

Hybridienergiajärjestelmän hyötysuhdemittauksista

Riku Järvinen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

JÄRVINEN, RIKU:
Hybridiennergiajärjestelmän hyötysuhdemittauksista

Opinnäytetyö 52 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2021

Opinnäytetyön kohteena oli Tampereen ammattikorkeakoulun ja Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen ENERVARA-yhteishankkeessa suunniteltu ja rakennettu liikuteltava hybridiennergiajärjestelmä. Hybridiennergiajärjestelmä on rakennettu kahteen perävaunuun, joista ensimmäinen sisältää tehoelektroniikkalinjan sekä sähköajoneuvojen teholatausaseman, ja toisessa on energiavarasto. Aikaisempien testien perusteella oli huomattu, että tehoelektroniikkalinjan sisältämät tehoelektroniikkakomponentit toimivat oletettua huonommalla hyötysuhteella.

Opinnäytetyön tavoitteena oli suorittaa järjestelmälle hyötysuhdemittauksia erilaisissa käyttö- ja kuormitustilanteissa. Hyötysuhdemittauksia suoritettiin käyttämällä erilaisia mittalaitteita, joita olivat sähköanalyysimittarit sekä oskilloskoopit.

Mittauksissa törmättiin kuitenkin odottamattomiin ongelmiin, joita ei täysin saatu opinnäytetyön aikana ratkaistua. Hyötysuhdemittaukset antoivat mittareista ja mittaustavasta riippumatta epäloogisia tuloksia, sillä hyötysuhteiden arvot nousivat järjestelmällisesti yli 100 %:n. Tämän seurauksena opinnäytetyön fokus muuttui varsinaisista hyötysuhdemittauksista kohti tehoelektroniikkalaitteiden hyötysuhdemittausten teknisiä yksityiskohtia. Tavoitteena on, että tulevaisuudessa samoja ongelmia kohtaavat henkilöt voisivat saada opinnäytetyöstä konkreettista hyötyä omien mittaustensa tekemiseen.

Opinnäytetyön perusteella tultiin siihen johtopäätökseen, että tällaisia tehoelektroniikkakomponentteja sisältävään järjestelmään tehtäviä mittauksia varten pitäisi kiinnittää erityistä huomiota tähän käyttötarkoitukseen sopivien mittapäiden valintaan. Todennäköisin syy mittausten epäloogisuuteen oli virranmittauksessa käytettyjen virtapihtien soveltumattomuus kyseisiin mittauksiin. Tulevia mittauksia varten pitäisi yrittää etsiä markkinoilta sellaisia virtapihtejä, jotka olisi suojattu paremmin sähkömagneettisilta häiriöiltä ja jotka varmuudella soveltuvat korkeataajuisen virran mittaamiseen.

Asiasanat: hybridiennergiajärjestelmä, hyötysuhdemittaukset, tehoelektroniikkakomponentit

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

Järvinen Riku:
On the Efficiency Measurements of the Hybrid Energy Storage System

Bachelor's thesis 52 pages, appendices 0 pages
May 2021

The subject of this thesis is a mobile hybrid energy storage system that was built in a joint venture between Tampere University of Applied Sciences and Tampere Adult Education Centre. This hybrid energy storage system was built on two car trailers. One of the trailers contains the energy storage and the other one contains the power electronics line. In previous measurements it was found that some of the power electronic devices worked with poorer efficiency that was previously thought.

The purpose of this thesis was to perform efficiency measurements for the power electronic devices in various load and usage situations.

The data was collected with Power Quality Analyzers and oscilloscopes.

However, it was found that the measurement devices chosen for data collection produced illogical and distorted efficiency measurement results.

Further research is required when choosing the right measurement devices for this kind of system that contains complex power electronic devices. The probable reason for illogical results was that the current probes were not able to measure this kind of high frequency currents, or they were not sufficiently well protected against the electromagnetic radiation that this kind of a system can produce.

Key words: hybrid energy storage system, efficiency measurements, power electronic devices

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEORIA.....	7
	2.1 Teho.....	7
	2.2 Hyötysuhde.....	9
	2.3 Tehoelektronikan komponenttien tehohäviöistä.....	9
3	MITATTAVA LAITTEISTO.....	12
	3.1 Yleistä kyseisestä järjestelmästä.....	12
	3.2 DC-DC-konvertterit.....	14
	3.3 PV-konvertteri.....	16
	3.4 AFE.....	17
	3.5 Saarekeverkkoinvertteri.....	19
4	KÄYTETYT MITTALAITTEET.....	20
	4.1 Sähkölaatuanalysointilaitteisto Fluke 43B.....	20
	4.2 Oskilloskooppi Keysight DSO1004 A.....	21
	4.3 Oskilloskooppi Agilent Technologies DSO1012 A.....	22
	4.4 Oskilloskooppi Rohde & Schwarz RTB2004.....	23
	4.5 Virtapihti Fluke 80i-110s.....	24
	4.6 Virtapihti Chauvin Arnoux.....	25
	4.7 Differentiaali-anturi Gould PB59.....	26
	4.8 Virtasensori ABB ES500-9661.....	27
	4.9 Tasajännitelähde EPS EP-3502.....	28
5	MITTAUKSET.....	29
	5.1 Ensimmäinen mittausmenetelmä.....	29
	5.1.1 Mittausasetelma.....	29
	5.1.2 Mittaustulokset.....	31
	5.2 Toinen mittausmenetelmä.....	32
	5.2.1 Mittausasetelma.....	33
	5.2.2 Mittaustulokset.....	34
	5.3 Kolmas mittausmenetelmä.....	41
	5.3.1 Mittausasetelma.....	41
	5.3.2 Mittaustulokset.....	42
	5.4 Neljäs mittausmenetelmä.....	43
	5.4.1 Mittausasetelma.....	44
	5.4.2 Mittaustulokset.....	47
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	50
	LÄHTEET.....	52

LYHENTEET JA TERMIT

AC	(Alternating Current) vaihtosähkö
AFE	(Active Front End) laite, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen tehonsyötön
DC	(Direct Current) tasasähkö
invertteri	laite, joka muuntaa tasavirtaa vaihtovirraksi
konvertteri	laite, joka muuntaa tasajännitteen tasoa
off	puolijohde on kytketty johtamattomaksi
on	puolijohde on kytketty johtavaksi
TAMK	tampereen ammattikorkeakoulu
C	kondensaattori
$\cos \varphi$	vaihtosähkön tehokerroin
I	virta, A
I_0	transistorin läpi kulkeva virta, A
i_L	kelan läpi kulkeva virta, A
L	kela
P	pätöteho, W
P_1	laitteeseen sisään menevä teho
P_2	laitteesta ulos saatava teho
P_s	teho, W
Q	loisteho, VAr
R	resistanssi, Ω
S	näennäisteho, VA
t	aika, s
$t_{c(off)}$	transistorin poiskytkentäaika, s
$t_{c(on)}$	transistorin päällekytkentäaika, s
U	jännite, V
V_d	transistorin yli oleva jännite, V
v_L	kelan yli vaikuttava jännite, V
W	sähkötyö, Ws
$W_{c(off)}$	transistorin poiskytkentähäviöt, W
$W_{c(on)}$	transistorin päällekytkentähäviöt, W
η	hyötysuhde

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön kohteena oli Tampereen ammattikorkeakoulun ja Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen ENERVARA-yhteishankkeessa suunniteltu ja rakennettu hybridienergiajärjestelmä. Hankkeessa oli rakennettu kahden perävaunun järjestelmä, joista ensimmäinen perävaunu sisältää tehoelektroniikkalinjan sekä sähköajoneuvojen latausaseman, ja toisessa on energiavarasto. Tehoelektroniikkalinjasto sisältää monia tehoelektroniikkakomponentteja, kuten akku- ja aurinkosähkökonvertterit, saarekeverkkoinvertterin sekä AFE:n. Tehoelektroniikkakomponenttien keskeinen tehtävä on sovittaa yhteen hybridienergiajärjestelmän sähköisesti erilaiset lähteet, varastot ja kuormitukset.

Hybridienergiajärjestelmälle tehtyjen aikaisempien testien perusteella oli tullut ilmi, että järjestelmän tehoelektroniikkakomponentit toimivat oletettua heikommalla hyötysuhteella. Opinnäytetyön tarkoituksena oli suorittaa näille tehoelektroniikkakomponenteille hyötysuhdemittauksia erilaisissa käyttö- ja kuormitustilanteissa sekä niiden perusteella arvioida, minne tehoa mahdollisesti hukkuu.

Opinnäytetyössä perehdytään aiheen kannalta oleellisiin teorioihin sekä käydään lävitse mittauksen kohteina olleiden tehoelektroniikkakomponenttien toimintaperiaatteita. Tämän jälkeen esitellään mittauksissa käytetyt mittalaitteet. Viimeisenä lukuna ennen johtopäätöksiä selostetaan yksityiskohtaisesti mittaustapahtumat.

2 TEORIA

2.1 Teho

Sähköteho on fysiikan mukaan työtä, joka tehdään tietyssä ajassa. Kun johtimessa kulkee sähköä, voidaan teho laskea kaavalla

$$P_s = \frac{dW}{dt} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}, \quad (1)$$

jossa P_s on teho, W on sähkötyö, t on aika, U jännite, I on virta ja R on resistanssi. (Aura & Tonteri 1994, 77)

Näin ollen voidaan saada sähkötehon yksikkö, joka on

$$P_s = UI = VA = W = \text{watti}.$$

Vaihtosähkön tehosta puhuttaessa pitää ottaa huomioon, että on olemassa erilaisia määritelmiä teholle.

Vaihtosähkön pätötehosta puhuttaessa, tarkoitetaan vaihtosähkön keskimääräistä tehoa, jolla on sama lämmittävä vaikutus kulkiessa impedanssin resistanssin lävitse, kuin vastaavalla tasasähkön teholla kulkiessa resistanssin läpi. Pätöteho on siis tehoa, jossa energia muuttuu muodosta toiseen. Pätöteho saadaan aina laskettua hetkellisen tehon keskiarvona. Tällöin pätöteho voidaan esittää kaavalla

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi, \quad (2)$$

jossa P on keskimääräinen teho, p on hetkellisteho, t on aika, U_{rms} on jännitteen tehollisarvo, I_{rms} on virran tehollisarvo ja $\cos \varphi$ on vaihtosähkön tehokerroin. Kulma φ on jännitteen ja virran välinen vaihe-ero. (Aura & Tonteri 1994, 197)

Jos vaihtosähkön kuormana on puhdasta resistanssia, eikä virtapiirissä ole mukana impedansseja, on tällöin vaihtosähkön teho puhdasta pätötehoa ja se voidaan laskea kaavalla

$$P = UI. \quad (3)$$

(Aura & Tonteri 1994, 199)

Loistehosta puhuttaessa tarkoitetaan tehoa, joka sykkii edestakaisin sähkölaitteen ja sähköverkon välillä. Tämä osa tehosta ei siis ota osaa työn suorittavaan tehoon, vaan varastoituu sähkö- ja magneettikenttään sähköenergiana. Tämä voidaan esittää kaavalla

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (4)$$

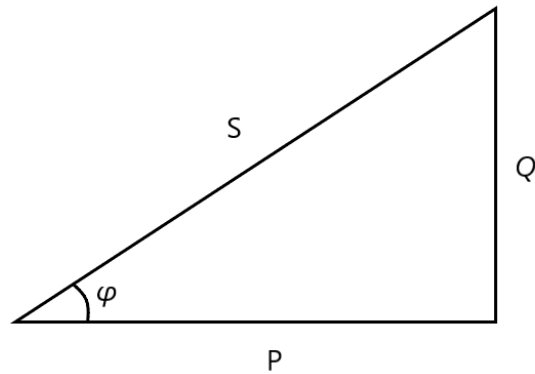
jossa Q on loisteho, U jännite, I on virta ja $\sin \varphi$ on vaihtosähkön loistehokerroin. (Aura & Tonteri 1994, 198)

Näennäisteho sisältää sekä pätötehon, että loistehon ja voidaan esittää kaavalla

$$S = UI, \quad (5)$$

jossa S on näennäisteho, U jännite, I on virta. (Aura & Tonteri 1994, 198)

Kuvassa 1 on tehokolmio, josta nähdään hyvin pätö-, lois- ja näennäistehon yhteys toisiinsa. Tästä tehokolmiosta havaitaan, että jos jännitteen ja virran välillä ei ole vaihe-eroa, pätöteho ja näennäisteho ovat yhtä suuret. Tällöin loistehoa ei ole ollenkaan, eikä energiaa varastoidu lainkaan sähkö- ja magneettikenttään.



Kuva 1. Tehokolmio

2.2 Hyötysuhde

Hyötysuhteella tarkoitetaan sähkölaitteesta ulos saatavan tehon suhdetta siihen vietyyn tehoon. Tämä on pienempi kuin 1, koska sähkölaitteissa syntyy aina tehohäviöitä. Mitä vähemmän laitteessa syntyy tehohäviöitä, sitä parempi on tällöin hyötysuhde. Hyötysuhteella on suuri merkitys taloudellisessa mielessä ja sen rooli korostuu laitteiston tehon kasvaessa. Hyötysuhde voidaan laskea kaavalla

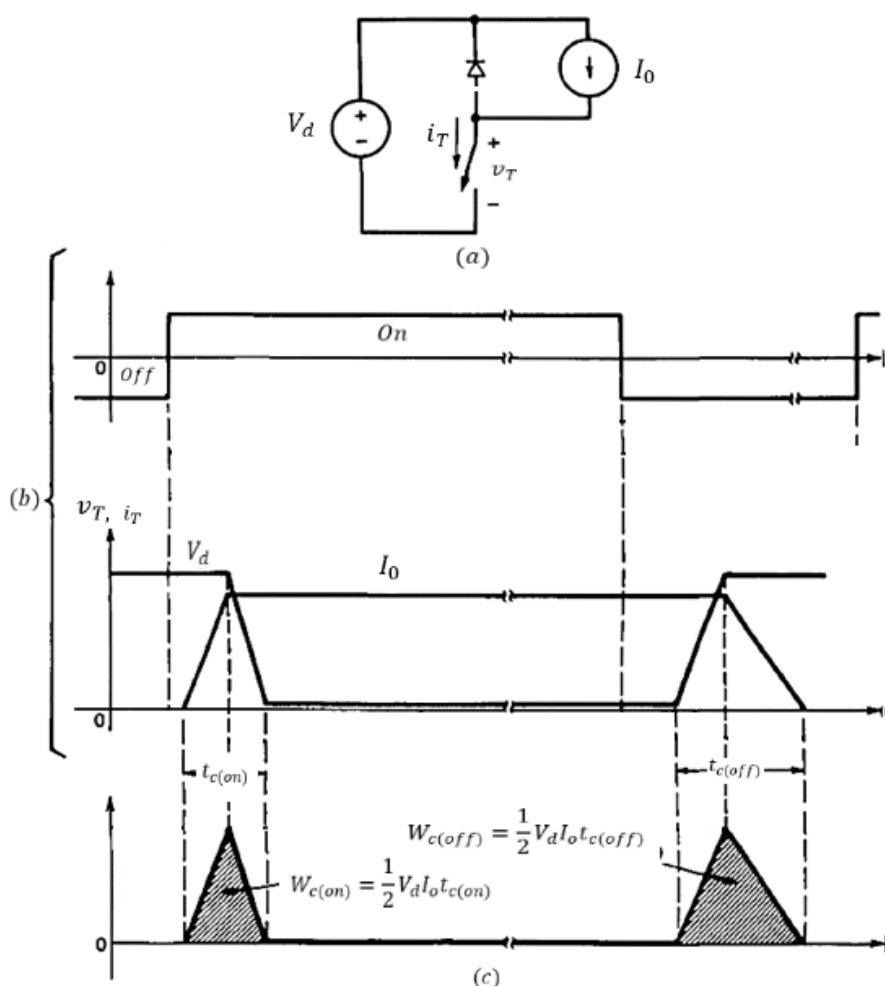
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

jossa η on hyötysuhde, P_2 on laitteesta ulos saatava teho ja P_1 on laitteeseen sisään menevä teho. (Aura & Tonteri 1994, 78–79)

2.3 Tehoelektroniikan komponenttien tehohäviöistä

Tehoelektroniikassa tehohäviöitä syntyy eritoten transistoreissa, kuristimissa ja kondensaattoreissa. Ehkä merkittävimmät tehohäviöt syntyvät puolijohdekomponenteissa. Puolijohdeiden tehohäviöt ovat hyvin yleisluontoisia, ja ovat samantyyppisiä kaikilla eri puolijohdekomponenteilla (Mohan, Undeland, & Robbins 2003, 21).

Kuvassa 2 on esitetty yleisluontoisia kytkentätilanteiden ilmiöitä. Kohdassa a on esitetty yksinkertaistettu piirikaavio, jossa oletetaan diodin olevan ideaalinen. B-kohdassa on esitetty päälle- ja poiskytkentää liittyvät ilmiöt ja viiveet. Tässä V_d kuvaa transistorin yli olevaa jännitettä ja I_0 sen läpi kulkevaa virtaa. Kytkentätilanteissa siis esiintyy pieniä viiveitä, johtuen virran nousu- ja laskuajasta. Todellisuudessa siis, kun kytketään puolijohdekomponentti johtavaksi tai johtamattomaan tilaan, se ei tapahdu välittömästi, ja tästä aiheutuu tehohäviöitä. C-kohdassa nähdään äkilliset kytkentätilanteisiin liittyvät tehohäviöt, jotka ovat merkittäviä. Vasta, kun virta I_0 on noussut nimellisarvoonsa, muuttuu diodi estosuuntaiseksi, ja transistorin yli jää vain pieni päälläolojännite. Tehohäviöt muodostuvat tästä virran nousuajasta johtuvasta komponenttien lämpenemisestä. Transistorin poiskytkentätilanteessa virran laskuaika aiheuttaa samankaltaisia lämpöhäviöitä. (Mohan ym. 2003, 20–23).



Kuva 2. Puolijohdekomponenttien kytkentätilanteisiin liittyviä ominaispiirteitä (Mohan, Undeland & Robbins 2003, muokattu)

Myös kuristimissa tapahtuu paljon erilaisia tehohäviöitä. Näitä ovat pääasiassa resistiiviset häviöt, joita tapahtuu kuparijohtimissa, hystereesihäviöt, pyörrevirtahäviöt, värinästä johtuvat häviöt, sähkömagneettisesta säteilystä johtuvat häviöt sekä häviöt, joita tapahtuu eristemateriaaleissa. (University of Surrey 2008)

Kun kuristimessa ei kulje vaihtelevaa virtaa, vain kuparijohtimissa tapahtuu häviöitä. Näitä häviöitä kutsutaan myös kuparihäviöiksi. Muita häviöitä ei tapahdu, jos kuristimen läpi kulkevan virran taajuus on nolla. Hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä kutsutaan yleisesti myös rautahäviöiksi. Nämä häviöt siis kasvavat virran taajuuden kasvaessa. Hystereesi- ja pyörrevirtahäviöissä on kyse ajan suhteen muuttuvan magneettikentän aiheuttamista häviöistä. Hystereesihäviöillä tarkoitetaan ferromagneettisen aineen magnetointiin liittyviä häviöitä. Ajan suhteen muuttuva magneettikenttä aiheuttaa ympärilleen aina sähkökentän pyörteen, joka johtavaan aineeseen kohdistuessaan aiheuttaa pyörrevirtoja ja niiden seurauksena häviöitä. Näitä häviöitä kutsutaan pyörrevirtahäviöiksi. (University of Surrey 2008)

3 MITATTAVA LAITTEISTO

3.1 Yleistä kyseisestä järjestelmästä

Tämä hybridienergiajärjestelmä on rakennettu kahteen perävaunuun. Kuvassa 3 vasemmanpuoleinen perävaunu on teholinjavaunu, jossa sijaitsee kaikki tehoelektroniikka, joiden hyötysuhteita tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus mitata. Kuvassa oikealla näkyvä perävaunu puolestaan pitää sisällään energiavarastojärjestelmän, eli siellä sijaitsee tämän järjestelmän akut, sekä niihin liittyvät sähköjärjestelmät.

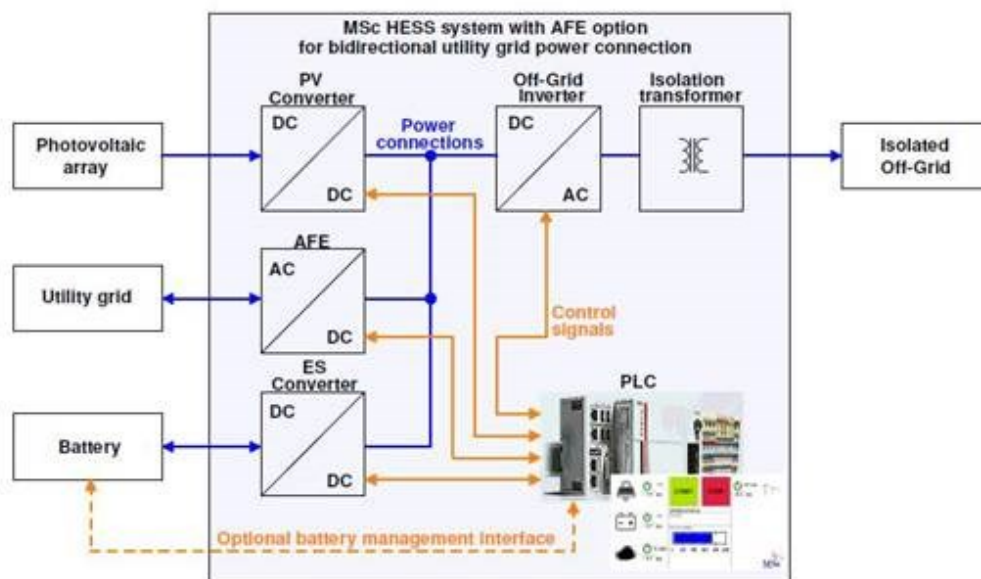


Kuva 3. Hybridienergiajärjestelmä

Kuvassa 4 nähdään järjestelmän yksinkertaistettu toimintaperiaate. Kyseessä on siis hybridienergiajärjestelmä, johon voidaan ladata sähköenergiaa useammasta eri lähteestä samanaikaisesti. Sähköenergia siis latautuu tällöin toisessa perä-

vaunussa olevaan energiavarastojärjestelmään. Energiavarastojärjestelmää voidaan ladata suoraan sähköverkosta, aurinkosähköjärjestelmällä tai toisesta energiavarastosta. AFE mahdollistaa sen, että energiaa voidaan syöttää myös hybridienergiajärjestelmästä sähköverkkoon päin. Tehoelektroniikkalinjan tarkoituksena on siis sovittaa yhteen sähköisesti erilaiset lähteet, varastot ja kuormat. Tämä yhteensovittaminen on toteutettu Common DC -tekniikalla, jossa kaikki tehoelektroniikkalaitteet kytkeytyvät samaan noin 750 V:n DC-jännitteeseen. Tämä nähdään kuvan 4 keskellä nimellä "Power connections".

Järjestelmä on suunniteltu käynnissä olevan energiamurroksen moderneihin sähkökäyttöihin, joissa uusiutuvalla energialla ja energian varastoinnilla on kasvava roolinsa. Tätä laitteistoa voidaan käyttää siis monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Tällä voidaan esimerkiksi teholadata sähköajoneuvoja siten, että osa tehosta tulee sähköverkosta ja osa energiavarastosta. Järjestelmällä voidaan myös muodostaa sähköverkosta täysin erillinen kolmivaiheinen saarekverkkko, joka tuotetaan aurinkosähkön ja energiavaraston avulla. Järjestelmää voidaan käyttää myös sähköverkosta otettavien sähkötehopiikkien leikkaamisen energiavaraston avulla.



Kuva 4. Hybridienergiajärjestelmän yksinkertaistettu toimintaperiaate (MSc Electronics Oy)

3.2 DC-DC-konvertterit

Tässä järjestelmässä on kaksi DC-DC-konvertteria ES1 ja ES2. ES1-konvertteria käytetään, kun käytössä on jokin toinen energiavarastojärjestelmä, kuin peräkärryn päälle oleva akkuvarasto. TAMK:ssa on sähkölaboratorion sisällä akkuvarasto, joka on kytketty tähän virtapiiriin. Kuitenkin tässä kyseisessä opinnäytetyössä mittauksia suoritettiin vain perävaunussa olevalla energiavarastolla, jolloin käytettiin siis ES2-konvertteria.

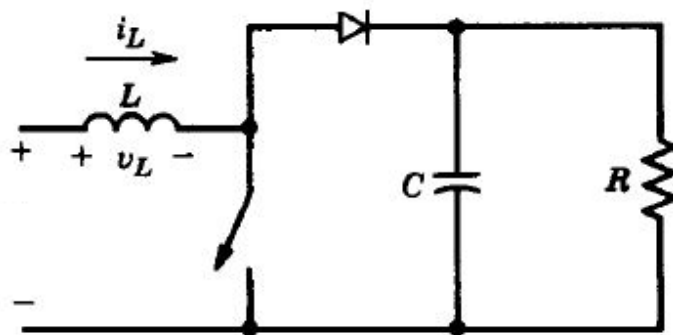
Tässä kyseisessä järjestelmässä DC-DC-konvertterin tehtävänä on joko nostaa tai laskea tasajännitteen tasoa, riippuen kumpaan suuntaan energiaa siirretään. Esimerkiksi kun kuvassa 5 näkyvään ES2-konvertteriin syötetään energiavarastojärjestelmästä sen nimellistä jännitettä noin 345 voltia, nostaa ES2-konvertteri sen arvoon noin 750 voltia, sekä siirtää jännitteen tasajännitevälipiiriin.



Kuva 5. ES2 DC-DC-konvertteri

Tällaisia komponentteja, jotka muuntavat jännitteentasoja tehoelektronikan kytkimillä, kutsutaan yleisesti hakkureiksi. Hakkurityyppejä on useampaakin erilaista, mutta tämän DC-DC-konvertterin toiminta perustuu kahteen niistä. Yleisesti hakkurien tehtävänä on pitää haluttu ulostulojännite vakiona riippumatta kuormitus- tai verkkojännitemuutoksista (Mohan ym. 2003, 161).

Kun energiaa siirretään tasajännitevälipiiriin, ja jännitettä nostetaan, perustuu sen toiminta kuvan 6 mukaiseen boost-tyyppiseen hakkuriin.



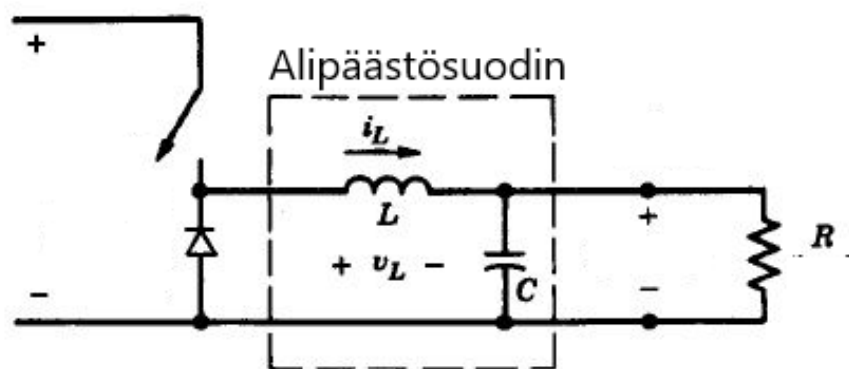
Kuva 6. Step-Up (Boost) -hakkuri (Mohan, Undeland & Robbins 2003, mukattu)

Boost-tyyppisen hakkurin ulostulojännite eli ns. toisiojännite on aina korkeampi, kuin sinne sisään syötetty tasajännite on. Piirin toimintaperiaate perustuu siihen, että kuvassa 6 näkyvä transistori toimii kytkimenä, joka todella nopealla kytkentätaajuudella oikosulkee sarjainduktanssin, sekä tämän jälkeen kytkee induktanssin sarjaan kuormapiiriin kanssa ja täten nostaa toisiojännitteen. (Mohan ym. 2003, 172–173; Rashid 2011, 254.)

Kun transistori on johtavassa tilassa, on se siis oikosuljettu, ja virta kulkee vain sen kautta, ja näin ollen kelan magneettikenttään varautuu energiaa. Kun taas transistori avautuu, pääsee kelaan varautunut energia purkautumaan ulostuloon, joka näin ollen nostaa ulostulossa olevan kondensaattorin jännitettä. (Mohan ym. 2003, 172–173; Rashid 2011, 254.)

Kun taas energiaa siirretään tasajännitevälipiiristä esimerkiksi energiavarastoon, pitää jännitettä tällöin laskea. Tällöin puhutaan jännitettä alentavasta eli buck-tyyppisestä hakkurista (kuva 7). Buck-tyyppisen hakkurin ulostulojännite on aina pienempi kuin sinne sisään syötetty tasajännite on. Tässäkin kytkennässä transistori toimii kytkimenä. Kun transistori on johtavassa tilassa, kulkee syöttöjännite kuormalle ja kelaan varastoituu energiaa. Kun transistori avautuu, purkautuu ke- laan varastoitunut energia kuormalle. Kuvassa 7 näkyvä alipäästösuodin suodattaa lähtöjännitettä, jolloin transistorin nopeasta päälle- ja pois-kytkennästä johtuva aaltomaisuus suodattuu, ja näin saadaan aikaiseksi tasaista tasajännitettä.

(Mohan ym. 2003, 162–166; Rashid 2011, 254.)



Kuva 7. Step-Down (Buck) -hakkuri (Mohan, Undeland & Robbins 2003, muokattu)

3.3 PV-konvertteri

Kuva 8 esittää PV-konvertterin, jonka avulla aurinkosähköjärjestelmä kytketään osaksi hybridienergiajärjestelmää. Kyseessä on ES-konverttereiden tapaan DC-DC-konvertteri, joten kytkentä tehdään suoraan aurinkopaneelien DC-jännitteeseen, ennen aurinkosähköjärjestelmän omaa invertteriä. ES-konverttereista poiketen PV-konvertteri on kuitenkin yksisuuntainen, eli tehon suunta on vain aurinkosähköjärjestelmästä kohti hybridienergiajärjestelmää. Tällöin konvertteri toimii jo edellä esitellyn boost-tyyppisen hakkurin tavoin.



Kuva 8. PV-konverterri

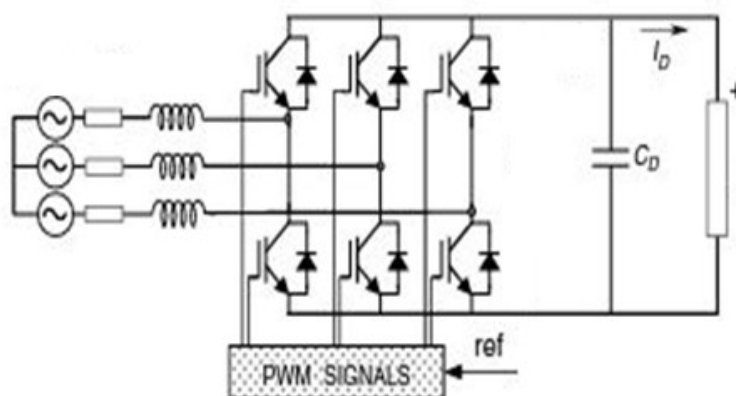
3.4 AFE

Kuvassa 9 näkyvä AFE on periaatteessa kaksisuuntainen kolmivaiheinvertteri. Invertterillä tarkoitetaan laitetta, joka tekee tasasähköstä vaihtosähköä. AFE taas tulee sanoista Active Front End, ja tarkoittaa käytännössä sitä, että laitteen tehoelektroniikkakomponentit mahdollistavat kaksisuuntaisen tehonsyötön. Kun valtakunnan sähköverkosta syötetään järjestelmään 400 voltin vaihtojännitettä, AFE tasasuuntaa jännitteen, sekä nostaa sen tasajännitevälipiirissä olevaan noin 750 voltin jännitetasoon. Kun taas järjestelmästä halutaan siirtää energiaa valtakunnan verkkoon, kulkee tällöinkin energia AFE:n kautta, jolloin jännite vaihtosuunnataan, sekä asetetaan 400 voltin jännitetasoon.



Kuva 9. AFE ja sen suotimet

Kuvassa 10 näkyvällä kytkennällä sähköä voidaan tasasuunnata, jolloin energiaa siirtyisi vasemmalta oikealle, mutta kytkennän avulla energiaa voidaan siirtää myös tasajännitteestä takaisin vaihtosähköksi, jolloin energian siirto onnistuu myös oikealta vasemmalle. Kun jännitettä tasasuunnataan, on kuvassa näkyvä virta I_D positiivinen ja kondensaattoria C_D puretaan. Tällöin ohjausjärjestelmään pyydetään antamaan lisää energiaa vaihtosähköpuolelta ja tällöin virtaa alkaa kulkea enemmän ja kondensaattori latautuu. Vaihtosuuntauksessa virta I_D on negatiivinen, jolloin tapahtuu päinvastoin, eli kondensaattorin jännite yli latautuu, jolloin energiaa aletaan siirtää takaisin vaihtosähköpuolelle. (Rashid 2011, 225)



Kuva 10. AFE:n toimintaperiaate (Rashid 2011, muokattu)

3.5 Saarekeverkkoinvertteri

Kuvassa 11 nähdään saarekeverkkoinvertteri. Tällä invertterillä voidaan järjestelmällä tuottaa täysin valtakunnan sähköverkosta erillinen kolmivaiheinen 400 voltin sähköverkko.



Kuva 11. Saarekeverkkoinvertteri

Tämän invertterin toimintaperiaate on samanlainen, kuin jo edellä esitelty AFE:n toimintaperiaate. Kuitenkin tämä on ohjelmallisesti tehty sellaiseksi, että energiaa voidaan siirtää vain tasasähkövälipiiristä ja vaihtosähköksi, jolloin laite toimii vain yksisuuntaisesti.

4 KÄYTETYT MITTALAITTEET

Tässä luvussa esitellään työssä käytössä olleet mittalaitteet sekä mittapääät. Tämä nähdään tärkeäksi siitä syystä, että työssä jouduttiin etsimään sopivia mittalaitteita hyötysuhdemittausten onnistumiseksi. Eritoten mittalaitteiden valinnassa kiinnitettiin huomiota siihen, että niillä pystyisi mittaamaan noin 8 kHz taajuudella olevia virtoja, jännitteitä ja tehoja. Tehosta tarkoitettiin mitata nimenomaan pätötehoa.

4.1 Sähkölaatuanalysointilaitteet Fluke 43B

Mittauksissa käytössä ollut Fluke 43B on sähkölaatuanalysointilaitte, eli mittalaitte, jolla voidaan suoraan mitata tehoa, sekä myös analysoida sen laatua (kuva 12). Laitte näyttää suoraan pätö-, lois- sekä näennäistehon, sekä myöskin tieteenkin virran ja jännitteen arvot. Tässä opinnäytetyössä laitetta käytettiin nimenomaan pätötehon mittaamiseen ensimmäisessä mittausmenetelmässä.

Kyseisellä mittalaitteella pystyy mittaamaan 1- ja 3-vaiheisia tehoja kolmivaihejärjestelmän symmetrisissä kuormissa. Pätötehon ja taajuuden mitta-alueet ovat 250 W – 250 MW ja 10,0 Hz – 15,0 kHz.

(Fluke 43B käyttöohje 2008, 37)

Näiden tietojen pohjalta Fluke 43B -sähkölaatuanalysointilaitteen pitäisi olla soveltuva tässä työssä tehtäviin mittauksiin.



Kuva 12. Sähkönlaatuanalysointilaite Fluke 43B

4.2 Oskilloskooppi Keysight DSO1004 A

Kuvassa 13 nähdään Keysightin 4-kanavainen oskilloskooppi, jota käytettiin mittauksissa jännite- ja virta-arvojen tallentamiseen usb-tikulle, eritoten mittausmenetelmässä kaksi. Koska mittalaitteessa on neljä kanavaa, voidaan sillä piirtää näytölle sekä tallentaa neljää eri signaalia yhtä aikaa. Tämä todettiin erittäin hyödylliseksi ominaisuudeksi mittauksissa, koska siten voitiin samalla kertaa tallentaa sekä ES2-konvertteriin sisään menevä teho sekä sieltä ulos tuleva teho tällä yhdellä mittalaitteella.

Tällaista oskilloskooppia voidaan käyttää esimerkiksi tuotekehitystyöhön, opetus-tarkoituksiin sekä tuotteiden testaukseen esimerkiksi valmistusteollisuudessa. (Keysight DSO1000 A/B Data Sheet 2018, 2)

Kun käytetään kaikkia neljää kanavaa yhtä aikaa, tämä oskilloskooppi pystyy lukemaan näytteitä maksimissaan $1 \cdot 10^9$ kappaletta sekunnissa. Näin korkea näytteenottonopeus toteutuu, kun laite on ollut päällä vähintään puoli tuntia ja ympäristön lämpötila on ± 5 % siitä lämpötilasta, jossa laite viimeksi kalibroitiin. (Keysight 1000 A Series Oscilloscopes User's Guide 2017, 139)



Kuva 13. Oskilloskooppi Keysight DSO1004 A

4.3 Oskilloskooppi Agilent Technologies DSO1012 A

Kuvassa 14 nähdään käytössä ollut 2-kanavainen oskilloskooppi. Tätä oskilloskooppia käytettiin virta-arvojen vertailuun tämän opinnäytetyön kolmannessa mittausmenetelmässä.

Kyseinen oskilloskooppi on muutoin sama kuin edellä esitelty, mutta tässä on vain kaksi kanavaa. Mittalaitetta voidaan käyttää samanlaisiin tarkoituksiin, kuin tämän 4-kanavaista versiota.

Kun käytetään molempia kanavia yhtä aikaa, tämä oskilloskooppi pystyy lukemaan näytteitä maksimissaan $1 \cdot 10^9$ kappaletta sekunnissa. Eli saman verran kuin edellä esitelty 4-kanavainen versio, kun kaikki kanavat ovat käytössä yhtä aikaa. Näin korkea näytteenottonopeus toteutuu, kun laite on ollut päällä vähintään puoli tuntia ja ympäristön lämpötila on $\pm 5 \%$ siitä lämpötilasta, jossa laite viimeksi kalibroitiin. (Agilent 1000 Series Oscilloscopes User's Guide 2009, 143)



Kuva 14. Oskilloskooppi Agilent Technologies DSO1012 A

4.4 Oskilloskooppi Rohde & Schwarz RTB2004

Kuvassa 15 nähdään Rohde & Schwarzin 4-kanavainen oskilloskooppi. Tätä mittalaitetta käytettiin tässä opinnäytetyössä neljännessä mittausmenetelmässä virta- ja jännitearvojen mittaamiseen.

Tässä työssä hyödynnettiin myös oskilloskoopin matematiikka- ja keskiarvofunktioita, joilla saatiin suoraan laskennallinen pätöteho oskilloskoopin näytölle näkyviin.

Kyseisellä oskilloskoopilla voidaan näytteitä lukea maksimissaan $1,25 \cdot 10^9$ kappaletta sekunnissa. (Rohde & Schwarz RTB2000 Oscilloscope Data Sheet 2021, 5) Tämä tarkoittaa siis sitä, että tällä oskilloskoopilla voidaan lukea hieman enemmän näytteitä per sekunti verrattuna aikaisemmin esiteltyihin oskilloskooppeihin.



Kuva 15. Oskilloskooppi Rohde & Schwarz RTB2004

4.5 Virtapihti Fluke 80i-110s

Kuvassa 16 nähdään mittauksissa käytössä ollut Fluken AC/DC -virtapihti. Kyseisiä virtapihtejä käytettiin tässä opinnäytetyössä virran mittauksiin ensimmäisessä ja toisessa mittausmenetelmässä.

Kyseisiä virtapihtejä voidaan käyttää virranmittauksiin esimerkiksi sähkö-, elektroniikka tai autosähkösovelluksissa. Nämä virtapihdit ovat suojattuja häiriöitä vastaan, joita syntyy moottorikäytöissä ja sytytysjärjestelmissä. Virtamittausalue 50 mA – 100 A, eikä erityisvaatimuksia virran muodolle ole, sillä sekä tasa- että vaihtovirran kuin myös näiden yhdistelmän mittaaminen onnistuu. (Fluke 80i-110s Instructions, 1)

Taajuusalue, joissa näitä virtapihtejä voi käyttää on todella laaja. Kuitenkaan yli 20 kHz taajuusalueella toimimista ei ole määritetty. (Fluke 80i-110s Instructions, 9)



Kuva 16. Virtapihti Fluke 80i-110s

4.6 Virtapihti Chauvin Arnoux

Kuvan 17 mukaisia Chauvin Arnoux E3N -virtapihtejä käytettiin tässä opinnäytetyössä virran mittaamiseen toisessa, kolmannessa ja neljännessä mittausmenetelmässä.

Näilläkin virtapihdeillä voi mitata tasavirtaa, vaihtovirtaa tai tasa- ja vaihtovirran yhdistelmää. Virtaa voidaan mitata välillä 50 mA – 100 A. (Chauvin Arnoux E3N User's manual, 16)

Käyttökohteita kyseisille virtapihdeille on monia, ja ne ovat pääasiassa samanlaisia kuin edelle esiteltujen Fluken virtapihtien käyttökohteet. Muutoinkin nämä virtapihdit vaikuttavat olevan toiminnallisuudeltaan melkein identtiset Fluken virtapihtien kanssa, vain valmistaja on eri.



Kuva 17. Virtapihti Chauvin Arnoux

4.7 Differentiaalianturi Gould PB59

Kuvan 18 mukaisia Gouldin differentiaaliantureita käytettiin tämän opinnäytetyön kaikissa jännitemittauksissa.



Kuva 18. Differentiaalianturi Gould PB59

Tällaisia differentiaaliantureita käytetään tavanomaisten oskilloskooppien kanssa jännitteenmittauksissa mittapäinä. Nämä ovat korkeaimpedanssisia aktiivisia mittapäitä, joissa on herkkyysäädin / vaimennin, jonka avulla voidaan muuntaa mittalaitteelle menevän jännitteen tasoa pienemmäksi. Vaimennussuhteita on tässä laitteessa kaksi, 200:1 ja 20:1. (Gould n.d., 1.) Tässä opinnäytetyössä kaikki mittaukset suoritettiin vaimennussuhteella 200:1. Tämä tarkoittaa sitä, että jos mitattiin 200 voltin jännitettä, mittalaitteelle meni vain yksi voltti.

4.8 Virtasensori ABB ES500-9661

ABB ES500-9661 -virtasensoria käytettiin virran mittaamiseen opinnäytetyön kolmannessa mittaustavassa (kuva 19). Tämä kyseinen virtasensori oli TAMK:n sähkölaboratoriossa irrallisena, ja on todennäköisesti irrotettu aikoinaan jostain taajuusmuuttajasta.

Nimellisvirta tässä sensorissa on 350 ampeeria. Tämä virtasensori toimii siten, että kun tähän syötetään sekä +15 volttia, että -15 volttia tasajännitettä, niin sensori antaa ulostulona milliampeereina virta-arvon. Tämä virta-arvo on siis mittavan johtimen läpi kulkeva virta. Tämä virta-arvo pitää vielä kertoa muuntosuhteella, jotta saadaan todellinen virta-arvo. Tätä kyseistä virtasensoria mitattiin TAMK:n sähkölaboratoriossa ja kokeellisesti muuntosuhteeksi saatiin noin 1/5000. Tämä tarkoittaa sitä, että jos virtasensorilla mitattaisiin nimellisvirtaa eli 350 ampeeria, niin virtasensorista ulostulevan virran arvo olisi noin 70 milliampeeria.



Kuva 19. Virtasensori ABB ES500-9661

4.9 Tasajännitelähde EPS EP-3502

Kuvassa 20 nähdään EPS EP-3502 -tasajännitelähde, joita käytettiin tässä opin-
näytetyössä kolmannessa mittaustavassa. Tässä mittausmenetelmässä siis syö-
tettiin ABB:n virtasensoriin ± 15 V tasajännitettä.

Tällä kyseisellä laitteella voidaan ottaa sähköä pistorasiasta ja syöttää jatkuvaa
ja muuttumatonta tasajännitettä ja -virtaa välillä 0–35 voltia ja 0–2 ampeeria.
Nämä suureet ovat säädettävissä portaattomasti. (EPS EP-SERIES n.d., 6)



Kuva 20. Tasajännitelähde EPS EP-3502

5 MITTAUKSET

5.1 Ensimmäinen mittausmenetelmä

Opinnäytetyö alkoi sillä, että etsittiin tehonmittaukseen parhaiten soveltuvat mittarit. Näin ollen päädyttiin suorittamaan mittaukset Fluke 43B -sähkönlaatuanalyysaattoreilla (kuva 21). Mittaukset aloitettiin mittaamalla ES2-konvertertin hyötysuhdetta siten, että energiaa siirrettiin akkuvaunun ja sähköverkon välillä. Mittauksia suoritettiin järjestelmällisesti usealla eri teholla aloittaen akkuvaunun purkutilanteen maksimiteholla. Tämän jälkeen siirryttiin mittaamaan akkuvaunun lataustilannetta.

5.1.1 Mittausasetelma

Kuvassa 21 on nähtävissä ensimmäisen mittauksen asettelu. Tässä mittauksessa käytettiin Fluken virtapihtejä. Koska kyseessä on tasavirtajärjestelmä, niin käytännössä ei pitäisi olla eroa, mitataanko virtaa plus- vai miinusjohtimista, joten päätettiin suorittaa kaikki virranmittaukset plusjohtimista selkeyden vuoksi.



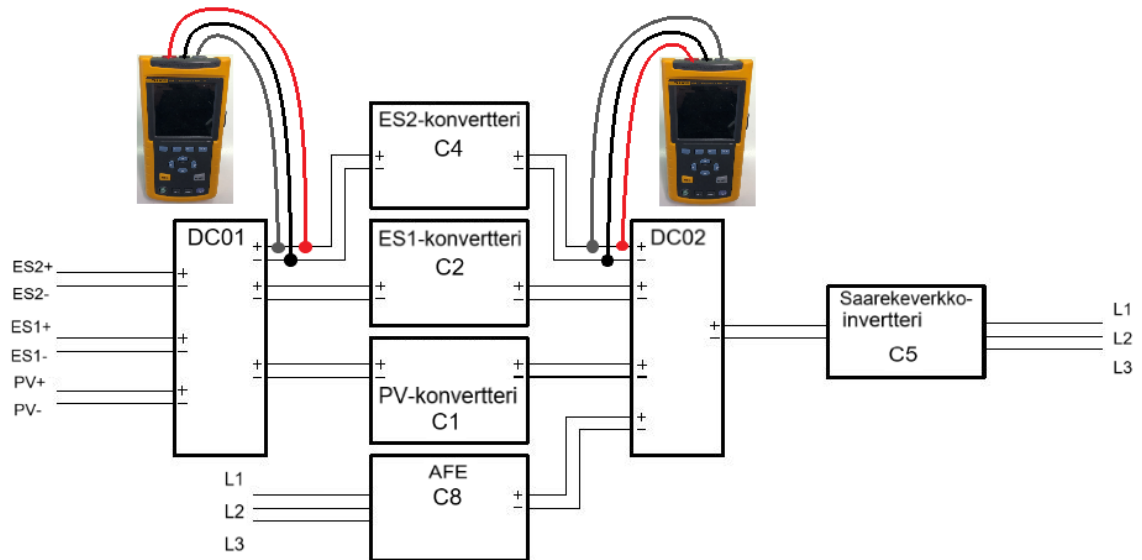
Kuva 21. Mittaustapahtuma käyttäen Fluke 43B:tä

Sähkölaatuanalyssaattorit sijoitettiin siten, että pystyttiin mittaamaan suoraan ES2-konvertteriin sisään menevää ja sieltä ulos tulevaa tehoa. Toinen sähkölaatuanalyssaattori asetettiin tasajännitevälipiiriin eli DC02-kytkentäkoteloon ja toinen DC01-kytkentäkoteloon, josta päästiin hyvin käsiksi akkuvaunuun meneviin johtimiin. Kuvasta 22 nähdään, miten jännitteenmittaus suoritettiin DC02-kytkentäkotelon sisältä ja virranmittaus heti kotelon vierestä oranssin kaapelin päältä.



Kuva 22 Jännite- ja virtamittauksien asettelu

Kuvassa 23 puolestaan nähdään kytkennän periaatteellinen kuva, sekä sähkölaatuanalyssaattorien asettelu. Tummanharmaalla piirretyt mittajohtimet kuvaavat virranmittausta. Punaisella ja mustalla piirretyt mittajohtimet kuvaavat jännitteenmittausta. Kuvassa näkyy myös tasajännitevälipiirin kytkentäkotelon DC02. Tosiassillisesti jännitteenmittaukset siis suoritettiin kytkentäkoteloiden sisältä ja virranmittaus kotelon ulkopuolelta, kuten kuvassa 22 nähtiin, mutta selkeyden vuoksi ne on alla olevassa kuvassa piirretty koteloiden viereen.



Kuva 23. Järjestelmän periaatteellinen kuva ja mittalaitteiden asettelu

5.1.2 Mittaustulokset

Mittauksista saadut tulokset nähdään taulukosta 1. Kun tarkastellaan ensimmäistä riviä taulukosta, huomataan, että akkuvaunun puolella ollut tehoanalyysaattori antoi tehoksi 19 kilowattia ja tasajännitevälipiiriin meni toisen tehoanalyysaattorin mukaan 14,7 kilowattia tehoa. Näin ollen siis ES2-konverterin hyötysuhteeksi kyseisellä teholla saatiin 77 %. Johtuen virtapihtien asettelusta näkyy taulukossa lataustilanteen teho miinusmerkkisenä.

Taulukko 1. Fluke 43B mittaustulokset

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
19,00	14,70	77
16,00	12,30	77
12,70	9,70	76
9,37	7,30	78
6,13	4,48	73
3,27	2,20	67
0,94	0,34	36
-13,80	-11,10	124

Mittauksissa huomattiin heti alkuun, että lataustilanteessa ES2-konverterin hyötysuhde nousi yli 100 %:n. Tällöin siis konverterista ulos tulevan energian määrä

olisi suurempi kuin mitä sinne sisään menevä energian määrä on. Lataustilanteesta taulukoitiin vain tulos täydellä latausteholla ja tämän jälkeen alettiin tutkia saatuja mittaustuloksia.

Mittaus toistettiin useaan kertaan ja usealla eri purku- sekä latausteholla. Jokaisella mittauskerralla saatiin samat tulokset. Eli akkuvaunun purkutilanteessa hyötysuhteet pysyivät alle 100 %:n, mutta lataustilanteessa saatiin aina hyötysuhteeksi yli 100 %.

Fluken käyttöohjeen mukaan sillä pitäisi pystyä mittaamaan tehoa 15 kHz:n asti ja DC-DC-konvertterien kytkentätaajuus on 8 kHz luokkaa. Näin ollen valituilla mittareilla olisi pitänyt pystyä suorittamaan kyseiset mittaukset. Kuitenkin koska mittaustulokset eivät olleet loogisia, eivätkä edes teoriassa mahdollisia, tultiin siihen lopputulokseen, että mittaukseen valitut tehoanalysointorit eivät sittenkään olleet sopivia kyseiseen mittaukseen.

Näin ollen päätettiin, että mittauksissa ei edetä mittaamaan muita komponentteja ennen kuin saadaan loogiset mittaustulokset aikaiseksi käyttäen ES2-konvertteria.

5.2 Toinen mittausmenetelmä

Seuraavaksi alettiin tutkia, mikä voisi olla parempi mittausmenetelmä kyseisen järjestelmän mittausten suorittamiseksi. Aika nopeasti tultiin siihen lopputulokseen, että otetaan käyttöön Keysight DSO1004 A -oskilloskooppi. Näin ollen mitattiin taas ES2-konvertterin hyötysuhdetta käyttäen tätä mittausmenetelmää. Erona aikaisempaan mittausmenetelmään oli siis vain mittalaitteen vaihdos sähkönlaatuanalysointoreista oskilloskooppiin.

5.2.1 Mittausasetelma

Kuvasta 24 on nähtävissä toisen mittausmenetelmän asettelu. Tässäkin mittauksessa käytettiin Fluken virtapihtejä, jotka aseteltiin samoihin johtoihin kuin ensimmäisessä mitaustavassa. Jännitteen mittauksessa käytettiin mittapäitä, joiden skaalaus asetettiin 1/200-kohtaan. Jännitettä mitattiin myös samasta kohdasta kuin ensimmäisessä mitaustavassa. Eli siis jännitteitä ja virtoja mitattiin samoin kuin kuvassa 23 esitettiin, mutta mittalaitteeksi vaihdettiin oskilloskooppi.



Kuva 24. Mittaustapahtuma käyttäen Keysight DSO1004 A -oskilloskooppia

Oskilloskooppi aseteltiin mittaukseen siten, että 1-kanavaan laitettiin akkuvaunun jännitemittaus, 2-kanavaan laitettiin akkuvaunun virtamittaus, 3-kanavaan laitettiin tasajännitevälipiirin jännitteenmittaus ja 4-kanavaan laitettiin tasajännitevälipiirin virtamittaus.

Tarkoituksena oli tallentaa oskilloskoopin näytöllä näkyvät aaltomuodot .csv-muodossa usb-tikulle, ja sen jälkeen voitaisiin laskea Excel-taulukkolaskentaohjelmalla virran ja jännitteen hetkellisarvoista hetkellisteho. Lasketuista keskimääräisistä tehoista voisi sitten laskea hyötysuhteet.

5.2.2 Mittaustulokset

Koska ES2-konvertteri on DC-DC-konvertteri, pitäisi sähkösuureiden periaatteessa olla tasasähköä. Hyvin pian kuitenkin huomattiin, että akkuvaunun puolella eli kanavassa 2 oli nähtävissä selkeä 150 Hz virran muoto, jonka ympärillä oli paljon korkeampitaajuisia aaltoja. Näin ollen päädyttiin asettamaan oskilloskooppi siten, että sen näytöllä näkyisi kolme jaksonaikaa, jolloin olisi helppo laskea hetkellisteho kolmen jakson yli. Mittausajaksi olisi voitu valita myös esimerkiksi vain yksi jaksonaika, mutta päätettiin valita kolme jaksonaikaa, jolloin nähdään selkeästi, että aallonmuoto on varmasti vakiintunutta. Tässä vaiheessa laskettiin jaksonaika, jolla varmistettiin, että päästiin nopeammin oikeaan oskilloskoopin asetteluun,

Jaksonaika voidaan laskea kaavalla

$$T = \frac{1}{f}, \quad (7)$$

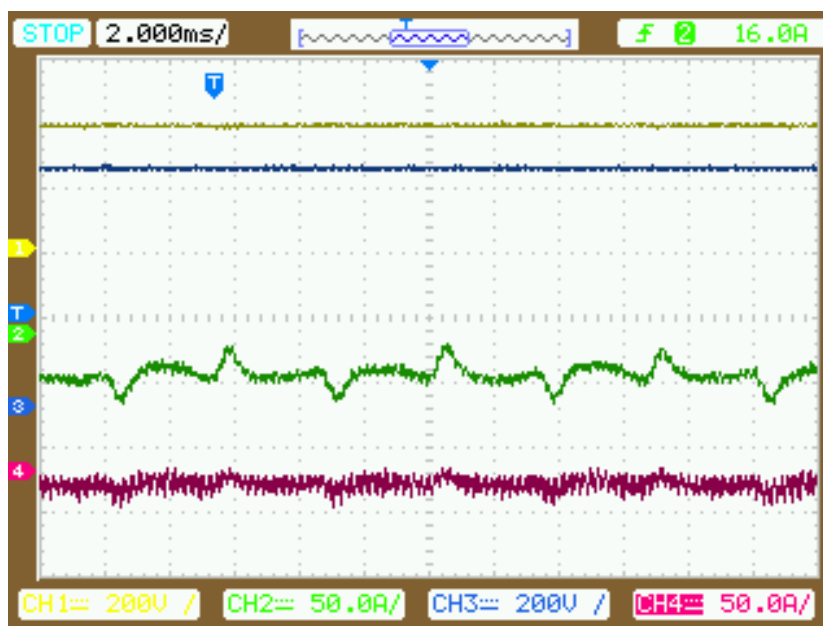
jossa T on jaksonaika ja f on taajuus.

Jaksonajaksi siten tälle 150 Hz taajuiselle virralle saadaan kaavalla (7)

$$T = \frac{1}{150 \text{ Hz}} = 0,00666 \text{ s} \approx 7 \text{ ms}.$$

Näin ollen oskilloskooppiin asetettiin ruudunleveydeksi 2 ms, jolloin siis ruudulle saatiin näkymään kolme jaksonaikaa. Kuvassa 25 on nähtävissä oskilloskoopin näyttökuvaa, kun akkuvaunua ladataan 16 kilowatin teholla. Tässä kuvassa keltainen käyrä kuvaa akkuvaunun jännitteenmittausta ja vihreä käyrä puolestaan ak-

kuvaunun virtamittausta. Tasajännitevälipiirin jännitteenmittaus on piirretty sinisellä ja virranmittaus puolestaan punaisella. Koska tehonlaskentaa varten tehtiin paljon laskentaa Excelillä, otetaan tarkempaan tarkasteluun vain tämä yksi laustilanne. Sama prosessi tehtiin kuitenkin jokaisella eri mittausteholla.



Kuva 25. Näyttökuva Keysight DSO1004 A -oskilloskoopista. Keltainen käyrä kuvaa akkuvaunun jännitteenmittausta ja vihreä käyrä puolestaan akkuvaunun virtamittausta. Tasajännitevälipiirin jännitteenmittaus on piirretty sinisellä ja virranmittaus puolestaan punaisella.

Kun tällä kyseisellä oskilloskoopilla tallennetaan näytöllä näkyvät aaltomuodot .csv-muodossa, saadaan Exceliin jokaisen neljän kanavan hetkellisarvot mitta-pisteinä. Näitä mittapisteitä oli 602 riviä per kanava. Koska tarkoitus oli tarkastella akkuvaunun virran muotoa, valittiin kanavan 2 mittauspisteistä ajanhetket, jolloin virran aaltomuodot ovat minimissään siten, että väliin mahtui kolme jaksonaikaa.

Näin ollen tehonlaskentaan valikoitui 504 mittauspistettä, joista nähtiin hetkellis-arvot jokaiselle kanavalle. Tästä oli helppo laskea esimerkiksi akkuvaunuun menevä teho siten, että jokaisella ajanhetkellä kerrottiin akkuvaunuun menevä jännite ja virta keskenään. Näin saatiin jokaisella 504 eri ajanhetkellä senhetkinen hetkellisteho. Näistä kaikista hetkellistehoista otettiin keskiarvo, jolloin saatiin hyvällä tarkkuudella kyseisen mittauksen keskimääräinen teho laskettua.

Tämä sama mittaustulosten käsittely tehtiin muillekin eri lataus- ja purkutilanteille. Taulukkoon 2 on kerätty akkuvaunun purkutilanteen lasketut tehot sekä hyötysuhde. Käsittelyyn valikoitui maksimi- sekä noin puoliteholla suoritettu akunpurkutilanne.

Taulukko 2. Akkuvaunun purkutilanne

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
22,84	17,85	78
12,74	10,55	83

Taulukkoon 3 on kerätty vastaavat laskentatulokset akkuvaunun lataustilanteesta. Kuten edelläkin käsittelyyn valikoitui maksimi- sekä puoliteholla suoritettut mittaukset.

Taulukko 3. Akkuvaunun lataustilanne

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
-21,07	-14,55	145
-11,87	-7,42	160

Lataustilanteen mittaustulosten perusteella saaduista laskentatuloksista nähtiin taas vastaava tilanne kuin ensimmäisellä mittausten menetelmällä saaduista tuloksista. Eli vaikka käytössä oli eri mittalaitteet, niin silti akkuvaunun lataustilanteessa ES2-konvertterin hyötysuhteeksi saatiin yli 100 %. Mittaukset suoritettiin satunnaisesti myös muilla lataus- sekä purkutehoilla, mutta kaikissa tapauksissa hyötysuhteet olivat samankaltaisia, kuin edellä lasketut.

Päätettiin toistaa tämän saman mittausten menetelmän mittaukset siten, että vaihdettiin Fluken virtapihtien tilalle Chauvin Arnoux -virtapihdit. Kuitenkin jo muutamalla mittauksella huomattiin, että tällä ei ollut vaikutusta mittaustuloksiin.

Tähän mennessä tehdyt mittaukset suoritettiin siis siten, että virtamittaus otettiin plusjohtimista. Nyt kuitenkin päätettiin kokeilla, onko sillä vaikutusta mittaustuloksiin, jos virtamittaus otettaisiin miinusjohtimista.

Seuraavaksi suoritettiin mittauksia siis vastaavalla mittausmenetelmällä kuin edellä, mutta siten, että virtaa mitattiinkin miinusjohtimista. Eli mittapääät aseteltiin muutoin samoin kuin kuvassa 23, mutta tummanharmaalla piirretyt virtajohtimet siirrettiin plusjohtimista miinusjohtimiin. Koska ei huomattu eroa, mitataanko Flukken vai Chauvin Arnouxin -virtapihdeillä, niin päätettiin jatkaa mittauksia Chauvin Arnouxin -virtapihdeillä.

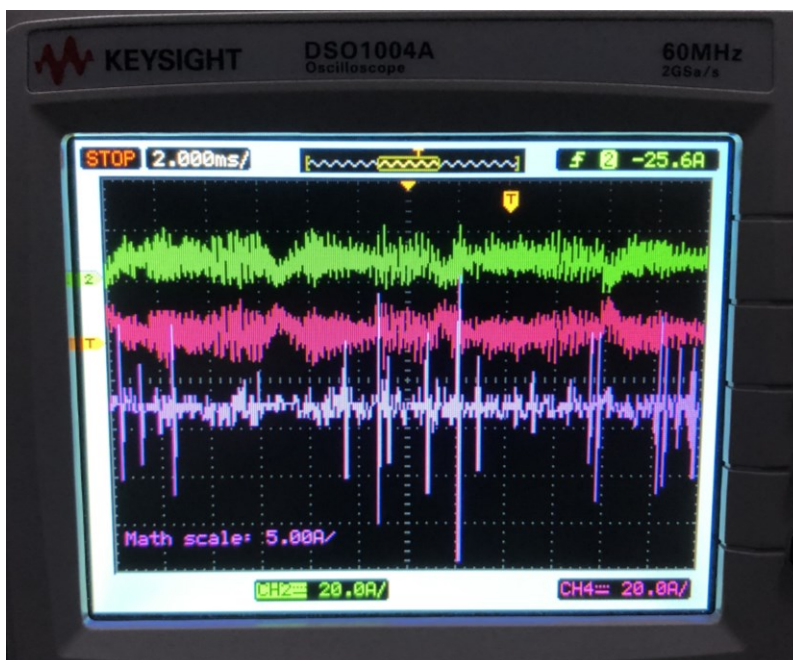
Aikaisemmin oli ollut siis siten, että aina latausvaiheessa hyötysuhteeksi saatiin yli 100 %. Nyt kuitenkin huomattiin hyvin pian, että kun mitattiin virtaa miinusjohtimista, niin hyötysuhteet kääntyivät niin sanotusti toisin päin. Eli latausvaiheessa hyötysuhteet olivat alle 100 %, mutta purkutilanteessa hyötysuhteet olivat epäloogisia ja huomattavasti yli 100 %:n.

Tässä vaiheessa pääteltiin, josko mittaustulosten epäloogisuus johtuisi jotenkin virranmittauksesta. Alettiin tutkia järjestelmää hieman tarkemmin, ja suorittamaan satunnaisia yksittäisiä mittauksia hieman kokeilumielessä. Merkittävin mittaus oli, kun vertailtiin ES2-konvertterin plus- ja miinusjohtimen virtaa (kuva 26). Virtamittaus asetettiin siis kuvan 23 periaatekuvassa siten, että DC01-kytkentäkotelolta ES2-konvertterille lähteviin plus- ja miinusjohtimiin asetettiin virtapihdit kiinni.



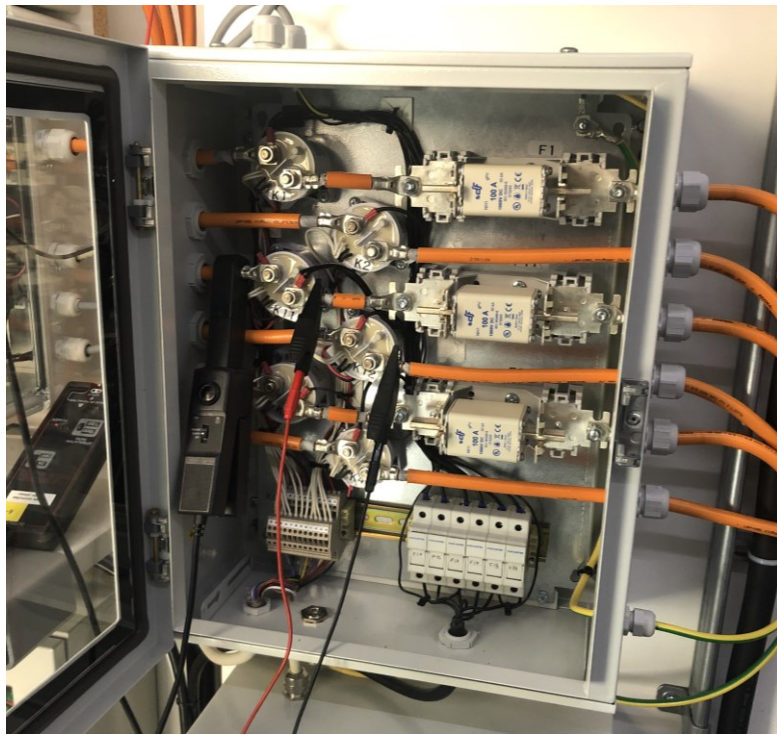
Kuva 26. Virranmittaus plus- ja miinusjohtimesta

Plus- ja miinusjohtimen virta-arvoja vertailtiin Keysight DSO1004 A -oskilloskoopilla. Kuvassa 27 näkyvä alimmainen aaltomuoto on oskilloskoopin math-toiminnolla suoritettu plus- ja miinusjohtimen mittaustulosten yhteenlaskutoiminnolla laskettu yhteisvirta. Tämän siis pitäisi olla nolla, mutta kuten kuvastakin nähdään, niin näin ei ole.



Kuva 27. Virranmittaus plus- ja miinusjohtimesta. Oskilloskooppikuva. Vihreä käyrä kuvaa plusjohtimen virtaa ja punaisella piirretty käyrä kuvaa miinusjohtimen virtaa. Oskilloskoopin math-toiminnolla suoritettu näiden virtojen yhteenlaskettu virta on piirretty violetilla.

Tämän jälkeen päätettiin suorittaa samankaltainen plus- ja miinusjohtimien virtojen vertailu siten, että virtapihdit asennettiin kuvan 28 mukaisella tavalla. Nyt siis virtaa mitattiinkin kaapelin kuoritusta osasta, eikä suoraan kaapelin päältä, kuten aikaisemmin oli tehty. Kuvassa 28 näkyy virranmittaus vain plusjohtimesta, mutta todellisuudessa virtaa mitattiin siis myös saman virtapiirin miinusjohtimesta, ja näitä kahta virta-arvoa vertailtiin.



Kuva 28. Virranmittaus kaapelin kuoritusta osasta

Virranmittauksessa huomattiin, että nyt virtojen arvot todellakin näyttävät samankaltaisilta. Kun vielä tarkistettiin asia oskilloskoopin math-toiminnolla, niin todellakin, nyt virtojen summa oli nolla. Näin ollen tällä mittauksella päästiin sellaiseen lopputulemaan, että tämänkaltaisessa laitteistossa virtaa pitäisi mitata kaapelin kuoritusta osasta.

Kun tämä asia huomattiin, pääteltiin, että tästä tulee paljon vääristymää kaikkiin edellisiin mittauksiin, eikä niiden todenmukaisuuteen voi luottaa. Näin ollen päätettiin suorittaa uudestaan mittaukset tällä samalla mittausmenetelmällä. Eli käytettiin vieläkin Keysight DSO1004 A -oskilloskooppia, mutta siten, että virtojen mittaukset otettiin aivan liittimien juuresta, kaapelin kuoritusta osasta, kuvan 28 mukaisesti. Virtaa mitattiin taas alkuperäisen mukaisesti, eli plusjohtimista.

Vaikkakin virtamittaus oli tällä kertaa todenmukaisempi, niin tälläkään ei ollut vaikutusta hyötysuhteen mittaustuloksiin. Mittauksia suoritettiin usealla eri teholla sekä lataus- että purkutilanteessa. Esimerkkinä voidaan ottaa lataustilanne, jossa akkuvaunua ladattiin melkein täydellä teholla. Tällöin mittausten perusteella keskimääräinen teho, joka siirtyi ES2-konverterin läpi, oli noin 19 kilowattia. Kuitenkin tasajännitevälipiirin puolelta mitattaessa tehoa siirtyi vain 13,6 kilowattia. Näin

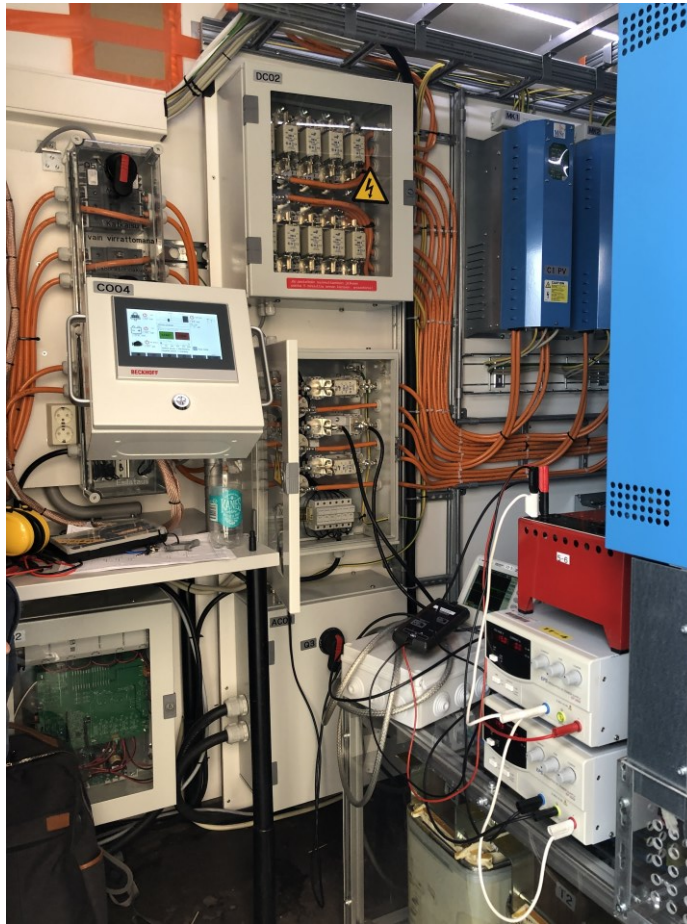
ollen hyötysuhteeksi saatiin noin 140 %. Eli vaikka virtaa mitattiin tällä kertaa luotettavammasta paikasta, niin silti akkuvaunun lataustilanteessa ES2-konvertterin hyötysuhteeksi saatiin yli 100 %. Tämän mukaan siis tehoa tuli taas enemmän ulos ES2-konvertterista, kuin sinne sisään ajettiin. Akkuvaunun purkutilanteessa tilanne oli myös sama kuin aikaisemmissa mittauksissa, eli senkin suhteen virtapihtien uudella sijoittamisella ei ollutkaan merkittävää vaikutusta mittaustuloksiin.

5.3 Kolmas mittausmenetelmä

Tässä vaiheessa pääteltiin, että epäloogiset ja mahdottoman tuntuiset mittaustulokset voisivat sittenkin johtua mittauksissa käytetyistä virtapihdeistä. Näin ollen päätettiin kokeilla, josko virran mittaus onnistuisi käyttäen ABB ES500-9661 -virtasensoria. Aluksi testattiin, antaako kyseinen virtasensori saman virta-arvon kuin aikaisemmin käytössä olleet virtapihdit eli Chauvin Arnouxin valmistamat virtapihdit.

5.3.1 Mittausasetelma

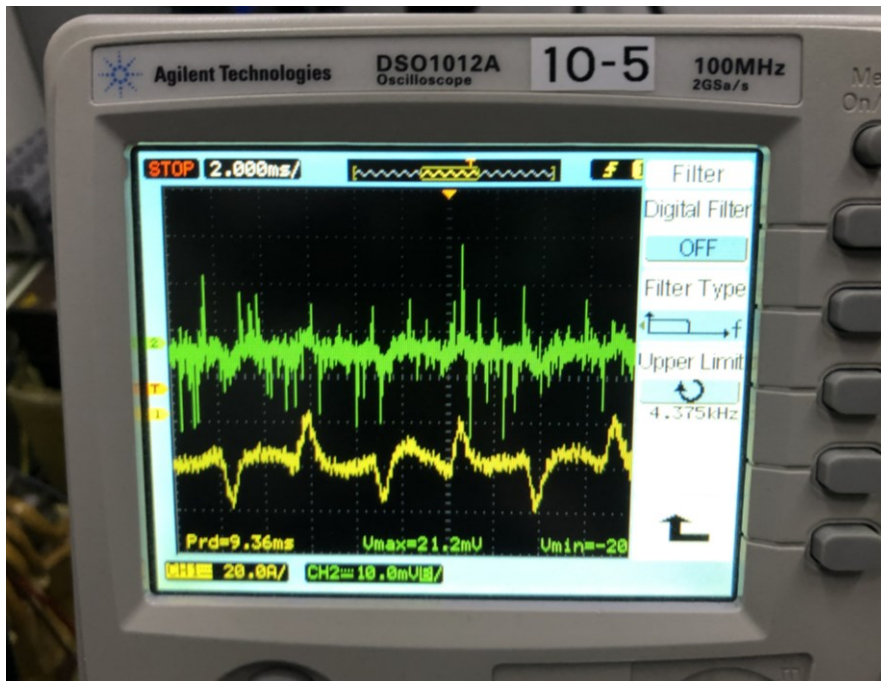
Kuvassa 29 nähdään mittausasetelma, jossa käytössä oli kaksi EPS EP-3502 -tasajännitelähdettä, sekä ABB ES500-9661 -virtasensori. Virtaa mitattiin samoista kohdista kuin edellisessä mittausmenetelmässä eli DC01-kytkentäkotelon sisältä. ABB:n virtasensori tarvitsee toimiakseen ± 15 V tasajännitettä, ja tätä varten käytössä oli myös tasajännitelähteet. Tässä mittausasetelmassa vertailtiin siis Agilent Technologies DSO1012 A -oskilloskoopilla mitattua virtaa sekä ABB:n virtasensorilla mitattua virtaa. ABB:n virtasensorilla mitattu virta vietiin kuvassa 29 näkyvän punaisen vastuksen läpi, ja sen yli mitattiin jännitettä, joka vietiin mitatapään läpi oskilloskoopille.



Kuva 29. Mittaustapahtuma käyttäen ABB ES500-9661 -virtasensoria

5.3.2 Mittaustulokset

Testimittauksia suoritettiin useilla eri tehoilla sekä lataus- että purkutilanteissa. Kuvassa 30 on nähtävissä virtojen muodot eräästä mittauksesta. Vihreällä piirretty virran aaltomuoto on ABB:n virtasensorilla mitattua virtaa ja sen alapuolella näkyvä keltaisella piirretty virran aaltomuoto on Chauvin Arnouxin -virtapihdillä mitattua virtaa.



Kuva 30. Virtamittaus ABB ES500-9661 -virtasensorilla ja Chauvin Arnoux -virtapihdillä. Vihreällä piirrettynä ABB:n virtasensorilla mitattua virtaa ja keltaisella Chauvin Arnouxin -virtapihdillä mitattua virtaa.

Kuvasta 30 huomattiin selkeästi, että virtojen aaltomuodot eivät ole lähellekään samanmuotoisia. Oletuksena pidettiin, että virran aaltomuodon pitäisi olla keltaisella piirretyn muotoista. Kuitenkin ABB:n virtapihdillä mitattu virran aaltomuoto ei millään tavoin mukaile oletettua virran aaltomuotoa.

Koska testimittauksessa saadut tulokset olivat edellä mainittuja, tultiin siihen päätökseen, että tällä ABB:n virtasensorilla ei ole järkevää yrittää jatkaa mittauksia. Joko virtasensori oli rikki, tai oli muuten soveltumaton kyseisen järjestelmän mittauksiin.

5.4 Neljäs mittausmenetelmä

Koska kaikkien edelliset mittausten tulokset olivat epäloogisia ja mahdottoman oloisia, yritettiin etsiä vielä yksi uusi mittausmenetelmä, jolla järjestelmän komponenttien hyötysuhteita päästäisiin todenmukaisesti mittaamaan. Päätettiin testausmielessä yrittää mittauksia vielä Rohde & Schwarz RTB2004 -oskilloskoopilla. Tämä on edellisissä mittauksissa käytettyjä oskilloskooppeja huomattavasti

uudempi ja edistyksellisempi mittalaite. Ajateltiin vielä yrittää, josko tällä voisi saada oikeanmukaisempi mittaustuloksia. Tässäkin mittauksessa käytössä olivat Chauvin Arnouxin -virtapihdit.

5.4.1 Mittausasetelma

Mittausasetelma oli kuvan 31 mukainen. Tässäkin mittausmenetelmässä mittapäät asetettiin samoin kuin kuvassa 23 esitettiin, mutta mittalaitteena oli Rohde & Schwarz RTB2004 -oskilloskooppi. Erona siis luvun 5.2 mittausmenetelmään oli vain, että käytettiin erilaista oskilloskooppia mittalaitteena. Kyseinen oskilloskooppi on 4-kanavainen, joten mittaukset voitiin suorittaa siten, että saadaan näytölle heti näkymään sekä ES2-konvertertiin menevä, että sieltä ulos tuleva teho. Oskilloskooppi asetettiin mittaukseen siten, että 1-kanavaan laitettiin tasajännitevälipiirin virtamittaus, 2-kanavaan tasajännitevälipiirin jännitemittaus, 3-kanavaan akkuvaunun virtamittaus ja 4-kanavaan laitettiin akkuvaunun jännitemittaus.



Kuva 31. Mittaustapahtuma käyttäen Rohde & Schwarz RTB2004 -oskilloskooppia

Tarkoituksena oli suorittaa sekä purku- että lataustilanteesta maksimi- sekä keskihalla mittaukset, ja tarkastella saatuja tuloksia. Tämän jälkeen vielä suoritettiin muutamia mittauksia erilaisilla alipäästösuodatuksilla.

Mittaukset alkoivat sillä, että aseteltiin oskilloskooppiin matemaattisia funktioita (kuva 32).



Kuva 32. Rohde & Schwarz -oskilloskoopin matemaattisten funktioiden asettelu. 1- ja 3-kanavaan asetettiin 5 kHz alipäästösuodatus virtamittauksiin. M3- ja M4-funktioilla asetettiin alipäästösuodatetun virran ja jännitteen tulo.

Näitä olivat alipäästösuodatuksen asettaminen 1- ja 3-kanavaan, jotka olivat siis sekä tasajännitevälipiirin, että akkuvaunun virtamittaukset. Näin ollen oskilloskooppi suodattaisi pois kaikki yli 5 kHz taajuiset virrat. Tämän ajateltiin vaikuttavan virtamittaukseen siten, että tulokset voisivat olla oikeanmukaisempia.

Samalla aseteltiin myös matemaattiset funktiot M3 ja M4. Nämä olivat siis tehonlaskuun tarvittavat funktiot. Esimerkiksi M3-funktioon asetettiin, että kerrotaan alipäästösuodatettu tasajännitevälipiirin virtamittaus tasajännitevälipiirin jännitteellä, jotta saataisiin tasajännitevälipiirin teho. M4-funktio oli sama asia, mutta akkuvaunun mittauksille.

Tämän jälkeen käytettiin vielä keskiarvofunktiota, joka näkyy kuvan 33 vasemmassa alareunassa.



Kuva 33. Rohde & Schwarz -oskilloskoopin keskiarvofunktion asettelu. Tästä valittiin Mean Value -niminen funktio kuvan vasemmasta alareunasta.

Tällä funktiolla oskilloskooppi laski esimerkiksi M3-kertolaskufunktion keskiarvon, ja antoi sen hetkellisarvona suoraan näytölle. Näin ollen näillä asetteluilla aikaansaatiin se, että kun suoritettiin mittauksia, saatiin joka hetki ES2-konvertteriin sisään menevän ja sieltä ulos tulevan tehon hetkellisarvot suoraan näkyviin näytölle, eikä mittaustuloksia tarvinnut käsitellä esimerkiksi Excelissä.

Mittaukset aloitettiin akkuvaunun purkutilanteella ja akkuvaunua purettiin sekä noin keskiteholla, että maksimiteholla. Tämän jälkeen akkuvaunua ladattiin ensin keskiteholla ja tämän jälkeen maksimiteholla. Näiden jälkeen otettiin vielä vertailumittaus, jossa akkuvaunua ladattiin täydellä teholla, mutta ilman alipäästösuodatusta. Alipäästösuodatus asetettiin tässä mittauksessa arvoon 70 MHz, joka tarkoittaa tässä mittauksessa samaa, kuin sitä ei olisi ollenkaan. Viimeiseksi vielä vertailtiin lataustilanteen tehoja erilaisilla alipäästösuodatuksilla.

5.4.2 Mittaustulokset

Kuva 34 havainnollistaa, miten mittaustulokset saatiin luettua oskilloskoopin näytöltä. Tämä mittaus on akkuvaunun purkutilanteesta noin keskiteholla.



Kuva 34. Akkuvaunun purkutilanne keskiteholla. Oskilloskooppikuva. C1 on tasajännitevälipiirin virtamittaus, C2 on tasajännitevälipiirin jännitemittaus, C3 on akkuvaunun virtamittaus, C4 on akkuvaunun jännitemittaus, M1 on alipäästösuodatettu tasajännitevälipiirin virta, M2 on alipäästösuodatettu akkuvaunun virta, M3 on tasajännitevälipiirin teho ja M4 on akkuvaunun teho.

Taulukkoon 4 on kerätty akkuvaunun purkutilanteen tehot, sekä niistä laskettu hyötysuhde.

Taulukko 4. Akkuvaunun purkutilanne, 5 kHz alipäästöillä

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
21,94	17,99	82
10,43	8,73	84

Taulukkoon 5 on kerätty vastaavat laskentatulokset akkuvaunun lataustilanteesta. Kuten edelläkin käsittelyyn valikoitui maksimi- sekä noin puoliteholla suoritettut mittaukset.

Taulukko 5. Akkuvaunun lataustilanne, 5 kHz alipäästöllä

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
-14,25	-11,80	121

Huomataan, että vaikka käytössä oli huomattavasti modernimpi oskilloskooppi, ja käytettiin myös alipäästösuodatusta, niin siltikin ES2-konvertterin hyötysuhteeksi akkuvaunun lataustilanteessa saatiin yli 100 %.

Tämän jälkeen päätettiin ottaa yksi vertailumittaus akkuvaunun lataustilanteesta, mutta ilman alipäästösuodatusta. Kyseisen mittauksen tulos näkyy taulukossa 6.

Taulukko 6. Akkuvaunun lataustilanne, ei alipäästöä

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
-11,25	-9,18	123

Taulukossa 6 näkyvästä mittaustuloksesta voidaan päätellä, ettei alipäästösuodatuksella ei ollut suurtakaan vaikutusta hyötysuhteen laskentaan.

Tässä vaiheessa mittauksia päätettiin vielä jatkaa alipäästösuodatuksen vaikutuksen tutkimista suorittamalla muutamia lisämittauksia. Taulukkoon 7 kerättiin mittaustulos, kun alipäästösuodatuksiksi asetettiin 15 kHz.

Taulukko 7. Akkuvaunun lataustilanne, 15 kHz alipäästöllä

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
-11,1	-9,52	117

Tämän jälkeen alipäästösuodatuksiksi asetettiin 2 kHz ja tämän mittauksen tulos näkyy taulukossa 8.

Taulukko 8. Akkuvaunun lataustilanne, 2 kHz alipäästöllä

$P_{\text{akkuvaunu}}$ (kW)	P_{dckisko} (kW)	Hyötysuhde (%)
-14,06	-11,72	120
-7,55	-6,43	117

Kuvasta 35 nähdään vielä alipäästösuodatuksen vaikutus virran aaltomuotoon. Tässä alipäästösuodatuksen taajuudeksi valittiin 15 kHz, koska tällöin nähtiin selvästi, miten virran muoto tasoittui, mutta silti vielä selvästi mukailee alkuperäistä virran muotoa. Kuvassa nähtävä M1 on siis tasajännitevälipiirin virta ja M2 on akkuvaunun virta. Molemmissa aaltomuodoissa alipäästösuodatettu virta on siis alkuperäisen virran päälle piirrettynä syaanin värisellä aallolla.



Kuva 35. 15 kHz taajuisen alipäästösuodatuksen vaikutus virran aaltomuotoon. Oskilloskooppikuva. M1 on tasajännitevälipiirin virta ja M2 on akkuvaunun virta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Mittaukset aloitettiin käyttäen Fluke 43B -sähkönlaatuanalysointilaitteita. Mittauksissa hyötysuhteeksi saatiin yli 100 %, joten päätettiin siirtyä suorittamaan mittauksia Keysight DSO1004 A -oskilloskooppia käyttäen. Hyötysuhteet olivat kuitenkin samankaltaisia myös tälläkin mittaustulosten epäloogisuutta johtavista virtapihdeistä. Näin ollen suoritettiin mittauksia käyttäen ABB:n virtasensoria. Nopeasti huomattiin kuitenkin, että joko virtasensori oli rikki tai muuten soveltumaton kyseisen järjestelmän mittauksiin. Lopuksi päätettiin vielä yrittää mittauksia käyttäen Rohde & Schwarzin RTB2004 -oskilloskooppia. Kuitenkin tälläkin mittalaitteella saatiin epäloogisia mittaustuloksia, sillä hyötysuhteet olivat yli 100 %.

Opinnäytetyön mittausten perusteella päädyttiin tuloksiin, joiden mukaan hyötysuhde oli aina yli yhden jompaankumpaan suuntaan tehoa siirrettäessä, riippuen virtamittauksen sijainnista plus- tai miinusjohtimessa. Tämähän on epälooginen ja epärealistinen lopputulos, sillä minkään laitteen hyötysuhde ei voi olla yhtä suuri tai suurempi kuin 100 %. Saadut mittaustulokset herättävät kysymyksen, että voiko kyseiselle järjestelmälle aikaisempiin tehtyihin mittaustuloksiinkaan luottaa, koska niitäkin on suoritettu vastaavilla mittalaitteilla.

Johtuen virtamittauksen asettelun vaikutuksesta hyötysuhteeseen, tultiin siihen johtopäätökseen, että mahdollisesti käytössä olleet virtapihdit olivatkin epäsouvia kyseisen järjestelmän mittauksiin. Mahdollinen syy virtapihtien epäsoivuudelle voisi olla, että näillä virtapihdeillä ei sittenkään voisi mitata näin korkeataajuuksisia virtoja, joita DC-DC-konverttereissa esiintyy. Toinen mahdollinen ja todennäköisempi syy mittausten epäloogisuudelle voisi olla se, että virtapihdit eivät olisikaan olleet tarpeeksi hyvin suojattuja sähkömagneettiselta säteilyltä, joita tällainen järjestelmä mahdollisesti ympäristöönsä lähettää.

Kehitysehdotuksena seuraaviin mittauksiin, tai vastaavan järjestelmän parissa työskentelevällä voisi olla vielä tarkemman huomion kiinnittäminen mittalaitteiden

ja erityisesti virtapihtien valintaan. Ensimmäisenä toimenpiteenä ehdottaisin selvitystyötä virtapihdeistä, joissa on erityisesti panostettu taustasäteilyltä suojautumiseen sekä korkeataajuisten virtojen mittaamiseen.

Vaikkakaan hyötysuhdemittaukset eivät onnistuneet suunnitellulla tavalla, mittaukset kuitenkin etenivät jouhevasti ja saimme selville mielenkiintoisia ja mahdollisesti hyödyllisiä tuloksia. Opinnäytetyön tekeminen oli todella opettavaista, ja ehkä suurimpana opetuksena itselleni oli se, että aina kaikki ei toimi tai suju niin kuin teoriassa. Käytännössä kun tehdään mittauksia näinkin teknisesti vaativalle järjestelmälle, aina tulee joitain muutoksia tai tuloksia, joiden perusteella joudutaan hieman muuttamaan alkuperäistä mittaussuunnitelmaa.

LÄHTEET

Aura, L., Tonteri, A. 1994. (tai 2005) Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.–5. painos. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Agilent Technologies. 2009. Agilent 1000 Series Oscilloscopes. User's Guide.

Chauvin Arnoux. 2016. E3N AC/DC current clamp. User's manual.

EPS Stromversorgung GmbH. EP-Series Single Output Power Supply. Operating manual.

Fluke Corporation. 2008. Fluke 43b -tehoanalysaattori. Käyttöohje.

Fluke Corporation. 2017. Fluke 80i-110s AC/DC Current Probe: Instructions.

Gould Instrument Systems. n.d. Gould PB59/60 Differential Probes. Data Sheet.

Keysight Technologies. 2017. Keysight 1000A Series Oscilloscopes. User's Guide.

Keysight Technologies. 2018. Keysight DSO1000 A/B Series Portable Oscilloscopes. Data Sheet.

Mohan, N., Undeland, T. & Robbins, W. 2003. Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd edition. Hoboken (N.J): Wiley.

Rashid, M. 2011. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. 3rd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Rohde & Schwarz. 2021. R&S RTB2000 Oscilloscope. Specifications. Data Sheet.

University of Surrey. Department of Electrical and Electronic Engineering. 2008. Power losses in wound components. Luettu 31.3.2021.

http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/power_loss.html