



Liikuteltava hybridienergiajärjestelmä laboriotyönä

Tuomas Rytönen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

RYTKÖNEN, TUOMAS
Liikuteltava hybridienergiajärjestelmä laboratoriotyönä

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2022

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda laboratoriotyö liikuteltavasta hybridienergiajärjestelmästä Tampereen sähkövoimatekniikan opiskelijoille. Laboratoriotyön tavoitteena on antaa opiskelijoille ymmärrys ilmiöistä järjestelmän rakentamisen taustalla sekä havainnollistaa muutamia hybridienergiajärjestelmän useista käyttömahdollisuuksista.

Opinnäytetyössä käsitellään ilmastonmuutosta sekä energiamurrosta ilmiönä, jotka ovat oleellisesti vaikuttaneet liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän rakentamiseen. Taustatekijöiden käsittelyn jälkeen avataan hybridienergiajärjestelmiä yleisellä tasolla sekä itse liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän rakennetta ja toimintaa. Lopuksi liikuteltavan järjestelmän ympärille on koottu laboratoriotyö Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan opiskelijoille.

Laboratoriotyö koostuu kolmesta osuudesta, joihin kuuluvat esitehtäväosuus, käytännön mittaukset ja jälkiselostuksen laatiminen. Esitehtäväosuudessa tutustutaan ilmiöihin, jotka ovat vaikuttaneet järjestelmän rakentamiseen, järjestelmän teknisiin käsitteisiin ja käyttöohjeeseen. Käytännön mittauksia on yhteensä kolme. Ensimmäisessä mittauksessa tarkastellaan, miten järjestelmän ylikuormittuminen vaikuttaa sen toimintaan. Toisessa mittauksessa selvitetään, miten aurinkopaneelin käyttöä voidaan optimoida akuston avulla. Viimeisessä mittauksessa tutustutaan järjestelmän automaattiohjaustoimintoon.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical and automation engineering
Electrical power engineering

TUOMAS RYTKÖNEN:
Mobile hybrid energy system as a laboratory work

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 3 pages
May 2022

The purpose of this thesis was to create a laboratory work on a mobile hybrid energy system for third- or fourth-year electrical power engineering students at Tampere university of applied sciences (TAMK). The mobile hybrid energy system was built entirely in-house at TAMK. The main goal of the laboratory work is to provide the students with a basic understanding of the driving factors that ultimately led to the construction of the hybrid energy system and to demonstrate a few of the several uses it has.

The thesis touches briefly on climate change and energy transition as driving factors behind the construction of the system. Next the main idea behind hybrid energy system is explained after which the general idea and functions of the mobile hybrid energy system itself are explained. Lastly, the laboratory work itself is composed and explained.

The laboratory work consists of three portions, which include a pre-laboratory work portion, a practical laboratory work portion as well as writing out a work report. In the pre-laboratory work portion the students explore the phenomena that have had a substantial impact on the construction of the mobile hybrid energy system. The students shall also familiarize themselves with the essential technical concepts and the user manual of the system. The practical laboratory work portion consists of three parts. In the first part the students examine how overloading affects the system. In the second part they study how a solar panel system can be optimized with the help of a battery. In the third part the students get to know how the intelligent control system works.

Key words: hybrid energy system, climate change, energy transition

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ILMIÖT HYBRIDIENERGIAJÄRJESTELMÄN TAUSTALLA	7
	2.1 Ilmastonmuutos ja energiantuotanto	7
	2.2 Energiamurros.....	7
3	HYBRIDIENERGIAJÄRJESTELMÄ	10
	3.1 Liikutettava hybridiennergiajärjestelmä	11
	3.2 Järjestelmän akusto	12
	3.3 Tehoelektroniikkavaunun yleisrakenne ja toiminta	14
	3.3.1 Aurinkopaneelijärjestelmä	16
	3.3.2 Verkkokäyttö.....	17
	3.3.3 Ohjausjärjestelmä.....	17
	3.4 Älykäs automaattiohjaus	18
	3.5 Hybridiennergiajärjestelmän käyttömahdollisuuksia.....	19
4	LABORATORIOTYÖN LAADINTA.....	21
	4.1 Laboratoriotyön esitehtävät sekä jälkiselostus	21
	4.2 Taajuusmuuttajakäyttöisen saarekeverkon kuormitustesti	22
	4.3 Aurinkosähkövoimalan optimointia energiavaraston avulla	27
	4.4 Verkkoliitynnän automaattiohjaus.....	32
5	POHDINTA	36
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET	40
	Liite 1. Ensimmäisen mittauksen periaatekytkentä.	40
	Liite 2. Toisen mittauksen kytkentäkaavio.	41
	Liite 3. Automaattiohjauksen käyttöönotto.	42

LYHENTEET JA TERMIT

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
HESS	Hybridienergian varastointijärjestelmä
EAKR	Euroopan aluekehitysrahasto
Ah	Ampeeritunti
SoH	State of Health, eli akuston vanhentumista kuvaava termi
SoC	State of Charge, eli akuston varaustilaa kuvaava termi
LFP	Lithium ferro phosphate, eli litium-rautafosfaatti
AFE	Active front end -suuntaaja
PV	Photovoltaic, valosähköinen
DC	Tasavirta
AC	Vaihtovirta

1 JOHDANTO

Pääosin ilmastonmuutoksen seurauksena sähköenergiajärjestelmä on murroksen keskellä. Tätä murrosta kutsutaan energiamurrokseksi, jossa fossiilisia polttoaineita, kuten hiiltä ja öljyä, hyödyntävistä energiantuotantomenetelmistä pyritään pääsemään hiljalleen eroon. Näiden ilmastoja saastuttavien energiantuotantomuotojen tilalle on tulossa hajautettuja ja uusiutuvia energiantuotantomuotoja, kuten esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaloita. Tämä siirtymä tuo mukanaan kuitenkin haasteita. Uusiutuvat energiantuotantomuodot, kuten edellä mainitut aurinko- sekä tuulivoima, ovat vahvasti riippuvaisia vallitsevasta säätilasta. Niiden energiantuotanto on siis hankalasti ennustettavissa lyhyellä aikatahtimella. Tuulettomina tai pilvisinä päivinä energiaa ei tuoteta riittävästi, mikä aiheuttaa haasteita verkon tehotasapainon hallintaan. Tehotasapainossa energian tuotannon sekä kulutuksen on vastattava joka hetki toisiaan, koska tehoepätasapaino heikentää sähkön laatua. Siksi onkin oleellista, että sähkön tuotannon sekä kulutuksen on oltava tasapainossa vuorokauden jokaisena hetkenä. Muun muassa energianvarastointiratkaisut ovat osana ratkaisemassa tätä ongelmaa.

Tampereen ammattikorkeakoulussa on rakennettu liikuteltava hybridienergiajärjestelmä yhteistyössä Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen sekä alalla vaikuttavien pienten ja keskisuurten yritysten kanssa. Projektin tavoitteena oli rakentaa mahdollisimman monipuolinen sekä älykäs järjestelmä, jonka avulla pystytään esittelemään monipuolisesti energiamurrokseen liittyviä moderneja sähkökäyttöjä, joissa yhteiskunnan sähköistymisellä, uusiutuvalla energialla ja energian varastoinnilla ovat merkittävät roolinsa. Liikuteltavaan hybridienergiajärjestelmään onkin siis sisällytetty mahdollisimman edistynyttä tehoelektroniikkaa ja sen liikuteltavuus lisää järjestelmän monipuolisuutta.

Toisessa luvussa käsitellään liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän rakentamisen taustalla vaikuttavia tekijöitä, eli ilmastonmuutosta ja energiamurrosta. Kolmannessa luvussa käsiteltävänä on itse liikuteltava hybridienergiajärjestelmä, sen rakenne ja toimintaperiaatteet. Neljäs luku painottuu järjestelmän pohjalta koottuun laboratoriotyöhön.

2 ILMIÖT LIIKUTELTAVAN HYBRIDIENERGIAJÄRJESTELMÄN TAUSTALLA

2.1 Ilmastonmuutos ja energiantuotanto

Ihmisen toiminta on vaikuttanut huomattavasti maapallon ilmastonmuutokseen. Ilmaston on lämmennyt, sillä valtavia määriä kasvihuonekaasuja on vapautunut ilmakehään jatkuvasti. Energiasektori tuottaa suurimman osan näistä kasvihuonekaasuista polttamalla fossiilisia polttoaineita. (Euroopan komissio. 2022.)

Energiantuotanto on siis yksi suurimmista ilmastonmuutokseen vaikuttavista tekijöistä. Fossiilisten polttoaineiden kuten hiilen ja öljyn käyttö energiantuotannossa kiihdyttää ilmaston lämpenemistä. Siirtymisellä fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energiantuotantomuotoihin, kuten aurinko- ja tuulivoimaan, pyritään hillitsemään ilmastonmuutoksen etenemistä. Valtaosa maailman hiilidioksidipäästöistä on peräisin rikkaista teollisuusmaista, mutta kehittyvien maiden energiankulutus on kasvamassa voimakkaasti. Ilmastonmuutos tarjoaa yhteiskunnalle mahdollisuuden siirtyä uusiutuviin ja vähäpäästöisiin energianlähteisiin energiantuotannossa. Tätä siirtymää kutsutaan energiamurrokseksi. (Ulkoministeriö. Energia ja ilmastonmuutos. 2022.)

2.2 Energiamurros

Energiamurroksessa energiasektori irtautuu fossiilisista polttoaineista, kuten öljystä, maakaasusta ja hiilestä. Ne korvataan muun muassa säästä riippuvilla uusiutuvilla sekä hajautetuilla energiantuotantomuodoilla, kuten esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimalla sekä energianvarastointiratkaisuilla. Muita ilmastoystävällisiä tuotantomuotoja ovat muun muassa ydinvoima ja bioenergia. Hajautetuilla energiantuotantomuodoilla tarkoitetaan useiden pienikokoisten tuotantolaitosten hajauttamista sähkön siirtoverkossa. Uusiutuvat energiantuotantomuodot sekä energian varastointi ovat avaintekijöitä energiamurroksessa. (Heiskanen, Matschoss, Laakso, Rinkinen & Apajalahti. 2021.)

Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuville energiantuotantomuodoilla aiheuttaa kuitenkin haasteita sähköenergiajärjestelmälle. Tuuli- ja aurinkovoiman energiantuotanto on voimakkaasti riippuvainen vallitsevasta säätilasta, toisin kuin energiantuotanto fossiililla polttoaineilla. Sähköä on tuotettava joka hetki saman verran kuin sitä kulutetaan. Tätä kulutuksen sekä tuotannon suhdetta kutsutaan tehotasapainoksi. Tasapainon vallitessa sähköverkon taajuus on Suomessa 50 Hz, jonka perinteisten voimalaitosten suuret sähköä tuottavat tahtigeneraattorit tuottavat. Tehoepätasapaino puolestaan vaikuttaa heikentävästi sähkön laatuun. Kun tuotanto ylittää kulutuksen, taajuus nousee. Jos sähköä kulutetaan enemmän kuin sitä tuotetaan, taajuus laskee. (Fortum. 2022.)

Säätövoiman lisäämiseen on kiinnitettävä tulevaisuudessa entistä enemmän huomiota tehotasapainon hallitsemiseksi. Sähköverkosta tulee aiempaa herkempi tehoepätasapainolle, koska sähköverkon inertia vähenee pyöriviä koneita hyödyntävän fossiilisen sähköntuotannon vähenemisen myötä. Sähköverkon inertia tarkoittaa sähköverkossa olevaa liike-energiaa, joka on sitoutunut voimalaitoksissa ja tehtaissa oleviin koneisiin. Nämä sähköä verkkoon tuottavien koneiden pyörivä massa tuottaa inertiaa sähköverkkoon. (Fingrid). Inertia tuottaa tasapainoa verkon taajuuteen, joten sen väheneminen aiheuttaa tehoepätasapainoa. Tämä johtaa siihen, että säätövoiman tarve sähköverkossa lisääntyy huomattavasti. Lisäksi, kun säästä riippuvaista energiantuotantoa lisätään, tehotasapainon hallinta vaikeutuu entisestään. Edellä mainittujen syiden vuoksi tehon hallinnalle on kasvava tarve. Energian varastointiratkaisut sekä älykkäät ohjaukset ovat avainasemassa näiden haasteiden ratkaisussa. (Korpela. 2022.)

Säätövoiman lisäksi muun muassa kysyntäjoustot, tehotariffit ja vartitaseet nousevat esiin liittyen tehotasapainon hallintaan. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkönkäytön- ja tuotannon hetkellistä muuttamista tehotasapainon tarpeisiin sopiviin hetkiin. Lisäksi kysyntää voidaan siirtää korkean kulutuksen sekä hinnan hetkiltä edullisempaan ajankohtaan. (Fingrid).

Energiayhtiöt ovat ottaneet käyttöönsä ns. tehotariffimallin, jossa sähkönkuluttaja maksaa sekä energian kulutuksesta että tehopiikeistä. Sähkönkuluttaja säästää sähkölaskuissaan suuren summan, jos hän välttää kulutuspiikkejä sekä ajankoh-

tia, jolloin sähkön kulutus on huipussaan (esim. talvikuukaudet). Ratkaisuna toimivat energian varastointi sekä älykkäät ohjaukset. Esimerkiksi akustoa voitaisiin ladata niinä hetkinä, kun muu kulutus on alhaisimmillaan ja ladattua energiaa hyödyntää silloin, kun energian tarve on suuri. (Gaia. 2018.)

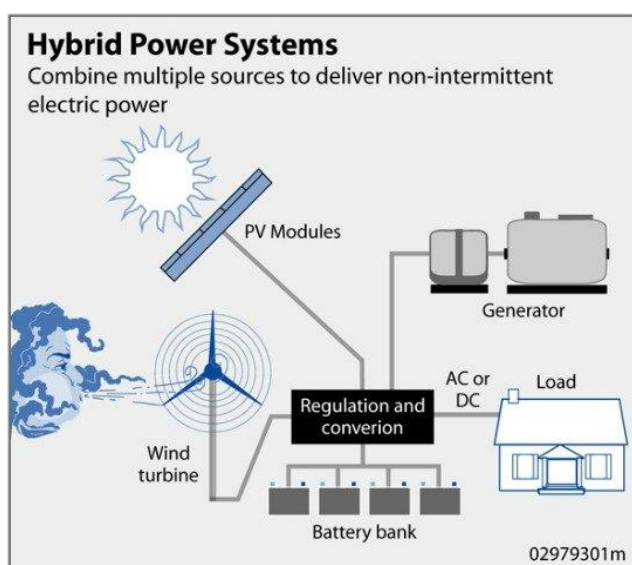
Nykyään sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat sähkön kulutuksen sekä tuotannon etukäteen tasapainon lähtökohdaksi. Uusiutuvan energiantuotannon lisääntymisen takia sähköntuotanto on entistä vaihtelevampaa. Säätilan vaihtelut ovat esimerkiksi puolipilvisinä päivinä nopeita, mikä vaikeuttaa entisestään tuotannon ennustamista. Nykyinen tunnin tarkkuudella ennustettava ajanjakso on liian pitkä, joten tulevaisuudessa siirrytään malliin, jossa sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainoa tarkastellaan 15 minuutin ajanjaksoissa. Tähän varttitaseeseen siirtymisen tavoitteena on muun muassa saada tehopiikit näkymään taselaskennassa entistä paremmin. Suomessa varttitaseeseen siirrytään toukuussa 2023. (Fingrid.)

Edellä mainittuja teemoja sisältävät modernit sähkökäytöt ja niiden demonstroiminen ovat lähtökohtana liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän suunnittelulle ja rakentamiselle. Pää tavoite järjestelmän rakentamisen taustalla oli suunnitella ja rakentaa sellainen järjestelmä, joka kykenee demonstroimaan edellä mainittuja moderneja sähkökäyttöjä, joissa tarkka tehonsäätely on avainasemassa. (Korpela. 2021.)

3 HYBRIDIENERGIAJÄRJESTELMÄ

Hybridienergiajärjestelmät yhdistävät useita eri energian tuotanto- ja varastointiteknologioita yhdeksi järjestelmäkokonaisuudeksi. Alun perin järjestelmät ovat yhdistäneet myös uusiutumattomia energiantuotantomuotoja, mutta nykyään niiden määritelmä on laajentunut pääosin käsittämään uusiutuvat energiantuotantojärjestelmät, kuten esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman. Järjestelmillä on tärkeä rooli energiamurroksessa, jossa pyritään siirtymään kokonaan fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. (G. Konstantinou. B. Hredzak. 2021.). Energianvarastointiratkaisut mahdollistavat ylimääräisen sähköenergian varastoinnin ja sen kuluttamisen niinä aikoina, kun joko tuotanto ylittää kysynnän tai kysyntä tuotannon. Varastot mahdollistavat kuluttajatasolla omavaraisuuden esimerkiksi niissä kotitalouksissa, joissa on oma aurinkosähköjärjestelmä. Teollisuudessa energiavarastoista saadaan varavoimaa jakeluverkon häiriöiden varalta ja niiden avulla pystytään leikkaamaan sähkön kulutushuippuja. (EASE. 2022.)

Kuvassa 1 on esitetty havainnollistava esimerkki hybridienergiajärjestelmästä. Järjestelmä yhdistää uusiutuvia energiantuotantomuotoja, kuten tuuliturbiinin ja aurinkopaneeliston sekä erillisen generaattorin ja akuston.



KUVA 1. Hybridienergiajärjestelmän periaate. (Yhdysvaltain energiavirasto. 2022.)

Useat hybridienergiajärjestelmät ovat itsenäisiä kokonaisuuksia, jotka eivät ole yhdistetty jakeluverkkoon. Kun aurinko- tai tuulivoimalat eivät tuota tarpeeseen nähden riittävästi energiaa, hybridijärjestelmät syöttävät tarvittavan energian akustoista tai joissakin tapauksissa esimerkiksi dieselgeneraattorin kautta. (Yhdysvaltain energiavirasto. 2022.)

3.1 Liikuteltava hybridienergiajärjestelmä

Liikuteltava hybridienergiajärjestelmä (KUVA 2) rakennettiin Pirkanmaan liiton rahoittamassa Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) hankkeessa. Hankkeen käytännön suunnittelun sekä kokoonpanon on toteuttanut Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK). Järjestelmästä suunniteltiin ja rakennettiin nykYTEKNOLOGIAN mahdollistamissa puitteissa mahdollisimman edistynyt sähkötekninen järjestelmä, jota pystytään hyödyntämään monipuolisesti. Järjestelmä tarjoaa energiamurroksen synnyttämiin haasteisiin ratkaisuja, mutta sitä ei rakennettu mitään tiettyä käyttöä varten. Järjestelmällä voidaan demonstroida mitä tahansa energiamurroksen modernia sähkökäyttöä. Järjestelmän tarkoitus on edistää uusiutuvan energian, energiavarastoinnin sekä sähköajoneuvojen hyödyntämistä Pirkanmaalla. Liikkuvan ominaisuutensa ansiosta sitä voidaan käyttää joustavana sähköajoneuvojen teholatausasemana ja energiavarastona. (Korpela 2021.)



KUVA 2. Liikuteltava hybridienergiajärjestelmä. Kuvassa vain tehoelektroniikka-vaunu. (TUNI. 2020.)

Järjestelmä on rakennettu kahteen erilliseen traileriin, joista toinen pitää sisällään noin 100 kilowattitunnin (kWh) litium-rautafosfaattiakuston (KUVA 3) ja toinen pitää sisällään tehoelektroniikkajärjestelmän, joka mahdollistaa erittäin monipuoliset järjestelmän käyttömahdollisuudet. Tehoelektroniikkatraileri sisältää myös sähköajoneuvojen teholatausaseman (KUVA 4), josta löytyvät yleisimmät latauspistoketyypit (CCS, CHAdeMO, Type 2).

3.2 Järjestelmän akusto

Akkuteknologian hyödyntäminen on erittäin yleinen ja perinteinen tapa varastoida sähköenergiaa. Akku on energiavarasto, joka varastoi sähköenergiaa sähkökemiallisessa muodossa. Akku kykenee muuttamaan tätä energiaa kemiallisesta muodosta sähköiseksi sekä toisinpäin. Akusto on yleensä usean sarjaankytketyn kennon muodostama kokonaisuus. Kenno on akun pienin yksikkö, joka koostuu positiivisesti ja negatiivisesti varautuneista levyistä sekä elektrolyyteistä. Varauskyky sekä hyötysuhde ovat akun tärkeimpiä ominaisuuksia. Hyötysuhde kertoo, mikä on akkuun ladattavan ja sieltä otettavan energian suhde. Varauskyky puolestaan ilmoittaa akusta purettavan sähkövarauksen suuruuden, joka ilmoitetaan ampeeritunteina (Ah). Akun energiakapasiteetti saadaan kertomalla sen varauskyky napajännitteellä. (Hietalahti. 2011.)

Muita oleellisia termejä akuston tilan ja kunnan valvomiseksi ovat muun muassa State of Health (SoH), State of Charge (SoC) sekä Battery Management System (BMS). State of Health kuvaa tarkasteltavan akuston kuntoa, eli käytännössä akun sähköenergian varauskykyä verrattuna uuteen vastaavaan akkuun. State of Charge sen sijaan kertoo arvion akun sen hetkisestä varaustilasta. (ETN. 2019.) Battery management system, eli akustonvalvontajärjestelmä, valvoo akuston tärkeimpiä arvoja, kuten lämpötilaa, jännitettä sekä kennojen varaustasoa. (Fortum. 2018.)

Liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän akusto on tyypiltään litium-rautafosfaattiakusto (LFP). LFP-akuston kennot on toimittanut SIG Energy Technology -yhtiys, mutta TAMK on rakentanut sekä suunnitellut itse järjestelmän. Akustonvalvontajärjestelmä edellyttää, että kytkentä koostuu 12 kennon sarjaankytketyistä kokonaisuuksista, joita kutsutaan moduuleiksi. Näitä moduuleja on 9 kappaletta,

joten kennoja on yhteensä 108. Valmistaja ilmoittaa yksittäisen täyteen ladatun kennon varauskyvyksi vähintään 277 Ah ja jännitteeksi 3,22 voltia (V). Akuston kokonaiskapasiteetti saadaan muodostettua kertomalla yhden kennon varauskyky sen napajännitteellä ja kennojen kokonaismäärällä. Näin ollen kokonaiskapasiteetiksi tällä LFP-akustolla saadaan vähintään 96,3 kWh ja jännitteeksi 350 V. Todellisuudessa nämä kennojen arvot ovat ylittyneet sen verran, että koko akuston kapasiteetti on lähes tarkalleen 100 kWh. Valmistajan suosittelee akuston eliniän pidentämiseksi sen kokonaiskapasiteetista käytettävän vain noin 80 kWh, eli 80 prosenttia. (Korpela. 2021.)



KUVA 3. Perävaunu, joka pitää sisällään 100 kWh:n litium-rautafosfaattiakuston.

LFP-akut ovat kustannustehokkuutensa, korkean elinikänsä (noin 5000 käyttösykliä), purkausnopeutensa sekä keveytensä vuoksi suosittuja muun muassa varavoima- ja ajoneuvokäytössä. Lisäksi LFP-akkujen muut ominaisuudet, kuten kapasiteetin pysyvyys, kylmänsietokyky ja turvallisuus tekevät niistä suosittuja. (Dragonfly Energy. 2021.)

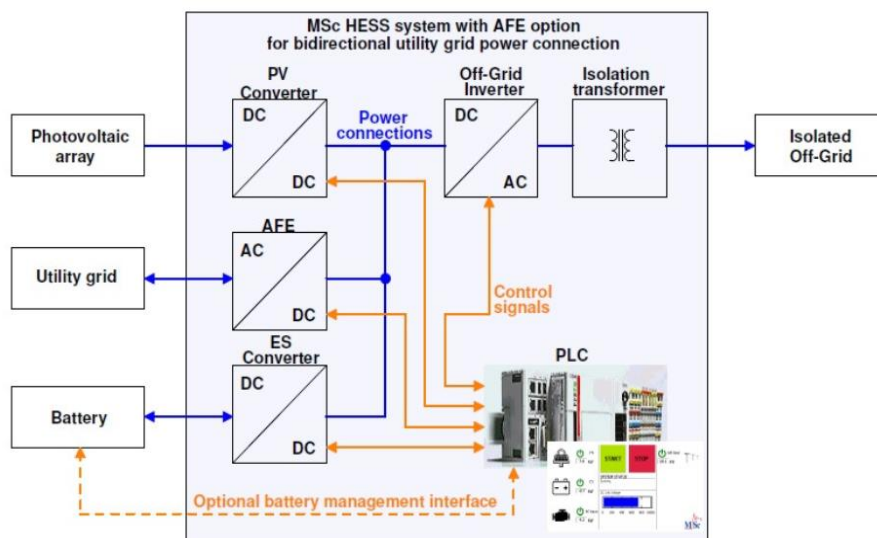
3.3 Tehoelektroniikkavaunun yleisrakenne ja toiminta

Liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän ydin on MSc Electronics Ltd:n (MSc) valmistama hybridienergian varastointijärjestelmä (HESS), joka on sisällytetty kokonaisuudessaan tehoelektroniikkavaunuun (KUVA 4). Järjestelmä mahdollistaa useiden sähköenergian lähteiden, varastojen sekä kuormien sovittamisen monipuolisesti.



KUVA 4. Vaunu, joka sisältää järjestelmän tehoelektroniikan.

Kuvassa 5 on esitelty yksinkertaistetussa kaaviomuodossa järjestelmän toimintaperiaate. Kuvan vasemmalta puolelta löytyvät aurinkosähköjärjestelmän, kolmivaiheisen sähköverkon sekä akuston tehojen suunnat sekä kullekin liittynälle vaadittavat suuntaajat. Suuntaajien toisiopuolelta ovat kytketty yhteen (kuvassa Power connections) ja ne voivat kukin toimia itsenäisesti tai yhdessä. Suuntaajilla voidaan syöttää eristettyä saarekeverkkoa erotusmuuntajan kautta. Erotusmuuntaja tuottaa galvaanisen erotuksen tehon lähteen sekä kuorman välille eli sen avulla saarekeverkko saadaan sähköisesti eristettyä muusta järjestelmästä tai sähköverkosta. Suuntaajien välinen noin 735 V suuruinen tasajännitevälipiiri mahdollistaa useiden erilaisten syöttöjen sekä kuormien liittämisen yhteen ja samaan järjestelmään.



KUVA 5. HESS-järjestelmän toimintakaavio (MSc Ltd. 2019).

Siniset nuolet kertovat, mihin suuntaan sähköenergiaa voidaan siirtää. Akusto sekä sähköverkko toimivat molempiin suuntiin. Niistä voidaan ottaa energiaa sekä niille voidaan syöttää sitä. Erillisellä aurinkosähköjärjestelmällä voidaan tuottaa sähköä, jolla yleensä ladataan järjestelmän akustoa. Järjestelmä pystyy hyödyntämään kaikkia energian lähteitä yhtä aikaa, mikä mahdollistaa suuremman sähköisen kuorman kytkemisen vaunuun. Energian suuntaa ohjataan antamalla järjestelmälle jänniteohjeita. Esimerkiksi tilanteessa, jossa halutaan ottaa energiaa jakeluverkosta, nostetaan AFE-suuntaajan jänniteohjetta tasajännitevälipiiriin vastaavaa suuremmaksi. Mitä suurempi tämä jännite-ero on, sitä suuremalla teholla energiaa siirretään. Vastaavasti, jos esimerkiksi halutaan ladata akustoa, on ES-suuntaajan jänniteohjetta laskettava tasajännitevälipiiriin jänniteohjetta pienemmäksi, jolloin energia virtaa kohti akustoa. Kukin järjestelmän suuntaajista noudattaa tätä samaa periaatetta. (Korpela. 2022.)

Kuvan 5 toimintakaaviossa ei ole esitetty laitteiston lukuisia suoja- ja mittalaitteita, LCL-verkkosuodatinta tai sähköajoneuvojen teholatausasemaa. LCL-suodatin on asennettu verkkoliittymän syötön puolelle ja se pienentää AFE-suuntaajan aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. LCL-suodatin rakentuu kahdesta kelasta ja yhdestä kondensaattorista, eli se on toiminnaltaan passiivinen suodatin. Käämit tasoittavat virtaa ja kondensaattori puolestaan tasoittaa jännitettä (Markkula. 2020.)

Yliaallot suodatetaan pois verkosta, sillä ne aiheuttavat esimerkiksi tehohäviöitä ja vaikuttavat haitallisesti muun muassa sähkön laatuun, verkkoon liitettyjen laitteiden elinkaaren pituuteen sekä niiden toimivuuteen. (Elovaara & Haarla 2011.)

3.3.1 Aurinkopaneelijärjestelmä

HESS-järjestelmään on mahdollista liittää erillinen aurinkosähköjärjestelmä (photovoltaic array), joka kytketään DC/DC-suuntaajan (PV Converter) kautta. Aurinkosähköjärjestelmiin kuuluva tasasähköä vaihtosähköksi muuttava invertteri jätetään pois. Esimerkiksi omakotitalokäytössä invertteri suuntaa aurinkopaneelien tuottaman tasajännitteen kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi. Tässä käytössä aurinkopaneelien jännite syötetään tasajännitevälipiiriin, joten invertteriä ei käytetä. Aurinkopaneelit kytketään DC-puoleltaan PV-suuntaajan, joka sisältää välttämättömän maksimitehopisteen seurantajärjestelmän. Maksimitehopisteessä jännite on tavallisesti noin 80 prosenttia avoimen piirin jännitteestä ja virta noin 90 prosenttia oikosulkuvirrasta. Aurinkosähköjärjestelmä tuottaa tietyn suuruisen tasajännitteen riippuen aurinkopaneelien määrästä. Suuntaaja nostaa jännitteen noin 735 V suuruiseksi tasajännitteeksi DC-välipiirissä. (Markkula. 2020.)

ES-suuntaajan jänniteohjetta lasketaan, jos aurinkopaneelien tuottama energia halutaan ohjata välipiiristä järjestelmän akustoon. Välipiirin 735 V suuruinen jännite on liian suuri latausjännitteeksi. ES-suuntaajan tehtävänä on muuntaa jännitetaso akustolle sopivalle tasolle. Jos taas aurinkopaneelien tuottamaa energiaa syötetään verkkoon, on AFE (Active Front End) -suuntaajan jänniteohjetta laskettava. Tällä tavoin teho siirtyy tasajännitevälipiiristä kohti verkkoa. AFE muuntaa välipiirin DC-tasajännitteen verkolle sopivaksi kolmivaiheiseksi 400 V AC-vaihtojännitteeksi. (Markkula. 2020.)

Aurinkopaneelikäyttö on suunniteltu käytettäväksi hybridienergiajärjestelmän akuston lataukseen tai tehon syöttämisen verkkoon. On epätodennäköistä, että järjestelmään liitettäisiin niin suurta aurinkopaneelijärjestelmää, joka kykenisi esimerkiksi syöttämään sähköautojen latausasemia tai muita järjestelmiä, joiden sähkötehon tarve on suuri. (Markkula. 2020.)

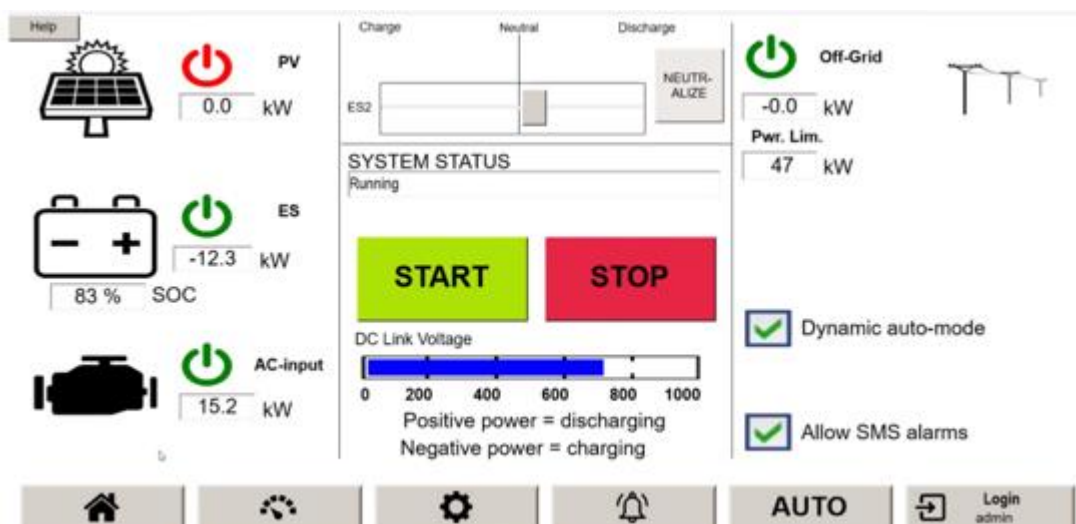
3.3.2 Verkkokäyttö

HESS-järjestelmä pystytään liittämään valtakunnanverkkoon Active Front End -suuntaajan (AFE) kautta. Se muuntaa 735 V tasajännitteen verkkoon sopivaksi 400 V suuruiseksi kolmivaihejännitteeksi. AFE toimii tehon suunnasta riippuen joko verkkovaihtosuuntaajana tai tasasuuntaajana. Se voi siis toimia sähkön pientuotannon verkkoliityntänä tai muuttuvataajuisten generaattorien tuottaman vaihtosähkön tasasuuntaajana ja jännitteen nostajana. (Tehoelektroniikka kurssimateriaali. 2020.)

3.3.3 Ohjausjärjestelmä

Järjestelmää ohjataan sekä annetaan käskyjä Beckhoff Ltd:n kehittämän ohjelmoitavan logiikan (PLC) kautta. Järjestelmää on mahdollista ohjata ja valvoa etäyhteyden kautta. Etäohjauksen kautta voi tehdä kaikki muut toimenpiteet paitsi fyysisten kytkentöjen suorittamisen. (Markkula 2020.)

Ohjelmoitavan logiikan avulla voidaan ohjata koko laitteiston toimintaa suuntaajilta sekä itse käyttäjältä saadun tiedon perusteella. PLC antaa saamansa tiedon pohjalta muun muassa virta- sekä jänniteohjeita suuntaajille ja suorittaa erilaiset tilamuutokset, kuten käynnistyssekvenssin. Kuvassa 6 on esitetty järjestelmän ohjauksen käyttöliittymää, jonka avulla pystytään tarkastelemaan eri arvoja HESS-järjestelmässä ja antamaan sille käskyjä. Tarkasteltavia arvoja ovat esimerkiksi liitetyn aurinkopaneeliston teho, akuston varaustila ja kunto, verkosta otettu ja sinne syötetty teho sekä DC-jännitevälipiirin jännitearvo. Verkkoliityntäissä annettavia käskyjä ovat esimerkiksi automaattiohjauksen parametrit ja liittymien virtarajat. (Markkula. 2020.)



KUVA 6. HESS-järjestelmän (etä)ohjauksen käyttöliittymä.

Käyttöliittymän vasemmassa reunassa näkyvät syöttöjen, eli aurinkovoimalan (PV), akuston (ES) sekä verkkoliittymien (AC-input) tehot. Akuston tehon ollessa miinusella, siirtyy DC-välipiiristä teho akustoon, jolloin akku latautuu. Verkkoliittymän tehon ollessa positiivinen, teho siirtyy verkosta kohti välipiiriä. Esimerkiksi kuvassa 6 järjestelmään ei ole kytketty erillistä aurinkovoimalaa, joten PV-suuntaajan tuottama teho on 0 kW. Akustoon syötetään energiaa 12,3 kW:n teholla, kun taas verkosta otetaan energiaa 15,2 kW:n teholla. Akustoa ei voida ladata koko verkosta otetulla teholla, sillä noin 2-3 kW kuluu tehoelektroniikkahäviöihin. Keskellä on järjestelmän käynnistys- sekä pysäytyspainikkeet sekä DC-jännitevälipiirin jännitelukema. Oikealla näkyy saarekeverkkoon syötetyn tehon suuruus sekä tehon rajoituksen lukema. Saarekeverkossa tehon ollessa positiivinen, siirtyy tehoa välipiiristä kohti saarekeverkkoa. (Markkula. 2020.)

3.4 Älykäs automaattiohjaus

Lähes kaikki modernit sähkökäytöt vaativat älypohjaista tehonhallintaa. Liikuttavassa hybridienergiajärjestelmässä tehonhallinta toteutettiin niin sanotulla tehoputkimallilla. Tehoputkimallissa järjestelmä pyrkii pitämään asiakkaan verkosta ottaman tehon asetettujen raja-arvojen sisällä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että asiakkaan liittymän tehon tarpeen ylittäessä asetetun raja-arvon, otetaan tarvittava energia akustosta tai omasta aurinkosähköjärjestelmästä. Jotta energiavarastoa kyetään jatkuvasti käyttämään, sitä ladataan sopivilla hetkillä verkko- tai aurinkosähköllä. Kun asiakkaan tehon tarve alittaa raja-arvon, energiavarastoa

ladataan. Luotettavat tehomittaukset on kytkettävä asiakkaan liittymään, jotta automaattiohjaus on mahdollista. (Korpela 2022.)

Suomessa sähkön kulutus vaihtelee huomattavasti vuodenajan mukaan. Talvisin lämmityksen tarve kasvaa, jolloin kotitalouden kulutus saattaa olla jopa 3–5-kertainen kesäajan kulutukseen verrattuna. Tehoputkimalli kykenee arvioimaan asiakkaan sähkön kulutuksen vuodenajan mukaan ja säätämään mallin kulutukseen sopivaksi. Kulutuksen vaihtelut ja samojen tehon raja-arvojen käyttö vuodenajasta riippumatta aiheuttavat haasteita tehoputkimallille. (Korpela. 2022.)

3.5 Hybridienergiajärjestelmän käyttömahdollisuuksia

Energian varastointiratkaisujen mahdollisuudet energiamurroksessa:

- Sähkön kulutushuippujen leikkaaminen.
- Varmennettu sähkönsyöttö vikatilanteissa.
- Akuston avulla esimerkiksi tuulivoimaloista saadaan säätövoimaisia järjestelmiä.
- Saarekeverkon luominen alueilla, joissa sähköverkkoon liittyminen on haasteellista tai mahdotonta.
- Heikon sähköverkon tukeminen.
- Kiinteistöjen sähköenergian omavaraisuus keväästä syksyyn aurinkovoimalan ja akuston avulla.
- Lisätehoa sähköautojen latausasemille, kun liittymä rajoittaa lataustehoa.

Edellä mainituista ominaisuuksista sähkön tehopiikkien leikkaaminen liittyy tehonhallintatarpeen kasvuun. Tehopiikit, eli hetkelliset suuret kulutushuiput, kuormittavat sähköverkkoa huomattavasti. Varsinkin kylminä vuodenaikoina sähkön kulutushuiput kasvavat merkittävästi, mikä näkyy asiakkaille tehomaksuina. Hybridienergiajärjestelmä tarjoaa ratkaisua kulutushuippuihin akuston avulla. Akustoa voitaisiin ladata niinä ajankohtina, kun sähkönkulutus on vähäistä. Suurimpien kulutuspiikkien aikaan akustosta otettaisiin käyttöön tarvittava energia. (Korpela. 2022.)

Heikon sähköverkon tukemista on onnistuneesti testattu liikuteltavalla HESS-järjestelmällä. Esimerkiksi eräällä maatilalla oli toistuvia ongelmia heikon verkon ja suuritehoisten sähkökoneiden kanssa. Joidenkin maatilan sähkömoottoreiden aiheuttamat suuret virtapiikit käynnistyksen aikana johtivat useasti yhden vaiheen putoamiseen verkosta. Vaiheen putoaminen verkosta johtaa siihen, että muun muassa sähkömoottorit ottavat enemmän virtaa verkosta. Virran kasvaminen johtaa kaapeleiden sekä moottorien käämien ylikuumentumiseen ja sitä kautta vaaratilanteisiin. Moottorit eivät kykene myöskään tuottamaan yhtä paljon tehoa kuin aikaisemmin. Sähkönlaatuongelmat johtuivat siis suurista tehopiikeistä, joita pystyttiin hybridienergiajärjestelmän automaattiohjauksella kompensoimaan. (Korpela. 2022.)

4 LABORATORIOTYÖN LAADINTA

Opinnäytetyön perimmäinen tarkoitus oli laatia liikkuvasta hybridienergiajärjestelmästä laboriotyö Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan 3.–4. vuosikurssien opiskelijoille. Opiskelijat perehtyvät ennen itse laboriomittauksia järjestelmän oleellisimpiin käsitteisiin sekä syihin sen rakentamisen taustalla. Laboriomittaukset liittyvät muutamiin järjestelmän useista sovellustavoista. Laboriotyö rakentuu käytännössä kolmesta osasta:

1. Esitehtäväosuudesta, jossa opiskelijat esimerkiksi tutustuvat mittauksiin liittyvään oleelliseen termistöön ja itse kohteena olevaan järjestelmään.
2. Mittausosuudesta, jossa opiskelijat suorittavat mittauksia käytännössä, tutustuen järjestelmän toimintaan ja ominaisuuksiin tarkemmin.
3. Jälkitehtäväosuudesta, jossa opiskelijat laativat työselostuksen tehdyistä mittauksista ja ilmi tulleista havainnoista.

Seuraavissa alaluvuissa avataan työn osioita tarkemmin. Työstä luotiin myös erillinen laboriotyöohje.

4.1 Laboriotyön esitehtävät sekä jälkiselostus

Laboriotyön esitehtäväosuus koostuu pääosin itse HESS-järjestelmään liittyvien oleellisten termien selityksistä. Opiskelijoiden tulee selvittää seuraavien järjestelmään ja sen taustoihin liittyvien käsitteiden ja tehoelektronikkalaitteiden tarkoitus.

Käsitteet:

- Energiamurros (ja sen vaikutus liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän rakentamiseen).
- Akun State of Health (SoH), State of Charge (SoC) sekä Battery Management system (BMS).
- Automaattiohjaus.
- Maksimitehopiste.

- Tehoelektronikkalaitteet ja niiden tarkoitukset järjestelmän toiminnan kannalta (PV-suuntaaja, Active Front End, ES-suuntaaja, saarekeverkkosuuntaaja).
- Järjestelmän käyttöohjeeseen perehtyminen.

Laboratoriomittausten suorittamisen jälkeen työstä laaditaan raportti, jossa opiskelijat kirjoittavat mittausten aikana tekemistään havainnoista.

4.2 Taajuusmuuttajakäyttöisen saarekeverkon kuormitustesti

Energiamurroksessa aurinko- ja tuulivoiman lisääntyminen tarkoittaa suuntaajakytkeytyn tuotannon lisäämistä. Samaan aikaan, kun pyöriviä koneita hyödyntäviä uusiutumattomia energiantuotantomuotoja poistuu verkosta, myös verkon inertia vähenee. Puuttuva teho on aiemmin pyritty ottamaan pyörivien koneiden liikeenergiasta, jos sähköenergian kysyntää on ollut enemmän kuin tuotantoa. Tällöin koneiden pyörimisnopeus hidastuu ja verkon taajuus pienenee, johtaen sähkön laadun heikkenemiseen.

Energiamurroksen myötä vanhat ylikuormitustilanteiden lainalaisuudet eivät enää päde, sillä suuntaajakytkeytyn tuotantomuodot lisääntyvät ja pyöriviä koneita hyödyntävät tuotantomuodot vähenevät. Suuntaajakytkeytyllä tuotannolla verkon epätasapainotilanteet eivät enää vaikuta verkon taajuuteen heikentävästi. Tätä ominaisuutta on tarkoitus havainnollistaa ensimmäisessä mittauksessa.

Ensimmäisenä konkreettisena mittauksena on tarkoitus tehdä taajuusmuuttajakäyttöisen saarekeverkon kuormitustesti. HESS-järjestelmällä kuormitetaan kolme teholtaan 1,705 kW säätämätöntä vastuslaitteistoa (KUVA 10) sekä kahta 3,3 kW tehoista säätövastusta (KUVA 11). Kuorman kokonaistehosta 5,115 kW on säätämättömiä vastuslaitteistoja ja loput 6,6 kW säätövastuksia. Kuormituksen kokonaisteho on siis 11,715 kW. Mittauksessa tarkastellaan oskilloskoopilla HESS-järjestelmän syöttämän kolmivaihejännitteen käyrämuotoa, kun lähestytään ylikuormitustilannetta. Ylikuormitustilanteessa järjestelmään kytketyn kuorman nimellisteho ylittää järjestelmän syöttämän tehon. Kytkennän periaate on liitteen 1 mukainen. Liitteen kytkentäkuvasta puuttuvat oskilloskooppi ja virtamittari.

HESS-järjestelmän vaunun ulkopuolella sijaitseva kolmivaiheinen pistorasia kytketään erillisellä kumikaapelilla TAMKin sähkölaboratorion ulkoseinässä olevan kytkentäkotelon (KUVA 7) liittimiin PE, N ja L1-L3.



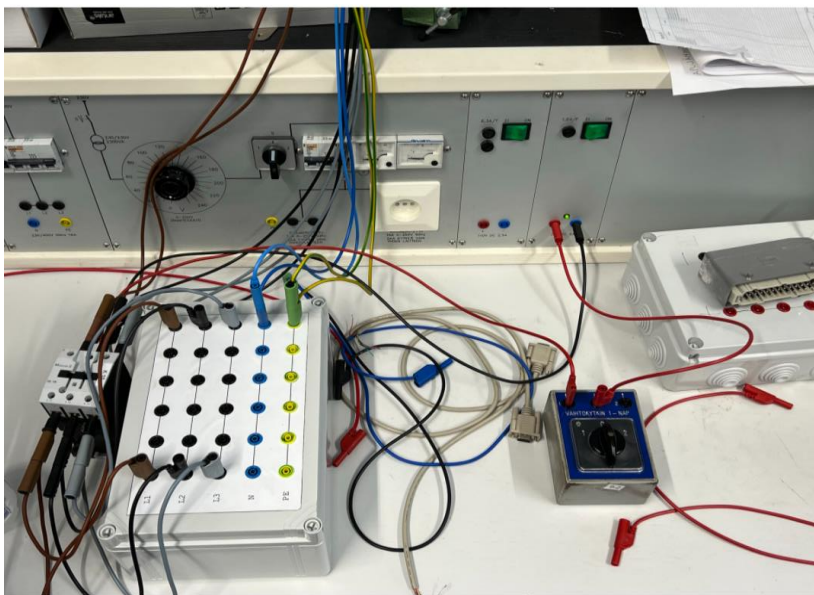
KUVA 7. Laboratorion ulkoseinällä sijaitseva kytkentäkotelo.

Kyseinen kytkentäkotelo on syöttää laboratorion sisäpuolella olevia kytkentäkoteloita 'Kuormituspaikka 1' sekä 'Kuormituspaikka 2' (KUVA 8).



KUVA 8. Kuormituspaikka 2 laboratorion sisällä mittauspöydän yläpuolella.

Kuormituspaikka 2:n liittimistä vaiheiden L1-L3 johtimet (kuvassa 8 ruskea, musta sekä harmaa johdin) tuodaan kontaktorille, jota ohjataan vaihtokytkimellä. Kontaktori toimii kytkennän päävirtapiirin pääkytkimenä, jolla saadaan katkaistua jännitteet kytkennästä. Kontaktorin ohjaukseen käytetään 24 V tasajännitettä. Maadoitus- ja nollajohtimet (kuvassa 8 keltavihreä sekä sininen johdin) kytketään suoraan erillisen kytkentälaatikon PE- ja N-liittimiin. Kontaktorin ulostuloista vaihejohtimet viedään kytkentälaatikon L1, L2 ja L3 -liittimiin. Allaoleva kuva 9 havainnollistaa kyseistä kytkentätilannetta.



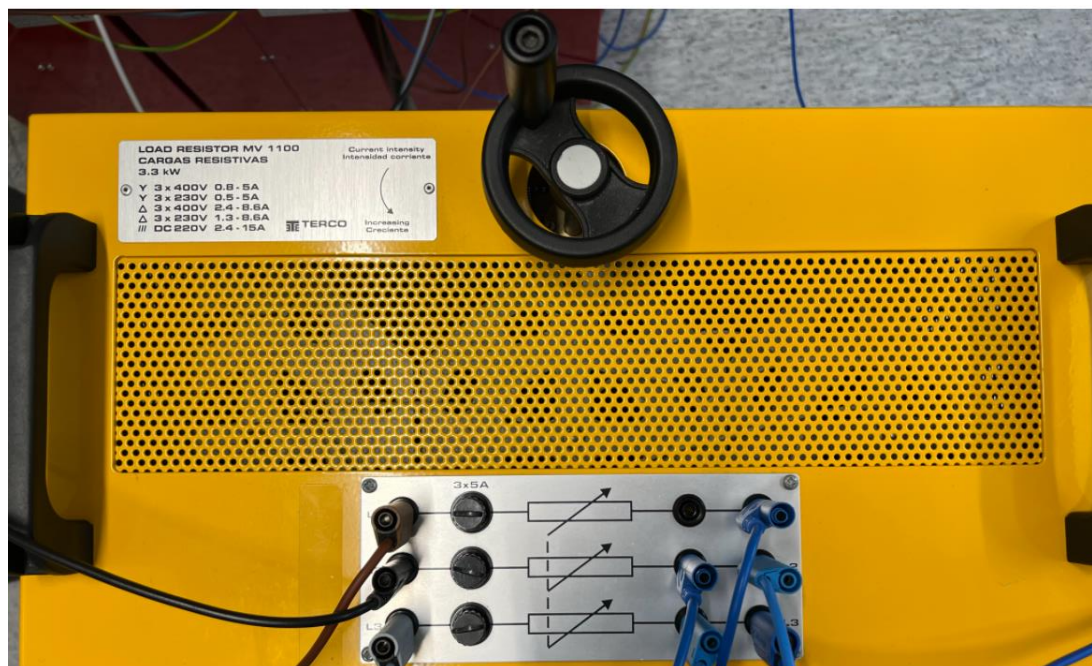
KUVA 9. Kontaktori, kytkentälaatikko sekä vaihtokytkin.

Säätämättömät kolme vastuslaitteistoa (KUVA 10) kytketään yksivaiheisesti kytkentälaatikon L1, L2 ja L3 -liitinten ja N-liittimen väliin, jotta kaikki vaiheet kuormittuvat tasaisesti. Säätämättömän vastuslaitteiston kaikki viisi osavastusta kytketään päälle, jolloin yhden vastuslaitteiston resistanssi on 31Ω ja kokonaisteho $1,705 \text{ kW}$.



KUVA 10. Säättämätön vastuslaitteisto, 1,705 kW.

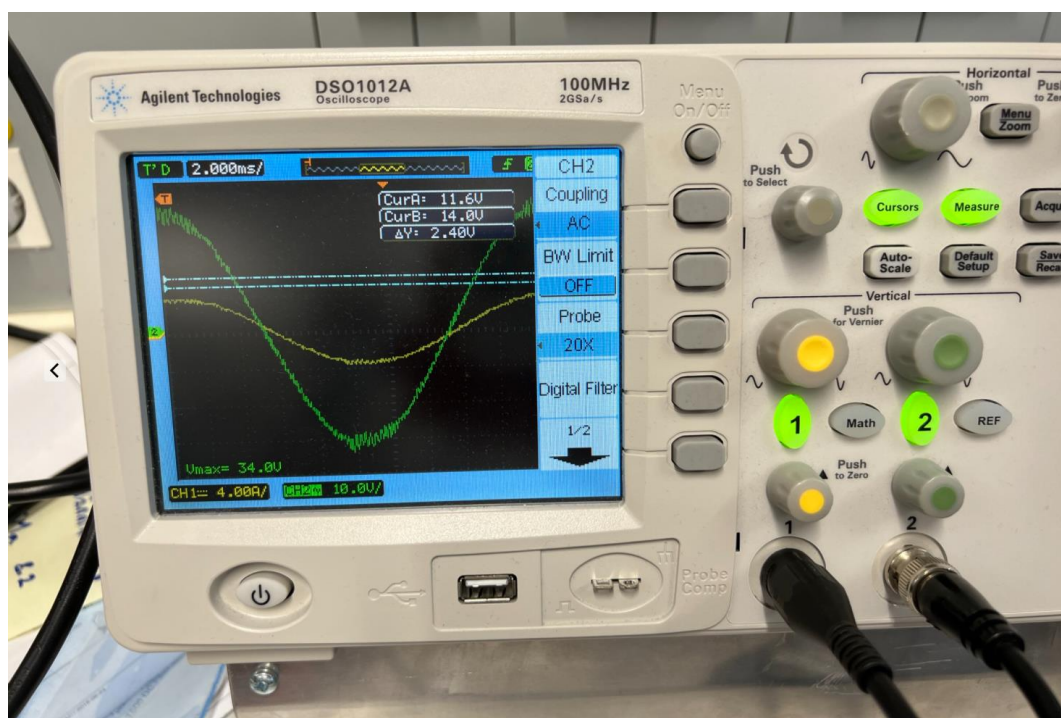
Säättövastuslaitteistot (KUVA 11) kytketään kolmivaiheisesti kytkentälaatikkoon ja niiden toisiot kytketään kolmiokytkentään. Alla olevassa kuvassa näkyvällä "veivillä" säädetään kuormitusta.



KUVA 11. Säättövastuslaitteisto, 3,3 kW.

Säätövastuksen tehon säätö on tehtävä varoen, että minkään vaiheen virtakuormitus ei ylitä 5 A arvoa. Vaihevirran ylittäessä 5 A rajan, on vaarana sulakkeiden laukeaminen.

Mittauksessa tarkastellaan vaihejännitteen käyrämuodon käyttäytymistä, kun HESS-järjestelmä lähestyy ylikuormittumispiirteitä. Huomattavaa oli, että kuormituksen lisääntyessä HESS-järjestelmän DC-välipiirin jännite laskee ja vaihejännitteen käyrämuoto säröytyy (KUVA 12). Taajuusmuuttajan puolijohdekytkimet muuntavat välipiirin tasajännitteestä tehollisarvoltaan 230 V ja taajuudeltaan 50 Hz vaihtojännitettä pulssinleveysmodulaation avulla. Puhtaan siniaallon tuottaminen ei enää onnistu, kun välipiirin jännite putoaa kuorman kasvamisen takia tarpeeksi alhaiseksi. Ylikuormittumisesta aiheutuva jännitteen säröytyminen pystytään kuitenkin kompensoimaan erilaisilla kompensointilaitteistoilla, toisin kuin taajuuden muutokset.



KUVA 12. Vaihejännitteen käyrämuoto säröytyy ylikuormitusta lähestyttäessä.

Kun DC-jännite välipiirissä laskee noin 650 V:iin, HESS-järjestelmä sammuttaa itsensä. Järjestelmän sammuminen kyseisellä jännitteellä on valmistajan (MSc Electronics Oy) ohjelmaan asettama suojaomienpide.

4.3 Aurinkosähkövoimalan optimointia energiavaraston avulla

Toisessa mittauksessa havainnollistetaan, miten aurinkovoimalan avulla voidaan tuottaa liittymän, kuten omakotitalon, vaatima energia hyvien sääolosuhteiden aikana samalla ladata akustoa. Huonojen sääolosuhteiden aikana kuorman tarvitsema energia otetaan akustosta. Kiinteistöihin liitetyissä aurinkopaneelistoissa esiintyvät samat ongelmat kuin suuremman mittakaavan uusiutuvan energian tuotannossa. Esimerkiksi liittymän kulutus ja aurinkopaneelien energian tuotanto eivät täsmää keskenään. Aurinkopaneelit tuottavat energiaa parhaiten päiväsaikaan eli silloin, kun kiinteistössä asuvat ihmiset ovat usein poissa ja kulutus on tavallisesti pienimmillään.

Ratkaisuna ongelmaan voidaan käyttää erillistä akustoa. Aurinkopaneelit lataavat päiväsaikaan akustoon energiaa, jota voidaan illan tullen kuluttaa, kun erilaisia sähkölaitteita kytketään päälle. Tilanteessa, jossa akusto on ladattu täyteen ja kuormitusta on vähäistä, voidaan ylimääräinen aurinkopaneeliston tuottama energia syöttää sähköverkkoon.

Mittauksessa aurinkosähkövoimalaa simuloidaan virtavaunun avulla, koska oikean aurinkopaneeliston käyttäminen olisi mittauksen kannalta epäkäytännöllistä. Virtavaunun potentiometriä säätämällä paneeliston jännitettä voidaan säätää joko suuremmaksi tai pienemmäksi, jolloin kyetään simuloimaan vallitsevaa säätä.

Mittauksessa tehdään liitteen 2 mukainen kytkentä. Kytkennän tarkoitus on hakea kuorman, eli tässä tapauksessa PV-suuntaajan (liitteen 2 kuvassa DC/DC-symboli), maksimitehopistettä. Theveninin maksimitehoteorian mukaan kuorma tuottaa suurimman tehon, kun kuorman resistanssi on Theveninin lähteen sisäresistanssin suuruinen. Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa sitä, että tässä kytkennässä suurin teho tuotetaan, kun vastuksien R1-R5 yli oleva jännite on yhtä suuri kuin kuorman, eli PV-suuntaajan, yli oleva jännite. Maksimitehopisteessä sekä vastusten että PV-suuntaajan ottama teho on yhtä suuri. PV-suuntaaja hakee siis jatkuvasti jännitearvoa, jossa ollaan maksimitehopisteessä. (Electronics-tutorials. 2022.)

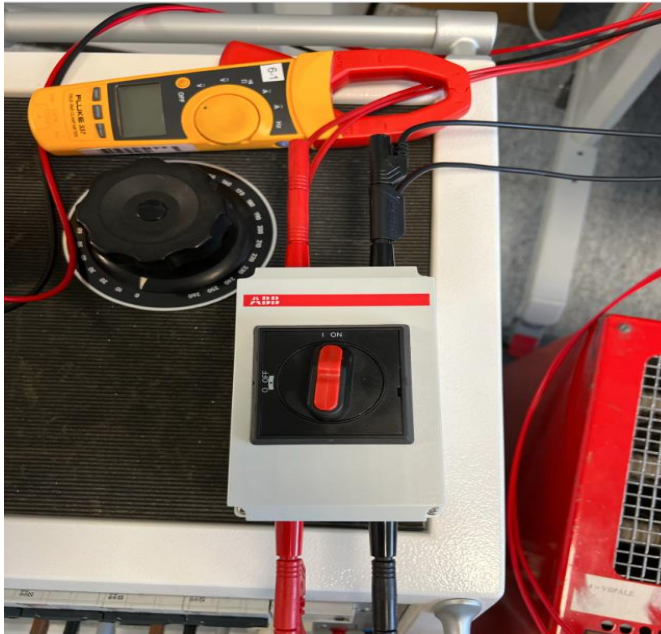
Käytännössä kytkentä olisi yksinkertaisinta tehdä yhdellä vastuksella, mutta tässä laboratoriokytkennässä ei tätä voida toteuttaa. Käytettävissä olevien vastuslaitteistojen jännitekestoisuus on vain noin 230 V, kun taas virtavaunulla voidaan tuottaa jopa 580 V jännite. Näin ollen kytkentä oli siis suunniteltava siten, että vastuslaitteistojen yli oleva jännite ei olisi suurempi kuin 230 V.

Kuvasta 13 poiketen mittauksessa kuormitetaan neljää rinnan kytkettyä 1,705 kW:n vastusta. Kuvassa näkyvät mittauksessa käytettävät laitteistot. Huomioitavaa on, että kytkennässä käytetään tuplajohtoja virtakestoisuuden parantamiseksi.



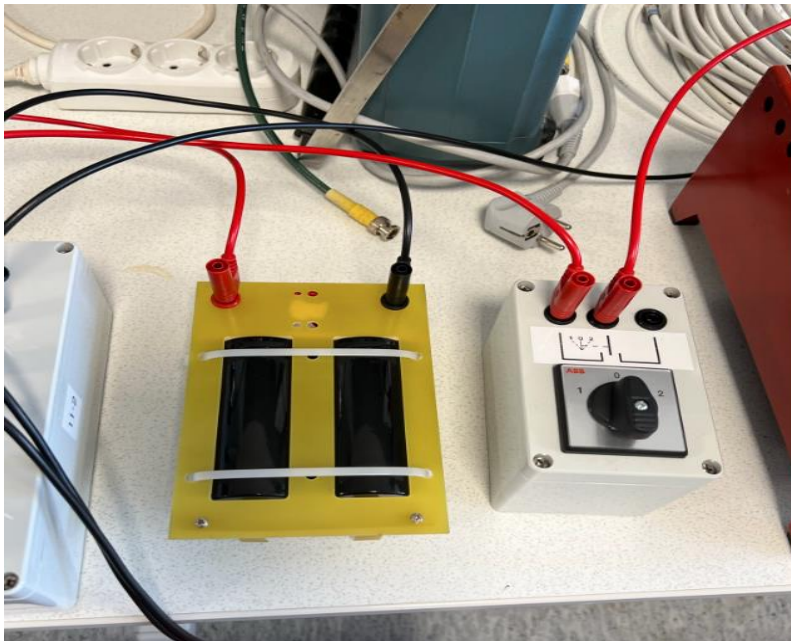
KUVA 13. Toisen mittauksen mittauskalustoa (vasemmalla virtavaunu, alhaalla vastuslaitteistot sekä ylhäällä kondensaattori ja purkuvastukset).

Virtavaunun kolmivaihepistotulppa kytketään laboratorion seinässä olevaan kolmivaiheiseen pistorasiaan. Virtavaunun tasajännitelähdöstä vaihe- ja nollajohtimet liitetään nelinapaiseen pääkytkimeen S1 (KUVA 14).



KUVA 14. Pääkytkin S1 sekä pihtivirtamittari.

Pääkytkimestä johtimet vietään erilliselle kytkentärasialle. Rasiaan kytketään valmiiksi sarjaan kytketyt 6,6 mF kondensaattorit ja kondensaattorien purkukytkin S2 (KUVA 15) sekä näiden rinnalle 0–320 Ω säädettävät purkuvastukset R6 ja R7. Purkuvastusten resistanssi säädetään 320 Ω arvoon. Kondensaattori tasoittaa virtavaunun tuottamaa tasajännitettä.



KUVA 15. Sarjaan kytketyt kondensaattorit.

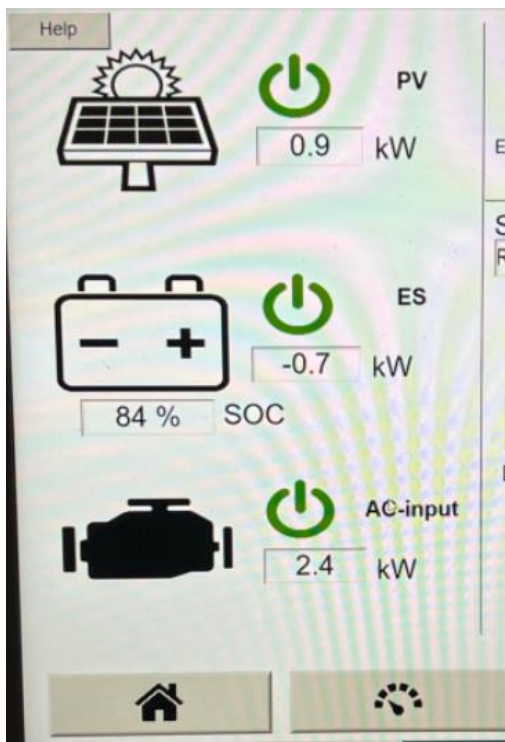
Kytkentärsialta viedään johtimet välivastuksille R1 sekä R2, joita ennen lisätään jännite- ja virtamittaukset. Säätoivastusten jälkeen kytketään itse kuormavastukset, joista käännetään jokainen kuormakytkin päälle. Kuormavastusten jälkeen kytketään akuston ES-suuntaaja erillisen kytkentärsian kautta (KUVA 16).



KUVA 16. Kytkentärsia, joka liitetään HESS-järjestelmän ES-suuntaajaan.

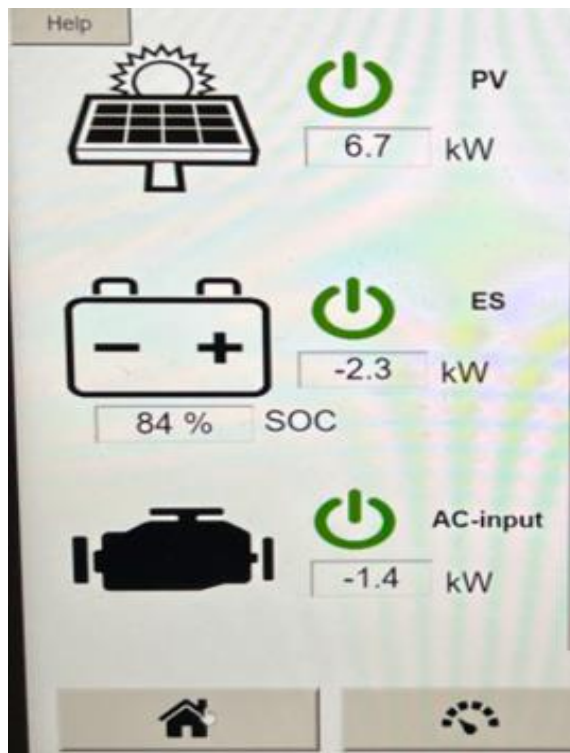
Kytkentää purettaessa on tärkeää purkaa kondensaattorien varaus kääntämällä niiden purkukytkin päälle, jolloin ne purkavat varauksensa vastusten R6 ja R7 kautta.

Kuvassa 17 on tilanne, jossa PV-suuntaaja syöttää HESS-järjestelmää 0,9 kW teholla. Tarkoituksena on simuloida pilvistä säätä, jolloin aurinkopaneeliston tuottama teho on alhainen. PV-suuntaaja on suunniteltu menemään lepotilaan, kun paneeliston tuottama teho alittaa 500 W rajan. Maksimitehopiste löytyy kohdasta, jossa PV-suuntaajan sekä vastusten yli olevat jännitteet ovat identtiset. PV-suuntaajan saama 0,9 kW teho on siis sama myös laborioivastuksilla, jotka muuttavat tehon pääosin lämmöksi. Tässä tilanteessa PV-suuntaaja syöttää HESS-järjestelmää 0,9 kW teholla, kun taas jakeluverkosta otetaan energiaa 2,4 kW teholla. Akustoa ladataan noin 0,7 kW teholla. Huomattavaa on, että HESS-järjestelmässä noin 2–3 kW menee tehoelektronikkakohäviöihin.



KUVA 17. Tilanne, jossa simuloidun aurinkopaneeliston tuottama teho on pieni.

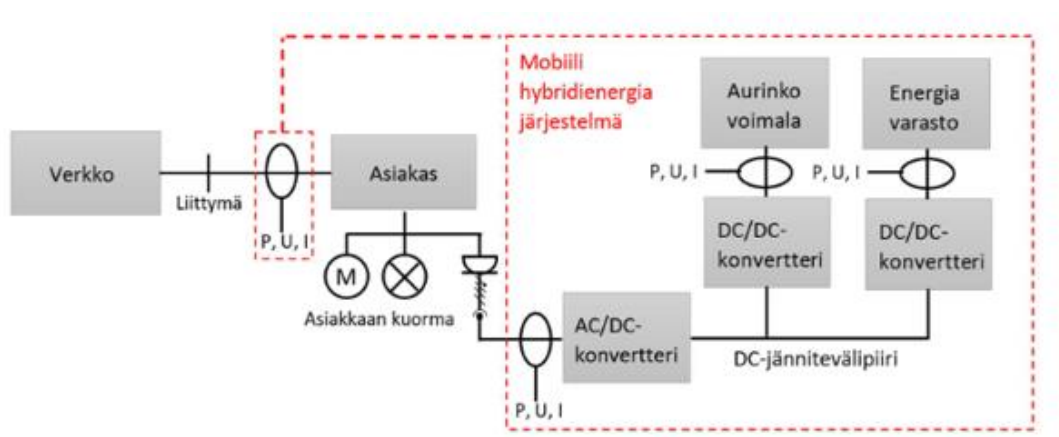
Seuraavaksi tarkasteltiin tilannetta, jossa sääolosuhteet ovatkin paneeliston tehontuotannon kannalta erinomaiset (Kuva 18). Aurinkopaneelisto kykenee syöttämään PV-suuntaajaa jopa 6,7 kW teholla. Tässäkin tilanteessa laboratoriovasuksia syötetään samalla teholla. PV-suuntaaja syöttää HESS-järjestelmää 6,7 kW teholla, josta akustoon menee 2,3 kW ja verkkoon 1,4 kW. Loppu aurinkopaneeliston tuottamasta tehosta on tässäkin tapauksessa tehoelektroniikkahäviöitä. Hyvien sääolosuhteiden aikana järjestelmällä kyetään samanaikaisesti sekä lataamaan akustoa että syöttämään energiaa jakeluverkkoon.



KUVA 18. Tilanne, jossa simuloidun aurinkopaneeliston tuottama teho on suuri.

4.4 Verkkoliittynän automaattiohjaus

Verkkoliittynän automaattiohjauksessa on tarkoitus havainnollistaa HESS-järjestelmän automaattiohjauksen toimintaa ja sen periaatteita. Mittauksessa järjestelmä liitetään Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorioon. Kuvassa 19 on esitetty automaattiohjauksen periaatekaavio.

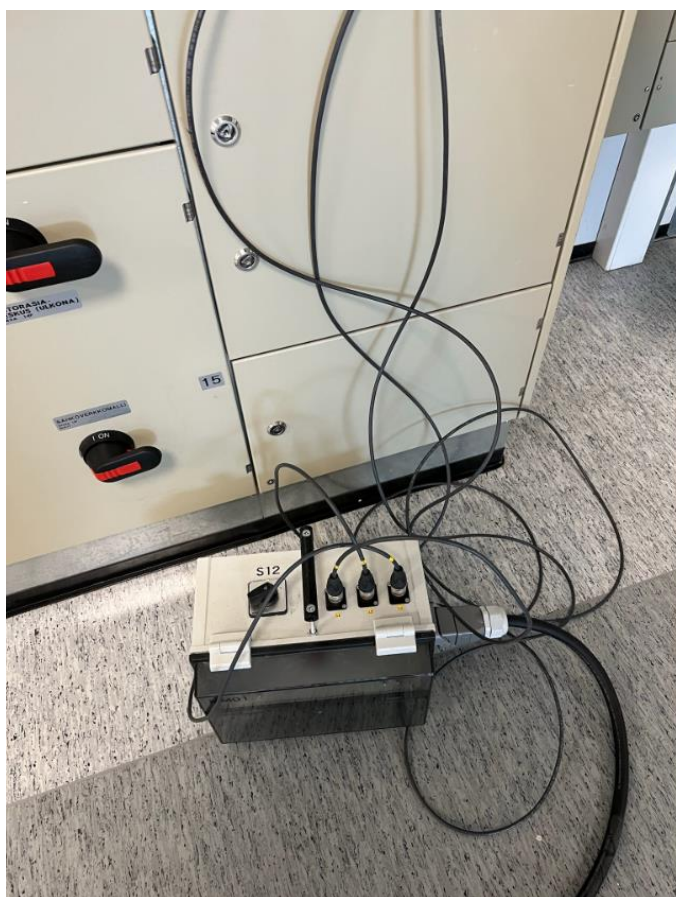


KUVA 19. Periaatekaavio automaattiohjauksesta. (Korpela. 2022.)

Automaattiohjauksen käyttöönottoa varten HESS-järjestelmän on tiedettävä liittymän teho, joten liittymään on kytkettävä virtamittaukset. Virtamittausta varten

erillinen välikaapeli yhdistetään mittamoduulin MM01 (KUVA 20) sekä tehoelektroniikkavaunun etuseinässä olevan liittimen välille. Mittamoduuliin liitetyt virtamittauskelat liitetään liittymän nousukaapelin vaiheiden ympärille (KUVA 21). Laboratoriotyön valvojan on suoritettava virtamittausten liittäminen vaihejohtimien ympärille, koska siinä on vaara koskea jännitteisiin osiin.

Liittymän tehon mittaamiseen tarvitaan virtamittauksen lisäksi myös tarkka tieto vaihejännitteistä. Tehomittauksen luotettavuus laskee, jos oletetaan, että asiakkaan vaihejännitteiden arvo on 230 V. Vaihejännitteiden selvittämiseen ei kuitenkaan käytetä samanlaista mittausjärjestelyä kuin virtamittauksessa. Liittymäpisteiden jännitteet saadaan selville liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän liittymäpisteestä. Hybridienergiajärjestelmällä suoritetaan kuormitustesti, jonka avulla saadaan tarkasti mitattua asiakkaan verkon resistanssi ja sitä kautta tarkka jännite.



KUVA 20. Mittamoduuli MM01.

HESS-järjestelmä liittyy olemassa olevaan verkkosyöttöön kolmivaiheisella pistotulpalla. Automaattiohjauksen toiminnan havainnollistamiseksi liittymään voidaan lisätä erillinen verkkoanalysaattori. Laboratoriossa on mittausten aikaan todennäköisesti useita muita mittauksia käynnissä samaan aikaan, joten hetkellinen teho muuttuu lähes jatkuvasti. Jos verkkoanalysaattori on kytketty liittymään, tulisi tämän näyttämän tehokäyrän olla parametreihin asetetun tehon rajojen sisäpuolella.



KUVA 21. Virtamittaukset laboratorion pääkaavion nousukaapeleissa.

Virtamittausten liittämisen jälkeen mittamoduulin MM01 kytkin S12 käännetään asentoon 1. Tämän jälkeen itse HESS-järjestelmä voidaan käynnistää. Valvoja varmistaa, että HESS-järjestelmän AC_03-kotelon kannessa oleva kytkin on käännetty asentoon 'Saareke'. Seuraavaksi järjestelmään syötetään sen vaatimat parametrit (KUVA 22).

HESS-järjestelmällä voidaan suorittaa sekä staattinen että dynaaminen automaattiohjaus. Staattisessa automaattiohjauksessa asetetaan liittymälle manuaalisesti tehon ylä- ja alarajat. Tässä laboratoriomittauksessa suoritetaan ainakin staattinen automaattiohjaus.

Parameters for active power control:

Allow powerflow to grid <input type="checkbox"/>	Customer grid connection point
Main fuse size: <input type="text" value="45"/> A	minimum short circuit current:
Start dynamic auto-mode after 24h <input type="checkbox"/>	SC-current: <input type="text" value="1100"/> A
Static minimum power <input type="checkbox"/>	Loop impedance: <input type="text" value="209"/> mOhm
Maximum power: <input type="text" value="15"/> kW	
Minimum power: <input type="text" value="1"/> kW	
Solar PV peak power: <input type="text" value="50.0"/> kW	
<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Exit automode"/>

KUVA 22. Järjestelmän parametrivalikko. Kuva on viitteellinen, eikä siihen ole syötetty tähän mittaukseen sopivia arvoja.

Automaattiohjauksen parametrivalikossa Allow powerflow to grid -ruutu mahdollistaa pätötehon siirtämisen syöttävään verkkoon. Tämä valinta voidaan pitää tyhjänä. Main fuse size-ruutuun syötetään liittymän pääsulakkeiden nimellisvirta, joka on sähkölaboratoriossa 63 A. Start dynamic auto-mode after 24 h -vaihtoehto käynnistää 24 tunnin kuluttua staattisen automaattiohjauksen aloittamisen jälkeen dynaamisen ohjauksen. Etuna on, että 24 tunnin aikana järjestelmä mallintaa liittymän kulutusta ja korjaa mallin valmiiksi dynaamista ohjausta varten. Vuorokauden jälkeen järjestelmä pystyy siirtymään valmiiksi korjattuun dynaamiseen malliin. Tätä asetusta on hyvä käyttää tilanteissa, joissa tieto liittymäpisteen keskitehosta on suurpiirteinen. Aikarajoitteiden vuoksi tämä valinta voidaan jättää myös tyhjäksi.

Static minimum power -valinta pitää minimitehon yhtä suurena tai pienenä riippumatta siitä, onko dynaaminen ohjaus päällä. Esimerkiksi jos minimitehon arvoksi asetetaan 0 kW, niin tehon siirtymistä verkkoon ei sallita. Tämä jätetään myös tyhjäksi. Maximum/minimum power -kohtiin asetetaan verkosta otettavan pätötehon ylä- sekä alarajat valvojan ohjeiden mukaan. Järjestelmä leikkaa pois tehopiikit, jotka ylittävät asetetun arvon. Solar PV peak power -kohtaan syötetään mahdollisen aurinkovoimalan huipputehon arvo. Koska liittymään ei ole liitetty aurinkovoimalaa, voidaan tämä kohta jättää tyhjäksi. Liitteessä 3 on ohje automaattiohjauksen käyttöönottoon. (HESS-järjestelmän käyttöohje. 2021).

5 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin ilmiöitä, jotka ovat oleellisesti vaikuttaneet liikuttavan hybridienergiajärjestelmän kehittämiseen sekä järjestelmän rakennetta ja toimintaperiaatetta. Ilmiöiden ymmärtäminen on tärkeää, jotta järjestelmän ympärille luodusta laboratoriotyöstä saa täyden hyödyn irti.

Ensimmäisessä laboratoriomittauksessa tarkoitus oli tarkastella, kuinka suuntaajakytketyllä tuotannolla verkon epätasapainotilanteet vaikuttavat verkon taajuuteen. Mittaus havainnollistaa hyvin, kuinka ylikuormitus tilanne ei oleellisesti vaikuta vaihejännitteen taajuuteen. Vaihejännite kuitenkin säröytyy hieman lähestyttäessä ylikuormituspistettä. Jännitteen säröytymistä on kuitenkin mahdollista kompensoida erilaisilla kompensointilaitteistoilla. Mittaus havainnollistaa mielestäni hyvin tätä suuntaajakytkettyjen tuotantomuotojen ominaisuutta. Mittauksessa käytettävällä oskilloskoopilla pystyy tarkastelemaan, kuinka kuormituksen kasvattaminen vaikuttaa vaihejännitteen käyrämuotoon.

Toisessa mittauksessa tarkoitus oli havainnollistaa, kuinka aurinkosähkövoimaa voidaan optimoida erillisen energiavaraston avulla. Päiväsaikaan hyvien sääolosuhteiden aikana aurinkovoimalalla voidaan tuottaa esimerkiksi omakotitalon vaatima energia samalla akustoa ladata. Päiväsaikaan omakotitalojen asukkaat ovat tavallisesti poissa kotoa ja energian kulutus on pienimmillään. Aurinkovoimalan tuottama ylimääräinen energia on myös mahdollista syöttää jakeluverkkoon, jos akusto onkin ladattu täyteen eikä omakotitalo kuluta energiaa. Akustoihin ladattu energia voidaan illan tullen kuluttaa, kun omakotitaloliittymän tehontarve kasvaa. Tässä mittauksessa aurinkosähkövoimaa simuloitiin erillisen virtavaunun avulla käytännöllisistä syistä johtuen. Virtavaunun avulla kyettiin simuloimaan vallitsevaa säätilaa. Kyseinen mittaus havainnollistaa mielestäni mainittuja käyttöjä hyvin. HESS-järjestelmän käyttöliittymästä pystytään lähes reaaliaikaisesti seuraamaan, kuinka sääolosuhteet vaikuttavat voimalan tehon tuotantoon. Esimerkiksi hyvien sääolosuhteiden aikana voimalalla voidaan ladata järjestelmän akustoa ja samanaikaisesti syöttää tehoa jakeluverkkoon.

Kolmannessa mittauksessa havainnollistettiin järjestelmän älykästä automaatiohjausta, joka on toteutettu niin sanotulla tehoptkimallilla. Tehoptkimallissa

järjestelmä pyrkii pitämään asiakkaan verkosta ottaman tehon asetettujen raja-arvojen sisällä. Mittauksessa järjestelmä liitettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratorioon. Ideaalisessa tilanteessa laboratoriossa olisi samanaikaisesti muita mittauksia käynnissä, jolloin hetkellinen teho muuttuisi jatkuvasti ja tehoputkimallin toiminta selkeytyisi tehokkaammin. Verkkoanalysointin lisääminen mittaukseen toisi huomattavaa lisäarvoa.

Opinnäytetyön perimmäisenä tarkoituksena oli kehittää laboratoriotyö Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan opiskelijoille. Työ havainnollistaa hyvin muutamia useista liikuteltavan hybridienergiajärjestelmän moderneista sähkökäytöistä. Laboratoriotyön tavoitteena on, että opiskelijat ymmärtävät, miksi liikuteltava hybridienergia järjestelmä on ylipäätään kehitetty, mikä on järjestelmän toimintaperiaate ja miten sillä voidaan demonstroida moderneja sähkökäyttöjä.

LÄHTEET

Euroopan komissio. Ilmastonmuutos. Luettu 5.2.2022. https://europa.eu/climate-pact/about/climate-change_fi

Ulkoministeriö. Energia ja ilmastonmuutos. Luettu 5.2.2022. www.maa-ilmma2030.fi/ilmastonmuutos/energia

Heiskanen, Matschoss, Laakso, Rinkinen & Apajalahti. Energiamurroksen jännitteet kansalaisten arjessa. Viitattu 5.2.2022.

Korpela, Alanen, Hietalahti, Kohtala, Markkula, Virtanen & Björn. Mobile Hybrid Energy System for Modern Drives of Smart Energy Transition. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. Preprint in review process. 2022.

Fortum. Tulevaisuuden energijärjestelmässä varastointi on avainasemassa. Luettu 5.2.2022. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/tulevaisuuden-energiajarjestelmassa-varastointi-avainasemassa>

Fingrid. Mitä on inertia? Luettu 22.5.2022. <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>

Fingrid. Kysyntäjousto. Luettu 4.5.2022. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pilottihankkeita/kysyntajousto/>

Gaia. 2018. Jakeluverkkoyhtiön tehotariffi – vaihtoehto puhtaasti kiinteälle kuukausimaksulle. <https://www.gaia.fi/blog/energy/jakeluverkkoyhtion-tehotariffi-vaihtoehto-puhtaasti-kiintealle-kuukausimaksulle-in-finnish/>

Fingrid. Luettu 5.2.2022. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/>

Konstantinou, G. Hredzak, B. Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids, 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hybrid-energy-system>

Yhdysvaltain energiaministeriö. Hybrid Wind and Solar Electric Systems. Luettu 7.2.2022. <https://www.energy.gov/energysaver/hybrid-wind-and-solar-electric-systems>

TUNI. Liikuteltavan hybridienergijärjestelmän rakentaminen etenee. 2020. <https://projects.tuni.fi/enervara/uutiset/liikuteltavan-hybridienergijarjestelman-rakentaminen-etenee/>

Hietalahti, L. Sähkökäyttö ja hybriditekniikka. 2011.

ETN. Tehoa akkujen valvontaan. 2019. <https://etn.fi/index.php/13-news/10087-tehoa-akkujen-valvontaan>

Fortum. Sähköautoilun termistö tutuksi. 2018.) <https://yhdedssa.fortum.fi/sahko-autoilun-termisto-tutuksi-sahkoauto-suomi-sanakirja>

Dragonfly Energy. What is lithium iron phosphate? 2021. <https://dragonfly-energy.com/what-is-lithium-iron-phosphate/>

Markkula, T. Energian varastointiratkaisut – Hybridienergiajärjestelmän toteutus. 2020.

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 1. painos. Helsinki: Otatieto.

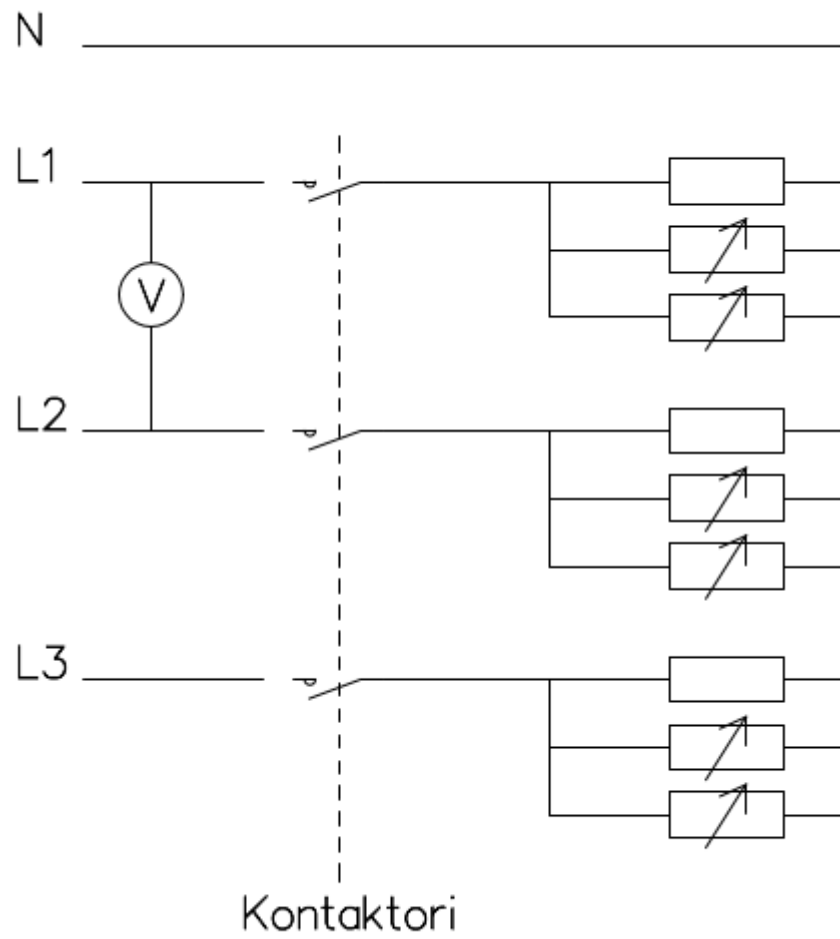
Korpela, A. Mobile Hybrid Energy System for Modern Drives of Smart Energy Transition. PowerPoint-esitys. 2022.

Tampereen ammattikorkeakoulu. HESS-järjestelmän käyttöohje. 2021.

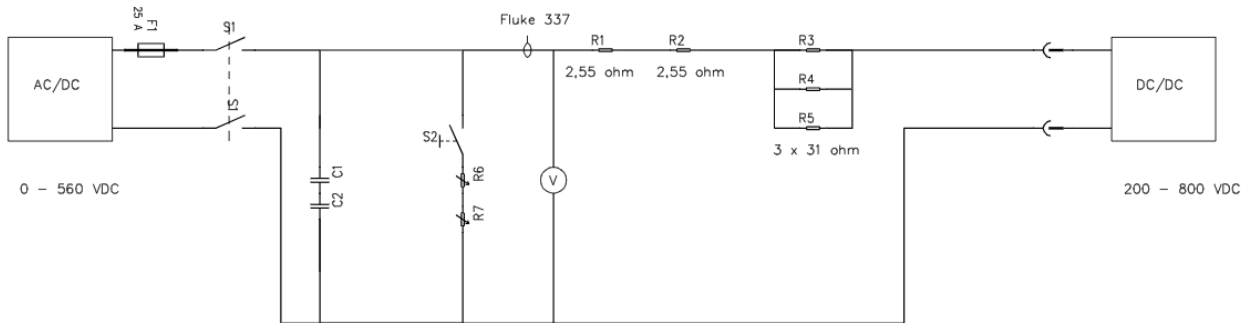
Electronics-tutorials. Maximum Power Transfer. 2022. https://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/dcp_9.html

LIITTEET

Liite 1. Ensimmäisen mittauksen periaatekytkentä.



Liite 2. Toisen mittauksen kytkentäkaavio.



R1 ja R2: Pyörimisnopeuden säätövastus, vaiheet sarjassa, asento 3

R3, R4 ja R5: Laboratoriovastus, kaikki kuormat päällä

R6 ja R7: Säätövastus, 0–320 ohmia, asetetaan täysille 1 A virrankeston takia (yht. 640 ohmia)

S2: Kondensaattorin purkukytkin, suljetaan työn päätteeksi ennen kytkennän purkua!

S1: Pääkytkin, 4–nap, DC

C1 ja C2: Valmiiksi sarjaan kytketyt kondensaattorit, $U_n = 300V$, $C = 6600 \mu F \Rightarrow U_n = 600V$, $C = 3300 \mu F$

Vastusten sarjakytkentä siksi, että niiden jännitteenkesto on 230 V! Oikein mitoitettuna vastusten yli oleva jännite ei ylitä mitoitusarvoa.

PV–konvertterin MPPT toimii siten, että se aloittaa $U_{in} = 200V$ ja nostaa jännitettä niin kauan, kun saatu teho kasvaa.

Virran kasvaessa vastusten jännitehäviö kasvaa ja syö suurenevan määrän kokonaistehosta. Maksimiteho löytyy kohdasta, jossa konvertterin ja vastusten yli oleva jännite on yhtä suuri.

Plan.	/6.4.2022	Object ID		Electrical position	Job no.
Draw.		Sheet	1/1	Drawing no.	
Check					

Liite 3. Automaattiohjauksen käyttöönotto.

4

Automaattiohjauksen käyttöönotto:

1. Liitä välikaapeli mittamoduulin MM01 ja vaunun etuseinässä olevan liittimen välille.
2. Liitä Rogowskin kelat mittamoduuliin. (Merkitty L1, L2 ja L3).
3. Aseta Rogowskin kelat liittymän nousujohtoon vaiheiden ympärille, nuoli osoittamaan kuormaan päin (eli verkosta pois päin)
4. Käännä moduulin kytkin S12 asentoon 1.
5. Käynnistä järjestelmä edellä mainitulla tavalla, ja varmista, että AC_03 -kotelon kannessa oleva kytkin on asennossa Saareke (muuten tarkastusmittaus ei onnistu).
6. Paina näytöltä rasti ruutuun Auto-mode (Static tai Dynamic). Järjestelmä kysyy automaattiohjauksen parametreit, ja tarkastaa Rogowskin kelojen asennuksen ja näyttää testituloksen.
 - Jos liittymässä on hyvin heikko tehokerroin esim. tyhjäkäyvän oikosulkumoottorin vuoksi, saattaa testi näyttää virheellisesti vääriä vaiheita. Jos testiä ei saa menemään läpi, tulee varmistua muilla keinoilla, että virranmittaus on oikein ja ohittaa testituloksen.

Etäohjaus:

Järjestelmässä on valmius täydelliseen etämonitorointiin ja etähallintaan. Etänä voi tehdä tarvittaessa kaiken muun, paitsi fyysisten kytkimien kääntämisen. Tietoturvasyistä avainta ei anneta kevyin perustein.

Huom! Etäohjauksessa ei ole suositeltavaa sammuttaa järjestelmää, jos verkkosyöttökaapelia ei ole kytketty tai verkonvalintakytkin on asennossa Saareke. Tällöin akkuvarmennus on ainoa asia, joka pitää laitteet toiminnassa. Akun tyhjennyttyä järjestelmää ei enää pysty hallitsemaan etänä ilman verkkosyöttöä.

Etäohjauksen käyttöönotto:

1. Käynnistä järjestelmä haluttuun tilaan. (Idle-tila riittää, jos kotelon CO_03 laitteet ovat päällä)
2. Liitä internet-yhteydessä olevaan tietokoneeseen TOSIBOX-avain, ja anna salasana. Jos liität avaimen ensimmäistä kertaa, pitää ensin asentaa TOSIBOX-ohjelma.
3. Odota, että ohjelmassa näkyvään lukkoon saadaan yhteys, ja avaa sen alta löytyvä Beckhoff CX9020 -linkki. Linkki aukeaa selaimessa, ja 5 sekunnin jälkeen uudelleenohjataan Webvisuun automaattisesti.
(Vikatilanteessa kirjoita selaimen linkki
http://cx-3be4a1/Tc3PlcHmiWeb/Port_851/Visu/webvisu.htm)
4. Kirjautu sisään.