



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**Sähköverkosta irti olevan pienhybridijärjestelmän
toteutus**
Implementation of small off-grid hybrid system

Perttu Suikkanen

Ville Kenttämaa

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Perttu Suikkanen
Ville Kenttämaa
Sähköverkosta irti olevan pienhybridijärjestelmän toteutus

2014

Kandidaatintyö.
61 sivua, 24 kuvaa, 5 taulukkoa ja 5 liitettä.

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen ja tutkimusjohtaja Markku Niemelä.
Hakusanat: Hybridijärjestelmä, tuulivoima, aurinkovoima, lataussäädin.

Kiitokset: Haluamme esittää kiitokset työn ohjaajille Olli Pyrhöselle ja Markku Niemelälle, ja partiolippukunta Lappeen Sinisten yhteyshenkilöille sekä laboratoriomittaukset järjestäneelle Kyösti Tikkaselle.

Lappeen siniset –partiolippukunnalla on käytössään leiripaikka Humaljärvellä, Lappeenrannassa. Leiripaikalla ei ole liityntää sähköverkkoon, joten leiripaikalle on asennettu kaksi erillistä aurinkovoimalla toimivaa sähköjärjestelmää. Leiripaikan sähköistetyt rakennukset ovat pääkämpä ja saunan sekä vanhan kämpän muodostama kokonaisuus. Aurinkopaneeleilla tuotettu sähköenergia varastoidaan akustoihin. Lippukunta on havainnot käytössä, ettei talvella tuotettu aurinkoenergia riitä kattamaan pääkämpän sähkönkulutusta, joten leiripaikalle on päätetty hankkia tuulivoimaa lisäämään tuotantoa.

Tässä kandidaatin työssä esitellään hybridijärjestelmään kuuluvien aurinko- ja tuulivoiman toimintaperiaatteita sekä näiden komponentteja. Aurinko- ja tuulivoimalla tuotetulle sähköenergialle lasketaan arviot, joita verrataan leiripaikan sähköjärjestelmän arvioituun kulutukseen. Leiripaikalle tulevaa tuuliturbiinia ja sen lataussäädintä testataan laboratoriossa, jotta varmistutaan niiden soveltuvuudesta sekä toimivuudesta kohteeseen. Testausten ja laitteiden datalehtien avulla suunnitellaan leiripaikalle toimiva hybridijärjestelmä, joka kattaa leiripaikan ympärivuotisen sähkönkulutuksen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Perttu Suikkanen
Ville Kenttämaa
Implementation of small off-grid hybrid system

2014

Bachelor's Thesis.
61 pages, 24 pictures, 5 tables and 5 attachments.

Examiners: Professor Olli Pyrhönen and D.Sc. Markku Niemelä.

Scout group Lappeen siniset has a campsite which is situated onshore lake Humaljärvi in Lappeenranta. Campsite has two separated solar power electricity systems. Electrified buildings are main cabin and sauna with old cabin. Energy produced by solar panels is stored to battery banks. Scout group has noted that consumption in main cabin in winter is more than solar panels can produce electricity. Result from that scout group has decided to enhance electricity production by upgrading the system with a wind turbine.

This bachelor's thesis' presents hybrid systems principles and it's components. Electricity produced by solar panels and wind turbine are estimated and compared to campsite's estimated consumption. Wind turbine and charge controller are tested in laboratory conditions to clarify components and systems functionality. By using results from laboratory and devices data sheets we design hybrid system which covers electricity consumption year-round.

Sisällysluettelo

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	6
1. JOHDANTO	8
2. HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	10
2.1 HYBRIDIJÄRJESTELMÄ	10
2.2 AURINKOVOIMA	12
2.3 TUULIVOIMA	14
2.3.1 Tuulivoimalatyypit	16
2.3.2 Pientuulivoima	18
2.4 LATAUSSÄÄTIMET	20
2.5 AKUSTO	21
2.5.1 Akkutyyppin valinta	22
2.6 KAAPELIT	23
2.7 KÄYTETTÄVÄT LAITTEET	25
3. SÄHKÖENERGIANTUOTANNON JA -KULUTUKSEN ARVIOINTI	27
3.1 VUOTUINEN JÄRJESTELMÄN ENERGIANKULUTUS	27
3.2 VUOTUINEN ENERGIANTUOTANTO AURINKOVOIMALLA	28
3.3 VUOTUINEN ENERGIANTUOTANTO TUULIVOIMALLA	29
3.4 KULUTUKSEN JA TUOTANNON TASAPAINO	33
4. LAITTEIDEN TESTAUS	34
4.1 TUULIGENERAATTORIN TESTAUS	34
4.1.1 Tuuligeneraattorin tuottama teho	36
4.1.2 Tuuligeneraattorin hyötysuhde	36
4.1.3 Tuuligeneraattorin oikosulkuvirta	37
4.2 LATAUSSÄÄTIMEN TESTAUS	38
4.2.1 Lataussäätimen herääminen	39
4.2.2 Lataussäätimen syöttämä teho?	39
4.2.3 Akkujen lataaminen	40
4.2.4 Eri varaustilanteissa olevien akkujen lataaminen	44
4.2.5 Lataussäätimen tasavirtakuorma ja virrankulutus	45
5. JÄRJESTELMÄRATKAISUT	47
5.1 LABORATORIOTESTAUKSESSA SIMULOITU HYBRIDIJÄRJESTELMÄ	47
5.2 TESTATUN LATAUSSÄÄTIMEN KÄYTTÄMINEN OSANA HYBRIDIJÄRJESTELMÄÄ	48
5.3 VAIHTOEHTOINEN JÄRJESTELMÄRATKAISU	50
5.4 TUULIVOIMALAN SIIJOITUS	51

5.4.1	<i>Kaapelihäviöt</i>	52
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	56
	LÄHTEET	57
	LIITTEET	62

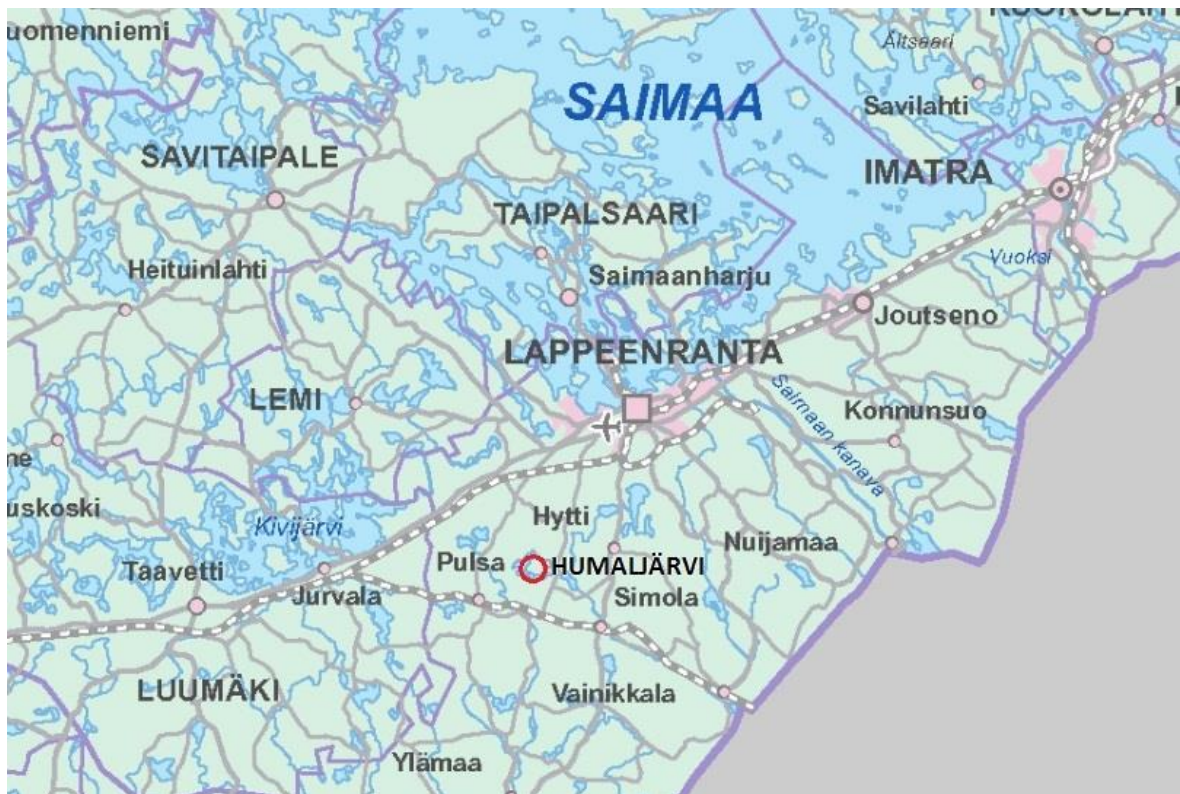
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

MPPT	Maximum Power Point Tracking, maksimi tehopisteen määrittäminen	
PWM	Pulse-width Modulation, pulssinleveysmodulaatio	
STC	Standart Test Conditions, standardin mukaiset mittausolosuhteet	
A_j	johtimen poikkipinta-ala	[m ²]
A_{pv}	aurinkopaneelin pinta-ala	[m ²]
A_t	tuulivoimalan pyyhkäisypinta-ala	[m ²]
C_{Betz}	Betzin kerroin	
C_p	tuuliturbiinin aerodynaaminen tehokerroin	
d	päivä	
E_{pv}	aurinkopaneelin tuottama energia	[Wh]
E_t	tuulivoimalan tuottama energia	[Wh]
f	taajuus	[Hz]
G	Auringon säteilyteho	[W/m ²]
H	Auringon säteilyenergia	[Wh/m ²]
I	näennäisvirta	[A]
I_{AC}	vaihtovirta	[A]
I_{DC}	tasavirta	[A]
I_k	keinokuorman virta	[A]
I_{max}	energianlähteiltä saatava maksimivirta	[A]
I_p	pätövirta	[A]
I_Q	loisvirta	[A]
k	tasasuunnatun jännitteen ja pääjännitteen tehollisarvon suhde	
L	induktanssi	[H]
l	pituus	[m]
n	pyörimisnopeus	[rpm]
P	teho	[W]
$P_{h,AC}$	kolmivaiheisen vaihtovirtakaapelin tehohäviö	[W]
$P_{h,DC}$	tehohäviö tasavirtakaapelissa	[W]
P_t	tuuliturbiinin sähköteho	[W]
P_{teor}	teoreettinen sähköteho	[W]
P_0	tuulen vapaan virtauksen teho	[W]
r	tuuliturbiinin pyyhkäisypinta-alan säde	[m]

R_{AC}	vaihtovirta resistanssi	[Ω]
R_{DC}	tasavirta resistanssi	[Ω]
R_k	keinokuorman resistanssi	[Ω]
t	aika	[s]
t_h	huipunkäyttöaika	[h]
T	lämpötila	[K]
T_n	sähkömoottorin nimellispisteen vääntömomentti	[Nm]
T_s	suhteellinen vääntömomentti	[%]
U	jännite	[V]
U_a	akuston jännite	[V]
U_{AC}	vaihtojännite	[V]
U_{DC}	tasajännite	[V]
$U_{h,AC}$	jännitteenalenema	[V]
X_{AC}	vaihtovirtakaapelin reaktanssi	[Ω]
W_p	aurinkopaneelin nimellisteho	[W]
w_a	tuulen nopeus	[m/s]
α	resistiivisyyden lämpötilakerroin	[1/K]
η_g	generaattorin hyötysuhde	
η_{mek}	turbogeneraattori hyötysuhde	
η_{pv}	aurinkopaneelin hyötysuhde	
φ	vaihe-ero	[°]
λ	kärkinopeussuhde	
ω	roottorin kulmanopeus	[rad/s]
ρ_a	ilman tiheys	[kg/m ³]
ρ_0	ominaisresistiivisyys	[Ωm]

1. JOHDANTO

Lappeen Siniset -partiolippukunnalla on leiripaikka Lappeenrannassa, Humaljärven rannalla, jossa ei ole liityntää sähköverkkoon. Kuvassa 1.1 on esitetty leiripaikan sijainti Lappeenrannan eteläpuolella. Leiripaikalla on tapahtumia vuoden ympäri, joten sähkön tarve on myös ympärivuotinen. Leiripaikalla on asennettuna neljä 100 W aurinkopaneelia, joista kaksi on pääkämpällä ja loput kaksi saunalla. Molemmat aurinkopaneeliparit muodostavat erilliset sähköjärjestelmät, jotka lataavat omia akustojaan. Akustojen lataamista säätelevät aurinkovoimalle soveltuvat lataussäätimet. Saunan vieressä oleva vanha kämpppä on liitetty saunan sähköjärjestelmään.



Kuva 1.1 Lappeen Sinisten partiokämpän sijainti. (Maanmittauslaitos)

Lippukunta on havainnut käytössä, ettei talvella saatava aurinkoenergia riitä kattamaan pääkämpän kulutusta. Saunan sähköjärjestelmä tuottaa enemmän energiaa ja tuotanto on riittävää myös talvisin. Pääkämpän ja saunan akustot on jouduttu vaihtamaan talvisin keskenään, jolla on varmistettu keskeyttämätön sähkönkäyttö pääkämpällä.

Huonon talvituotannon takia lippukunta on päättänyt hankkia leiripaikalle tuulivoimalan varmistamaan ympärivuotisen sähkönkäytön. Lippukunta on saanut lahjoituksena nimellisteholtaan 600 W tuuliturbiinin ja siihen sopivan lataussäätimen, jotka aiotaan liittää

yhteen aurinkopaneelien kanssa muodostaen pienhybridijärjestelmän. Pienhybridijärjestelmällä tarkoitetaan tässä työssä nimellisteholtaan alle 1 kW olevan tuulivoimalan ja alle 600 W aurinkopaneelijärjestelmän muodostamaa sähköjärjestelmää. Järjestelmä on tarkoitus rakentaa vuoden 2014 kesällä.

Tässä työssä suunnitellaan leiripaikalle toimiva hybridijärjestelmä, joka kattaa energiankulutuksen ympäri vuoden. Järjestelmä pyritään lähtökohtaisesti toteuttamaan lahjoitetuista ja olemassa olevista laitteista. Tuulivoimalan ja sen lataussäätimen toimintaa mallinnetaan laboratorio-olosuhteissa, jotta niiden soveltuvuudesta suunniteltavaan järjestelmään voidaan olla varmoja. Laboratoriotuloksia käytetään apuna yhdessä laitevalmistajien datalehtien kanssa. Työssä suunnitellaan lisäksi vaihtoehtoinen hybridijärjestelmä, missä käytetyt komponentit ovat valittu leiripaikan vaatimusten mukaan.

2. HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

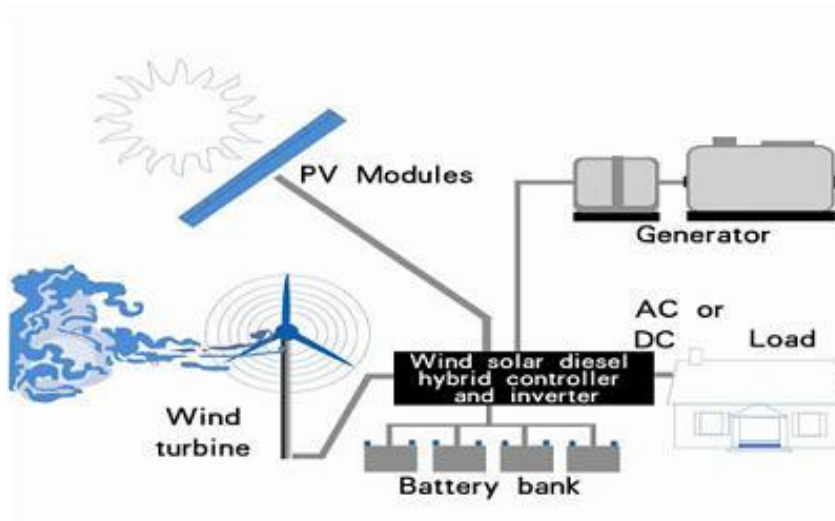
Tutustutaan hybridijärjestelmän periaatteeseen ja sen toteuttamiseen tarvittaviin laitteisiin sekä niiden toimintaan. Hybridijärjestelmään kuuluvat aurinkopaneelien ja tuulivoimalan lisäksi akut, lataussäätimet ja kaapelit. Lisäksi kappaleessa esitellään leiripaikalla olevat laitteet ja lippukunnalle lahjoitetut lataussäädin sekä tuuligeneraattori.

2.1 Hybridijärjestelmä

Hybridijärjestelmässä sähköenergiaa tuotetaan yhdessä kahden eri energialähteen avulla, yleensä aurinko- ja tuulienergian avulla. Energiaa voidaan tuottaa hybridijärjestelmissä myös vesivoiman avulla, pienellä vesiturbiinilla. Hybridijärjestelmää voidaan käyttää lataamaan akustoa tai kytkeä se osaksi rakennuksen omaa sähköjärjestelmää. Akustoa ladattaessa hybridijärjestelmän avulla sähköverkosta eristetyissä järjestelmissä, voidaan lisätä sähkönsaannin varmuutta vuorokaudenajasta tai vuodenajasta riippumatta. Hybridijärjestelmää voidaan käyttää myös osana rakennuksen sähköverkkoa lisäten näin sähkönsaannin omavaraisuutta ja pienentäen näin sähkön kulutuksesta aiheutuvia kustannuksia. Tässä työssä keskitytään ainoastaan työn kohteena olevan partiokämpän kaltaisiin, sähköverkosta eristettyihin järjestelmiin. (Kaldellis 2010)

Hybridijärjestelmä on hyvä vaihtoehto sähkön tuottamiseen kohteissa, joissa sähköverkkoon liittyminen on kallista tai liittymishaara kasvaa pitkäksi. Jos valitaan kohteeseen ainoastaan jompikumpi sähköenergian tuotantotapa, huononee sähkönsaannin varmuus ja varavoiman merkitys kasvaa. Varavoiman käyttö, esimerkiksi aggregaatti, lisää pidemmällä aikavälillä sähköntuotantokustannuksia. Hyviä esimerkkejä tämääntapaisista sähköverkosta erillään olevista kohteista ovat Suomessa kesämökit, jotka sijaitsevat saarella, kaukana sähköverkosta.

Tutustutaan tarkemmin sellaisen hybridijärjestelmän komponentteihin, toimintatapaan ja kytkentöihin, jossa ei ole saatavilla verkkosähköä. Kuvassa 2.1 on esitetty erään sähköverkosta erillään olevan hybridijärjestelmän kaaviopiirros.



Kuva 2.1 Sähköverkosta eristetyn hybridijärjestelmän kaaviopiirros. (SRM Wind Power Company)

Kuvasta 2.1 nähdään, että tuuliturbiinin ja aurinkopaneelien sekä akuston väliin on liitetty lataussäädin. Lataussäätimen tehtävänä on estää akkujen yllilataus, syväpurkaus ja vuotovirrat takaisin aurinkopaneeleille tai tuuligeneraattorille. Lataussäätimiä on erikseen aurinkopaneeleille, tuuligeneraattoreille ja niin sanottuja hybridilataussäätimiä, jotka soveltuvat molemmilla sähköntuotantotavoilla tuotetun sähköenergian säätämiseen samanaikaisesti. Lataussäätimiä käsitellään tarkemmin myöhemmin tässä työssä.

Vaikka verkosta eristetty hybridijärjestelmä oikein mitoitettuna kattaakin hyvällä todennäköisyydellä kaiken pienen rakennuksen kulutuksen, kannattaa hätätapauksia varten varata varavoimala. Varavoimala voi olla aggregaatti, joka voidaan kytkeä lataamaan akkuja. Hybridijärjestelmä tuottaa varavoimaa lukuun ottamatta täysin uusiutuvaa energiaa eikä se tuota kasvihuonekaasuja tai muita päästöjä.

Hybridijärjestelmän investointikustannus on kohtalaisen suuri. Suuri hankintakustannus voi karkottaa mahdollisia investoijia, mutta pitkällä aikavälillä käyttökustannus on matala. Hybridijärjestelmä usein myös ylimitoitetaan, koska suunnittelija yrittää kattaa järjestelmän energian tarpeen kullakin energiantuottotavalla. Energiantuottotapojen erilainen teknologia voi aiheuttaa myös ongelmia suunnittelijalle, etenkin elektronisten säätöjärjestelmien osalta. (Kaldellis 2010)

2.2 Aurinkovoima

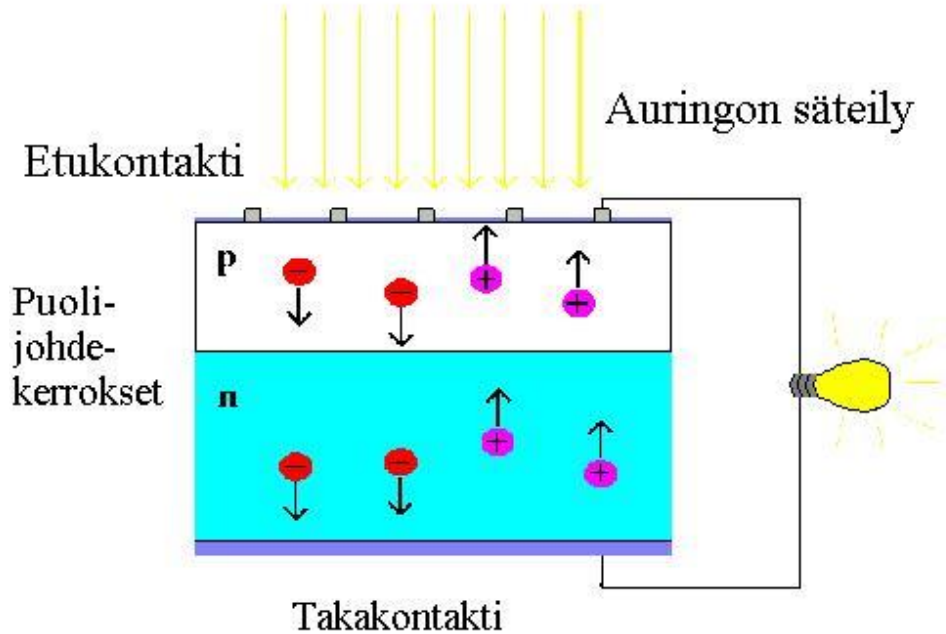
Auringon sähkömagneettinen säteily voidaan muuttaa aurinkopaneelien avulla suoraan sähköenergiaksi. Aurinkopaneeleissa ei ole liikkuvia osia, jonka johdosta ne vaativat vähän huoltoa ja niiden käyttöikä on pitkä. Paneelien avulla tuotettu sähkö ei tuota saasteita eikä kasvihuonekaasuja, jos paneelien valmistukseen kuluva energia sekä päästöjä ei oteta huomioon. Valmistukseen kuluneen energian tuotannosta aiheutuvien päästöjen takaisinmaksuaika on noin 3-4 vuotta (NREL 2004). Aurinkopaneeleista koostuvia systeemejä voidaan rakentaa minkä kokoisina tahansa, aina milliwatteista megawatteihin. Lisäksi systeemien kokoa voidaan muuttaa, sillä paneeleita voidaan helposti kytkeä sarjaan muuttaen näin paneeleista saatavaa kokonaistehoa. (Kaligirou 2009) Kuvassa 2.2 on esitetty nimellisteholtaan 250 W monikidepaneeli.



Kuva 2.2 Nimellisteholtaan 250 W monikidepaneeli. (Yingli Solar)

Aurinkopaneelin sähköenergian tuottaminen tapahtuu aurinkokennojen avulla, joiden materiaalina käytetään yleisimmin maaperästä saatavaa piitä. Aurinkokennot voivat olla, joko yksi- tai monikiteisiä. Yksikiteinen aurinkokenno koostuu yhdestä kasvatetusta piikiteestä, joka sahataan kiekoksi, muodostaen yhden aurinkopaneelin kennon. Yksikiteisen piin etu monikiteiseen verrattuna on parempi hyötysuhde, mutta koska monikiteinen kenno on edullisempi valmistaa, on sen markkinaosuus suurempi (Finnwind). Kennot koostuvat kahdesta puolijohdekerroksesta, joiden välille syntyy jännite

valosähköisen ilmiön vaikutuksesta. Aurinkokennon toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.3. (Kaligirou 2009)



Kuva 2.3 Aurinkokennon toimintaperiaate. (TKK)

Auringon sähkömagneettinen säteily koostuu fotoneista, jotka osuessaan aurinkokennoon irrottavat elektroneja sen materiaalista. Fotonien energia siirtyy positiivisille ja negatiivisille varauksenkuljettajille, jotka pääsevät liikkumaan vapaasti kennossa. Aurinkokenno koostuu p- ja n-puolijohdemateriaaleista, jotka eroavat toisistaan varausjakaumansa suhteen. Varausjakaumien ero synnyttää kennon sisälle sähkökentän, joka vie auringonvalon vapauttamat positiiviset ja negatiiviset varauksenkuljettajat eri suuntiin kennossa. Liittämällä kenno osaksi suljettua sähköpiiriä saadaan aikaan sähkövirta. Halutun suuruinen jännite saadaan aikaan kytkemällä tarvittava määrä aurinkokennoja sarjaan. (TKK)

Aurinkopaneeli määritellään yleensä niiden tuottaman nimellistehon W_p perusteella, mikä tarkoittaa paneelin suurinta mahdollista tehontuottoa. Nimellisteho määritellään STC - olosuhteissa (Standard Test Conditions), jonka mukaan paneelin maksimiteho saavutetaan, kun Auringon säteilyteho G on 1000 W/m^2 ja kennon lämpötila on $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Aurinkopaneelin tuottaman energia E_{pv} tietyllä ajanjaksolla voidaan laskea yhtälöllä

$$E_{pv} = \int_0^t \eta_{pv} A_{pv} H dt, \quad (2.1)$$

missä η_{pv} on paneelien hyötysuhde, A paneelien pinta-ala ja H Auringon säteilyenergia ajanjaksolla. Piistä valmistettujen yksikiteisten aurinkokennojen hyötysuhde on tällä hetkellä noin 17 % ja monikiteisistä valmistettujen noin 16 % (Pyrhönen 2014). Aurinkopaneelin hyötysuhde voidaan myös arvioida yhtälöllä

$$\eta_{pv} = \frac{W_p}{GA_{pv}}, \quad (2.2)$$

missä Auringon säteilytehona käytetään STC –olosuhteiden mukaista säteilytehoa 1000 W/m².

Aurinkopaneelilta vuodessa saatava sähköenergia voidaan myös laskea paneelin nimellistehon avulla yhtälöllä

$$E_{pv} = W_p t_h, \quad (2.3)$$

missä t_h on aurinkopaneelin tarkastelujakson huipunkäyttöaika tunneissa. (Kalogirou 2009) Huipunkäyttöajalla tarkoitetaan sitä, että aurinkopaneelista saadaan tarkasteltavana olevan ajanjakson aikana energiaa yhteensä määrä, joka vastaa paneelin toimimista huipunkäyttöajan verran nimellistehollaan. Aurinkokennojen huipunkäyttöaika on Etelä-Suomessa noin 900-1000 tuntia. Vuotuinen aurinkopaneelilla tuotettu energia vastaa kennon toimimista nimellistehollaan huipunkäyttöajan verran. Esimerkiksi 100 W nimellistehoinen aurinkopaneeli tuottaa Etelä-Suomessa vuodessa suurimmillaan noin 100 kWh sähköä. (Finnwind)

2.3 Tuulivoima

Tuulivoima tarkoittaa tuulen kineettisen energian muuttamista ensin turbiinin mekaaniseksi energiaksi, jonka jälkeen generaattori muuttaa sen sähköenergiaksi. Tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeus kasvaa suoraviivaisesti tuulennopeuden kasvaessa. Tuulen syntymiseen vaikuttaa maapallon epätasainen lämpeneminen ja jäähtyminen. Epätasaisen lämpenemisen vaikutuksesta kylmää ilmaa virtaa kohti lämpimämpiä alueita ja lämmintä ilmaa kohti kylmiä alueita muodostaen näin ilman virtausta, tuulta. (Emeis 2013)

Tuulivoima on nostanut suosiotaan energiantuotannossa fossiilisten polttoaineiden hinnan nousun myötä ja ympäristötietoisuuden kasvaessa. Uusiutuvana energiana tuulivoima on ympäristöystävällinen ja varma energiantuotantomuoto, joka ei saastuta ympäristöä eikä

tuota kasvihuonepäästöjä asennuksen ja valmistuksen jälkeen. Tuulivoiman varmuus perustuu tuulen jatkuvaan esiintymiseen ja fossiilisten polttoaineiden varantojen huvetessa tuulivoiman sekä muiden uusiutuvien energiamuotojen merkitys kasvaa. Tuulienergiaa on saatavilla tasaisesti ympäri Maapalloa, joten sen hyödyntämisen mahdollisuudet ovat suuret. (Tiwari 2012)

Tuulivoimalan tärkeimmät osat ovat masto, roottori ja naselli. Maston avulla tuuligeneraattori saadaan sijoitettua hyvälle tuuliolosuhteille. Roottorin lapojen avulla tuulen kineettinen energia muutetaan roottorin mekaaniseksi energiaksi, pyörimisliikkeeksi. Roottorin pyörimisliikkeen avulla saadaan generaattorissa synnytettyä sähköenergiaa, joka voidaan syöttää suoraan verkkoon tai etenkin pienempien tuulivoimaloiden kohdalla varastoida akustoon. Naselli pitää sisällään tuuligeneraattorin konehuoneen, vaihdelaatikon ja generaattorin sähköiset kytkennät.

Tarkastellaan tuuligeneraattorin tuottamaa sähköenergiaa, joka tuotetaan tuulen kineettisen energian avulla. Tuulen vapaan virtauksen teho P_0 saadaan yhtälöstä

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_a A_t w_a^3, \quad (2.4)$$

missä ρ_a on ilman tiheys, A_t voimalan pyyhkäisyypinta-ala ja w_a tuulennopeus. Suurin teoreettinen tuulesta saatava teho P_{teor} saadaan Betzin hyötösuhteen C_{Betz} avulla yhtälöllä

$$P_{\text{teor}} = C_{\text{Betz}} P_0. \quad (2.5)$$

Tuulen kineettisestä tehosta saatava sähköteho P_t saadaan yhtälöstä

$$P_t = \eta_{\text{mek}} C_p P_0, \quad (2.6)$$

missä η_{mek} sisältää mekaaniset sekä generaattorihäviöt ja C_p tuuliroottorin aerodynaamisen hyötösuhteen. Tuulella tuotettu sähköenergia E_t voidaan laskea halutulta ajanjaksolta yhtälöllä

$$E_t = \int_0^t P_t dt, \quad (2.7)$$

missä t on tarkasteltavan ajanjakson pituus ja P_t ajanjakson keskimääräinen teho. Tuuliroottorin aerodynaamiset häviöt riippuvat voimalan kärkinopeussuhteesta λ joka saadaan yhtälöstä

$$\lambda = \frac{\omega r}{w_a}, \quad (2.8)$$

missä ω on roottorin kulmanopeus ja r pyyhkäisyypinta-alan säde. Tuuligeneraattorin siiven kärkinopeussuhde on tärkeä apuväline kun tarkastellaan tuulivoimalan tehokerrointa. Kaikkien tuulivoimaloiden tehokerroin vaihtelee kullekin ominaisella tavalla. siiven kärkinopeussuhteen funktiona. Tämän takia suurten tuulivoimaloiden siiven kärkinopeussuhde halutaan pitää vakiona jokaisella tuulennopeudella, joka vastaa parasta mahdollista kyseisen tuulivoimalan tehokerrointa.

2.3.1 Tuulivoimalatyypit

Tuulivoimaloiden päätyypit ovat vaaka- ja pysty akselillä roottorilla varustetut tuuligeneraattorit. Yleisin tuulivoimalatyyppi on kolmilapaisella roottorilla ja vaaka-akselilla varustettu tuuligeneraattori. Vaaka-akselilla varustettu tuulivoimala asennetaan maston päähän, jonka avulla se saadaan sijoitettua paremmille tuuliolosuhteille. Kuvassa 2.4 on esitetty valmistajan Vestaksen nimellisteholtaan 660 kW suuruinen kolmilapainen tuulivoimala. (Hau 2013)



Kuva 2.4 Vestas V47-660kW tuuliturbiini.

Vaaka-akselinen tuulivoimala tulee kääntää aina tuulen suunnan mukaisesti niin, että tuulen virtaus on kohtisuorassa roottorin lapojen pyyhkäisyypinta-alaa nähden. Tämä tapahtuu suurilla tuulivoimaloilla säätöjärjestelmän ja pienillä tuuligeneraattorin perään asennetun pyrstön avulla. Tämän tapaisen voimalan tuottamaa tehoa ja sen roottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla roottorin lapojen asentoa. Lapojen asentoa muuttamalla voidaan tehokkaasti ehkäistä myös roottorin ylinopeus kovilla tuulen nopeuksilla. Lapojen säätöä käytetään erityisesti suurien tuulivoimaloiden kohdalla. Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden lapojen muoto voidaan optimoida aerodynaamisesti ja näin voidaan saavuttaa korkein mahdollinen hyötysuhde. Suuriin tämän tyyppisiin tuulivoimaloihin on asennettu vaihteisto, jonka avulla tuuligeneraattorin siiven kärkinopeussuhde saadaan pidettyä optimaalisella alueella, joka vastaa parasta mahdollista tuuligeneraattorin tehokerrointa. Juuri näiden ominaisuuksien takia lähes kaikki sähköntuotantoon tarkoitetut tuulivoimalat ovat vaaka-akselisella roottorilla varustettuja. (Hau 2013)

Pysty akselisen tuulivoimalan etuna on mahdollisuus asentaa mekaaniset ja elektroniset komponentit, vaihdelaatikko sekä generaattori maan tasalle. Tämän tapainen tuulivoimala voidaan asentaa helposti myös ahtaisiin kaupunkiympäristöihin, sillä se ei vie yhtä paljon tilaa kuin vaaka-akselilla varustettu tuulivoimala. (Hau 2013) Kuvassa 2.5 on esitetty pysty akselilla varustettuja Savonius –tyyppisiä tuulivoimaloita asennettuna osaksi rakennusta.



Kuva 2.5 Venger Wind V2 Savonius –tyyppiset tuulivoimalat asennettuna osaksi rakennusta.

Pysty akselinen tuulivoimala ei myöskään tarvitse rakenteensa puolesta tuulen suunnan mukaista suuntausta. Tämä voidaan myös laskea kyseisen tuulivoimalamallin haitaksi, koska siiven kärkinopeussuhde on tämän takia pysty akselilla voimalalla pieni. Pysty akselinen suuri tuulivoimala ei voi myöskään käynnistyä itsestään, vaan tarvitsee avustuksen pyörimisliikkeen aikaansaamiseksi. Roottorin siipien asentoa ei voida myöskään muuttaa säätämällä näin tuulivoimalan tuottamaa sähkötehoa. (Hau 2013)

2.3.2 Pientuulivoima

Tuulivoimaa käytetään kaupallisen sähkön tuottamiseen suurilla tuuligeneraattoreilla, jotka ovat usein sijoitettuja tuulipuistoihin. Toinen tuulivoiman käyttötapa on talokohtainen sähköntuottaminen, jossa tuotettu energia varastoidaan akustoon tai tuulivoimala on kytketty osaksi talon omaa sähköverkkoa. Tähän käyttötarkoitukseen soveltuvat

tuulivoimalat ovat usein pieniä, suurimmillaan muutamien kilowattien suuruisia generaattoreita. Tässä työssä perehdytään tarkemmin pientuulivoiman käyttöön.

Pientuulivoimalat ovat normin IEC 61400-2 mukaan voimaloita, joiden pyyhkäisyypinta-ala on alle 200 m², ja joka käytännössä tarkoittaa alle 50 kW:n laitteita. Tyypillisiä käyttökohteita pientuulivoimalle ovat esimerkiksi maataloudet, kotitaloudet ja vapaa-ajan asunnot. Pientuulivoimaa käytetään tällä hetkellä pääasiassa vain sellaisissa kohteissa, jotka eivät ole sähköverkon piirissä. Valtio ei tue Suomessa tällä hetkellä pientuulivoiman rakentamista eikä verkkoyhtiöt maksa välttämättä korvausta verkkoon syötetylle sähkölle. Tämän vuoksi pientuulivoima ei ole yleistynyt sähkönjakelun piirissä olevien asuinrakennusten keskuudessa.

Suomessa pientuulivoimaa käytetään pääsääntöisesti akkujen lataukseen järjestelmissä, joiden jännite vaihtelee välillä 12 V - 230 V, lämmitysenergian tuottamiseen rakennuksen lämmitysvesijärjestelmään ja lämpimän käyttöveden varaajaan. Verkkoon kytketyissä tuulijärjestelmissä sähköä tuotetaan suoraan omakotitalon sähköverkkoon, jolloin voimalan teho muutetaan verkkosähköksi ja voimala kytketään kiinteistön sähköjärjestelmään. Tuulivoimalla tuotettu ylijäämä syötetään sähköverkkoon ja vastaavasti alijäämä saadaan sähköverkosta. (Suomen tuulivoimayhdistys ry b)

Tuulivoimalatyypinä käytetään pääsääntöisesti perinteisiä potkurityyppisiä vaaka-akselisia voimaloita, mutta myös pystyakselisia tuulivoimaloita. Vaaka-akseliset voimalat ovat suunniteltu tietyille tuulenopeusalueelle, jolla ne toimivat parhaiten. Pystyakselisia voimaloita voidaan käyttää pyörteisissä olosuhteissa, josta hyvänä esimerkkinä voidaan sanoa ahtaaksi rakennettu kaupunkiympäristö. (Suomen tuulivoimayhdistys ry a)

Tuuliturbiinin antama teho on luonnostaan vaihtelevaa ja riippuu hetkittäin saatavasta tuulen kineettisestä energiasta. Tämän vuoksi systeemin, johon tuulivoimala on kytketty, on otettava jollakin tavalla huomioon sähköntuotannon vaihtelut. Verkkoon kytketyissä järjestelmissä sähköverkko toimii ikään kuin kohteen energiavarastona. Pienemmässä ja eristetyssä systeemissä, jota tässä projektissa käsitellään, sähköenergian saanti voidaan turvata sähköenergian varastoinnilla sekä varalle asennetulla sähkögeneraattorilla, kuten aggregaattilla. (Suomen tuulivoimayhdistys ry b)

Pientuulivoimala tulee suojata kovan tuulen aiheuttamalta ylinopeudelta, joka voi johtaa generaattorin rikkoutumiseen, siihen kytkettyjen laitteiden ylikuormittumiseen ja hajoamiseen sekä vaaratilanteisiin. Pientuulivoimalan myrskysuojaus voidaan toteuttaa potkurin sivuun käännön, potkurin pysäytyksen tai potkurin sakkauksen avulla. Potkurin

siivuun kääntäminen tarkoittaa potkurin kääntämistä pois tuulesta sivuun tai ylös, jolloin tuulta kohtisuoraan oleva pyyhkäisypinta-ala pienenee. Potkurin ylinopeuden ehkäisemiseksi, voidaan roottoriin asentaa mekaaninen jarru, joka alkaa rajoittamaan potkurin pyörimisnopeutta tuulen nopeuden kasvaessa suureksi. Potkurin sakkaus toteutetaan lapojen suunnittelulla niin, että kovalla tuulella ilman virtaus irtoaa lavoista, jolloin generaattori ei enää pysty tuottamaan tarvittavaa energiaa. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry a) Kestomagneettigeneraattorin tapauksessa voimala voidaan pysäyttää myös kytkemällä generaattorin staattori oikosulkuun. Oikosulku voidaan toteuttaa erillisellä kytkimellä, joka voidaan erikseen asentaa generaattorin maston juureen tai lataussäätimen oman kytkimen avulla.

2.4 Lataussäätimet

Lataussäätimen tehtävänä on säädellä tuotettua sähkövirtaa akustolle ja kuormalle sopivaksi. Säädin pitää akuston täyteen ladattuna ylilataamatta sitä. Kun akuston varaus on matala, lataussäädin alkaa syöttämään virtaa akustoon. Kun säädin aistii akuston latautuneeksi, se lopettaa sähkövirran syöttämisen energialähteiltä. Monet lataussäätimet aistivat myös, milloin kuorma on ottanut liikaa sähköenergiaa akuilta. Tässä tapauksessa säädin lopettaa sähkövirran syöttämisen kuormaan kunnes akustoon on palautunut riittävä varaus. Tämä toiminta pidentää huomattavasti akuston käyttöikää. (Agrawal 2011) Lataussäätimen valinta perustuu käytettävien akkujen jännitteeseen ja energiatuotantolaitteiston maksimivirran mukaan. Lataussäätimen virrankestoisuus mitoitetaan vähintään tuuligeneraattorin tai aurinkopaneelin maksimivirtaa vastaavaksi.

2.4.1 Lataussäädintyypit

Lataussäätimiä voidaan katsoa olevan kolme erilaista päätyyppiä, joiden toiminta eroaa keskenään, miten akkua ladataan sen tullessa täyteen. Päätyypit eroavat myös kokonaishyötysuhteen osalta, ottaen huomioon lataussäätimien oma energiankulutus. Nämä lataussäätimien kolme päätyyppiä ovat latausreleperiaatteella toimivat lataussäätimet, älykkäät hakkurisäätimet ja älykkäät PWM –säätimet (Pulse-width Modulation). (Eurosolar)

Latausreleperiaatteella toimivat lataussäätimet toimivat, niin että akun tullessa täyteen, säätimen latausrele vetää ja siinä oleva kosketin irrottaa latauspiirin galvaanisesti akusta. Latauspiiri voi olla tuuligeneraattori, aurinkopaneelit tai nämä yhdessä. Tällaisen säätimen hyvänä puolena on yleensä erittäin yksinkertainen rakenne ja laite on usein hankintahinnaltaan erittäin edullinen. Toisaalta säädintyyppin huonona puolena on

pidettävä myös tätä liiankin yksinkertaista rakennetta, jolloin suuret lämpötilan vaihtelut sekä erityisesti ikääntyneen akun vaikutukset rajoittavat näiden säädinten käytettävyyttä merkittävästi. Säätimen analogiatekniikalla toteutettuja toimintoja on kuitenkin voitu merkittävästi parantaa laadukkaampien sähköisten komponenttien valinnalla sekä lisäämällä niihin uusia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi käyttämällä lämpötilan kompensatiota, jonka avulla latausjännitteen taso seuraa akun lämpötilaa. Näitä perussäätimiä ei kuitenkaan suositella ikääntyneiden tai ympärivuotisessa käytössä olevien akkujen lataamiseen. (Eurosolar)

Älykkään hakkurisäätimen eli MPPT –lataussäätimen (Maximum power point tracking) toimintaa ohjaa yleensä prosessori, joka valvoo akun napajännitteen muuttumista ja estää näin akun ylilataantumista tehokkaasti. Säädin toimii myös syväpurkaussuojana estäen akun täydellisen tyhjenemisen virhetilanteissa. MPPT -periaatteilla toimivilla säätimillä on mahdollisuus myös nostaa latausvirran määrää hetkellisesti silloin, kun akun varaustila on alhaalla ja esimerkiksi aurinkopaneelin kennojännite korkealla. MPPT –säätimien toiminta perustuukin aurinkokennojen maksimitoimintapisteen seurantaan, jonka avulla akkujen lataus tapahtuu parhaalla mahdollisella virran arvolla. (Eurosolar)

Älykkäiden PWM –lataussäätimien toimintaa ohjataan myös mikroprosessorin avulla, jossa laitteen älykkäällä pulssileveysmodulaattorilla saavutetaan lataustuloksen kannalta merkittäviä etuja. Akun tullessa täyteen, latausta ei kokonaan lopeteta, kuten latausreleperiaatteella toimivissa säätimissä, vaan latausta jatketaan edelleen pulssittamalla akkuun syötettävää latausvirtaa. Tällöin lataussäädin syöttää ylimääräistä sähkötehoa lataussäätimeen kytkettynä olevaan sähkövastukseen eli keinokuormaan. Tällä tavoin saadaan ikääntynytkin ja hieman sulfisoitunut akku varautumaan täyteen. PWM –säätimellä saadaan siis selkeästi latausreleperiaatteella toimivaa säädintä parempi lataustulos. Laitteen etuna on myös erittäin pieni oma virrankulutus sekä täysin elektroninen toiminta. PWM –säätimiä suositellaan erityisesti suuriin järjestelmiin ja yli vuoden käytössä olleiden akkujen lataamiseen. PWM –säätimien perusominaisuuksiin sisältyy myös aina syväpurkaussuojatoiminta, joka estää akun täydellisen purkautumisen virhetilanteissa. (Eurosolar)

2.5 Akusto

Koska tuuli- ja aurinkovoimalla saatava energia vaihtelee sääolosuhteiden mukaan, täytyy näillä tuotantomenetelmillä tuotettua energiaa varastoida verkosta eristettyjen järjestelmien kohdalla akkuihin myöhempää käyttöä varten. Energialähteillä tuotettu

sähköenergia varastoidaan akkuihin, tämän työn kohteen kaltaisissa järjestelmissä yleensä lyijyakkuihin. Akkujen koko täytyy mitoittaa niin, että se kattaa muutaman pilvisen ja tuulettoman päivän energian tarpeen. (Kaldellis 2010)

Akuston mitoitus on hyvä aloittaa määrittämällä kuinka monen tuulettoman ja pilvettömän päivän ajan järjestelmän halutaan toimivan. Toisena määritetään järjestelmän kuluttama sähköenergia vuorokaudessa ja kuinka paljon akuston kapasiteetista halutaan hyödyntää. Lähtökohtana akustosta on hyvä käyttää vain 70 - 80 % sen kapasiteetista, jotta tekninen käyttöikä tulee mahdollisimman pitkäksi (Rashid 2011). Hyvä syväpurkausakku kuitenkin kestää yleensä hyvinkin monta syväpurkaussykliä, joka voi olla 50 % akun varauksesta. Talvella kylmyys laskee akuston varausta, joten akut olisi silloin hyvä pitää mahdollisimman täyteen varattuina. Akkuja ei koskaan tulisi purkaa kokonaan tyhjiksi, sillä akusto saattaa vioittua ja menettää varauskykyään tämän seurauksena.

2.5.1 Akkutyypit

Tuuli- ja aurinkosähköjärjestelmän akuston tulee kestää useita syviä purkaukertoja ja toimia kovassakin pakkasessa. Akuston oikealla valinnalla saavutetaan siis suunniteltavalle sähköjärjestelmälle mahdollisimman suuri käyttöikä ja varma toiminta kaikissa olosuhteissa. Tavallisimpia syväpurkausakkuja, jotka soveltuvat hybridijärjestelmän energiavarastoiksi, ovat avoimet lyijyhappoakut paksuilla lyijykennoilla, geeliakut ja AGM –akut. (REPS)

Avoimet akut ovat edullisimpia verrattavana oleviin akkutyyppeihin ja sopivat usein vapaa-ajan asunnoille, joissa akkuja säilytetään usein mökin alla tai kuistilla ja säädin on asennettu sisätiloihin erilleen akuista. Haittapuolena avoimia akkuja tulee huoltaa säännöllisesti täyttämällä niitä vedellä sekä akkuhapoilla, jotka höyrystyvät nopean latauksen yhteydessä. Happohöyryt syövyttävät mahdollisesti käytettävän invertterin elektroniikkaa ja muodostavat palovaaran, jonka takia niitä ei tulisi varastoida sisätiloissa. (REPS)

Geeliakuissa elektrolyytti on sidottu geeliin, eikä näin ollen pääse vuotamaan. Tämän takia niitä voidaan säilyttää sisätiloissa ja missä asennossa tahansa. Suurin haittapuoli geeliakuilla on niiden kyky ottaa vastaan tai antaa ulos suuria virtamääriä. Nopeissa latauksissa geelissä muodostuu kaasuja, jotka aiheuttavat geeliin kanavia ja halkeamia, niin että sähköön kulku akussa loppuu. Geeliakut soveltuvat parhaiten hitaaseen lataukseen ja vastaavasti hitaaseen purkaukseen esimerkiksi led-valoilla. (REPS)

AGM –akku on kehittynyt lyijyakku, jossa neste on sidottu lasikuitukankaaseen paksujen lyijykennojen väliin. Niillä on geeliakkujen kaikki hyvät puolet ja tämän lisäksi ne sallivat lisäksi suuria virtoja. Kuten kaikissa muissakin akkutyypeissä, eri valmistajien ja mallien välillä on suuria eroavaisuuksia AGM –akkujen välillä. Suurin ero muodostuu akun sietämästä lataus-purkaussyklistä, joka on suorassa suhteessa akun elinikään. Myös niiden kyky kestää jäätymistä on parempi ja niiden sisäinen vastus on pieni, jonka kautta latauskyky sekä itsepurkautumisominaisuudet ovat paremmat kuin muilla akkutyypeillä. Korkea sisäinen vastus tekee sen, että jännite laskee enemmän kovassa kuormituksessa. (REPS)

2.6 Kaapelit

Sähköenergiaa siirretään kaapeleilla tuotantopaikasta kuormaan. Siirron aikana tapahtuu häviöitä, jolloin kaapelissa kulkeva energia muuttuu toiseen muotoon, yleisimmin lämpöenergiaksi. Tasavirtakaapeleissa häviöt johtuvat johdemateriaalin resistanssista ja vaihtovirtakaapeleissa resistanssin lisäksi vaikuttaa myös johdemateriaalin reaktanssi. Kaapeleiden lisäksi häviöitä tapahtuu liittimissä ja johtojen liitoksissa.

Tasavirta kaapelin resistanssi R_{DC} voidaan laskea yhtälöllä

$$R_{DC} = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)\frac{l}{A_j}, \quad (2.9)$$

missä ρ_0 on johtimen materiaalin ominaisresistiivisyys, α resistiivisyyden lämpötilakerroin materiaalille, ΔT lämpötilaero referenssi lämpötilan ja vallitsevan lämpötilan välillä. Lisäksi johtimen pituus on l ja sen poikkipinnan pinta-ala on A_j . Yhtälöstä (2.9) huomataan, että mitä paksumpaa kaapeli on, sitä pienempi tasavirta resistanssi on johtimessa.

Tehohäviö tasavirtakaapelissa $P_{h,DC}$ saadaan nyt yhtälöstä (2.10), kun tiedetään kaapelin resistanssi ja siinä kulkeva tasavirta I_{DC} .

$$P_{h,DC} = R_{DC}I_{DC}^2 \quad (2.10)$$

Tuuligeneraattorilla tuotettu kolmivaiheisen virran ja jännitteen arvo muuttuu tasasuuntauksessa, joten ne täytyy selvittää häviölaskelmia varten. Laskennassa tasasuuntaussillan tulo- ja lähtötehon voidaan olettaa olevan samoja, koska tehohäviöt tasasuuntauksessa ovat pieniä. Kun tasasuuntauksen teho pysyy samana, voidaan tasavirran arvo I_{DC} määrittää yhtälöllä

$$\sqrt{3} * I_{AC} U_{AC} = I_{DC} U_{DC}, \quad (2.11)$$

missä I_{AC} on kolmivaiheisen vaihtovirran arvo, U_{AC} kolmivaiheisen pääjännitteen arvo ja U_{DC} tasasuunnatun jännitteen arvo. Tasasuunnattu jännite voidaan selvittää yhtälöllä

$$U_{DC} = k * U_{AC}, \quad (2.12)$$

missä k on tasasuunnatun jännitteen ja kolmivaiheisen pääjännitteen tehollisarvon suhde.

Jännitteenalenema kolmivaiheisessa vaihtovirtakaapelissa riippuu resistanssin lisäksi myös induktiivisesta reaktanssista X_{AC} . Jännitteenalenema $U_{h,AC}$ voidaan laskea yhtälöllä

$$U_{h,AC} = \sqrt{3}(I_P R_{AC} + I_Q X_{AC}), \quad (2.13)$$

missä I_P on pätövirta, R_{AC} kaapelin vaihtovirta resistanssi ja I_Q loisvirta, ja yhtälöstä saatava jännitteenalenema saadaan pääjännitesuureena. Näennäisvirta I voidaan jakaa pätö- ja loisvirran komponentteihin vaihe-eron φ avulla. Pätö- ja loisvirta saadaan yhtälöistä

$$I_P = I \cos \varphi \quad (2.14)$$

$$I_Q = I \sin \varphi. \quad (2.15)$$

Jokaisella kaapelilla on ominaiset vaihtovirta resistanssit ja induktanssit, joiden arvot löytyvät kaapeleiden datalehdistä. Kaapelin induktiivinen reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä

$$X_{AC} = 2\pi f L, \quad (2.16)$$

missä f on vaihtovirran taajuus ja L kaapelin induktanssi.

Kolmivaiheisen vaihtovirtakaapelin tehohäviö $P_{h,AC}$ voidaan nyt laskea yhtälöllä

$$P_{h,AC} = \sqrt{3} * U_{h,AC} I_{AC}, \quad (2.17)$$

kun kaapelissa kulkeva virta I_{AC} tiedetään.

Sähköntuotantolaitteisto kannattaa häviöiden johdosta sijoittaa aina mahdollisimman lähelle lataussäädintä, akustoa ja kulutuskojeita. Suurilla kaapelin poikkipinta-aloilla

saadaan pienemmät häviöt, mutta tällöin kaapeleiden hinta nousee. Teknillistaloudellisesti kaapeleita mitoittaessa pitääkin tehdä yleensä kompromisseja kaapeleiden hinnan ja häviöiden suuruuden kanssa.

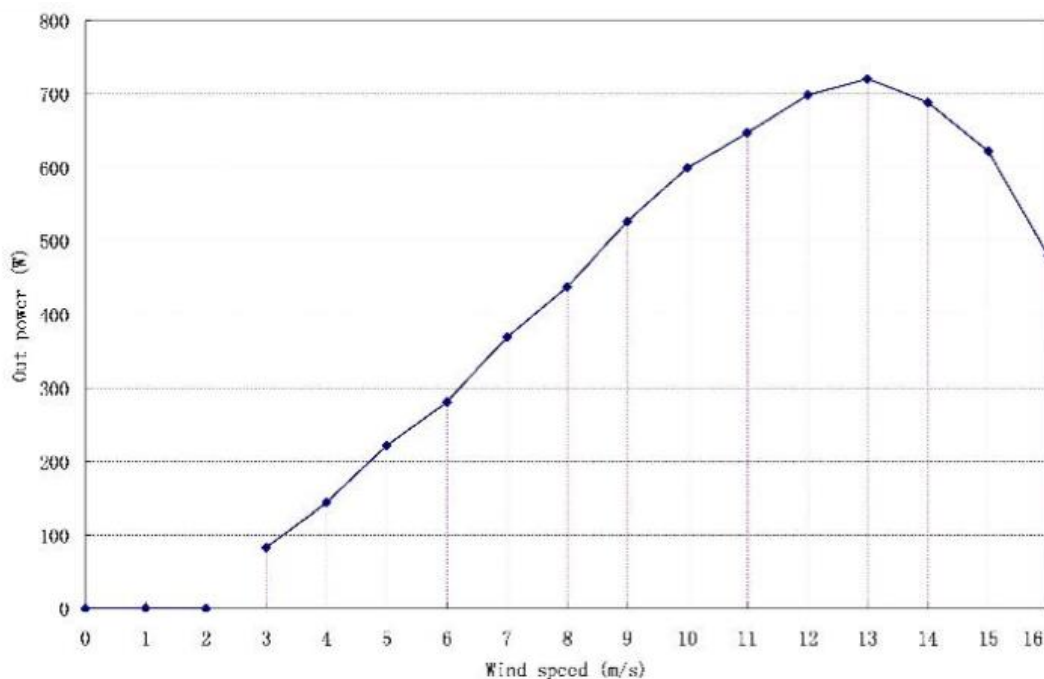
2.7 Käytettävät laitteet

Humaljärven partiokämpällä on kaksi toisistaan erillistä aurinkopaneelijärjestelmää. Varsinaisen partiokämpän katolla on kaksi 100 W monikidepaneelia sarjaan kytkettynä, samoin kuin saunan katolla. Yhden aurinkopaneelin pinta-ala on 0,78 m² ja sen tuottama jännite on nimellispisteessä 17,2 V sekä virta 5,81 A. Molemmissa järjestelmissä käytetään Soltronic MPPT 7520 lataussäädintä, jotka säätelevät akkujen latausvirtaa. Molemmissa järjestelmissä käytetään kahta Exide ES2400 Equipment Gel –akkua, jonka kapasiteetti on 210 Ah. Akut on kytketty rinnan muodostaen 12 V järjestelmät, tällöin järjestelmän akuston yhteiskapasiteetti on 420 Ah.

Leiripaikan kaikki sähkölaitteet ja valot toimivat 12 V jännitteellä. Pääkämpän terassilla ulkovalaistus on toteutettu kolmella 10 W led-valonlähteellä, joiden virrankulutus on $\frac{10 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0,83 \text{ A}$. Sisällä valaistus hoidetaan kahdeksalla led-valokiskolla, jossa yhden valokiskon teho on 7,2 W ja jonka virrankulutus on $\frac{7,2 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0,6 \text{ A}$. Pääkämpän varustukseen kuuluu Tivoli Audio Model One –pöytäradio, jonka virrankulutus on 800 mA. Lisäksi mökissä on mahdollisuus ladata kännyköitä autokännykänlaturilla. Yksittäisen autolaturin maksimi virrankulutus on 1,0 A (Belkin).

Saunan pihavalona käytetään yhtä 10 W led-valolähteellä. Saunan sisällä on kuusi samanlaista led-valokiskoa kuin pääkämpällä. Lisäksi saunalla on pistorasia, johon voidaan kytkeä puhelimen latureita tai radio. Vanhan kämpän valaistus on hoidettu kahdella led-valokiskolla. Myös vanhalla kämpällä on pistorasia puhelinten latausta ja radiota varten. Saunalla ja vanhalla kämpällä käytetään samaa radiota kuin pääkämpällä.

Lippukunta on saanut lahjoituksena GP-600w tuulivoimalan ja tuulilataussäätimen FK_FSZ24H-0.6A. Tuulivoimalan ja lataussäätimen on valmistanut kiinalainen WinPower, jonka maahantuojalta, GreenEnergy Finland Oy:ltä, laitteet on hankittu. Kuvassa 2.6 on esitetty tuuliturbiinin tehokäyrä.



Kuva 2.6 GP-600w tuuliturbiinin antama teho tuulen nopeuden funktiona.

GP-600w tuuliturbiinin nimellisteho 600 W saadaan tuulennopeudella 10 m/s, jota vastaa pyörimisnopeus 400 rpm. Kuvasta 2.6 nähdään generaattorin tuottaman tehon kasvavan lähes lineaarisesti aina tuulennopeuteen 13 m/s asti, jonka jälkeen tuotettu teho pienenee nopeasti. Käyrämuoto selittyy tuulivoimalan siiven kärkinopeussuhteen arvon laskemisen takia, joka johtaa turbiinin tehokertoimen huononemiseen. Tuulivoimala on kestromagnetoitu ja kolmivaiheinen generaattori, jonka kolmilapaisen roottorin halkaisija on 2,5 metriä.

Tuuligeneraattorin mukana toimitettu lataussäädin toimii PWM –tekniikalla ja se soveltuu lataamaan 24 V akustoa. Lataussäädin on varustettu keinovastuksella, johon lataussäädin syöttää ylimääräisen tehon akkujen ollessa täynnä. Green Energy Finland on asentanut lisäkytkimen lataussäättimeen, jonka avulla kuorma voidaan kytkeä manuaalisesti irti akuista, jolloin se ei kuluta akkujen varausta. Lataussäätimessä on myös tuuliturbiinin pysäyttämistä varten oleva kytkin, jonka avulla tuuligeneraattorin staattori voidaan kytkeä oikosulkuun.

3. SÄHKÖENERGIANTUOTANNON JA -KULUTUKSEN ARVIOINTI

Arvioidaan suunnittelun kohteena olevan partiokämpän vuotuista sähköntuotantoa ja –kulutusta. Tuulivoimalan tuotannon arviointi tapahtuu Ilmatieteenlaitoksen Lappeenrannan Lepolan sääasemalta kerätyllä tuulidatalla ja aurinkopaneelien Suomen sääpalvelun aurinkodatalla, joka on kerätty Lappeenrannan teknillisen yliopiston katolta. Kulutuksen arviointiin käytetään partiokämpän varauskalenterin paikallaolovuorokausia ja partiokämpän sähkölaitteiden virrankulutusta.

3.1 Vuotuinen järjestelmän energiankulutus

Suunnittelun kohteena oleva partiokämpä on lähes tasaisessa ympärivuotisessa käytössä, niin että suurimmat läsnäolovuorokaudet ajoittuvat kesäkuukausille. Kesäkuukausilla partiokämpää käytetään pidempiä jaksoja putkeen, kun taas talvella käyttö painottuu viikonloppuihin. Partiokämpän käyttöaste oli vuonna 2013 144 varausvuorokautta.

Kulutusta arvioitaessa vuoden kuukaudet on jaettu kesä- ja talvikuukausille. Kesäkuukausiksi on määritelty kuukaudet huhtikuusta elokuuhun ja talvikuukausiksi tammi – maaliskuu sekä syys – joulukuu. Varausvuorokaudet on myös jaettu puolikkaisiin ja kokonaisiin päiviin sekä yksittäisiin päiviin. Vuorokausien laitekohtaiset käyttötunnit talvikuukausina pääkämpällä on arvioitu liitteessä 1 taulukossa 1 ja saunalla sekä vanhalla kämpällä taulukossa 2 näkyvällä tavalla.

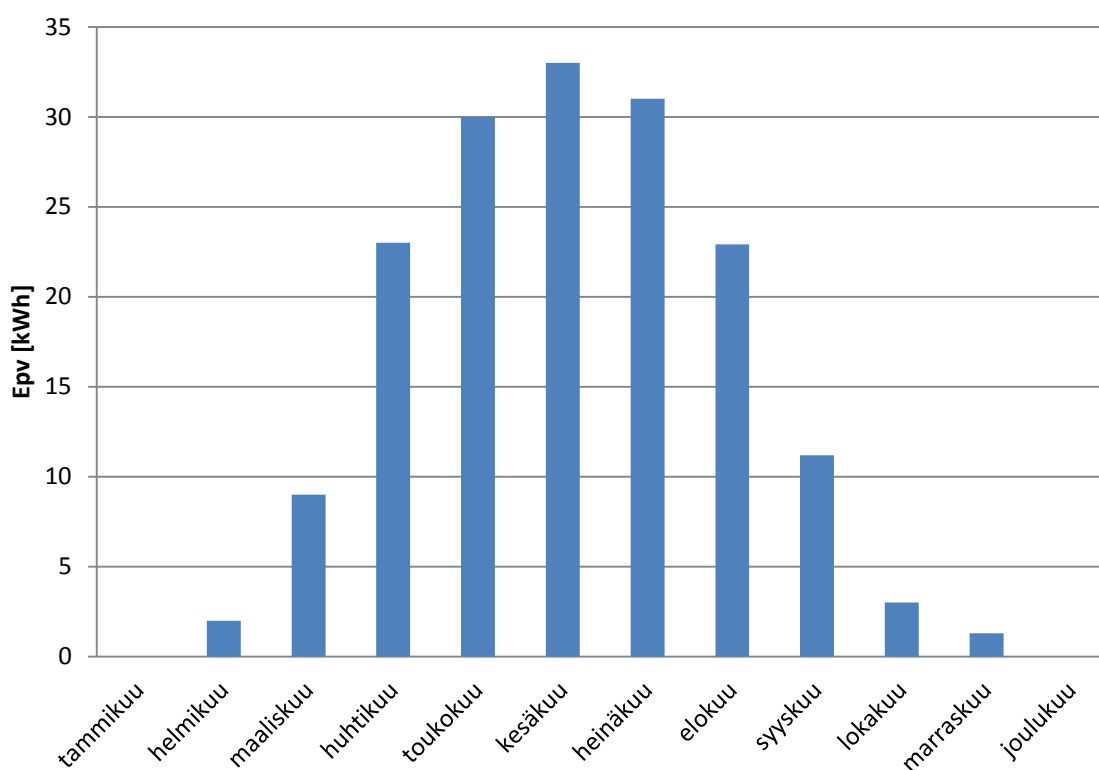
Yksittäinen päivä tarkoittaa ainoastaan päiväksi varattua Humaljärven leiripaikkaa, jolloin kyseessä on tyypillisesti saunareissu. Puolikas päivä tarkoittaa pidemmälle ajanjaksolle varatun leiripaikan tulo- ja lähtöpäivää. Kokonainen päivä tarkoittaa pitkälle ajanjaksolle varatun leiripaikan kokonaisia päiviä. Sähköjärjestelmien kulutukset lasketaan kertomalla liitteessä I näkyvät laitteiden käyttötunnit kappaleessa 2.7 esitettyjen laitteiden virrankulutusten kanssa. Edellä määriteltyjen talvikuukausien pääkämpän kokonaiskulutukseksi saadaan noin 2600 Ah ja vastaavasti saunan sekä vanhan kämpän kokonaiskulutukseksi 2300 Ah.

Arvioidaan seuraavaksi kesäkuukausina käytettyjen laitteiden kulutusarviot ja verrataan niitä talvikuukausille laskettuihin arvoihin. Vuorokausikohtaiset laitteiden käyttötunnit kesäkuukausina pääkämpällä on arvioitu liitteessä I taulukossa 3 ja saunalla sekä vanhalla kämpällä taulukossa 4 näkyvällä tavalla. Liitteessä I esitettyjen käyttötuntien ja laitteiden virrankulutusten mukaan kesäkuukausina pääkämpä kuluttaa virtaa noin 3200

Ah ja vastaavasti sauna sekä vanha kämppä 3000 Ah. Arvot ovat huomattavasti suurempia kuin talvikuukausille lasketut, vaikka talvikuukausia on määritelty yksi enemmän. Vaikka talvikuukausina varausvuorokautta kohden kulutettu sähköenergia on suurempaa kuin kesällä, on kesäkuukausina huomattavasti enemmän käyttövuorokausia. Vuotuinen kokonaisenergian kulutus on pääkämpällä noin 5800 Ah ja saunalla sekä vanhalla kämpällä on noin 5300 Ah.

3.2 Vuotuinen energiantuotanto aurinkovoimalla

Vuotuisen tuotetun aurinkoenergian arvioimiseen käytetään vuoden 2013 huhtikuusta vuoden 2014 maaliskuuhun kerättyä dataa Auringon säteilyenergiasta (Suomen sääpalvelu). Vertailu Humaljärven partiokämppään kyseisillä arvoilla on riittävällä tarkkuudella, koska kohteitten välinen etäisyys on vain noin 20 km. Aurinkopaneeleiden hyötysuhteeksi arvioitiin yhtälön (2.2) avulla 12,9 %. Aurinkopaneelilta saatavat sähköenergiat voidaan nyt laskea yhtälöllä (2.1) käyttäen kuukauden aikana saatavaa Auringon säteilyenergiaa. Arvioidut Humaljärven aurinkopaneelien energiantuotannot on esitetty graafisesti kuukausittain kuvassa 3.1 ja kuvaajan arvot on taulukoitu liitteeseen II.



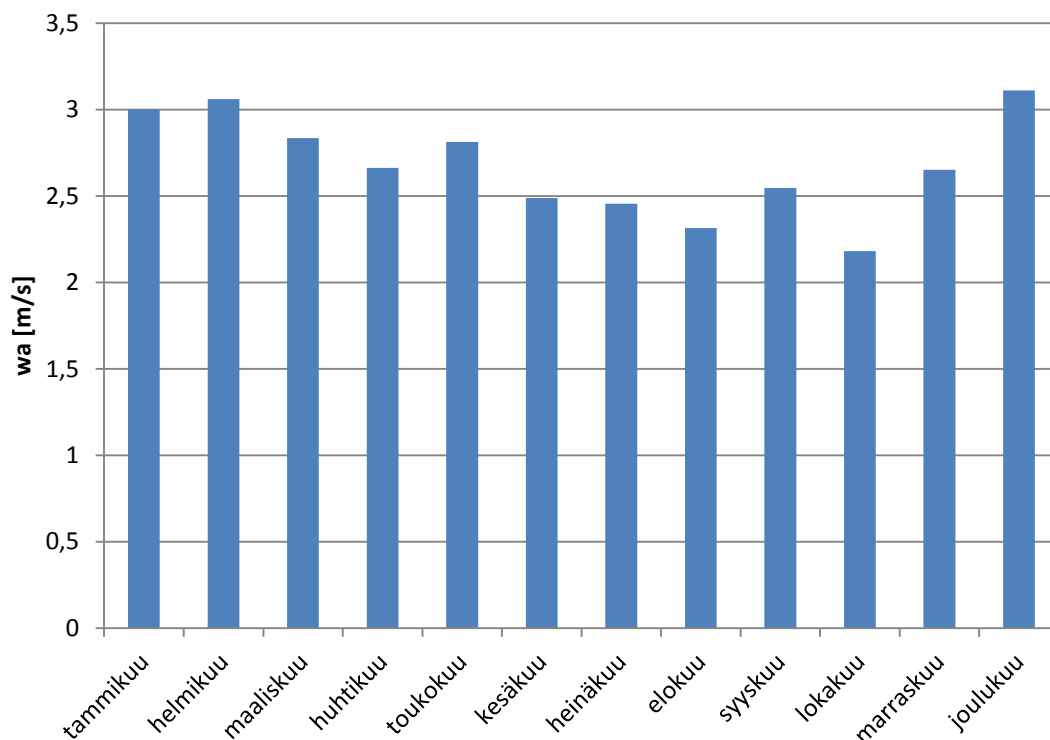
Kuva 3.1 Kuukausittain aurinkopaneelilta saatava arvioitu sähköenergia Humaljärvellä. (Suomen sääpalvelu)

Kuvasta 3.1 nähdään, että auringon säteilyenergia painottuu voimakkaasti kesäkuukausille. Säteilyenergia kasvaa voimakkaasti keväällä ja vastaavasti vähentyy voimakkaasti syksyllä. Kuvasta 3.1 voidaan myös huomata, että edellä määritettyinä talvikuukausina aurinkopaneelilta saadaan huomattavasti vähemmän sähköenergiaa.

Sekä pääkämpäälle että saunalle lasketut aurinkopaneelien tuotot ovat yhtä suuria, sillä kohteissa sijaitsevat aurinkopaneelit ovat samanlaisia ja pinta-alaltaan yhtä suuria. Liitteessä II esitetyistä arvoista nähdään, että määritettyinä talvikuukausina tuotetun aurinkoenergian suuruus molempien rakennusten kohdalla on noin 29,8 kWh. Vastaavasti kesäkuukausina tuotetuksi aurinkoenergiaksi molemmissa järjestelmissä saadaan noin 141,3 kWh. Ampeeritunneiksi muutettuna talvella saatava aurinkoenergia rakennusta kohden on 2,5 kAh ja kesällä 11,8 kAh. Laskettuihin tuotantoarvioihin ei ole otettu mukaan puiden varjostuksesta johtuvaa energian tuotannon vähenemistä, joten todellinen aurinkopaneeleista saatava sähköenergia on arvioihin verrattuna pienempi. Lippukunnan kokemuksen mukaan pääkämpän aurinkopaneelijärjestelmä lataa akustoa huomattavasti huonommin kuin saunan, joten varsinkin pääkämpän aurinkopaneeleista saatava energia on huomattavasti pienempää arvioihin verrattuna. Ongelma korostuu varsinkin talvisin, jolloin lippukunnan kokemuksen mukaan pääkämpän aurinkopaneelien kohdalla paistetunnit ovat huonoimmillaan vain noin kaksi tuntia vuorokaudessa.

3.3 Vuotuinen energiantuotanto tuulivoimalla

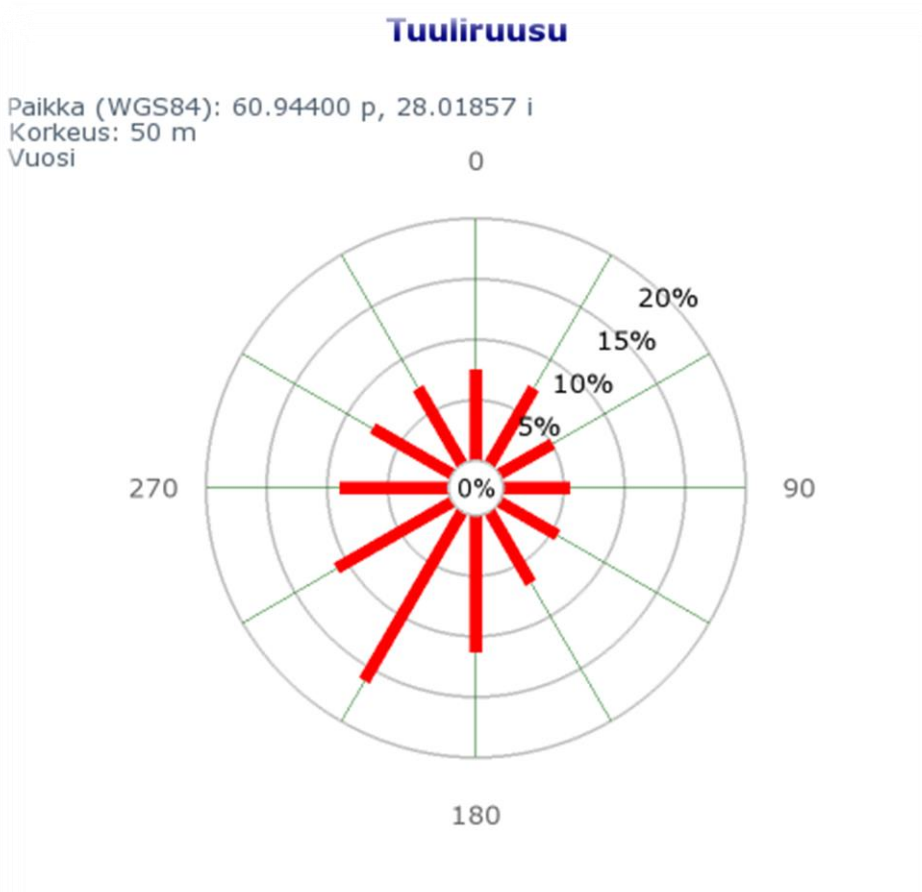
Tuulivoimalan tuottaman tehon arvioimiseen käytetään Lappeenrannan Lepolasta kerättyä tuulen mittausdataa vuodelta 2012 (Ilmatieteen laitos b). Tuulen mittauspiste sijaitsee noin 20 metrin korkeudessa, mikä on riittävän lähellä tuulivoimalan tuuliolosuhteita Humaljärven rannalla. Mittauspisteestä saadun datan perusteella laskettiin keskituulennopeudet kullekin kuukaudelle, joiden perusteella piirrettiin kuvan 3.2 tuulijakauma.



Kuva 3.2 Vuoden 2012 tuulijakauma Lappeenrannan Lepolan mittauspisteessä.

Kuvasta 3.2 nähdään suuremman tuulivoiman sähköntuotantokapasiteetin sijoittuvan talvikuukausille, toisin kuin aurinkovoiman kohdalla. Tuulivoiman saatavuus jakautuu kuitenkin melko tasaisesti koko vuodelle, sillä kuvasta 3.2 voidaan huomata kuukausittaisten keskituulennopeuksien sijoittuvan noin 1,0 m/s sisälle. Mittauspisteistä laskettuna koko vuoden keskituulennopeus on 2,7 m/s.

Tuulivoimalla tuotetun sähköenergian arvioimiseen tulee ottaa huomioon tuulennopeuksien lisäksi myös tuulen suunta, jotta voidaan ottaa huomioon mahdolliset maastonmuodoista tai rakennuksista aiheutuvat esteet tuulen vapaalle virtaukselle. Tuulen keskimääräiset suunnat esitetään yleensä tuuliruusussa, jossa tuulensuunnat on esitetty prosentuaalisesti esiintymänsä mukaan. Kuvassa 3.3 on esitetty Suomen tuuliatlaksista otettu tuuliruusu Humaljärvellä 50 metrin korkeudessa.

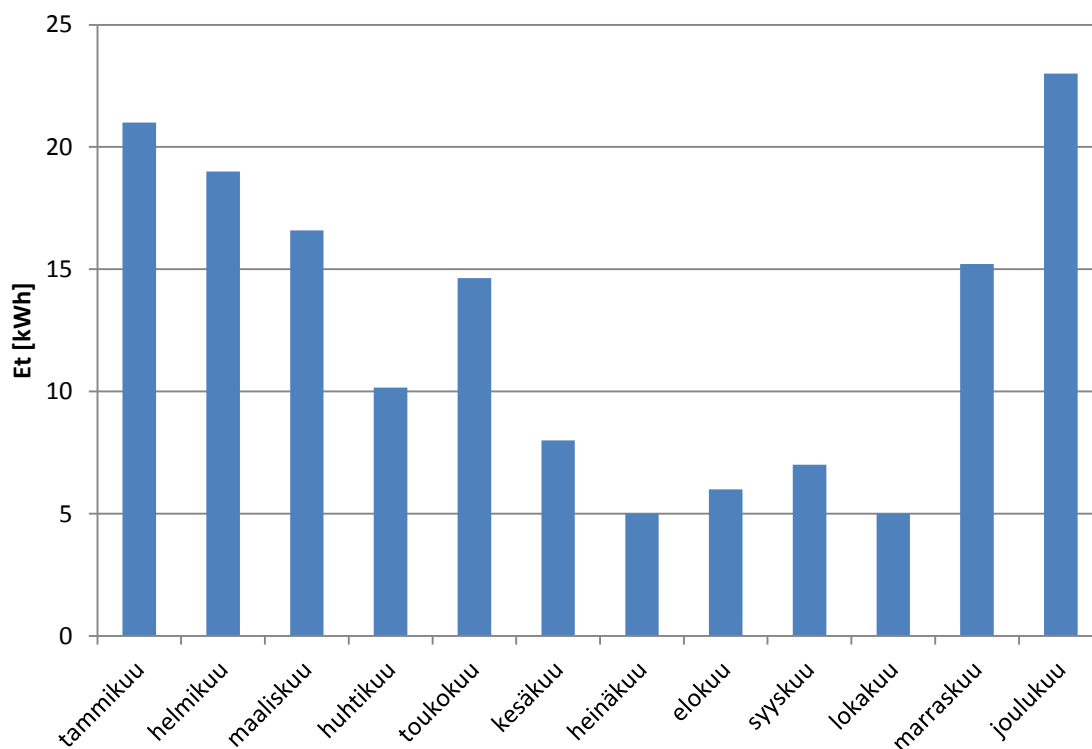


Kuva 3.3 Humaljärven tuuliruusu 50 metrin korkeudelta. (Suomen tuuliatlas)

Kuvasta 3.3 nähdään, että yleisimmin Humaljärvellä tuulee luoteen ja etelän väliltä. Kyseinen tuulensuunta ei ole edullinen partiokämpän tuulivoimalla tuotetun sähköenergian määrälle, johtuen partiokämpän sijainnista. Partiokämpän etelä- ja lounaispuolella on metsää ja järvi avautuu lännen sekä kaakon välille. Suuri osa saatavana olevasta tuulienergiasta osuu siis kuvan 3.3 tuuliruusun mukaan maastonmuodoista johtuviin esteisiin. Tässä työssä oletetaan, että järven rannalle sijoitettavan tuulivoimalan tuuliolosuhteet ovat hyvät joka tuulen suunnasta, vaikka tuuliruusun mukaan yleisimmät tuulen suunnat ovat Humaljärvellä epäotolliset. Tätä ei oteta huomioon tuulivoimalan tuotantoarvioissa.

Saadusta mittausdatasta saatiin selville vuoden 2012 tuntien keskitehot. Tuulivoimalan hyötysuhteena η_{mek} käytettiin kappaleessa 4.1.2 laskettujen generaattorin hyötysuhteiden perusteella arvoa 0,60 ja tehokertoimeksi C_p arvioitiin 0,40. Sijoittamalla nämä arvot yhdessä jokaisen tarkasteluajanjakson tunnin tuulen vapaan virtauksen keskitehon kanssa yhtälöön (2.6) ja summaamalla saadut arvot yhteen saadaan yhtälön (2.7)

mukaan tuotettu sähköenergia tarkasteluajanjaksona. Kuukausikohtaiset tuulella tuotetut sähköenergiat on esitetty graafisesti kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Tuulivoimalan sähköenergian tuotantoarvio kuukausittain vuonna 2012. Arvio perustuu kuvan 3.2 tuulijakaumaan

Kuvasta 3.4 voidaan huomata, että talvikuukausina tuulivoimala tuottaa selvästi enemmän kuin kesäkuukausina. Talvella tuulivoimalan kokonaisenergian tuotanto on noin 109 kWh ja kesällä 45 kWh. Ampeeritunneiksi muutettuna energiantuotanto on talvisin noin 9,1 kAh ja kesäisin noin 3,8 kAh. Vertailemalla tuotettua energiaa kuvassa 3.2 näkyviin kuukausittaisiin tuulennopeuden keskiarvoihin huomataan energiantuoton vaihtelevan huomattavasti enemmän. Vaikka keskituulennopeudet pysyvät 1,0 m/s marginaalissa, tuotettu energia vaihtelee suurimmillaan noin 17 kWh:n välillä. Tämä johtuu kesän alhaisemmista tuulennopeuksista, koska tuulivoimala ei tuota alle 3 m/s tuulennopeuksilla. Lisäksi tuulen vapaan virtauksen teho kasvaa tuulennopeuden kolmanteen potenssiin yhtälön (2.5) mukaisesti.

3.4 Kulutuksen ja tuotannon tasapaino

Tämän hetkiselällä järjestelmällä partiolaisten mukaan aurinkopaneelien tuotanto riittää kesäisin pääkämpän ja saunan sekä vanhan kämpän kulutukseen. Talvella sen sijaan pääkämpän kulutus on tuotantoa suurempaa, jonka takia talvella on jouduttu vaihtamaan akustot päittäin. Talvinen energiavaje voidaan huomata myös vertaamalla aurinkopaneelille laskettuja tuotantoarvioita pääkämpän kulutusarvioihin. Koska kulutus talvikuukausina pääkämpällä on noin 2600 Ah ja tuotanto ilman tuotantovähennyksiä noin 2500 Ah, ei tuotettu energia riitä kattamaan talvella tarvittavaa energiaa. Todellisuudessa pääkämpällä saadaan arvioidusta sähköenergiasta reilusti pienempi osa, sillä pääkämpän aurinkopaneelit ovat puuston takia varjossa suuren osan valoisasta ajasta. Saunalla ja vanhalla kämpällä kulutus talvisin 2300 Ah, joka on hieman pienempää kuin tuotanto aurinkopaneelilla. Partiolaisten kokemukset energian riittävydestä talvisin vahvistavat tätä arviota.

Kesäisin pääkämpän aurinkopaneelilla tuotetaan sähköenergiaa ilman varjoisuudesta johtuvia vähennyksiä noin 11,8 kAh kulutuksen ollessa tällöin 3,2 kAh. Aurinkoenergialla tuotetaan siis kesäkuukausina riittävästi sähköenergiaa pääkämpän kulutukseen nähden. Arvioista voidaan myös nähdä, että kesäisin saunan aurinkojärjestelmä tuottaa enemmän sähköenergiaa kuin saunalla ja vanhalla kämpällä kulutetaan.

Pääkämpän sähköjärjestelmän energiavaje talvikuukausina voidaan kattaa liittämällä tuulivoimala järjestelmän akustoon. Tällöin talven arvioitu kokonaistuotanto pääkämpällä on noin 11,6 kAh, joka kattaa reilusti talven kulutuksen. Jo pelkän tuulivoimalan tuottama energia riittäisi arviointien mukaan kattamaan pääkämpän sähkökulutuksen. Kesällä aurinkopaneelien ja tuulivoimalan yhteistuotanto nousee 15,2 kAh:iin. Tuulivoimalan liittämisen myötä kesäkuukausien energiantuotanto kasvaa entisestään verrattuna pääkämpän kulutukseen. Tuulivoiman liittäminen saunalle ei edellä laskettujen kulutus- ja tuotantoarvioiden sekä lippukunnan kokemusten mukaan ole tarpeellista.

4. LAITTEIDEN TESTAUS

Laboratoriotestausten tarkoituksena on selvittää lippukunnalle lahjoitettujen tuuligeneraattorin ja lataussäätimen toimivuus sekä soveltuvuus partiokämpän systeemille. Etenkin lataussäätimen kohdalla halutaan määrittää sen toimivuus mahdollisimman monessa erilaisessa tilanteessa, jotta käytössä ei ilmenisi ongelmatilanteita. Laboratoriomittauksissa käytetty järjestelmä on esitetty kuvassa 4.1.

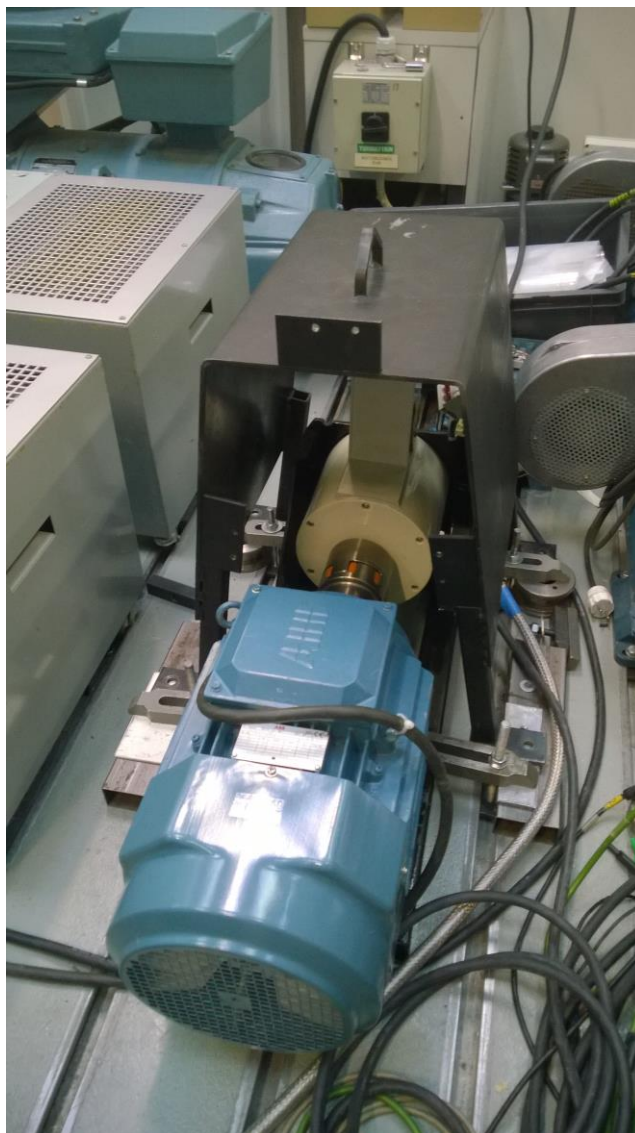


Kuva 4.1 Laboratoriomittauksissa käytetty järjestelmä.

Tuuliturbiinin generaattori näkyy kuvassa 4.1 kytkettynä sähkömoottoriin säätövastuksien takana. Lisäksi kuvassa näkyy vierekkäin taajuusmuuttaja ja tuuliturbiinin lataussäädin. Oikeassa alakulmassa nähdään testauksissa käytetyt 12 V:n akut ja oikeassa yläkulmassa hyllykön päällä tehoanalysaattori, jonka avulla kerättiin mittaustietoja.

4.1 Tuuligeneraattorin testaus

Generaattori oli kytkettynä nimellisteholtaan 7,5 kW:n oikosulkumoottoriin, jonka avulla pyöritettiin generaattorin roottoria. Sähkömoottoria ohjattiin taajuusmuuttajan avulla, jolla pystyttiin säätämään moottorin pyörimisnopeutta. Kuvassa 4.2 on esitetty testattu tuuligeneraattori kytkettynä 7,5 kW:n sähkömoottoriin.



Kuva 4.2 Testattu tuuligeneraattori kytkettynä taajuusmuuttajaohjattuun 7,5 kW:n oikosulkumoottoriin.

Tuuligeneraattorin testauksessa tutkittiin generaattorin tuottamaa tehoa sen eri pyörimisnopeuksilla, minkä avulla on mahdollisuus verrata pyörimisnopeuksia sekä tuulennopeuksia keskenään. Generaattorin hyötysuhde määritettiin nimellispisteessä ja siitä alaspäin. Lisäksi tutkittiin generaattorin tuottamaa oikosulkuvirtaa, kytkemällä staattori oikosulkuun generaattorin pyöriessä nimellipyörimisnopeudellaan. Oikosulkuvirran suuruutta verrataan generaattorin käyttötilanteen nimellispisteessä synnyttämään virtaan ja katsotaan kasvaako se suureksi. Suuri oikosulkuvirta voi aiheuttaa vaaraa käyttötilanteessa ja vahingoittaa laitteita, johtimia sekä liittimiä.

4.1.1 Tuuligeneraattorin tuottama teho

Tuuligeneraattorin tuottaman tehon testaus toteutettiin liitteessä III kuvassa 1 esitetyllä kytkennällä, jossa kuormana oli kolme rinnan kytkettyä kolmivaihevastusta. Virrat, tehot ja jännitteet luettiin tehoanalysaattorin avulla. Generaattori asetettiin taajuusmuuttajan avulla pyörimään nimellinopeudella 400 rpm ja säätämällä kuormana olevat vastukset kuluttamaan generaattorin nimellistehon eli noin 600 W. Tämän jälkeen pyörimisnopeutta laskettiin pyörimisnopeuteen 150 rpm asti. Pyörimisnopeutta nostettiin vielä 450 rpm asti, jotta toimittajan ilmoittaman kuvassa 2.6 näkyvän tehokäyrän lineaarinen osa tulee kokonaan testatuksi. Tuuligeneraattorin tuottama teho, pääjännite ja virta eri pyörimisnopeuksilla on taulukoitu taulukkoon 4.1.

Taulukko 4.1 Tuuligeneraattorin tuottaman tehon, pääjännitteen ja virran testauksesta mitatut arvot.

Tuulennopeus w_a [m/s]	Pyörimisnopeus n [rpm]	Teho P [W]	Pääjännite U_p [V]	Virta I [A]
3,2	150	99,5	12,8	4,5
3,9	175	133,3	14,8	5,2
4,5	200	171,5	16,8	5,9
5,8	250	259,1	20,6	7,3
6,9	300	359,3	24,2	8,6
8,4	350	470	27,7	9,8
10,0	400	593,5	31,1	11,0
12,8	450	701,3	33,8	12,0

Yli 450 rpm olevia pyörimisnopeuksia ei pystytty tällä menetelmällä testaamaan, koska pyörimisnopeutta kasvatettaessa sähkömoottorin avulla teho kasvaa lineaarisesti, mikä ei vastaa todellista tuulivoimalan toimintaa. Todellisessa toiminnassa yli nimellispisteen olevat tuulennopeudet aiheuttavat tuulivoimalan siivissä sakkaamista, mikä laskee tuulivoimalan tuottamaa tehoa. Taulukossa näkyvät tuulennopeudet on arvioitu vertailemalla mitattuja arvoja sekä kuvassa 2.6 näkyvää tehokäyrää.

4.1.2 Tuuligeneraattorin hyötysuhde

Tuuligeneraattorin hyötysuhdetta tutkittiin taulukossa 4.1 esitettyjen generaattorin tuottamien tehojen ja taajuusmuuttajasta otettujen vääntömomenttien avulla. Mittauksen

kytkentä on esitetty liitteessä III kuvassa 1. Hyötysuhteen määrittämiseen käytetyt mittaustulokset sekä laskennat on esitetty liitteessä IV. Taulukkoon 4.2 on taulukoitu mitattujen arvojen perusteella lasketut tuuligeneraattorin hyötysuhteet.

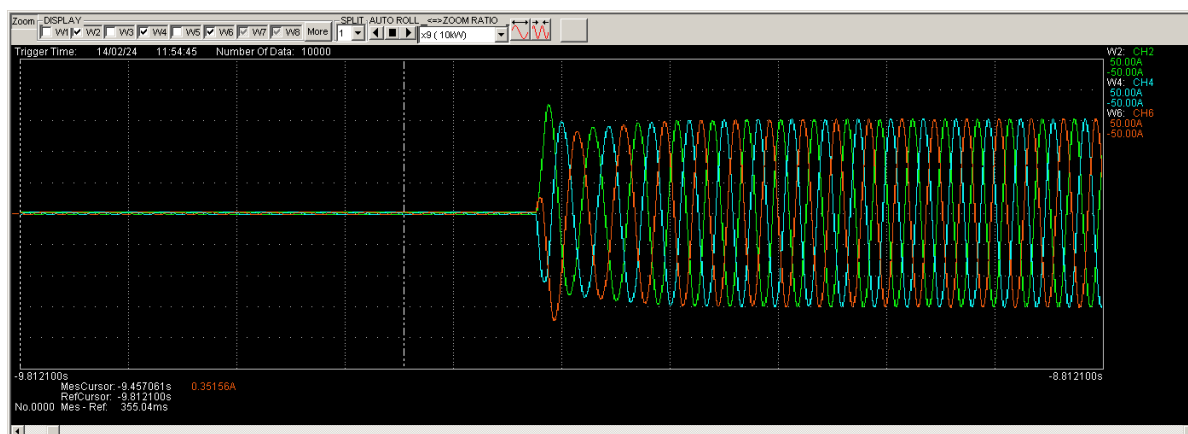
Taulukko 4.2 Tuuligeneraattorin hyötysuhteet.

Tuulennopeus w_a [m/s]	Pyörimisnopeus n [rpm]	Turbiinin hyötysuhde η [%]
4,5	200	54,4
6,9	300	66,3
10,0	400	72,1

Taulukosta 4.2 nähdään generaattorin hyötysuhteen kasvavan turbiinin pyörimisnopeuden ja tehon kasvaessa. Pienillä pyörimisnopeuksilla generaattorin hyötysuhteiden huomataan olevan vain hieman yli 50 %, kun taas suurilla pyörimisnopeuksilla generaattorin hyötysuhde nousee yli 70 %.

4.1.3 Tuuligeneraattorin oikosulkuvirta

Generaattorin tuottaman oikosulkuvirran testaus toteutettiin liitteessä III kuvassa 3 esitettyllä kytkennällä. Oikosulun synnyttämiseksi käytettiin lataussäätimen manuaalista kytkintä. Akkuina testauksessa käytettiin valmistajien Varta ja Exide 12 V geeliakkuja, jotka oli kytketty sarjaan muodostaen näin lataussäätimelle soveltuvan 24 V akuston. Kyseistä akustoa käytetään myös kaikissa muissa laboratoriomittauksissa. Nimellipyörimisnopeudella oikosulkuun kytketyn generaattorin oikosulkuvirran kuvaaja on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Nimellipyörimisnopeudella 400 rpm oikosulkuun kytketyn tuuligeneraattorin oikosulkuvirta. Y-akselin asteikko vaihtelee ± 50 ampeerin välillä.

Oikosulun tapahtuessa oikosulkuvirran huippuarvo nousee noin 36 ampeeriin, jonka tehollisarvo on $A_o = \frac{36 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 25,5 \text{ A}$. Verrattuna generaattorin nimellispisteen virtaan, taulukko 4.1, virtapiikin tehollisarvo on 2,3-kertainen. Virtapiikin jälkeen virran huippuarvo tasoittuu arvoon 30 A, jonka tehollisarvoksi saadaan 21,2 A. Tasoittuneen virran tehollisarvo on hieman alle kaksinkertainen generaattorin tuottaman nimellispisteen virtaan verrattuna. Tuulivoimalan oikosulkuvirta ei siis ole poikkeuksellisen suuri, mikä on hyvä asia generaattorin kestävyuden kannalta. Suuret oikosulkuvirrat voivat vahingoittaa kytkettyinä olevia laitteita, liittimiä ja johtoja.

Oikosulkuun kytkemisen jälkeen havaittiin lataussäätimestä tulevan palaneen hajua. Kun generaattorin staattorin oikosulkupiiri avattiin lataussäätimen kytkimen avulla, havaittiin ettei säädin alkanut heti lataamaan akkuja, vaikka generaattori asetettiin pyörimään sähköntuotannolle riittävällä nopeudella. Säätimen palautumisajan jälkeen säädin jatkoi normaalisti akkujen lataamista. Palautumisajan välttämiseksi kytkentään lisättiin erillinen kytkin, jolla staattori kytkettiin oikosulkuun.

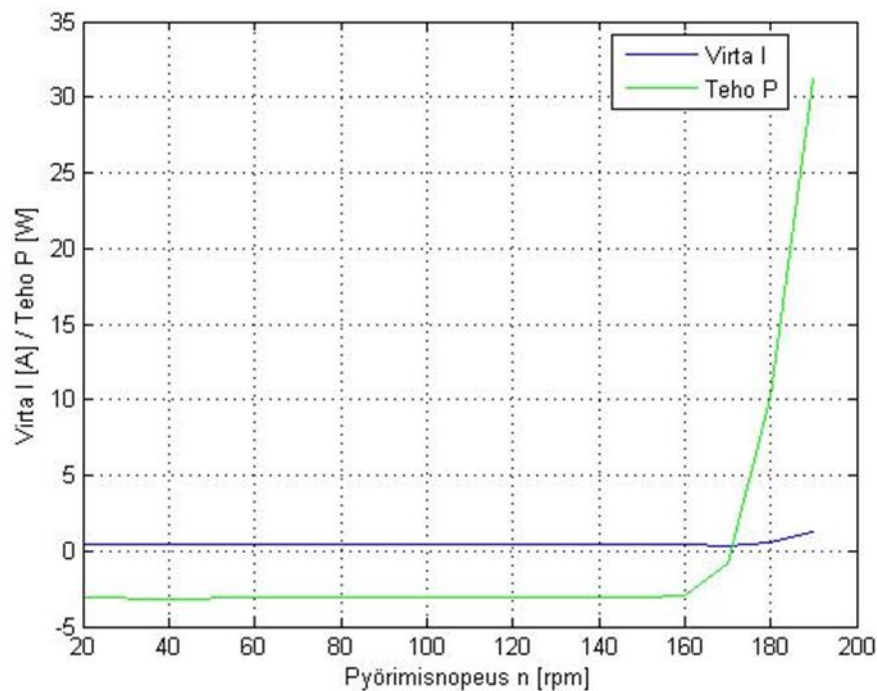
4.2 Lataussäätimen testaus

Tuuligeneraattorin lataussäätimen toimintaa testattiin aluksi selvittämällä, millä generaattorin pyörimisnopeuksilla se alkaa lataaman akustoa. Lataussäätimen akuille syöttämää latausvirtaa ja -jännitettä tutkittiin eri generaattorin pyörimisnopeuksilla. Akkujen latautumista lataussäätimen avulla tutkittiin kahdella eri generaattorin pyörimisnopeudella. Tällä mittauksella haluttiin selvittää lataussäätimen toiminta akkujen lähestyessä täyttä varaustilannetta ja kuinka säädin rajoittaa syötettävää virtaa akkujen ollessa täynnä. Kyseisen kokeen avulla voidaan myös arvioida akkujen latautumiseen kuluvaa aikaa, kun tiedetään akkujen varaustilanne latauksen alkaessa. Akkujen latautumista testattiin myös silloin, kun akut ovat eri varaustilanteessa ja lataamalla toista akkua erillisellä jännitelähteellä. Erillisellä jännitelähteellä lataaminen simuloi tilannetta, jossa toista akkua varattaisiin aurinkopaneelin avulla.

Laboratoriokokeissa tutkittiin myös tasavirtakuorman kytkemistä lataussäätimeen ja siihen erikseen liitetyn kytkimen toimivuutta. Tasavirtakuorman testauksessa haluttiin selvittää, mistä kuorma ottaa tehonsa, suoraan akuista vai ensisijaisesti tuuliturbiinin syöttämästä sähkötehosta. Kytkimen toimivuutta testataan mittaamalla kuormalle kulkevaa virtaa kytkimen ollessa molemmissa asennoissa. Lataussäätimen staattorin oikosulun kytkemiseen käytettävää kytkintä, eli manuaalista jarrua, testattiin tuuligeneraattorin oikosulkuvirran mittauksen yhteydessä.

4.2.1 Lataussäätimen herääminen

Ensimmäiseksi haluttiin määrittää generaattorin pyörimisnopeus, jolla lataussäädin alkaa lataamaan akkuja. Kokeen tekeminen on tärkeää, koska kyseinen lataussäätimen ominaisuus vaikuttaa suuresti kohteen sähköntuotantoon. Jos lataussäädin ei lataa akkuja pienillä tuulenopeuksilla, menee saatavilla olevaa tuulienergiaa hukkaan. Kuten kappaleessa 4.2 todettiin, partiokämpän alueella vuotuinen keskituulenopeus on 2,7 m/s, joten latauksen aloittamispiste ei saa nousta hyvin suureksi. Koe suoritettiin liitteessä III kuvassa 2 esitetyllä kytkennällä ja kuvassa 4.4 on esitetty graafisesti mittauksesta saatu tulos.



Kuva 4.4 Lataussäätimen latauksen testaaminen eri generaattorin pyörimisnopeuksilla.

Kuvasta 4.4 nähdään lataussäätimen aloittavan akkujen lataamisen generaattorin pyörimisnopeuksien ollessa 170-180 rpm välissä. Kyseisten pyörimisnopeuksien vastaavuudet tuulenopeuksiin voidaan nähdä vertailemalla kuvan 2.6 tehokäyrää ja taulukkoa 4.1. Vertailusta nähdään lataussäätimen aloittavan akkujen lataamisen tuulenopeuden ollessa noin 4 m/s.

4.2.2 Lataussäätimen syöttämä teho

Lataussäätimen syöttämää latausvirtaa ja -jännitettä tutkittiin eri generaattorin pyörimisnopeuksilla. Testauksen tarkoituksena oli selvittää eri tilanteissa syötettävien virtojen suuruuden lisäksi kullakin pyörimisnopeudella, syöttääkö lataussäädin liian suurta virtaa akkujen kestävyyskannalta suurilla pyörimisnopeuksilla. Testaus toteutettiin

liitteessä III kuvassa 2 esitetyllä kytkennällä akkujen varaustilanteen ollessa noin 66 % ja kokeessa saadut tulokset on taulukoitu taulukkoon 4.3.

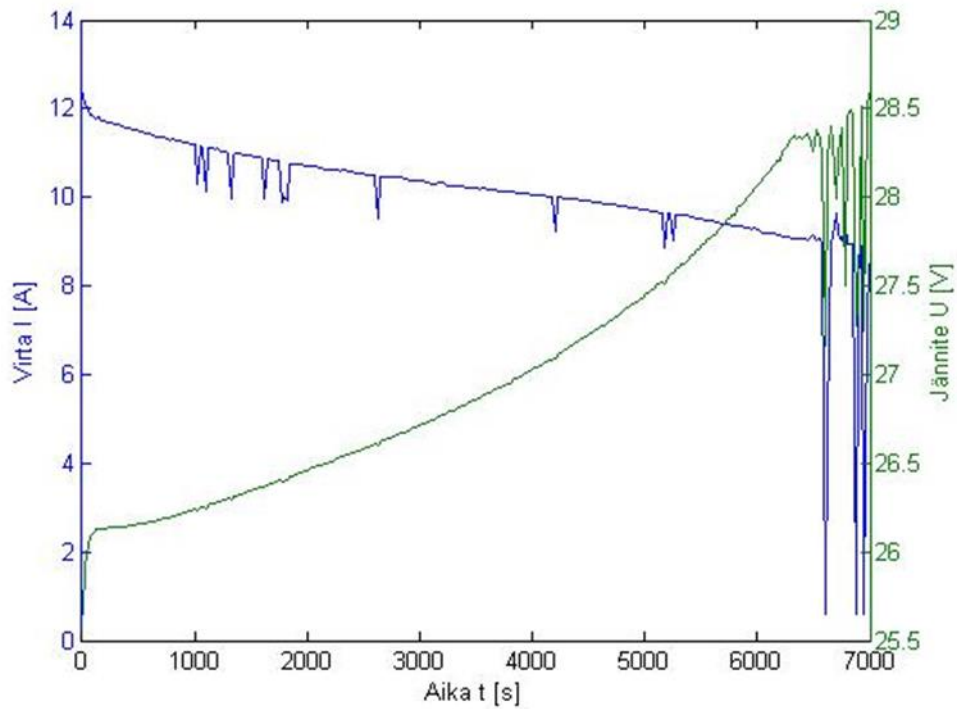
Taulukko 4.3 Lataussäätimen latausvirta ja –jännite generaattorin eri pyörimisnopeuksilla.

Pyörimisnopeus n [rpm]	Jännite U [V]	Virta I [A]	Teho P [W]
200	25,6	1,8	45,5
250	25,9	6,7	174,3
300	26,4	11,6	306,5
350	27,0	15,6	421,1
400	27,4	18,6	508,9
450	27,7	20,8	575,3

Taulukosta 4.3 nähdään lataussäätimen syöttämän latausvirran kasvavan aluksi nopeasti alhaisilla pyörimisnopeuksilla ja tullessa suurille pyörimisnopeuksille latausvirran kasvaminen hidastuu. Partiokämpällä olevien akkujen valmistaja suosittelee, että latausvirta ei kasvaisi 25 prosenttia akkujen kapasiteettia suuremmaksi (Exide). Tässä tapauksessa suurin sallittu latausvirta on $I_{\max} = 0,25 * 420 \text{ A} = 105 \text{ A}$. Lataussäätimeltä saatava latausvirta ei koskaan tule saavuttamaan tätä arvoa, koska lataussäätimen valmistajan ohjekirjan mukaan suurin säätimeltä saatava latausvirta on 25 A.

4.2.3 Akkujen lataaminen

Akkujen latautumista tutkittiin lataussäätimen avulla kahdella eri generaattorin pyörimisnopeudella akkujen varaustilanteen ollessa kummassakin tapauksessa noin 66 %. Mittauksen tarkoituksena oli selvittää PWM -lataussäätimen käyttäytyminen lataustilanteessa ja akkujen ollessa täynnä. Ensimmäisessä tapauksessa generaattorin pyörimisnopeuden arvoksi valittiin 300 rpm, joka vastaa noin tuulennopeutta 6,5 m/s. Mittaus toteutettiin liitteessä III kuvassa 2 esitetyllä kytkennällä ja saatu latauskäyrä on esitetty graafisesti kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Lataussäätimen latauskäyrä generaattorin pyörimisnopeuden ollessa 300 rpm.

Kuvasta 4.5 nähdään lataussäätimen laskevan akuille syötettävää virtaa akkujen lähestyessä täyttä varaustilannetta samalla kun akkujen jännite kasvaa. Kun akkujen jännite on saavuttanut pisteen noin 28,4 V eli akkujen tullessa täyteen, alkaa se katkomaan akuille syötettävää virtaa PWM -tyyppiselle lataussäätimelle ominaiseen tapaan. Kuvasta 4.5 huomataan akkujen lataamisen täyteen 66 %:n varaustilanteesta kestävä pyörimisnopeudella 300 rpm noin yhden tunnin ja 40 minuuttia.

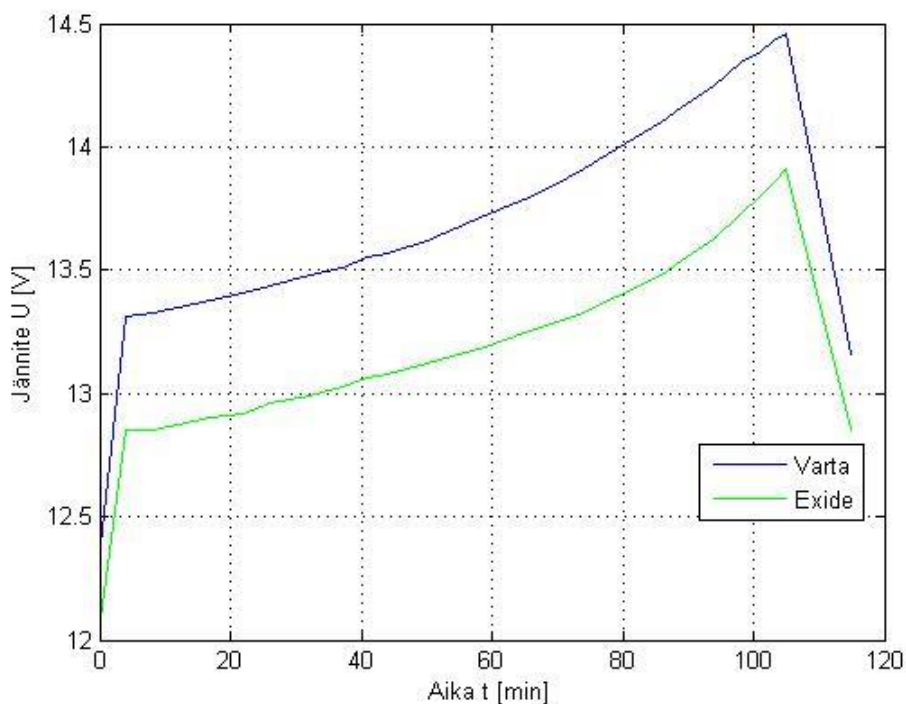
Laboratoriotestauksessa kiinnitettiin lataussäätimen sisäiseen vastukseen yleismittari, jonka avulla haluttiin nähdä kellutusvaiheen aikana vastukseen syötetty teho. Kuvassa 4.6 on esitetty testatun PWM -lataussäätimen sisäinen keinokuorma.



Kuva 4.6 Testatun lataussäätimen sisältämä vastus.

Yleismittarin avulla huomattiin, että lataussäätimen kellutusvaiheessa tuuligeneraattorin ylimääräinen teho syötetään lataussäätimen vastukseen. Mittauksen yhteydessä huomattiin, ettei vastuksen alapuolella oleva tuuletin toiminut. Tuulettimessa olevan vian vuoksi vastus lämpeni huomattavasti ja lataussäätimestä havaittiin tulevan palaneen hajua.

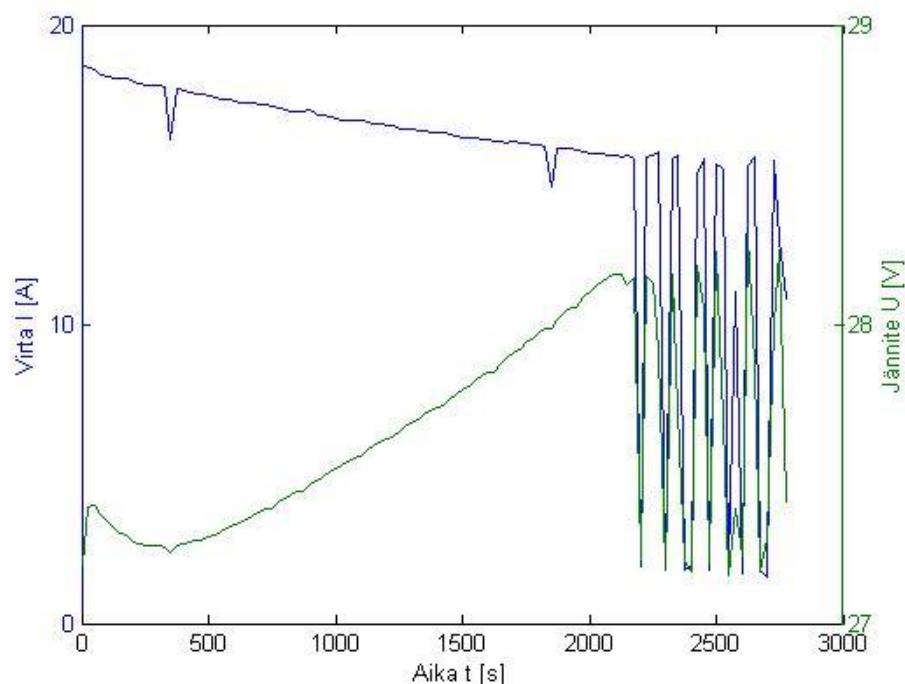
Akkujen latautumista tutkittiin vielä akkukohtaisesti ja akkujen jännitteiden arvot otettiin ylös ennen latauksen aloittamista, latauksen aikana sekä jännitteiden tasaannuttua latauksen jälkeen. Valmistajan Varta akun jännite ennen latauksen aloittamista oli 12,39 V ja valmistajan Exide 12,10 V. Akut oli ennen koetta ladattu erikseen täyteen varaukseen, jonka jälkeen niitä oli purettu 10 A suuruisella virralla kaksi tuntia. Akut olivat siis samassa varaustilanteessa ja niiden erisuuriset jännitteet johtuvat siis akkujen erilaisesta rakenteesta tai niiden erilaisesta kunnosta. Akkujen jännitteet latauksen aikana on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7 Akkujen jännitteet latauksen aikana generaattorin pyörimisnopeuden ollessa 300 rpm.

Kuvasta 4.7 huomataan akkujen jännitteiden olevan erisuuruisia koko latauksen ajan, mutta kasvavan kuitenkin samassa tahdissa. Kun akkujen jännitteiden oli annettu tasaantua noin 10 minuuttia latauksen jälkeen, olivat jännitteet Vartan akulla 13,16 V ja Exidellä 12,85 V. Tästä huomataan valmistajan Varta akun jännitteen nousseen hieman enemmän kuin Exiden. Akkujen erilainen käyttäytyminen johtuu akkujen erilaisista ominaisuuksista tai niiden ikääntymisestä.

Akkujen latautumista testattiin vielä suuremmalla generaattorin pyörimisnopeudella 400 rpm. Kyseinen pyörimisnopeus on generaattorin nimellisnopeus, joka vastaa tuulennopeutta 10 m/s. Tällä kertaa akkujen jännitteitä ei otettu erikseen ylös vaan tarkasteltiin ainoastaan akkujen muodostaman 24 V järjestelmän jännitettä. Akkujen varaustilanne oli tässäkin kokeessa noin 66 %. Kokeesta saatujen mittaustulosten perusteella piirretyt lataussäätimen latauskäyrät on esitetty kuvassa 4.8.

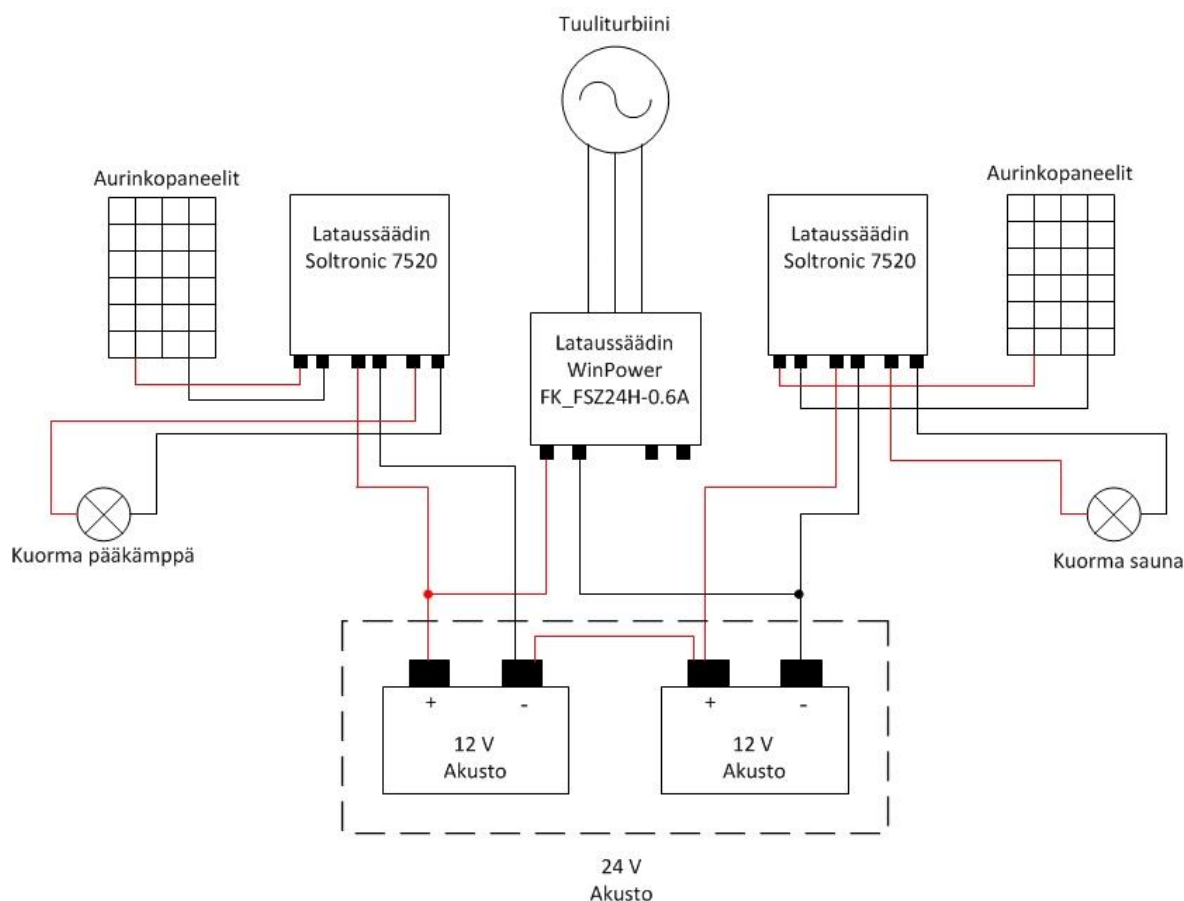


Kuva 4.8 Lataussäätimen latauskäyrä generaattorin pyörimisnopeuden ollessa 400 rpm.

Kuvasta 4.8 huomataan lataussäätimen käyttäytyvän perusperiaatteeltaan samalla tavalla kuin generaattorin pyörimisnopeudella 300 rpm. Latautuminen samasta varaustilanteesta on kuitenkin huomattavasti nopeampaa. Tuuligeneraattorin pyörimisnopeuden ollessa 400 rpm akkujen latautumiseen varaustilanteesta 66 % kesti ainoastaan reilun kolmasosan verrattuna generaattorin pyörimisnopeudella 300 rpm, eli noin 35 minuuttia.

4.2.4 Eri varaustilanteissa olevien akkujen lataaminen

Lataussäätimen lataamista testattiin myös tilanteessa, jossa toinen akku oli varattu täyteen ja toisen ollessa vajaa. Akut olivat tällöin sarjassa muodostaen 24 V akuston, johon tuuligeneraattorin lataussäädin oli kytketty. Tällöin tuuligeneraattori lataisi 24 V akustoa ja molemmat aurinkopaneeliparit omia 12 V akkujaan. Pääkämpän ja saunan kuormat olisi kytketty omiin 12 V akkuihin. Kuvassa 4.9 on esitetty simuloidun järjestelmän topologia.



Kuva 4.9 Simuloidun järjestelmän topologia.

Simuloidussa tilanteessa toisen 12 V akuston varaus oli sähkönkulutuksen seurauksena matalampi ja toinen akusto puolestaan täyteen varattu. Tilanteessa aurinkopaneelit eivät tuota sähköenergiaa, kun tuuliturbiini asetettiin pyörimään tuottaen sähköenergiaa. Huomattiin, että lataussäädin alkaa välittömästi katkomaan akuille syötettävää virtaa, vaikka toinen akku ei ole täynnä. Tällöin tyhjempi akku ei latautunut normaalisti lataussäätimen katkoessa sille syötettävää virtaa. Täynnä olevan akun jännite kohosi hetkittäin erittäin suureksi, yli 18 V. Akun jännitteen kohoaminen liian suureksi lyhentää pitkällä aikavälillä akun käyttöikä.

4.2.5 Lataussäätimen tasavirtakuorma ja virrankulutus

Tasavirtakuorman kytkentää testattiin liittämällä kuormalle tarkoitettuun porttiin vastus. Testauksessa mitattiin tuuligeneraattorilta saatava ja akuille sekä vastukseen lataussäätimen syöttämä sähkövirta. Huomattiin, että kuorma ottaa ensisijaisesti tarvitsemansa sähkötehon tuuligeneraattorin tuottamasta tehosta. Loput tuuligeneraattorin tuottamasta tehosta lataussäädin syöttää akustolle Kirchhoffin ensimmäisen lain mukaisesti. Kun kuorman tarvitsema teho on suurempaa kuin mitä tuuligeneraattori tuottaa, ottaa kuorma tarvitsemansa lisätehon akustosta.

Lataussäätimen omaa virrankulutusta testattiin siihen asennetun kytkimen ollessa molemmissa asennoissa. Kytkimen on tarkoitus irrottaa tasavirtakuorma akustosta, kun järjestelmää ei käytetä. Tällöin lataussäätimen oma virrankulutus tulisi olla vähemmän. Tasavirtakuorman ollessa liitettynä akustoon, mitattiin akustolta otettavaksi virraksi noin 240 mA. Kun akusto irrotettiin tasavirtakuormasta, akustolta otettu virta oli tällöin 180 mA. Tasavirtakuorman akuista irtikytkeminen asennetun kytkimen avulla laskee siis lataussäätimen virrankulutusta 60 mA. Testistä voidaan nähdä, että lataussäädin kuluttaa vähän akkujen varausta, vaikka kuorma ei olisikaan liitetty säätimeen.

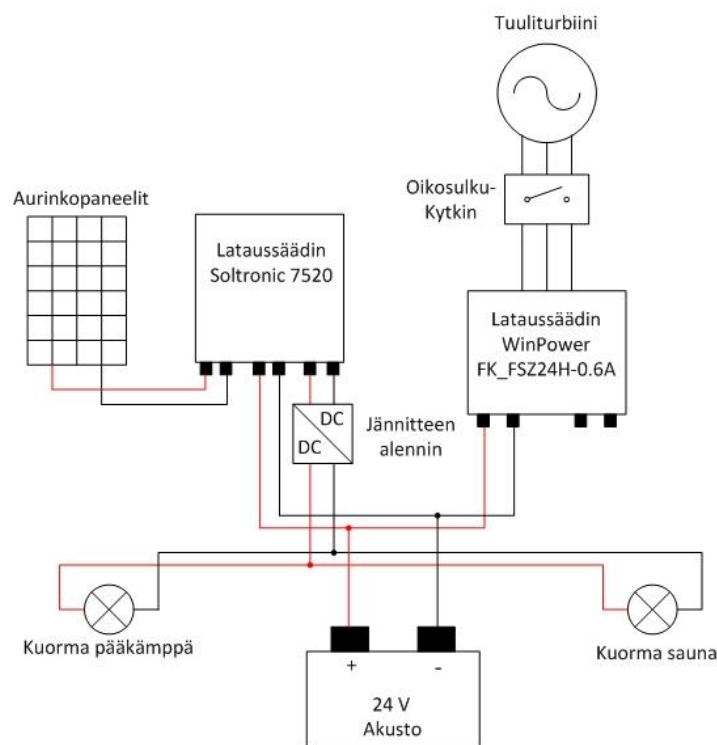
5. JÄRJESTELMÄRATKAISUT

Arvioitujen kulutus- ja tuotantoarvioiden sekä testaustulosten perusteella suunniteltiin partiokämpällä kolme erilaista vaihtoehtoa hybridijärjestelmän toteuttamiselle. Ensimmäisen järjestelmän perustana on kappaleessa 4.2.4 simuloitu järjestelmä. Kahden muun järjestelmän perustana on, että molempien rakennusten sähköjärjestelmät voidaan tarvittaessa yhdistää siirtämättä paneeleita ja akustoa. Jälkimmäisissä järjestelmävaihtoehdoissa tuulivoimalalta saatavalla sähköenergialla varataan pääkämpän akustoa, koska talvikuukausina aurinkopaneeleilta saatava energia ei kata järjestelmän energiantarvetta. Saunalle ja vanhalle kämpälle tuulivoiman liittäminen ei ole tarpeellista, kuten kappaleessa 3.4 huomattiin. Toisessa järjestelmävaihtoehdossa käytetään testattua lataussäädintä ja kolmannessa vaihtoehdossa Xantrex C35 –lataussäädintä, joka soveltuu sekä aurinko- että tuulivoimalle.

5.1 Laboratoriotestauksessa simuloitu hybridijärjestelmä

Kappaleessa 4.2.4 simuloitun järjestelmämallin kohdalla huomattiin, että kaikkien tuulilataussäätimeen liitettyjen akkujen tulee olla samassa varaustilassa, jotta ne latautuvat optimaalisesti. Kuorman tulee ottaa kuluttamansa sähköenergia yhdestä akustosta, joka on samassa jänniteportaassa. Tällä tavalla ei akustoon pääse muodostumaan eri varaustilanteessa olevia akkuja.

Simuloitu järjestelmämalli voitaisiin toteuttaa niin, että aurinkopaneelit kytketään yhteen lataussäätimeen, joka asetettaisiin lataamaan 24 V akustoa yhdessä tuuligeneraattorin kanssa. Tällöin kuormat olisi liitetty 24 V akustoon, joten kuormia ennen tarvittaisiin jännitteen alentimet. Jännite muutettaisiin alentimen avulla leiripaikan sähkölaitteiden ja valojen vaatimaksi 12 V. Tällä ratkaisulla ehkäistään akuston erisuuruiset varaustilanteet. Järjestelmäratkaisu on esitetty kuvassa 5.1.

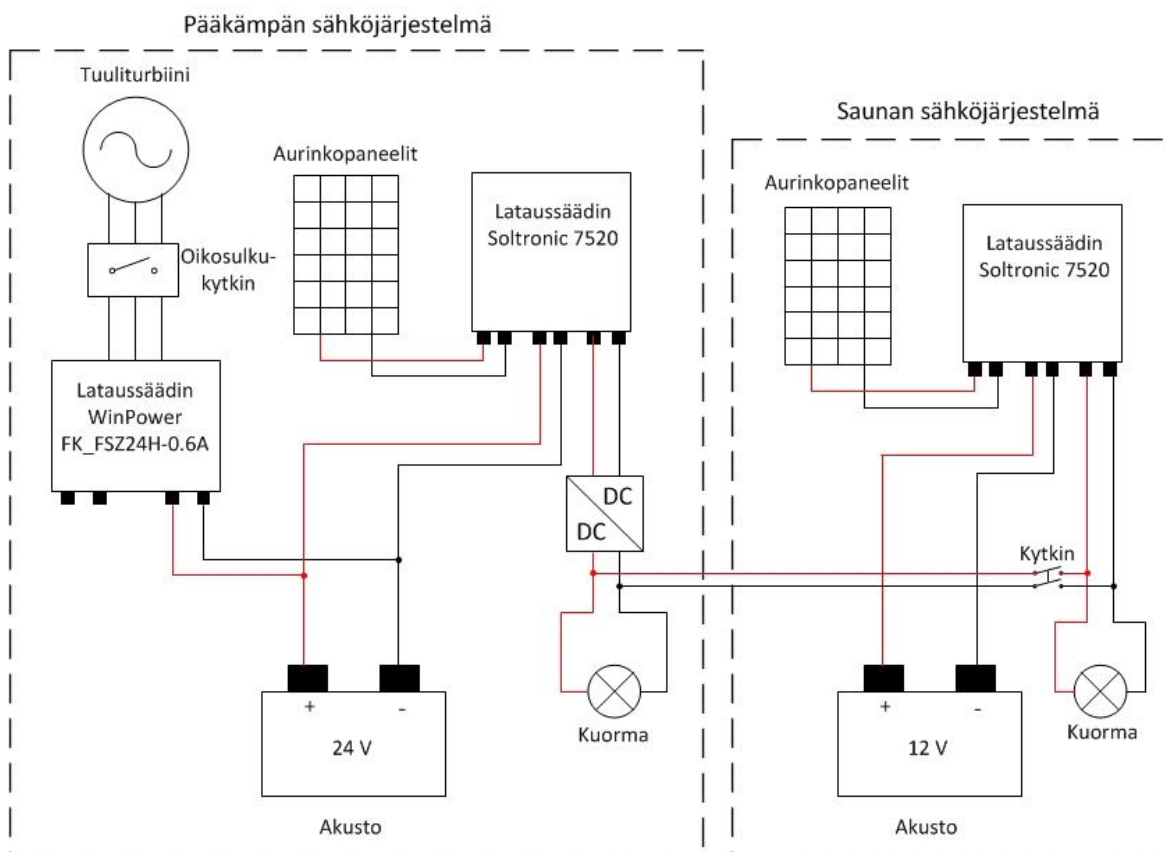


Kuva 5.1 Laboratoriotestauksen pohjalta suunniteltu hybridijärjestelmä.

Tuuligeneraattorin lataussäädin on PWM -tyypin lataussäädin ja aurinkopaneelien lataussäädin on taas MPPT -tyyppiä. Näiden kahden erityyppisen lataussäätimen asentaminen samaan järjestelmään tulee todennäköisesti tuottamaan ongelmia, koska lataussäätimien latausalgoritmit poikkeavat toisistaan. PWM -tyypin lataussäädin kelluttaa akuston napajännitettä kun akut ovat täyteen varattuja, jolloin akuston napajännite vaihtelee nopealla syklillä. MPPT -lataussäädin tarkkailee akuston napajännitettä, joten jännitteen vaihtelu nopealla syklillä voi johtaa säätimen epäideaaliseen toimintaan. Kyseisen ongelmakohdan testaamista ei voitu toteuttaa, joten käsiteltyjen lataussäätimien keskinäisestä toiminnasta ei ole tarkempaa tietoa.

5.2 Testatun lataussäätimen käyttäminen osana hybridijärjestelmää

Testatulle lataussäätimelle suunniteltiin toinen järjestelmävaihtoehto, jossa aurinkopaneeleita eikä akkuja tarvitse siirtää. Pääkämpän sähköenergian tuotannon riittämättömyyden takia tuulivoimala asennetaan osaksi pääkämpän sähköjärjestelmää yhdessä pääkämpän aurinkopaneelien kanssa. Tällöin tuuligeneraattorin ja aurinkopaneelien lataussäätimet lataavat 24 V akustoa. Akuston ja kuorman väliin täytyy asentaa jännitteen alennin, jotta akuston jännite vastaa kuorman vaatimaa jännitettä. Kuvassa 5.2 on esitetty suunniteltu hybridijärjestelmä käyttämällä testattua lataussäädintä.



Kuva 5.2 Testatun lataussäätimen avulla toteutettu hybridijärjestelmä.

Suunnitellussa hybridijärjestelmässä pääkämpän sähköjärjestelmän akut on kytketty sarjaan ja saunalla akut ovat taas kytketty rinnan. Kuormat on liitetty akustoon niin, että pääkämpän sekä saunan kuormat on kytketty kummallakin rakennuksella oleviin MPPT –lataussäätimiin. Lataussäätimet valvovat akkujen ylipurkautumista, ja estää näin akkujen vioittumisen varauksen laskiessa liian alas. Pääkämpän kuorma voidaan kytkeä vaihtoehtoisesti PWM –lataussäätimeen, joka toteuttaa myös akkujen ylipurkautumissuojausta.

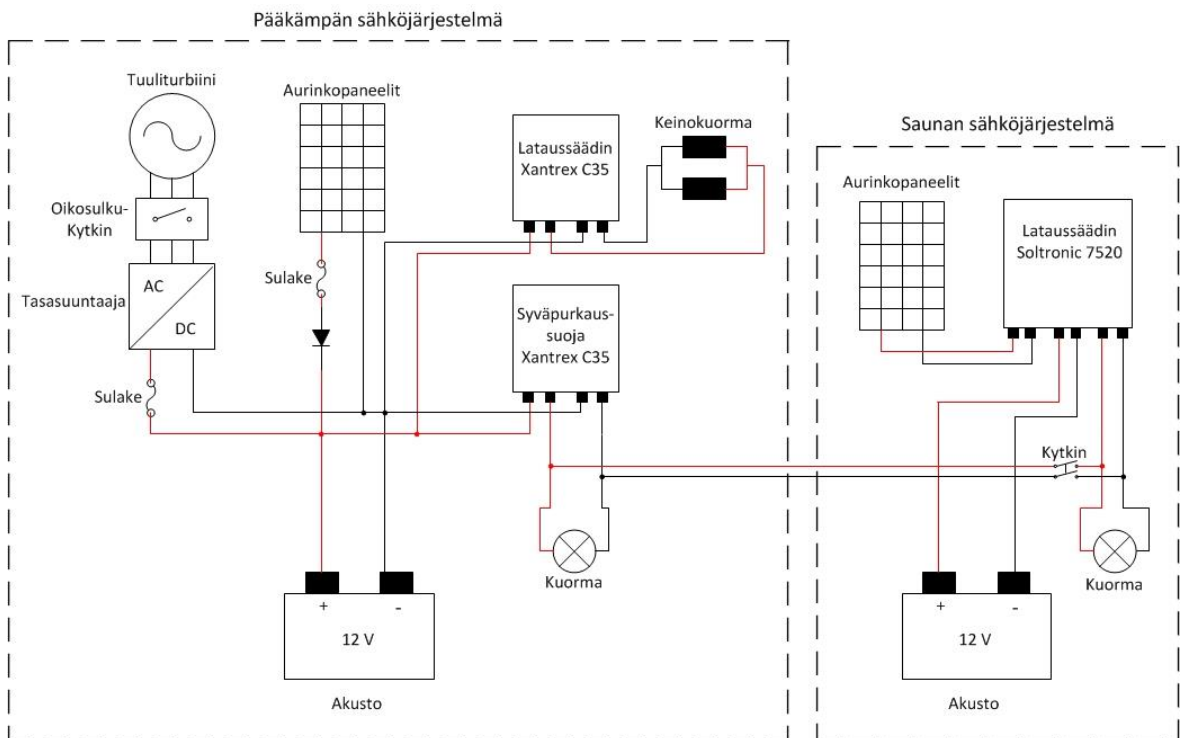
Yhtenä suunnittelun lähtökohtana oli, että rakennusten sähköjärjestelmät voidaan yhdistää. Tämä toteutetaan pääkämpän kuorman liittämisenä saunan kuormaan. Saunalla voidaan tällä tavoin akkujen varauksen ollessa matala käyttää pääkämpän akustoon tuulivoimalla tuotettua sähköenergiaa. Saunalla on kytkin, jonka avulla voidaan valita käytetäänkö saunan sähköjärjestelmän omaa akustoa vai pääkämpän sähköjärjestelmää.

Koska molemmilla rakennuksilla on jännitteellä 12 V toimivat sähkölaitteet, on pääkämpän akustolta otettava 24 V jännite muunnettava niille sopivaksi. Muunto tapahtuu kuvassa 5.2 näkyvällä jännitteen alentimella. Jännitteen alentimien haittapuolena on niiden aiheuttama järjestelmän hyötysuhteen heikkeneminen, sillä niiden hyötysuhteet ovat noin 0,85 luokkaa. Jännitteen alentimien tuottamat häviöt lisäävät entisestään järjestelmän

kokonaishäviöitä yhdessä pitkien siirtokaapeleiden kanssa. Järjestelmän haittapuolena on myös lataussäätimien erilaiset algoritmit, jotka saattavat aiheuttaa lataustilanteessa ongelmia, kuten edellisessä kappaleessa mainittiin.

5.3 Xantrex C35 –lataussäätimillä toteutettu järjestelmäratkaisu

Edellisissä kohdissa esitellyssä järjestelmässä ilmenneiden ongelmien johdosta leiripaikan sähköjärjestelmälle suunniteltiin kolmas vaihtoehto käyttäen Windy Nationin toimittamia komponentteja. Tässä järjestelmäsuunnitelmassa käytetään pääkämpän sähköjärjestelmässä kahta Xantrex C35 –lataussäädintä, joista toinen toimii lataussäätimenä ja toinen ylipurkautumissuojana. Xantrex C35 –lataussäätimet valittiin niiden virrankestoisuuden perusteella, joka on 35 A. Lataussäätimen virrankestoisuus riittää kattamaan tuulivoimalalta ja aurinkopaneeleilta tulevan kokonaisvirran. Saunan sähköjärjestelmänä käytetään alkuperäistä järjestelmäratkaisua. Kuvassa 5.3 on esitetty suunniteltu järjestelmä.



Kuva 5.3 Xantrex C35 -lataussäätimillä toteutettu hybridijärjestelmä.

Xantrex C35 –lataussäädin voidaan valita toimimaan joko lataussäätimenä tai ylipurkautumissuojana, joten kummankin toiminnon muodostamiseksi tarvitaan kaksi kyseistä laitetta. Tuulivoimalan ja aurinkopaneelien kytkeminen akustoon eroaa edellisessä järjestelmässä siten, että kummatkin sähköenergianlähteet kytketään suoraan akustoon, jonka rinnalle asennetaan lataussäädin. Tuulivoimalan kolmivaiheinen

vaihtovirta joudutaan tasasuuntaamaan kolmivaiheisella tasasuuntaussillalla, koska akuston lataaminen edellyttää tasavirtaa.

Käytettävä lataussäädin toimii PWM –tekniikalla, joka rajoittaa virtaa samalla periaatteella kuin kappaleessa 4.2.3 mittausten perusteella havaittiin testatun lataussäätimen kohdalla. Kun lataussäädin havaitsee akkujen jännitteen nousseen tiettyyn pisteeseen, se alkaa syöttämään tuuligeneraattorilta sekä aurinkopaneeleilta tulevaa virtaa säätimeen kytkettyihin vastuksiin. Vastusten kytkeytyessä rinnan akuston kanssa, kulkee virta aina vastusten kautta, koska akkujen muodostama vastajännite estää virran kulkeutumisen akustolle. Vaikka tuuligeneraattorin muodostama jännite voi kasvaa suurimmillaan hyvinkin korkeaksi verrattuna akkuihin, se ei aiheuta akuille vaaraa niiden sähköisen varauksen johdosta. Koska akkujen varaus on hyvin suuri verrattuna generaattoriin, akku torjuu tuulivoimalan muodostaman korkean jännitteen sen kytkeytyessä akustoon (Windy Nation a).

Lataussäädin ei sisällä valmiiksi asennettua vastusta, johon ylimääräistä sähkötehoa syötetään suojaten tällä tavoin akustoa yllilatautumiselta. Keinokuorma joudutaan siis mitoittamaan erikseen. Suunnitellussa hybridijärjestelmässä vastuksina käytetään Windy Nationin toimittamia 300 W vastuksia, jotka soveltuvat 12 V järjestelmälle. Lataussäätimeen liitettävän keinokuorman mitoittamiseksi tehdyt laskennat on esitetty liitteessä V. Laskennan pohjalta lataussäätimeen liitetään kaksi edellä mainittua vastusta rinnankytkettynä, jolloin kaikki ylimääräinen sähköteho saadaan kulutettua ja ehkäisemällä akkujen yllilataus.

Pääkämpän kuorma liitetään kuvassa 5.3 näkyvällä tavalla akustoon syväpurkaussuojana toimivan lataussäätimen kautta. Lataussäädin tarkkailee tässä tapauksessa akkujen jännitettä, jotta niiden varaus ei pääse laskemaan liian alas ja aiheuttamaan akkujen vioittumista. Järjestelmän mahdollisten ylivirtojen suojaus toteutetaan sulakkeilla. Sulakkeet asennetaan tuuliturbiinin tasasuuntaajan jälkeen ja pääkämpällä sijaitsevien aurinkopaneeleiden jälkeen. Sulake mitoitetetaan tuuliturbiinille 20 % suuremmaksi kuin turbiinin tuottama maksimivirta ja aurinkopaneelille 20 % suuremmaksi kuin sen maksimivirta (Windy Nation a). Samoin kuin kappaleen 5.2 järjestelmäratkaisussa myös tässä järjestelmäratkaisussa pääkämpän ja saunan väliin suunnitellaan asennettavan järjestelmät yhdistävä kaapeli.

5.4 Tuulivoimalan sijoitus

Tuuliolosuhteiden kannalta paras vaihtoehto olisi vanhan kämpän edustalla oleva niemi, sillä tuuli pääsee tällöin virtaamaan esteittä tuuliturbiinille mahdollisimman monesta suunnasta. Siirtokaapeleiden hinta kasvaa tällöin suureksi, sillä sijoituspaikan etäisyys

maitse pääkämpästä kasvaa noin 140 metriin. Suoraan lahden yli asennettaessa sijoituspaikan sekä lataussäätimen etäisyys laskee noin 115 metriin. Halvempi ratkaisu saataisiin sijoittamalla tuulivoimala pääkämpän edustalle kuvassa 5.4 näkyvään kohtaan. Tällöin siirtokaapeleiden pituus olisi noin 60 metriä, mikä on puolet lyhyempi edelliseen ratkaisuun verrattuna.



Kuva 5.4 Tuulivoimalan sijoitusvaihtoehdot (Maanmittauslaitos).

Kaapeleina voidaan käyttää joko ilma- tai maakaapeleita. Maakaapelit tulee kaivaa routarajan alapuolelle, jotta ne eivät pääse vahingoittumaan talvella. Maahan kaivettuna kaapelit eivät ole alttiita myrskytuulien kaatamille puille toisin kuin ilmakaapelit. Ilmakaapelit asennetaan tolppien varaan, joiden korkeuden olisi hyvä olla vähintään neljä metriä, jotta kukaan ei pääse kosketuksiin kaapeleiden kanssa.

5.4.1 Kaapelihäviöt

Kuten aiemmin todettiin, kaapeleissa tapahtuva tehohäviö on riippuvainen sähköenergian siirtomatkasta, jonka kasvaessa häviöt kasvavat. Siirtomatkan lisäksi tehohäviöiden suuruuteen vaikuttaa myös sähkönsiirtotapa, eli siirretäänkö sähköenergiaa tasa- vai vaihtovirralla. Kolmas siirtohäviöihin vaikuttava tekijä on kaapelin poikkipinta-ala. Mitä

suurempi on siirtokaapelin poikkipinta-ala sitä pienemmät ovat kaapelissa tapahtuvat häviöt.

Lippukunnalla on käytössään 35 mm² AMKA pienjänniteriippukierrekaapelia, jonka tasavirtaresistanssi R_{DC} on 0,868 Ω/km ja vaihtovirtaresistanssi R_{AC} 1,0 Ω/km sekä induktanssi L 0,00034 H/km. Tasavirralla tapahtuva tehohäviö voidaan nyt laskea yhtälöllä (2.10), kun ensin on selvitetty tasasuunnatun virran arvo yhtälön (2.11) avulla. Kyseiseen yhtälöön tarvittava tasasuunnatun jännitteen arvo saadaan yhtälöstä (2.12), jossa tasasuuntauksen oletetaan tapahtuvan 6-pulssidiodisillan avulla. Tällöin kertoimena k käytetään arvoa 1,35 (ABB 2000). Laskennassa on muistettava, että tasavirralla sähkötehoa siirretään kahden johtimen avulla, joten todellinen johtimen pituus on kaksi kertaa siirtomatka. Jakamalla tehohäviö tuuligeneraattorin tuottamalla teholla saadaan kaapelissa tapahtuvan tehohäviön prosenttiosuus. Laskennassa huomattiin, että tehohäviöt ovat lähes saman suuruisia riippumatta tuuligeneraattorin pyörimisnopeudesta. Siirtomatoille lasketut prosentuaaliset tehohäviöt tuuligeneraattorin nimellispisteessä on taulukoitu taulukkoon 5.1.

Kyseiselle kaapelille vaihtovirralla tapahtuva jänniteenalenema voidaan laskea yhtälöillä (2.12), (2.13), (2.14) ja (2.11). Tehohäviö vaihtovirralla saadaan nyt yhtälöstä (2.15). Kuten edellisessä tasavirtahäviöiden tarkastelussa, siirtomatoille laskettiin prosentuaaliset tehohäviöt ja ne on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Tehohäviöt AMKA 35 mm² riippukierrekaapelilla tuuligeneraattorin nimellispisteessä. Etäisyyksiä vastaavat siirtoreitit nähdään kuvasta 5.4.

	Tehohäviöt tasavirralla [%]	Tehohäviöt vaihtovirralla [%]
Etäisyys 60 m	3,5	3,4
Etäisyys 115 m	6,7	6,5
Etäisyys 140 m	8,2	7,9

Taulukossa 5.1 esitettyjen vaihtovirralla tapahtuvien prosentuaalisten tehohäviöiden huomataan olevan hieman tasavirralla tapahtuvia tehohäviöitä pienempiä. Tehohäviöt nähdään olevan myös kohtuullisen pieniä, joten sähkötehon siirtäminen kaikilla tutkituilla matkoilla on kannattavaa. Tuloksista voidaan todeta, ettei sähkönsiirtotavalla ole merkitystä häviöiden puolesta Humaljärven kohteessa.

Siirtomatoille haluttiin laskea myös tehohäviöt, kun käytettäviksi kaapeleiksi valitaan 16 mm² poikkipintainen ja alumiininen AMKA –kaapeli sekä 10 mm² poikkipintainen kuparijohtiminen MCMK –kaapeli. Laskennan tarkoitus on tarkastella kaapelivaihtoehtoja,

jotka lippukunnan olisi pitänyt hankkia, jos käytössä ei olisi ollut edellä mainittua kaapelia. Poikkipinnaltaan 16 mm² AMKA –kaapeli on ohuin saatavilla oleva alumiinivoimakaapeli, jonka kuormituskestoisuus on kuitenkin riittävä käyttötarkoitukseensa. Poikkipinta-alaltaan 10mm² MCMK –kaapeli valittiin toiseksi tarkasteltavaksi, koska haluttiin nähdä saadaanko alumiinivoimakaapelia ohuemmalla kuparivoimakaapelilla aikaan pienemmät tehohäviöt.

Tarkasteltavan AMKA –kaapelin tasavirtaresistanssi R_{DC} kilometriä kohden on 1,91 Ω /km, vaihtovirtaresistanssi R_{AC} 2,3 Ω /km ja induktanssi L 0,00039 H/km. Vastaavasti tarkasteltavan MCMK –kaapelin tasavirtaresistanssi R_{DC} on 1,89 Ω /km, vaihtovirtaresistanssi R_{AC} 2,19 Ω /km ja induktanssi L 0,00028 H/km. Kaapeleissa tapahtuvat häviöt voidaan määrittää nyt samalla tavalla kuin edeltävässä kohdassa ja tuuligeneraattorin nimellis pisteessä lasketut arvot on taulukoitu taulukkoon 5.2.

Taulukko 5.2 Tehohäviöt tuuligeneraattorin nimellis pisteessä 16 mm² poikkipintaisella AMKA –alumiinivoimakaapelilla ja 10 mm² –paksuisella MCMK –kuparivoimakaapelilla. Etäisyyksiä vastaavat siirtoreitit nähdään kuvasta 5.4.

	Tehohäviöt tasavirralla [%]	Tehohäviöt vaihtovirralla [%]
AMKA 16 mm ²		
Etäisyys 60 m	7,7	7,7
Etäisyys 115 m	14,7	14,7
Etäisyys 140 m	17,9	17,9
MCMK 10 mm ²		
Etäisyys 60 m	7,6	7,3
Etäisyys 115 m	14,6	14,0
Etäisyys 140 m	17,8	17,1

Taulukosta 5.2 nähdään, että ohuemmillä kaapeleilla siirtohäviöt kasvavat huomattavasti verrattuna taulukossa 5.1 esitettyihin poikkipinnaltaan 35 mm² kaapelin vastaaviin arvoihin. Taulukosta 5.2 nähdään myös, että kuparikaapelilla saavutettavat tehohäviöt ovat pienemmät kuin alumiinikaapelilla, vaikka tarkasteltavana olevan alumiinikaapelin poikkipinta-ala on suurempi. Tämä johtuu kuparin paremmasta sähkönjohtavuudesta. Kummankin kaapelin kohdalla tapahtuvat tehohäviöt ovat kuitenkin varsin pieniä ja kaapelit soveltuisivat suunniteltavaan sähköjärjestelmään tuulivoimalan tuottaman tehon siirtämiseen molemmilla sähkösiirtotavoilla.

Hinnaltaan 16 mm² AMKA –alumiinivoimakaapeli on huomattavasti edullisempi kuin 10 mm² MCMK –kuparivoimakaapeli. AMKA –kaapelin hinta metriä kohden on 2,16 €/m ja vastaavasti MCMK –kaapelin 7,90 €/m (Sähkötuote). Teknistaloudellisessa mielessä

paras siirtokaapelivaihtoehto tarkasteltavista kaapeleista olisi AMKA –kaapeli, sillä se on huomattavasti edullisempi ja sen kohdalla tapahtuvat siirtohäviöt ovat laskettujen etäisyyksien kohdalla suurimmillaan vain noin 0,8 %-yksikköä suuremmat. MCMK –kaapeliksi voitaisiin valita myös tarkastellun AMKA –kaapelin kanssa saman paksuinen vaihtoehto pienentäen näin siirtohäviöitä, mutta 16 mm² MCMK -kaapelin hinta nousisi jo 12,00 €/m (Sähkötuote).

Pääkämpän ja saunan välille suunnitellun tasavirtalinkille laskettiin myös tehohäviö käyttäen lippukunnan omistamaa 35 mm² AMKA –kaapelia. Pääkämpän ja saunan etäisyys toisistaan on noin 100 metriä. Tehohäviö laskettiin saunan sähköenergian kulutuksen huipputehon mukaan, jolloin saunan kaikki valot ovat päällä ja käytössä on yksi matkapuhelinlaturi. Tällöin sähkölaitteiden ottamaksi huipputehoksi arvioitiin 65 W, jolloin ne tarvitsevat 5,4 A:n suuruisen virran. Tasavirtalinkissä tasavirralla tapahtuvat häviöt lasketaan yhtälöllä (2.10) ja häviöprosentiksi saatiin 7,8 %. Käytössä olevalla kaapelilla tehohäviöt ovat siis riittävän pieniä, jotta pääkämpän sekä saunan sähköjärjestelmien yhdistäminen on kannattavaa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Suunniteltujen järjestelmäratkaisujen pohjalta Humaljärven partiokämpälle päädyttiin suositteluun kappaleessa 5.3 esiteltyä järjestelmää, jossa pääkämpän lataussäätimenä käytetään Xantrex C35 –lataussäädintä. Lataussäädin pystyy säätämään sekä aurinkopaneeleilla että tuulivoimalalla toteutettavaa akkujen lataamista, jolloin aurinkopaneeleille ei tarvita erillistä lataussäädintä. Tällä tavalla erityyppisten lataussäätimien latausalgoritmit eivät aiheuta mahdollisia ongelmatilanteita, kuten kappaleessa 5.2 esitetyssä järjestelmässä, jossa tuuligeneraattorin lataussäätimenä käytetään testattua lataussäädintä. Aurinkopaneelien lataustulos on kuitenkin käsitellyssä järjestelmässä huonompaa, koska alkuperäisessä järjestelmässä oleva MPPT –lataussäädin pystyy nostamaan aurinkopaneelilta saatavaa virtaa laskemalla niiden tuottamaa jännitettä. Kyseisen lataussäätimen avulla aurinkopaneeleista saadaan ulos paras mahdollinen latauspiste, mutta käsitellyssä järjestelmässä aurinkopaneelit ovat kytketty suoraan akuston napoihin. Tuuligeneraattorin arvioitu tuotanto on kuitenkin suurta, joten samassa latausjärjestelmässä olevan aurinkopaneelin heikompi tuotanto ei ole energian riittävyyden kannalta ongelma.

Tuulivoimalan kohdalla lataustulos paranee käytävällä lataussäätimellä verrattuna testattuun, sillä sen avulla voidaan käyttää akuston jännitteenä 12 V:a. Testatun lataussäätimen kohdalla huomattiin kappaleessa 4.2.1, että säädin alkaa lataamaan akkuja tuulennopeuden kasvaessa yli 4 m/s. Xantrex C35 –lataussäätimen avulla tuuligeneraattori alkaa lataamaan akkuja heti sen aloittaessa sähköenergian tuottamisen. Tällöin tuuligeneraattorin tuottaman jännitteen nähdään kasvavan riittävän suureksi 12 V:n akuston lataamisen aloittamiseksi, mikä voidaan nähdä taulukosta 4.1.

Testatun lataussäätimen avulla kappaleessa 5.2 suunniteltu järjestelmä tarvitsee 24 V akuston vuoksi jännitteen alentimet, joilla muunnetaan akustolta saatava jännite järjestelmän 12 V:lla toimiville laitteille sopivaksi. Jännitteen alentimet lisäävät järjestelmän kokonaishäviöitä, sillä niiden hyötysuhteet ovat noin 0,85 luokkaa. Xantrex C35 –lataussäätimen avulla saadaan siis parempi tuuligeneraattorin lataustulos ja järjestelmän kokonaishyötysuhde. Järjestelmän uusien laitteiden hankintahinta on toimituskuluineen noin 287 €, mikä on varsin pieni (Windy Nation b). Testatun lataussäätimen käyttäminen järjestelmässä ei ole siis kannattavaa, sillä paremmin Humaljärvelle soveltuvan järjestelmän laitteet saadaan hankittua pienellä investoinnilla. Testattu lataussäädin olisi kuitenkin toimiva ratkaisu sellaiseen 24 V:n järjestelmään, jossa energiantuottaminen toteutettaisiin ainoastaan tuulivoimalla.

Tuulivoimalan sijoituspaikaksi ehdotetaan valittavaksi saunan pohjoispuolella sijaitsevan niemen kärki parempien tuuliolosuhteiden johdosta. Niemen kärjestä sähkö siirretään pääkämpälle ilmakaapelina jolloin siirtomatkaksi muodostuu noin 115 metriä. Sähkön siirtäminen toteutetaan tasasähkönä, sillä Humaljärven tapauksessa se on asentamisen kannalta helpompaa. Kaapelihäviöiden kannalta sähkönsiirtotavan valinnalla ei ole merkitystä, kuten kappaleessa 5.4.1 todettiin. Tällöin järjestelmän vaatima tasasuuntaussilta sijoitetaan lähelle akustoa. Tällä tuulivoimalan sijoituspaikalla ja valitulla sähkönsiirtotavalla käytettävissä kaapeleissa tapahtuvat tehohäviöt ovat 6,7 %, joten tehohäviöt ovat siis 35 mm² AMKA –kaapelilla todella pienet. Tehohäviöissä ei olla otettu huomioon tasasuuntaussillassa ja liittimissä tapahtuvia tehohäviöitä. Nämä tehohäviöt voidaan kuitenkin olettaa pieniksi, ja ne voidaan jättää huomioimatta.

Tuulivoimalan muodostama sähköjärjestelmä suojataan sulakkeilla, maadoituksilla ja ylijännitesuojilla. Sulakkeiden mitoitus sekä sijoitus esiteltiin kappaleessa 5.3. Koska tuuligeneraattorin tuottama virta tasasuunnataan, sille mitoitettava sulake määritetään tasasuunnatun maksimivirran mukaan. Tuuligeneraattorin tasasuunnattu maksimivirta on yhtälön (2.11) mukaan 15,4 A. Sulakkeet valitaan niin, että tuulivoimalalle valitaan 20 A:n ja aurinkopaneeleille 6 A:n suuruiset, esimerkiksi Roaming Oy:n toimittamat automaattisulakkeet (Roaming Oy). Tuuliturbiinin masto maadoitetaan 16 mm² kuparijohtimella, joka johdetaan järveen maston juuresta. Myös järjestelmän lataussäätimet maadoitetaan pääkämpän perustusten alla olevaan maadoituselektrodiin. Ylijännitesuojaus toteutetaan esimerkiksi kolmivaiheisella Deltan LA303 -ylijännitesuojalla, joka kytketään generaattorin vaihejohtimiin sekä maadoituskaapeliin (Delta Surge Protectors). Ylijännitesuoja asennetaan oikosulkukytkimen ja tasasuuntaussillan väliin, jotta turbiinin kytkeminen oikosulkuun ei aiheuta mahdollista virhetilannetta ylijännitesuojassa. Tuulivoimalan sulake ja ylijännitesuoja sijoitetaan tuulivoimalan maston juurelle sijoitettavaan säältä suojattuun koteloon yhdessä tuulivoimalan oikosulkukytkimen kanssa.

Järjestelmäratkaisujen yhteydessä kappaleissa 5.1 ja 5.2 todettiin, että PWM – ja MPPT – tyyppisten lataussäätimien latausalgoritmien yhteensopivuudessa saattaa ilmetä ongelmia. Tästä ongelmasta ei voida kuitenkaan olla varmoja, sillä aiheesta ei ole olemassa dokumentteja eikä vastaaviin järjestelmiin erikoistuneet yritykset osanneet kertoa varmuudella laitteiden yhteensopivuudesta. Järjestelmä tulisi testata laboratoriossa, jotta saataisiin varmaa tietoa lataussäätimien yhteensopivuudesta.

LÄHTEET

- (ABB 2000) ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10. painos. Ykkös-Offset Oy. Vaasa. s. 420
- (Agrawal 2011) Agrawal, B., Tiwari, G., N. 2011. Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems – For Sustainable Developments. Royal Society of Chemistry. s. 287.
- (Belkin) Belkin. Products. [verkkosivu]. [viitattu 13.9.2014]. saatavilla: <http://www.belkin.com/us/F8M711-Belkin/p/P-F8M711/>
- (Delta Surge Protectors) Delta Surge Protectors. [verkkosivu]. [viitattu 18.5.2014]. saatavilla: <http://www.deltasurgeprotectors.com/home.cfm>
- (Emeis 2013) Emeis, S. 2013. Wind Energy Meteorology Atmosphere Physics for Wind Generation. Springer Berlin Heidelberg. s. 9.
- (Eurosolar) Eurosolar. Lataussäätimet. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.2.2014]. Saatavilla: <http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/7s.pdf>
- (Exide) Exide Batteries. Esitteet. Exide geeli. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.4.2014]. Saatavilla: http://exide.fi.loopiadns.com/wp/wp-content/uploads/2012/04/Exide_EXIDE_GEL_FI.pdf
- (Finnwind) Finnwind. Aurinkoenergiaopas. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.1.2014]. Saatavilla: <http://finnwind.fi/aurinko/Aurinkoenergiaopas-Finnwind.pdf>
- (Hau 2013) Hau, E. 2013. Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer Berlin Heidelberg. s. 65-70.
- (Ilmatieteen laitos a) Ilmatieteen laitos. Auringon rakenne ja elinkaari. [verkkosivu]. [viitattu 7.4.2014]. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakenne-ja-elinkaari>

- (Ilmatieteen laitos b) Ilmatieteen laitos. Avoin data. Tuulennopeudet. Lepolan sääasema, id 101247. 2012. Muokattu. [viitattu 2.4.2014]
- (Kaldellis 2010) Kaldellis, J., K. 2010. Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems – Technology, Energy Storage and Applications. Woodhead Publishing. s. 3, 8-9.
- (Kaligirou 2009) Kaligirou, S., A. 2009. Solar Energy Engineering – Processes and Systems. Elsevier. s. 469-470.
- (Maanmittauslaitos) Maanmittauslaitos. Avoimien aineistojen tiedostopalvelu. [viitattu 13.4.2014]. Saatavilla:
<https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/karta>
- (NREL 2004) The National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [verkkodokumentti]. [viitattu 18.5.2014]
- (Pyrhönen 2014) Pyrhönen, O. 2014. Tuuli- ja aurinkovoimateknologia ja liiketoiminta. Luento 9, Solar energy technology. s. 20. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.9.2014]
- (Rashid 2011) Rashid, M., H. 2011. Power Electronics Handbook – Devices, Circuits and Applications. 3rd Edition. Elsevier. s. 727.
- (REPS) REPS, Renewable Energy Productions Solutions. [verkkosivu]. [viitattu 24.1.2014]. Saatavilla:
<http://www.reps.fi/frames-prod-batteries-fi.htm>
- (Roaming Oy) Roaming Oy. Tuotteet. Tarvikkeet. [verkkosivu]. [viitattu 18.5.2014]. saatavilla:
<http://www.roaming.fi/tarvikkeet.htm>
- (SRM Wind Power Company) SRM Wind Power Company. Application. [verkkosivu]. [viitattu 4.4.2014]. Saatavilla:
<http://www.windgenerators.cn/showapplication/6.html>
- (Suntekno) Suntekno. Aurinkopaneelit. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.2.2014]. Saatavilla:
<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopaketti/paneelit.pdf>

- (Suomen sääpalvelu) Suomen sääpalvelu. Auringon säteilyteho. Lappeenranta vuositilastot 2013. [verkkosivu]. [viitattu 13.2.2014]. Saatavilla: <http://www.saapalvelu.fi/lappeenranta/vuositilastot.php>
- (Suomen tuuliatlas) Suomen tuuliatlas. Karttaliittymä. [verkkosivu]. [viitattu 13.2.2014]. Saatavilla: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>
- (Suomen tuulivoimayhdistys ry a) Suomen tuulivoimayhdistys ry. Tietoa rakentajalle. [verkkosivu]. [viitattu 17.1.2014]. Saatavilla: http://www.tuulivoimayhdistys.fi/yleista_teknikasta
- (Suomen tuulivoimayhdistys ry b) Suomen tuulivoimayhdistys ry. Pientuulivoima. [verkkosivu]. [viitattu 17.1.2014]. Saatavilla: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/pientuulivoima>
- (Sähkötuote) Sähkötuote. Johtimet ja kaapelit. Tuotteiden hinnat. [verkkosivu]. [viitattu 2.5.2014]. Saatavilla: http://sahkotuote.fi/kauppa/index.php?main_page=index&cPath=99988&zenid=m82chi2lb9t5ebms0jofls4tg0
- (Tiwari 2012) Tiwari, G., N., Mishra, R., K. 2012. Advanced Renewable Energy Sources. Royal Society of Chemistry. s. 319-320.
- (TKK) Helsingin teknillinen yliopisto. Laboratory of Advanced Energy Systems. New & Renewable energy systems group. Aurinkosähkö. [verkkosivu]. [viitattu 12.2.2014]. Saatavilla: <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>
- (Windy Nation a) Windy Nation. Sähköpostihaastattelu. Asiakaspalvelu. [viitattu 14.4.2014]

(Windy Nation b)

Windy Nation. Accessories. Tuotteiden hinnat. [verkkosivu]. [viitattu 2.5.2014]. Saatavilla: <http://www.windynation.com/Accessories>

(Windy Nation c)

Windy Nation. Wind Turbine Dump and Diversion Loads: What They Do and How to Choose the Right System. [verkkosivu]. [viitattu 17.9.2014]. Saatavilla: <http://www.windynation.com/jzv/inf/wind-turbine-dump-and-diversion-loads-what-they-do-and-how-choose-right-s>

(Yingli Solar)

Yingli Solar. Our Products. YGE 60 Cell Series. Datasheet. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.5.2014]. Saatavilla: http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf

LIITTEET

- Liite I. Humaljärven leiripaikan sähkölaitteiden käyttötunnit
- Liite II. Aurinko- ja tuulivoimalla arvioidut kuukausittaiset energiantuotannot
- Liite III. Järjestelmätestauksessa käytetyt kytkennät
- Liite IV. Generaattorin hyötysuhteen laskenta
- Liite V. Xantrex C35 –lataussäätimen keinokuorman mitoittaminen

HUMALJÄRVEN LEIRIPAIKAN SÄHKÖLAITTEIDEN KÄYTTÖTUNNIT

Taulukko 1 Varausvuorokausille arvioidut pääkämpän laitteiden käyttötunnit talvikuukausina.

	Sisävalot, keskimäärin 6kpl [h]	Ulkovalot [h]	Radio [h]	Matkapuhelimet [h]
Yksittäinen päivä	3	1	0	0
Puolikas päivä	4	2	4	2
Kokonainen päivä	8	2	10	16

Taulukko 2 Varausvuorokausille arvioidut saunan ja vanhan kämpän laitteiden käyttötunnit talvikuukausina.

	Sisävalot, keskimäärin 6kpl [h]	Ulkovalot [h]	Radio [h]	Matkapuhelimet [h]
Yksittäinen päivä	3	1	0	0
Puolikas päivä	4	2	4	2
Kokonainen päivä	6	2	10	16

Taulukko 3 Varausvuorokausille arvioidut pääkämpän laitteiden käyttötunnit kesäkuukausina.

	Sisävalot, keskimäärin 6kpl [h]	Ulkovalot [h]	Radio [h]	Matkapuhelimet [h]
Yksittäinen päivä	1	1	0	0
Puolikas päivä	2	1	4	2
Kokonainen päivä	4	1	10	16

Taulukko 4 Varausvuorokausille arvioidut saunan ja vanhan kämpän laitteiden käyttötunnit kesäkuukausina.

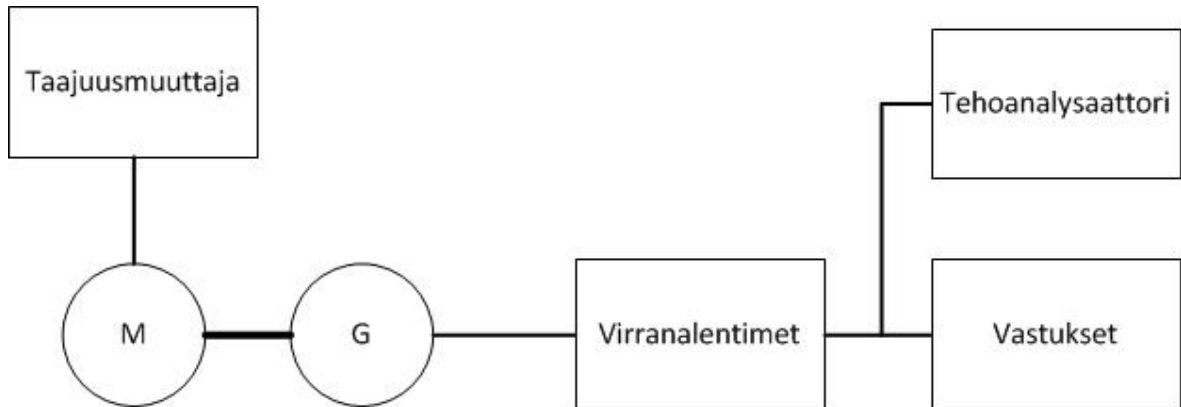
	Sisävalot, keskimäärin 6kpl [h]	Ulkovalot [h]	Radio [h]	Matkapuhelimet [h]
Yksittäinen päivä	1	0	0	0
Puolikas päivä	2	0	4	2
Kokonainen päivä	4	2	10	16

**AURINKO- JA TUULIVOIMALALLA ARVIDUT KUUKAUSITTAISET
ENERGIANTUONTANNOT**

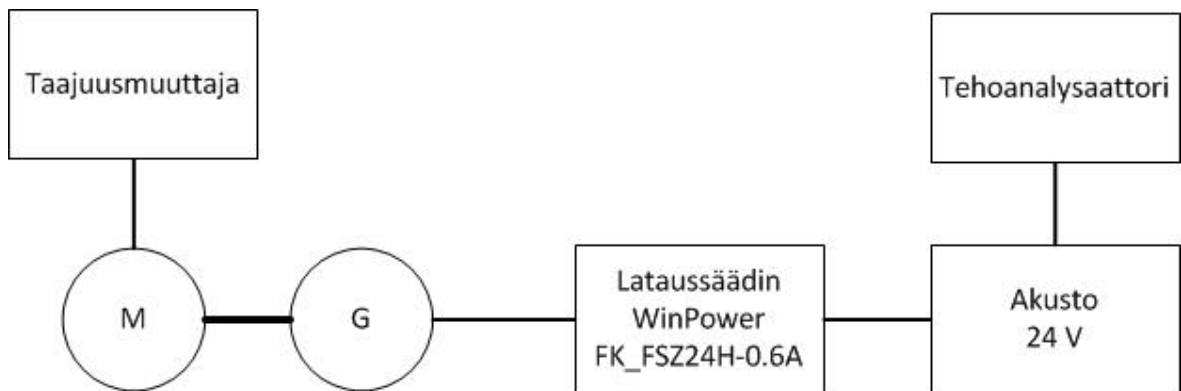
Taulukko 1 Tuuli- ja aurinkovoimalla arvioidut energiantuotannot kuukausittain.

Kuukausi	Arvioitu tuotettu aurinkoenergia [kWh]	Arvioitu tuotettu tuulienergia [kWh]
tammikuu	0,78	21,64
helmikuu	2,34	19,42
maaliskuu	9,51	16,59
huhtikuu	23,05	10,17
toukokuu	30,99	14,64
kesäkuu	33,07	8,64
heinäkuu	31,25	5,97
elokuu	22,92	6,08
syyskuu	11,20	7,96
lokakuu	3,91	5,52
marraskuu	1,30	15,22
joulukuu	0,78	23,09

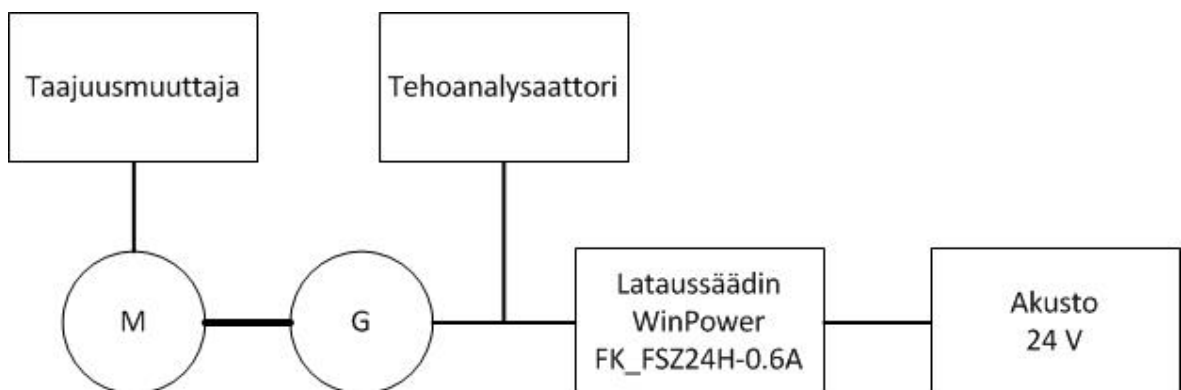
JÄRJESTELMÄTESTAUKSESSA KÄYTETYT KYTKENNÄT



Kuva 1 Tuuligeneraattorin tehojen ja hyötysuhteiden määrittämiseksi käytetyn kytkennän lohkokkaavio.



Kuva 2 Lataussäätimen heräämiseen, latausvirtojen ja latauskäyrän mittaamiseksi käytetyn kytkennän lohkokkaavio.



Kuva 3 Tuuligeneraattorin oikosulkuvirran määrittämiseksi käytetyn kytkennän lohkokkaavio.

GENERAATTORIN HYÖTYSUHTEN LASKENTA

Generaattorin hyötysuhde lasketaan yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_t}{T_s * T_n * 2\pi \frac{n}{60}}, \quad (1)$$

missä P_t on generaattorin tuottama sähköteho, T_s generaattoria pyörittävän sähkömoottorin prosentuaalinen osuus nimellispisteen vääntömomentista, T_n sähkömoottorin nimellispisteen vääntömomentti ja n generaattorin pyörimisnopeus. Käytetyn nimellisteholtaan 7,5 kW:n sähkömoottorin nimellispisteen vääntömomentti on 49,4 Nm. Taulukossa 1 on esitetty testauksessa saadut mittaustulokset.

Taulukko 1 Tuuligeneraattorin hyötysuhteen testaamisessa mitatut arvot.

Pyörimisnopeus n [rpm]	Vääntömomentti moottorin nimellispisteestä T_s [%]	Generaattorin antama sähköteho P_t [W]
200	33,8	190,2
300	35,6	366,1
400	39,6	591,7

Generaattorin hyötysuhteiksi laskettiin seuraavat arvot eri pyörimisnopeuksilla:

$n = 200$ rpm:

$$\frac{190,2 \text{ W}}{0,338 * 49,4 \text{ Nm} * 2\pi \frac{200}{60}} \approx 0,544$$

$n = 300$ rpm:

$$\frac{366,1 \text{ W}}{0,356 * 49,4 \text{ Nm} * 2\pi \frac{300}{60}} \approx 0,663$$

$n = 400$ rpm:

$$\frac{591,7 \text{ W}}{0,396 * 49,4 \text{ Nm} * 2\pi \frac{400}{60}} \approx 0,721$$

XANTREX C35 –LATAUSSÄÄTIMEN KEINOKUORMAN MITOITTAMINEN

Keinokuormaa mitoittaessa selvitetään energianlähteiltä saatava suurin virran arvo. Aurinkopaneeleilta saatava suurin tasasähkövirta on 5,81 A ja tuuligeneraattorilta saatava suurin kolmivaiheinen vaihtovirtavirta I_{AC} on laboratoriotestauksen mukaan 12,0 A. Kun tasasuuntauksen teho pysyy samana, voidaan tasasuunnatun virran arvo I_{DC} selvittää yhtälöillä (2.11) ja (2.12).

Oletetaan käytettävän tasasuuntaajan olevan 6-pulssidiodisilta, jolloin kertoimeksi k saadaan 1,35 (ABB 2000). Kun tuuligeneraattorin tuottaman suurimman kolmivaiheisen pääjännitteen arvo on 33,8 V, saadaan yhtälöstä (2.12) tasasuunnatuksi jännitteeksi $U_{DC} = 1,35 * 33,8 = 45,6 \text{ V}$. Nyt voidaan ratkaista yhtälöstä (2.11) tasasuunnatun virran arvo, jonka on $I_{DC} = \frac{\sqrt{3} * 12,0 \text{ A} * 33,8 \text{ V}}{45,6 \text{ V}} = 15,4 \text{ A}$. Energianlähteiltä saatava suurin sähkövirta I_{max} on siis yhteensä $5,8 \text{ A} + 15,4 \text{ A} = 21,2 \text{ A}$.

Lasketaan Ohmin lain mukaan yhtälöllä (1) kuinka paljon tehoa P keinokuormassa on kulutettava.

$$P_k = U_a I_{max}, \quad (1)$$

missä U_a on akuston jännite. Valitaan akuston jännitteeksi 14,5 V, joka on karkeasti arvioituna täyteen varatun 12 V akuston jännite. Keinokuorman vaadituksi tehon kulutukseksi saadaan nyt $P_k = 14,5 \text{ V} * 21,2 \text{ A} = 307,4 \text{ W}$.

Lasketaan keinokuormalle tuleva sähkövirta I_k , kun keinokuorma kytkeytyy akustoon yhtälöllä

$$I_k = \frac{U_a}{R_k}, \quad (2)$$

missä R_k on keinokuorman resistanssi. Keinokuormana käytetään Windy Nationin 12 V:n järjestelmille soveltuvaa vastusta, jonka resistanssi on $0,73 \Omega$. Keinokuormalle tulevaksi sähkövirraksi saadaan nyt $I_k = \frac{14,5 \text{ V}}{0,73 \Omega} = 19,9 \text{ A}$.

Yhdessä keinokuormassa kuluva teho P_k voidaan laskea nyt yhtälön (1) avulla sijoittamalla virran paikalle kuormalle tulevan sähkövirran I_k , jolloin tulokseksi saadaan

$P_k = 14,5 \text{ V} * 19,9 \text{ A} = 288,0 \text{ W}$. Huomataan, että vaadittu tehon kulutus on suurempi kuin yksi vastus kuluttaa tehoa, joten keinokuormaan tarvitaan enemmän kuin yksi vastus. Vertaamalla vaadittua tehon kulutusta ja yhden vastuksen kuluttamaa tehoa nähdään, että Xantrex C35 -lataussäädin tarvitsee vähintään kaksi vastusta rinnankytkettynä keinokuorman muodostamiseen. (Windy Nation c)