simulointimallissa mukana olevat laitteet, joista tuotannon puolella on suuntaaja ja siihen kytketty kestopagneettigeneraattori, jolle voidaan antaa haluttu pyörimisnopeus, jolloin generaattorilla voidaan mallintaa tuuliturbiinia tai dieselgeneraattoria tarpeen mukaan. Tuuliturbiinin lisäksi tuotantopuolella on aurinkopaneeli, joka on kytketty suoraan välipiiriin ja myös sen parametrit sekä siihen vaikuttavat sääolosuhteet voidaan määrittellä halutunlaiseksi. Energiavarastona käytetään akustoa, joka on sitä ohjaavan DC/DC-hakkurin kautta kytketty järjestelmän välipiiriin. Kulutuksen puolella on saarekeverkko, joka sisältää saarekekonvertterin, kolmio/tähti-muuntajan sekä erityyppisiä kytkettäviä kuormia. Ne simulointimallin komponentit, joita käytettiin verifioitaessa simulaattoria, on parametrisoitu vastaamaan laboratorio-laitteistossa käytettyjä vastaavia komponentteja.

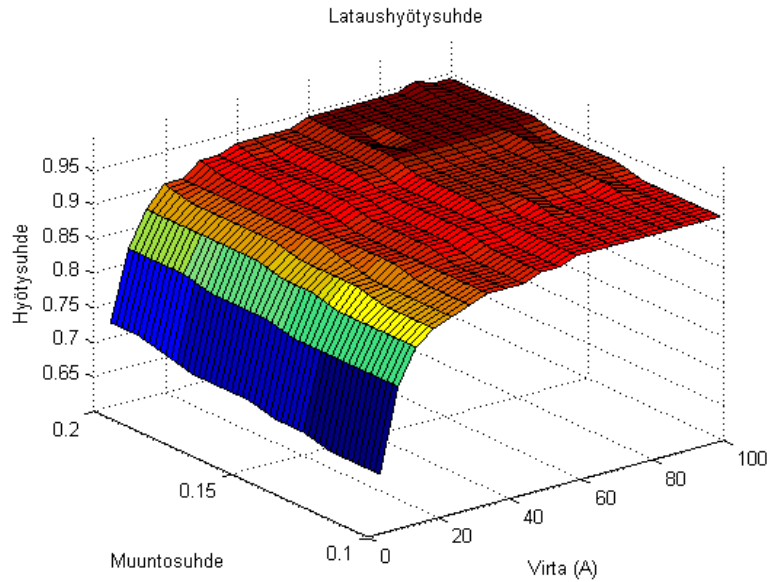


Kuva 5.6. Simulaattoriin mallinnetun laitteiston periaatteellinen kytkentä

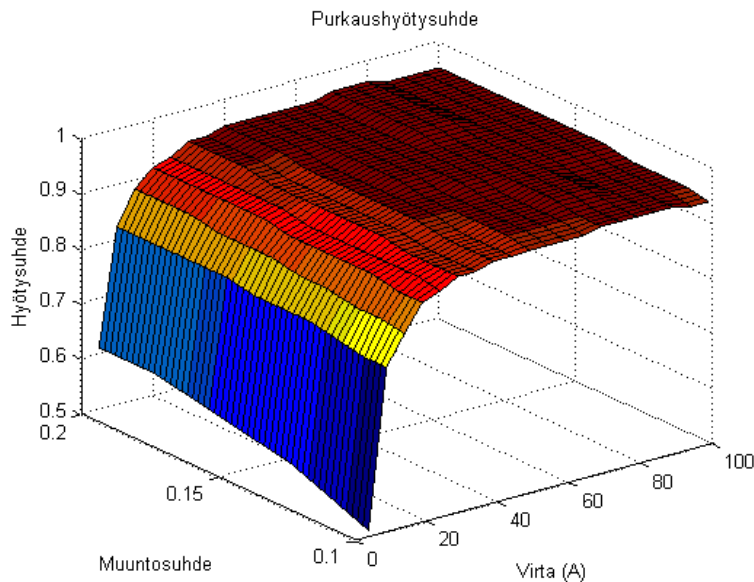
5.2.1 DC/DC-hakkuri

DC/DC-hakkurin malli on huomattavasti yksinkertaisempi kuin muiden konverttereiden, koska sitä ei ole mallinnettu fysikaalisesti, vaan laitteen läpi kulkevan tehon hyö-

tysuhde lasketaan käyttäen hyötysuhdekäyrästä, jotka on määritetty erikseen akun lataus- (kuva 5.7) ja purkaussuuntaan (kuva 5.8) (Muhonen 2009). Hakkurin hyötysuhde on riippuvainen jännitteen muuntosuhteesta sekä hakkurin läpi akustolle menevän virran arvosta.



Kuva 5.7. Hakkurin hyötysuhdekäyrästä akun lataussuuntaan



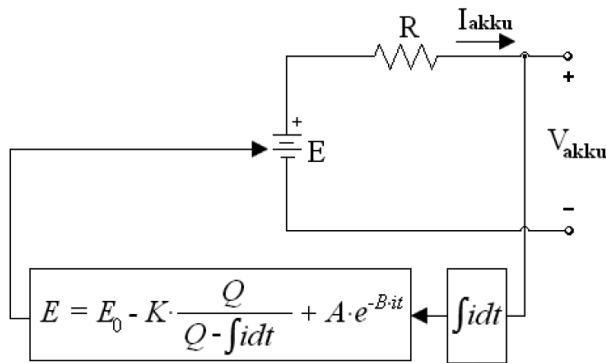
Kuva 5.8. Hakkurin hyötysuhdekäyrästä akun purkaussuuntaan

Hakkurille on käytetty jo aiemmin mitattuja hyötysuhdekäyriä (Muhonen 2009), jotka oli tallennettu Matlabin funktioon. Jotta hyötysuhdekäyriä pystyttiin käyttämään C-kielellä ohjelmoidussa simulaattorissa, ne täytyi muokata toiseen formaattiin. Käy-

tännössä tämä onnistui siten, että Matlabissa käytetyllä funktiolla laskettiin suuri määrä hyötysuhdearvoja käyttäen eri jännitemuuntosuhde- ja virta-arvojen yhdistelmiä. Saaduista tuloksista luotiin kattava taulukko, jonka simulaattori lukee tekstitiedostosta käynnistysvaiheessa. Simulaattorissa oleva funktio tutkii virran kulkusuunnan sekä laskee jännitteen muuntosuhteen ja akuston virran, minkä jälkeen näiden tietojen ja hyötysuhdekäyrien perusteella simulaattori laskee iteroimalla oikean hyötysuhteen. Funktiosta saadun hyötysuhteen perusteella hakkurin kautta menevästä tehosta vähennetään häviötehon osuus.

5.2.2 Akusto

Akuston mallinnuksessa on käytetty epälineaarista akkumallia, jossa lasketaan jatkuvasti integraalia akuston virrasta, minkä perusteella saadaan määritettyä akuston varaustila ja sen perusteella edelleen lähdejännite (E). Periaatekuva akkumallista on esitetty kuvassa 5.9. (Dekkiche et al. 2007; Hännikäinen 2010).



Kuva 5.9. Epälineaarinen akkumalli (Hännikäinen 2010).

Akun lähdejännite (E) saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (7).

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - \int i dt} + A \cdot e^{-B \cdot i t} \quad (7)$$

missä:

E = ohjattu jännitelähde (V)

E_0 = akun vakiojännite (V)

K = polarisaatiojännite (V)

Q = akun kapasiteetti (Ah)

$\int i dt$ = akun todellinen varaustila (Ah)

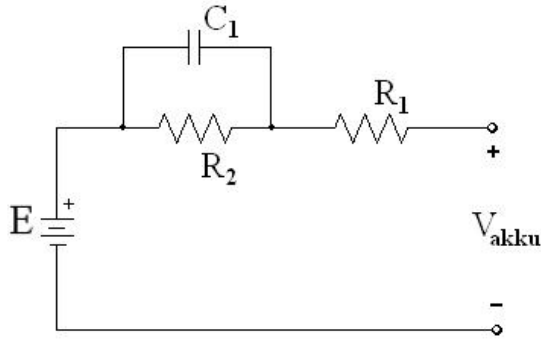
A = eksponentiaalisen alueen amplitudi (V)

B = eksponentiaalisen alueen aikavakion inverssi ((Ah)⁻¹)

i = akun virta (A)

V_{akku} = akun napajännite (V)

Lopullisessa akuston mallissa on käytetty yllä esitettyä epälineaarista akkumallia ja Thevenin sijaiskytkentää (kuva 5.10), jossa akuston sisäisen resistanssin (R_1) lisäksi toinen on resistanssi (R_2), joka kuvaa elektrolyytin ja elektrodien välistä epälineaarista resistanssia. Resistanssien lisäksi sijaiskytkennässä on kondensaattori (C_1), joka mallintaa elektrodien välistä kapasitanssia. (Hännikäinen 2010)



Kuva 5.10. Akkumalli Thevenin perinteisellä Thevenin sijaiskytkennällä (Hännikäinen 2010).

Jotta lähdejännitteen kaavaa (7) ja Thevenin sijaiskytkentää voidaan käyttää, täytyy akustosta tietää vaaditut parametrit. Laboratoriossa sijaitsevan litium-ioniakuston mallintamiseen tarvittavat parametrit (taulukko 5.1) on koottu Hännikäisen diplomityöstä sekä kennojen valmistajan datalehdestä.

Taulukko 5.1. Laboratorion litium-ioniakuston parametrit (Hännikäinen 2010; K2 Energy Solutions, Inc)

Akuston mallin parametrit	
A (V)	10,2
B (Ah ⁻¹)	2
K (V)	1,49
E ₀ (V)	102,15
C ₁ (F)	230
R ₁ (mΩ)	33
R ₂ (mΩ)	17
Q (Ah)	90

Testit olivat kestoltaan melko lyhyitä ja niiden aikana akun varaus muuttui korkeintaan muutaman prosentin, jolloin akuston napajännitteen muutokset olivat niin pieniä, että DC/DC-hakkurin säätö kompensoi ne helposti, eikä napajännitteen muutoksilla ollut merkittäviä vaikutuksia simulointituloksiin. Tästä syystä akuston mallin olisi voinut korvata simulointien osalta esimerkiksi vakiojännitelähteellä ja vastuksella.

5.3 Simulaattorin verifiointi

Simulaattorilla suoritettiin kaksi ajoa, joista ensimmäisessä muutettiin kulutustehoa ja toisessa tuotantotehoa. Vastaavat testit ajettiin myös testilaitteistolla, jotta voitiin tarkastella, vastaavatko simulaattorilla saadut tulokset todellisuutta. Tässä luvussa on esiteltyinä ne testilaitteiston mittaukset, joita verrataan simulaattorin antamiin tuloksiin. Loput testilaitteistosta mitatuista tuloksista sekä testilaitteisto itsessään on esitettyinä luvussa 6.

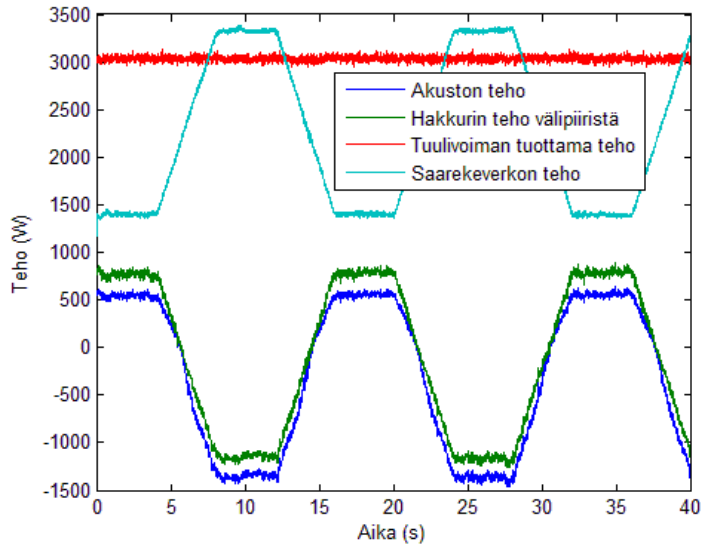
Simulaattoriajoissa ja testeissä esitettyjen kuvaajien tehojen positiivinen arvo tarkoittaa, että teho virtaa tuuliturbiinilta saarekeverkon kulukseen päin ja energiavaraston tehojen sekä virtojen positiivinen suunta on kohti energiavarastoa eli positiivinen teho lataa akustoa.

5.3.1 Ramppimuotoinen kuormitusyksi

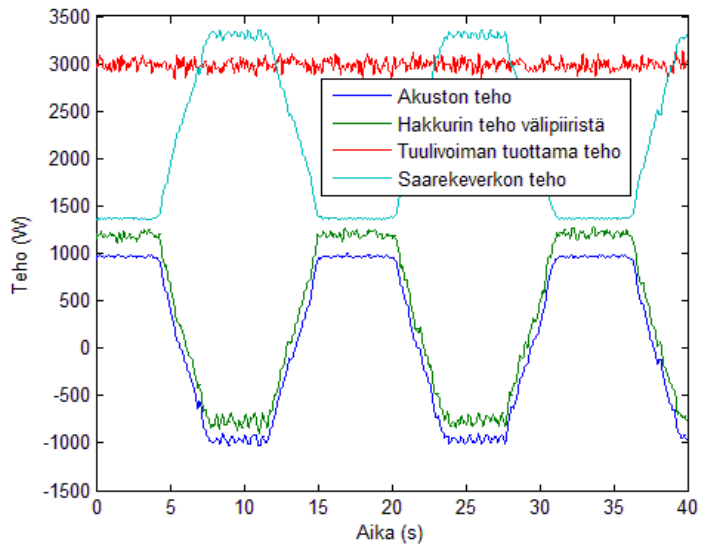
Ensimmäisessä testissä mallinnetaan saarekeverkon normaalia toimintatilaa, jossa tuotantopuolta ajetaan vakioteholla ja samalla saarekeverkon kulutusta muutetaan ramppimaisesti. Syklin alussa kulutusteho on vakio 4 sekuntia, jonka jälkeen seuraa 4 sekunnin mittainen ramppi, jossa tehoa kasvatetaan lineaarisesti. Tämän jälkeen tehoa pidetään jälleen 4 sekuntia vakiona, jonka jälkeen seuraa tehon lasku takaisin syklin alkua vastaavaan arvoon 4 sekunnin mittaisella rampilla. Testiä jatketaan toistamalla samaa sykliä 40 sekunnin mittainen ajanjakso.

Simuloidut tehojen kuvaajat on esitettyinä kuvassa 5.11, josta on nähtävissä tuotannon ja kulutuksen tehot sekä energiavarastolle menevä teho ennen ja jälkeen DC/DC-hakkuria. Testilaitteistolla ajettiin simulaattoriajoa vastaava kuormitusyksi, joka on esitettyinä kuvassa 5.12. Kuvaajista voidaan havaita, että tuotantoa on keskimäärin enemmän kuin kulutusta, mutta kulutus käy hetkellisesti tuotantoa suurempana, jolloin energiavarastoa tarvitaan pitämään tehotasapainoa yllä. Kuvaajista nähdään myös laitteiston häviöteho, koska tuotannon, kulutuksen ja energiavaraston tehojen yhteenlaskettu summa ei ole nolla vaan noin 800 W.

Vertaamalla simulaattorin tuloksia (kuva 5.11) testilaitteistosta mitattuihin arvoihin (kuva 5.12) havaitaan, että simuloidut tulokset vastaavat hyvin mitattuja ja ainoastaan DC/DC-hakkurin sekä akuston teho on noin 400 W vähemmän kuin mitatuissa tuloksissa. Verifiointitulokset on hyvä, koska käytetyt suuntaajat ovat nimellisarvoltaan yli 100 kW:n laitteita, joten ajatut tehot ovat vain muutaman prosentin suuruisia verrattuna nimelliseen tehoon, jolloin tuloksissa esiintyvä virhe on vain alle prosentin laitteiston nimellisestä tehosta. Myös mittaustulosten suuri kohina ja siitä johtuva mittausten suodattaminen on saattanut vaikuttaa mittaustuloksiin.



Kuva 5.11. Simulaattorilla lasketut tehot kuormitusyökin aikana

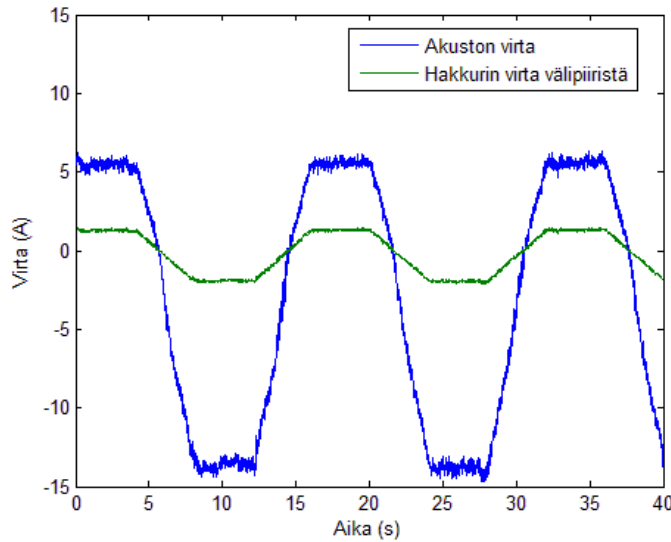


Kuva 5.12. Testilaitteistosta mitatut tehot kuormitusyökin aikana

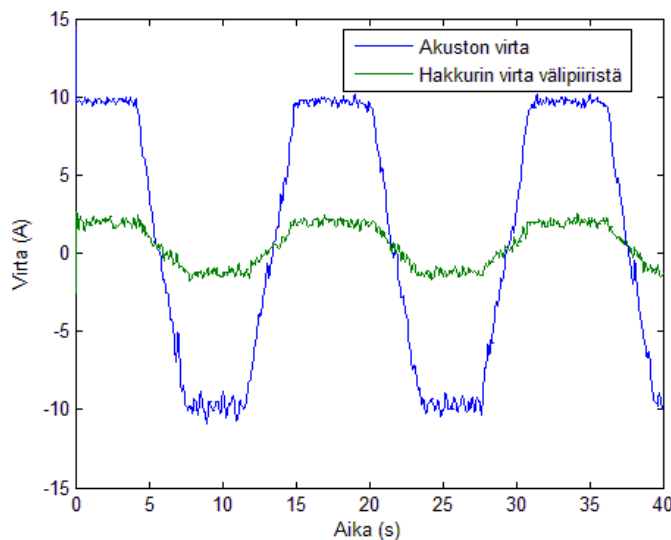
Energiavaraosta ohjaavan hakkurin säätö toimi hyvin syökin aikana, koska välipiirin jännite pysyi käytännössä vakiona asetusarvossaan (600 V) eli tehotaapaino ylläpitäminen onnistui. Hakkurin ja akuston virrat (kuva 5.13 ja 5.14) noudattavat tarkasti hakkurin tehokäyriä, koska jännite välipiirissä on käytännössä vakio ja akustonkaan napajännite ei juuri vaihtele. Kuvaajasta huomataan, että akuston virta on huomattavasti välipiirin virtaa suurempi, mikä johtuu akuston pienemmästä jännitteestä (100V).

Verrattaessa laskettua (kuva 5.13) akuston virtaa mitattuun (kuva 5.14) ero näyttää olevan suuri erityisesti akuston latausvaiheessa, mikä johtuu siitä, että hakkurin virta on pieni, jolloin hakkurin mallilla ei pystytä laskemaan luotettavia tuloksia. Lisäksi hakkurille menevien virtojen ollessa lähellä nollaa, pienetkin virheet virran arvossa vaikuttavat huomattavasti akustolle meneviin virtoihin. Simuloiduissa tuloksissa akustolle

menevä virta on koko ajan pienempi kuin todellinen mitattu virta, joten simuloituissa tuloksissa laitteistolla näyttäisi olevan huonompi hyötysuhde kuin mitatuissa tuloksissa. Ero akuston virrassa on noin 4 A ja akuston jännite on 100 V, jolloin simulaattori laskee häviötehon noin 400 W liian pieneksi.



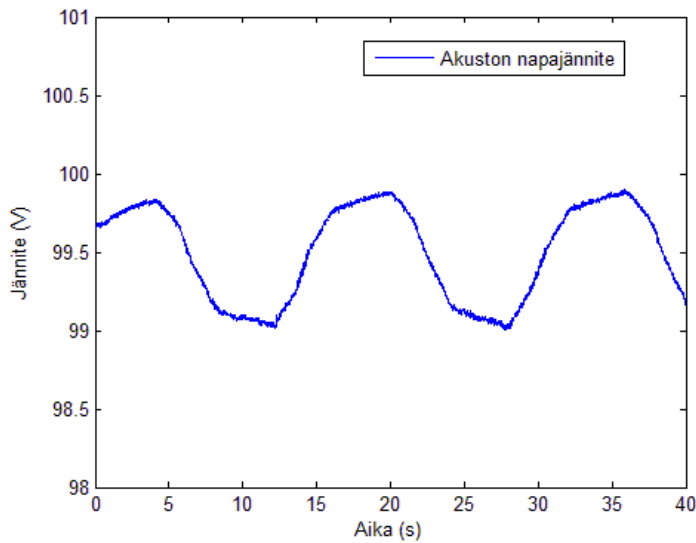
Kuva 5.13. Simulaattorilla lasketut energiavaraston virrat kuormitusyklin aikana



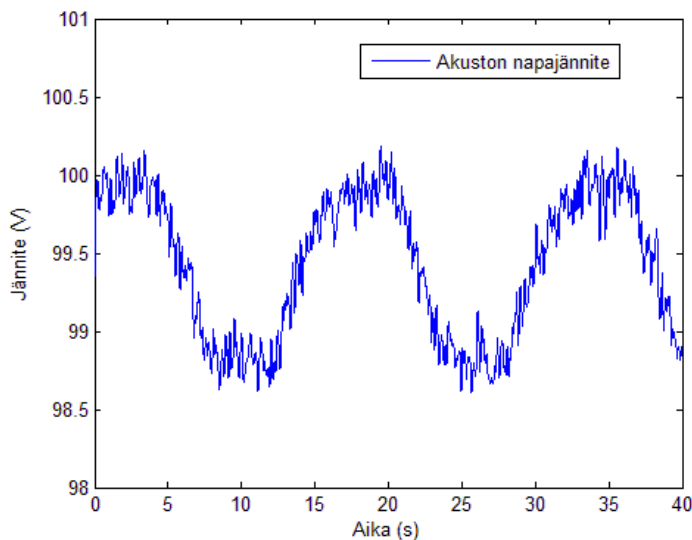
Kuva 5.14. Testilaitteistosta mitatut energiavaraston virrat kuormitusyklin aikana

Akuston napajännite vaihtelee vähän virran suuruuden mukaan, mikä johtuu pääasiassa akuston sisäisestä resistanssista. Testien aikana akustoon vaikuttavat virrat olivat pieniä ja testijaksot lyhyitä, joten napajännitteen vaihtelu oli pientä eikä se vaikuttanut merkittävästi tuloksiin. Kuva 5.15 esittää simulaattorissa käytetyn akuston mallin napajännitteen käyttäytymistä kuormitusyklin aikana ja kuvassa 5.16 on esitettyä mitattu akuston todellinen napajännite. Kuvaajista voidaan huomata, että akuston malli

vastaa hyvin todellista, joten tarvittaessa simulaattorilla voidaan suorittaa myös pitempiä testiajoja, joissa akuston varaus sekä sen napajännite muuttuvat merkittävästi.



Kuva 5.15. Simulaattorilla laskettu akuston napajännite kuormitussyklin aikana

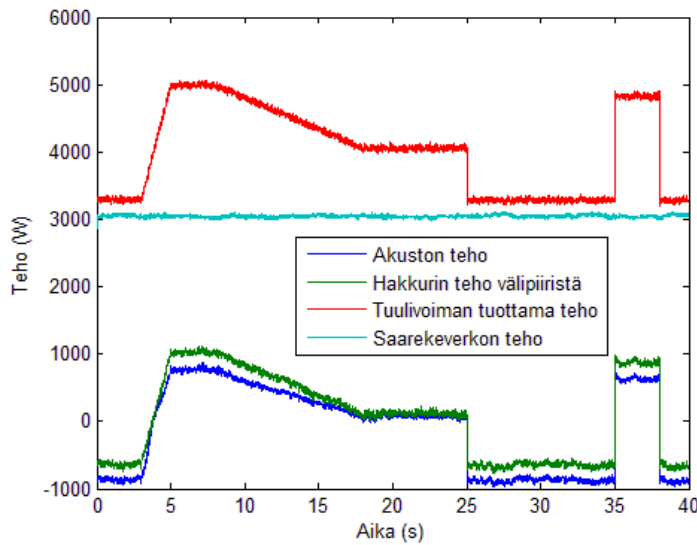


Kuva 5.16. Testilaitteistosta mitattu akuston napajännite kuormitussyklin aikana

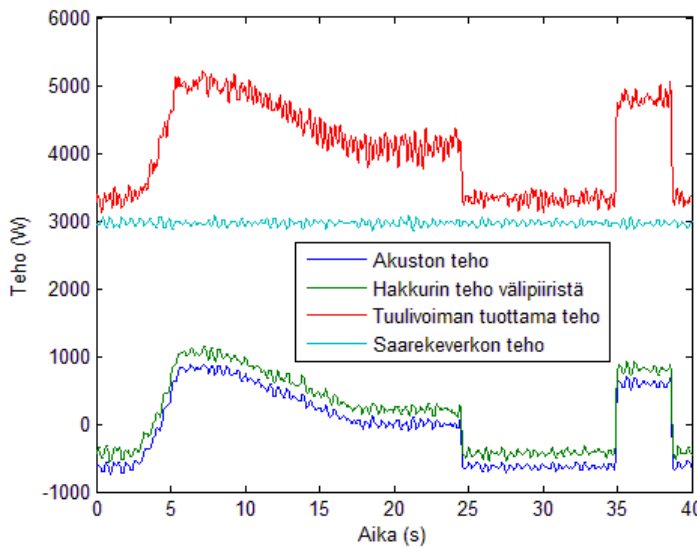
5.3.2 Tuotantosykli

Myös toisessa testissä laitteisto toimi normaalitilassa, mutta tällä kertaa kulutus pidetään vakiona ja tuotanto vaihteli ensin ramppimaisesti ja lopuksi askelmaisesti. Täysin ramppimaista tuotantotehon ohjausta oli hankala toteuttaa testilaitteistolla, koska tuuliturbiinin momenttiohje syötettiin käsiohjauksella suuntaajalle. Simuloinnissa tuotantoa pyrittiin ohjaamaan siten, että se vastaisi mahdollisimman hyvin mitattua tuotantosykliä, jossa tuuliturbiinin momenttia muutettiin aluksi mahdollisimman ramppimaisesti ylös ja

alas, minkä jälkeen tehtiin kolme askelmaista muutosta. Kuvaajissa on esitetty simulaattorilla lasketut (kuva 5.17) ja testilaitteistosta mitatut (kuva 5.18) tehot.



Kuva 5.17. Simulaattorilla lasketut tehot tuotantosyklin aikana

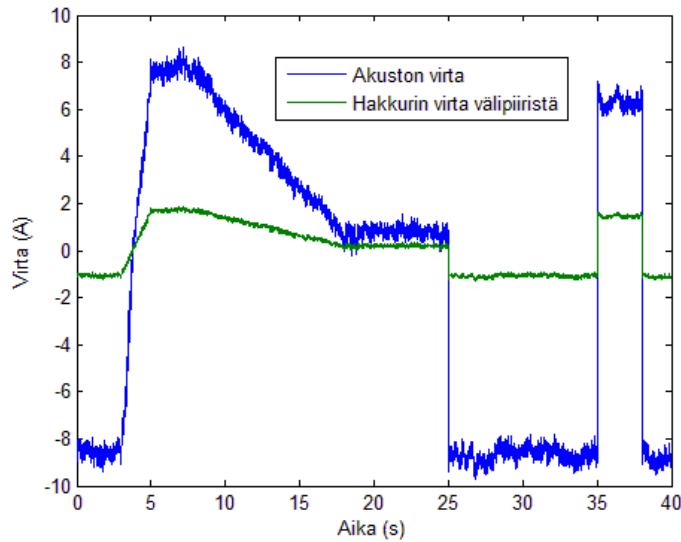


Kuva 5.18. Testilaitteistosta mitatut tehot tuotantosyklin aikana

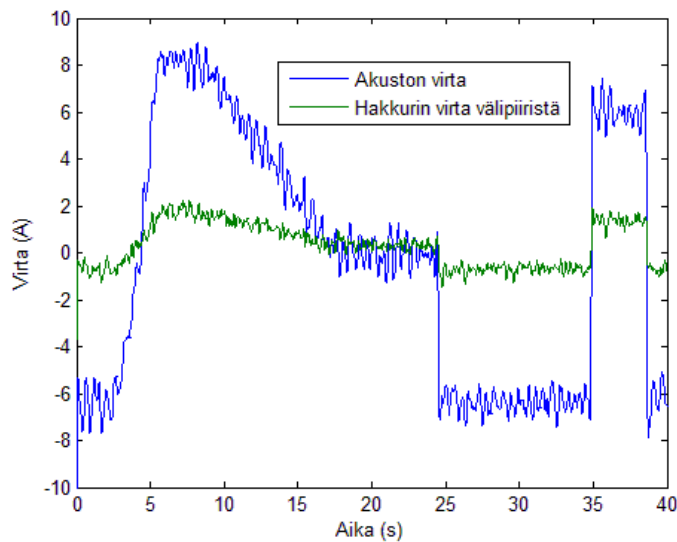
Tässä simuloinnissa konverttereiden tehot ovat jonkin verran ensimmäistä suuremmat, mikä näkyy myös parempina simulointituloksina. Simulaattorilla laskettu hakkurin teho vastaa mitattua niin hyvin kuin se kuvaajista on luettavissa, mutta laskettu akuston teho ei kaikissa tilanteissa vastaa täysin mitattua, mikä johtuu mallin tavasta laskea akuston teho. Akuston tehon laskenta perustuu hyötysuhteisiin, joten akuston teholle ei saada luotettavia tuloksia pienillä virroilla. Mitatusta kuvaajasta (kuva 5.18) on kuitenkin huomattavissa, että hakkurin häviöteho pysyy lähes vakiona koko mittaus-

jakson, koska pienillä tehoilla häviöt koostuvat lähinnä kuristimen rautahäviöistä ja suuntaajien apuelektronikan, kuten esimerkiksi tuulettimien, kuluttamasta tehosta.

Luonnollisesti myös tässä simuloinnissa (kuva 5.19) ja mittauksessa (kuva 5.20) energiavaraston virrat noudattavat tehojen muutoksia tarkasti ja lasketut virrat vastaavat mitattuja virtoja hyvin, vaikka toimitaan edelleen suhteellisen pienillä tehoilla.



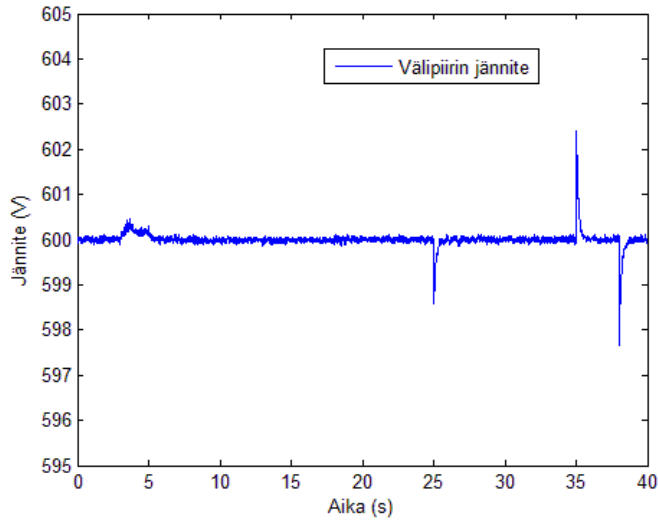
Kuva 5.19. Simulaattorilla lasketut energiavaraston virrat tuotantosyklin aikana



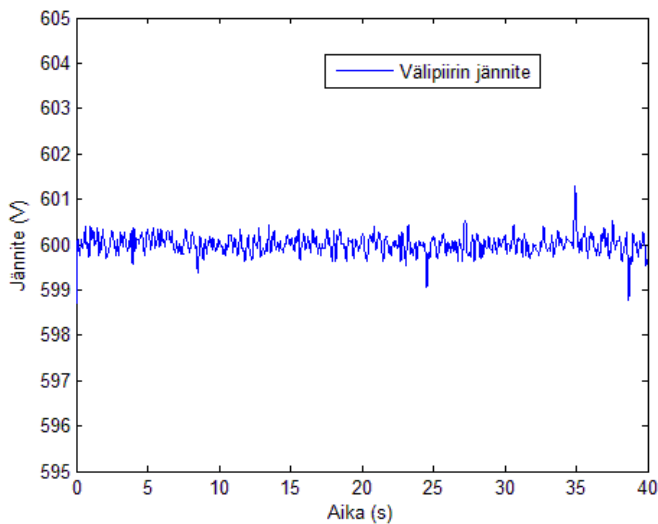
Kuva 5.20. Testilaitteistosta mitatut virrat tuotantosyklin aikana

Välipiirin jännite pysyi lähes vakiona myös tämän testin aikana, mistä voidaan päätellä, että energiavarasto ja sitä ohjaava hakkuri kykenee pitämään tehotasapainon hallinnassa myös tuotannon muutoksissa. Virroista havaitaan hakkurin säätimen nopea virran ohjaus, mutta nopea rampinomainen muutos sekä askelmaiset muutokset aiheuttavat jännitteeseen (kuva 5.21) hyvin pienet piikit. Vastaavat jännitepiikit näkyvät myös mitatussa testilaitteiston välipiirin jännitteessä (kuva 5.22), mutta mittauksen suodatta-

misen ja suuremman näytteenottovälin vuoksi piikit eivät ole yhtä selvät kuin simuloituissa tuloksissa. Jännitepiikit ovat kuitenkin niin pieniä, etteivät ne vaikuta mitenkään saarekeverkon toimintaan. Virran ja jännitteen kuvaajista voidaan havaita, että hakkurin PI-säätimen viritys on onnistunut hyvin, koska vaste on nopea ja ohjauksissa ei näy värähtelyä.



Kuva 5.21. Simulaattorilla laskettu välipiirin jännite tuotantosyklin aikana



Kuva 5.22. Testilaitteistosta mitattu välipiirin jännite tuotantosyklin aikana

6. TESTILAITTEISTO JA MITTAUKSET

Diplomityön liittyviä testauksia ja mittauksia varten rakennettiin testilaitteisto TTY:n Sähköenergiatekniikan laitoksen laboratoriotiloihin, koska sieltä löytyi jo valmiiksi suurin osa tarvittavista laitteista. Rakennetulla testilaitteistolla testattiin erityyppisiä tilanteita, jossa tehotasapaino vaihteli. Lisäksi verifioitiin tehty simulointimalli sekä tutkittiin laitteiston käyttäytymistä tilanteessa, jossa energiavarasto kytkeytyy irti järjestelmästä vikatilanteen tai kapasiteetin loppumisen seurauksena.

6.1 Testeissä käytetyn laitteiston komponentit

Käytetty testilaitteisto koostui useammasta laitteesta, joista tuuliturbiinin suuntaajana ja saarekekonverterina käytettiin ABB:n toimittamaa ACS800-11 moduulia, jota on muokattu testilaitteistoon sopivaksi, sekä energiavarastona laboratoriotiloista löytyvää litium-ioniakustoa ja siihen liitettyä MSc 200 DCDC 750 DC/DC-hakkuria. Näiden lisäksi käytössä oli vielä kaksi moottoriparia, joista yksi mallinsa tuuliturbiinia ja toinen toimi saarekeverkon kuormana.

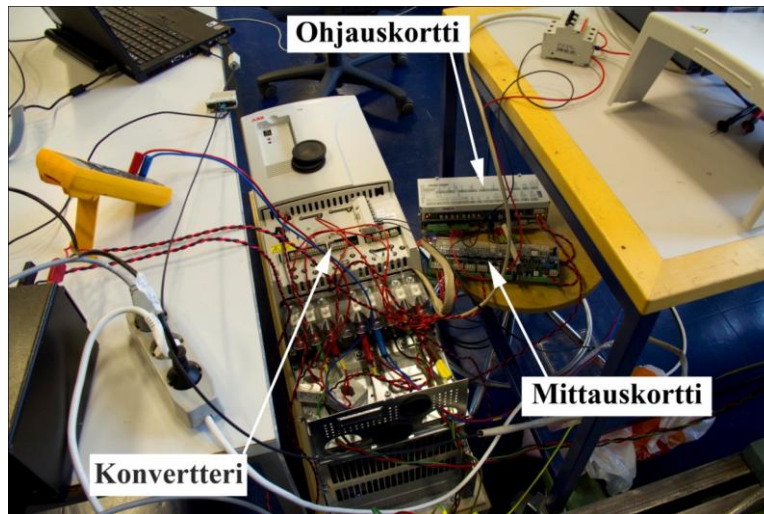
Mittaukset, DC/DC-hakkurin ohjaus ja saarekeverkon kuormamoottorin ohjaaminen hoidettiin tietokoneeseen kytketyllä dSPACE-järjestelmällä, mutta muut laitteiden ohjaukset oli hajautettu ja eikä niillä ollut minkäänlaista keskinäistä kommunikointia. Myös laitteiden säätöjärjestelmien vaatimat mittaukset oli hajautettu siten, että eri laitteilla ei ollut myöskään mitään yhteisiä mittaussignaaleja käytettävissä.

6.1.1 Saarekekonvertteri ja tuuliturbiinin suuntaaja

Saarekekonvertteri ja tuuliturbiinin suuntaajana käytetään ABB:n valmistamaa nimellisisarvoiltaan 93 A:n ACS800-11 moduulia, joka koostuu kahdesta vastakkain kytketystä kolmivaiheisesta IGBT-tehoasteesta ja yhdestä LCL-suodattimesta (ABB 2006). Sellaisenaan laitetta voi esimerkiksi käyttää verkkoon jarruttavana taajuudenmuuttajana moottorikäytöissä tai generaattorin ja sähköverkon väliin sijoitettavana taajuudenmuuttajana tuuliturbiinikäytöissä. Muuta testilaitteistoa silmällä pitäen moduuli on reilusti ylimitoitettu, mutta testien aikana ylimitoitus osoittautui hyödylliseksi, koska järjestelmän käynnistämistä ja sammuttamista helpotti se, että moduulin virtamarginaali kykeni vastaamaan yksittäisiin virtapiikkeihin.

Kaupallista tuotetta on hieman muokattu testilaitteistoa varten siten, että toisen suuntaajasillan ohjaus suoritetaan erillisellä ohjauskortilla ja että sen yhteyteen on lisätty erillinen mittauskortti lisämittauksia varten, jolloin normaalisti verkkoon kytketty laite pystyy muodostamaan oman kolmivaiheisen saarekeverkon ja ylläpitämään sen

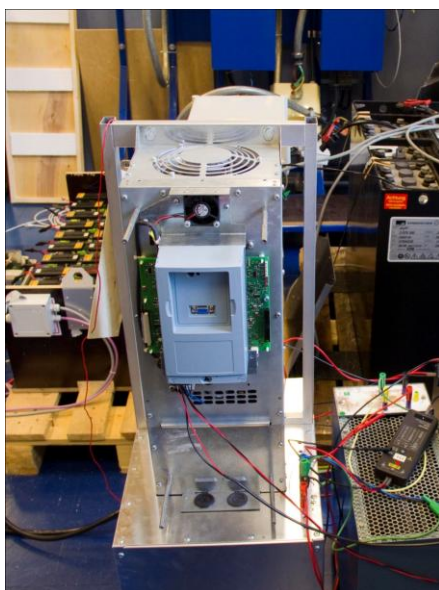
stabiilina eri kuormitustilanteissa. Kuvassa 6.1 on esitettyä ACS800-11 moduuli, erillinen ohjainkortti, mittauskortti sekä niiden kytkennät.



Kuva 6.1. ACS800-11 - moduuli sekä siihen liitetyt lisäkortit ja kytkennät

6.1.2 DC/DC-hakkuri

Energiavaran virtoja testilaitteistossa ohjaa MSc Electronics Oy valmistama MSc 200 DCDC 750 DC/DC-hakkuri (kuva 6.2), joka on nimellisarvoltaan 120 A ja 750 V, mutta Hetkellisesti sen läpi voidaan ajaa jopa 200 A virta. Hakkuri on jännitettä nostavaa mallia, joten välipiirin jännitteen tulee aina olla energiavaran jännitettä suurempi sekä vähintään 460 V, jotta hakkuri saa sieltä käyttöjännitteen. (MSc Electronics Oy 2009)

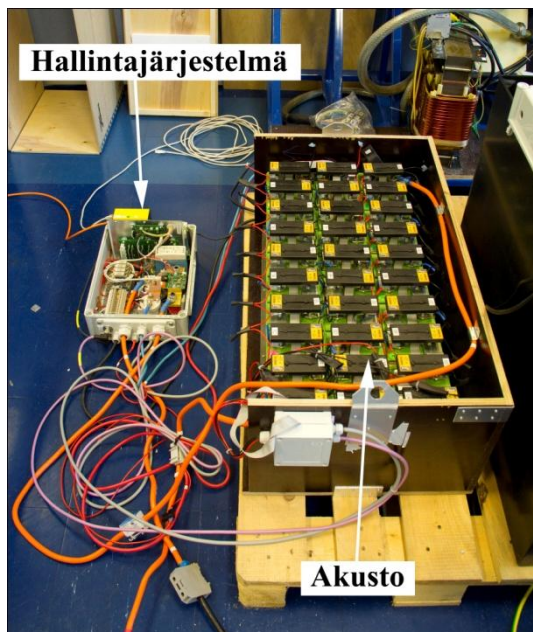


Kuva 6.2. MSc 200 DCDC 750DC/DC-hakkuri

Hakkuri löytyi jo valmiiksi laboratorionista ja sille on rakennettu teline, jossa laite on helposti liikuteltavissa ja kytkettävissä erilaisiin laitteistoihin. Hakkurista on purettu päällimmäinen kansi pois ja siihen on yhdistettynä analogisia signaaleja laitteen hallintaa varten (kuva 6.2).

6.1.3 Energiavarasto

Energiavarastona testilaitteistossa käytettiin K2 Energy Solutions LFP300HES-kennoista koottua litium-ioniakustoa (kuva 6.3), joka koostuu 30 sarjaankytketystä kennoista. Kennojen keskimääräinen käyttöjännite on 3,2 V, jolloin akustolle saadaan napajännitteeksi noin 96 V. Testien aikana akuston varaus oli noin 80 % ja napajännite noin 100 V, mitkä pysyivät lähes vakiona testien aikana, koska testijaksot olivat melko lyhyitä (n. 40 sekuntia) ja tehoa virtasi tasaisesti molempiin suuntiin. (K2 Energy Solutions, Inc; Hännikäinen 2010)



Kuva 6.3. Litium-ioniakusto ja sen hallintajärjestelmä

LFP300HES kennon parametrit on koottu taulukkoon 6.1, josta voidaan huomata, että litium-ioniakusto kestää korkeitakin purkausvirtoja. Vaikka suositeltu latausvirta on taulukon mukaan enintään 18 A, voidaan akustoa valmistajan edustajan mukaan kuormittaa jopa 10 C:n eli 900 A latausvirralla maksimissaan 5 sekuntia. (K2 Energy Solutions, Inc; Hännikäinen 2010)

Muuhun testilaitteistoon verrattuna akun suorituskyky oli riittävä ja testien aikana normaalia suuremman virtapiikin aiheutti ainoastaan saarekeverkon kuormamootorin toimineen 11 kW:n oikosulkumootorin käynnistäminen, jolloin akuston hetkellinen virta nousi 120 A:iin ja kesti noin 4 sekuntia.

Taulukko 6.1. LFP300HES litium-ioniakkukennon parametrit (K2 Energy Solutions, Inc)**LFP300HES litium-ioniakkukkenno****Tekniset tiedot**

Nimellinen kapasiteetti @ C/5 (Ah)	90
Keskimääräinen käyttöjännite @ C/5 (V)	3,2
Sisäinen impedanssi @ 1kHz, AC (mΩ)	< 5,0
Paino (kg)	3,0
Korkeus (mm)	208
Leveys (mm)	81
Pituus (mm)	123

Suosittelut käyttöolosuhteet

Jatkuva purkausvirta (A)	≤ 90
Hetkellinen purkausvirta (A) 30 sekuntia	300
Latausvirta (A)	≤ 18
Latauksen katkaisujännite (V)	3,65
Purkauksen katkaisujännite (V)	2,5
Maksimi ympäristölämpötila (°C)	60
Minimi ympäristölämpötila (°C)	-20

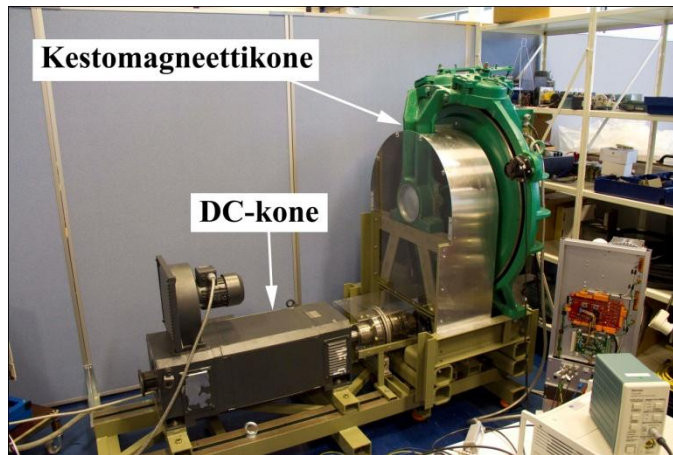
Maksimi käyttöolosuhteet

Jatkuva purkausvirta (A)	300
Hetkellinen purkausvirta (A) 5 sekuntia	700

Akuston on liitetty myös sen hallintajärjestelmä (kuva 6.3), jonka tehtävänä on valvoa yksittäisten kennojen tiloja sekä estää akuston ylikuormittaminen. Valvontajärjestelmässä on oma käyttöjärjestelmä, jota pystyy ohjaamaan tietokoneella verkkoliitännän kautta telnet-pääteyhteydellä. Pääteohjelmasta pystyy lukemaan koko akuston tai yksittäisten kennojen tiloja sekä irrottamaan akuston hakkurista hallintajärjestelmässä olevien kontaktorien avulla.

6.1.4 Tuuliturbiini

Tuuliturbiinia mallinnettiin käyttämällä moottoriparia (kuva 6.4), jonka moottorit olivat kytketty mekaanisesti toisiinsa. Tuuliturbiinigeneraattorina toimi KONEen MX-18 hissikäyttöön tarkoitettu kestomagneetikone, jota pyöritti ABB:n DCS500B 58 kW:n nelikvadrantisella tyristorisuuntaajalla syötetty Siemensin DC-moottori (kuva 6.5). Moottoreiden väliin on kytketty hihnavetoinen välitys, jonka suhde 1:4. (Pokkinen 2011)



Kuva 6.4. Siemens DC-kone ja KONE MX-18 kestopagneettitahtikone



Kuva 6.5. ABB DCS500B tyristorisuuntaaja

KONE MX-18 ei varsinaisesti ole tuuliturbiinisovelluksiin suunniteltu generaattori, mutta sitä päätettiin käyttää testilaitteiston komponenttina, koska se oli jo valmiiksi kytketty DC-moottoriin. MX-18:n tuottama virta (taulukko 6.2) on vähintäänkin riittävä tähän testilaitteistoon, mutta sen liikejännite olisi saanut olla huomattavasti suurempi.

Taulukko 6.2. KONE MX-18 kestopagneettitahtikoneen parametrit (Eskola 2010)

KONE MX-18 kestopagneettitahtikone

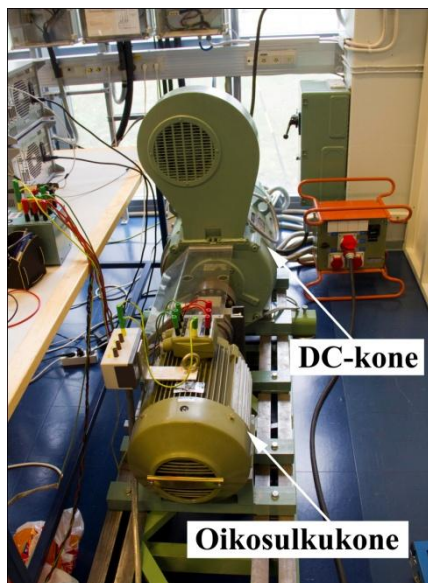
Nimellisarvot

Jatkuva virta (A)	60
Jatkuva liikejännite (V)	140
Syöttötaajuus (Hz)	23,51
Momentti (Nm)	1800
Napapariluku	12

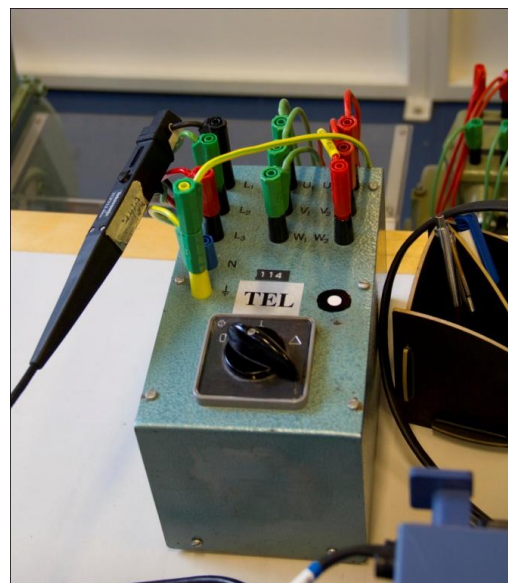
Järjestelmän suuntaajat ottavat käyttöjännitteensä välipiiristä, johon on mahdollista tuottaa jännite kestoplaneettakoneella suuntaajasillan IGBT-transistorien rinnalle kytkettyjen diodien kautta, jolloin testilaitteiston kaltainen järjestelmä on mahdollista käynnistää ilman ulkopuolista virtalähdettä. Kuitenkin järjestelmässä käytetyn pyörivän kestoplaneettakoneen tuottama välipiiriin jännite oli liian pieni, jotta järjestelmän suuntaajat olisivat saaneet käynnistymiseen tarvittavan jännitteen. Tämän vuoksi tarvittiin erillinen latauspiiri ja sähkönsyöttö, jotta välipiiriin saatiin tarvittava jännite käynnistys-tilanteessa.

6.1.5 Saarekeverkon kuorma

Koska testilaitteistossa ei sisältänyt saarekeverkon puoleista muuntajaa, täytyi saarekeverkoissa käyttää symmetristä kolmivaiheista kuormaa. Kuormana käytettiin koneikkoa (taulukko 6.3), jossa oli oikosulkumoottori ja sen kanssa samalle akselille kytketty DC-moottori (kuva 6.6). Kuormamoottori kytkettiin saarekeverkkoon tähti/kolmio-kytkimellä (kuva 6.7), jolloin moottorin ottamaa käynnistysvirtaa saatiin hieman rajoitettua.



Kuva 6.6. Oikosulku- ja DC-kone



Kuva 6.7. Tähti/kolmio-kytkin

Käytännössä testien aikana oikosulkumoottorin nimellisteho oli alle 11 kW, koska saarekekonvertterin synnyttämän sähköverkon jännitteen tehollisarvo asetettiin 350 V ja oikosulkumoottorin nimellinen jännite oli 385 V. Oikosulkumoottorin teho riitti hyvin myös 350 V jännitteellä, koska testien aikana moottorin kuormitus pysyi alle 4 kW:ssa. Lisäksi käyttämällä hieman alemmaa jännitettä saatiin moottorin ottamaa käynnistysvirtaa rajoitettua, jolloin myös akuston virtapiikkiä saatiin alemmaksi.

Taulukko 6.3. Saarekeverkon kuormakoneikon kilpiarvot (Hännikäinen 2010)**Kuormakoneikon kilpiarvot****Oikosulkumoottori**

Nimellisteho (kW)	11
Nimellisjännite (V)	385
Nimellisvirta (A)	23
Nimellispyörimisnopeus (rpm)	1455,0
Tehokerroin (cosφ)	0,84

DC-moottori

Nimellisteho (kW)	62
Nimellisvirta (A)	153
Pyörimisnopeus (rpm)	1500 - 1800

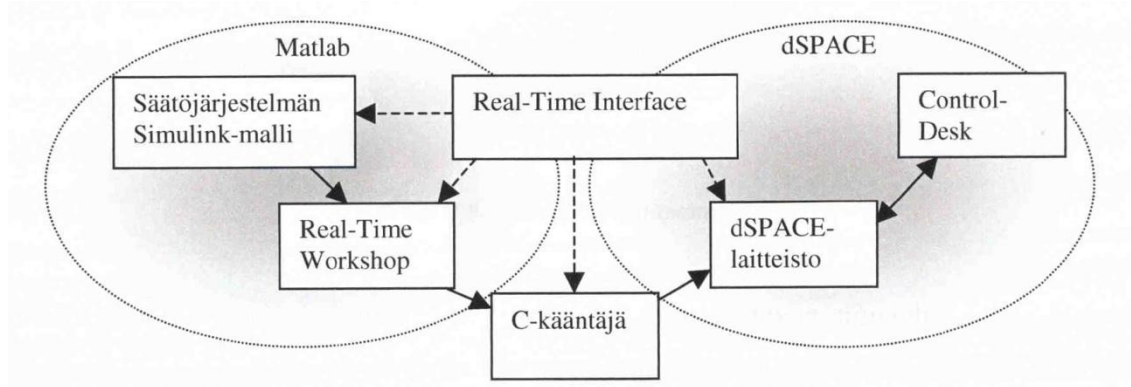
6.1.6 dSPACE-reaaliaikasimulaattori

dSPACE on reaaliaikainen simulointijärjestelmä, jonka avulla voidaan tietokoneella tehdyllä simulointimallilla ohjata todellista laitetta, jolloin dSPACE-järjestelmällä pystytään helposti tekemään eri tyyppisiä säätö-, ohjaus- ja mittausjärjestelmiä. Jotta dSPACEa voidaan käyttää, vaaditaan tietokone, josta löytyy Mathworksin Matlab- ja Simulink – ohjelmistot. Näiden lisäksi dSPACE vaatii Real-Time Interface, Real-Time Workshop ja ControlDesk – ohjelmistot, jotta Simulinkillä tehty malli saadaan toimimaan dSPACElla. Järjestelmä sisältää myös CP1103-liitäntäpaneelin (kuva 6.8), jossa on useita analogisia ja digitaalisia lähtöjä sekä tuloja, ja sen avulla dSPACE ohjaa ja mittaa käytössä olevaa järjestelmää. (Hemminki 2005)

**Kuva 6.8.** dSPACE-järjestelmän CP1103-liitäntäpaneeli (Hemminki 2005)

Itse ohjainohjelmiston malli tehdään Matlabin Simulink-ohjelmalla normaalin simulointimallin tyylistä. Sisään- ja ulostulosignaalit sisältävä rtilib-kirjasto sisältyy Real-Time Interface-ohjelmaan. Malli pystytään kääntämään suoraan dSPACElle Real-

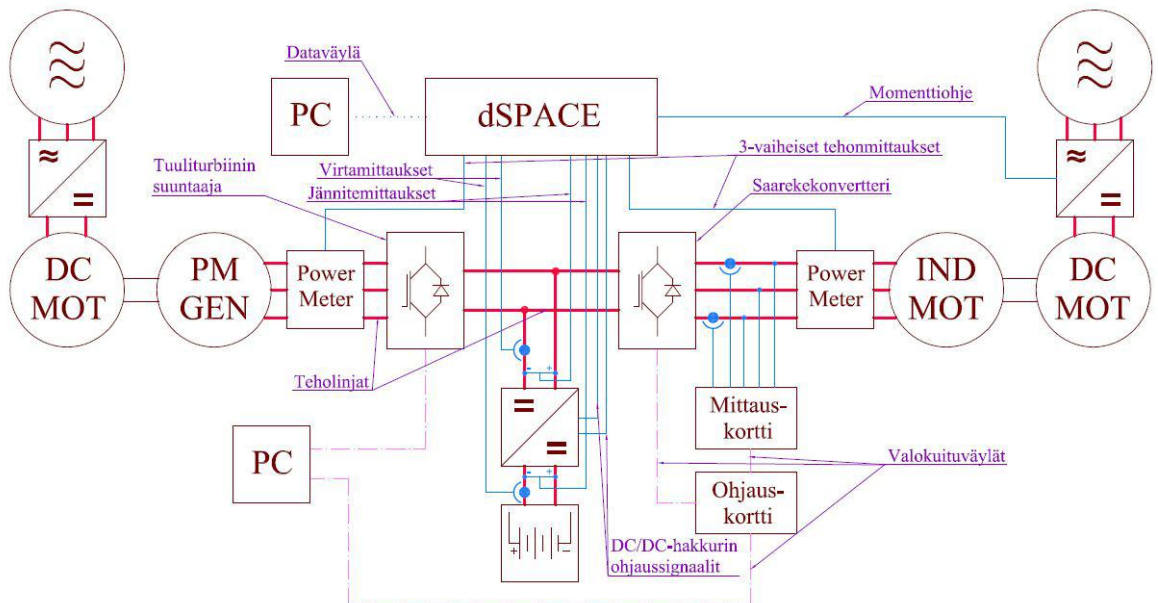
Time Workshopin ja C-kääntäjän avulla, joten käyttäjän ei tarvitse itse koodata ohjelmistoa. ControlDesk-ohjelmistolla voidaan asettaa suunnitellun ohjausjärjestelmän ohjauksia ja mitata signaaleja reaaliajassa. Kuvassa 6.9 on esitetty lohko-kaaviomuodossa Matlabin, dSPACE:n ja ohjelmistojen väliset yhteydet. (Hemminki 2005)



Kuva 6.9. dSPACE-järjestelmän yhteydet eri ohjelmistojen kesken (Hemminki 2005)

6.2 Testilaitteiston kytkennät

Tässä työssä käytetyn testilaitteiston kytkennät on esitetty kuvassa 6.10, jossa punaisella on merkitty teholinjat, sinisellä analogiset mittaus- ja ohjaussignaalit sekä katkoviivoilla dataliikenneväylät. Tuotantopuoli on kuvassa vasemmalla ja kulutus eli saarekeverkko oikealla.



Kuva 6.10. Testilaitteiston kytkennät

6.2.1 Suuntaajat

Tuuliturbiinin suuntaajan kytkennät koostuvat päävirtapiiristä ja valokuitulinkistä, jota käytetään suuntaajan ohjaukseen. Päävirtapiiri tulee kolmivaiheisena kestromagneettikoneelta mittauslaitteen, eli Power Meterin, kautta suuntaajalle ja jatkuu siitä eteenpäin tasajännitelinjana. Tuotannon puolen suuntaaja on kaupallinen laite, joten sen generaattorin ohjaukseen tarvittavat mittaukset ovat suuntaajan koteloinnin sisällä.

Saarekekonvertterissa käytetään erillistä mittauskorttia sekä ulkoisia mittauksia ja laitteen ohjaukshortti on sijoitettu kotelon ulkopuolelle. Koska testilaitteiston suuntaaja on muokattu kaupallisesta verkkovaihtosuuntaajasta, suuntaajassa on saarekeverkon puolella sisäänrakennettuna LCL-suodatin, jonka ulostulosta mittauskortti mittaa kaikkien kolmen vaiheen jännitteet sekä kahden vaiheen vaihevirrat. Mittauskortin, ohjaukshortin ja varsinaisen sillan välillä tieto kulkee valokuitulinkkiä pitkin.

Molempien suuntaajien ohjaukskäskyjen antaminen, tilan valvonta sekä parametrisointi hoidetaan tietokoneella valokuitulinkin kautta. Tietokonetta ei käytetä laitteiden varsinaiseen ohjaamiseen, eivätkä laitteet jaa tietoa sen välityksellä, joten käytännössä tietokone voidaan haluttaessa irrottaa laitteistosta käytön aikana.

6.2.2 Energiavarasto

Akuston yhteyteen sijoitettu hallintajärjestelmä toimii käytännössä itsenäisenä laitteena, joka valvoo, että akkua ei ylikuormiteta. Selvyyden vuoksi akusto ja sen hallintajärjestelmä on piirretty yhtenä komponenttina kuvassa 6.10.

DC/DC-hakkurin ohjaamiseen käytetään osittain DSPACE-järjestelmää ja sen mittauksia, mutta DSPACEltä tulee ainoastaan hakkurin virtaohje ja käynnistyskomento analogisena signaalina. Virtaohje saadaan PI-säätimeltä, jonka takaisinkytkentänä käytetään välipiirin jännitteen mittausta, mutta virtaohjeen hakkuri toteuttaa sisäisellä säätimellä, joten DSPACEn mittaamaa virtatietoa ei käytetä säätämiseen.

6.2.3 Koneikot

Tuotannon puolella tuuliturbiinia mallintava KONEen MX-18-kestromagneettikone on kytketty suoraan ABB:n suuntaajaan ja samassa koneikossa sijaitseva Siemensin DC-moottori on kytketty sähköverkkoon DCS-500B-tyristorisuuntaajan avulla. Tyristorisuuntaaja syöttää vakionopeusohjeella pyörivää DC-moottoria. Tällöin myös kestromagneettikone pyörii koko ajan vakionopeutta kuormituksesta riippumatta ja tuuliturbiinin tuotannon suuruutta säädetään ohjaamalla kestromagneettikoneen momenttia.

Saarekeverkon kulutusta ei ohjata saarekekonvertterilla vaan sen tehtävänä on pitää saarekeverkon jännite ja taajuus stabiilina eri kuormitustilanteista riippumatta. Saarekeverkon koneikon oikosulkumoottori on kytketty saarekekonvertteriin tähti/kolmio-kytkimen avulla ja oikosulkumoottorin kanssa samalle akselille kytketyllä DC-moottorilla säädetään saarekeverkon kuormitusta. Kuormitusta voidaan ohjata laboratoriossa sijaitsevan ohjauspulpetin kautta, jolloin ohjauksena on tarpeen mukaan mah-

dollista käyttää vakiomomenttiohjetta tai dSPACEltä syötettyä analogista momenttignaalia.

6.2.4 Mittaukset

Kolmivaiheisten tehojen eli tuotannon ja kulutuksen mittaukset hoidettiin kahdella analogisella Power Meter –mittalaitteella, joiden kautta kummastakin suuntaajasta lähtevät vaihejohtimet kulkivat. Power Meteristä ulostulona saatiin pätötehon arvo analogisena signaalina, joka johdettiin dSPACEen. Tarkemmat mittaustulokset olisi saanut mittaamalla tuotannon ja kulutuksen tehot välipiirin virroista, jolloin mittauksissa ei olisi näkynyt kytkinkomponenttien häviöitä, mutta suuntaajien koteloinnin vuoksi se ei ollut mahdollista.

Tuuliturbiinin tehonmittaus oli haastavaa, koska generaattori oli kiinni suoraan suuntaajassa, jolloin generaattorin jännitteissä näkyi melko voimakkaasti suuntaajasillan tuottama jännitevaihtelu. Tämän vuoksi myös Power Meterin mittaamassa pätötehon signaalissa oli huomattavasti kohinaa ja mittausta jouduttiin suodattamaan. Tämän lisäksi tehosignaalia jouduttiin korjaamaan kertoimella, jota määritettäessä vertailukohtana käytettiin suuntaajan itse mittaamaa hetkellistä tehoa. Saarekeverkon puolella suuntaajan ja LCL-suodattimen tuottama jännite muistutti siniaaltoa, jolloin tehonmittaus onnistui Power Meterillä paremmin.

Energiavaraston tehoa oli helpompi mitata, koska sen yhteydessä oli käytössä ainoastaan tasajännitteitä ja -virtoja, jotka mitattiin erikseen DC/DC-hakkurin kummaltakin puolelta, jolloin pystyttiin laskemaan akustosta otettu ja hakkurin välipiiriin tuottama teho erikseen. Tasajännite- ja tasavirtasuureiden mittaaminen suoritettiin suoraan dSPACEllä käyttämällä mittapäitä, jotka skaalaavat mittaussignaalit dSPACEen käyttämälle signaalitasolle.

6.3 Suoritetut testit erikoistilanteissa

Ennen erikoistilanteiden testaamista ajettiin kaksi testiä laitteiston normaalissa toimintatilassa, jolloin kaikki laitteet toimivat, ja näitä tuloksia käytettiin simulaattorin verifiointiin. Ensimmäisessä testissä muutettiin kulutustehoa ja toisessa tuotantotehoa. Näiden testien tulokset on esitettyä aikaisemmin luvussa 5.3, jossa niitä verrattiin simulaattorilla laskettuihin tuloksiin.

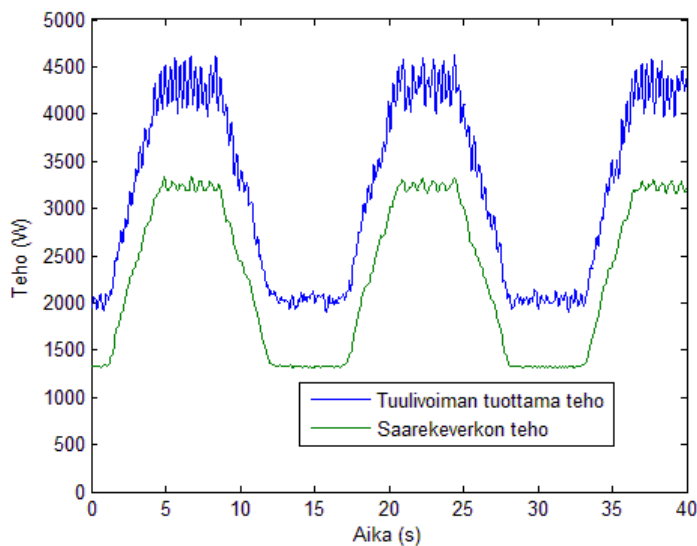
Simulaattorin verifiointiin lisäksi testilaitteistolla testattiin muutama erikoistilanne, joiden tulokset esitetään tässä luvussa. Aluksi ajettiin ensimmäistä verifiointimittauksista vastaava kuormasykli läpi ilman energiavarastoa siten, että tuuliturbiinista oli koko ajan otettavissa riittävästi tehoa. Tämän jälkeen testattiin akuston varauksen täytyminen ja tyhjentyminen, jolloin hakkuri lopettaa tehon syöttämisen. Tämä on myös verrattavissa tilanteeseen, jossa hakkuri pysähtyy vikatilanteen seurauksena. Lisäksi viimeisenä testinä syötettiin saarekekonvertterin läpi negatiivinen kuormateho eli saarekeverkon kuormamootoria käytettiin generaattorina tuottamaan energiaa.

6.3.1 Toiminta ilman energiavarausta

Ensimmäisenä normaalitilanteesta poikkeavassa testissä tuuliturbiini on käytössä normaalisti, mutta energiavarausta ohjaava hakkuri on pysäytettynä, jolloin hakkuri ei myöskään ylläpidä välipiirin jännitettä. Tuotanto kuitenkin riittää kattamaan kulutuksen kaikissa tilanteissa ja tuuliturbiiniin suuntaajan ylijännitesäädin hoitaa välipiirin jännitteen säätämisen. Tämän kaltainen tilanne on mahdollinen, jos energiavaraustoon tai sitä ohjaavaan elektroniikkaan tulee jokin vika, mutta saarekeverkkoa ei tarvitse ajaa alas, koska tuotanto riittää kattamaan kulutuksen.

Ylijännitesäädin on ohjelmoitu rajoittamaan tuuliturbiinin momenttia, jos välipiirin jännite alkaa nousta liian suureksi. Testien aikana ylijännitesäädin oli asetettu rajoittamaan momenttia, jos välipiirin jännite nousee yli 650 V sekä estämään jännitteen nousun yli 700 V:iin. Tuuliturbiinin momenttiohjeen rajoittaminen aiheuttaa todellisuudessa turbiinin nopeuden kiihtymisen, jos turbiinia pyörittävää tehoa ei rajoiteta. Tämän vuoksi turbiinin siivissä täytyy olla lapakulmasäätö, joka estää hallitsemattoman pyörimisnopeuden nousun. Testien aikana tämä ei muodostunut ongelmaksi, koska tuuliturbiinia mallintavaa generaattoria pyörittävän DC-moottorin pyörimisnopeuden säätö esti koneikon ryntäämisen.

Testissä käytettiin samaa kuormitusyksiä kuin ensimmäisessäkin testissä, mutta tuuliturbiinin momentti ohje oli asetettu siten, että tuotanto oli joka tilanteessa suurempi kuin kulutus. Mitatut tehot on esitetty kuvassa 6.11.



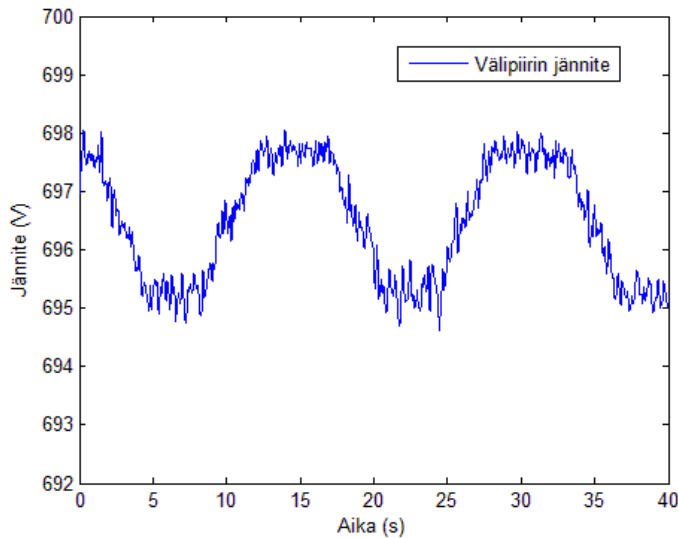
Kuva 6.11. Testilaitteistosta mitatut tehot toimittaessa ilman energiavarausta

Tehon kuvaajista voidaan havaita, että tuuliturbiinin teho noudattaa saarekeverkon tehoa. Ideaalitilanteessa tehokäyrät piirtyisivät päällekkäin, mutta tuloksista on kuitenkin havaittavissa selvästi laitteiston häviöteho.

Ylijännitesäätimen tuottamassa välipiirin jännitteessä (kuva 6.12) on huomattavasti enemmän vaihtelua kuin DC/DC-hakkurin säätämässä jännitteessä, koska

ylijännitesäätimelle ei varsinaisesti anneta mitään asetusarvoa, jossa jännite tulisi pitää. Ylijännitesäätimen parametreihin asetetaan ainoastaan jänniteraja, jolloin säädin alkaa toimia sekä maksimiarvo välipiirin jännitteelle, jota suuremmaksi säädin ei anna jännitteen nousta.

Myös hakkurin kondensaattori aiheuttaa ylimääräistä dynamiikkaa järjestelmään, koska hakkurin välipiirin kondensaattori on kytkettynä konvertterin välipiiriin, vaikka hakkuri itsessään ei ole käytössä.

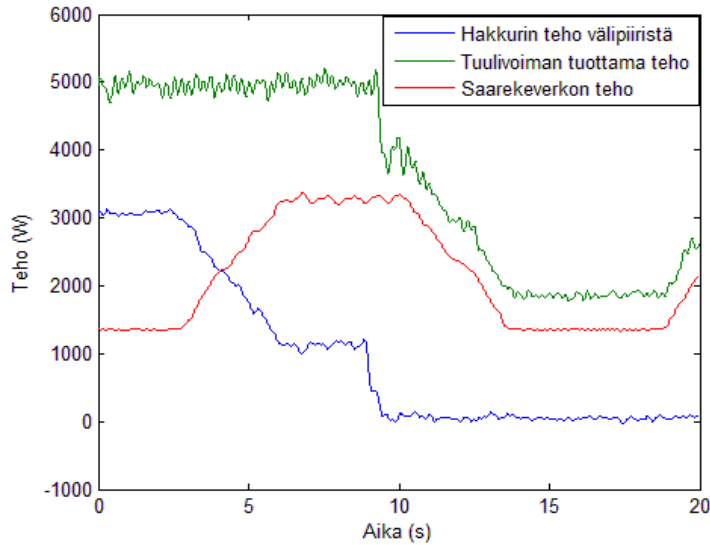


Kuva 6.12. Testilaitteistosta mitattu välipiirin jännite toimittaessa ilman energiavarastoa

6.3.2 Toiminta energiavaraston täytyessä

Tuuliturbiiniin liitetyn suuntaajan ylijännitesäätimelle on myös silloin tarvetta, jos energiavaraston kapasiteetti täyttyy eikä energiavarasto kykene vastaanottamaan enempää tehoa, jolloin sitä ohjaava hakkuri pysäytetään. Keskitetyn valvonnan avulla tällainen tilanne voidaan ennakoida ja tuuliturbiinin tehoa voidaan rajoittaa hallitusti, mutta toimittaessa ilman laitteiden välistä kommunikaatiota, tilanne tulee säätöjärjestelmälle yllätyksen. Vaikka itse energiavarastoa ei ladattu täyteen testien aikana, voitiin vastaanlainen tilanne mallintaa pysäyttämällä hakkuri kesken ajon sellaisessa tilanteessa, jossa tuotantoteho on suurempi kuin kulutusteho.

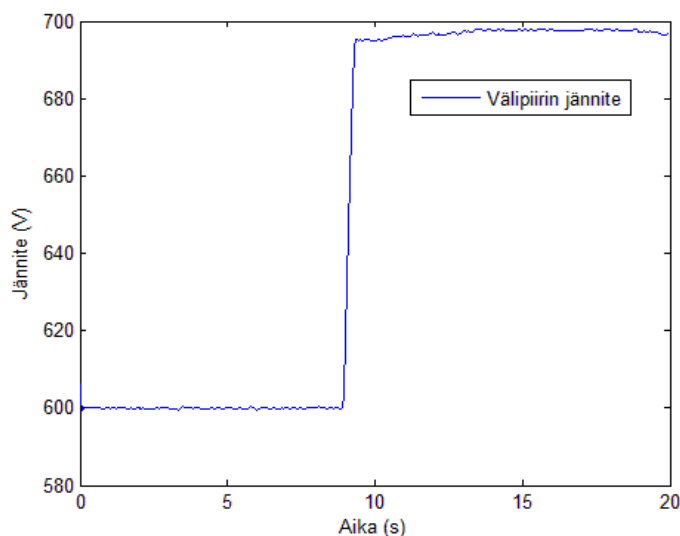
Testissä saarekeverkon kuormitus noudatti edellisestä testeistä tuttu ramppimaisista sykliä, jonka maksimiteho oli noin 3,4 kW ja tuuliturbiinin tuotantotehoksi oli säädetty noin 5 kW. Hakkurin modulointi pysäytettiin kesken ajon ja mitattiin tehojen käyttäytymistä. Mitatut tehot on esitetty kuvassa 6.13.



Kuva 6.13. Testilaitteistosta mitatut tehot energiavaraston täytyessä ajanhetkellä 9 s

Tehot käyttäytyvät odotetusti ja järjestelmä pysyy toiminnassa, koska tuuliturbiinin suuntaaja rajoittaa momenttia välittömästi, kun energiavaraston hakkuri lopettaa tehon vastaanottamisen. Saarekeverkon puolelle ei muutostilanteesta aiheudu minkäänlaista häiriötä, mutta hakkurin tehon mittaukseen jää havaittava värähtely, koska hakkurin kondensaattori on edelleen kytkettynä välipiiriin.

Energiavaraston ollessa kytkettynä hakkuri pitää välipiirissä 600 V:n vakiojännitteen ja kun hakkuri pysäytetään, välipiirin jännitteen säätö siirtyy tuuliturbiinin suuntaajan ylijännitesäätimelle, jolloin jännite nousee lähelle 700 V:a, mikä näkyy myös välipiirin jännitteen mittauksessa (kuva 6.14). Hakkurin pysäyttämisen jälkeen, ylijännitesäätimen ohjaamassa jännitteessä näkyy vastaavanlainen vaihtelu kuin kuvassa 6.12, jolloin järjestelmää ajettiin ilman energiavarastoa.



Kuva 6.14. Testilaitteistosta mitattu välipiirin jännite energiavaraston täytyessä ajanhetkellä 9 s

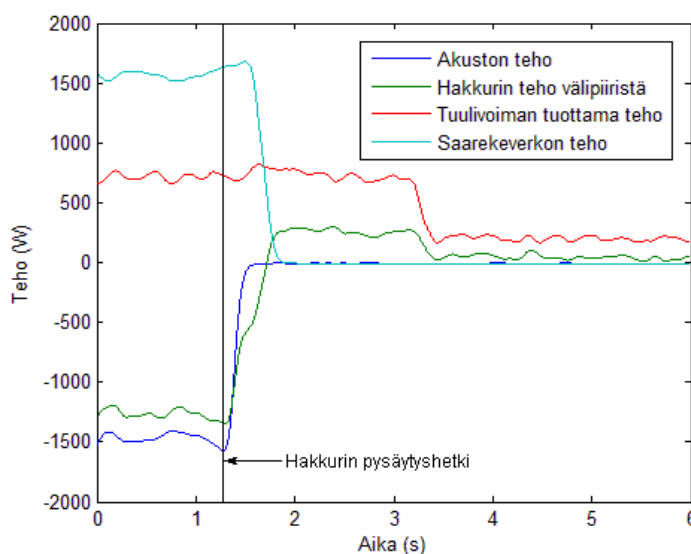
6.3.3 Toiminta energiavaraston tyhjentyessä

Jollei saarekeverkkojärjestelmään ole liitetty ulkoista, olosuhteista riippumatonta vara-voimaa, kuten dieselgeneraattoria, voi energiavarasto tyhjäntyä. Kuten edellisistä testeistä huomattiin, laitteisto kykenee toimimaan ilman energiavarastoa, jos tuotantoa on riittävästi, mutta tilanteessa, jossa kulutusteho ylittää tuotantotehon ja energiavarasto ei vian tai kapasiteetin loppumisen vuoksi kykene antamaan energiaa, seuraa välipiirin jännitteen aleneminen ja siitä johtuva saarekeverkon alasajo.

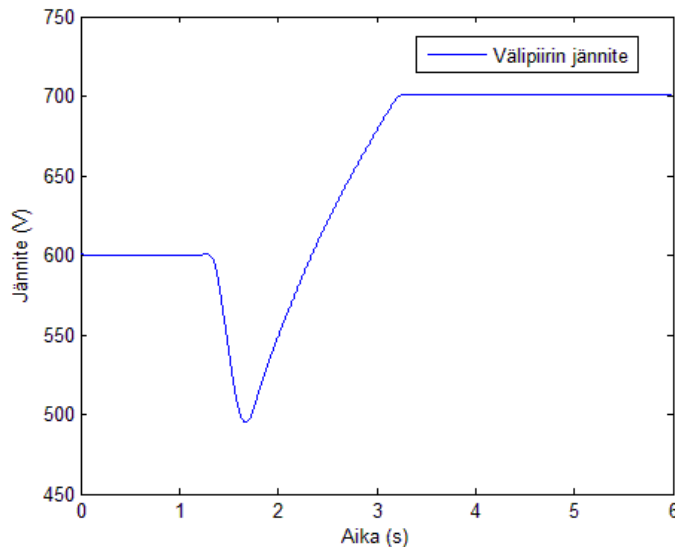
Kuvassa 6.15 on esitettyä mitatut tehot testissä, jossa hakkuri pysäytettiin ajanhetkellä 1,3 sekuntia, jolloin kulutusteho oli tuotantotehoa suurempi. Akuston tehon kuvaajasta voidaan nähdä ajanhetki, jolloin hakkuri kytkettiin pois toiminnasta ja akuston teho laske nollaan. Kuitenkin saarekekonvertteri piti saarekeverkon toiminnassa pienen hetken hakkurin pysäyttämisen jälkeen, koska hakkuri kykeni lyhyen aikaa antamaan tehoa saarekekonvertterin välipiiriin. Tämä ilmiö johtuu jälleen hakkurin kondensaattorista, johon on varastoitunut jonkin verran tehoa, joka siirtyi saarekekonvertterin välipiiriin hakkurin pysäyttämisen jälkeen.

Välipiirin jännitteen kuvaajasta (kuva 6.16) nähdään, kuinka välipiirin jännite laskee, kun energiavarasto kytketään pois toiminnasta, koska kulutusteho ylittää tuotantotehon. Välipiirin jännitteen saavuttaessa määritetyn alarajan, saarekekonvertteri ajaa saarekeverkon alas, jolloin kulutusteho putoaa nollaan ja välipiirin jännite lähtee uudelleen nousemaan, koska tuuliturbiinilta tulee edelleen tehoa.

Välipiirin jännitteen noustessa mitattu hakkurin teho on positiivinen hetken aikaa (kuva 6.15), koska sen kondensaattori latautuu jälleen. Välipiirin jännite nousee, kunnes tuuliturbiinin suuntaajan ylijännitesäädin rajoittaa momenttia, mutta tuuliturbiinista otettava teho ei mene täysin nolllille vaan sieltä otetaan suuntaajien tyhjäkäyntihäviöiden verran tehoa.



Kuva 6.15. Testilaitteistosta mitatut tehot energiavaraston loppuessa ajanhetkellä 1,3 s



Kuva 6.16. Testilaitteistosta mitattu välipiirin jännite energiavaraston loppuessa ajankohdalla 1,3 s

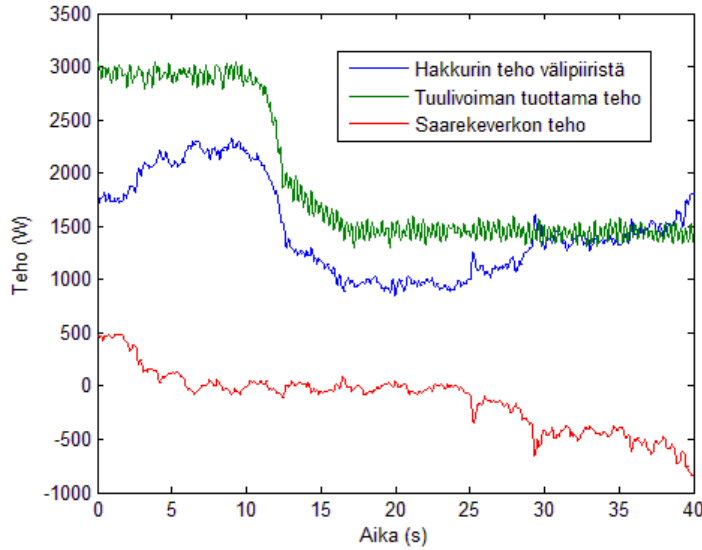
Saarekeverkon alasajon jälkeen tuuliturbiinilla voitaisiin jatkaa tyhjentyneen energiavaraston latausta ja saarekeverkko voitaisiin käynnistää uudelleen, kun energiavarastossa olisi riittävästi kapasiteettia. Kuitenkin jollei tuotantoa voitaisi kasvattaa tai kulutusta saarekeverkossa pienentää, energiavarasto tyhjentyisi uudelleen ja saarekeverkko ajettaisiin alas uudelleen.

Keskitetyn hallinnan avulla saarekekonvertterille voitaisiin antaa tieto akuston vähäisestä kapasiteetista, jolloin saarekekonvertteri voisi jonkin aikaa rajoittaa saarekeverkon tehoa laskemalla sen jännitettä. Kuitenkin toimittaessa ilman laitteiden välistä kommunikaatiota saarekekonvertteri rajoittaa saarekkeen tehoa ainoastaan tilanteessa, jossa saarekekonvertteriin asetettu virtaraja ylittyy, ja saarekekonvertteri ajaa saarekeverkon jännitteen kokonaan alas, jos taas välipiirin jänniteraja alittuu tai ylittyy.

6.3.4 Saarekeverkon negatiivinen teho

Käytössä olevassa saarekeverkossa teho on aina positiivinen eli saarekekonvertterin luoma verkko ainoastaan kuluttaa tehoa, koska kaikki tuotanto kytketään välipiirin ennen saarekekonvertteria. Testilaitteistolla suoritettiin kuitenkin ajo, jossa saarekkeen teho ajetaan positiivisesta negatiiviseen. Tämä toteutettiin kääntämällä oikosulkukoneeseen kytketyn DC-koneen momentti erimerkkiseksi, jolloin DC-moottori pyrki kiihdyttämään saarekeverkon kuormana käytettyä oikosulkumoottoria.

Mittauksista (kuva 6.17) nähdään, että saarekkeen teho menee negatiiviseksi ja energiavaraston teho kasvaa. Tuuliturbiinin tuottamaa tehoa pienennettiin testin aikana, jotta akustoa ei turhaan ladata suurella virralla.



Kuva 6.17. Testilaitteistosta mitatut tehot saarekkeen tehon mennessä negatiiviseksi

Tehon tuottaminen saarekekonvertterilla on mahdollista kun DC-moottorissa käytetään samansuuntaista momenttia kuin oikosulkumoottorissa, jolloin koneikon pyörimisnopeus alkaa kiihtyä. Saarekekonvertteri ohjaa jännitettä siten, että saarekeverkon taajuus pysyy vakiona, jolloin oikosulkumoottori pyöri ylisynkronisella pyörimisnopeudella ja toimii kuten generaattori normaalissa sähköverkossa.

Kokeen perusteella huomattiin, että negatiivinen teho saarekeverkossa on mahdollista, mutta saarekeverkon turvallisuuden sekä laitteiden oikean toiminnan vuoksi tuotantoa ei kuitenkaan kannata kytkeä saarekeverkon puolelle, koska voi esimerkiksi syntyä tilanne, jossa saarekeverkkoon jää jännite, vaikka saarekekonvertteri sammutetaan, jolloin syntyy hallitsematon saarekeverkko.

7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä oli tavoitteen tutkia hajautetun tuotannon ja tehoelektroniikalla toteutetun saarekeverkon yhdistämistä siten, että tehotasapaino ylläpidetään energiavaran avulla. Lisäksi tutkittiin, saadaanko järjestelmä toimimaan ilman laitteiden välistä kommunikointia. Työn teoriaosuudessa käytiin läpi saarekeverkon toimintaa ja käyttökohteita sekä tehotasapainon ylläpitämistä eri tilanteissa. Käytännön osuus koostui laboratorioon rakennetusta testijärjestelmästä ja sen toimintaa mallintavasta simulaattorista.

Testilaitteisto koostui tuuliturbiinia mallintavasta koneikosta ja sen suuntaajasta, saarekekonverterterista ja siihen liitetystä kuormakoneikosta sekä energiavaran, johon kuului akusto ja dc/dc-hakkuri. dSPACE-järjestelmää käytettiin mittaustulosten tallentamiseen sekä säätämään välipiirin jännitettä hakkurin virtaohjeen avulla.

Simulaattorilla lasketut simulointitulokset verifioitiin testilaitteistolla, minkä lisäksi laitteiston toimintaa testattiin erilaisissa erikoistilanteissa, joita saattaa aiheuttaa energiavaran kapasiteetin rajoitukset tai siihen liitetyn hakkurin vikatilanteet. Simulointitulokset vastasivat pääosin hyvin todellisesta laitteistosta saatuja mittaustuloksia. Laitteiston toiminta erikoistilanteissa vastasi myös sille asetettuja odotuksia.

Tuloksista voidaan päätellä, että on mahdollista rakentaa saarekeverkkoa syöttävä hajautetun tuotannon yksikkö, jossa käytetään akustoa energiavaran tasapainottamaan tuotantoa ja kulutusta, ja että yksikön tehoelektroniikkalaitteet saadaan toimimaan yksinkertaisimmillaan ilman keskinäistä kommunikointia. Oikealla energiavaran mitoituksella voidaan saarekeverkkoa ylläpitää haluttu aika, vaikka tuotanto ei vastaisi kulutusta. Saarekeverkkoa voidaan myös ylläpitää ilman energiavaraa, kunhan tuotanto riittää kattamaan kulutuksen.

Tämä työ oli teknistä konseptitutkimusta, josta tehoelektroniikkalaitteiden häviöitä ja hyötysuhteita ei varsinaisesti huomioitu ja jossa konseptin taloudellista kannattavuutta ei tutkittu. Työ liittyy SGEM-tutkimushankkeeseen ja sen tulokset ovat hyödynnettävissä jatkotutkimuksessa ja pilottihankkeiden suunnittelussa.

LÄHTEET

ABB. PCS100 ESS, 100 kVA to 10 MVA Energy Storage System [tuote-esite]. [viitattu 17.3.2011] Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/07f37ae6a964ae9f482578460073e90d/\\$file/2ucd301111_b%20pcs100%20ess.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/07f37ae6a964ae9f482578460073e90d/$file/2ucd301111_b%20pcs100%20ess.pdf)

ABB. 2006. ACS800-11 Hardware Manual Drives 5.5 to 110 kW [käyttöohjekirja].

Alahuhtala, J., Haakana, J., Järventausta, P., Kaipia, T., Kannus, K., Lahti, K., Lana, A., Lassila, J., Makkonen, H., Mäkinen, A., Niemelä, M., Nikander, A., Nousiainen, L., Nuutinen, P., Paajanen, P., Partanen, J., Peltoniemi, P., Pinomaa, A., Pyrhönen, J., Rekola, J., Salonen, P., Silventoinen, P., Sunttila, T., Suntio, T., Tuusa, H., Vornanen, T. & Voutilainen, V. 2010. Tehoelektroniikka sähkönjakelussa – Pienjännitteinen tasasähkönjakelu. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 170 s.

Alanen, R., Koljonen T., Hukari S. & Saari P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. Espoo, VTT. 169 s. + liitt. 60 s.

Alanen, R. & Pasonen, R. 2011. Use of energy storages in Smart Grids management. Espoo, VTT. 110 s.

Antila, S., Komsu, R., Lähdeaho, T., Niiranen, J. & Routimo, M. 2010. Experiences from a Back-to-Back Converter fed Village Microgrid. Helsinki, ABB. 5 p.

Bauer, P., Kumar, Rajen, E., Weldemariam, L.E. 2011. Connecting Topologies of Stand alone Hybrid Power Systems. PCIM Europe 2011, Nuremberg, Germany, May 17-19, 2011. Offenbach, Berlin, VDE VERLAG GMBH. pp- 304-310.

Bragard, M., De Doncker, R., Soltau, N. & Thomas, S. 2010. The Balance of Renewable Sources and User Demands in Grids: Power Electronics for Modular Battery Energy Storage Systems. In: IEEE. Transactions On Power Electronics, Vol. 25, No. 12. IEEE. pp. 3049-3056

Dekkiche, A.-I., Dessaint, L -A. & Tremblay, O. 2007. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. In: Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE. pp. 284-289

Eriksson, L. & Toivonen, E. 2006. Kontinosturin sumea säätö. [Kurssimateriaali] Teknillinen korkeakoulu, Aalto yliopisto. 19 s. [Viitattu 26.10.2011] Saatavissa: https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/as-0.2230/materiaali/tyo_8__tyoohje_2.pdf

Fingrid Oyj. 2009. Liittymissäännöt tuulivoimaloiden liittämiseksi Suomen voimansiirtoverkkoon. 13 s. [viitattu 27.7.2011] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/attachments/fi/toimikunnat/verkkotoimikunta/liittsaannot_tuulivoimalat.pdf

Hemminki, A. 2005. Vaihtosuuntaajan ohjaus dSPACE:lla. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma, 101 s.

Hirvonen, R. 2003. Suomen energiavisio 2030 [Suomenkielinen tiivistelmä]. VTT. 32 s. [viitattu 16.3.2011] Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf

Hännikäinen, S. 2010. Akuston liittäminen hybridijärjestelmään. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Automaatiotekniikan koulutusohjelma, 71 s.

Ingeteam. Ingecon Hybrid [tuote-esite]. s. 46-51. [viitattu 16.3.2011] Saatavissa: http://www.ingetteam.com/castellano/Contenido/referencias%5Cnueva%5CIS_Ingles.pdf

ITACA. 2005. A Guide To Photovoltaic Panels [WWW]. [viitattu 16.3.2011]. Saatavissa: <http://www.itacanet.org/eng/elec/solar/pv2.htm#cells>

Jussila, T. 2010. ASE-1250 Järjestelmien ohjaus 2010 [Kurssimateriaali]. Systemiteknikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. 296 s. [Viitattu 26.10.2011] Saatavissa: <http://www.ac.tut.fi/aci/courses/ASE-1250/pruju.pdf>

K2 Energy Solutions, Inc. LFP300HES Energy Module Data Sheet [datalehti]. [viitattu 19.2.2011] Saatavissa: <http://liionbms.com/pdf/k2/LFP300HES.pdf>

Lapp, T. 2009. Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä Kiilto Oy:ssä. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. 94 s. + liitt. 3 s.

Mauno, O. Lineaarialgebran alkeet [WWW]. Teknillinen korkeakoulu. 2004. [viitattu 3.5.2011]. Saatavissa: <http://matta.hut.fi/mattafi/linis/linis.html>

Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry. 2009. Tuulivoimaloiden säätötavan mukainen luokitus [WWW]. [viitattu 20.10.2011]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/saatotapa>

MSc electronics Oy. 2009. MSc 200 DCDC 750 User's Manual [käyttöohjekirja].

Muhonen, T. 2009. DC/DC- suuntaajan hyötysuhdekartat. ENTALT-projekti.

NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2009. Distributed Energy Basics [WWW]. [viitattu 20.2.2011]. Saatavissa:

http://www.nrel.gov/learning/eds_distributed_energy.html

Nyberg, J. 2008. Tuulivoimaloiden verkkoonliittämisen vaatimukset jakeluverkon suojausten kannalta. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma, 100 s. + liitt. 18 s.

Paap, G.C., van der Sluis, L. & van Voorden, A.M. 2005. The Use of Batteries in Stand-alone Renewable Power Systems. In: Power Tech. IEEE. pp. 1-6

Pasonen, R. 2010. Community Microgrid - A building Block of Finnish Smart Grid. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. 107 s. + liitt. 4 s.

Pienvesivoimayhdistys ry. 2009. Pienvesivoimalaopas. 28 s.

Pokkinen, O. 2011. Tuulivoimakäytön laboratoriotestausjärjestelmä. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma, 86 s.

Repo, S. & Koponen, P. 2007. Sähkönjakeluverkon saarekekäytön mahdollisuudet. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikka. 37 s.

Salo, M. Sähkökäyttöjen ohjaustekniikka [Luentomoniste]. Tampereen teknillinen yliopisto. 2008.

Sederlund, J. 2008. Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä. Fingrid [verkkolehti]. 3/08, s. 30-31. [viitattu 16.3.2011]. Saatavissa:

http://www.fingrid.fi/attachments/fi/media/julkaisut/digipaper_03_08_fi/

Seppänen, R., Tiihonen, S., Wuolijoki, H., Kervinen, M., Smolander, J., Haavisto, A., Karkela, L. & Varho, K. 2001. MAOL-taulukot. 3. painos. Helsinki, Otava Oy. 159 s.

Sähköenergialiitto ry Sener. 2001. Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon. Helsinki, 26 s.

International Energy Agency (IEA). 2010. Technology Roadmaps - Solar photovoltaic energy [WWW]. [viitattu 17.2.2011]. 43 p. Saatavissa:

http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf

International Energy Agency (IEA). 2009. Technology Roadmaps - Wind Energy [WWW]. [viitattu 15.2.2011]. 48 p. Saatavissa:
http://www.iea.org/papers/2009/Wind_Roadmap.pdf

Tselepis, S. Field Tests on Actual Microgrids [konferenssiesitys]. Paris, France, MICROGRIDS. 29.11.2010 [viitattu 5.5.2011]. Saatavissa:
http://www.microgrids.eu/documents/S._Tselepis_The_Kythnos_Microgrid.pdf

Vassallo, A. & Paul, G. 1998. Effect of Time Constant on Power Capability of Supercapacitors [WWW]. CAP-XX Pty Ltd. 5 p. [viitattu 26.10.2011]. Saatavissa:
http://www.cap-xx.com/resources/docs/ppr_1998_effect.pdf

VTT energia. 1999. Energia Suomessa. 2. Painos. Helsinki, Oy Edita Ab. 368 s.

Zigor Corporation S.A.. HIS/HIT T [tuote-esite]. World Future Energy Summit (WFES). 10.12.2010. [viitattu 5.5.2011] Saatavissa:
http://www.worldfutureenergysummit.com/Files/his_hit_t_en.pdf