

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

HENRI KARIMÄKI
AJONEUVOKÄYTÖN POLTTOKENNOTEHOLÄHTEEN
HYBRIDISOINTI – TEOREETTINEN JA KOKEELLINEN
TARKASTELU

Diplomityö

Tarkastaja: lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 3. kesäkuuta 2009

Tiivistelmä

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KARIMÄKI, HENRI: Ajoneuvokäytön polttokennoteholähteen hybridisointi –
teoreettinen ja kokeellinen tarkastelu

Diplomityö, 118 sivua

Joulukuu 2009

Pääaine: Moderni sähköenergiatekniikka

Tarkastaja: lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Polttokennot, PEMFC, Hybridisointi, Superkondensaattori,
Lyijyakku, Mallinnus ja simulointi, Regeneratiivinen jarrutus

Tässä diplomityössä on tutkittu polymeeripolttokennojärjestelmän (PEMFC-järjestelmä) hybridisointia lyijyakuilla ja superkondensaattoreilla. Polttokennoteholähteen hybridisointi parantaa merkittävästi mahdollisuuksia polttokennon hyvien puolien hyödyntämiseksi. Hybridisointi voidaan toteuttaa monella erilaisella tavalla, ja hybridijärjestelmä pitääkin suunnitella rakenteeltaan ja mitoitukseltaan optimaaliseksi kutakin ajoneuvosovellusta varten.

Työn tavoitteena oli tutkia polttokennoteholähteen ja erilaisten hybridijärjestelmien ominaisuuksia sekä simulointimallien että kokeellisten mittausten avulla. Aiheeseen liittyen tehtiin myös kattava kirjallisuusselvitys. Simulointimallit luotiin lyijyakun ja superkondensaattorin kaksoishybridille sekä PEMFC-järjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin kolmoishybridille. Näillä malleilla simuloitiin hybridijärjestelmien toimintaa, sekä regeneratiivisen jarrutustehon talteenottoa. Kokeellisissa mittauksissa tutkittiin kaksois- ja kolmoishybridien, lyijyakun sekä polttokennoteholähteen ominaisuuksia ja suorituskykyä. Kokeellista dataa käytettiin simulointimallien paranteluun ja validointiin.

Saatujen tulosten perusteella polttokennoteholähteen hybridisoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä polttokennon eliniän ja järjestelmän hyötysuhteen kannalta. Hybridisoimalla lyijyakku superkondensaattorilla voidaan vastaavasti parantaa akun elinikää ja hyötysuhdetta. Simulointimalleista ja -työkaluista voidaan saada suurta apua hybridijärjestelmän topologian valintaan ja komponenttien mitoituksen suunnitteluun. Myös hybridijärjestelmien toiminnasta regeneratiivisen jarrutustehon talteenoton aikana saatiin paljon tietoa simulointimallien avulla.

Abstract

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering Technology

KARIMÄKI, HENRI: Fuel Cell Hybridization for Vehicle Applications –

Theoretical and Experimental Analysis

Master of Science Thesis, 118 pages

December 2009

Major: Modern Electrical Energy Engineering

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Fuel cells, PEMFC, Hybridization, Supercapacitors, Lead-Acid Batteries, Modelling and Simulation, Regenerative braking

The thesis focuses on hybridization of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system with lead-acid batteries and supercapacitors. Advantages of fuel cell technology can be utilized more efficiently by fuel cell hybridization. There are many different hybrid powertrain topologies which can be used in vehicle applications. Hence, hybrid systems have to be designed individually for each application and drive cycle.

This thesis was performed to study PEMFC system and different hybrid powertrain topologies with simulation models and experimental tests. A comprehensive literature survey referring to the field of study was also carried out. Simulation models were developed for battery–supercapacitor double hybrid and PEMFC–battery–supercapacitor triple hybrid. These models were then used to simulate hybrid powertrain performance and regenerative braking. Experimental tests were conducted to record double and triple hybrid, lead-acid battery and PEMFC system performance. Experimental data was then used to further develop and validate the simulation models.

The results highlight that significant advantages can be obtained by using PEMFC hybridization. This includes improving fuel cell lifetime and system efficiency. Accordingly, hybridization of lead-acid batteries with supercapacitors improves battery lifetime and system efficiency. Simulation models can be used to find optimal hybrid powertrain topologies and component sizing for different applications and drive cycles. Plenty of knowledge and information was also obtained from simulating regenerative energy in double and triple hybrids.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty VTT:n Polttokennotiimissä Espoossa osana WorkingPEM-projektia. Projektin tavoitteena on ollut soveltaa polttokennoteknologiaa teollisuuden työkoneisiin, ja sen painopisteenä ovat olleet järjestelmä- ja materiaalikehitys.

Työn ohjaajana VTT:ltä toimi Jari Ihonen, jota haluan kiittää ammattitaitoisesta ohjauksesta sekä perehdytyksestä polttokenno- ja hybriditekniikkaan. Työn tarkastajana toimi TTY:n Elektroniikan laitokselta Risto Mikkonen, jolle suuret kiitokset diplomityön sisällön kommentoinnista ja siihen liittyvistä neuvoista.

Haluan kiittää myös muita VTT:n Polttokennotiimin työntekijöitä ja WorkingPEM-projektissa mukana olleita henkilöitä, joilta olen saanut apua, kommentteja ja kehitysehdotuksia työhöni liittyen. Erityiset kiitokset menevät Timo Keräselle, joka oli suurena apuna useissa työn käytännön suorittamiseen liittyvissä asioissa.

Kiitokset myös avopuolisolleni, muille läheisilleni ja ystävilleni, jotka ovat tukeneet minua työn edetessä.

Espoossa, 12. marraskuuta 2009

Henri Karimäki

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
1.1. Tausta.....	1
1.2. Ongelma.....	2
1.3. Tavoite ja menetelmät	2
1.4. Diplomityön rakenne	3
2. Polttokennot	5
2.1. Polttokennojen yleinen teoria.....	5
2.1.1. Polttokennotyytit.....	6
2.1.2. Avoimen piirin jännite ja hyötysuhde.....	8
2.1.3. Jännitehäviöt ja polarisaatiokäyrä	11
2.1.4. Polttoainevaihtoehdot	15
2.2. Vetyä käyttävät polymeeripolttokennot.....	16
2.2.1. PEMFC:n toimintaperiaate.....	16
2.2.2. PEMFC:n rakenne ja materiaalit	17
2.2.3. Toimintaolosuhteiden vaikutus PEMFC:n suorituskykyyn	19
2.2.4. Toimintaolosuhteiden vaikutus PEMFC:n elinikään.....	20
2.2.5. Vedyn varastointi.....	21
2.2.6. Polttokennojärjestelmän oheislaitteet	23
3. Hybridisoidut ajoneuvokäytön polttokennoteholähteet	25
3.1. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden johdanto	25
3.1.1. Hybridijärjestelmän komponentit	25
3.1.2. Hybridijärjestelmän topologiat.....	27
3.2. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden mallinnus.....	30
3.2.1. Hybridijärjestelmämallit kirjallisuudessa	30
3.2.2. Hybridijärjestelmämallien yhteenveto	43
3.3. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden kokeellinen karakterisointi.....	45
3.3.1. Hybridijärjestelmien kokeellinen karakterisointi kirjallisuudessa	45
3.3.2. Kokeellisten karakterisointien yhteenveto	58
3.4. Hybridijärjestelmän komponenttien kaupallinen tarjonta	59
3.4.1. Polttokennoteholähteet.....	59
3.4.2. Akut	61
3.4.3. Superkondensaattorit	62
3.4.4. Tehoelektronikka	63
4. Hybridijärjestelmien mallintaminen Simulinkilla	65
4.1. Lyijyakun ja superkondensaattorin mallintaminen	65
4.1.1. Mallin komponentit ja toiminta	65
4.1.2. Mallin parametrit	68
4.2. Polttokennojärjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin mallintaminen .	70
4.2.1. Mallin komponentit ja toiminta	70
4.2.2. Mallin parametrit	71
4.3. Regeneratiivisen jarrutustehon mallintaminen.....	72

5. Hybridijärjestelmien kokeellinen tarkastelu.....	73
5.1. Lyijyakun ja superkondensaattorin kokeellinen tarkastelu	73
5.1.1. Mittausjärjestelyt	73
5.1.2. Mittausten suorittaminen.....	74
5.2. Polttokennojärjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin kokeellinen tarkastelu.....	75
5.2.1. Mittausjärjestelyt	75
5.2.2. Mittausten suorittaminen.....	78
6. Tulokset	79
6.1. Lyijyakku	79
6.2. Lyijyakku ja superkondensaattori.....	82
6.2.1. Simulointi	82
6.2.2. Kokeelliset tulokset.....	84
6.3. Polttokennojärjestelmä ja lyijyakku	90
6.4. Polttokennojärjestelmä, lyijyakku ja superkondensaattori	92
6.4.1. Simulointi	92
6.4.2. Kokeelliset tulokset.....	93
6.5. Polttokennojärjestelmän karakterisointi	99
6.6. Regeneratiivisen jarrutustehon simulointi	102
7. Pohdintaa tuloksista	107
7.1. Hybridijärjestelmän topologioiden vertailu	107
7.2. Simulointimallien validointi.....	108
7.3. Polttokennoteholähteen karakterisointi.....	110
7.4. Regeneratiivisen jarrutustehon talteenotto.....	111
8. Johtopäätökset ja suunnitelma jatkotyölle.....	113
8.1. Johtopäätökset	113
8.2. Suunnitelma jatkotyölle	113
Lähteet.....	115

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AFC	Alkalipolttokenno (englanniksi Alkaline Fuel Cell).
Aktiivinen pinta-ala	Membraanin sen osan pinta-ala, jolle pystytään toimittamaan reaktantteja, ja joka pystyy tuottamaan sähköä.
Aktivointienergia	Kemiallisen tai sähkökemiallisen reaktion käynnistymiseen tarvittava energia.
Alempi lämpöarvo	Tehollinen lämpöarvo (englanniksi lower heating value, LHV). Se lämpöenergian määrä joka vapautuu kun sekä polttoaineen vesi, että palamisessa muodostunut vesi ovat vesihöyryinä. Alempi lämpöarvo on veden höyrystymislämmön verran ylempää lämpöarvoa pienempi.
Anodi	Sähkökemiallisen parin se elektrodi, jolla hapettuminen tapahtuu.
Avoimen piirin jännite	Tyhjäkäyntijännite, eli jännite ilman kuormitusta.
BoP	Polttokennon oheisjärjestelmät, jotka mahdollistavat polttokennon toiminnan halutulla tavalla (englanniksi Balance of Plant).
Buck/Boost-muunnin	DC/DC-muunnin, joka pystyy tuottamaan ulostuloonsa joko sisäänmenoa korkeamman (Boost) tai alhaisemman (Buck) jännitteen.
Bulkkikonsentraatio	Reaktantin konsentraatio virtauskanavassa ennen kulkeutumista diffuusiokerrokselle.
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto. Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa sähkön sivutuotteena syntyvä lämpö käytetään hyväksi esimerkiksi kaukolämpönä tai prosessihöyryinä (englanniksi Combined Heat and Power production).
Diffundoituminen	Molekyylien kulkeutuminen korkeamman konsentraation seoksesta matalamman konsentraation suuntaan.
DMFC	Suorametanolipolttokenno (englanniksi Direct Methanol Fuel Cell).
Elektrodi	Sähköisen virtapiirin osa, jossa elektronit (sähkövirta) siirtyvät sähköpiiristä väliaineeseen, tai väliaineesta sähköpiiriin.

Elektrolyytti (polttokennossa)	Väliaine, joka päästää lävitseen positiiviset tai negatiiviset ionit (polttokennotyypistä riippuen) elektrodilta toiselle, mutta estää polttoainetta ja hapetinta sekoittumasta keskenään.
Gibbsin vapaa energia	Suurin mahdollinen mekaanisen työn määrä, jonka termodynaaminen prosessi voi tehdä vakio- lämpötilassa ja -paineessa.
Halidi	Halogeenin yhdiste, jossa halogeeni on elektronegatiivisempänä osapuolena.
Hapetin	Kemiallisessa reaktiossa pelkistyvä aine, joka ottaa vastaan elektroneja hapettuvalla aineella.
Hybridijärjestelmä	Teholähteen (esimerkiksi polttokenno) ja energiavaraston (esimerkiksi akku tai superkondensaattori) yhdistelmä.
Hybridisointiaste	Sähköisen energiavaraston (ESS) ja koko hybridijärjestelmän (ESS ja polttokenno) teho- tai energiasuhde.
Irreversiibeli prosessi	Palautumaton termodynaaminen prosessi.
Itseisvirrantiheys	Kineettinen suure, joka kuvaa elektronisiirtovaiheen nopeutta. Mitä suurempi on itseisvirrantiheyden arvo, sitä pienemmät ovat polttokennon aktivointihäviöt.
Kaasudiffuusiokerros	Polymeeripolttokennon komponentti, jonka läpi reaktantit diffundoituvat virtauskanavista tasaisesti elektrodeille.
Katalyytti	Aine joka nopeuttaa kemiallista tai sähkökemiallista reaktiota tietyssä lämpötilassa kuitenkin itse kulumatta reaktiossa. Katalyytti osallistuu reaktioon, mutta ei ole reaktion alku- tai lopputuote.
Katodi	Sähkökemiallisen parin se elektrodi, jolla pelkistyminen tapahtuu.
Kolmen faasin rajapinta	Polymeeripolttokennossa katalyytin, membraanin ja reaktanttikaasun muodostama rajapinta, jossa polttokennon reaktiot tarkkaan ottaen tapahtuvat. Ainoastaan tuolla rajapinnalla sekä reaktantti, elektronit että protonit ovat kaikki läsnä (englanniksi Three Phase Boundary).
Korkean lämpötilan polttokennot	Polttokennotyypit joiden operointilämpötila on yli 600 °C (kiinteäoksidi- ja sulakarbonaatti-polttokennot).
Kryogeeninen lämpötila	Alle -150 °C:n (123 K) lämpötila.

Lataus-purku-hyötysuhde	Sähköisestä energiavarastosta purettavan ja sinne ladatun energian suhde. Lataus-purku-hyötysuhde kertoo siis paljonko varastoidusta energiasta kuluu häviöihin.
Matalan lämpötilan polttokennot	Polttokennotyypit joiden operointilämpötila on alle 250 °C (alkali-, fosforihappo- ja polymeeri-polttokennot).
Matriisimateriaali	Komposiittimateriaaleissa matriisimateriaali toimii tukiaineena.
MCFC	Sulakarbonaattipolttokenno (englanniksi Molten Carbonate Fuel Cell).
MEA	Membranin ja elektrodien muodostama polymeeripolttokennon komponentti (englanniksi Membrane Electrode Assembly).
Membraani	Polymeerikennossa elektrolyytinä toimiva ohut polymeerikalvo.
PAFC	Fosforihappopolttokenno (englanniksi Phosphoric Acid Fuel Cell).
PEMFC	Polymeeripolttokenno (englanniksi Proton Exchange Membrane Fuel Cell tai Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell).
Polarisaatiokäyrä	Polttokennon todellinen jännite esitettynä virrantiheyden funktiona. Polarisaatiokäyrällä ilmaistaan polttokennon suorituskykyä.
Polttokennojärjestelmä	Polttokennostackin ja sen oheisjärjestelmien (BoP) muodostama kokonaisuus.
Polttokennoteholähde	Katso polttokennojärjestelmä.
Polttokennostack	Useita polttokennoja sarjaan kytkettynä. Polttokennostackissa voi olla satoja yksittäisiä polttokennoja.
Rajoittava virrantiheys	Virrantiheyden arvo, jolla polttokenno alkaa kuluttaa reaktanttia nopeammin kuin sitä pystytään syöttämään reaktioalueelle. Polttokenno ei pysty tuottamaan rajoittavaa virrantiheyttä korkeampia virrantiheyden arvoja.
Reaktantti	Kemiallisessa tai sähkökemiallisessa reaktiossa reagoiva lähtöaine.
Reaktiokinetiikka	Kemiallisen tai sähkökemiallisen reaktion nopeus.
Reformointi	Reformoinnilla vetypitoinen polttoaine muutetaan vedyksi tai vetypitoiseksi kaasuseokseksi, jota voidaan käyttää polttoaineena polttokennossa.

Regeneratiivinen jarrutusenergia	Ajoneuvoa jarrutettaessa talteen otettava kineettinen energia.
Reversiibeli prosessi	Palautuva termodynaaminen prosessi.
SOFC	Kiinteäoksidipolttokenno (englanniksi Solid Oxide Fuel Cell).
Standardiolosuhteet	Standardiolosuhteissa lämpötila on 25 °C (298,15 K) ja paine 101,325 kPa (1 atm). Myös muita standardiolosuhteita käytetään, jotka poikkeavat näistä arvoista.
Stoikiometria	Stoikiometria ilmaisee paljonko reaktantteja kuluu (ideaalisessa) reaktiossa. Polttokennon tapauksessa se on sisään syötetyn ja reaktiossa kuluvan polttoaineen tai hapen suhde.
Superkondensaattorimoduuli	Useista sarjaan ja rinnankytkettävistä yksittäisistä superkondensaattorikennoista koottava paketti.
Sähköinen energiavarasto (ESS)	Laite, johon voidaan varastoida sähköenergiaa (englanniksi energy storage system). Hybridiajoneuvojen tapauksessa käytetyimpiä ovat akut ja superkondensaattorit.
Topologia	Hybridijärjestelmän tapauksessa järjestelmän perusrakenne, eli tapa jolla järjestelmän komponentit on kytketty toisiinsa.
Virtauslevy (Bipolaarilevy)	Yksittäisen polymeeripolttokennon rakenteessa uloimpana oleva komponentti, jossa olevien virtauskanavien kautta reaktantit tuodaan kaasudiffuusiokerroksille, ja joiden kautta elektronit johdetaan ulkoisen piirin kautta anodilta katodille.
Ylempi lämpöarvo	Kalorimetrinen lämpöarvo (englanniksi higher heating value, HHV). Se lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun polttoaine palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:n lämpötilaan.

1. JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden rajallisuus ja ilmaston lämpeneminen ovat lisänneet painetta energiatehokkaampien ja vähäpäästöisempien ajoneuvojen tehollisuuden kehittämiseen. Sähköisten energiavarastojen avulla hybridisoidut polttokennoteholähteet ovat yksi varteenotettava vaihtoehto.

Polttokennoilla on potentiaalia saavuttaa monia etuja muihin ajoneuvojen tehollisuuksiin nähden. Polttokennoilla on hyvä hyötysuhde, ne ovat vähäpäästöisiä (vetykäytössä ainoat paikalliset päästöt ovat vesi ja lämpö) ja niissä voidaan käyttää monia erilaisia polttoaineita. Vaikka useimmat suuret ajoneuvovalmistajat panostavat polttokennoajoneuvojen tutkimukseen, on teknologian täysimittaisen kaupallistumisen tiellä kuitenkin useita haasteita. Polttokennojen hinta on saatava merkittävästi nykyistä alhaisemmaksi, ja elinikä on yhä parannettava. Myös vedyn jakelu ja varastointi ajoneuvoissa ovat asioita, jotka tulisi pystyä ratkaisemaan ennen kuin laaja kaupallistuminen on mahdollista.

Polttokennoteholähteen hybridisoinnilla tarkoitetaan sähköisen energiavaraston, kuten akku ja superkondensaattori, kytkemistä polttokennon rinnalle. Hybridisointi mahdollistaa kunkin hybridijärjestelmän komponentin parhaiden ominaisuuksien tehokkaamman hyödyntämisen. Polttokennoteholähteen osalta hybridisointi mahdollistaa eliniän ja hyötysuhteen parantamisen. Tarvittavan polttokennoteholähteen koko myös pienenee, mikä laskee koko järjestelmän kustannuksia.

1.1. Tausta

Tämä diplomityö on tehty osana vuosien 2007–2009 aikana käynnissä olevaa WorkingPEM-projektia. Projektin tavoitteena on ollut soveltaa polymeeripolttokennojen teknologiaa teollisuuden työkonsepteihin, ja sen painopisteenä ovat olleet lähinnä järjestelmä- ja materiaalikehitys. WorkingPEM on jatkoa vuonna 2006 päättyneelle PowerPEMFC-projektille.

Projektin rahoittajina ovat toimineet Tekes, VTT ja mukana olevat teollisuuskumppanit. Teollisuudesta mukana ovat olleet Cargotec Finland Oy, Konecranes Oyj, Sandvik Mining and Construction Oy, Patria Land & Armament Oy, Fitelnet Oy, PEM Energy Oy ja MSc electronics Oy. Cargotec Finland Oy on osa Cargotec-konsernia, ja sen tuotteita ovat erilaiset konttien ja raskaan lastin käsittelylaitteet satamiin, terminaaleihin ja teollisuuteen. Konecranes Oyj toimittaa erilaisia nostelaiteratkaisuja teollisuuteen ja satamille. Sandvik Mining and Construction Oy valmistaa työkoneita maanalaiseen kaivostoimintaan sekä maanpäälliseen maanrakennustoimintaan. Patria Land & Armament Oy on osa Patria-konsernia, ja sen

tuotteita ovat esimerkiksi panssaroidut ajoneuvot. Fitelnet Oy on tietoliikennetekniikkaan erikoistunut yhtiö, ja sen osaamisalueita ovat radio- ja televerkkojen suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja suojaus. MSc electronics Oy valmistaa tehoelektroniikkakomponentteja muun muassa hybridijärjestelmiin ja liikkuviin työkoneisiin.

WorkingPEM-projektin osana rakennetaan hybridisoitua polttokennoteholähdettä hyödyntävä trukki. Trukissa käytettävä hybridijärjestelmä koostuu polymeeripolttokennojärjestelmästä, lyijyakuista ja superkondensaattoreista. Tässä diplomityössä tutkittu kolmoishybridijärjestelmä on topologialtaan vastaava, mutta komponenttien mitoitukseltaan puolet tuosta järjestelmästä (165 F superkondensaattorilla).

1.2. Ongelma

Suurimpana esteenä polttokennojen laajemmalle kaupallistumiselle ajoneuvosovelluksissa on toistaiseksi ollut niiden korkea hinta ja puutteellinen kestävyys. Hybridisointi kuitenkin lisää polttokennojen kilpailukykyä huomattavasti.

Polttokennoteholähteen hybridisointi ja hybridijärjestelmien suunnittelu käytännön sovelluksiin tuo mukanaan haasteita. Uudet polttokennoja, akkuja ja superkondensaattoreita hyödyntävät ratkaisut pitää pystyä suunnittelemaan rakenteeltaan ja mitoitukseltaan optimaaliseksi kuhunkin käyttötarkoitukseen. Tämän takia olisi tärkeä selvittää minkälaisia etuja ja haittoja erilaisilla hybridisointitavoilla on. Samoin tulisi selvittää hybridisoinnin aiheuttamia kustannuksia ja säästöjä.

1.3. Tavoite ja menetelmät

Tässä työssä on tutkittu teoreettisesti ja kokeellisesti polttokennoteholähteen hybridisointia. Työn tavoitteena on ollut:

- mitata polttokennoteholähteen dataa ja saada tietoa sen toiminnasta,
- tutkia kokeellisesti erilaisia hybriditopologioita ja vertailla niitä toisiinsa,
- luoda simulointimalleja kaksois- ja kolmoishybrideille kirjallisuuden ja oman kokeellisen datan pohjalta, sekä
- tehdä kattava kirjallisuuskatsaus aiheesta tehtyyn teoreettiseen ja kokeelliseen tutkimustyöhön.

Kokeelliset mittaukset tehtiin laboratorio-olosuhteissa. Mittausten toteuttamisessa käytettiin sekä kaupallisia, että ei-kaupallisia komponentteja. Hybridijärjestelmien dynaamiset simulointimallit toteutettiin MATLAB/Simulinkin avulla.

1.4. Diplomityön rakenne

Tämän diplomityön pääpaino on ollut hybridisoitujen polttokennoteholähteiden tutkimisessa. Hybridijärjestelmille on luotu kirjallisuuden pohjalta simulointimalleja, joita on validoitu ja kehitetty edelleen kokeellisista mittauksista saadun datan pohjalta.

Kappaleessa 2 on esitelty sekä yleisesti polttokennojen teoriaa, että tässä työssä tarkemmin tarkastellun polymeeripolttokennon teoriaa. Kappaleessa 3 on aluksi käyty läpi polttokennojärjestelmän hybridisoinnin perusteita, ja erilaisia hybridisointitapoja. Tämän jälkeen on tehty kattava kirjallisuustutkimus hybridijärjestelmille ja niiden komponenteille jo tehdyistä simulointimalleista. Näitä malleja pyrittiin käyttämään apuna omia simulointimalleja luotaessa. Kirjallisuustutkimusta tehtiin myös polttokenno- ja hybridijärjestelmille tehdystä kokeellisesta tutkimuksesta.

Kappaleessa 4 on esitelty hybridijärjestelmille, sekä niiden komponenteille laaditut simulointimallit. Mallien rakenne, toiminta ja käytetyt parametrit on dokumentoitu. Kappaleessa 5 on raportoitu hybridijärjestelmille suoritettut kokeelliset mittaukset. Käytetyt mittausjärjestelyt, sekä koelaitteiston tiedot ja ominaisuudet on esitetty. Kappaleessa 6 on esitelty simulointien ja kokeellisten mittausten tuloksia. Saatuja tuloksia on analysoitu ja vertailtu kappaleessa 7. Kappaleessa 8 on esitetty tehdyt johtopäätökset ja laadittu suunnitelma tulevaisuuden jatkotyölle.

2. POLTTOKENNOT

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa polttoaineen kemiallista energiaa suoraan sähköenergiaksi ilman palamista. Polttokennolla voidaan näin ollen päästä korkeampiin hyötysuhteisiin kuin perinteisillä lämpövoimakoneilla. Esimerkiksi polttomoottorin tai höyryturbiiniprosessin tapauksissa polttoaineen palamisessa muodostuva lämpöenergia muunnetaan ensin mekaaniseksi energiaksi, ja siitä edelleen sähköenergiaksi. Polttokennolla nämä välivaiheet voidaan ohittaa.

2.1. Polttokennojen yleinen teoria

Polttokenno koostuu anodista, katodista, sekä niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Rakenne on siis periaatteessa samanlainen kuin akulla. Polttokennossa polttoaineena oleva vety (kemiallinen energia) syötetään jatkuvana virtauksena anodille, joka toimii polttokennon negatiivisena elektrodina. Akuissa taas kemiallinen energia on varastoituna elektrolyyttiin ja elektrodeihin. Polttokennossa hapettimena oleva happi syötetään jatkuvana virtauksena katodille, eli positiiviselle elektrodille. Elektrolyytti estää polttoaineen ja hapettimen sekoittumisen, mutta päästää lävitseen positiiviset tai negatiiviset ionit kyseessä olevasta polttokennotyypistä riippuen. Anodilla oleva polttoaine hapettuu, jolloin vapautuvat elektronit kulkevat ulkoisen piirin kautta katodille muodostaen sähkövirran. Katodilla tapahtuu hapettimen pelkistyminen. Polttokennossa voidaan sanoa tapahtuvan yksinkertaistettu pääreaktio:



Elektrodeilla tapahtuvat reaktiot vaihtelevat riippuen kyseessä olevasta polttokennotyypistä. Reaktioiden kiihdyttämiseksi matalan lämpötilan polttokennojen elektrodeilla käytetään yleisesti katalyyttia. Korkean lämpötilan polttokennoilla katalyyttien käyttö ei ole välttämätöntä.

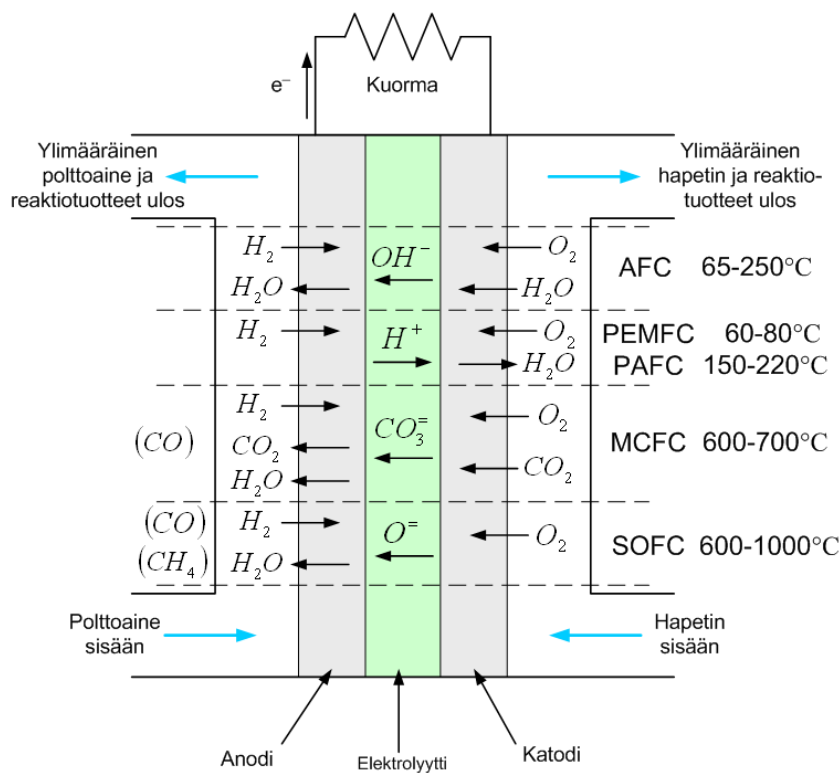
Tyypillisimmät polttokennoissa käytetyt reagoivat aineet ovat vety ja happi. Kummankaan ei tarvitse kuitenkaan esiintyä puhtaana kaasuna. Tietyissä polttokennotyypeissä polttoaineena voidaan käyttää suoraan vetyä sisältäviä hiilivetyjä kuten maakaasua tai metanolia. Muillakin kennotyypeillä vety voidaan erottaa polttoaineesta reformoimalla. Hapettimena käytetään yleensä ilman happea. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.1.1. Polttokennotyypit

Polttokennot jaotellaan yleisesti eri polttokennotyyppeihin joko toimintalämpötilan tai niissä käytetyn elektrolyyttimateriaalin mukaan. Käytetty elektrolyyttimateriaali jakaa polttokennot viiteen eri polttokennotyyppiin:

- Polymeeripolttokennot (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC).
- Alkalipolttokennot (Alkaline Fuel Cell, AFC).
- Fosforihappopolttokennot (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC).
- Sulakarbonaattipolttokennot (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC).
- Kiinteäoksidipolttokennot (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC).

Joskus myös suorametanolipolttokenno (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) lasketaan omaksi polttokennotyyppikseen. Pohjimmiltaan se on kuitenkin polymeeripolttokenno, joka käyttää polttoaineenaan puhtaan vedyn sijaan metanolia. Tämän lisäksi on olemassa myös muita nestemäisiä polttoaineita käyttäviä polttokennoja, kuten suoraetanolipolttokenno (Direct Ethanol Fuel Cell, DEFC), mutta ne eivät ole kaupallistuneet kuten DMFC. Polymeeripolttokennojen (PEMFC) erityispiirteitä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.2. Polttokennon perusrakenne, eri polttokennotyypeille ominaiset reaktiot sekä tyypilliset toimintalämpötilat on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Polttokennon perusrakenne, eri polttokennotyypien kennoreaktiot ja tyypilliset toimintalämpötilat.

Alkalipolttokennon (AFC) elektrolyytinä toimii kaliumhydroksidi (*KOH*). Operoitaessa korkeilla lämpötiloilla (noin 250 °C) käytetään väkevöityä (85 massa-%) kaliumhydroksidiliuosta, ja matalilla lämpötiloilla (alle 120 °C) laimeampaa (35-50 massa-%) liuosta. Elektrolyytti sidotaan matriisimateriaaliin (tyypillisesti asbesti). Kennotyypillä voidaan käyttää laajaa valikoimaa eri katalyyttejä, kuten nikkeliä, hopeaa, metallioksideita tai jalometalleja. Alkalipolttokenno ei siedä hiilidioksidia (CO_2) polttoaineen tai hapettimen joukossa, sillä se reagoi kaliumhydroksidin (*KOH*) kanssa muodostaen kaliumkarbonaattia (K_2CO_3), muuttaen näin elektrolyytin koostumusta.

Alkalipolttokennoja on käytetty eri avaruushjelmissä 1960-luvulta lähtien, mutta muuten niiden sovelluskohteita on rajoittanut kennotyyppin hiilidioksidiherkkyys. Käyttämällä elektrolyytin kierrätystä tätä herkkyyttä voidaan kuitenkin pienentää (Kordes et al. 2000), jolloin voidaan operoida CO_2 -pitoisella ilmalla. Kennotyyppin etuja ovat muihin polttokennoihin nähden hyvä hyötysuhde käytettäessä vetyä ja happea, sekä joustavuus katalyyttimateriaalin valinnassa. Haasteena on CO :n ja CO_2 :n pitoisuuksien huomioiminen joko poistamalla ne reaktanttien joukosta tai käyttämällä elektrolyytin kierrätystä, mikä tekee järjestelmästä monimutkaisen ja laskee hyötysuhdetta.

Fosforihappopolttokennot (PAFC) käyttävät elektrolyytinään väkevöityä fosforihappoa (noin 100 %). Elektrolyytin sitomiseen käytettävä matriisimateriaali on tyypillisesti piikarbidi (*SiC*), ja katalyyttinä sekä anodilla että katodilla toimii platina. Operointilämpötila on tyypillisesti 150–220 °C.

Fosforihappopolttokennoja on jo kaupallisesti saatavilla stationäärisiin sähköntuotantosovelluksiin (200 kW:n laitokset). Satoja yksiköitä on käytössä ympäri maailman. Kennotyyppin etuna on, että se on AFC:ta ja PEMFC:ta vähemmän herkkä CO :n suhteen. Operointilämpötila on riittävän alhainen, jotta rakenteessa ei tarvita erikoismateriaaleja. Fosforihappopolttokennoilla on saatu aikaan 37–42 % järjestelmän kokonaishyötysuhteita perustuen maakaasun alempaan lämpöarvoon (EG&G Technical Services 2004, s.1-11), mikä on PEMFC:lla saavutettua korkeampi, mutta SOFC:a ja MCFC:a matalampi. Lisäksi järjestelmän hukkalämpöä on mahdollista käyttää hyväksi CHP-sovelluksissa, eli yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Haasteena on polttoaineen prosessoinnin tarve. Lisäksi elektrolyytinä olevan fosforihapon syövyttävyys vaatii kalliiden materiaalien käyttöä kennon rakenteessa.

Korkean lämpötilan PEMFC:sta (High-Temperature PEM tai HT-PEM) ainoa kaupallistunut tyyppi on fosforihappoympättyä PBI-kalvoa (polybentsimidatsoli) käyttävä versio. Tämä polttokennotyyppi on ominaisuuksiltaan käytännössä fosforihappopolttokennoa vastaava.

Sulakarbonaattipolttokennon (MCFC) elektrolyytti on tyypillisesti eri alkalikarbonaattien seos, joka on sidottu keraamiseen matriisiin kuten litiumalumiinioksidi ($LiAlO_2$). Operointilämpötila on 600–700 °C, jolla lämpötila-alueella karbonaatit muodostavat hyvin johtavia sulia suoloja, karbonaatti-ionien

mahdollistaessa ionien liikkumisen elektrolyytissä. Näin korkeissa operointilämpötiloissa ei tarvita katalyytiksi jalometalleja, vaan nikkeli anodilla ja nikkelioksidi katodilla ovat riittäviä.

Sulakarbonaattipolttokennon kehitystyö on painottunut stationäärisiin ja merenkulun sovelluksiin. Kyseisissä kohteissa kennotyyppin suhteellisen suuri koko ja paino, sekä hidas käynnistymisaika eivät ole yhtä suuri ongelma kuin muissa sovelluksissa. MCFC:n korkeahko operointilämpötila johtaa useisiin etuihin: katalyyttimateriaaliksi riittää verrattain edullinen nikkeli, ja polttoaineena voidaan käyttää tiettyjä hiilivetyjä, jotka reformoidaan vedyksi kennon sisällä. Tämä nostaa kennotyyppin hyötysuhteen 50 % tienoille alemman lämpöarvon mukaan laskettuna. Hukkalämmön hyväksikäyttäminen CHP-sovelluksissa voi nostaa järjestelmän kokonaishyötysuhteen yli 80 %:iin. Suurimmat haasteet aiheutuvat hyvin syövyttävästä ja liikkuvasta elektrolyttimateriaalista, joka edellyttää nikkelin ja korkeatasoisen ruostumattoman teräksen käyttöä polttokennon materiaalina. Myös korkeat lämpötilat tuovat mukanaan materiaaleihin liittyviä haasteita liittyen mekaaniseen kestävyYTEEN sekä elinikään.

Kiinteäoksidipolttokennot (SOFC) käyttävät elektrolyttinä kiinteää, ei-huokoista metallioksidia, tyypillisesti yttriumoksidilla (Y_2O_3) stabiloitua zirkoniumoksidia (ZrO_2). Kennotyyppin operointilämpötila on 600–1000 °C. Kehitystyötä on tehty operointilämpötilan alentamiseksi, mikä mahdollistaisi edullisempien materiaalien käytön polttokennon rakenteessa.

Kiinteäoksidipolttokenttojen kehitystyö painottuu pääasiassa stationäärisiin sovelluksiin. Koska käytetty elektrolyytti on kiinteässä olomuodossa, voidaan kenno sovittaa erilaisiin muotoihin kuten putkimaiseksi tai litteäksi. Polttokennon keraaminen rakenne vähentää korroosioon liittyviä ongelmia. Kiinteä elektrolyytti ei voi liikkua ja tulla elektrodeille. Kennotyyppin reaktiokinetiikka on melko nopea ja CO :ta voidaan käyttää suoraan polttoaineena kuten MCFC:ssa. Ohuen elektrolyttin litteillä kiinteäoksidipolttokennoilla on saavutettu korkeita tehotehden arvoja. MCFC:n tavoin korkea operointilämpötila sallii hukkalämmön käytön CHP-sovelluksissa. Saavutetut hyötysuhteet ovat samaa luokkaa MCFC:n kanssa.

SOFC:n korkea operointilämpötila tuo mukanaan monia haasteita. Kennon rakenteissa esiintyvien materiaalien lämpölaajenemisominaisuuksissa on suuria eroja, mikä johtaa helposti liian suuriin mekaanisiin rasituksiin. Korkea lämpötila rajoittaa materiaalivalintoja, ja johtaa monimutkaisiin valmistusprosesseihin. Myös korroosio metallisissa komponenteissa on haaste. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.1.2. Avoimen piirin jännite ja hyötysuhde

Polttokennon avoimen piirin jännite, eli tyhjäkäyntijännite, ja hyötysuhde vaihtelevat toimintaolosuhteiden mukaan. Vakiolämpötilassa ja -paineessa toimivan polttokennon tekemä sähköinen maksimityö (W_{el}) määritetään sähkökemiallisen reaktion Gibbsin vapaan energian muutoksena (ΔG):

$$W_{el} = -\Delta G = nFE_0, \quad (2.2)$$

missä n on reaktioon osallistuvien elektronien lukumäärä anodille tuotua polttoainemolekyyliä kohti, F on Faradayn vakio (96487 As/mol) ja E_0 on polttokennon ideaalinen avoimen piirin jännite. Gibbsin vapaan energian muutos voidaan esittää myös muodossa

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (2.3)$$

missä ΔH on entalpiian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä ja ΔS entropian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä.

Ominaisentalpia ja -entropia lämpötilassa T voidaan vakiopaineessa esittää muodossa

$$h(T) = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (2.4)$$

$$s(T) = s_0 + \int_{T_0}^T \frac{1}{T} c_p dT, \quad (2.5)$$

missä alaindeksi 0 viittaa kyseiseen suureeseen standardilämpötilassa ($T_0 = 298,15K$), ja c_p on molaarinen ominaislämpökapasiteetti. Vetyä ja happea käyttävän polttokennon entalpiian ja entropian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä voidaan esittää

$$\Delta H = (h)_{H_2O} - (h)_{H_2} - \frac{1}{2}(h)_{O_2} \quad (2.6)$$

$$\Delta S = (s)_{H_2O} - (s)_{H_2} - \frac{1}{2}(s)_{O_2}. \quad (2.7)$$

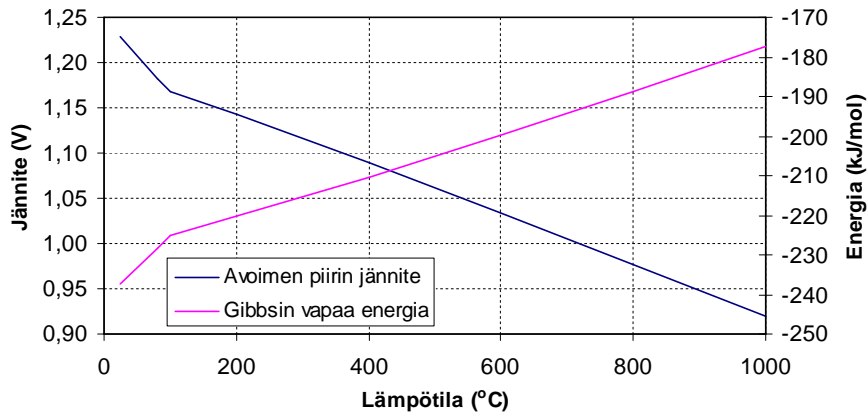
Polttokennon ideaalinen avoimen piirin jännite saadaan ratkaistua yhtälöstä (2.2):

$$E_0 = \frac{-\Delta G}{nF}. \quad (2.8)$$

Koska Gibbsin vapaan energian muutos pienenee lämpötilan kasvaessa, myös polttokennon jännite pienenee lämpötilan kasvaessa. Yhtälöiden (2.6) ja (2.7) tapauksessa standardiolosuhteissa (25 °C ja 101,325 kPa) Gibbsin vapaa energia on 237,34 kJ/mol, jolloin polttokennon ideaalinen avoimen piirin jännite samoissa olosuhteissa on

$$E_0 = \frac{237,34 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96487 \text{ As/mol}} \approx 1,23 \text{ V}.$$

Vety-happi-polttokennolle laskettua teoreettisen avoimen piirin jännitteen ja Gibbsin vapaan energian muutosta lämpötilan funktiona vakioaineessa (101,325 kPa) on havainnollistettu kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Teoreettinen avoimen piirin jännite ja Gibbsin vapaan energian muutos vety-happi-polttokennolle lämpötilan T funktiona ($p = 101,325 \text{ kPa}$).

Minkä tahansa energian muuntamiseen käytettävän laitteen hyötysuhde ilmaistaan yleisesti käytettävissä olevan ulostuloenergian ja käytetyn sisäänmenoenergian suhteena:

$$\eta = \frac{\text{käytettävissä oleva ulostuloenergia}}{\text{käytetty sisäänmenoenergia}} \quad (2.9)$$

Polttokennon tapauksessa ulostuloenergia on tuotettu sähköenergia, ja sisäänmenona on vedyn entalpia eli vedyn korkeampi lämpöarvo ($\text{HHV} = 286,02 \text{ kJ/mol}$). Jos oletetaan että koko Gibbsin vapaa energia voidaan muuntaa sähköenergiaksi polttokennossa, saadaan polttokennon teoreettiseksi maksimihyötysuhteeksi standardiolosuhteissa

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{286,02 \cdot 10^3 \text{ J/mol}} \approx 0,83. \quad (2.10)$$

Mikäli polttokennon tuottama hukkalämpö on riittävän korkeassa lämpötilassa, voidaan osa siitä muuttaa sähköksi tai mekaaniseksi energiaksi.

Usein polttokennon hyötysuhde ilmaistaan vedyn alemman lämpöarvon ($\text{LHV} = 241,98 \text{ kJ/mol}$) avulla. Näin voidaan helpommin suorittaa vertailu polttomoottorin hyötysuhteeseen, joka perinteisesti ilmoitetaan polttoaineen alemman lämpöarvon avulla.

Jos jaetaan polttokennon hyötysuhteen yhtälössä (2.10) osoittaja ja nimittäjä $-nF$:llä, voidaan hyötysuhde ilmoittaa polttokennon jännitteen avulla

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-\frac{\Delta G}{nF}}{-\frac{\Delta H}{nF}} = \frac{1,23V}{1,482V} \approx 0,83, \quad (2.11)$$

missä $-\frac{\Delta G}{nF} = E_0$ on polttokennon reversiibeli avoimen piirin jännite. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.1.3. Jännitehäviöt ja polarisaatiokäyrä

Todellisuudessa polttokennon avoimen piirin jännite on selvästi teoreettista arvoa alhaisempi. Tämä johtuu polttokennossa vaikuttavista irreversiibeleistä häviöistä, joita aiheuttaa neljä eri häviölähdettä:

- aktivointihäviöt,
- vuotovirtahäviöt,
- ohmiset häviöt ja
- konsentraatiohäviöt.

Näitä häviöitä kutsutaan yleisesti myös polarisaatioksi, ylipotentialiksi tai ylijännitteeksi.

Aktivointihäviöt aiheutuvat anodilla ja katodilla tapahtuvien sähkökemiallisten reaktioiden hitaasta reaktiokinetiikasta. Reaktiot vaativat tapahtuakseen riittävällä nopeudella tietyn jännitepoikkeaman tasapainotilasta, eli tarvittavan aktivointienergian ylittymisen. Aktivointihäviöitä esiintyy sekä anodilla että katodilla, mutta erityisesti matalissa lämpötiloissa katodihäviöt ovat korkeammat. Hapen pelkistyminen vaatii korkeamman ylipotentialin kuin vedyn hapettuminen, minkä takia reaktionopeudet ovat katodipuolella hitaampia.

Kun aktivointiylipotentiali on riittävän suuri, polttokennon aktivointihäviöitä ΔV_{act} voidaan mallintaa niin kutsutulla Tafelin yhtälöllä (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004). Polttokennon aktivointihäviöt voidaan esittää:

$$\Delta V_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0}, \quad (2.12)$$

missä α on tarkasteltavalla elektrodilla tapahtuvalle reaktiolle ominainen varauksen siirtokerroin, R on yleinen kaasuvakio (8,314 Jmol/K), i on virrantiheys ja i_0 on itseisvirrantiheys, joka on reaktion kinetiikkaa kuvaava parametri. Mitä korkeampi on polttokennon itseisvirrantiheys, sitä alhaisemmat ovat aktivointihäviöt.

Tafelin yhtälö on usein esitettyä muodossa

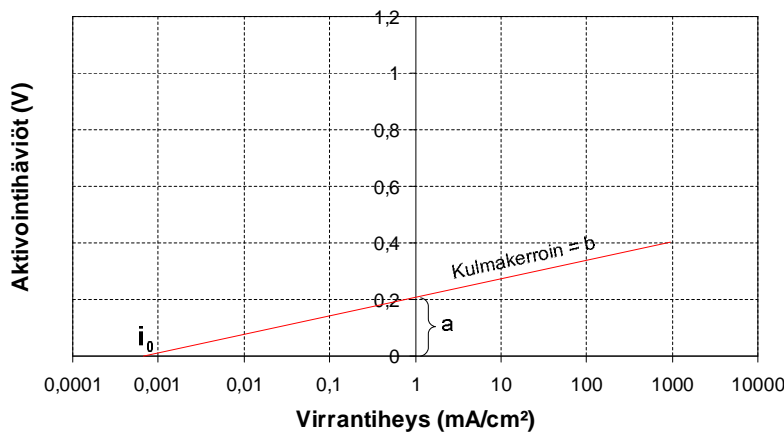
$$\Delta V_{act} = a + b \ln(i), \quad (2.13)$$

missä

$$a = -\frac{RT}{\alpha nF} \ln(i_0), \quad (2.14)$$

$$b = \frac{RT}{\alpha nF}. \quad (2.15)$$

Termiä b kutsutaan Tafelin kulmakertoimeksi, ja se saadaan kuvaajan kulmakertoimesta kun ΔV_{act} esitetään $\ln(i)$:n funktiona. Samassa kuvaajassa a on jännitteen arvo kun $i = 1$, ja i_0 on virrantiheyden arvo kun $\Delta V_{act} = 0$. Esimerkki Tafelin yhtälön mukaisesta suorasta on esitetty kuvassa 2.3. Mikäli aktivointihäviöt ovat pieniä, kuten PEMFC:n anodilla, kasvavat ne lineaarisesti virrantiheyden funktiona (Barbir 2005).



Kuva 2.3. Esimerkki Tafelin yhtälön mukaisesta suorasta.

Vuotovirtahäviöitä syntyy kun polttoainetta kulkeutuu suoraan elektrolyytin läpi anodilta katodille. Vaikka elektrolyytti ei ole sähköisesti johtava ja se on lähes läpäisemätön kaasulle, pieniä määriä polttoainetta pääsee diffundoitumaan sen läpi (ylivuoto). Polttoaineen ylivuodosta seuraa polttoaineen kulumista ilman, että se synnyttäisi sähkövirtaa. Tämän lisäksi pieni osa elektroneista löytää reitin suoraan anodilta katodille ilman, että ne kulkisivat ulkoisen virtapiirin kautta (vuotovirta). Näitä reaktion osallistumattomista elektroneista muodostuvia häviöitä kutsutaan myös faradisiksi häviöiksi. Faradisten häviöiden muodostama osuus koko vuotovirtahäviöistä on yleensä hyvin pieni, lukuun ottamatta suorametanolipolttokennoa (DMFC).

Vuotovirtahäviöt ovat korkean lämpötilan polttokennoissa melko marginaalisia. Matalan lämpötilan polttokennoissakin vuotovirtahäviöillä on oleellista merkitystä hyötysuhteen kannalta ainoastaan operoitaessa hyvin alhaisilla virrantiheyden arvoilla. Käytännössä tällaisia tilanteita ovat polttokennon käynnistäminen ja pysäyttäminen.

Esimerkiksi Gasteiger et al. (2003) ovat mitanneet 50 cm² aktiivisen pinta-alan vedyllä toimivan polymeeripolttokennon vuotovirraksi keskimäärin 3,3 mA/cm². Tyypillinen arvo PEMFC:lle onkin noin 1-10 mA/cm².

Vuotovirtahäviöitä voidaan käyttää polymeeripolttokennojen ikääntymisen indikaattorina. Elektrolyyttimateriaali ohenee iän myötä, ja siihen syntyy pieniä reikiä ja halkeamia. Tämän myötä elektrolyytin kyky erottaa reaktanttikaasut toisistaan heikkenee, ja ylivuotohäviöt kasvavat.

Ohmiset häviöt ovat polttokennon rakenteiden aiheuttamia resistiivisiä häviöitä. Ne aiheutuvat ionien liikettä vastustavasta resistanssista elektrolyytissä, sekä elektronien liikettä vastustavasta resistanssista polttokennon sähköä johtavissa komponenteissa (virtauslevyt). Nämä häviöt voidaan ilmaista Ohmin lain avulla

$$\Delta V_{ohm} = iR_i, \quad (2.16)$$

missä i on virrantiheys (A/cm²) ja R_i on polttokennon ominaisresistanssi (Ωcm²) sisältäen ioni-, elektroni- ja kontaktiresistanssin. Näistä elektroniresistanssi muodostaa selvästi pienimmän osan koko polttokennon ominaisresistanssista. Ioni- ja kontaktiresistanssi ovat tätä nykyä keskenään usein jo samaa suuruusluokkaa, koska elektrolyytin vastus on pienentynyt kehitystyön myötä.

Konsentraatiohäviöitä ilmenee, kun reaktioaineen kuluminen reaktioissa aiheuttaa sen konsentraatiossa muutoksia elektrodin pinnalla. Toisin sanoen, reaktantin osapaine reaktioalueella on pienempi kuin muualla kaasussa tai liuoksessa. Reaktantin osapaineen aleneminen johtaa kennojännitteen pienentymiseen. Polymeeripolttokennoilla konsentraatiohäviöitä voi aiheutua myös, mikäli reaktiotuotteena syntyvää nestemäistä vettä ei saada poistettua huokoiselta katodilta riittävän tehokkaasti. Tästä on seurauksena katodin tulviminen, mikä vaikeuttaa reaktantin pääsyä reaktioalueelle.

Reaktanttien konsentraation vaikutus kennojännitteeseen saadaan Nernstin yhtälön avulla (Barbir 2005)

$$\Delta V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right), \quad (2.17)$$

missä C_B on reaktantin virtauksen bulkkikonsentraatio (mol/cm³) ja C_S on reaktantin konsentraatio katalyytin pinnalla (mol/cm³). Fickin lain mukaan reaktantin moolivirta N (mol/s) on verrannollinen konsentraatioeroon reaktanttivirtauksen ja katalyytin pinnan välillä. Riippuvuus voidaan esittää

$$N = \frac{D(C_B - C_S)}{\delta} A, \quad (2.18)$$

missä D on reaktantin diffuusiokerroin (cm^2/s), A on elektrodin aktiivinen pinta-ala (cm^2) ja δ on diffuusiomatka (cm). Faradayn lain mukaan virrantiheys on verrannollinen siirrettävään varaukseen nF (C/mol) sekä reaktantin kulutukseen pinta-alaa kohti N/A ($\text{mol}/(\text{s cm}^2)$)

$$i = nF \frac{N}{A}. \quad (2.19)$$

Yhdistämällä yhtälöt (2.18) ja (2.19) saadaan

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta}. \quad (2.20)$$

Reaktantin konsentraatio katalyytin pinnalla on siis sitä pienempi, mitä suurempi on virrantiheys. Konsentraatio saavuttaa nollan, kun reaktanttia kuluu nopeammin kuin se ehtii saavuttaa katalyytin pinnan. Virrantiheyden arvoa, jolla tämä tapahtuu, kutsutaan rajoittavaksi virrantiheydeksi. Polttokenno ei pysty tuottamaan rajoittavaa virrantiheyttä korkeampia arvoja, koska silloin reaktantit eivät saavuta katalyyttiä. Kun asetetaan C_S nolllaksi, rajoittavaksi virrantiheydeksi i_L saadaan

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta}. \quad (2.21)$$

Kun yhdistetään yhtälöt (2.17), (2.20) ja (2.21), saadaan konsentraatiohäviöille

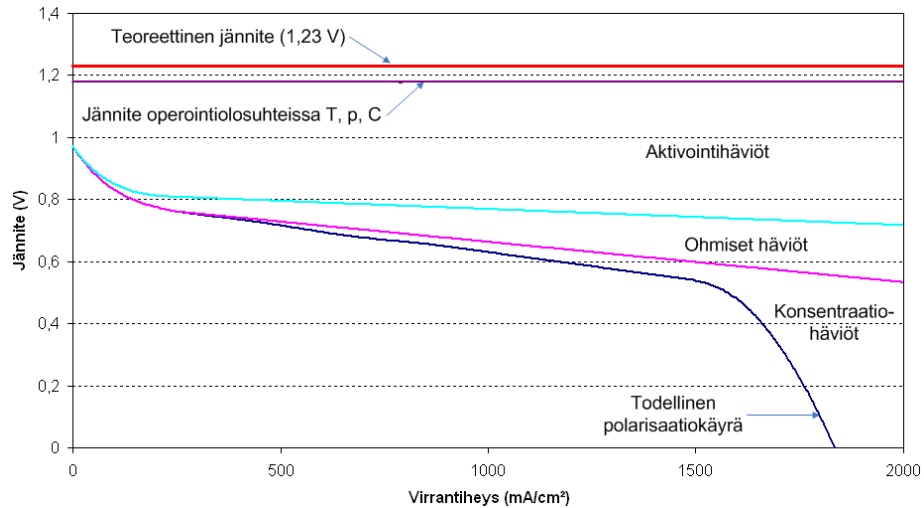
$$\Delta V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right). \quad (2.22)$$

Näin ollen todellinen kennojännite saadaan, kun teoreettisesta avoimen piirin jännitteestä E_0 vähennetään edellä esitetyt häviölähteet

$$V_{cell} = E_0 - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc}. \quad (2.23)$$

Vuotovirtahäviöitä ei tavallisesti oteta mukaan yhtälöön (2.23), koska niiden osuus koko polttokennon häviöistä on useimmissa tapauksissa melko marginaalinen.

Polttokennon todellinen jännite esitettynä virrantiheyden funktiona on nimeltään polarisaatiokäyrä. Esimerkki polarisaatiokäyrästä, ja eri häviölähteiden vaikutukset polttokennon jännitteeseen on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Polttokennon eri häviölähteiden vaikutus jännitteeseen, ja esimerkki polarisaatiokäyrästä.

Luonnollisesti polttokennojen rakenteiden suunnittelussa pyritään minimoimaan eri häviölähteiden vaikutukset. Käyttämällä tehokkaampia katalyyttimateriaaleja ja lisäämällä elektrodien aktiivista pinta-alaa saadaan aktivointihäviöitä pienennettyä. Paremmiin ioneja johtava elektrolyytti ja sähköä johtavat elektrodit pienentävät ohmisia häviöitä.

Häviöitä saadaan pienennettyä myös opeointiolosuhteiden optimoinnilla. Nostamalla opeointilämpötilaa tai -painetta, ja reaktanttien konsentraatiota (esimerkiksi käyttämällä ilman tilalla puhdasta happea) voidaan pienentää aktivointi- ja konsentraatiohäviöitä. Opeointipaineen nostaminen tai hapen erottaminen ilmasta lisäävät kuitenkin systeemi-häviöitä, kun oheislaitteet tarvitsevat enemmän energiaa. Lämpötilan nostaminen taas tuo mukanaan komponenttien elinikään liittyviä haasteita. Näin ollen opeointiolosuhteiden valinnassa on pyrittävä kompromisseihin, jotka ovat kustannustehokkaimpia koko järjestelmän kannalta halutussa käyttökohteessa. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.1.4. Polttoainevaihtoehdot

Polttokennojen polttoainevaihtoehdot eivät rajoitu pelkästään puhtaaseen vetyyn. Useita konventionaalisia polttoaineita on tutkittu polttokennokäytössä, jotta polttokennot olisi mahdollista saada markkinoille jo ennen kuin vedystä saadaan varteenotettava polttoaine jokapäiväiseen käyttöön.

Eri-laisten vetyä sisältävien polttoaineiden käyttö on mahdollista, kun polttoaine reformoidaan vedyksi polttokennojärjestelmän sisällä. Käyttäminen myös suoraan ilman reformointia on mahdollista tietyillä polttokennotyypeillä (DMFC). Reformointijärjestelmässä vety voidaan erottaa hiilivedyistä, kuten maakaasusta, bensiinistä tai metanolista kemiallisin, termokemiallisin tai sähkökemiallisin menetelmin. Polttokennon eliniän kannalta riittävän puhtaan vedyn tuottamiseksi on kaasu lisäksi prosessoitava muun muassa rikkiyhdisteiden, halidien ja ammoniakkin

poistamiseksi. Tämän lisäksi polymeeri- ja alkalipolttookennoilla kaasun CO -pitoisuutta on pienennettävä, koska se on haitallista katalyyttien toiminnalle. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi siirtymäreaktiota tai valikoivaa hapettumista hyödyntämällä.

Reformointijärjestelmä vaatii toimiakseen korkean lämpötilan ja se tekee polttockennojärjestelmästä monimutkaisemman. Tästä johtuen voidaan nyrkkisääntönä pitää, että mitä korkeampi polttockennon toimintalämpötila ja mitä suurempi järjestelmä, sitä paremmin onnistuu vaikeammin reformoitavien polttoaineiden käyttö.

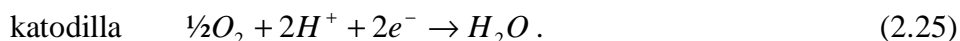
2.2. Vetyä käyttävät polymeeripolttockennot

Polymeeripolttockennoja (jatkossa PEMFC) on kehitetty monentyyppisiin sovelluskohteisiin. Suurimmat odotukset kohdistuvat ajoneuvosovelluksiin, mutta kaupallistuminen tapahtuu ensin muissa käyttökohteissa (tietoliikennesovelluksissa varavoimana, työkoneet jne.). Myös esimerkiksi kannettavien laitteiden teholähteenä tai hajautetussa energiantuotannossa PEMFC:lla on kaupallistumismahdollisuuksia.

2.2.1. PEMFC:n toimintaperiaate

PEMFC kuuluu niin sanottuihin matalan lämpötilan polttockennoihin. Sen toimintalämpötila on tällä hetkellä tyypillisesti $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä, mutta kehitystyö on johtamassa lämpötilan kasvuun lähemmäs $100\text{ }^{\circ}\text{C}$:ta. Kennotyyppissä elektrolyytin on protoneita läpäisevä ohut polymeerimembraani. Elektrodit muodostuvat elektrolyytin pinnalle levitetystä ohuesta katalyyttikerroksesta, joka on tyypillisesti platinaa hiilipartikkelien (kantajamateriaali) pinnalla.

Elektrolyytin, elektrodien ja katalyytin välisellä rajapinnalla tapahtuvat sähkökemialliset reaktiot ovat



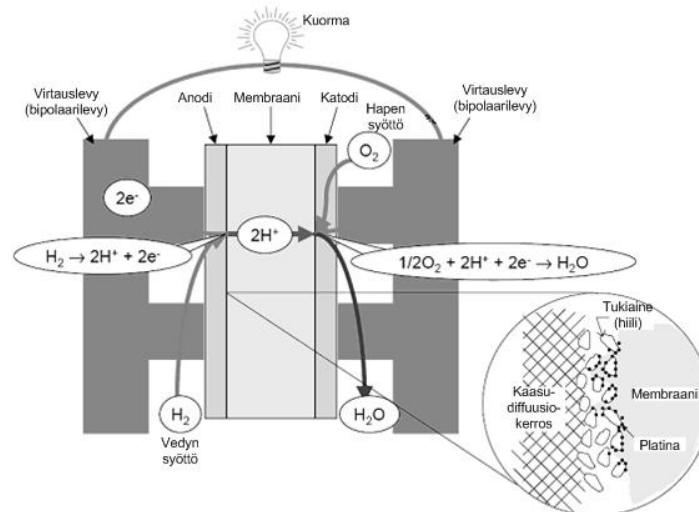
Anodille syötettävät vetymolekyylit hajoavat kahdeksi protoniksi ja kahdeksi elektroniksi. Protonit kulkevat katodipuolelle elektrolyytin läpi, ja elektronit ulkoisen piirin kautta. Katodille syötettävä ilman happi reagoi elektronien ja protonien kanssa muodostaen vettä, joka poistuu elektrodilta reagoimattoman ilman mukana.

Veden hallinta kennossa on erittäin tärkeää polttockennon suorituskyvyn kannalta. PEMFC:n operointiolosuhteiden on oltava sellaiset, joissa katodireaktioiden tuottama vesi ei höyrysty liian nopeasti ja membraani ei pääse kuivumaan. Katalyyttinä oleva platina on melko herkkää erilaisille epäpuhtauksille, CO :lle, rikkiyhdisteille ja ammoniakille, joten ne on eroteltava polttoaineesta ennen syöttämistä anodille. Myös katodille syötettävästä ilmasta on poistettava epäpuhtauksia suodattamalla. Epäpuhtauksien aiheuttamat ongelmat voivat olla tilapäisiä (CO) tai pysyviä (useat rikin yhdisteet).

Koska yksittäisen PEMFC:n käyttöjännite on alle yksi voltti, käytännön sovelluksissa useita polttokennoja kytetään sarjaan polttokennostackiksi. Yhdessä stackissa voi olla satoja polttokennoja. Tällöin on huomioitava muun muassa reaktanttien ja lämpötilan tasainen jakautuminen polttokennojen kesken tasaisen jännitejakauman ja pitkän eliniän saavuttamiseksi.

2.2.2. PEMFC:n rakenne ja materiaalit

PEMFC:n perusrakenne on esitetty kuvassa 2.5. Polttokennon keskellä on elektrolyytin ja elektrodien yhdessä muodostama membraani-elektrodi-kokoonpano (Membrane Electrode Assembly, jatkossa MEA). MEA:n molemmilla puolilla elektrodien pinnalla ovat huokoiset kaasudiffuusiokerrokset, joiden kautta reaktantit diffundoituvat elektrodien pinnalle. Yksittäisissä kennoissa uloimpana ovat virtauslevyt, joissa olevien virtauskanavien kautta reaktantit tuodaan kaasudiffuusiokerroksille, ja joiden kautta elektronit johdetaan ulkoisen piirin kautta anodilta katodille.



Kuva 2.5. PEMFC:n perusrakenne ja toimintaperiaate. (Barbir 2005)

Elektrolyytinä olevalta polymeerimembraanilta vaaditaan ennen kaikkea hyvää protonijohtavuutta. Tämän lisäksi sen on estettävä reaktanttikaasujen sekoittuminen anodin ja katodin välillä, ja sen on oltava kemiallisesti ja mekaanisesti riittävän kestävä polttokennon toimintaolosuhteissa.

Tyypillisesti PEMFC:n membraanimateriaali on valmistettu perfluorisulfonihappo-ionomeeristä (PFSA, toinen lyhenne PFSI). Yleisin tällainen membraanimateriaali on Dupontin valmistama Nafion™, jota saadaan kun polytetrafluorietyleni (PTFE, Teflon) polymeerin molekyyli-rakenteeseen lisätään sulfonihappoa (HSO_3). Tällä tavalla membraaniin saadaan vettä hylkiviä (PTFE) ja kosteutta kerääviä (HSO_3) alueita. Membraani voi sitoa itseensä jopa oman massansa verran vettä. H^+ ionit pääsevät liikkumaan näiden vettä sitoneiden alueiden kautta, mikä tekee materiaalista hyvin protoneita johtavan. Membraanimateriaalin kestävyys riittävän korkeissa lämpötiloissa (yli 70 °C) ja alhaisissa kosteuksissa on yleisesti ottaen ollut ongelma. Viime vuosina

(2005–2009) asiassa on saavutettu erittäin paljon edistystä, kun ymmärrys hajoamisprosesseista on kasvanut.

Elektrodit ovat käytännössä ohut katalyyttikerros membraanin pinnalla. PEMFC:n sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat tarkkaan ottaen katalyytin, membraanin ja reaktanttikaasun muodostamalla kolmen faasin rajapinnalla (three phase boundary). Ainoastaan tuolla rajapinnalla sekä reaktantti, elektronit että protonit ovat läsnä.

Yleisin käytetty katalyyttimateriaali sekä anodilla että katodilla on platina tai sen seosmetalli. Koska katalyytin pinta-ala ratkaisee, käytetään hyvin pieniä (alle 4 nm) platinapartikkeleita, jotka on levitetty suurempipartikkelisen kantajan (tyypillisesti hiilijauhe) pinnalle.

PEMFC:n kehityksen alkuvaiheessa platinaa tarvittiin katalyyttinä suuria määriä, jopa 28 mg/cm². Nykyään tarvittava määrä on tyypillisesti 0,25–0,4 mg/cm² elektrodin aktiivista pinta-alaa kohti. Autoteollisuuden polttomoottorien hinnat ovat tyypillisesti luokkaa 35–50 USD/kW. (Barbir 2005) Jos polttokennon tehosiheydeksi oletetaan kuvan 2.4 perusteella 0,35 W/cm² (0,7 V ja 500 mA/cm²), saadaan tarvittavan platinan määräksi noin 1 mg/W eli 1 g/kW. Platinan hinta vaihtelee suuresti, keskiarvon kolmen viime vuoden ajalta (toukokuusta 2006 toukokuuhun 2009) ollessa 43,1 USD/g (Johnson Mattheu PMM 2009). Tuolla keskihinnalla platinan osuus polttokennon hinnasta on noin 40 USD/kW, eli samaa suuruusluokkaa koko polttomoottorin hinnan kanssa. Ajoneuvosovellusten kaupallistumisen näkökulmasta platinan määrää tulisi edelleen pienentää 0,35 mg/W tienoille ilman, että polttokennon suorituskyky ja hyötösuhde kärsivät (Sinha et al. 2008).

Kaasudiffuusiokerrosten on oltava huokoista materiaalia, jotta reaktanttikaasut pääsevät helposti diffundoitumaan niiden läpi koko elektrodin alueelle. Materiaalin on oltava myös hyvin sähköä johtavaa, jotta elektronit pääsevät kulkemaan elektrodin ja virtauslevyn välillä. Tämän lisäksi kaasudiffuusiokerrokset johtavat reaktioissa syntyvää lämpöä ja kaasumaista ja nestemäistä vettä pois elektrolyyttiltä, sekä ne toimivat rakenteeltaan ohuen MEA:n tukirakenteena. Kaasudiffuusiokerrosten materiaalina on yleisesti hiilikuitupaperi tai -kangas.

Virtauslevyjä kutsutaan *bipolaarilevyiksi* kun useita polttokennoja on kytketty sarjaan polttokennostackiksi. Tällöin levyjen kummallakin puolella on virtauskanavat ja polttokenno. Bipolaarilevyt kytkevät sähköisesti vierekkäiset kennot toisiinsa, minkä takia niiden on oltava hyvin sähköä johtavaa materiaalia. Levyihin työstetyt virtauskanavat johtavat reaktanttikaasut kaasudiffuusiokerroksille, joten materiaalin on estettävä kaasuvirtausten sekoittuminen levyn läpi. Bipolaarilevyt johtavat myös lämpöä pois polttokennosta. Vesijäähdytteisessä stackissa levyjen toisella puolella ovat reaktanttien virtauskanavat ja toisella puolella vesijäähdytyksen kanavat. Virtaus- ja jäähdytyskanavien takia levyjen on oltava helposti työstettävää materiaalia. Levyn työstämisen sijaan virtauskanavat voidaan valmistaa myös valamalla levyt ruisku- tai ahtopuristuksella. Bipolaarilevyt toimivat myös koko polttokennostackia mekaanisesti tukevana rakenteena.

Bipolaarilevyt voidaan valmistaa joko grafiitista, grafiittikomposiiteista tai metallista. Grafiitti on kevyt ja kemiallisesti hyvin stabiili materiaali. Se on kuitenkin huokoista, jolloin se on kyllästettävä kaasua läpäisemättömäksi. Grafiittikomposiitit ovat kemiallisesti stabiileja ja melko helposti työstettäviä, mutta niistä tehdyt levyt ovat melko kookkaita. Materiaalien sähkönjohtavuudessa on saatu aikaan parannuksia viime vuosina. Metallit täyttävät vaaditut materiaaliominaisuudet, mutta ovat PEMFC:n olosuhteissa hyvin korroosioherkkiä. Yhdistetty rakenne jossa ohut metallilevy on kahden grafiittikomposiittilevyn välissä tuo mukanaan molempien materiaalien hyvät puolet (kemiallisesti ja mekaanisesti kestävä, kaasua läpäisemätön, kevyt ja helposti valmistettava). (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.2.3. Toimintaolosuhteiden vaikutus PEMFC:n suorituskykyyn

Lämpötila vaikuttaa polttokennon jännitteeseen. Yhdistämällä yhtälöt (2.3) ja (2.8) saadaan

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right), \quad (2.26)$$

mistä voidaan päätellä että lämpötilan nousu pienentää teoreettista polttokennon avoimen piirin jännitettä. Lämpötilan muutos vaikuttaa kuitenkin tämän ohella myös polttokennon häviöiden suuruuteen.

Yhtälön (2.12) perusteella voisi luulla, että lämpötilan nousu kasvattaa polttokennon aktivointihäviötä. Vaikutus on kuitenkin päinvastainen, sillä lämpötilan kasvaessa myös itseisvirrantiheyden i_0 arvo kasvaa. Lämpötilan kasvaessa aktivointihäviöt pienenevät eksponentiaalisesti. Yleensä aktivointihäviöiden pieneminen lämpötilan noustessa on niin suurta, että se kompensoi teoreettisen jännitteen alenemisen.

Lämpötilan vaikutus polttokennon ohmisiin häviöihin on erilainen eri materiaaleilla. Metalleilla resistanssi yleensä kasvaa lämpötilan mukana, kun taas sähköisesti johtavilla ja ionijohtavilla keraameilla se pienenee eksponentiaalisesti. NafionTM-pohjaisten materiaalien protoniresistiivisyys on voimakkaasti vesipitoisuuden funktio, joten toimintalämpötilan on oltava riittävän alhainen elektrolyytin vesitasapainon ylläpitämiseksi. Yleisesti ottaen matalan lämpötilan polttokennoilla, kuten PEMFC:lla, ohmisten häviöiden vaihtelu lämpötilan funktiona on pientä. Korkean lämpötilan polttokennoilla vaikutukset voivat olla huomattavia. Vaikka lämpötilan noustessa polttokennon teoreettinen avoimen piirin jännite laskee, polttokennossa vaikuttavat häviöt pienenevät tätä jännitteen laskua enemmän. Näin ollen yleisesti lämpötilan nouseminen kasvattaa polttokennon käyttöjännitettä.

Paineen vaikutusta polttokennon teoreettiseen jännitteeseen voidaan kuvata Nernstin yhtälöllä:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{\left(\frac{p_A}{p_0} \right)^a \left(\frac{p_B}{p_0} \right)^b}{\left(\frac{p_C}{p_0} \right)^c \left(\frac{p_D}{p_0} \right)^d} \right], \quad (2.27)$$

missä p_0 on standardipaine, ja osapaineiden p_i alaindeksit ja potenssit viittaavat kemialliseen reaktioon



Vety/happi-reaktiolle Nernstin yhtälö on muotoa

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}}. \quad (2.29)$$

Edelliset yhtälöt pätevät vain kaasumaisille lähtöaineille ja reaktiotuotteille. Kun polttokennon reaktiotuotteena on nestemäistä vettä, $p_{H_2O} = 1$. Yhtälöstä (2.29) seuraa, että reaktanttien osapaineiden kasvaessa polttokennon jännite kasvaa. Edelleen, esimerkiksi käytettäessä katodipuolella ilmaa puhtaan hapen tilalla, hapen osapaine riippuu sen konsentraatiosta ilmassa, ja näin ollen polttokennon jännite on pienempi.

Operointipaineen nostaminen vaikuttaa reaktanttien osapaineiden lisäksi positiivisesti myös kaasujen liukoisuuteen ja aineensiirron nopeuteen. Järjestelmähäviöt kuitenkin kasvavat, kun paineistus vaatii enemmän energiaa. Korkeampi paine vaatii myös esimerkiksi reaktanttien kiertojärjestelmältä parempaa paineenkestoa.

Virrantiheyden vaikutusta PEMFC:n suorituskykyyn on käsitelty jo jännitehäviöiden muodossa kappaleessa 2.1.3. Kuten kuvasta 2.2 voidaan nähdä, alhaisilla virrantiheyden arvoilla jännite putoaa nopeasti virrantiheyden kasvaessa. Tämä johtuu hitaasta reaktiokinetiikasta, eli aktivointihäviöt ovat hallitseva häviölähde. Virrantiheyden edelleen noustessa myös ohmiset ja konsentraatiohäviöt kasvavat, ja jännite jatkaa pienenemistään, tosin nyt hitaammin. Suurilla virrantiheyden arvoilla, kun saavutetaan niin kutsuttu rajoittava virrantiheys, jännite putoaa nopeasti. Tämä johtuu konsentraatiohäviöistä, kun reaktanttia kuluu nopeammin kuin sitä saadaan tuotua elektrodille. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.2.4. Toimintaolosuhteiden vaikutus PEMFC:n elinikään

Toimintaolosuhteilla on merkittävä vaikutus polttokennojen elinikään. Tutkimuksen painopiste on muutaman viime vuoden aikana siirtynyt yhä enemmän PEMFC:n hyötysuhteen parantamisesta eliniän pidentämiseen. Ajoneuvosovelluksissa on tulevaisuudessa päästävä vähintään 5000 käyttötuntiin (vastaa noin 240000

ajokilometriä) ilman, että polttokennon ulostulotehon alenema on yli 5 % uuden polttokennon tehosta (Borup et al. 2007). Membraanin ja katalyyttikerroksen kestävyys ovat kriittisimmät tekijät PEMFC:n eliniän kannalta.

Erityisesti ajoneuvosovelluksissa polttokennot joutuvat toimimaan laajalla tehoalueella ja nopeasti muuttuvilla kuormilla, mikäli niitä ei ole hybridisoitu. Nopeat kennojännitteen vaihtelut aiheuttavat platinakatalyytin hajoamista, liukenemistä ja partikkelikoon kasvua etenkin katodipuolella, mikä alentaa polttokennon suorituskykyä pysyvästi ja heikentää myös epäsuorasti membraanin kestävyyttä.

Nopeat tehonvaihtelut aiheuttavat muutoksia polttokennon toimintalämpötilassa ja kosteustasapainossa. Jatkuvat kosteustasapainon muutokset voivat aiheuttaa jännitystiloja membraanin rakenteeseen, kun se vuorotellen kuivuu ja kostuu. Tästä voi seurata membraanin fyysinen hajoaminen. Nopeiden jännitevaihteluiden sekä kosteuden ja lämpötilan muutosten on lisäksi todettu vaikuttavan platinapartikkelien koon kasvamiseen, jolloin polttokennon aktiivinen reaktiopinta-ala pienenee. Korkea lämpötila nopeuttaa, ja alhainen kennon kosteus hidastaa partikkelien kasvamista. Alhainen kosteus lisää myös tukiaineena olevien hiilipartikkelien korroosiota. (Borup et al. 2006a, Borup et al. 2006b)

Käytännön polttokennostackeissa reaktanttien jakautuminen yksittäisille kennoille on aina jossain määrin epätasaista. Jokaisen polttokennon on kuitenkin tuotettava sama virta, koska kennot on kytketty stackissa sarjaan. Epätasaisen reaktanttien jakautumisen takia kaikilla kennoilla ei ole kuitenkaan aina riittävästi polttoainetta edelliseltä kennolta tulevan virran siirtämiseksi. Mikäli anodilla ei ole tasaisesti polttoainetta, yksittäisen kennon jännite nousee, mikä kiihdyttää hiilipartikkelien korroosiota. (Borup et al. 2007, Knights et al. 2004)

PEMFC:n elinikää voidaan pyrkiä pidentämään sekä kehittämällä parempia materiaaleja ja komponentteja, että säätelemällä tarkemmin toimintaolosuhteita. Esimerkiksi ajoneuvosovelluksissa polttokenno voidaan hybridisoida energiavaranon (akku ja/tai superkondensaattori) kanssa. Tällöin polttokennon voidaan antaa operoida eliniän kannalta optimaalisella tavalla, eli riittävän tasaisella jännitteellä, ja ennen kaikkea ilman nopeita jännitevaihteluita. Polttokennoteholähteen hybridisointia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.

2.2.5. Vedyn varastointi

Vedyn varastointiin on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Suuremman tehon polttokennosovelluksissa kolme yleisintä menetelmää ovat:

- paineistettu vetykaasu,
- nesteytetty vety ja
- metallihydridit.

Myös kemiallisten hydridien käyttö on mahdollista, mutta niitä käytetään kustannussyistä vain pienitehoisissa sovelluksissa.

Paineistettuja kaasusäiliöitä käytetään laajasti maakaasun varastointiin. Varastointipaine vaihtelee suurista pallonmuotoisista matalapaineisista säiliöistä (yli 30000 m³, 12–16 bar) stationäärisiin korkeapainesäiliöihin (yli 200 bar). Vastaavaa tekniikkaa voidaan käyttää myös vedyn varastointiin.

Ajoneuvokäytössä uudet komposiittimateriaalit mahdollistavat ultrakevyiden yli 200 barin säiliöiden valmistamisen. Näissä saavutetaan varastointikapasiteetti, jossa yli 0,05 kg vetyä voidaan varastoida 1 kg kokonaismassaa kohti. Vedyn varastointi paineistettuna vaatii tilavuudeltaan melko suuria säiliöitä, esimerkiksi noin 60 l/kg, H₂ 200 barin paineessa tai noin 35 l/kg, H₂ 400 barin paineessa. (Barbir 2005)

Vedyn varastointi nesteytettynä vaatii paljon energiaa, mutta sillä voidaan saavuttaa suuri varastointitiheys. Vedyn höyrystymislämpötila on 20,25 K (noin -253 °C), jolloin vedyn nesteytys vaatii energiaa lähes kolmanneksen vedyn energiasisällöstä. Haasteena ovat myös nestevedyn kiehumishäviöt, joita voidaan minimoida asianmukaisella lämpöeristyksellä. Varastointi nesteinä on yleensä käytännöllistä ainoastaan sovelluksissa, joissa vaaditaan korkeaa varastointitiheyttä ja varastoitavan vedyn määrä on suuri.

Vety voi muodostaa *metallihydrideitä* useiden eri metallien ja yhdisteiden kanssa. Vety molekyylit hajoavat, ja muodostuneet atomit liukenevat metallin tai yhdisteen kidehiltaan. Näin voidaan saavuttaa jopa nestemäistä vetyä suurempia volumetrisia varastointitiheyksiä, mutta kun metallin massa otetaan huomioon, gravimetrinen varastointitiheys putoaa paineistettujen säiliöiden tasolle. Parhaat saavutetut varastointikapasiteetin arvot korkean lämpötilan metallihydrideille, kuten MgH₂, ovat noin 0,076 kg vetyä 1 kg metallia kohti. (Sakintuna, Lamari-Darkrim & Hirscher 2007)

Varastointiprosessin (lataus) aikana vapautuu lämpöä, joka on poistettava varastointisäiliöstä prosessin jatkuvuuden takaamiseksi. Vedyn vapautumisprosessin (purku) aikana lämpöä on tuotava varastointisäiliöön. Varastoitaessa vetyä metallihydrideihin suurimpana etuna on varastoinnin turvallisuus. Vakava varastointisäiliön vaurio esimerkiksi törmäyksen seurauksena ei aiheuta merkittävää tulipaloriskiä, sillä pääosa vedystä pysyy pitkään metallin kiderakenteessa. Mikäli säiliötä ollaan juuri purkamassa tai lataamassa onnettomuuden sattuessa, vaara on kuitenkin lähes samankaltainen kuin muilla säiliöillä.

Edellä mainittujen varastointitekniikoiden lisäksi myös muita vaihtoehtoja vedyn varastointiin tutkitaan, jotta voitaisiin saavuttaa yhä parempi varastointikapasiteetti. Tällaisia ovat muun muassa vedyn varastointi aktiivihiiileen korkeassa paineessa ja kryogeenisissä lämpötiloissa, varastointi hiilipohjaisiin nanoputkiin ja lasipalloihin. Varastointi vetyä sisältävissä kemiallisissa yhdisteissä (kuten metanoli) on myös mahdollista, kuten kappaleessa 2.1.4. on esitetty. Tällöin vedyn vapauttamiseksi polttoaine on prosessoitava esimerkiksi reformerin avulla. (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004)

2.2.6. Polttokennojärjestelmän oheislaitteet

Polttokennojen järjestelmään eli polttokennoteholähteeseen kuuluu polttokennostackin lisäksi erilaisia oheisjärjestelmiä ja komponentteja (Balance of Plant, BoP). BoP riippuu suuresti kyseessä olevasta polttokennotyypistä, käytettävästä polttoaineesta, hybridisointiasteesta, sovelluskohteesta ja operointiolosuhteista. Polttokennojärjestelmä sisältää kuitenkin tyypillisesti ainakin seuraavat oheisjärjestelmät:

- reaktanttivirtausten hallinta,
- lämpötasapainon hallinta,
- kosteustasapainon hallinta ja
- tehonhallinta.

Oheisjärjestelmillä on huomattava vaikutus polttokennojärjestelmän massaan, kokoon, hintaan ja hyötysuhteeseen. Niiden sovittaminen yhteen koko polttokennojärjestelmän kanssa on haastavaa, sillä eri oheisjärjestelmät vaikuttavat toistensa toimintaan.

Reaktanttivirtausten hallinta koostuu vedyn- ja ilmansyöttöjärjestelmistä. Vedyn virtausta anodille säädellään venttiilillä sekä vedyn uudelleenkierrätystä käytettäessä pumpulla. Purkuventtiilin kautta voidaan poistaa kiertoan kertyvät epäpuhtaudet. Ilman virtausta katodille säädellään puhaltimella tai kompressorilla, minkä lisäksi sisään tulevasta ilmavirtauksesta poistetaan epäpuhtauksia ilmansuodattimen avulla. Tavoitteena on taata riittävät reaktanttien virtaukset polttokennojärjestelmän tehotransienttien aikana, ja minimoida oheisjärjestelmän tehonkulutus.

Polttokennon lämpötasapainoa hallitaan jäähdytyspiirillä, joka koostuu jäähdytysnestettä kierrättävästä pumpusta ja jäähdyttimestä tai neste/nestelämmönvaihtimesta. Jäähdytysnesteenä käytetään yleensä deionisoitua vettä, joka kiertää bipolaarilevyihin työstetyissä jäähdytyskanavissa erillään reaktanttien virtauksista. Pienissä polttokennostackeissa voidaan käyttää joissakin tapauksissa myös ilmajäähdytystä tai passiivista jäähdytystä (ulkopinnan jäähdytysrivat). Jäähdytyspiirin ohella myös reaktanttivirtaukset jäähdyttävät polttokennoa. Lämpötasapainon hallinnan tavoitteena on polttokennojärjestelmän lyhyt käynnistysaika ja lämpötilan pitäminen tasaisena tehotransienttien aikana, sekä tuulettimen ja pumpun tehonkulutuksen minimoiminen.

Kosteustasapainon hallinnalla pyritään estämään polymeerimembraanin kuivuminen ja toisaalta kaasudiffuusiokerrosten tulviminen. Hapettimen virtaus on yleensä kostutettava, jos kenno toimii yli 50 °C lämpötilassa. Polttokennon reaktiotuotteena syntyvää vettä pyritään käyttämään hyödyksi, jotta ylimääräistä vettä ei tarvitse syöttää järjestelmään. Kostuttamiseen käytetään yleensä vettä läpäisevään kalvoon perustuvaa kostutinta, eli niin sanottua membraanikostutinta. Polttoainepuolella kostutus pystytään useimmiten hoitamaan polttoaineen takaisinkierätyksellä, jolloin

erillistä kostutinta ei välttämättä tarvita. Kosteustasapainon hallintaa vaikeuttaa se, että muutokset operointiolosuhteissa kuten virrantiheydessä, reaktanttien paineessa ja virtauksissa tai toimintalämpötilassa, vaikuttavat suuresti polttokennon kosteusolosuhteisiin.

Tehonhallinta säätelee polttokennolta otettavaa ulostulotehoa. Koska polttokennon ulostulojännite vaihtelee virran funktiona, käytetään kuorman ja polttokennon välissä usein DC/DC-muunninta tehonhallintaan. Muunninta käyttämällä on myös mahdollista rajoittaa jyrkkiä tehotransientteja, mikä on tärkeää muun muassa polttokennon eliniän kannalta.

Edellä mainittujen oheisjärjestelmien lisäksi muuta kuin puhdasta vetyä käytävissä polttokennoissa polttoainetta on yleensä prosessoitava esimerkiksi reformerissa, ja polttoaineesta on poistettava epäpuhtauksia (kuten *CO* ja rikkiyhdisteet). (Barbir 2005, EG&G Technical Services 2004, Pukrushpan, Stefanopoulou & Peng 2004)

3. HYBRIDISOIDUT AJONEUVOKÄYTÖN POLTTOKENNOTEHOLÄHTEET

3.1. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden johdanto

Polymeeripolttokennoista odotetaan yleisesti polttomoottorin korvaajaa ajoneuvojen teholähteenä. Vaikka useimmat suuret ajoneuvovalmistajat ovat panostaneet polttokennotutkimukseen, on polttokennoajoneuvojen kaupallistumisen tiellä yhä useita haasteita. Kehitystyötä on yhä tehtävä muun muassa polttokennoajoneuvojen hinnan alentamiseksi, sekä eliniän ja luotettavuuden kasvattamiseksi.

Polttokennoteholähteen hybridisointi parantaa merkittävästi mahdollisuuksia polttokennon hyvien puolien hyödyntämiseksi. Polttokennoajoneuvon peruskokoonpanoon kuuluvat polttokennostack ja sen oheisjärjestelmät sekä polttoainevarasto, sähkömoottori ja sen vaatima tehoelektroniikka. Polttokennojärjestelmää ei kuitenkaan kannata suunnitella vastaamaan ajoneuvon nopeisiin tehonmuutoksiin, sillä se lisää kustannuksia sekä alentaa järjestelmän hyötysuhdetta ja ennen kaikkea polttokennon elinikää. Kun polttokennon rinnalle otetaan mukaan sähköinen energiavarasto, voidaan saavuttaa merkittäviä etuja koko järjestelmän toiminnan kannalta.

Hybridisoidussa järjestelmässä polttokenno tuottaa ajoneuvon tarvitseman perustehon. Energiavarasto huolehtii nopeista tehonmuutoksista ja tehopiikeistä, sekä regeneratiivisen jarrutustehon varastoinnista. Polttokenno saa toimia elinikänsä sekä hyötysuhteensa kannalta optimaalisella tehoalueella. Hybridisoidussa järjestelmässä polttokennoa ei tarvitse mitoittaa ajoneuvon tarvitseman huipputehon, vaan keskitehon mukaan. Näin tullaan toimeen paljon pienemmällä polttokennolla. Jarrutustehon varastoinnilla voidaan saavuttaa lisäksi 30–40 % polttoaineenkulutuksen pieneneminen tavalliseen polttokennoajoneuvoon verrattuna (Arsie et al. 2007).

Sähköisen energiavaraston tehon ja koko hybridijärjestelmän tehon suhdetta kutsutaan hybridisointiasteeksi. Hybridisointiasteella voidaan siis ilmoittaa, kuinka voimakkaasti ajoneuvo on hybridisoitu. Näin ollen puhtaalle polttokennoajoneuvolle hybridisointiaste on nolla.

3.1.1. Hybridijärjestelmän komponentit

Ajoneuvokäytön hybridijärjestelmien energiavarastona käytetään useimmiten akkuja ja superkondensaattoreita. Järjestelmässä voi olla mukana joko toinen komponenteista, tai

molemmat. Käyttämällä yhdessä järjestelmässä sekä akkuja että superkondensaattoreita voidaan hyödyntää kummankin energiavaraston hyviä ominaisuuksia.

Superkondensaattorit ovat sähkökemiallisia kondensaattoreita, joihin voidaan varastoida paljon normaaleita kondensaattoreita suurempi energiamäärä. Hybridijärjestelmissä käytettävät superkondensaattorimoduulit kootaan useista, tyyppillisesti nimellisjännitteeltään alle kolmen voltin superkondensaattorikennoista.

Superkondensaattoreilla on akkuihin verrattuna alhainen energiatiheys, mutta korkea tehosiheys sekä lataus/purku-hyötysuhde. Ne voivat siis vastata tehokkaasti korkeisiin tehopiikkeihin, mutta eivät kykene antamaan tehoa pitkään yhtäjaksoisesti.

Superkondensaattorimoduulien elinikä on yli miljoona lataus/purku-sykliä, joten niiden varaustilan voidaan antaa vaihdella huomattavasti akkuja enemmän. Alhaisesta sisäresistanssista johtuen superkondensaattoreita voidaan ladata nopeasti akkuja huomattavasti suuremmilla latausvirroilla, minkä takia ne soveltuvat akkuja paremmin regeneratiivisen jarrutusenergian talteenottoon.

Akuilla on huomattavasti superkondensaattoreita korkeampi energiatiheys, eli niihin voidaan varastoida enemmän energiaa. Akkujen alhaisemmasta tehosiheydestä johtuen ne eivät kuitenkaan pysty vastaamaan tehokkaasti nopeisiin tehonmuutoksiin. Akkujen eliniän kannalta on tärkeää että tehonmuutokset ovat hitaita, ja että akun varaustila pidettäisiin mahdollisimman vakiona.

Hybridisoiduissa polttokennoteholähteissä toistaiseksi käytetyin akkutyyppi on lyijyaku alhaisesta hinnastaan johtuen. Myös lyijyakkuja kevyempiä nikkelimetallihydridiakkuja (*NiMH*) käytetään yleisesti. Tulevaisuudessa energiatiheydeltään ja hyötysuhteeltaan parempien litium-ioniakkujen (*Li-ion*) rooli tulee kasvamaan, kun niiden käyttöön liittyviä epävarmuuksia saadaan pienennettyä ja hintaa alennettua.

Superkondensaattoreiden tehtävänä hybridijärjestelmässä on nopeimpiin kuormatehon muutoksiin vastaaminen. Tällöin superkondensaattorin korkea lataus/purku-hyötysuhde ja pitkä elinikä voidaan käyttää parhaiten hyödyksi. Akulta vaadittava huipputeho pienenee, mikä vaikuttaa positiivisesti akun elinikään.

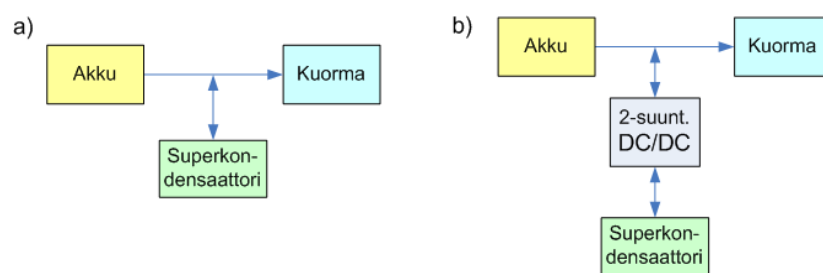
Hybridijärjestelmissä voidaan käyttää tehoelektroniikkaa ohjaamaan tehonsiirtoa järjestelmän eri komponenttien välillä. Tämä toteutetaan kytkemällä polttokenno tai energiavarasto väyläjännitteeseen DC/DC-muuntimen kautta.

Polttokennolta virta kulkee vain jänniteväylään päin. Näin ollen polttokennon ja jänniteväylän välillä käytettävän DC/DC-muuntimen on oltava yksisuuntainen. Energiavarastoja taas tulee voida sekä ladata että purkaa muuntimen kautta, mikä edellyttää kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen käyttöä. Polttokenno tai energiavarasto voidaan kytkeä väyläjännitteeseen myös suoraan. Tällöin polttokenno on kuitenkin suojattava diodilla. Hybridijärjestelmän perusrakenteen (eli topologian) erilaisia vaihtoehtoja on tarkemmin käsitelty kappaleessa 3.1.2.

3.1.2. Hybridijärjestelmän topologiat

Hybridijärjestelmän topologialla tarkoitetaan järjestelmän perusrakennetta, eli tapaa jolla järjestelmän eri komponentit on kytketty toisiinsa. Oikeanlaisen topologian valinta on hyvin tärkeää hybridijärjestelmän suunnittelussa.

Topologian valintaan ja komponenttien mitoitukseen vaikuttavat tehontarve ja tehotransienttien nopeus (eli odotettavissa oleva ajosykli), sekä muut rajoittavat tekijät kuten hinta ja järjestelmän fyysiset mitat. Yksittäistä kaikissa sovelluskohteissa optimaalista topologiaa ei ole siis mahdollista nimetä, vaan valinta on suoritettava aina sovelluskohtaisesti. Esimerkkejä mahdollisista hybridijärjestelmän topologioista on esitetty kuvissa 3.1–3.4.



Kuva 3.1. Kaksi esimerkkiä akku-superkondensaattori-kaksoishybridijärjestelmän topologiavaihtoehdoista: a) passiivisesti rinnankytkettynä ja b) superkondensaattori DC/DC-muuntimen kautta kytkettynä. Nuolet kuvaavat sähkövirran kulkusuuntia.

Passiivisesti rinnankytketyissä hybridijärjestelmissä (kuvat 3.1 a., kuva 3.2 a. ja b. sekä kuva 3.4 a.) komponenttien impedanssit määräävät kuormavirran jakautumisen polttokennon, akun ja superkondensaattorin kesken. Impedanssit riippuvat monista parametreista, kuten lämpötila, varaustila (state-of-charge, SoC), elinikä tai toimintapiste (virta ja jännite). Passiivisessa rinnankytkennässä komponentit voivat siis joutua toimimaan hyötysuhteen tai eliniän kannalta epäoptimaalisissa olosuhteissa. Lisäksi komponenttien käyttöjännitteiden tulee vastata toisiaan.

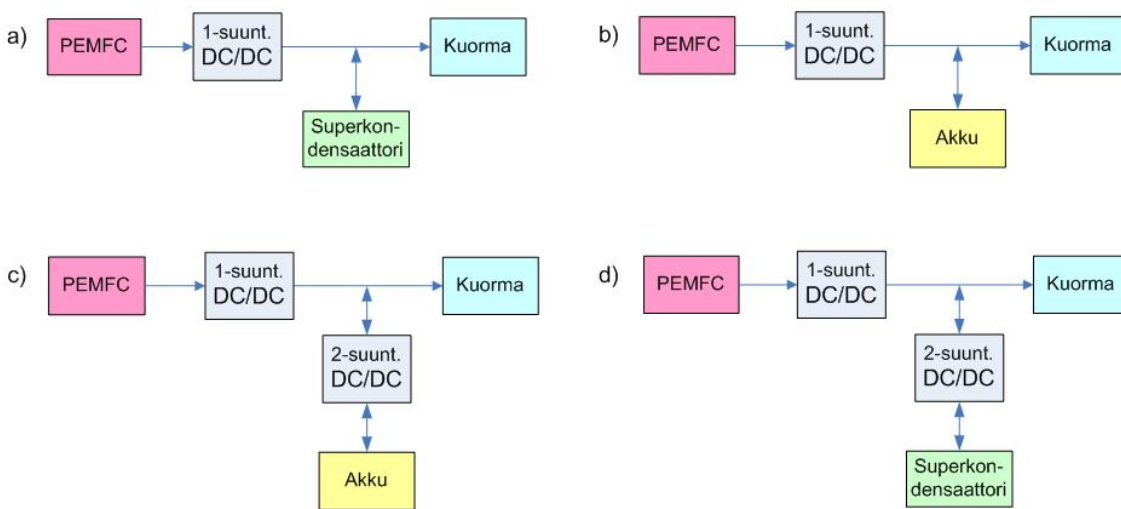


Kuva 3.2. Polttokennolla varustetun passiivisesti kytketyn kaksoishybridijärjestelmän topologiavaihtoehdot: a) PEMFC ja superkondensaattori, sekä b) PEMFC ja akku.

Superkondensaattorin kytkeminen kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen taakse (kuvat 3.1 b., kuva 3.3 d., kuva 3.4 c. ja 3.4 d.) mahdollistaa superkondensaattorin koko varauskapasiteetin käyttämisen tehokkaammin hyväksi. Superkondensaattorin varaus voidaan esittää

$$Q = CV, \quad (3.1)$$

missä C on superkondensaattorin kapasitanssi, ja V jännite. Ilman DC/DC-muunninta kytketyn superkondensaattorin jännite on riippuvainen väyläjännitteestä. Riittävän suuren moottorijännitteen tuottamiseksi väyläjännite on pidettävä tietyissä rajoissa, mikä voi rajoittaa superkondensaattorin varauskapasiteetin täysimittaista käyttöä. DC/DC-muunnin sallii superkondensaattorin jännitteen vaihtelun väyläjännitteestä riippumatta, jolloin superkondensaattorin varauskapasiteettia voidaan käyttää hyödyksi DC/DC-muuntimen toiminta-alueen rajoissa. Superkondensaattorit eivät kestä pitkäaikaisesti maksimikäyttöjännitettään korkeampia jännitteitä, joten DC/DC-muunninta voidaan käyttää myös superkondensaattorin suojaamiseen.



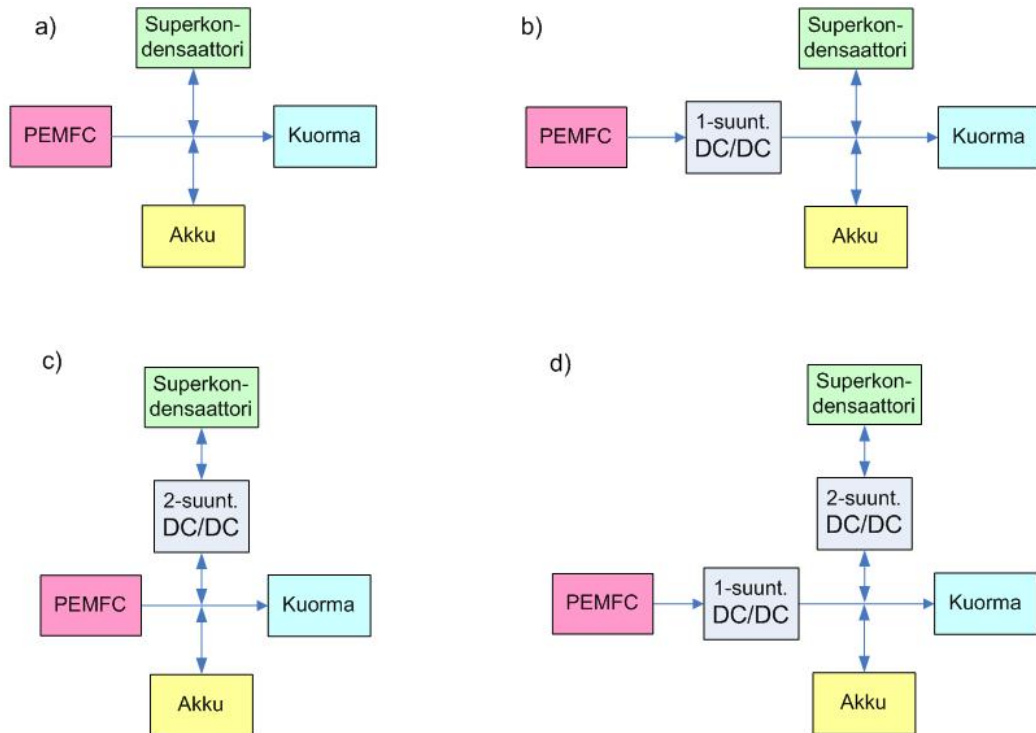
Kuva 3.3. Esimerkkejä aktiivisesti ohjatun polttokennolla varustetun kaksoishybridijärjestelmän topologiavaihtoehdoista: a) PEMFC yksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta ja superkondensaattori, b) PEMFC DC/DC-muuntimen kautta ja akku, c) PEMFC yksisuuntaisen ja akku kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta, d) PEMFC yksisuuntaisen ja superkondensaattori kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta.

Polttokennon kytkeminen DC/DC-muuntimen taakse mahdollistaa polttokennon ohjaamisen. Polttokennon tehotransientin nopeutta saadaan rajattua, mikä on erittäin hyvä asia polttokennon eliniän ja hyötysuhteen kannalta. DC/DC-muunnin myös suojaa kennoa, mikäli ilman tai polttoaineen syöttöön tulee häiriö ja polttokennon jännite laskee nopeasti. Tällaisen häiriön seurauksena virta voisi kulkea väärään suuntaan ja vahingoittaa stackia. Joissakin tapauksissa DC/DC-muuntimessa hävitään kuitenkin tarpeettoman paljon energiaa. Polttokennon ja akun rinnankytkennässä (katso kuva 3.3 b. ja c.) polttokennon tehotransienttien rajoittaminen myös rasittaa voimakkaasti akkua.

Toinen tapa suojata polttokennostack on käyttää diodia polttokennon ja muiden komponenttien välissä. Diodista aiheutuu kuitenkin aina 0,5–1,0 V suuruinen

jännitehäviö. Polttokennostackin jännitteen on oltava siis suuri, jotta jännitehäviön merkitystä voidaan pienentää.

Topologioissa, joissa koko energiavarasto on DC/DC-muuntimen takana (kuva 3.3. c. ja d.), regeneratiivisen jarrutustehon talteenotto voi olla ongelmallista. Riippuen DC/DC-muuntimen säädön nopeudesta, nopean latauspiikin aikana säätöön ei aina ole tarpeeksi aikaa. Tällöin osa jarrutusenergiasta voi jäädä hyödyntämättä.



Kuva 3.4. Esimerkkejä polttokennolla varustetun kolmoishybridijärjestelmän topologiavaihtoehdoista: a) komponentit passiivisesti rinnakkain, b) PEMFC yksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta, c) superkondensaattori kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen takana, d) PEMFC yksisuuntaisen ja superkondensaattori kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta.

Joissakin tapauksissa voidaan kolmoishybridin (kuva 3.4.) superkondensaattori korvata niin sanotulla tehoakulla. Mikäli odotettavissa oleva ajosykli sisältää paljon pitkäkestoisia (useita minuutteja) tehopiikkejä, joihin superkondensaattorin varauskapasiteetti ei riitä, voidaan tehotehdyeltään korkeaksi suunnitellulla tehoakulla saavuttaa sekä riittävän nopea dynaaminen vaste että korkea varauskapasiteetti. Tällöin järjestelmä koostuu polttokennosta, energiatiheydeltään korkeaksi suunnitellusta energia-akusta ja tehotehdyeltään korkeaksi suunnitellusta tehoakusta.

Topologioita 3.1.a, 3.2.b ja 3.4.a on tutkittu ja vertailtu tässä työssä simulointimallin ja kokeellisten mittausten avulla. Mallinnus ja simulointi on raportoitu kappaleessa 4, ja kokeelliset mittaukset kappaleessa 5. Saatuja tuloksia on esitelty kappaleessa 6, ja niitä on analysoitu ja vertailtu kappaleessa 7.

3.2. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden mallinnus

Hybridisoidun polttokennoteholähteen mallinnuksen suunnittelun avuksi on tehty kirjallisuustutkimusta. Tavoitteena on ollut kartoittaa jo olemassa olevia malleja, ja käyttää niitä mahdollisuuksien mukaan apuna omien MATLAB/Simulink-mallien suunnittelussa. Laaditut hybridijärjestelmien mallit on esitelty kappaleessa 4.

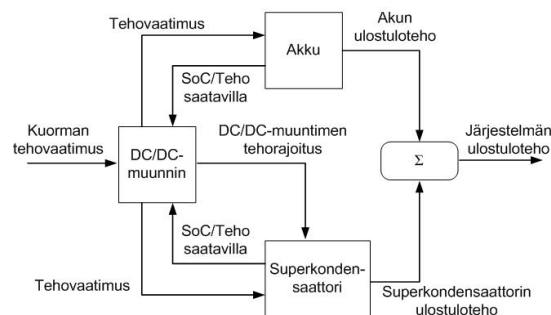
3.2.1. Hybridijärjestelmämallit kirjallisuudessa

Akun ja superkondensaattorin kaksoishybridijärjestelmä

Baisden ja Emadi (2004) ovat tutkineet akun ja DC/DC-muuntimen kautta kytketyn superkondensaattorin muodostamaa kaksoishybridijärjestelmää (katso kuva 3.1.b). Hybriditeholähteen toimintaa on simuloitu MATLAB/Simulink-mallilla.

Mallinnuksessa on käytetty apuna ADVISOR:ia, joka on valmis ajoneuvosimulointityökalu MATLAB/Simulink-ympäristöön. ADVISOR on tarkoitettu nopeaan erilaisten ajoneuvojen (esimerkiksi hybridiajoneuvot ja polttokennoajoneuvot) tehonsiirtojärjestelmien analysointiin. Sillä voidaan testata eri komponenttien parametrien (moottori, akusto, vaihtoehtoiset polttoaineet ja niin edelleen) vaikutuksia ajoneuvon suorituskykyyn, polttoainetalouteen ja päästöihin. ADVISOR:in avulla voidaan esimerkiksi optimoida hybridiajoneuvon tehonsiirron komponenttien koot hyötysuhteen ja suorituskyvyn perusteella. (AVL 2009)

Käytetyn hybridisointimallin lohkokaavio on esitetty kuvassa 3.5. DC/DC-muunnin säätelee kuormalta (moottorilta) tulevan tehovaatimuksen jakautumista akun ja superkondensaattorin kesken. Ainoastaan superkondensaattori on DC/DC-muuntimen takana, jolloin muunnin säätelee varsinaisesti vain superkondensaattorin tehoa (ja akku antaa loput kuorman tarvitsemasta tehosta). Tehon jakautuminen perustuu akun ja superkondensaattorin varaustiloihin (SoC, State of Charge), eli paljonko tehoa on saatavilla kummastakin energiavarastosta.



Kuva 3.5. Hybridisointimallin lohkokaavio. (Baisden, Emadi 2004)

Hybridijärjestelmän mahdolliset toimintamoodit on esitetty taulukossa 3.1. Akun SoC pyritään pitämään koko ajan tasaisesti 0,6–0,7:ssä (varaus on 60–70 % maksimista), mikä on akun eliniän kannalta edullista. Superkondensaattorin annetaan

operoida laajemmalla alueella. Varaustilan laaja vaihtelu ei käytännössä vaikuta superkondensaattorin elinikään, kunhan sen maksimikäyttöjännitettä ei ylitetä (Du Pasquier et al. 2003).

Taulukko 3.1. Järjestelmän mahdolliset toimintamoodit yksinkertaistettusti. (Baisden, Emadi 2004)

Tila	Teholähde	Kuorma	Toiminta	Lyhyt kuvaus toiminnasta
1	Akku & Superkondensaattori	Moottori	Tehopiikki	Superkondensaattori tuottaa tehoa DC/DC-muuntimen ylärajaan asti. Akku tuottaa loput tehosta.
2	Akku	Superkondensaattori & Moottori	Alhainen tehontarve	Akku tuottaa moottorin tarvitseman tehon, ja lataa superkondensaattoria tarvittaessa.
3	Moottori (Generaattori)	Superkondensaattori & Akku	Regeneraatio	Superkondensaattori ladataan täyteen, ja akku ottaa loput tehosta (tai kunnes regeneraatio on ohi).

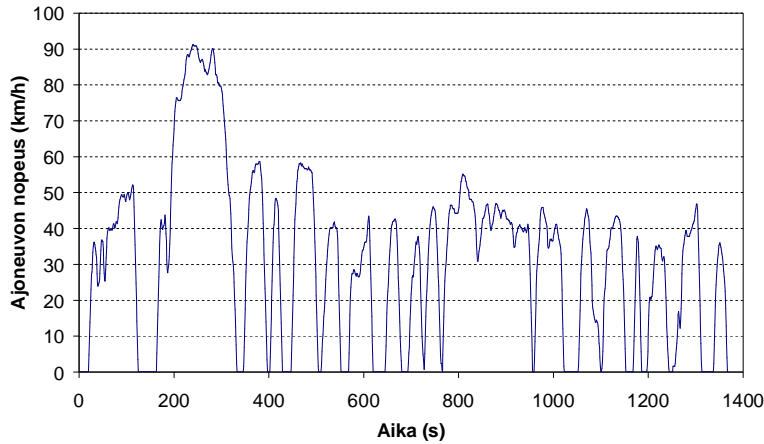
Järjestelmä hyödyntää regeneratiivista jarrutustehoa lataamalla akkua ja superkondensaattoria aina ajoneuvon jarruttaessa. Lataustehon jakautuminen akun ja superkondensaattorin välillä määritetään niin sanotun lookup-taulukon (taulukko 3.2) avulla. Esimerkiksi akun SoC:n ollessa 0,7 (eli 70 % maksimivarauksesta) ja superkondensaattorin 0,8, lookup-taulukko palauttaa arvon 0,75, mikä tarkoittaa lataustehon jakautuvan 75 % akulle ja loput 25 % superkondensaattorille.

Taulukko 3.2. Regeneratiivisen jarrutustehon (latausteho) jakautuminen akun ja superkondensaattorin välillä (I=kaikki akulle) erilaisilla varaustiloilla (SoC). (Baisden, Emadi 2004)

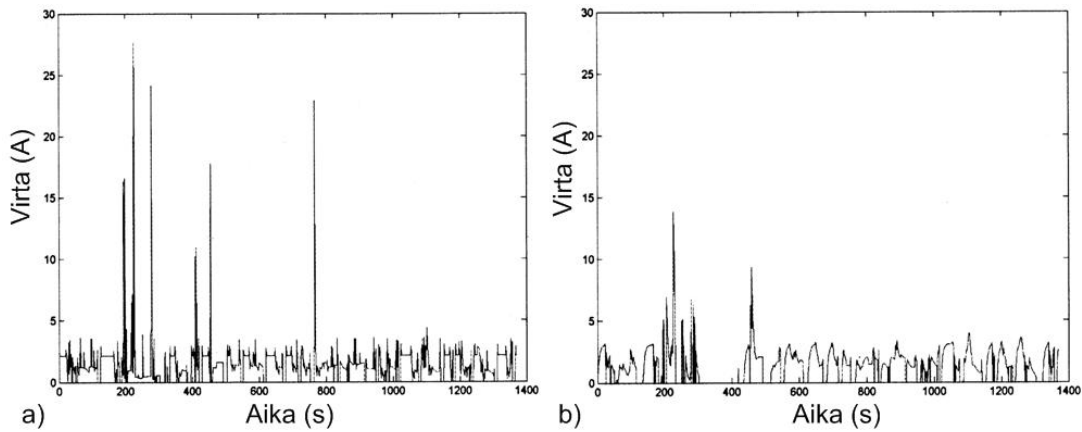
		Akun SoC			
		0,5	0,6	0,7	0,8
Superkonden- saattorin SoC	0	0,5	0	0	0
	0,1	0,5	0	0	0
	0,2	0,5	0,1	0	0
	0,3	0,6	0,1	0	0
	0,4	0,75	0,1	0	0
	0,5	0,9	0,5	0	0
	0,6	1	0,75	0,1	0,25
	0,7	1	0,9	0,5	0,5
	0,8	1	0,9	0,75	0,75
	0,9	1	1	1	0,9
	1,0	1	1	1	1

Järjestelmää kuormitettaessa akun ja superkondensaattorin ulostulotehojen välinen jakautuminen määräytyy superkondensaattorin SoC:n mukaan. Mitä alhaisempi on superkondensaattorin SoC, sitä suuremman osan akku tuottaa vaadittavasta tehosta. Myös kuormitustehon jakautuminen on mallinnettu lookup-taulukon avulla.

Järjestelmää simuloitiin kaupunkiajoa mallintavalla UDDS-ajosykliä (Urban Dynamometer Driving Schedule) erilaisia hybridisointiasteita (36–64 %) käyttäen. UDDS-ajosykli on esitetty kuvassa 3.6. Tuloksia verrattiin vastaavan, pelkkää akkua käyttävän ajoneuvon tuloksiin. Kuvassa 3.7 on esitetty akun läpi kulkeva virta kun akku toimii ainoana energiavarastona, ja kun akku ja superkondensaattori toimivat rinnakkain.



Kuva 3.6. Ajoneuvon nopeus ajan funktiona UDDS-ajosyklissä. (U.S Environmental Protection Agency 2008)



Kuva 3.7. Akun virta kun a) akku toimii ainoana energiavarastona b) akku ja superkondensaattori molemmat toimivat energiavarastona. (Baisden, Emadi 2004)

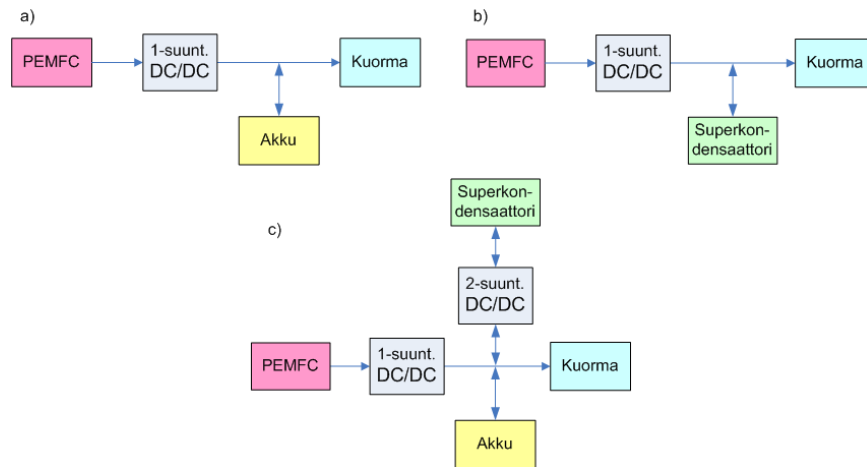
Rinnakkaiskäytöllä virran huippuarvoja saatiin pienennettyä noin puoleen pelkkään akkuun nähden. Lisäksi virtapiikkien lukumäärä on pienempi. Tämä mahdollistaa pienemmän, halvemmän ja hyötysuhteeltaan paremman akun käytön. Myös akun elinikää saadaan näin pidennettyä.

Polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridijärjestelmä

Bauman ja Kazerani (2008) ovat tutkineet ja verranneet keskenään kolmea eri hybridijärjestelmän topologiaa. Vertailun kohteena olivat suorituskyky, polttoainetalous ja järjestelmän hinta. Ajotavan vaikutusta komponenttien elinikään ei tutkittu. Ajoneuvomallit on ohjelmoitu MATLAB/Simulinkilla.

Vertailuun valitut topologiat on esitetty kuvassa 3.8. Akun tai superkondensaattorin kytkeminen suoraan korkeajänniteväylään (jännite 250–400 V) pakottaa käyttämään tiettyä määrää akkuja tai superkondensaattoreita sarjaan kytkettynä. Kytkemällä akku tai superkondensaattori väyläjännitteeseen kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta voidaan akun tai superkondensaattorin jännitteen antaa vaihdella vapaasti

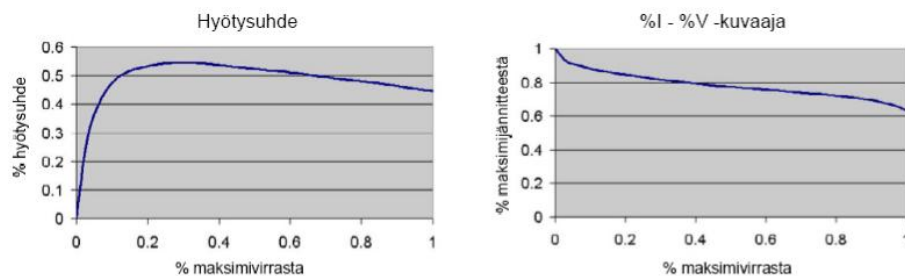
väyläjännitteestä riippumatta. Muuntimen kaksisuuntaisuus mahdollistaa akun lataamisen polttokennon tai regeneratiivisen jarrutustehon avulla. Vaikka kaksisuuntaiset DC/DC-muuntimet tuovat mukanaan monia etuja, on niiden määrä tässä tapauksessa pyritty minimoimaan lisäkustannusten ja -painon, sekä hyötysuhteen pienenemisen takia.



Kuva 3.8. Vertailuun valitut hybridijärjestelmien topologiat a) PEMFC-akku b) PEMFC-superkondensaattori c) PEMFC-akku-superkondensaattori.

Polttokenno on Baumanin ja Kazeranin tutkimissa topologioissa aina DC/DC-muuntimen takana. Yleisesti ottaen tähän on syynä halu suojata polttokennoa tilanteessa, jossa ilman tai polttoaineen syöttöön tulee häiriö, ja sähkövirran olisi mahdollista kulkea väärään suuntaan ja vahingoittaa stackia.

Polttokennon, superkondensaattorin sekä akun mallit perustuvat tyypillisten kaupallisten laitteiden ominaisuuksiin. Polttokennomallin perustana ovat Hydrogenicsin HyPM-polttokennostackin hyötysuhde- ja IV -käyrät (virta-jännite -käyrä). Kuvaajissa virran ja jännitteen yksiköt on muutettu ampeereista ja volteista prosenttiosuuksiksi maksimivirrasta ja -jännitteestä (katso kuva 3.9). Mallissa on oletettu, että kuvaajien muodot säilyvät samanlaisena maksimivirran ja -jännitteen prosenttiosuuden funktiona. Näin ollen samoja $\%V-\%I$ ja $\text{hyötysuhde}-\%I$ -kuvaajia voidaan käyttää erikokoisille polttokennoille. Kutakin polttokennolle tulevaa virtavaatimusta vastaava kennojännite ja hyötysuhde saadaan edellä mainittuihin kuvaajiin perustuvista lookup-taulukoista.



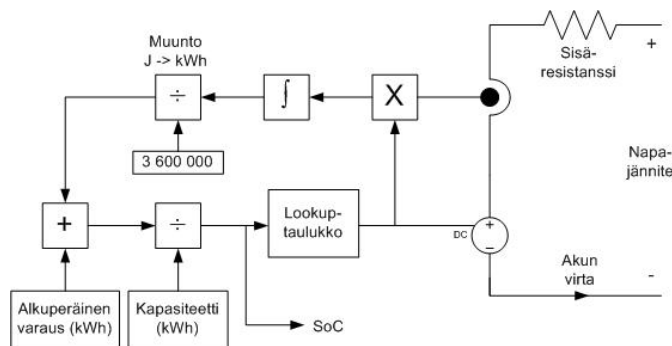
Kuva 3.9. Tyypillisen polttokennon hyötysuhde- ja IV -kuvaajat, joita on käytetty mallin luomisessa (lookup-taulukkona). (Bauman, Kazerani 2008)

Superkondensaattorimalli perustuu Maxwellin BMOD0058 15 V superkondensaattoripakettiin. Koska superkondensaattori on kytketty suoraan 250–400 V korkeajänniteväylään, pitäisi sen maksimijännite olla lähellä 400 voltia. Järjestelmässä 27 pakettia on kytketty sarjaan, jolloin maksimijännite on 405 V. Superkondensaattorin jännitettä kuvataan yhtälöllä

$$v_{uc}(t) = v_{uc}(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_{uc}(\lambda) d\lambda, \quad (3.2)$$

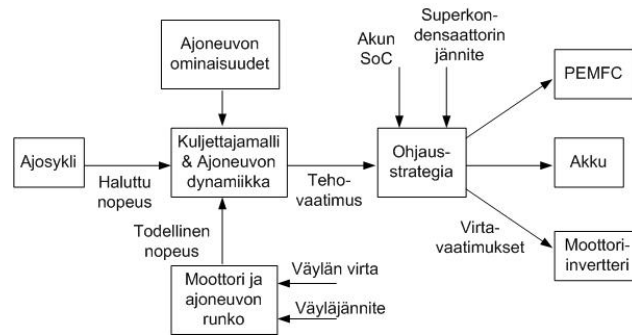
jossa C on superkondensaattorien kokonaiskapasitanssi. Sisäresistanssin aiheuttama jännitehäviö on myös otettu huomioon.

Akkumalli perustuu A123 Systemsin Li-ion ANR26650MI akkuun. Kaksi muuttujaa, sarjaan kytkettyjen ja rinnankytkettyjen akkujen lukumäärä, määräävät kokonaisresistanssin ja %V-SoC-kuvaajan. Kuten polttokennomallissa, %V on prosenttiosuus maksimijännitteestä. Lataus-purku-hyötysuhteen on oletettu olevan keskimäärin 95 %. Hyötysuhde riippuu muun muassa purkuvirran suuruudesta ja sen muutosten nopeudesta. Nopeissa purkuvirran muutoksissa akun hyötysuhde voi olla käytännössä selkeästi nyt oletettua alhaisempi. Akkumalli on esitetty kuvassa 3.10. Mitattu akun virta kerrotaan akun jännitteellä. Saatu teho integroidaan ja muutetaan kilowattitunneiksi, jotta se voidaan summata akun alkuperäiseen varaukseen. Akun varaustila (kWh) jaetaan akun kapasiteetilla, jolloin saadaan akun prosentuaalinen SoC, minkä avulla taas määritetään akun jännite lookup-taulukosta.



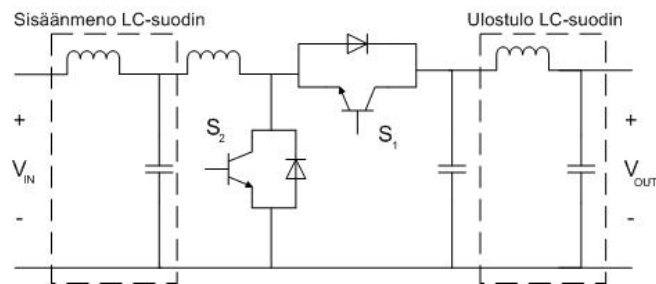
Kuva 3.10. Akun yksinkertaistettu malli. (Bauman, Kazerani 2008)

Polttokennon ja akun kaksoishybridimallissa sarjaan kytkettyjen akkujen lukumäärä on vakio 105 kappaletta, koska akku on kytketty suoraan korkeajänniteväylään. Yksittäisen akun jännitteellä 3,3 V tämä antaa kokonaisjännitteen 346,5 V. Polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridissä kaksisuuntainen DC/DC-muunnin on sijoitettu akun ja korkeajänniteväylän väliin, jolloin akkujännite on asetettu väyläjännitettä alhaisemmaksi. Tällöin sarjaan kytkettyjen akkujen lukumääräksi on määrätty 75 kappaletta, jotta superkondensaattori pystyy saavuttamaan 250 V jännitteen purettaessa. Polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridimallin vuokaavio on esitetty kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Kolmoishybridimallin vuokaavio. (Bauman, Kazerani 2008)

Polttokennoon ja akkuihin kytketyt DC/DC-muuntimet sallivat polttokennon ja akun jännitteen vaihtelevan riippumatta superkondensaattorin jännitteestä. DC/DC-muuntimen tarkka mallinnus on tärkeää, sillä muuntimen dynaamiset häviöt vaikuttavat ajoneuvon polttoainetalouteen, ja muunnin vaikuttaa merkittävästi järjestelmän massaan ja hintaan. Mallinnuksessa käytetty DC/DC-muuntimen piirimalli on esitetty kuvassa 3.12.



Kuva 3.12. Kaksisuuntainen DC/DC-muunnin sisäänmeno- ja ulostulosuotimella. Yksisuuntainen DC/DC-muuntimen tapauksessa kytkin S_1 poistuu. (Bauman, Kazerani 2008)

Simuloinnit suoritettiin käyttämällä kaupunkiajaja mallintavaa FUDS-ajosykliä (Federal Urban Driving Schedule). FUDS on hyvin samankaltainen ajosykli kuvassa 3.5 esitetyn UDDS-ajosyklin kanssa. Simulointitulosten keskiarvoja on esitetty taulukossa 3.3. Polttokennon ja superkondensaattorin kaksoishybridi todettiin huonoimmaksi vaihtoehdoksi sen selvästi korkeimman hinnan johdosta. Polttokenno-akku- ja polttokenno-akku-superkondensaattori-hybridi olivat ominaisuuksiltaan melko lähellä toisiaan. Polttokennon ja akun hybridi on halvempi ja yksinkertaisempi, mutta polttokennon, akun ja superkondensaattorin hybridillä voidaan saavuttaa parempi polttoainetalous. Artikkelissa ei kuitenkaan huomioida tehonsiirron topologian vaikutusta akun ja polttokennon elinikään, ja tätä kautta järjestelmän pääomakustannuksiin. Polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridillä on muita vaihtoehtoja paremmat mahdollisuudet kasvattaa komponenttien elinikää, ja se mahdollistaa myös paremmat systeemiratkaisut polttokennoteholähteessä.

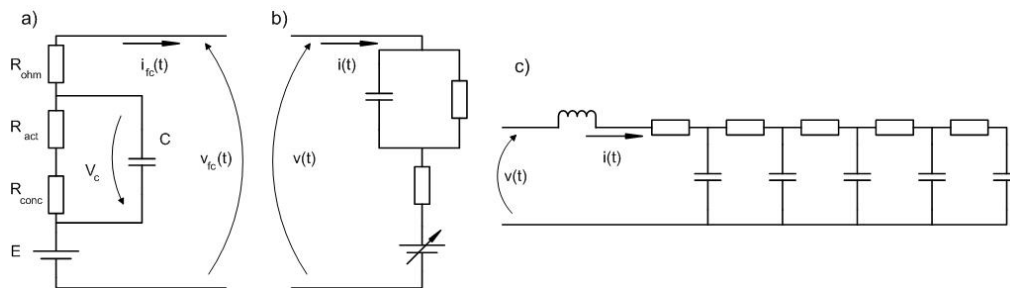
Taulukko 3.3. Simulointitulosten keskiarvoja eri hybridikokoonpanoille (mpgge: miles per gallon gasoline equivalent). (Bauman, Kazerani 2008)

	PEMFC-Akku	PEMFC-Superkondensaattori	PEMFC-Akku-Superkondensaattori
Ajoneuvon massa (kg)	1900	2050	1960
Kiihtyvyys 0-100 km/h (s)	8,6	9,3	10,3
Polttoainetalous (mpgge)	51,5	50,8	52,1
Järjestelmän hinta (USD)	27000	45000	33000

Polttokennon ja sähköisen energiavaran kaksoishybridijärjestelmä

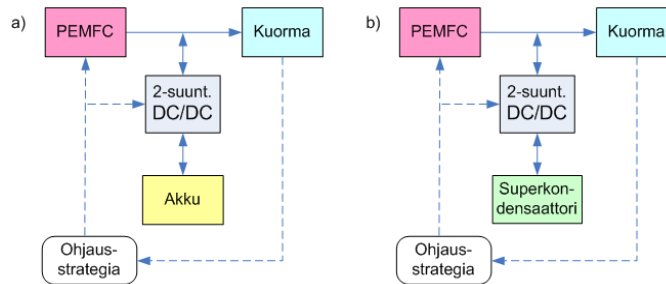
Wenzhong Gao (2005) on tutkinut ja vertaillut erilaisia polttokennon hybridisointeja akun tai superkondensaattorin avulla ajoneuvokäytössä. Kokoonpanot on mallinnettu ja simuloitu käyttäen ADVISOR-simulointityökalua. Vertailun kohteena ovat olleet eri kokoonpanojen polttoainetalous, suorituskyky, huipputeho, paino ja hinta. Myöskään tässä tutkimuksessa komponenttien (polttokenno ja akku) elinikään ei ole kiinnitetty huomiota.

Komponenteille muodostetut dynaamiset mallit on esitetty kuvassa 3.13. Polttokennomallissa jännitelähteen kanssa sarjaan kytketyt vastukset kuvaavat kennon ohmisia, aktiivointi- ja konsentraatiohäviöitä. Akkumallissa SoC:n mukaan jännitettään muuttava jännitelähde on sarjassa akun sisäresistanssin kanssa. Rinnakkain oleva vastus ja kondensaattori mallintavat akun dynaamista luonnetta. Superkondensaattorimallissa viisi kondensaattoria on kytketty rinnakkain sisäresistansseineen.



Kuva 3.13. Komponenteille muodostetut dynaamiset mallit: a) polttokennomalli b) akkumalli c) superkondensaattorin viidennen asteen malli on esitetty kuvassa. (Gao 2005)

Kummassakin vertaillussa kokoonpanossa (kuva 3.14) polttokenno on kytketty suoraan kuormaan, kun taas energiavaro (akku tai superkondensaattori) on DC/DC-muuntimen takana. Tällöin voidaan vapaasti valita akku- ja superkondensaattorikokoonpanon jännitetaso, ja näin ollen myös sarjaan kytkettyjen yksittäisten komponenttien lukumäärä. Toisaalta, kun polttokenno on kytketty suoraan väläjännitteeseen, seuraa se kuormaa orjallisesti ilman mitään puskuria. Järjestelmän ohjattavuuden ja tehollisuuden turvallisuukselta tämä on erittäin huono asia.



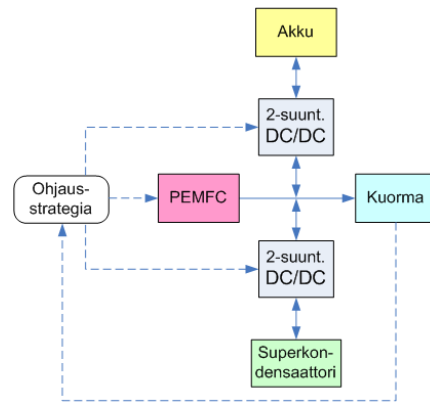
Kuva 3.14. Mallinnetut a) polttokennon ja akun hybridi, sekä b) polttokennon ja superkondensaattorin hybridi.

ADVISOR:iin suunniteltiin kummallekin kokoonpanovaihtoehdolle mallit, joissa energiavarojen tehoa muuteltiin. Malleja testattiin siis erilaisilla hybridisointiasteilla. Simuloinnit ajettiin kolmella eri ajosyklillä: kaupunkiajoa simuloivalla UDDS:lla, moottoritieajoa simuloivalla HWFET:lla (Highway Fuel Economy Test) ja aggressiivisella US06-ajosyklillä.

Yleinen suuntaus kummallakin kokoonpanovaihtoehdolla on, että hybridisointiasteen nostaminen kasvattaa polttoaineen kulutusta. Polttokennon ja akun hybridissä hybridisointiasteen nostaminen parantaa suorituskykyä aina 200 kW:n huipputehoon asti. Tämän jälkeen akkujen koon myötä kasvava ajoneuvon kokonaismassa kääntää suorituskyvyn laskuun. Superkondensaattoreillakin suorituskyvyn paraneminen tasaantuu 200 kW:n yläpuolella.

Superkondensaattorin todetaan pystyvän akkua paremmin tukemaan polttokennoa jyrkkiin tehonmuutoksiin reagoitaessa. Kuitenkin, mikäli superkondensaattoreita käytetään ainoana energiavaroena, esiintyy ajoneuvon käynnistysvaiheessa toimintahäiriöitä. Esimerkiksi simuloinnin pohjana olevan polttokennojärjestelmän käynnistymisaika on noin 10 min. Simuloinnissa käytetyn UDDS-ajosyklin ensimmäisten 10 min aikana ajoneuvo tarvitsee enemmän energiaa, kuin mitä superkondensaattori pystyy tuottamaan. Näin ollen superkondensaattorit eivät pysty polttokennon käynnistyessä tuottamaan kaikkea ajoneuvon tarvitsemää tehoa yksin.

Simulointitulosten perusteella myös polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridi (kuva 3.15) oli otettu jälkeenpäin vertailuun mukaan potentiaalisena vaihtoehtona. Simulointitulokset osoittavat että kokoonpanossa saadaan käyttöön sekä akun että superkondensaattoreiden hyvät puolet (akun korkea energiatiheys ja superkondensaattoreiden korkea tehotiheys).

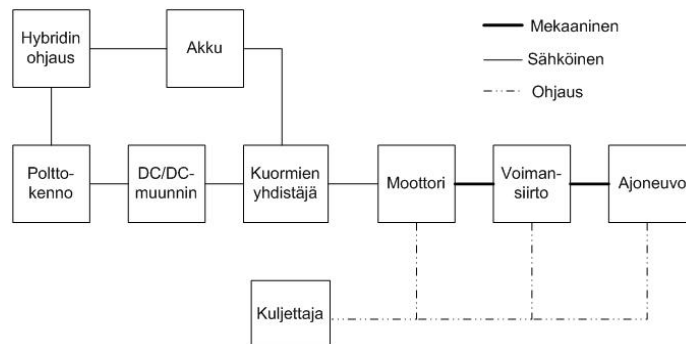


Kuva 3.15. Mallinnettu polttokennon, akun ja superkondensaattorin hybridi.

Polttokennon ja akun kaksoishybridijärjestelmä

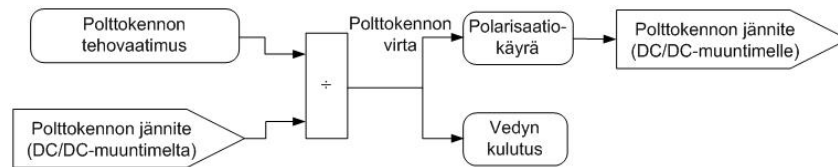
Brown et al. (2008) ovat kehittäneet MATLAB/Simulink-ympäristössä toimivan simulointityökalun polttokennoa käyttävien hybridiajoneuvojen voimansiirron simulointiin. LFM-työkalu (Light, Fast and Modifiable) on aikaisempia simulointityökaluja helpommin muunneltavissa ja joustavampi, sopien näin monien erilaisten hybridiajoneuvojen mallinnukseen.

Mallia ohjataan ajosyklillä (haluttu ajonopeus). Polttokenno on DC/DC-muuntimen takana, mutta akku on kytketty suoraan väläläjännitteeseen. LFM:n perusrakenne on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 3.16.



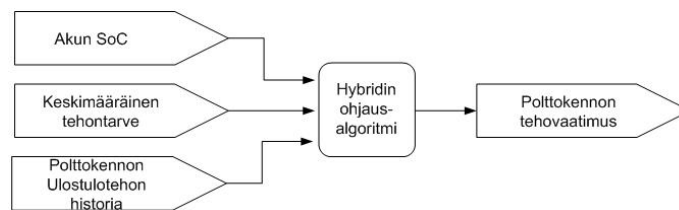
Kuva 3.16. LFM:n yksinkertaistettu osajärjestelmistä muodostuva malli. (Brown et al. 2008)

Osajärjestelmien mallit on esitetty kuvissa 3.17–3.20. Polttokennojärjestelmä (kuva 3.17) saa teho vaatimuksen hybridin ohjausjärjestelmältä, jolloin se käyttää yksinkertaista look-up-taulukkoa ja samaansa teho vaatimusta määrittääkseen tarvittavan ulostulojännitteen. Look-up-taulukko perustuu polttokennostackille kokeellisesti mitattuun polarisaatiokäyrään (polttokennon jännite-virtakuvaaja). Operointiolosuhteita (lämpötila, paine, stoikiometria jne.), joissa taulukko on muodostettu, ei ole mainittu.

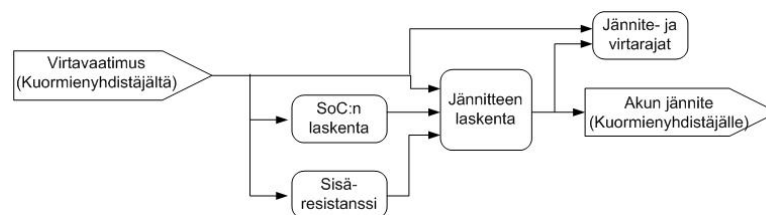


Kuva 3.17. Polttokenno-osajärjestelmä. (Brown et al. 2008)

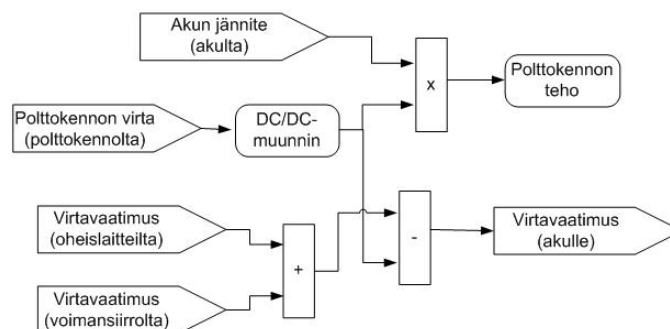
Hybridin ohjausjärjestelmä (kuva 3.18) määrittää polttokennolta otettavan tehon akulta, polttokennolta ja kuormienyhdistäjältä saamiensa arvojen perusteella. Akku-osajärjestelmä (kuva 3.19) laskee akun jännitteen. Kuormienyhdistäjä (kuva 3.20) ottaa moottorin tarvitseman virran ensisijaisesti akulta, kun taas polttokenno tuottaa koko ajan hybridin ohjausjärjestelmän vaatimaa virtaa.



Kuva 3.18. Hybridin ohjaus -osajärjestelmä. (Brown et al. 2008)



Kuva 3.19. Akku-osajärjestelmä. (Brown et al. 2008)

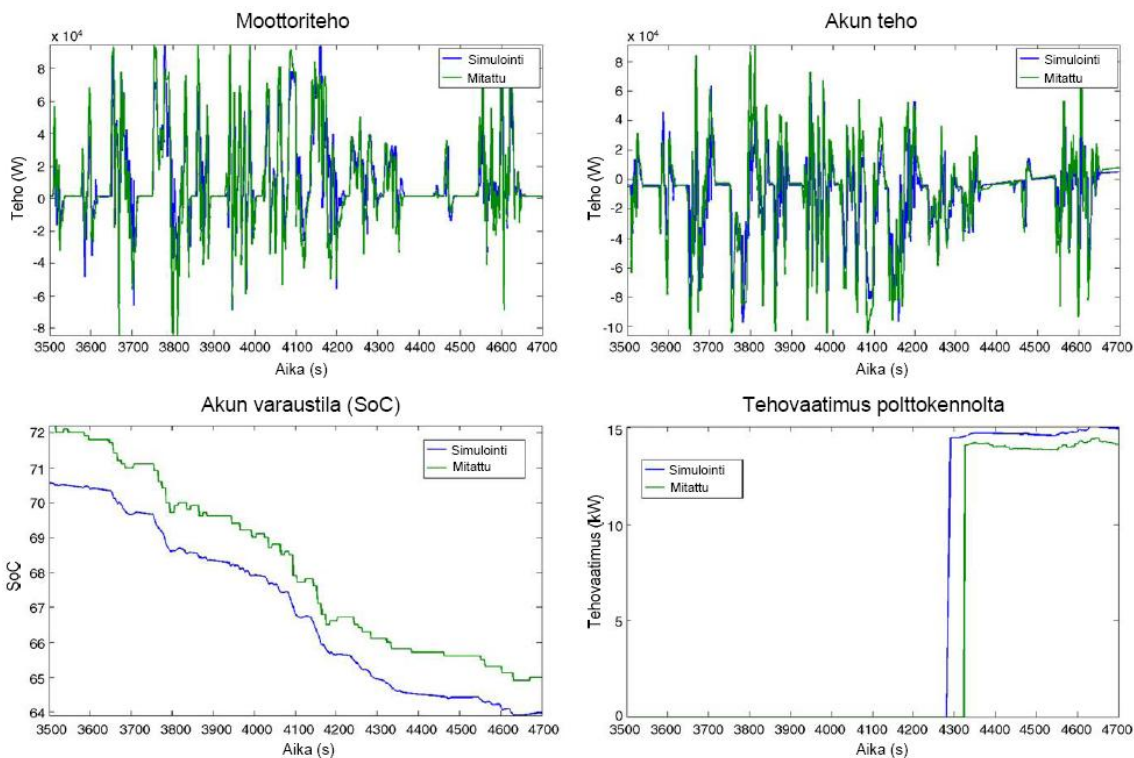


Kuva 3.20. Kuormienyhdistäjä -osajärjestelmä. (Brown et al. 2008)

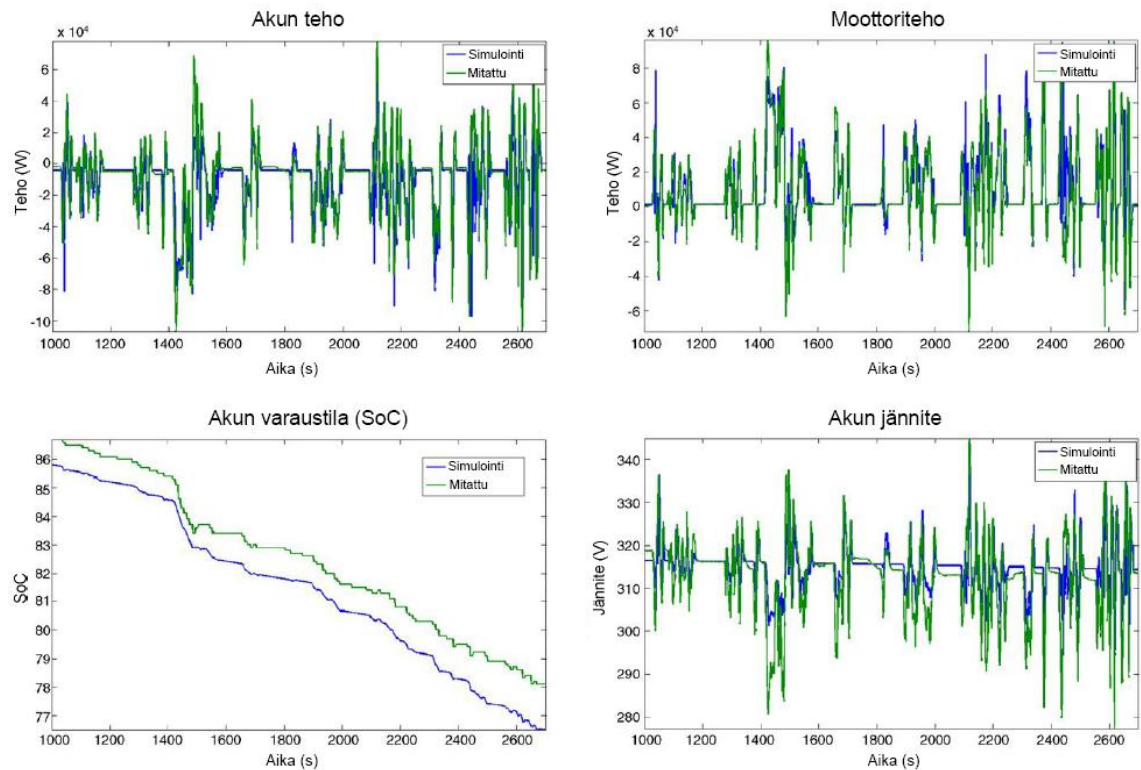
Mallin validointi suoritettiin polttokennohybridibussilla. Järjestelmä koostui 130 kW:n vaihtovirtamoottorista, 19,4 kW:n Ballardin polttokennostackista, ja varauskapasiteetiltaan 60 kWh:n nikkeli-kadmium akustosta. Käytetty

polttokennoteholähde on teholtaan hyvin pieni akun varauskapasiteettiin verrattuna. Käytännössä kyseessä on siis sähköbussi, jossa polttokennoa käytetään toimintasäteen laajentamiseen (englanniksi range extender).

LFM-mallia ja koelaitteistoa ajettiin kumpaakin kuudella erilaisella ajosykliä, ja tuloksia verrattiin keskenään. Ajosykli olivat tyypillisiä bussireittejä, joiden aikana ajoneuvon nopeutta mitattiin GPS:n (Global Positioning System) avulla. Näin kokeellista dataa voitiin verrata samalle ajosykliä simuloituun dataan. Kahden ajosyklin aikana saatuja tuloksia moottoriteholle, akun teholle, akun SoC:lle ja teho vaatimukselle polttokennolta on esitetty kuvissa 3.21 ja 3.22. Kuvissa tarkastellaan vain tiettyjä 1200 ja 1700 sekunnin mittaisia osuuksia koko ajosyklistä. Ajosykliä 1 polttokenno aktivoitui vasta noin 4300 sekunnin kohdalla, kun akun SoC laski riittävän alhaiseksi. Ajosykliä 2 polttokenno ei aktivoitunut kertaakaan, joten teho vaatimus polttokennolta oli koko ajan nolla.



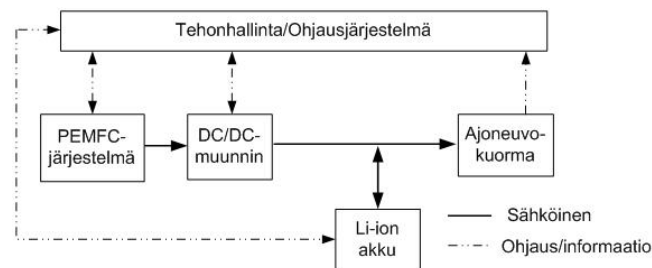
Kuva 3.21. Ajosykli 1 – kokeellisesti mitatut ja simuloitut tulokset. (Brown et al. 2008)



Kuva 3.22. Ajosykli 2 – kokeellisesti mitatut ja simuloitut tulokset. (Brown et al. 2008)

Verrattaessa simuloituja ja kokeellisesti mitattuja tuloksia keskenään, voidaan todeta että LFM-malli pystyy melko luotettavasti kuvaamaan oikean ajoneuvon suorituskykyä. Tämä on saavutettu sillä, että mallinnus perustuu suurilta osin look-up-taulukoihin eli kokeellisesti mitattuun suorituskykyyn.

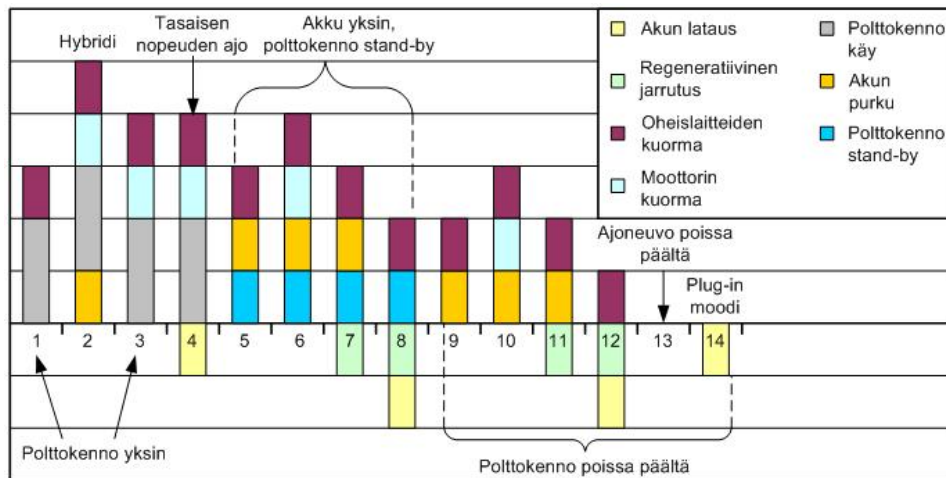
Chandrasekaran, Bi ja Fuller (2008) ovat tutkineet polttokennon ja akun elinikään vaikuttavia tekijöitä hybridimallilla. Mallinnetun hybridijärjestelmän rakenne on esitetty kuvassa 3.23.



Kuva 3.23. Hybridijärjestelmän rakenne. Systeemin osajärjestelmien mallit on esitetty tarkemmin artikkelissa. (Chandrasekaran, Bi & Fuller 2008)

Hybridijärjestelmän mahdolliset tilat on esitetty kuvassa 3.24. Tilat ovat yhdistelmiä järjestelmän komponenttien mahdollisista toimintatiloista. Esimerkiksi tilassa 4 (tasaisen nopeuden ajo) polttokenno käy normaalisti tuottaen ohjelaitteiden ja moottorin vaatiman tehon, sekä ladataan akkuja ”ylimääräisellä” teholla. Järjestelmä vaihtelee tilaansa eri yhdistelmien välillä riippuen moottorin sekä ohjelaitteiden tehontarpeesta, akun SoC:sta ja jännitteestä, sekä polttokennon maksimi- ja minimitehosta (pienin hyväksytty teho). Yleisellä tasolla voidaan todeta, että mitä

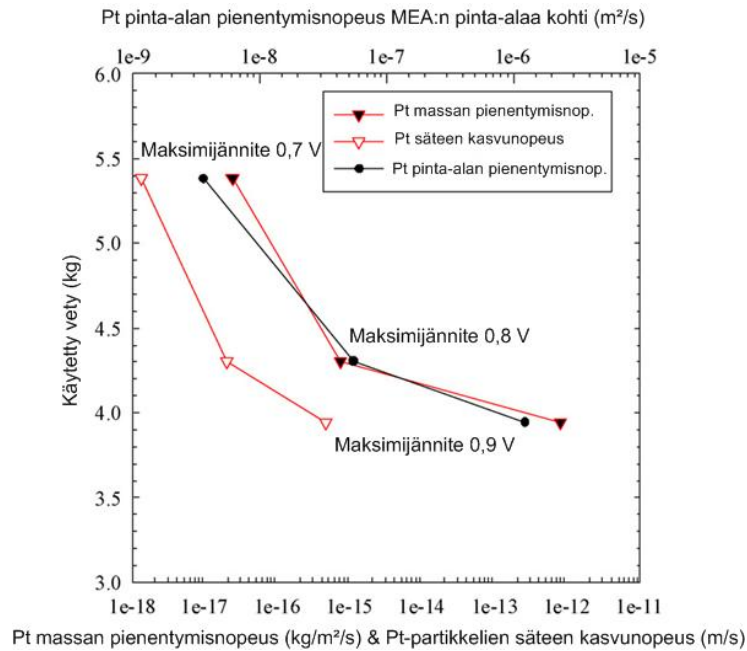
useampaa eri parametria järjestelmän ohjauksessa käytetään, sitä suurempi on mahdollisuus polttoainetalouden parantamiseen ja eliniän optimointiin. Samalla järjestelmän vikaherkyys kuitenkin kasvaa.



Kuva 3.24. Hybridijärjestelmän ja sen komponenttien mahdolliset toimintatilat. (Chandrasekaran, Bi & Fuller 2008)

Kun polttokennoa ajetaan pienillä virrantiheyksillä, jännite kasvaa lähelle avoimen piirin jännitettä. Korkea jännite vauhdittaa platinakatalyytin hajoamista ja liukenemista, sekä kantajana toimivan hiilijauheen korroosiota. Mitä korkeampi polttokennon jännite, sitä nopeampaa on katalyytin hajoaminen. Jos jännitettä taas rajoitetaan, käytetään polttokennoa tällöin matalammalla hyötysuhteella. Myös korkeassa potentiaalissa tapahtuvat nopeat jännitteenvaihtelut nopeuttavat katalyytin hajoamista.

Mallia ajettiin tyypillistä kaupunkiajoa mallintavalla FTP-ajosyklillä (Federal Test Procedure), josta saadut tulokset on esitetty. Polttokennon hyötysuhteen ja eliniän yhteyden havainnollistamiseksi polttokennon jännitettä rajoitettiin. Jännitteen maksimiarvoa vaihdeltiin 0,7 V ja 0,9 V välillä. Platinan hajoamistermit vedynkulutuksen funktiona kullekin maksimijännitteelle on esitetty kuvassa 3.25. Tuloksista voidaan nähdä merkittävä vedynkulutuksen nousu polttokennon maksimijännitteen laskiessa. Tästä seuraa kuitenkin myös platinan hajoamisen hidastuminen, ja näin ollen pidempi polttokennon elinikä.



Kuva 3.25. Platinan hajoaminen vedynkulutuksen funktiona. (Chandrasekaran, Bi & Fuller 2008)

3.2.2. Hybridijärjestelmämallien yhteenveto

Tarkasteltujen hybridijärjestelmien pääkohdat on koottu taulukkoon 3.4. Taulukossa on esitetty lähteessä tarkastellun järjestelmän, polttokennoteholähteen ja sähköisten energiavarastojen (ESS) koot. Järjestelmän hybridisointiaste on energiavaraston osuus koko järjestelmän (PEMFC ja ESS) tehosta. Myös käytetyt simulointityökalut, mallinnuksen lähestymistapa, simuloinnissa käytetyt ajosykliit, mitatut parametrit ja keskeiset tulokset on esitetty. Puoliempiirinen lähestymistapa tarkoittaa kokeellisen datan (esimerkiksi lookup-taulukot) käyttöä osana mallia, kun teoreettinen malli perustuu ainoastaan laskettuun dataan.

Taulukko 3.4. Hybridijärjestelmien mallinnusartikkelien yhteenveto.

	Baisden & Emadi 2004	Bauman & Kazerani 2008	Wenzhong Gao 2005	Brown et al. 2008	Chandrasekaran, Bi & Fuller 2008
Järjestelmän koko	64 kW		136-223 kW	130 kW	110 kW
PEMFC -		35-75 kW	50 kW	19.4 kW	90 kW
ESS	Lyijy Akku + Superkondensaattori	Li-ion akku + Superkondensaattori	86 kW-173 kW Lyijy Akku/Superkondensaattori	60 kWh Ni-Cd	20 kW Li-ion
Hybridisointi-aste (tehosuhde)	36-64 %		63-78 %	85 %	18 %
Simulointi-työkalut	Mattlab/Simulink, ADVISOR	Mattlab/Simulink	Mattlab/Simulink, ADVISOR	Mattlab/Simulink, LFM	
Lähestymistapa	Puoliempiirinen	Puoliempiirinen	Puoliempiirinen	Teoreettinen/Puoliempiirinen	Teoreettinen
Käytetty ajosykli	UDDS	FUDS	UDDS, HWFET, US06	6 erilaista oikeaa bussireittiä	FTP
Mitatut parametrit	Akun ja superkondensaattorin virta sekä SoC, polttoaineenkulutus, ajoneuvon suorituskyky.	PEMFC:n ja ESS:n kokoonpanojen sekä kokojen optimointi ja vertailu polttoainetalouden, suorituskyvyn, massan ja hinnan suhteen. Akun virta.	Ajoneuvon suorituskyky, PEMFC:n nettoteho, akun/superkondensaattorin virta ja SoC, polttoaineenkulutus.	Mootoriteho, akun teho, akun SoC, tehovaatimus PEMFC:ita.	Mootoriteho, stackin kennojännitteet, akun teho ja SoC, akun kennojännitteet, Pt-katalyytin stabiilisuus.
Keskeiset tulokset	Rinnakkaiskäytöllä virran huippuarvoja saatiin pienennettyä noin puoleen pelkkään akkuun nähden. Lisäksi virtapiikkien määrä on pienempi.	Kolmesta vertailusta kokoonpanosta PEMFC-superk. selvästi kallein, PEMFC-akku halvin ja yksinkertaisin mutta PEMFC-akku-superk:illa parempi polttoainetalous ja pidempi akun elinikä.	Superk. pystyy akkua paremmin tukemaan PEMFC:a jyrkissä tehonmuutoksissa, mutta sen kapasiteetti ei riitä yksin PEMFC:n käynnistystilanteissa. PEMFC-akku superk:illa saadaan käyttöön molempien en.varastojen hyvät puolet.	LFM-mallinnustyökalulla pystytään melko luotettavasti kuvaamaan oikean ajoneuvon suorituskykyä.	Mitä alemmas PEMFC:n maksimijännite rajoitetaan, sitä korkeampi vedynkulutus, mutta pidempi PEMFC:n elinikä.

3.3. Hybridisoitujen polttokennoteholähteiden kokeellinen karakterisointi

Simulointimallien tavoin myös kokeellisten mittausten suunnittelun tueksi on tehty kirjallisuustutkimusta. Tavoitteena on ollut selvittää minkälaista kokeellista tutkimustyötä ajoneuvokäytön polttokennojärjestelmien toimintaan, ja niiden hybridisointiin liittyen on tehty. Jo tehtyä tutkimusta on pyritty käyttämään apuna kokeellisia mittauksia suunniteltaessa. Omat kokeelliset mittaukset sekä niiden tulokset on raportoitu kappaleissa 5. ja 6.

3.3.1. Hybridijärjestelmien kokeellinen karakterisointi kirjallisuudessa

Polttokennoteholähteen dynamiikka

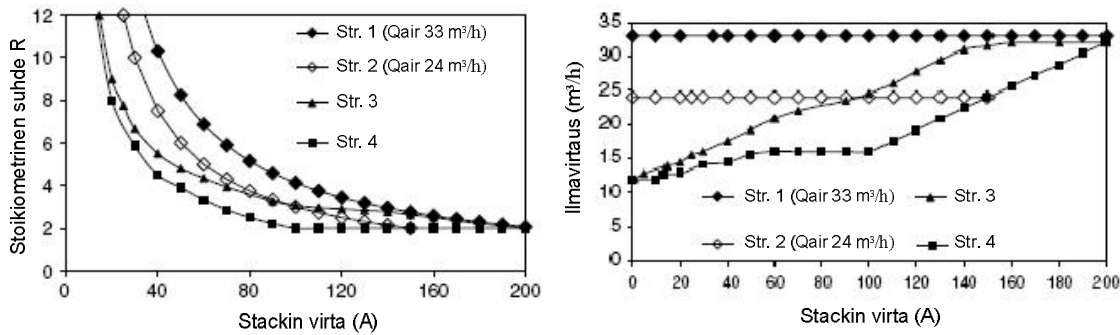
Corbo, Migliardini ja Veneri (2008a) ovat tutkineet reaktantti-ilman hallinnan vaikutuksia PEMFC-stackin toimintaan. Tarkoituksena oli selvittää, miten erilaiset ilmakompressorin ohjausstrategiat vaikuttavat 20 kW vety/ilma-polttokennostackin kennojännitteiden tasaisuuteen ja polttokennojärjestelmän hyötysuhteeseen.

Mittauksissa käytettiin ajoneuvosovelluksia simuloivaa ajosykliä, jossa kuormavirran transienttien jyrkkyyttä vaihdeltiin välillä 2–50 A/s, maksimivirran ollessa 240 A. Stackin lämpötila pidettiin mittausten aikana alle 330 K:ssa (57 °C), ja paine alle 150 kPa:ssa.

Ilmanhallinnan strategia perustuu vedyn ja ilman toteutuneen ja teoreettisen stoikiometrian suhteen säätämiseen polttokennon virran funktiona. Kyseinen suhde on artikkelin kirjoittajien tässä yhteydessä määrittelemä, joten se ei ole mikään yleisesti käytetty suure. Tämä stoikiometrinen suhde voidaan esittää

$$R = R_{eff} / R_{stoich} , \quad (3.3)$$

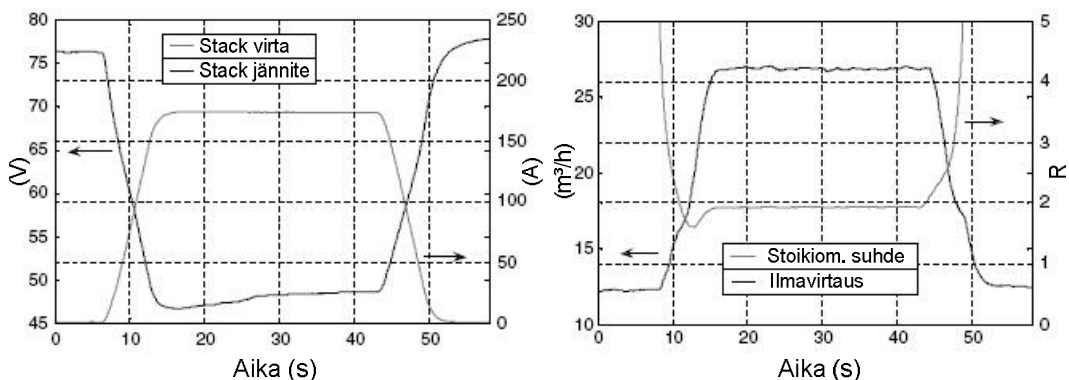
missä R_{eff} on toteutunut ilman ja vedyn massavirtojen suhde, ja R_{stoich} on laskennallinen ilman ja vedyn suhde, joka tarvitaan vedyn hapettumisreaktiossa. Tutkitut neljä strategiaa on esitetty kuvassa 3.26. Strategioissa 1 ja 2 (kuvaajat 1 ja 2) ilmavirtaus on vakio (24 ja 33 m³/h) virran funktiona. Strategiassa 3 ilmavirtaus kasvaa melko lineaarisesti 150 A:iin asti, jonka jälkeen ilmavirtaus on vakio. Strategiassa 4 stoikiometrinen suhde pysyy vakiona ($R = 2$) yli 100 A virroilla, ilmavirtauksen kasvaessa samalla lineaarisesti.



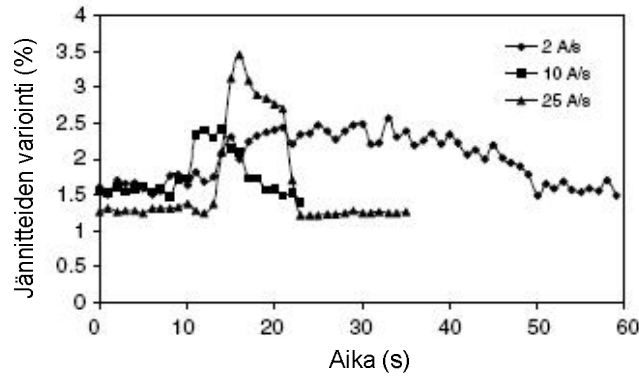
Kuva 3.26. Stoikiometrinen suhde stackin virran funktiona, ja ilmavirtaus stackin virran funktiona eri ohjausstrategioilla. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

Strategia 4 on järjestelmän hyötysuhteen kannalta edullisin ohjausstrategia. Ilmavirtaus on riittävä varmistamaan normaali stackin toiminta steady-state-olosuhteissa. Tällä strategialla suoritettiin dynaamisia testejä yksinkertaisella ajosyklillä, jossa on kiihdytysvaihe (vuorotellen arvoilla 2, 10 ja 25 A/s), vakiovirran vaihe 160 A:ssa, ja jarrutusvaihe. Kuvassa 3.27 on esitetty stackin jännitteen ja virran, sekä stoikiometrisen suhteen ja ilmavirtauksen käyttäytyminen nopeimman kiihdytyksen (25 A/s) syklillä. Kiihdytysvaiheen aikana jännite putoaa noin 76 voltista 47 volttiin, jonka jälkeen se tasaisen virran aikana nousee hitaasti muutamalla voltilla. Jännite ei pysy vakiona vakiovirralla, koska stoikiometrinen suhde putoaa alle kahteen kiihdytysvaiheen lopussa, ja ilmaa ei pystytä toimittamaan tasaisesti kaikille kennoille. Hitaammilla (2 ja 10 A/s) kiihdytyksillä kompressori pysyi paremmin virtatransienttien mukana.

Ajon aikana mitattiin myös yksittäisten kennojen jännitteitä. Kennojännitteiden keskinäinen variointi ajosyklin aikana eri virran muutosnopeuksilla on esitetty kuvassa 3.28. Kuvaajista nähdään selvemmin ilmavirtauksen riittämättömyyden vaikutus kennojännitteisiin. Kiihdytyksen loppuvaiheessa ilmaa ei saada toimitettua tasaisesti kaikille kennoille ja kennojännitteiden vaihtelu lisääntyy.



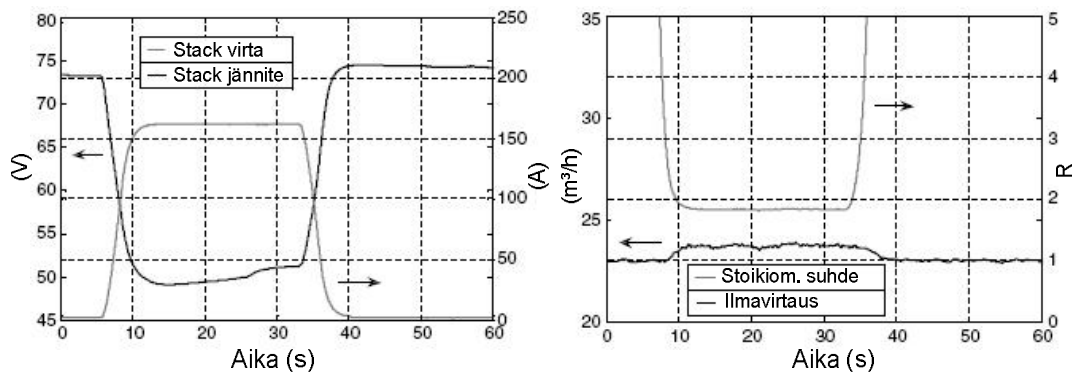
Kuva 3.27. Strategia 4. Stackin virta ja jännite, sekä stoikiometrinen suhde ja ilmavirtaus 25 A/s ajosyklin aikana. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)



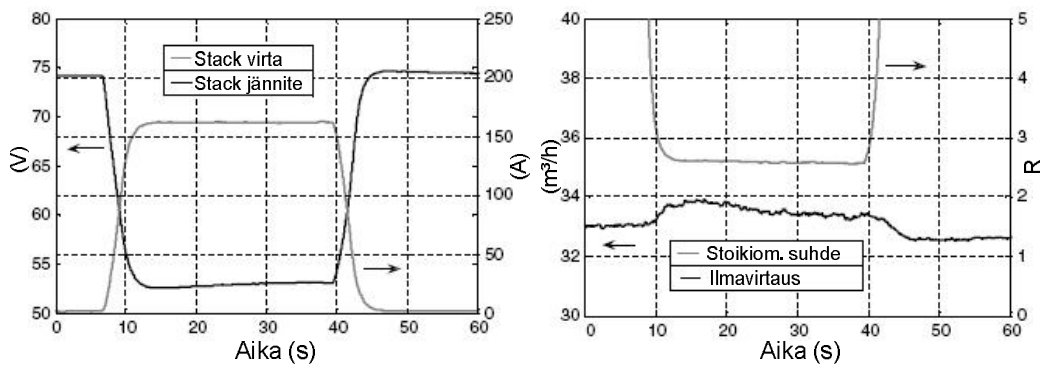
Kuva 3.28. Yksittäisten kennojännitteiden keskinäinen variointi ajosyklin aikana eri virran muutosnopeuksilla. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

Strategioiden 1 ja 2 (vakio ilmavirtaus) avulla tarkasteltiin kompressorin ja polttokennostackin toimintaa nopeammin muuttuvalla kuormalla. Näillä strategioilla ilmavirtaus on korkeampi, joten se pysyy riittävänä suuremman osan ajasta. Järjestelmän hyötysuhde kuitenkin kärsii, kun virtausta pidetään pienillä virroilla tarpeettoman korkeana. Lisäksi tämä kuivattaa kennoa, jos ajo on pidempi. Kuvassa 3.29 on esitetty 50 A/s virta-askeleella strategialla 2 (virtaus 24 m³/h) saadut tulokset. Stackin jännitteen minimiarvo syklin aikana on noin 49 voltia, josta se hitaasti nousee 51 volttiin. Tälle ei kuitenkaan löydy selitystä stoikiometrisesta suhteesta, sillä se on koko ajan halutulla tasolla. Kuvassa 3.30 on esitetty vastaavat tulokset strategialle 1 (virtaus 33 m³/h). Vakiovirtavaiheen aikana stackin jännitteessä ei nähdä nyt samanlaista pudotusta, vaan jännite pysyy lähes vakiona. Stoikiometrinen suhteen arvot ovat halutulla tasolla ($R = 2,5, 160 \text{ A}$).

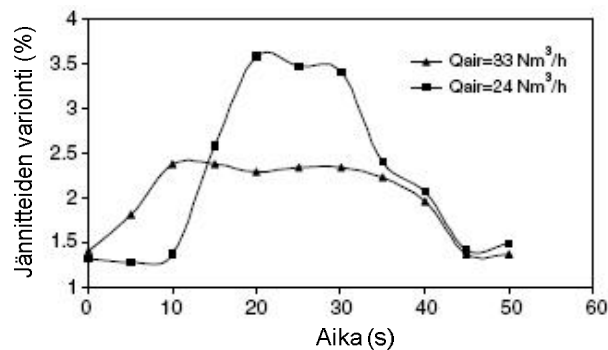
Sama eroavaisuus stackin suorituskyvyssä voidaan havaita myös kennojännitteistä. Kuvassa 3.31 on esitetty kennojännitteiden keskinäinen variointi ajosyklin aikana ohjausstrategialla 1 ja 2. Nopeammalla ilmavirtauksella kennojännitteiden vaihtelu on kiihdytysvaiheen aikana yli prosenttiyksikön verran pienempää. Tämä viittaa siihen, että nopeiden virtavaihteluiden aikana tarvitaan selvästi korkeampia stoikiometrisen suhteen arvoja kuin steady-state -tilassa tai hitailla virranvaihteluilla. Muussa tapauksessa polttokennon suorituskyky putoaa nopeissa virranvaihteluissa ja elinikä lyhenee.



Kuva 3.29. Strategia 2. Stackin virta ja jännite, sekä stoikiometrinen suhde ja ilmavirtaus 50 A/s ajosyklin aikana. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

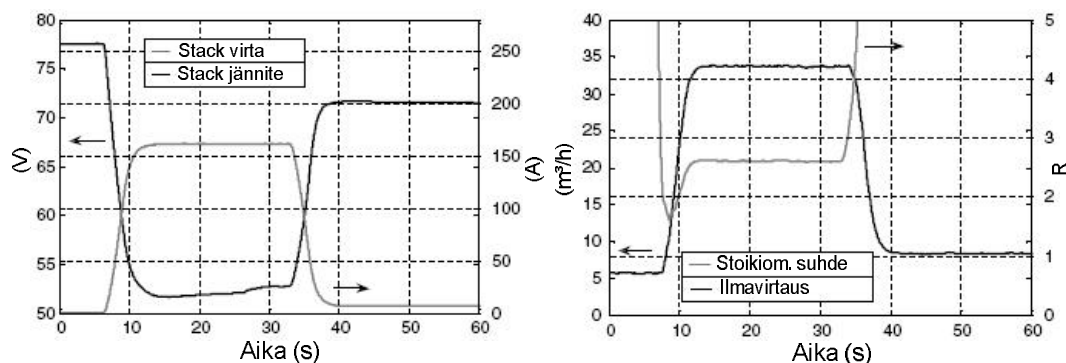


Kuva 3.30. Strategia 1. Stackin virta ja jännite, sekä stoikiometrinen suhde ja ilmavirtaus 50 A/s ajosyklin aikana. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

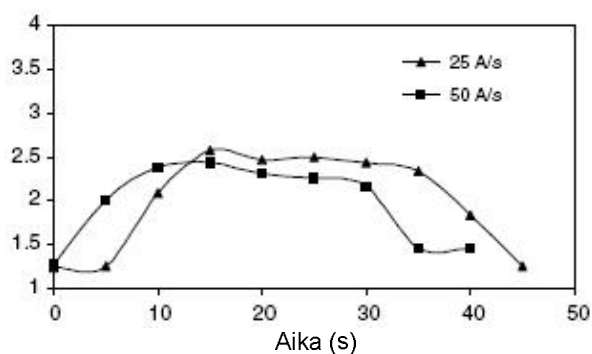


Kuva 3.31. Yksittäisten kennojännitteiden keskinäinen variointi 50 A/s ajosyklin aikana strategioilla 1 ja 2. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

Jotta voitaisiin löytää paras mahdollinen kompromissi kompressorin tehontarpeen ja polttokennostackin dynaamisen suorituskyvyn välillä, ohjausstrategiaa 3 testattiin 25 A/s ja 50 A/s ajosykleillä. Kyseinen ohjausstrategia pyrkii pitämään stoikiometrisen suhteen korkeampana kuin strategia 4 ($R = 2,5$, 160 A virralla), mutta kuitenkin ohjaa ilmavirtausta pienillä virroilla pienemmäksi. Stackin jännitteestä (kuva 3.32) nähdään, että jännitteen käyttäytyminen on melko normaalia 50 A/s ajosyklillä. Stoikiometrinen suhde tippuu vain lyhyeksi hetkeksi hieman alle kahden, minkä jälkeen haluttu arvo saavutetaan jälleen melko nopeasti. Kuvasta 3.33 nähdään, että polttokennostackin toiminta säilyi kohtuullisen hyvänä vielä 50 A/s ajosyklilläkin. Kennojännitteiden vaihtelu kiihdytysvaiheen aikana on noin 2,5 %.



Kuva 3.32. Strategia 3. Stackin virta ja jännite, sekä stoikiometrinen suhde ja ilmavirtaus 50 A/s ajosyklin aikana. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)



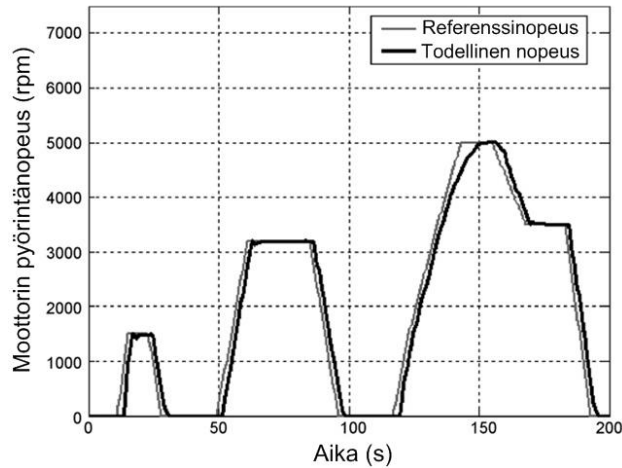
Kuva 3.33. Yksittäisten kennojännitteiden keskinäinen variointi 25 A/s ja 50 A/s ajosyklin aikana strategialla 3. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008a)

Polttokennon dynaamisessa toiminnassa kompressorin ohjausstrategia siis vaikuttaa sekä yksittäisten kennojen jännitevaihteluun (ja siten stackin luotettavuuteen), että järjestelmän hyötysuhteeseen. Ohjausstrategia 3 tuottaa parhaan kompromissin nyt tutkittujen strategioiden välillä. Suurilla virroilla stoikiometrista suhdetta ohjataan hieman steady-state -tilassa tarvittavaa suhdetta korkeammaksi, jotta pystytään paremmin vastaamaan nopeisiin virranvaihteluihin.

Polttokennon ja akun kaksoishybridijärjestelmä

Corbo, Migliardini ja Veneri (2008b) ovat kokeellisesti tutkineet myös ajoneuvokäyttöön tarkoitetun 30 kW:n polttokennohybridijärjestelmän dynaamisia ominaisuuksia. Järjestelmä koostui lyijyakuista ja DC/DC-muuntimen kautta korkeajänniteväylään kytketystä 20 kW:n PEMFC-stackista.

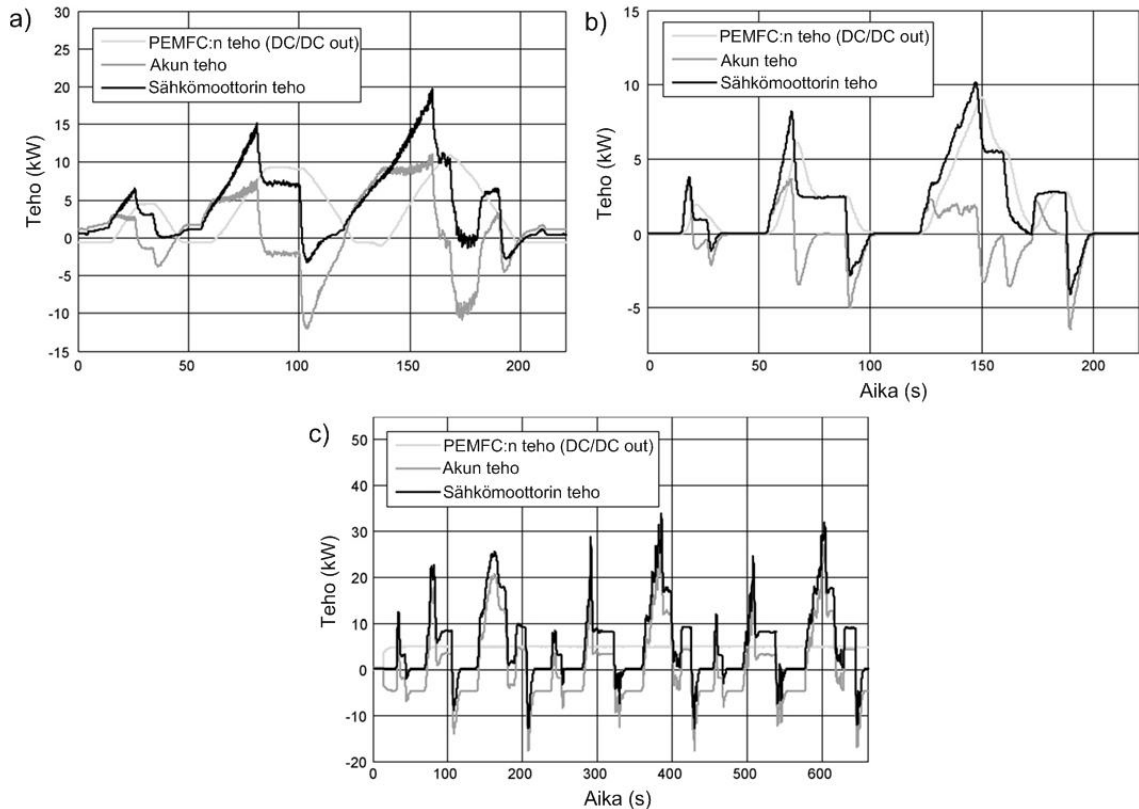
Kokeellinen testaus suoritettiin laboratoriotestipenkissä käyttäen eurooppalaista R40-ajosykliä dynaamisena kuormana. R40 sisältää kolme erillistä kiihdytys- ja jarrutusjaksoa, ja se mallintaa tyypillistä kaupunkiajoa. Hybridisoinnin astetta muutettiin, ja järjestelmää analysoitiin erilaisilla kuormavirran muutosnopeuksilla. Sekä koko järjestelmän, että eri osajärjestelmien hyötysuhteita arvioitiin. Hybridisointiasteen vaikutusta komponenttien elinikään ei arvioitu. Moottorin pyörintänopeus ajan funktiona R40-ajosykliissä on esitetty kuvassa 3.34.



Kuva 3.34. Moottorin pyörintänopeus ajan funktiona R40-ajosyklissä. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008b)

Aluksi pelkkää polttokennojärjestelmää ajettiin R40-ajosyklillä muunnellen ajosyklissä esiintyvien kuormavirran vaihteluiden jyrkkyyttä (5 A/s, 10 A/s ja 50 A/s). Polttokennostackin dynaamista suorituskykyä analysoitiin mittaamalla yksittäisten polttokennojen jännitettä, eli stackin sisäistä jännitejakaumaa, ajosyklien aikana. Saatuja tuloksia käytettiin akun ja polttokennon välisen hybridisoinnin tason, sekä katodin ilmavirtauksen hallintastrategian suunnitteluun.

Tämän jälkeen järjestelmälle valittiin kolme ohjausstrategiaa, joissa kussakin akun ja polttokennon välisen hybridisoinnin taso oli erilainen. Ensimmäisessä mittauksessa järjestelmää ajettiin R40-ajosyklillä, jossa kuormavirta vaihteli kiihdytystilanteissa nopeudella 5 A/s. Ohjausstrategiana oli antaa ajoneuvon toimia käynnistyksen yhteydessä ja osakuormilla ajettaessa pelkästään akkujen tarjoamalla teholla. Kun moottorin vaatima teho nousee yli puoleen moottorin maksimitehosta, polttokenno tulee mukaan ja seuraa ajosyklin muutoksia ladataen samalla akkuja. Toisessa mittauksessa kuormavirta vaihteli kiihdytystilanteissa nopeudella 10 A/s. Käynnistyksestä alkaen suurin osa moottorin tehontarpeesta otettiin polttokennolta, kun akuilta otettava teho oli rajoitettu 30 %:iin tehontarpeesta kiihdytysten aikana. Kolmannessa mittauksessa kuormavirta vaihteli kiihdytystilanteissa nopeudella 50 A/s. Nyt polttokennon annettiin operoida koko ajosyklin ajan vakioteholla (5 kW DC/DC-muuntimen ulostulossa) akkujen tuottaessa kaikki dynaamiset tehontarpeet. Kolmella eri ohjausstrategialla mitatut moottoriteho, akun teho ja polttokennon nettoteho (DC/DC-muuntimen ulostuloteho) on esitetty kuvassa 3.35.



Kuva 3.35. Sähkömoottorin teho ja tehon jakautuminen polttokennon ja akun välillä ajosyklin aikana a) ensimmäisessä mittauksessa, b) toisessa mittauksessa ja c) kolmannessa mittauksessa. (Corbo, Migliardini & Veneri 2008b)

Tuloksista voidaan havaita selkeä ero PEMFC:n tehotransienteissa eri ohjausstrategioiden välillä. Akun roolin ollessa pieni (kuva 3.35 a.) PEMFC joutuu vastaamaan järjestelmän tehonmuutoksiin, vaikkakin pienellä viiveellä. Akun roolin ollessa suuri (kuva 3.35 c.) PEMFC saa toimia vakioteholla. Tämä on edullista sekä polttokennon eliniän, että järjestelmän hyötysuhteen kannalta. Mikäli artikkelissa tutkittuun järjestelmään otettaisiin mukaan akun lisäksi vielä superkondensaattori, saisi myös akku toimia hitaammin tehonmuutoksien. Tällöin myös akun elinikää saataisiin kasvatettua.

Kullekin ohjausstrategialle laskettiin hyötysuhteet polttokennojärjestelmälle, DC/DC-muuntimelle ja sähkömoottorille, sekä näiden perusteella hyötysuhde koko järjestelmälle. Akun lataus/purku-hyötysuhde on oletettu kaikissa mittauksissa 100 %. Hyötysuhteet on koottu taulukkoon 3.5.

Taulukko 3.5. Järjestelmälle lasketut hyötysuhteet.

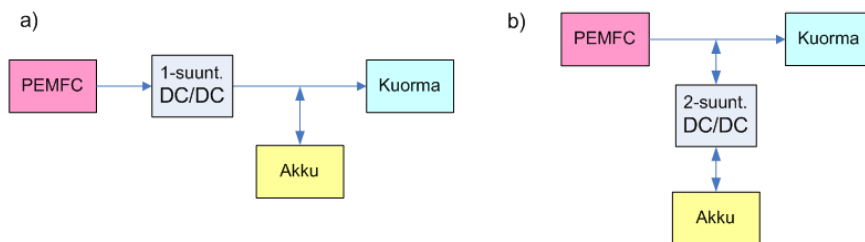
Hyötysuhde (%)	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3
Polttokenno	46	45	48
DC/DC	78	77	84
Sähkömoottori	74	74	75
Koko järjestelmä	27	26	30

Mittausten 1 ja 2 välillä ei ole nähtävissä oleellista eroa. Mittauksessa 3, jossa hybridisoinnin aste oli kaikista korkein (akun rooli suurin) ainoa selvä ero muihin tuli DC/DC-muuntimen hyötysuhteessa. Myös polttokennojärjestelmän hyötysuhde oli hieman muita korkeammalla tasolla. Seurauksena myös järjestelmän kokonaishyötysuhde oli vertailun korkein (30 %). Nämä hyötysuhteet eivät ole suoraan verrattavissa esimerkiksi polttomoottoreille yleisesti ilmoitettuihin arvoihin (noin 20–25 %), sillä käytetty ajosykli on erilainen.

Ouyang et al. (2006) ovat tutkineet kokeellisesti erilaisten tehonsiirron topologioiden sekä tehonhallinnan strategioiden vaikutusta polttokennohybridibussin suorituskykyyn. Kaksi erilaista hybridibussia on rakennettu, FCB A ja FCB B, joissa kummassakin on PEMFC:n lisäksi energiavarastona akku. FCB A:ssa hybridisointiaste on korkeampi, ja akun tehtävänä on vastata ajoneuvon korkeisiin energiavaatimuksiin. FCB B:ssä hybridisointiaste on matalampi, ja akun tehtävänä on vastata korkeisiin teho vaatimuksiin. Yleisesti ottaen molemmissa vaihtoehdoissa hybridisointiaste on kuitenkin verrattain alhainen.

Tehonsiirron topologiat on esitetty kuvassa 3.36. FCB A:ssa polttokennojärjestelmä on yksisuuntaisen DC/DC-muuntimen takana sen ulostulotehon säätelemiseksi. FCB B:ssä akku on kaksisuuntaisen DC/DC-suuntaajan takana, jotta akun latausta ja purkua voitaisiin säädellä muuntimen avulla. Tällöin voidaan myös vapaasti valita akkupaketin käyttöjännite. Toisaalta, kun polttokenno on kytketty suoraan väyläjännitteeseen, seuraa se kuormaa orjallisesti ilman mitään puskuria. Järjestelmän ohjattavuuden ja tehonlähteen turvallisuuden kannalta tämä on ongelmallista.

Kummassakin topologiassa sähkömoottori ottaa vaatimansa vaihtojännitteen jänniteväylästä vaihtosuuntaajan kautta. Kokoonpanoihin valittujen komponenttien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 3.6.



Kuva 3.36. Tehonsiirron topologiat a) FCB A:ssa b) FCB B:ssä.

Taulukko 3.6. Vertailtavien järjestelmien komponenttien tekniset tiedot. (Ouyang et al. 2006)

	FCB A	FCB B
PEMFC		
Stackien lukumäärä	2	3
Nimellisteho (kW)	65	100
Ylikuormitusteho (kW)	88	130
Ulostulojännite (V)	330-450	330-450
Akku		
Tyyppi	Lyijyakku	Ni-MH akku
Varauskapasiteetti (Ah)	80	80
Moottori		
Nimellisteho (kW)		120 (1800 rpm)
Maksimipyörintänopeus (rpm)		7000
DC/DC-muunnin		
Tyyppi	Yksisuuntainen, Buck (jännitettä laskeva)	Kaksisuuntainen, Boost/Buck (jänn. nostava/laskeva)
Nimellisteho (kW)	90	50/20

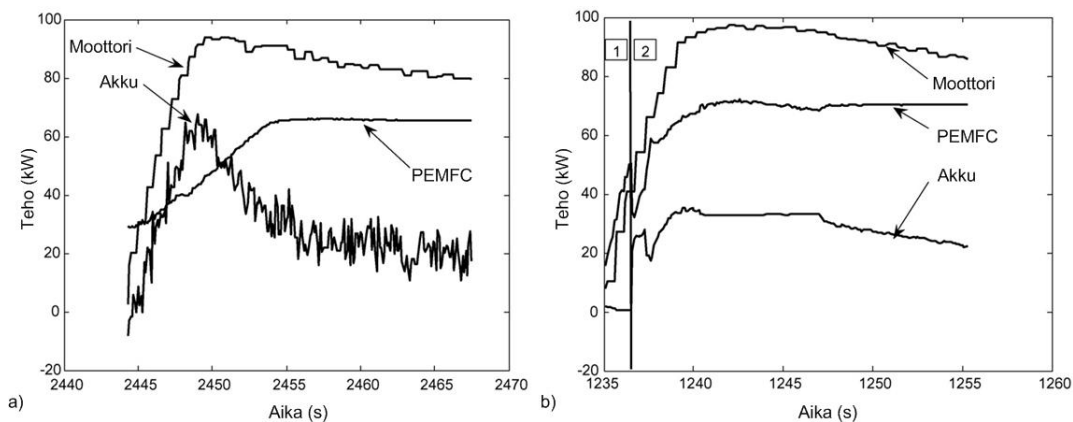
Tehonhallintastrategian suunnittelussa lähtökohtana on ollut vedynkulutuksen minimoiminen, PEMFC:n ulostulotehon pitäminen sopivalla korkean hyötysuhteen alueella, PEMFC:n tehotransienttien rajoittaminen ja akun varaustilan (SoC) pitäminen tasaisena. Regeneratiivista jarrutustehoa ei ole hyödynnetty kummassakaan kokoonpanossa. FCB B:n tapauksessa regeneratiivisen jarrutuksen käyttö voisi olla myös vaikeaa hallita, koska kyseisessä topologiassa koko energiavarasto (akku) on DC/DC-muuntimen takana.

FCB A:ssa PEMFC-järjestelmä on kytketty väyläjännitteeseen yksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta. Muunnin säätelee ulostulovirtaa tehonhallintastrategian määräämän tavoitetehton mukaan. PEMFC:n tavoitetehto on moottorin vaatiman tehon ja akun lataus/purkutehon (riippuu akun SoC:sta) erotus. Akun SoC pyritään pitämään 0,8:ssa. Mikäli SoC on yli tuon arvon, akkua puretaan, ja kun SoC on alle tuon arvon, akkua ladataan. PEMFC:n tehotransientteja rajoitetaan, jolloin voidaan kasvattaa sen elinikää.

FCB B:ssä akku on kytketty väyläjännitteeseen kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta. Muuntimen läpi kulkevan tehon suuntaa muutellaan väyläjännitteen perusteella, joka on tässä tapauksessa sama kuin PEMFC:n ulostulojännite. Muuntimen toimiessa buck-tilassa (jännitettä laskeva), se säätelee akun ulostulojännitettä. Boost-tilassa (jännitettä nostava) se taas säätelee PEMFC:n ulostulojännitettä. Kun väyläjännite laskee alle ennalta määrätyn alarajan (eli moottorin tehovaatimus kasvaa suureksi), DC/DC-muunnin toimii boost-tilassa purkaen akkua. Kun taas väyläjännite nousee yli ennalta määrätyn ylärajan (eli moottorin tehovaatimus on pieni), DC/DC-muunnin kääntää buck-tilaan ladatakseen akkua.

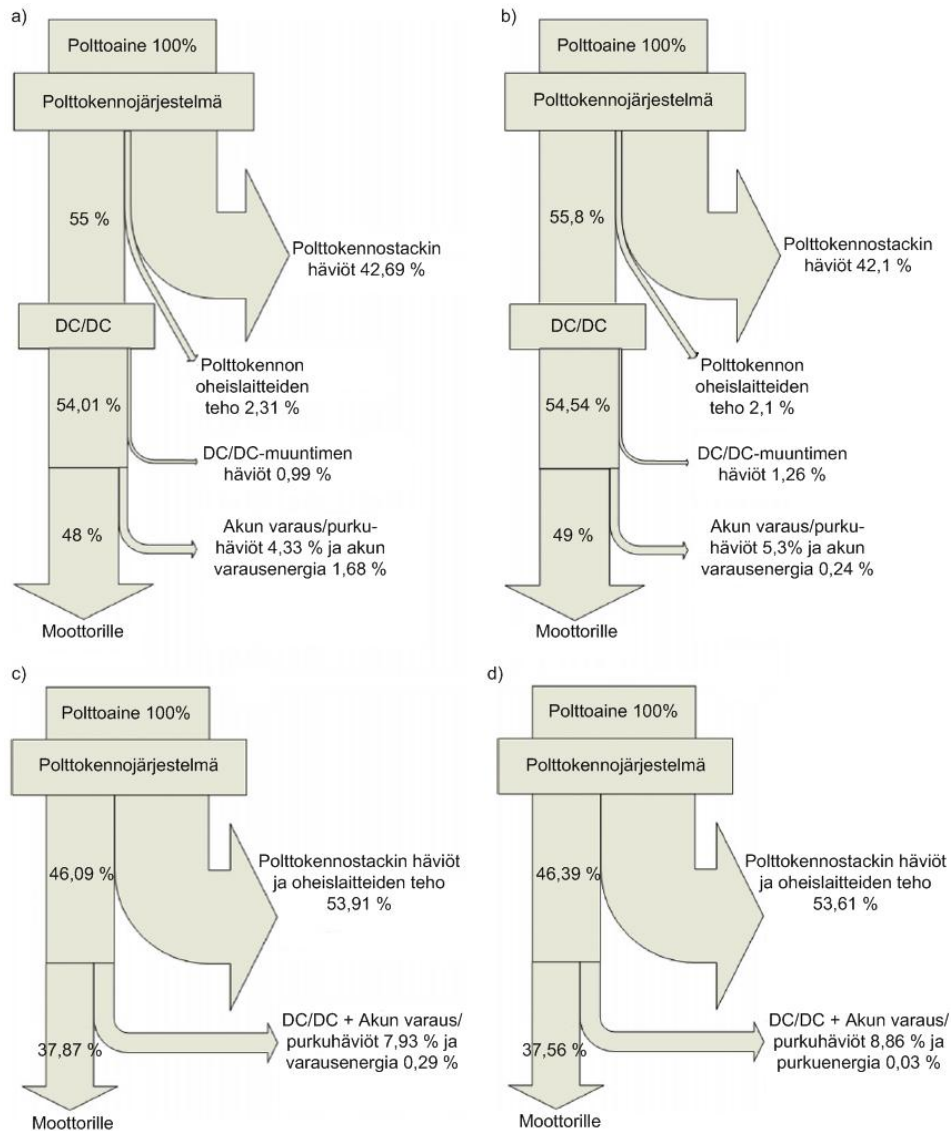
Hybridibusseja verrattiin keskenään ajamalla niitä sekä tyypilliseen bussireittiin perustuvalla ajosyklillä että 40 km/h vakionopeusajolla. Ajon aikana mitattiin

polttokennon bruttotehoa, akun ulostulotehoa ja sähkömoottorin vaatimaa tehoa. Kuvassa 3.37 on esitetty FCB A:n ja FCB B:n tehojen jakautuminen ajoneuvon kiihdytyksen aikana. FCB A:ssa akku operoi ilman DC/DC-muuntimen tuomaa suojaa, mistä seuraa akun tehon korkeataajuinen vaihtelu. PEMFC:n teho nousee hitaasti kohti vaadittua tehoa, johtuen ohjauksen viiveestä. Tässä tapauksessa PEMFC tuotti 59 % ja akku 41 % moottorin tehontarpeesta. FCB B:n tapauksessa kiihdytys koostuu kahdesta eri vaiheesta. Ensimmäiset 1,5 s DC/DC-muunnin toimii buck-tilassa, joten akku ei pysty tuottamaan tehoa. PEMFC:n teho on hieman moottorin vaatimaa suurempi johtuen PEMFC-järjestelmän häviöistä. 1,5 s:n jälkeen DC/DC-muunnin vaihtaa boost-tilaan, jolloin akku alkaa tuottaa tehoa ja PEMFC:n teho putoaa. Tässä tapauksessa PEMFC tuotti 65 % ja akku 35 % moottorin tehontarpeesta.



Kuva 3.37. Tehon jakautuminen kiihdytyksen aikana a) FCB A:ssa b) FCB B:ssä. (Ouyang et al. 2006)

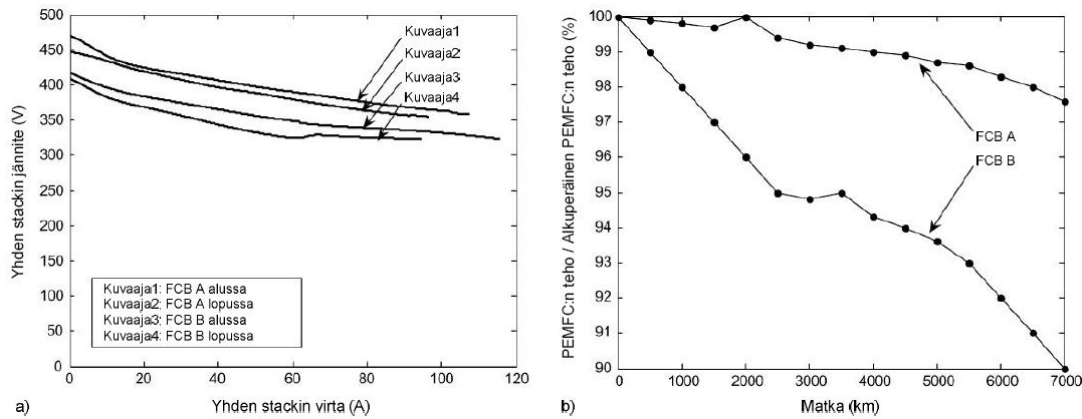
Kuvassa 3.38 on esitetty bussien keskimääräiset energiavirtaukset koeajojen aikana. Kummankaan kokoonpanon hyötysuhde ei muutu merkittävästi vaihtelevan ajosyklin ja vakionopeusajon välillä, mutta eri kokoonpanojen välillä on merkittävä ero (noin 48 % / 38 %). Hyötysuhdetta voitaisiin edelleen merkittävästi parantaa hyödyntämällä regeneratiivista jarrutusta.



Kuva 3.38. Energiavirtausdiagrammi a) FCB A ajosyklissä b) FCB A 40 km/h vakionopeusajossa c) FCB B ajosyklissä d) FCB B 40 km/h vakionopeusajossa. (Ouyang et al. 2006)

Ajosyklin aikana FCB A:lla saavutettiin 7,9 kg/100 km ja FCB B:llä 9,8 kg/100 km vedynkulutus. Vakionopeusajossa FCB A:lla kulutus oli 3,3 kg/100 km ja FCB B:llä 4,0 kg/100 km.

PEMFC:n suorituskykyä ajosykliden alussa ja lopussa vertailtiin, jotta saataisiin tietoa ajotavan vaikutuksesta sen elinikään. Tuloksia on esitetty kuvassa 3.39. Koska FCB B:ssä PEMFC toimi laajemmalla tehoalueella ja nopeammilla tehotransienteilla kuin FCB A:ssa, suorituskyvyn lasku on FCB B:ssä suurempaa. 7000 km:n ajon jälkeen PEMFC:n suorituskyky FCB A:ssa oli laskenut 2,4 %, ja FCB B:ssä 10 %.



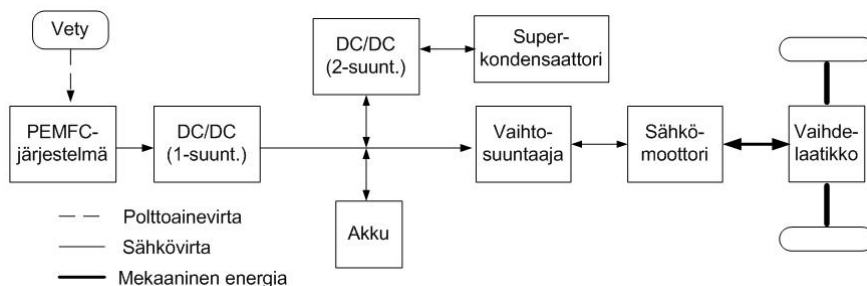
Kuva 3.39. a) Yksittäisen polttokennostackin polarisaatiokäyrä 7000 km:n ajosyklin alussa ja lopussa kummallakin bussilla b) PEMFC:n suorituskvyn lasku ajomatkan funktiona kummallakin bussilla. (Ouyang et al. 2006)

Polttokennon, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridijärjestelmä

Gao, Jin ja Lu (2008) ovat tutkineet sumeaan logiikkaan perustuvaa tehonhallintastrategiaa polttokennohybridibussilla. Sumea logiikka on matemaattisen logiikan muoto, jossa totuusarvo voi diskreettien arvojen (0 tai 1, tosi tai epätosi) sijaan vaihdella reaalisesti toden ja epätoden välillä (välillä $[0...1]$) (Princeton University electronic lexical database 2009).

Polttokennojärjestelmä on hybridisoitu akuilla ja superkondensaattoreilla. Tehonhallintastrategialla pystytään määrittämään polttokennojärjestelmältä, akuilta ja superkondensaattoreilta vaadittava ulostuloteho ajoneuvon tarvitseman tehon ja regeneratiivisen jarrutustehon mukaan. Bussin sekä tehonhallintastrategian suorituskvya on testattu kokeellisesti tyypillisellä bussireitillä.

Kuvassa 3.40 on esitetty hybridibussin tehonsiirron topologia pääkomponentteineen sekä energian kulkusuunnat. Polttokennojärjestelmä syöttää tehoa jänniteväylään DC/DC-muuntimen kautta, ja superkondensaattori kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta. Polttokennojärjestelmässä on kaksi kappaletta 504 polttokennon vesijähdytettyä stackia, joiden ulostulojännite vaihtelee 330–500 V välillä. Jännite muunnetaan yksisuuntaisessa DC/DC-muuntimessa jänniteväylään 280–400 V:ksi. Polttokennojärjestelmän nettoteho on 65 kW.

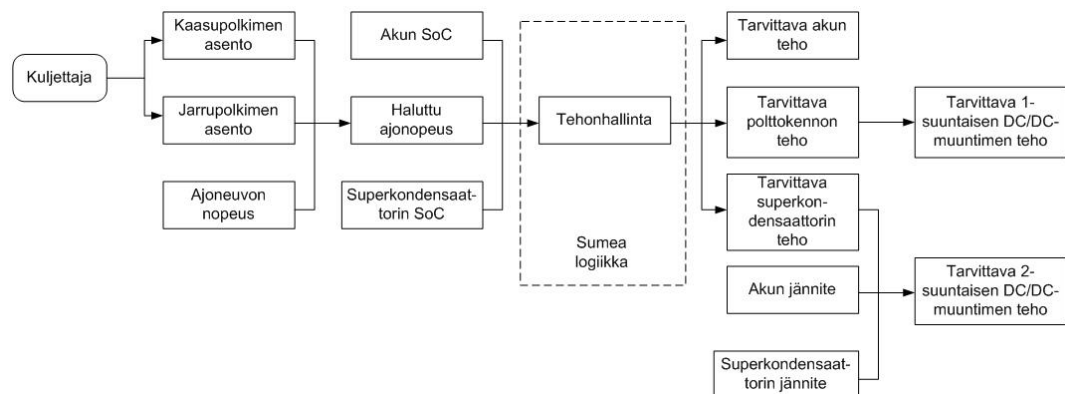


Kuva 3.40. Hybridibussin tehonsiirron topologia. (Gao, Jin & Lu 2008)

Akkupaketissa on 28 kappaletta 24 Ah:n lyijyakkukkennoja, nimellisjännitteen ollessa 336 V. Superkondensaattoripaketissa on 144 kappaletta kapasitanssiltaan 3500 F kennoja. Paketin maksimijännite on 390 V. Kaksisuuntainen DC/DC-muunnin muuntaa superkondensaattorin 180–390 V jännitteen jänniteväylän 280–400 V:ksi. Sähkömoottorin maksimiteho on 120 kW.

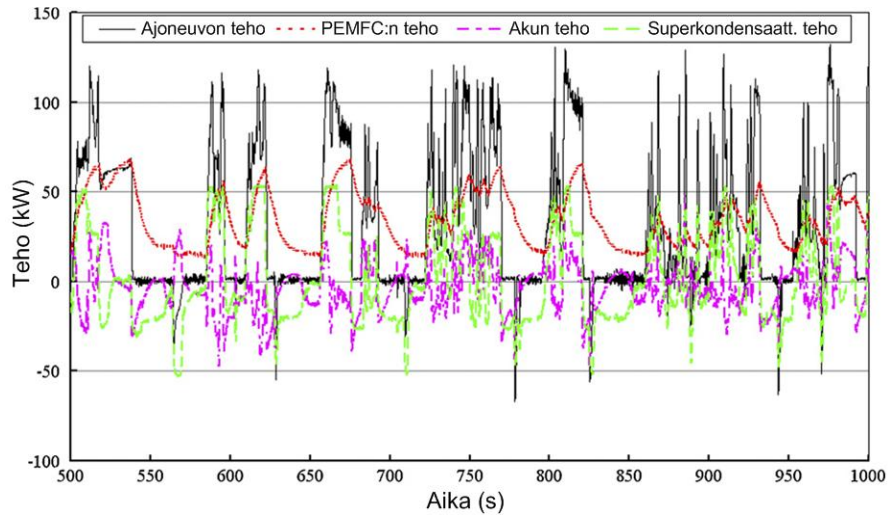
DC/DC-muunnin voi yleensä toimia kolmessa eri tilassa, jotka ovat ulostulovirran säätö, ulostulojännitteen säätö ja ulostulotehon säätö. Hybridibussin tapauksessa yksisuuntainen DC/DC-muunnin toimii tehonsäätötilassa, mutta kaksisuuntainen DC/DC-muunnin toimii virransäätötilassa. Näin ollen sekä polttokenno että superkondensaattori toimivat aktiiviohjattuina teholähteinä, ja akku passiiviohjattuna teholähteenä.

Hybridibussin tehonsiirron ohjauskaavio on esitetty kuvassa 3.41. Tehon jakautuminen kolmen eri teholähteen välillä on määritelty ajoneuvon vaatiman tehon, sekä akun ja superkondensaattorin SoC:n perusteella. Tehokkaimman mahdollisen tehojakauman saavuttamiseksi polttokennojärjestelmän tulisi toimia korkean hyötysuhteen alueella, ja akun SoC:n tulisi pysyä riittävällä tasolla. Käytetty sumean logiikan ohjaus on esitelty tarkemmin artikkelissa.

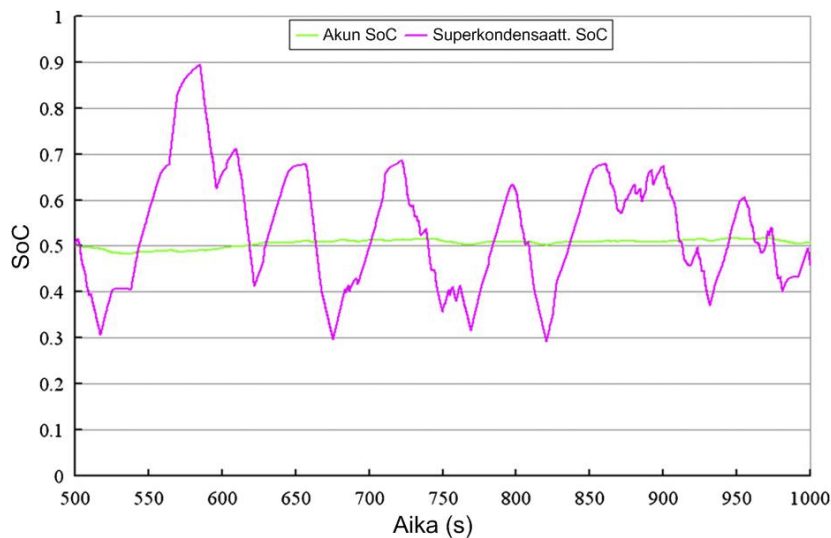


Kuva 3.41. Tehonsiirron ohjauskaavio. (Gao, Jin & Lu 2008)

Ajoneuvon ja valitun ohjausstrategian suorituskyvyn tutkimiseksi hybridibussia testattiin tyypillisellä bussireitillä. Polttokennojärjestelmän, akun ja superkondensaattorin ulostulotehoa sekä ajoneuvon vaatimaa tehoa mitattiin toteutuneen tehojakauman selvittämiseksi. Akun ja superkondensaattorin SoC:ta mitattiin varaustilan säilymisen selvittämiseksi. Mitatut tulokset on esitetty kuvissa 3.42 ja 3.43.



Kuva 3.42. Tehon jakautuminen teholähteiden kesken ajosyklin jakson (500 s) aikana. (Gao, Jin & Lu 2008)



Kuva 3.43. Akun ja superkondensaattorin SoC ajosyklin aikana. (Gao, Jin & Lu 2008)

Tuloksista voidaan nähdä, että teholähteet pystyvät hyvin tyydyttämään ajoneuvon tehonvaatimukset käytetyllä ajosyklillä. Polttokennojärjestelmän nettoteho vaihtelee noin 15 ja 65 kW:n välillä, mikä on järjestelmän korkean hyötysuhteen alueella. Kuitenkin, jotta saataisiin vähennettyä polttokennojärjestelmän tehotransientteja (muun muassa hyvän polttokennon eliniän saavuttamiseksi), tulisi yksisuuntaista DC/DC-muunninta ohjata. Näin polttokennojärjestelmän ulostuloteho saisi muuttua hitaasti ja asteittain. Kaksisuuntainen DC/DC-muunnin mahdollistaa superkondensaattorin varauskapasiteetin tehokkaan hyväksikäytön, kuten voidaan havaita kuvasta 3.42. Ilman DC/DC-muunninta SoC:n vaihtelu olisi paljon suppeampaa.

3.3.2. Kokeellisten karakterisointien yhteenveto

Hybridijärjestelmien kokeellisten karakterisointien pääasiat ja keskeisiä tuloksia on koottu taulukkoon 3.7. Taulukossa on esitetty lähteessä tarkastellun järjestelmän,

polttokennoteholähteen ja energiavarastojen (ESS) koot. Järjestelmän hybridisointiaste on energiavaraston osuus koko järjestelmän (PEMFC ja ESS) tehosta. Myös ajokokeissa mitatut parametrit ja käytetyt ajosykli on esitetty.

Taulukko 3.7. Hybridijärjestelmien kokeellisten karakterisointien yhteenveto.

	Corbo, Migliardini & Veneri 2008a	Corbo, Migliardini & Veneri 2008b	Ouyang et al. 2006	Gao, Jin & Lu 2008
Järjestelmän koko	20 kW	30 kW	120 kW	120 kW
PEMFC	20 kW	20 kW	65 / 100 kW	65 kW
ESS	-	50 Ah Lyijyakku	80 Ah Lyijyakku / 80 Ah Ni-MH	24 Ah Lyijyakku, 3500 F superkondensaattori
Hybridisointiaste (tehosuhde)	-	33 %	17-46 %	46 %
Käytetty ajosykli	R40:een perustuva lyhyt yhden virta-askeleen sykli	R40	Tyypillinen bussireitti	Tyypillinen bussireitti
Mitatut parametrit	PEMFC:n virta, stackin kennojäännitteet, reaktanttien paineet, ilman ja jäähdytysveden lämpötilat (sisään/ulos), katodi-ilman kosteus	Stackin kennojäännitteet, katodin ilmavirtaus, PEMFC:n nettoteho, akun teho, moottoriteho, hyötysuhde	PEMFC:n bruttoteho, akun teho, moottoriteho, vedynkulutus, hyötysuhde	PEMFC:n nettoteho, akun ja superkondensaattorin teho sekä SoC, moottoriteho
Keskeiset tulokset	Kompressorin ohjausstrategian valinta vaikuttaa huomattavasti PEMFC:n dynaamiseen suorituskyykyyn ja järjestelmän hyötysuhteeseen.	PEMFC:n ja akun hybridijärjestelmälle korkein hyötysuhde saavutettiin, kun PEMFC:n annettiin tuottaa vakioitehoa, ja akku huolehti dynaamisesta tehontarpeesta.	PEMFC:n kytkeminen DC/DC:n kautta kasvattaa PEMFC:n elinikää ja hybridijärjestelmän hyötysuhdetta, mutta rasittaa akkua enemmän.	Hybridijärjestelmän tehokauma.
Huomioita	-	-	PEMFC:n suorituskyykyyn huononeminen ikääntymisen seurauksena esitetty	-

3.4. Hybridijärjestelmän komponenttien kaupallinen tarjonta

3.4.1. Polttokennoteholähteet

Useat valmistajat tarjoavat ajoneuvokäyttöön sopivia valmiita polttokennoteholähteitä. Useimmiten tehohädepaketit perustuvat valmistajien omiin polttokennostackeihin. Jotkut valmistajista tarjoavat pelkkien polttokennoteholähteiden lisäksi valmiita kompaktisti pakattuja polttokennohybridijärjestelmiä. Taulukossa 3.8 on esitetty kootusti kaupallisesti tarjolla olevia polttokennoteholähteitä, ja niiden ominaisuuksia.

Taulukko 3.8. Kaupallisesti tarjolla olevia polttokennoteholähteitä, ja niiden ominaisuuksia.

	Ballard Power Systems		Hydrogenics			
Tuote	FCVelocity HD6		HyPM HD 4	HyPM HD 8	HyPM HD 12	HyPM HD 16
Maksimiteho	75 kW	150 kW	4,5 kW	8,5 kW	12 kW	16,5 kW
Maksimivirta	325 A		175 A	350 A	350 A	350 A
DC Jännite	220 - 400 V	440 - 800 V	20 - 40 V	20 - 40 V	30 - 60 V	30 - 60 V
Hyötysuhde	62 - 71 % (LHV)		51 % (max)	51 % (max)	53 % (max)	53 % (max)
Massa	250 kg	355 kg	80 kg	80 kg	86 kg	92 kg
Tilavuus	1446x871x496 mm		825x448x312 mm	825x448x312 mm	887x448x312 mm	949x448x312 mm
Elinikä (tavoite)	6000 h		10 000 h			
Dynamiikka	Ei tiedossa		Aika tyhjäkäynnistä huipputehoon < 4 s	Aika tyhjäkäynnistä huipputehoon < 5 s	Aika tyhjäkäynnistä huipputehoon < 5 s	Aika tyhjäkäynnistä huipputehoon < 5 s
	NuCellSys	Nuvera Fuel Cells		Proton Motor Fuel Cell		
Tuote	HY-80	Power Flow	HDL-82	PM Basic A 5	PM Basic A 20	PM Basic A 50
Maksimiteho	68 kW	2,5 kW / 5 kW	82 kW	5 kW	20 kW	50 kW
Maksimivirta	Ei tiedossa	Ei tiedossa		Ei tiedossa	350 A	350 A
DC Jännite	250 - 450 V	Ei tiedossa	< 230 V	> 24 V	70 - 130 V	140 - 260 V
Hyötysuhde	> 50 %	56 % (max)	54%	> 50 %	> 50 %	> 50 %
Massa	n. 220 kg	Ei tiedossa	n. 230 kg	Ei tiedossa		n. 600 kg
Tilavuus	n. 220 l	Ei tiedossa	n. 150 litraa	Ei tiedossa		1700x915x1125 mm
Elinikä (tavoite)	Ei tiedossa	Ei tiedossa	2000 h	Ei tiedossa		
Dynamiikka	Aika tyhjäkäynnistä 90 % tehoon < 1 s	Ei tiedossa	Aika 10% tehosta huipputehoon 3 s	Ei tiedossa		

Ballard Power Systems tarjoaa ajoneuvokäyttöön FCVelocity-sarjan tuotteita. Sarjaan kuuluu trukikäyttöön tarkoitettu 9SSL-polttokennostack, jota valmistetaan 4,4 kW; 8,8 kW; 13,2 kW ja 19,3 kW tehoversioina. Kyseessä on kuitenkin siis pelkkä PEMFC-stack, joten tuote vaatii ympärilleen vielä BoP:n (oheisjärjestelmät). FCVelocity HD6 puolestaan on lähes valmis polttokennojärjestelmä (sisältäen pääosan BoP:sta), jota valmistetaan 75 kW ja 150 kW tehoversioina. Tärkeimpänä sovelluskohteena HD6:lle valmistaja mainitsee linja-autosovellukset. (Ballard Power Systems 2009b, Ballard Power Systems 2009a)

Hydrogenics tarjoaa ajoneuvokäyttöön HyPM HD-sarjaa, jonka suunnittelun lähtökohtina on ollut elinikä ja kestävyys, sekä korkea tehoteho. HyPM HD on valmis polttokennoteholähde, ja se on saatavilla 4,5 kW; 8,5 kW; 12 kW ja 16,5 kW tehoversioina. HyPM HD polttokennoteholähteen ympärille on rakennettu myös käyttövalmis hybriditeholähdepaketti HyPX Power Pack. (Hydrogenics 2009)

Daimler-konserniin kuuluvalla NuCellSys:lla on valikoimassaan yksi polttokennoteholähde, HY-80 (68 kW). Järjestelmä perustuu Ballardin PEMFC-stackiin. Tärkeimpänä sovelluskohteena mainitaan henkilöautosovellukset, mutta raskaammatkin ajoneuvot ovat mahdollisia sovelluskohteita, jos teholähde hybridisoidaan tai useampia teholähteitä liitetään yhteen. (NuCellSys 2005)

Nuveran tuotevalikoimassa on ajoneuvosovelluksiin tarjolla valmiita polttokennoteholähteitä sekä polttokennostackeja. Andromeda on 50 kW, 90 kW ja 127 kW tehoversioina tarjolla oleva erityisesti ajoneuvosovelluksiin suunniteltu polttokennostack. HDL-82 on Andromeda-stackiin perustuva valmis 82 kW:n polttokennoteholähde. PowerFlow on pienempi polttokennoteholähde, jonka standardiversion (2,5 kW / 5 kW) lisäksi on tarjolla räätälöityjä teholähderatkaisuja 32 kW:iin asti. (Nuvera Fuel Cells 2009a, Nuvera Fuel Cells 2009b)

Proton Motorilla on valikoimassaan sekä polttokennoteholähteitä, että valmiita hybriditeholähteitä. PM Basic on 5 kW, 20 kW ja 50 kW tehoversioina saatavilla oleva polttokennoteholähde. PM Basic toimii pohjana PM Package ja PM Turnkey -hybridiratkaisuihin. Näistä PM Package on valmis hybriditeholähdepaketti, kun PM Turnkey suunnitellaan aina tapauskohtaisesti kyseessä olevasta sovelluskohteesta riippuen. (Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009a, Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009b, Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009c)

3.4.2. Akut

Lyijyakut

Lyijyakut ovat Li-ion- ja NiMH-akkuja vanhempi, ja enemmän käytetty akkuteknologia. Tästä johtuen on luonnollista, että ajoneuvokäyttöön sopivia lyijyakkuja on markkinoilla tarjolla paljon muita akkutyyppejä laajempi valikoima. Suurehkoja valmistajia ovat esimerkiksi Midac Batteries, EnerSys ja East Penn (Deka). Tarjolla olevat akkupaketit ovat hyvin pitkälle räätälöitävissä olevia. Erittäin laajasta valikoimasta johtuen tässä ei ole taulukoitu tarjolla olevia malleja.

Li-ion-akut

Useimmilla ajoneuvokäyttöön suunniteltujen Li-ion-akkujen valmistajista on tuotevalikoimissaan ainoastaan yksittäisiä Li-ion-kennoja. Kennot ovat kuitenkin modulaarisia, eli niitä voidaan kytkeä rinnakkain ja sarjaan tarvittava määrä. Li-ion-akut kestävät huonosti ylilataamista ja ylipurkua, joten ajoneuvokäytössä akut on usein varustettava lisäksi jännitetasoa ja kennojen lämpötiloja valvovalla oheisjärjestelmällä, ja jäähdytysjärjestelmällä. Valmiissa akkupaketeissa tarvittavat oheisjärjestelmät ovat valmiina. Taulukossa 3.9 on esitetty kootusti kaupallisesti tarjolla olevia Li-ion-kennoja ja -kennopaketteja, sekä niiden ominaisuuksia.

Tällä hetkellä kaupallisesti ajoneuvokäyttöön tarkoitettujen Li-ion-akkujen valmistajia on melko rajallinen määrä. Jotkut sähkö- tai hybridiajoneuvoja suunnittelevat toimijat käyttävät omia akkujaan, jotka eivät ole yleisesti kaupallisesti tarjolla. Kaupallisten Li-ion-akkuvalmistajien määrä on kuitenkin kasvussa.

Taulukko 3.9. Ajoneuvokäyttöön kaupallisesti tarjolla olevia Li-ion-kennoja ja -akkupaketteja, sekä niiden ominaisuuksia. (A123Systems 2009, AltairNano 2009a, AltairNano 2009b, GS Yuasa 2009, International Battery 2009)

Valmistaja	Akkukennot						Kennopakettit
	Anodi-/katodimateriaali	Nimellisjännite	Kapasiteetti	Energia-tiheys	Paino	Elinikä (1C, 25°C)	
A123Systems	Ei tiedossa	3,3 V	20 Ah	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ajoneuvokohtaisesti räätälöitävä suunnittelu
AltairNano	LTO / LMO	2,3 V	11 Ah	74 Wh/kg	0,37 kg	> 4000 sykliä	-
			50 Ah	72 Wh/kg	1,6 kg		
EnerDel	LTO tai kova hiili / LMO	Sovelluskohteet: tehoakkuna kevyesti hybridisoiduissa ajoneuvoissa				Ei tiedossa	Valmiita kennopaketteja hybridiajoneuvoihin ja sähköajoneuvoihin
		Sovelluskohteet: kevyesti hybridisoidut ajoneuvot					
GS Yuasa	Ei tiedossa	3,7 V	50 Ah	109 Wh/kg	1,7 kg	Ei tiedossa	-
		14,8 V		99 Wh/kg	7,5 kg		
International Battery	Ei tied. / LiFePO4	3,2 V	40 Ah	88 Wh/kg	1,45 kg	> 2000 sykliä	-
			60 Ah	87 Wh/kg	2,2 kg		
			160 Ah	94 Wh/kg	5,4 kg		
Axeon							Ajoneuvokohtaisesti räätälöitävä suunnittelu (< 180 kWh, < 614 V)
Continental							Ajoneuvokohtaisesti räätälöitävä suunnittelu (18 kW-120 kW)

NiMH-akut

Markkinoilla on tällä hetkellä neljä suurta NiMH-akkujen valmistajaa. Japanilaiset Panasonic ja Sanyo, kiinalainen GP Industries, sekä yhdysvaltalaiset Johnson Controls ja Cobasys. Panasonic valmistaa 200 V tehoakut Toyota Prius -hybridiautoon. Ford käyttää hybrideissään Sanyon NiMH-akkuja. Esimerkiksi Ford Fusion -hybridissä on Sanyon 275 V NiMH-akusto. GM taas käyttää Cobasysin 36 V akkupaketteja omista hybridiajoneuvoissaan.

3.4.3. Superkondensaattorit

Ajoneuvokäyttöön sopivien superkondensaattorien valmistajia on toistaiseksi markkinoilla vain muutama. Maxwell Technologiesin lisäksi vain Nesscap valmistaa ominaisuuksiltaan sopivia superkondensaattorimoduuleita. Näiden kahden valmistajan standardituotteiden ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 3.10. Taulukossa mukana olevien 48 V moduulien lisäksi myös Nesscapilla on valikoimissaan joitakin korkeammilla jännitetasoilla toimivia erikseen räätälöitäviä tuotteita.

Taulukko 3.10. Superkondensaattorimoduulien ominaisuuksien vertailu. (Maxwell 2009a, Maxwell 2009b, Maxwell 2009c, Nesscap 2009)

Valmistaja	Maxwell			Nesscap				
Kapasitanssi	80 F	110 F	165 F	36 F	66 F	88 F	111 F	116 F
Nimellisjännite	48,6 V DC			48,6 V DC				
Syöksyjännite	50,4 V DC			51,3 V DC				
Sisäresistanssi (maksimi)	12,3 mΩ	8,1 mΩ	7,1 mΩ	13 mΩ	10,4 mΩ	8,9 mΩ	7,1 mΩ	5,6 mΩ
Energia	27,3 Wh	36,1 Wh	54,1 Wh	11,8 Wh	18,8 Wh	28,8 Wh	36,4 Wh	54,4 Wh
Paino	11 kg	12 kg	14,2 kg	7,5 kg	9,0 kg	10,6 kg	12,2 kg	16,0 kg
Elinikä	> 1000000 sykliä			> 1000000 sykliä				
Kapasitanssin muutos	30% lasku			< 30% lasku				
Sisäresistanssin muutos	150% nousu			< 150% nousu				
Valmistaja	Maxwell							
Kapasitanssi	20 F	38 F	47 F	63 F	94 F	63 F		
Nimellisjännite	75 V DC					125 V DC		
Syöksyjännite	90 V DC					153 V DC		
Sisäresistanssi (maksimi)	28,8 mΩ	21,8 mΩ	18,3 mΩ	14,4 mΩ	12,5 mΩ	18 mΩ		
Energia	15,6 Wh	29,3 Wh	36,6 Wh	48,8 Wh	73,2 Wh	150,5 Wh		
Paino	Ei tiedossa					59,5 kg		
Elinikä	> 1000000 sykliä							
Kapasitanssin muutos	20% lasku						Ei tiedossa	
Sisäresistanssin muutos	100% nousu							

3.4.4. Tehoelektronikka

Hybridijärjestelmiin sopivista DC/DC-muuntimista tarkastellaan esimerkkinä MSc electronicsin valmistamaa MSc ESC:tä. MSc ESC on kaksisuuntainen DC/DC-muunnin, joka on suunniteltu erityisesti ajoneuvokäyttöön. Sen teknisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.11.

Taulukko 3.11. MSc ESC kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen teknisiä ominaisuuksia. (MSc Electronics 2009)

DC-väylästä ESS:iin			ESS:stä DC-väylään			Mitat (mm)	Paino
Jännite sisään	Jännite ulos	Maksimivirta	Jännite sisään	Jännite ulos	Maksimivirta		
250 - 750 V DC	5 - 750 V DC	120 A, jatkuva. 200 A, 10 s/10 min	5 - 750 V DC	250 - 750 V DC	120 A, jatkuva. 200 A, 1 s/10 min	237x257x600	n. 35 kg

MSc ESC kykenee toimimaan melko laajalla jännitealueella, joka on riittävä tavanomaisissa hybridisovelluksissa. Jänniteväylän jännitteen on oltava välillä 250–750 V, energiavaraston (ESS) välillä 5–750 V. Laite pystyy käsittelemään jatkuvasti 120 A, ja hetkellisesti 200 A virtaa. Muuntimen toimintaa voidaan ohjata ulkoisella jännitesignaalilla.

4. HYBRIDIJÄRJESTELMIEN MALLINTAMINEN SIMULINKILLA

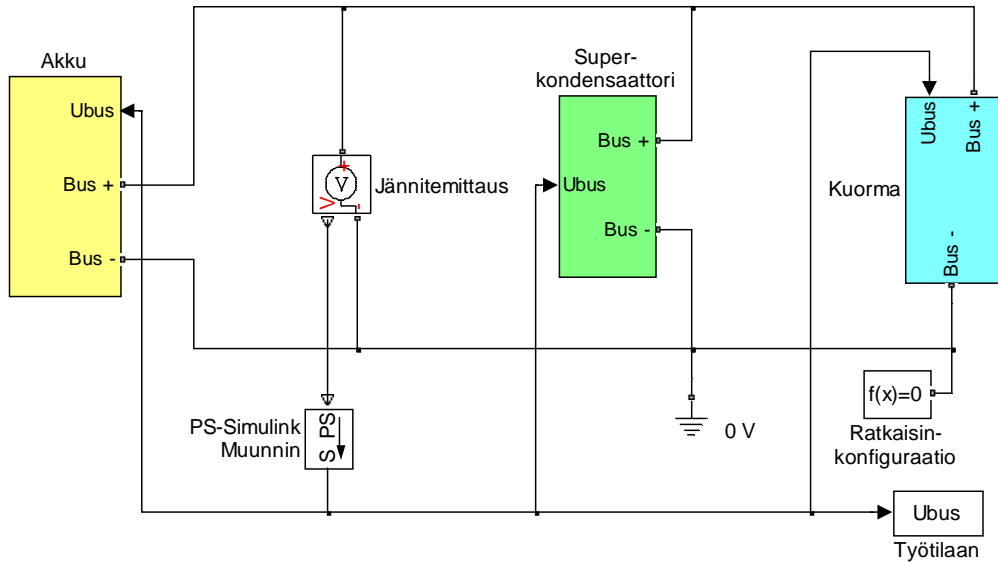
Hybridijärjestelmien mallintamiseen on tässä työssä käytetty Simulinkia. Simulink on The MathWorks Inc.:n kehittämä MATLAB:in laajennusosa, joka on tarkoitettu dynaamisten järjestelmien mallintamiseen, simulointiin ja analysointiin.

Mallin rakentaminen tapahtuu ohjelman graafisessa käyttöliittymässä yhdistelemällä valmiita toimintalohkoja. Käyttäjä voi myös laatia itse funktioita, mikäli valmista lohkoa ei ole saatavilla. Simulinkin toimiminen osana MATLAB:ia mahdollistaa sen ohjelmointikielen käyttämisen osana Simulink-mallia. Tässä työssä on käytetty MATLAB/Simulinkin versiota 7.8.0 (R2009a). Mallinnuksen apuna pyrittiin käyttämään kirjallisuudessa esiintyviä malleja, joita on käsitelty kappaleessa 3.2.

4.1. Lyijyakun ja superkondensaattorin mallintaminen

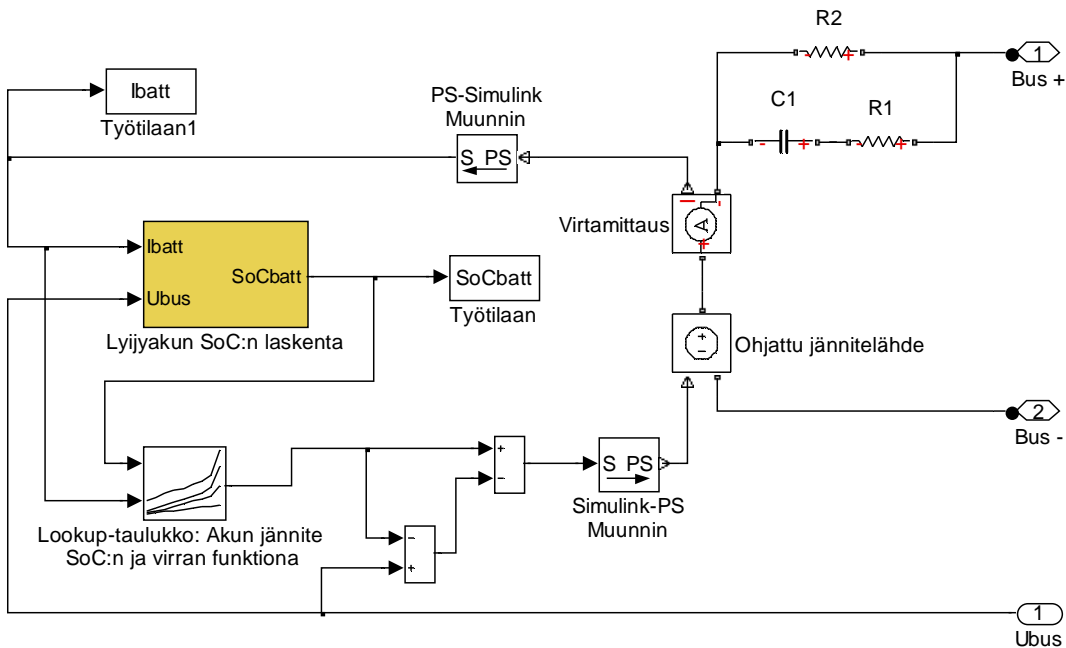
4.1.1. Mallin komponentit ja toiminta

Lyijyakun ja superkondensaattorin passiiviselle rinnankytkennälle (katso topologia, kuva 3.1 a) laadittiin sitä mallintava ekvivalenttipiiri. Rinnankytkennän Simulink-malli on esitetty kuvassa 4.1. Akku, superkondensaattori sekä kuorma on mallinnettu kukin omina alijärjestelminään. Piirimallit on rakennettu käyttämällä Simulinkin Simscape-kirjaston valmiita piirikomponenttilohkoja. Sekä akku, superkondensaattori että kuorma ovat kytkettynä rinnakkain samaan väyläjännitteeseen U_{bus} . Komponenttien välillä ei siis ole mitään virtojen kulkua tai jännitetasoja säätelevää ohjausta (kuten DC/DC-muunninta).



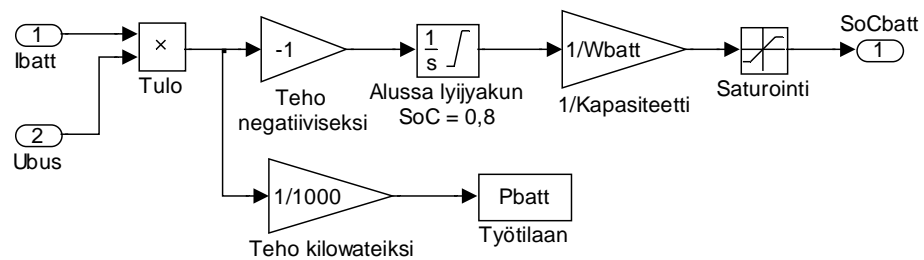
Kuva 4.1. Lyijyakun, superkondensaattorin ja kuorman passiivinen rinnankytkentä Simulinkissa (katso kuva 3.1.a).

Lyijyakkumallin pohjana käytettiin Catherinon et al. (2006) esittelemää lyijyakun ekvivalenttipiiriä. Lyijyakulle luotu malli on kuvassa 4.2. Ekvivalenttipiiri koostuu ideaalisesta jännitelähteestä, akun sisäresistanssista R_2 sekä akun dynaamisia ominaisuuksia mallintavasta kapasitanssista C_1 ja resistanssista R_1 . Akun tyhjäkäyntijännite määritetään akun varaustilan SoC_{batt} perusteella lookup-taulukosta, joka on laadittu lyijyakkupaketille suoritetujen kokeellisten mittausten, sekä valmistajan ilmoittaman datan pohjalta. Kahden summalohkon avulla toteutettu "jännitekompensointi" kumoaa akun resistanssien R_1 ja R_2 sekä kapasitanssin C_1 yli olevan jännitteen vaikutuksen.



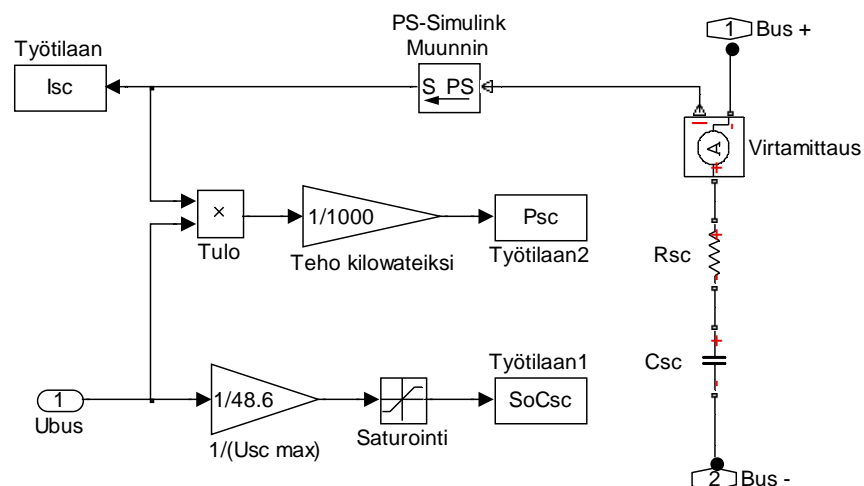
Kuva 4.2. Lyijyakun Simulink-malli.

Lyijyakun SoC:n määrittäminen tapahtuu omassa alijärjestelmässään. Sen rakenne on esitetty kuvassa 4.3. SoC laskentaan käytetään vastaavaa menetelmää kuin Baumanin ja Kazeranin akkumallissa (2008), joka on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.2.1 (kuva 3.10). Akun läpi kulkevan virran I_{batt} ja väyläjännitteen U_{bus} tulona saadaan akun teho P_{batt} . Tehon etumerkki vaihdetaan, jotta positiivinen teho purkaa akkua. Integroimalla tehoa ajan suhteen saadaan akulta purettu energia, joka akun kapasiteetilla W_{batt} jaettuna antaa akun varaustilan SoC_{batt} . Integraattorilohkoon voidaan asettaa akun varaustilan alkuarvoksi haluttu arvo (esimerkiksi tässä 0,8). Saturointilohko pitää SoC:n lukuarvon välillä 0-1.



Kuva 4.3. Lyijyakun SoC:n laskenta.

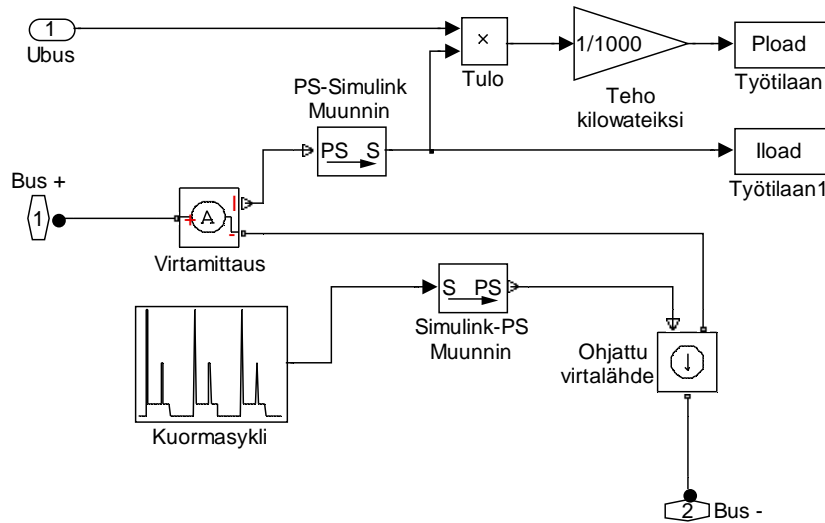
Superkondensaattorin ekvivalenttipiiri koostuu superkondensaattorin kapasitanssista C_{sc} , ja sisäresistanssista R_{sc} . Superkondensaattorin malli on esitetty kuvassa 4.4. Varaustilan laskenta on toteutettu yhtälön (3.1) mukaisesti, eli jakamalla superkondensaattorin jännite sen maksimikäyttöjännitteellä (48,6 V).



Kuva 4.4. Superkondensaattorin Simulink-malli.

Kuormaa mallinnetaan säädellyllä virtalähteellä, joka syöttää virtaa piiriin akkua ja superkondensaattoria vastaan. Kuormavirran I_{load} suuruus ajan funktiona määräytyy lookup-taulukkoon ohjelmoidun kuormasyklin perusteella. Kuormalohkon rakenne on

esitetty kuvassa 4.5. Kuorman teho P_{load} saadaan kuormavirran ja väyläjännitteen tulona.

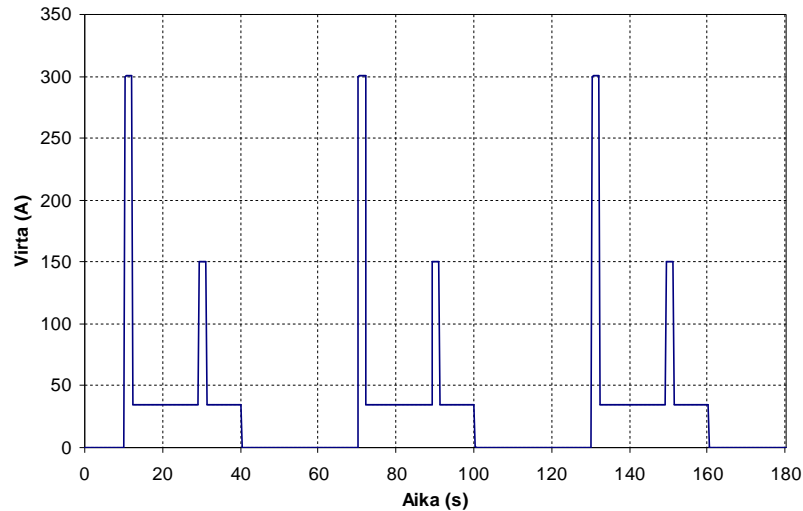


Kuva 4.5. Kuormalohkon rakenne.

4.1.2. Mallin parametrit

Ajosykliksi suunniteltiin 60 sekunnin mittainen sykli, jota toistetaan simuloinnin kestoajan. Ajosykli on tarkoitettu mallien validoimista varten, ja sillä ei siten ole suoraa yhtymäkohtaa minkään käytännön koneen kanssa. Tarkoituksena oli suunnitella sykli, jossa tutkittavien eri hybridijärjestelmien dynaamiset ominaisuudet tulevat hyvin esiin. Tarkoituksena ei siis niinkään ollut mallintaa mitään todellista ajotilannetta.

Käytetty ajosykli on esitetty kuvassa 4.6. Varsinaisessa 30 sekunnin ajo-osuudessa on kaksi 2 sekunnin mittaista virtapiikkiä, joissa kuormavirta nousee ensimmäisessä 300 A:iin, ja toisessa 150 A:iin. Virtapiikkien välillä virta putoaa 35 A:iin. Ajo-osuuksien välillä on 30 sekunnin lepo-osuus, jonka aikana kuormavirta on 0 A. Samaa ajosykliä käytettiin myös kokeellisissa mittauksissa. Syklistä tehtiin simulointitarkoituksiin myös toinen versio, jossa jälkimmäisen (150 A) virtapiikin jälkeen on negatiivinen 520 A virtapiikki simuloimassa regeneratiivista jarrutusta. Regeneratiivisen jarrutustehon mallintaminen on esitetty kappaleessa 4.3. Regeneratiivista jarrutusta ei tässä työssä voitu tutkia kokeellisesti.



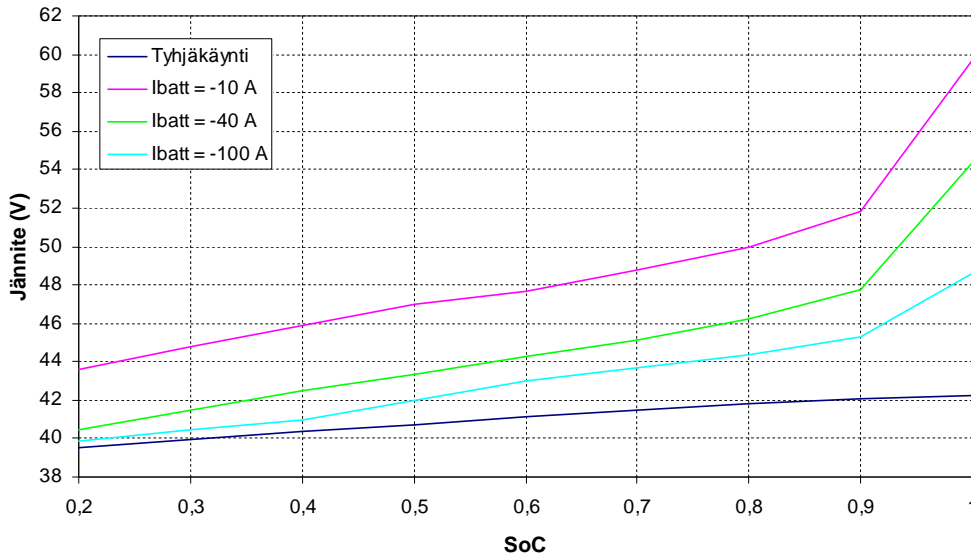
Kuva 4.6. Kuvassa on esitetty kolme 60 sekunnin mittaista ajosykliä peräkkäin.

Simuloinnit aloitettiin käyttämällä valmistajien ilmoittamia, tai muuten komponenteille tyypillisiä parametrien arvoja. Ensimmäisten kokeellisten mittausten jälkeen parametreja hienosäädettiin vastaamaan saatuja tuloksia. Malleissa esiintyville parametreille käytettyjä arvoja on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Mallien parametreille käytetyt arvot lyijyakun ja superkondensaattorien mallintamisessa.

Lyijyakku:	$R_1 = 4 \text{ m}\Omega$	$C_1 = 10 \text{ F}$	$R_2 = 33 \text{ m}\Omega$
	$W_{batt} = 43200 \text{ kJ}$		
Superkondensaattorit:			
165 F	$R_{sc} = 1,75 \text{ m}\Omega$		$C_{sc} = 165 \text{ F}$
83 F	$R_{sc} = 3,03 \text{ m}\Omega$		$C_{sc} = 80 \text{ F}$

Lyijyakun jännite määritetään lookup-tilaukosta akun varaustilan ja virran perusteella. Lookup-tilaukko on laadittu valmistajan ilmoittamien tietojen pohjalta, mutta sitä on muokattu vastaamaan kokeellisissa mittauksissa käytetyille lyijyakupaketille mitattuja arvoja. Kokeelliset mittaukset on raportoitu kappaleessa 5.1. Lyijyakumallissa käytetyn lookup-tilaukosta kuvaaja on esitetty kuvassa 4.7. Mikäli akun virta on positiivinen (eli akkua puretaan), jännite määräytyy tyhjäkäyntijännitteen mukaan. Mikäli akun virta taas on negatiivinen (eli akkua ladataan), akun jännite määräytyy ylempien jännitekäyrien mukaan ekstrapoloimalla.

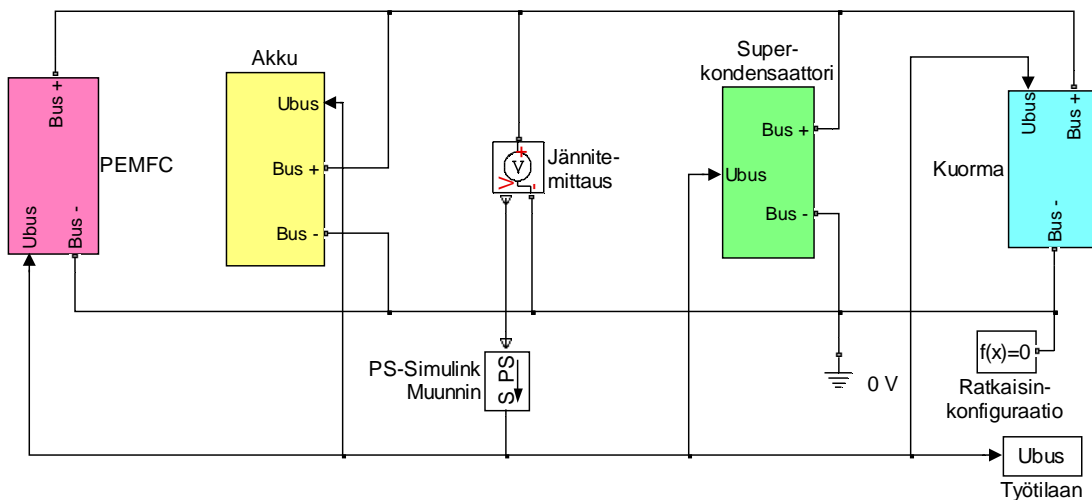


Kuva 4.7. Lyijyakumallin ohjatun jännitelähteen jännite akun varaustilan ja akun virran funktiona.

4.2. Polttokennojärjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin mallintaminen

4.2.1. Mallin komponentit ja toiminta

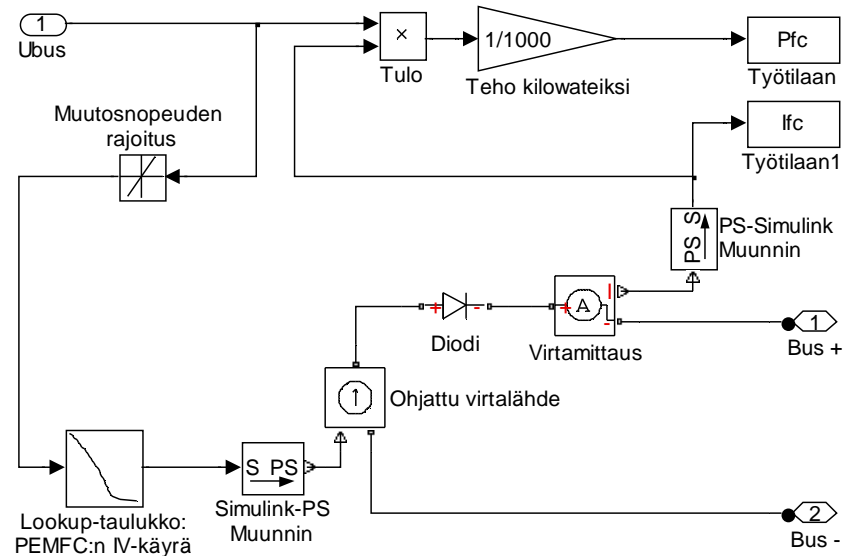
Polttokennojärjestelmän, akun ja superkondensaattorin kolmoishybridin (topologia kuvassa 3.4 a.) malli luotiin lisäämällä polttokennomalli kappaleessa 4.1 esitellyn kaksoishybridimallin rinnalle. Kolmoishybridimalli on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.8. Polttokennon, lyijyakun, superkondensaattorin ja kuorman passiivinen rinnankytkentä Simulinkissa.

PEMFC-alijärjestelmän rakenne on esitetty kuvassa 4.9. Polttokennon malli perustuu polttokennostackille mitattuun virta-jännite-käyrään (IV-käyrään), joka kuvaa polttokennon ulostulovirran riippuvuutta ulostulojännitteestä. IV-käyrä on ohjelmoitu

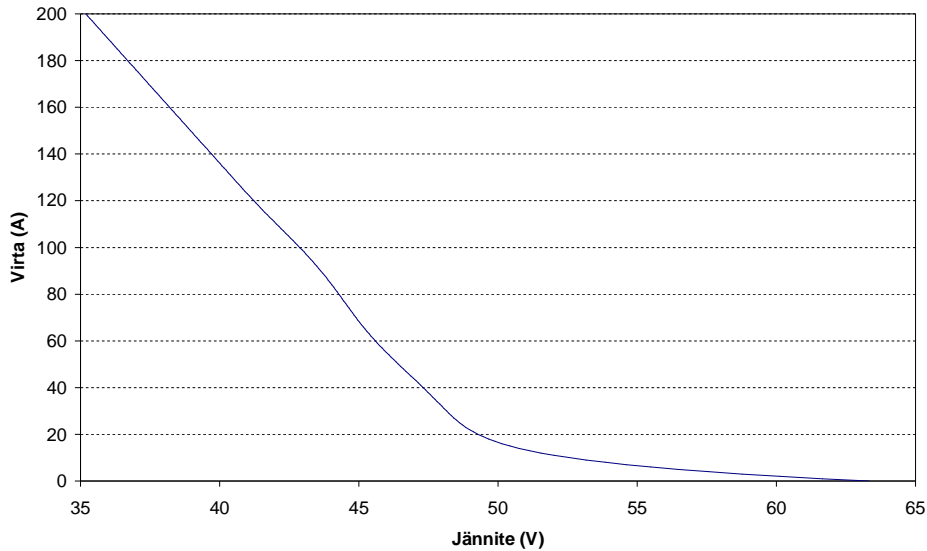
lookup-taulukkoon, joka ohjaa virtalähdettä. Diodi estää virran kulun väärään suuntaan jänniteväliltä polttokennolle. Muutosnopeuden rajoitus -lohkolla voidaan rajoittaa polttokennon virran muutosnopeutta, ja näin ollen mallintaa polttokennoteholähteen todellista dynaamista vastetta sen ollessa passiivisesti kytketty. Lohkolla voidaan haluttaessa myös simuloida polttokennoteholähteen aktiivista ohjausta sen ollessa DC/DC-muuntimen takana. Lyijyakun, superkondensaattorin ja kuorman mallit ja niiden toiminta on esitelty jo kappaleessa 4.1.1.



Kuva 4.9. PEMFC-alijärjestelmän rakenne.

4.2.2. Mallin parametrit

Kolmoishybridin mallissa käytettiin kuormalle, akulle ja superkondensaattoreille samoja parametreja kuin kaksoishybridin mallissa. Kyseiset parametrit on esitetty kappaleessa 4.1.2. Polttokennomallissa käytetty virta-jännite-käyrä perustuu Nedstackin P8.0 PEMFC-stackille mitattuun kokeelliseen dataan, jossa ei ole huomioitu järjestelmähäviöitä eli BoP:n aiheuttamia häviöitä. Kokeelliset mittaukset on raportoitu kappaleessa 5.2. Lookup-taulukon pohjana käytetty IV-käyrä on esitetty kuvassa 4.10.

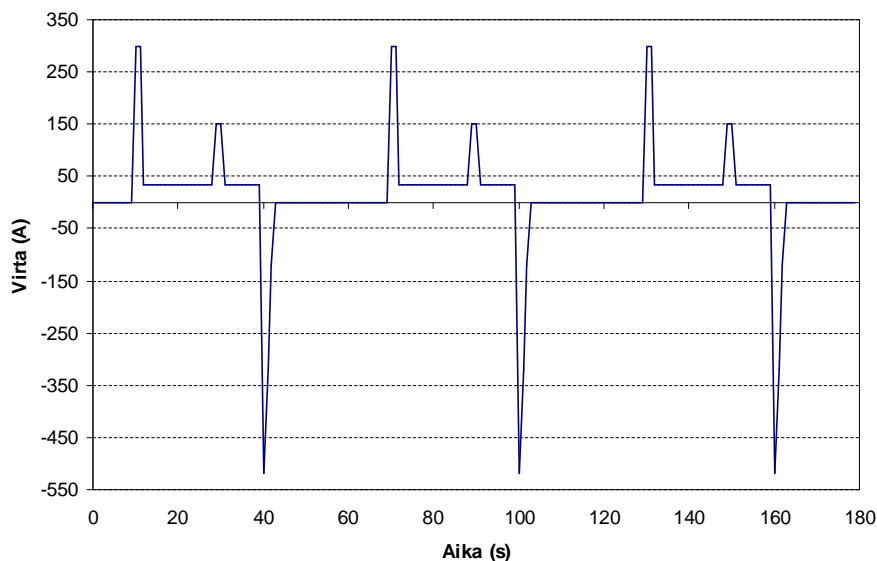


Kuva 4.10. Polttokennomallissa käytetty lookup-taulukko: polttokennon virta jännitteen funktiona.

4.3. Regeneratiivisen jarrutustehon mallintaminen

Sekä kaksois- että kolmoishybridimallilla simuloitiin myös regeneratiivisen jarrutustehon talteenottoa. Kuvan 4.6 ajosyklistä laadittiin toinen versio, jossa jälkimmäisen 35 A virran osuuden jälkeen on kolmen sekunnin mittainen negatiivinen 520 A virtapiikki simuloimassa regeneratiivista jarrutusta (kuva 4.11). Tämä ajosykli sijoitettiin hybridimalleihin kuormasykliksi.

Virtapiikin suuruus on arvioitu oikean työkoneen (trukki) ajodatan perusteella. Virtapiikiksi valittiin käytännön ajotilanteessa suurin toteutunut regeneratiivinen virtapiikki. Käytännössä näin suuria regeneratiivisia jarrutustehoja ei siis saada jokaisessa jarrutuksessa.



Kuva 4.11. Regeneratiivisen jarrutustehon mallintamiseen käytetty ajosykli.

5. HYBRIDIJÄRJESTELMIEN KOKEELLINEN TARKASTELU

5.1. Lyijyakun ja superkondensaattorin kokeellinen tarkastelu

5.1.1. Mittausjärjestelyt

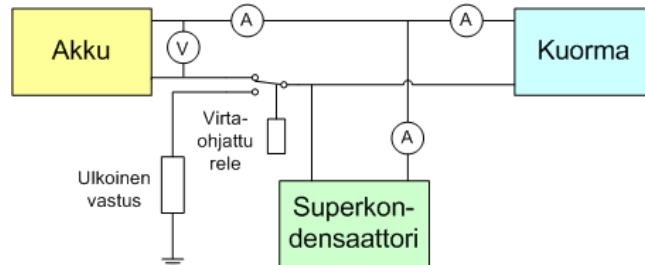
Kokeellisissa mittauksissa tutkittiin lyijyakun ja superkondensaattorin passiivisen rinnankytkennän (katso kuva 3.1 a.) toimintaa. Mittauksissa käytetty 300 Ah:n lyijyakkupaketti oli tyypiltään Batteriunion AB:n 5EPzS300/5MDL60. Käytetyt superkondensaattorimoduulit olivat Maxwell Boostcap BMOD0083 ja BMOD0165. Valmistajien ilmoittamat tekniset tiedot lyijyakkupaketille sekä superkondensaattoreille on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Mittauksissa käytetyn lyijyakkupaketin ja superkondensaattorimoduulien valmistajien ilmoittamat tekniset tiedot. (Maxwell)

Lyijyaku:	Batteriunion AB 5EPzS300/5MDL60		
Kapasiteetti	300 Ah	Energia	12 kWh
Kennomäärä	20 kpl	Energiatiheys	27,9 Wh/kg
Jännite	40 V	Paino	noin 430 kg
Superkondensaattori:	Maxwell Boostcap BMOD0083	Maxwell Boostcap BMOD0165	
Kapasitanssi	80 F	165 F	
Käyttöjännite	48,6 V DC		
Syöksyjännite	50,4 V DC		
Sisäresistanssi (maksimi)	12,3 mΩ	7,1 mΩ	
Energia	27,3 Wh	54,1 Wh	
Energiatiheys	2,48 Wh/kg	3,81 Wh/kg	
Tehotiheys (maksimi)	5,4 kW/kg	7,9 kW/kg	
Paino	11,0 kg	14,2 kg	

Lyijyakkupaketti ja superkondensaattorimoduuli kytkettiin rinnakkain releohjauksen kautta. Releohjauksen tarkoituksena oli suojata akkua mahdolliselta liian suurelta latausvirralta komponenttien kytkentävaiheessa. Mikäli virran arvo olisi noussut yli akun eliniälle haitallisen arvon, olisi virta ohjattu ulkoiseen vastukseen. Akun ja superkondensaattorin välillä ei mittauksia tehtäessä käytetty mitään muuta virtojen kulkua säätelevää ohjausta, kuten DC/DC-muunninta. Kuvassa 5.1 on esitetty tutkittu

kaksoishybriditopologia, käytetty relesuojaus ja mittausjärjestelyt. Tässä koejärjestelyssä superkondensaattori ei ollut suoja-alueen takana (toisin kuin kolmoishybridimittauksissa). Mittauksissa vain purettiin energiaa akusta, joten jännite ei olisi voinut nousta superkondensaattorille vaaralliseksi.



Kuva 5.1. Tutkittu kaksoishybriditopologia, käytetty relesuojaus sekä mittausjärjestelyt.

Mittausalustana oli National Instrumentsin FieldPoint, jota ohjattiin PC:ltä LabView-ohjelmiston avulla. Sähköistä kuormaa simuloitiin ohjelmoitavalla kuormalaitteella (Amrel). Kuormalaitetta ohjattiin LabView:n kautta tekstitiedostoon kirjoitetun ajosyklin avulla. Ajosykli ilmoittaa kuormavirran suuruuden ajan funktiona. Ajojen aikana mitattiin akkupaketin kennojännitteitä (kokonaisjännite saatiin näiden summana), kuormavirtaa, akun virtaa sekä superkondensaattorin virtaa. Mittauksen näytteenottotaajuus oli 0,25 s.

5.1.2. Mittausten suorittaminen

Mittaukset aloitettiin tekemällä hitaita purkuajoja pelkälle lyijyakkupaketille. Tavoitteena oli saada lisätietoa akun ja sen yksittäisten kennojen jännitetasoista varaustilan muuttuessa. Akkupaketti ladattiin täyteen varaustilaansa (SoC 1,0), minkä jälkeen akku purettiin 30 A:n vakiovirralla noin 0,2 SoC:iin. Ajon aikana mitattiin kuormavirtaa sekä akkupaketin yksittäisten kennojen jännitteitä, joiden summana saatiin koko akkupaketin jännite.

Akulle mitattiin myös niin sanottu latauskäyrä. Akkua ladattiin 10 A, 20 A, 30 A ja 40 A latausvirroilla, ja samalla mitattiin jännitettä. Superkondensaattorin suurin sallittu käyttöjännite on 48,6 V, ja yli 50,4 V jännitteellä moduuli hajoaa. Kun superkondensaattori on kytkettynä passiivisesti (ilman DC/DC-muunninta) akun rinnalle, ei jännite saisi siis ylittää näitä raja-arvoja. Tavoitteena oli näin ollen määrittää superkondensaattorin kannalta turvalliset akun latausvirrat eri akun varaustiloilla. Tämä on erityisen tärkeää, kun polttokenno otetaan kokoonpanoon mukaan, ja sillä ladataan akkua ajon aikana. Samalla saatiin tietoa siitä millaisia regeneratiivisia jarrutusvirtoja voi järjestelmään syöttää eri akun varaustiloilla.

Rinnankytketyn lyijyakun ja superkondensaattorin mittaukset aloitettiin 165 F:n superkondensaattorimoduulilla. Ennen akun rinnalle kytkemistä superkondensaattori esiladattiin samaan jännitetasoon akun kanssa, jotta saataisiin minimoitua akun ja

superkondensaattorin välillä kulkeva virta kytkentävaiheessa. Jos superkondensaattori olisi kytketty akkuun tyhjänä, olisi se noussut samaan potentiaaliin akun kanssa, ja ”imaissut” samalla suurin virtoja akulta. Tämän lisäksi komponenttien rinnankytkeminen suoritettiin varotoimenpiteenä releen kautta (katso kappale 5.1.1.).

Täyteen varaustilaansa ladatun lyijyakun ja superkondensaattorin rinnankytkentää ajettiin simuloinneissa käytetyllä ajosyklillä (katso kuva 4.6) noin 5 tunnin ajan. Kuormavirran keskiarvo yhden ajosyklin aikana on noin 30 A, jolloin tunnin ajon aikana 300 Ah:n akkupaketin varaustila laskee kymmenesosalla. Viiden tunnin ajon aikana akun SoC putosi siis noin 0,5:een.

Sama viiden tunnin ajo toistettiin myös pienemmän 83 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle. Ajon alussa ja lopussa ajettiin myös pelkkää akkua ilman superkondensaattoria kolmen ajosyklin ajan, jotta saataisiin vertailudataa rinnankytkennän datalle. Ajo pelkällä akulla pidettiin lyhyenä, koska ajosyklissä esiintyvät korkeat virtapiikit vaikuttavat negatiivisesti akun elinikään.

5.2. Polttokennojärjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin kokeellinen tarkastelu

5.2.1. Mittausjärjestelyt

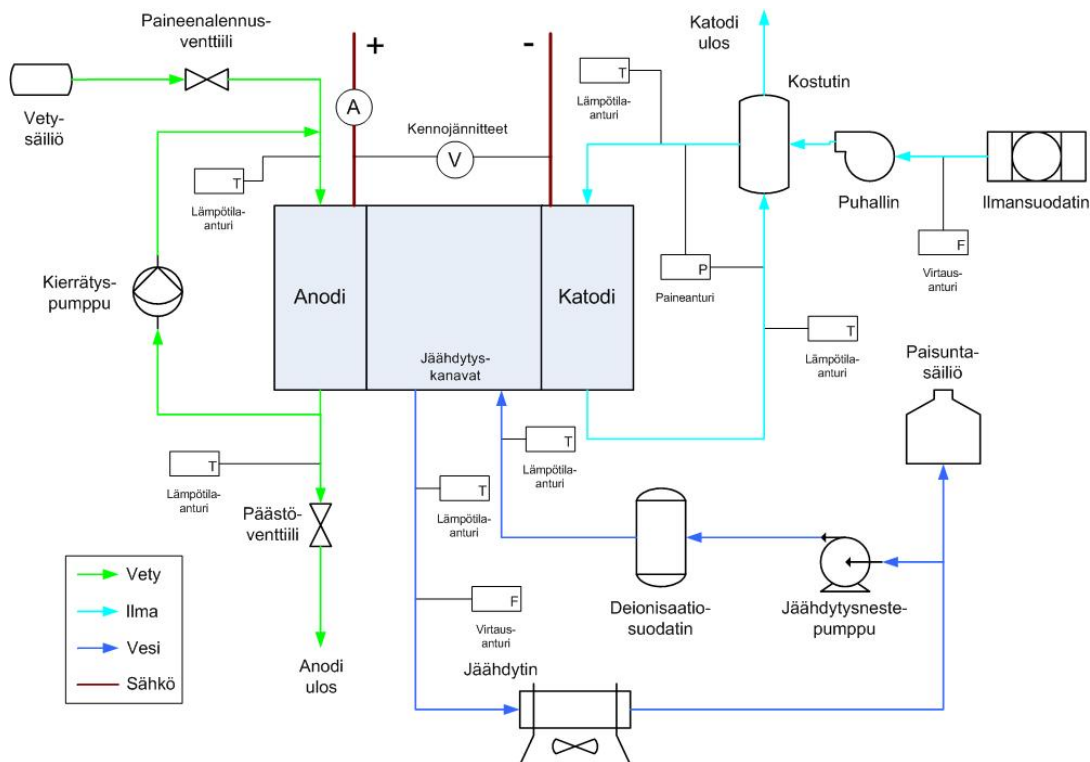
Myös passiivisesti rinnankytkettyjen PEMFC-järjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin muodostamaa kolmoishybridiä (katso kuva 3.4 a.) tutkittiin kokeellisesti. Mittauksissa käytetty akkupaketti ja superkondensaattorimoduulit olivat samat kuin akun ja superkondensaattorin mittauksissa (taulukko 5.1). Polttokennojärjestelmä oli rakennettu kaupallisen 8 kW:n NedStackin P8.0-64 polttokennostackin ympärille. Stackin tärkeimmät tekniset tiedot esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Polttokennostackin tärkeimmät tekniset tiedot.

Polttokennostack:	NedStack P8.0-64 PEM Fuel Cell Stack		
Maksimiteho	> 8 kW	Paino (pelkkä stack)	34 kg
Jännite (maksimiteholla)	32 V	Mitat (pelkkä stack)	500x188x264 mm
Maksimijännite	64 V	Toimintalämpötila	noin 65 °C
Maksimivirta	> 250 A	Paine	ilmanpaine

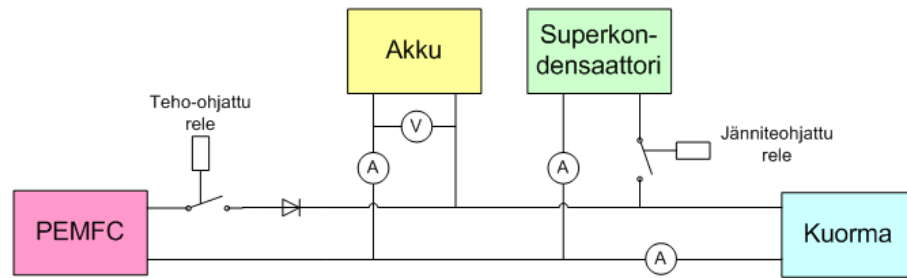
Kuvassa 5.2 on esitetty pääpiirteittäin polttokennojärjestelmän vety-, ilma- ja jäähdytyskierrot ja niiden pääkomponentit. Kuvaan on merkitty myös mittausanturien paikat. Vetykierron paine pidetään vakiona paineenalennusventtiilin avulla. Vetypuolen kostutus on toteutettu uudelleenkierrätyspumpulla (valmistaja Gardner Denver Thomas GmbH), joka kierrättää anodin ulostulosta kosteata kaasua sisäänmenon kuivan vetyvirtauksen sekaan. Päästöventtiili tekee määrätysin väliajoin pulssimaisia tyhjennyksiä, jolloin anodille kertynyt vesi ja inertit kaasut poistuvat järjestelmästä (englanniksi hydrogen purge). Anodipuolen *purgen* yhteydessä myös katodipuolen

ilmapuhallinta käytetään myös täydellä teholla muutaman sekunnin ajan, jotta katodille kertyvä vesi saadaan tehokkaammin poistettua järjestelmästä. Reaktantti-ilma otetaan ympäröivästä ilmasta ilmansuodattimen (Donaldson FCX400045) kautta. Koska kyseessä on matalapainejärjestelmä, on katodipuolella tavallinen ohivirtauspuhallin (Ametek) riittävä. Katodille menevä ilmavirtaus kostutetaan kostuttimessa (Permapure FC-300) katodilta tulevan kostean ulostuloilman avulla. Jäähdytyspiirissä väliaineena on deionisoitu vesi. Jäähdytysnestepumppu (Johnson Pumps CM30P7-1) kierrättää veden deionisaatio-suodattimeen (HOH Separtec Oy), joka poistaa vedestä siihen kertyviä ioneita. Vesi kiertää stackin läpi jäähdytyskanavien kautta samalla sitoen itseensä lämpöä. Lämpöenergia poistetaan kierrosta stackin ulkopuolella jäähdyttimessä (Biltema, Golf III Vento 1.8i). Polttokennon oheisjärjestelmät ottivat tarvitsemansa 24 V käyttöjännitteen ulkoisesta akustosta. Ne eivät siis toimineet polttokennon tuottamalla sähköteholla.



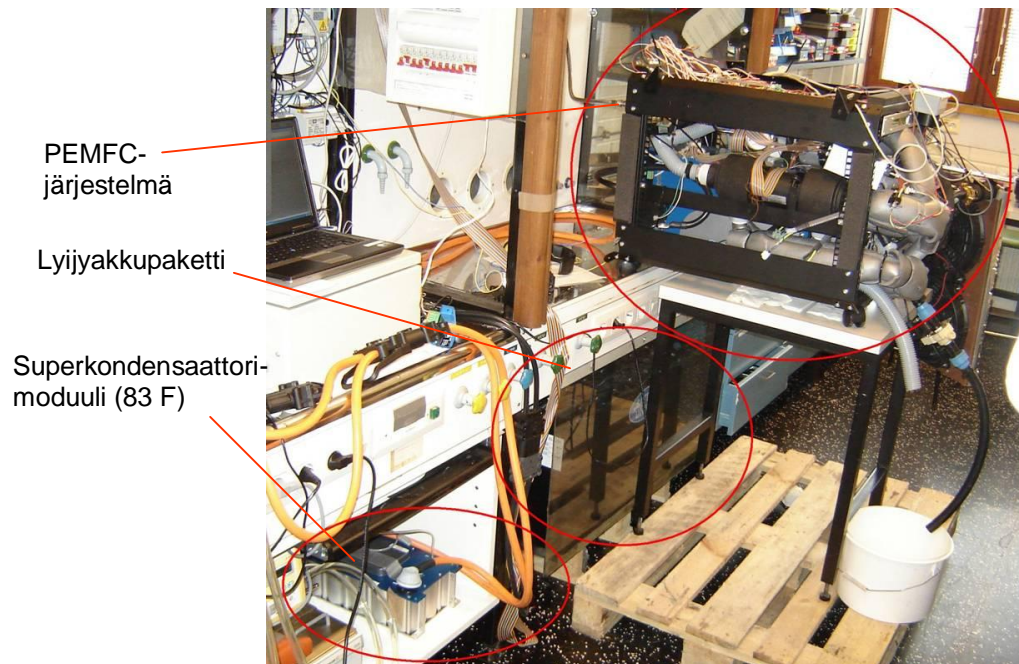
Kuva 5.2. Periaatekuva polttokennojärjestelmän vety-, ilma- ja jäähdytyskiertojen toteutuksesta.

Polttokennojärjestelmä, lyijyakku ja superkondensaattori kytkettiin rinnakkain relesuojauksen kautta. Akun ja superkondensaattorin mittauksista poiketen relesuojausta kuitenkin muutettiin siten, että väyläjännitteen noustessa määrätyn jänniterajan yli (superkondensaattorin maksimikäyttöjännite) rele kytkee superkondensaattorin irti piiristä. Tällöin superkondensaattori ei pääse vahingoittumaan ajotilanteessa. Tutkittu kolmoishybriditopologia, relesuojaus sekä virtojen ja jännitteiden mittauspisteet on esitetty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Tutkittu kolmoishybriditopologia, käytetty relesuojaus sekä mittausjärjestelyt.

Mittauksissa käytettiin samaa LabView/FieldPoint-testiasemaa, kuin akulla ja superkondenssaattorilla. Mitattavat parametrit ja näytteenottotaajuus olivat myös samat. Polttokennojärjestelmän oman käyttöliittymän kautta saatiin lisäksi mittausdataa polttokennostackin ja sen ohaisjärjestelmien toiminnasta. Mittausanturien paikat on esitetty kuvassa 5.3. Käyttöliittymän kautta mitattiin stackin kennojännitteitä, sisäänmenevien ja ulostulevien ilma- ja jäähdytysvesivirtausten lämpötiloja, ympäristön lämpötilaa, katodi-ilman differentiaalipainetta ja virtausnopeutta, jäähdytysveden virtausnopeutta, polttokennon virtaa ja ympäristön ilman vetypitoisuutta. Lisäksi saatiin tietoa ohaisjärjestelmien ohjaussignaaleista. Näytteenottotaajuus polttokennojärjestelmän käyttöliittymässä oli 0,20 s. Mittausjärjestelyistä otetussa valokuvassa (kuva 5.4) näkyvät kolmoishybridijärjestelmän komponentit, testiaseman kannettava tietokone. Kannettavan tietokoneen alla valkoisessa laatikossa ovat relesuojauksen komponentit.



Kuva 5.4. Valokuva kolmoishybridin mittausjärjestelyistä. Kuvassa 8 kW PEMFC-järjestelmä, 300 Ah lyijyakkupaketti (pleksilevyn takana) ja 83 F superkondenssaattorimoduuli.

5.2.2. Mittausten suorittaminen

Mittaukset aloitettiin polttokennojärjestelmän ja lyijyakun (kaksoishybridi) rinnankytkennällä. Tarkoituksena oli ensin tutkia tämän rinnankytkennän toimintaa, jotta myöhemmin voitaisiin turvallisesti kytkeä superkondensaattori lisäksi rinnalle (kolmoishybridi). Mittausten alkuvaiheessa säädettiin myös polttokennojärjestelmän ilmapuhaltimen ohjausta vastaamaan paremmin ajosykliissä esiintyviin nopeisiin kuormanvaihteluihin. Samalla saatiin myös vertailudataa kolmoishybridiä varten.

Polttokennon ja akun mittaukset aloitettiin akun varaustiloista 0,8 ja 0,5. Ajosyklinä käytettiin samaa kuvan 4.6 ajosykliä, kuin aikaisemmissa mittauksissa. Ajojen kestot olivat hieman yli ja alle 1,5 h, jona aikana akun SoC:t nousivat hieman polttokennon ladatessa akkua.

Kolmoishybridiajot aloitettiin 83 F superkondensaattorimoduulilla, akun SoC:n ollessa 0,3. Ajoa jatkettiin kahdessa erässä yhteensä noin 2 h 45 min, jona aikana akun SoC nousi merkittävästi. Samanlainen (noin 2 h 45 min, akun SoC alussa 0,3) ajo toistettiin 165 F superkondensaattorimoduulin kanssa.

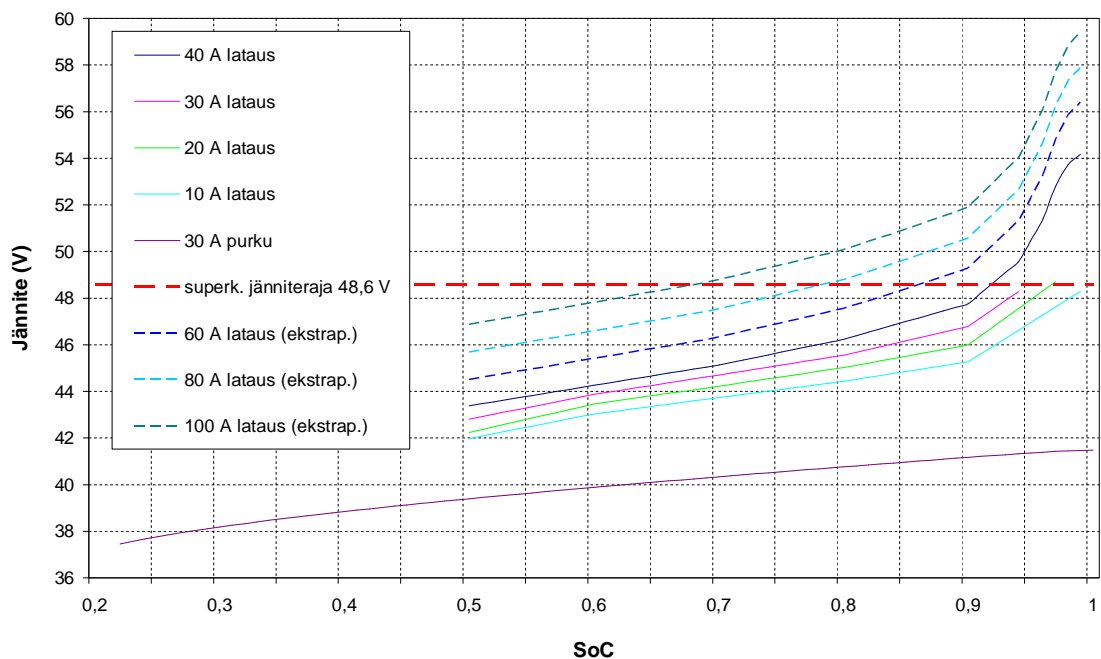
Tämän lisäksi haluttiin tutkia vielä polttokennojärjestelmän hyötysuhteita transienttitaloissa. Polttokennojärjestelmän vetypuolelle lisättiin vetyvirtausmittari, ja virtamittarit lisättiin mittaamaan oheisjärjestelmien (24 V) akuilta otettavaa virtaa ja ilmapuhaltimen ottamaa virtaa. Näin saatiin mitattua sekä polttokennostackin hyötysuhdetta (vetyvirtauksen avulla), että koko polttokennojärjestelmän hyötysuhdetta (vetyvirtauksen ja BoP:n tehontarpeen avulla). Pelkällä polttokennojärjestelmällä (ilman akkua ja superkondensaattoreita) ajettiin tämän jälkeen ajo, jossa kuormavirtaa kasvatettiin askeleittain nollassa 120–180 A:iin, minkä jälkeen palattiin askeleittain takaisin nolnaan. Virta-askelten pituus oli 2 minuuttia, ja askeleen korkeus oli vuoroin 15 A, 30 A, 45 A, 60 A, 75 A ja 90 A.

6. TULOKSET

Tässä kappaleessa on esitelty simuloimalla ja kokeellisesti mittaamalla saatuja tuloksia. Tuloksia on analysoitu ja vertailtu kappaleessa 7.

6.1. Lyijyakku

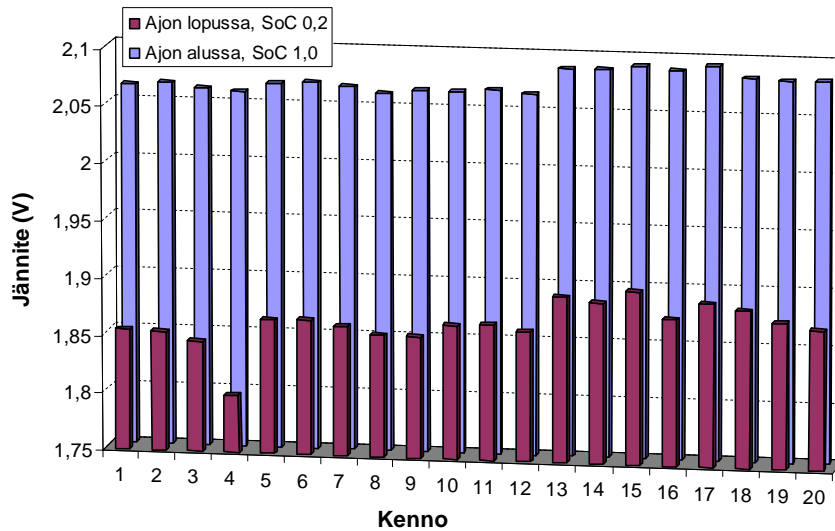
Lyijyakulle mitattiin jännitetasojen määrittämiseksi eri varaustiloilla ja virran arvoilla lataus- ja purkukäyrät. Lataus-purkukäyrä on esitetty kuvassa 6.1. Latausjännite nousee SoC:n mukana melko lineaarisesti kaikilla latausvirroilla aina arvoon 0,9 asti. Tämän jälkeen jännite nousee voimakkaammin aina täyteen varaustilaan asti. Akkulatorin maksimivirrasta (40 A) johtuen latausjännitteet voitiin mitata vain 40 A latausvirtaan asti. Jännitekäyrät korkeammille latausvirroille on ekstrapoloitu, ja merkitty kuvaan katkoviivalla.



Kuva 6.1. Lyijyakun lataus-purkukäyrästä. Akun latausjännitteet neljällä eri latausvirran arvolla varaustilan funktiona, sekä purkujännite 30 A purkuvirralla. Kuvaan on ekstrapoloitu latauskäyrät myös korkeammille latausvirroille (katkoviiva).

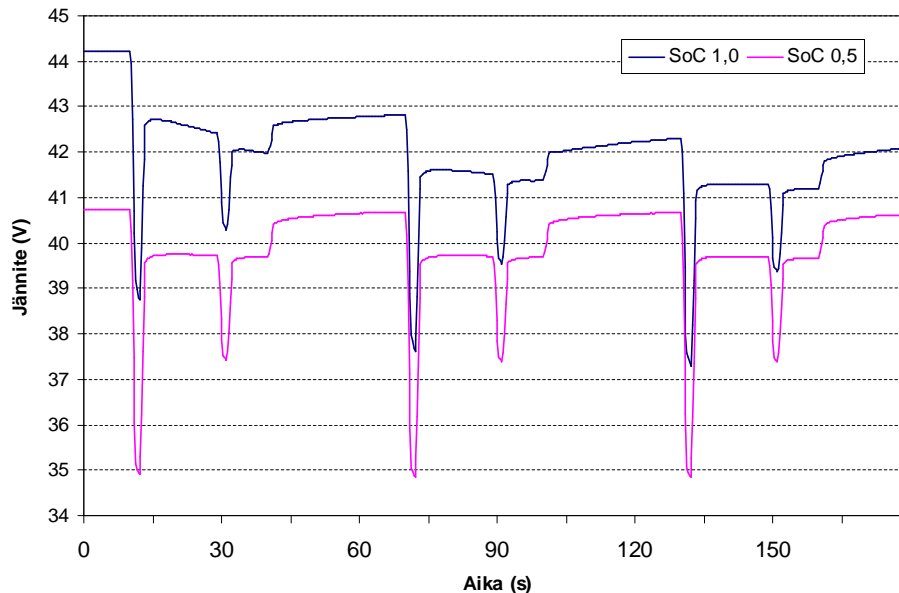
Lyijyakun purkuajon aikana mitattiin myös yksittäisten kennojen jännitteitä. Kennojännitteet ajon alussa ja lopussa on esitetty kuvassa 6.2. Ajon alussa kennojen jännitteet ovat melko yhtenäisiä: ero korkeimman ja alhaisimman jännitteen välillä on noin 0,03 V. Ajon lopussa ero korkeimman (kenno 15) ja alhaisimman (kenno 4) jännitteen välillä on kuitenkin jo 0,1 V luokkaa. Toistettaessa sama mittaus uudelleen, ja

jatkossa tehtäessä akkupaketilla muita mittauksia, havaittiin kennon 4 jännitteen laskevan aina muita kennoja nopeammin. Tämä johtuu joko muita kennoja heikommasta kennosta, tai akkupaketin sisälle ajon aikana syntyvistä lämpötilaeroista.



Kuva 6.2. Lyijyakun kennojännitteet 30 A:n purkuajon alussa (SoC noin 1,0) ja lopussa (SoC noin 0,2).

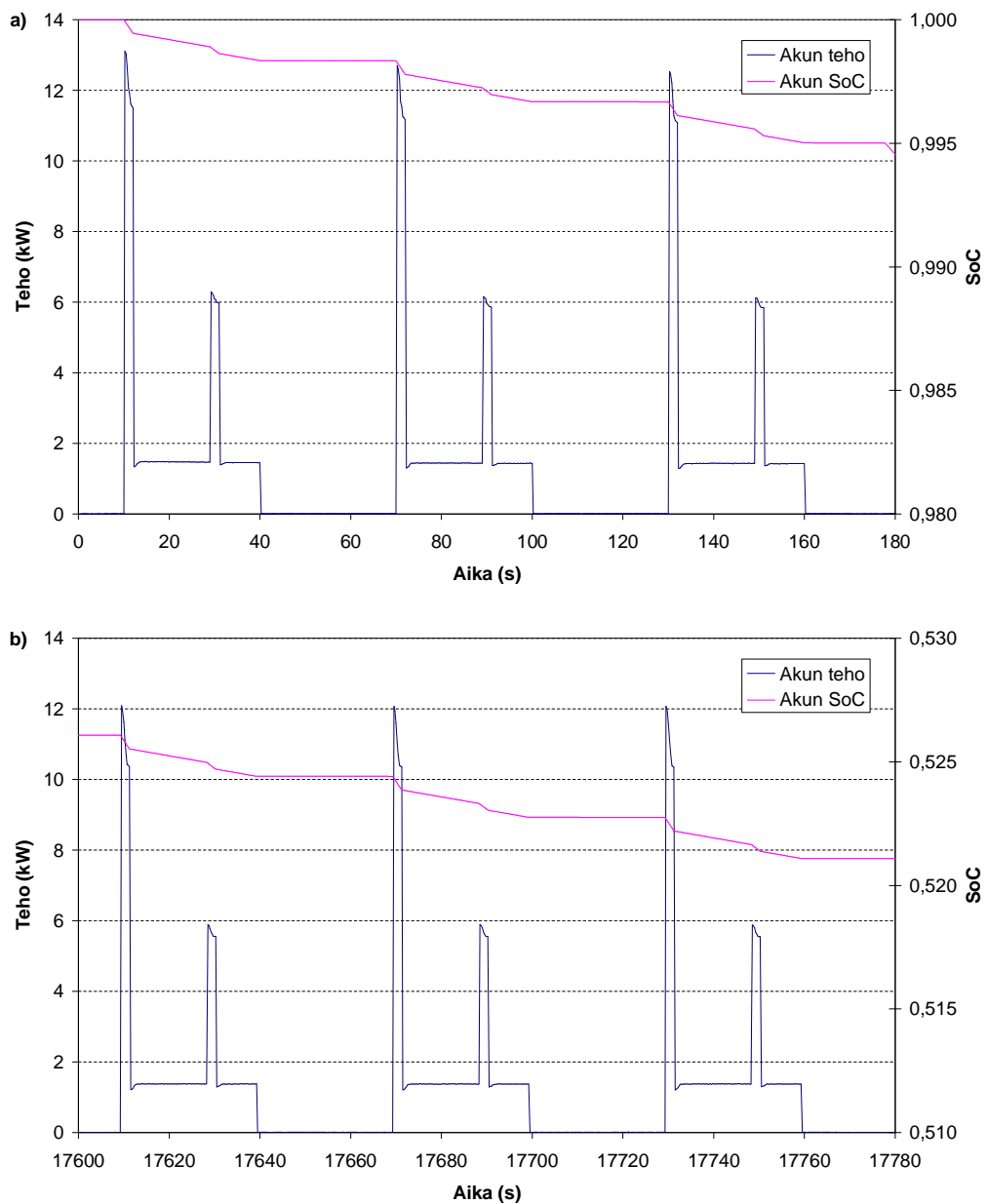
Pelkällä lyijyakulla ajettiin muutamia ajosyklejä (kuvan 4.6 ajosyklillä), jotta saataisiin vertailudataa superkondensaattorin kanssa saatavalle datalle. Akun jännitteen vaihtelu kolmen ajosyklin aikana ajon alussa ja lopussa on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. Akun jännite pelkällä lyijyakulla ajettaessa kolmen ajosyklin aikana ajon alussa (akun SoC noin 1,0) ja lopussa (akun SoC noin 0,5).

Ajosyklin 300 A kuormavirtapiikin aikana akun SoC:n ollessa 1,0 jännite putoaa noin 5 V. Ajon lopussa SoC:n ollessa noin 0,5, jännite putoaa jo lähes 6 V. Ajon alussa akun avoimen piirin jännite on noin 44,2 V, mutta jännitetaso laskee nopeasti muutaman ensimmäisen ajosyklin aikana. Tämä johtuu siitä, että akun jännite ei ehdi palautua ajosykliden välillä 30 s lepoaiheen aikana ”todelliseen” arvoonsa.

Kuvassa 6.4 on esitetty mitattujen väyläjännitteen ja akun virran tulona laskettu akun teho ajan funktiona mittauksen alussa ja lopussa. Samassa kuvassa on esitetty myös akun laskennallinen SoC. SoC:n muutos on laskettu akulta puretun sähkövarauksen (Ah) perusteella. Akun huipputeho 300 A virtapiikin aikana on varaustilasta riippuen noin 12–13 kW. Tehopiikin laki ei ole virtapiikin tavoin tasainen, koska jännitteen putoaminen laskee tehoa.

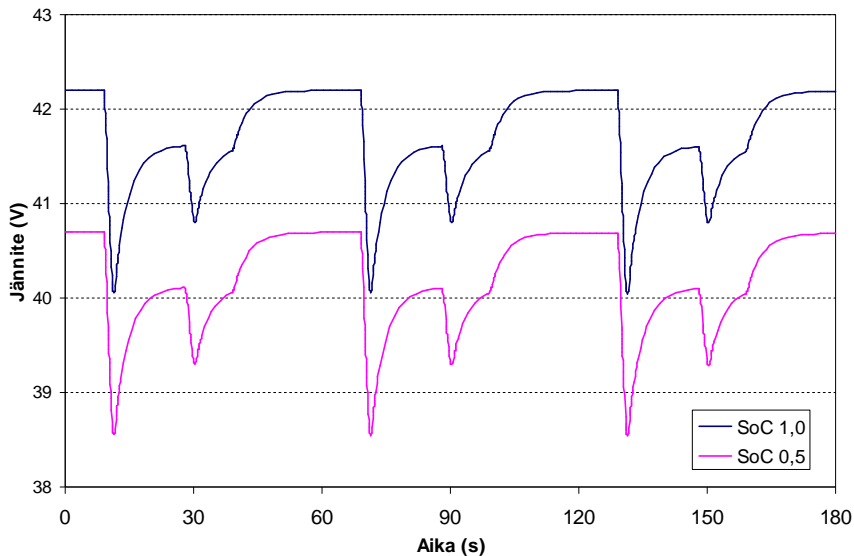


Kuva 6.4. Akun teho ja SoC:n muutos kolmen peräkkäisen ajosyklin aikana a) ajon alussa (SoC noin 1,0) ja b) ajon lopussa (SoC noin 0,5).

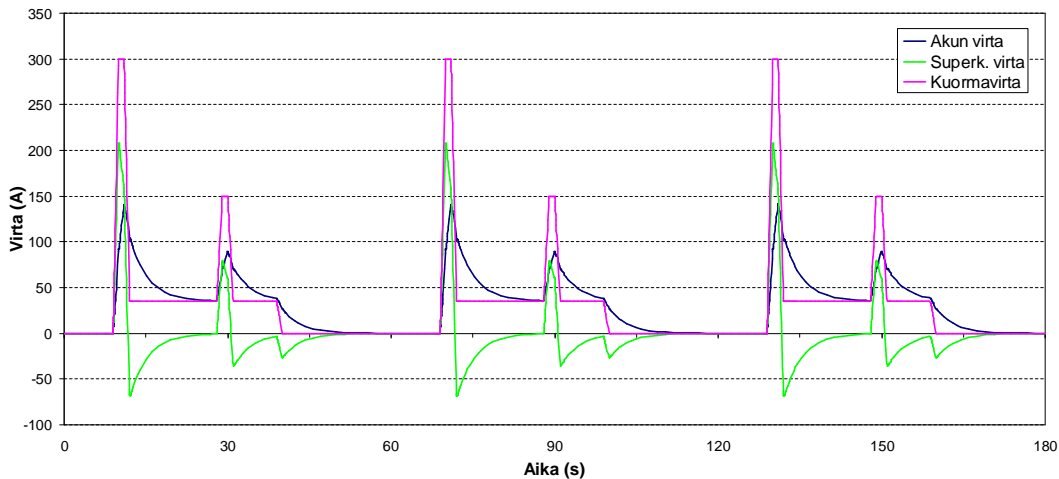
6.2. Lyijyakku ja superkondensaattori

6.2.1. Simulointi

Kaksoishybridille luotua Simulink-mallia (katso kappale 4.1) käyttämällä simuloitiin lyijyakun ja 165 F:n superkondensaattorin passiivista rinnankytkentää. Superkondensaattorin mallin parametrit asetettiin vastaamaan taulukossa 4.1 ilmoitettuja arvoja. Simulointituloksina saatu väyläjännite eri akun varaustiloilla on esitetty kuvassa 6.5, ja kuormavirran jakautuminen täydellä akun varaustilalla on esitetty kuvassa 6.6.



Kuva 6.5. Simuloitu väyläjännite U_{bus} kolmen ajosyklin aikana 165 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle akun SoC:n ollessa 1,0 ja 0,5.

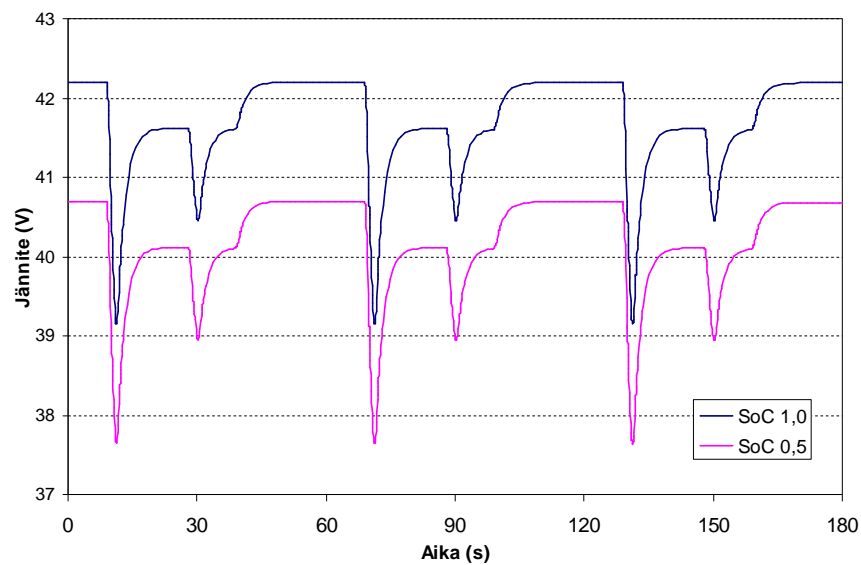


Kuva 6.6. Simuloitu akun virta I_{batt} , superkondensaattorin virta I_{sc} sekä kuormavirta I_{load} 165 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle akun SoC:lla 1.

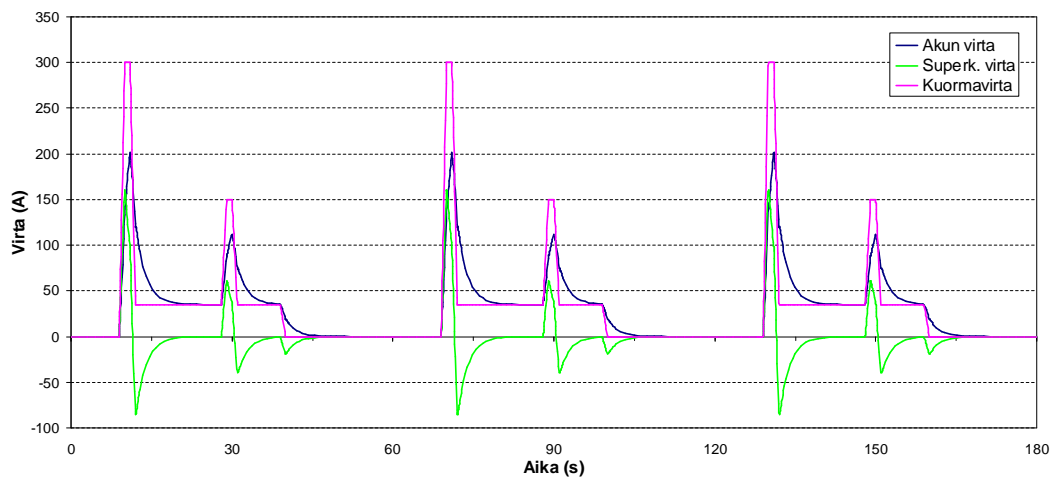
Superkondensaattori vastaa nopeimpiin kuormanvaihteluihin, joten jännitteenvaihtelu on pienempää kuin pelkällä lyijyakulla. Väyläjännite putoaa nyt 300

A:n virtapiikin aikana hieman yli kahdella voltilla, eli superkondensaattori vähentää jännitevaihtelun alle puoleen. Myös lyijyakun huippuvirta putoaa alle puoleen. Virtapiikin jälkeen akun virta putoaa kuormavirtaa hitaammin, ja akku lataa superkondensaattoria. Negatiivinen superkondensaattorin virta merkitsee superkondensaattorin latautumista.

Pienemmän superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle saadut simulointitulokset on esitetty kuvissa 6.7 ja 6.8. Alhaisemmasta kapasitanssistaan sekä korkeammasta sisäresistanssistaan johtuen 83 F:n superkondensaattori ei tue akkua yhtä tehokkaasti kuin suurempi superkondensaattori. Jännite putoaa korkeamman virtapiikin aikana nyt noin kolmella voltilla, ja alhaisemman piikin aikana hieman yli yhdellä voltilla. Akun huippuvirta on nyt noin 200 A, ja superkondensaattorin huippuvirta noin 160 A.



Kuva 6.7. Simuloitu väyläjännite U_{bus} kolmen ajosyklin aikana 83 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle akun SoC:n ollessa 1,0 ja 0,5.

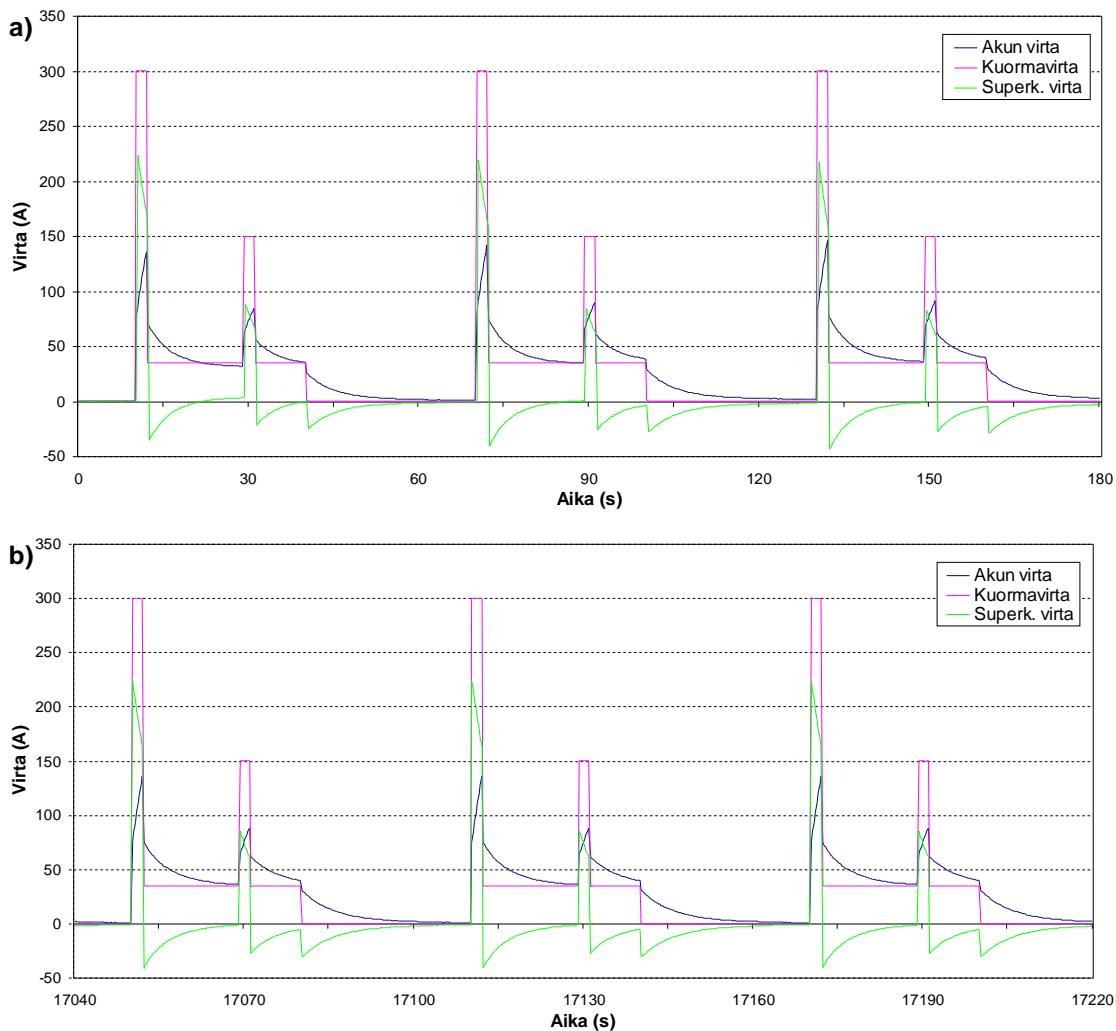


Kuva 6.8. Simuloidut akun virta I_{batt} , superkondensaattorin virta I_{sc} sekä kuormavirta I_{load} 83 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle akun SoC:n ollessa 1.

6.2.2. Kokeelliset tulokset

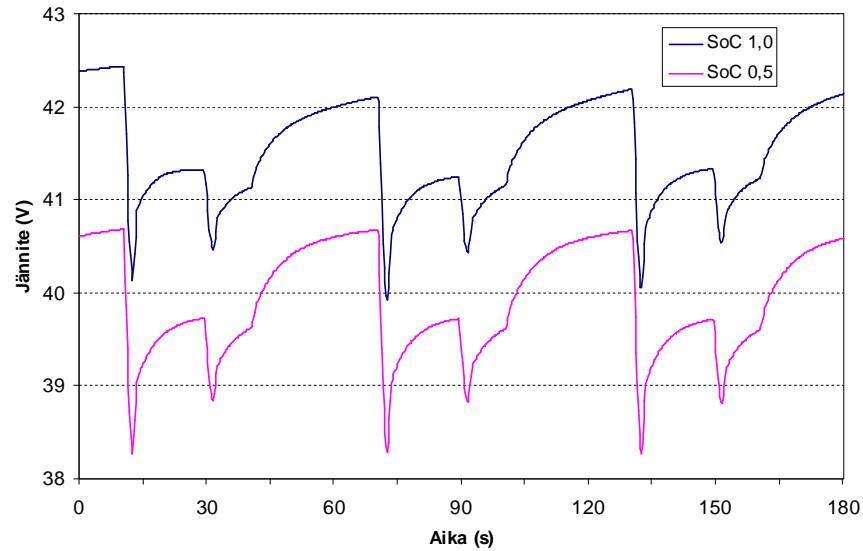
Kaksoishybridimittaukset aloitettiin kytkemällä lyijyakun rinnalle suurempi 165 F:n superkondensaattorimoduuli. Akun varaustila ajettiin ajosykliä käyttäen 1,0:sta 0,5:een. Kuormavirta ja sen jakautuminen akun ja superkondensaattorin välillä SoC:ssa 0,5 ja 1,0 on esitetty kuvassa 6.9.

Verrattuna ajoon pelkällä akulla, 165 F:n superkondensaattori puolittaa lyijyakun huippuvirran korkeammassa virtapiikissä 300 A:sta alle 150 A:iin. Akun varaustilojen 1,0 ja 0,5 välillä on virroissa vain hyvin pieniä eroja. Akun huippuvirta 300 A:n virtapiikin aikana laskee noin 5-10 A:lla mittauksen alkuun verrattuna. Erot johtuvat akun sisäresistanssin kasvamisesta SoC:n laskiessa. Sisäresistanssin muuttuessa myös virtojen jakautuminen akun ja superkondensaattorin välillä muuttuu.



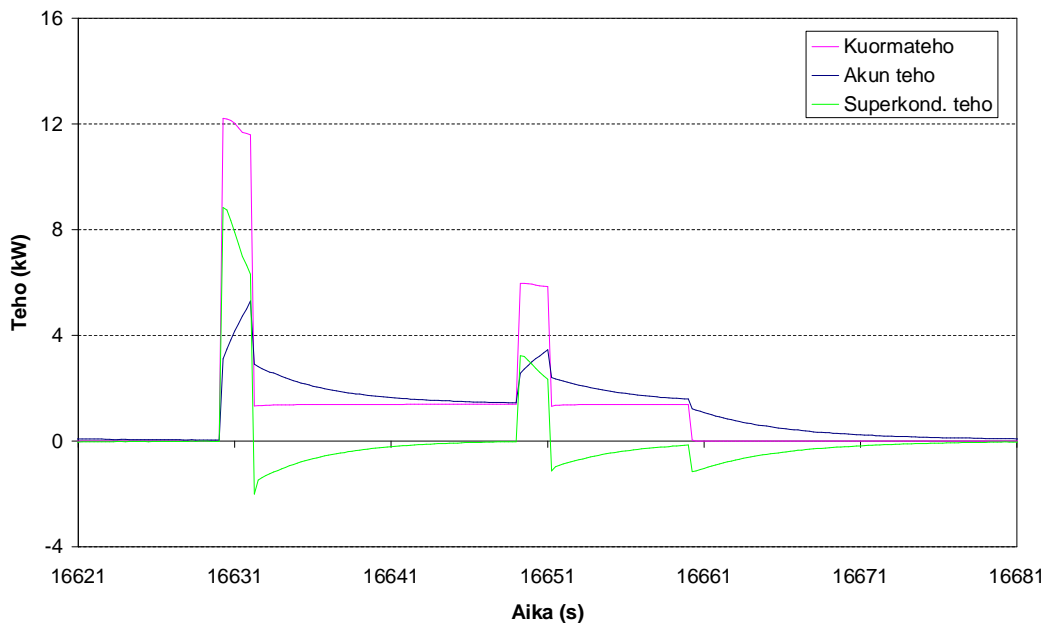
Kuva 6.9. Akun virta, superkondensaattorin virta sekä kuormavirta 165 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle a) ajon alussa (akun SoC on 1) ja b) ajon lopussa (akun SoC on 0,5).

Superkondensaattorin käyttö pienensi myös akun jännitteen vaihteluita kuormitettaessa. Kuvassa 6.10 on esitetty akun jännitteen (eli väyläjännitteen) vaihtelu ajon alussa ja lopussa. SoC:n ollessa 1,0 jännite laskee 300 A:n virtapiikin aikana hieman yli kaksi voltia, ja SoC:n ollessa 0,5 noin 2,5 voltia. Akun huippuvirran tavoin myös jännitteen vaihtelu saatiin siis pienennettyä alle puoleen pelkkään akkuun verrattuna.



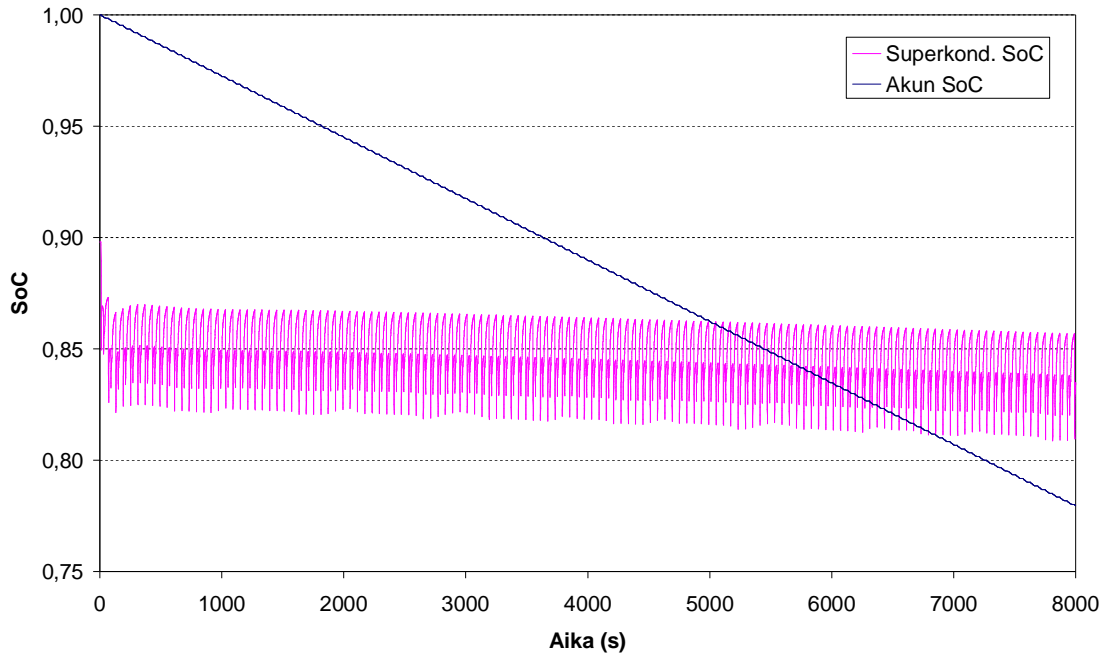
Kuva 6.10. Akun jännite kolmen ajosyklin aikana 165 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle ajon alussa (SoC 1,0) ja lopussa (SoC 0,5).

Kuvassa 6.11 on laskettu hybridijärjestelmän tehon jakautuminen mitattujen virtojen ja väyläjännitteen tulona yhden ajosyklin aikana. Järjestelmän huipputeho 300 A piikin aikana on noin 12 kW, josta superkondensaattori ottaa piikin alussa noin 9 kW.



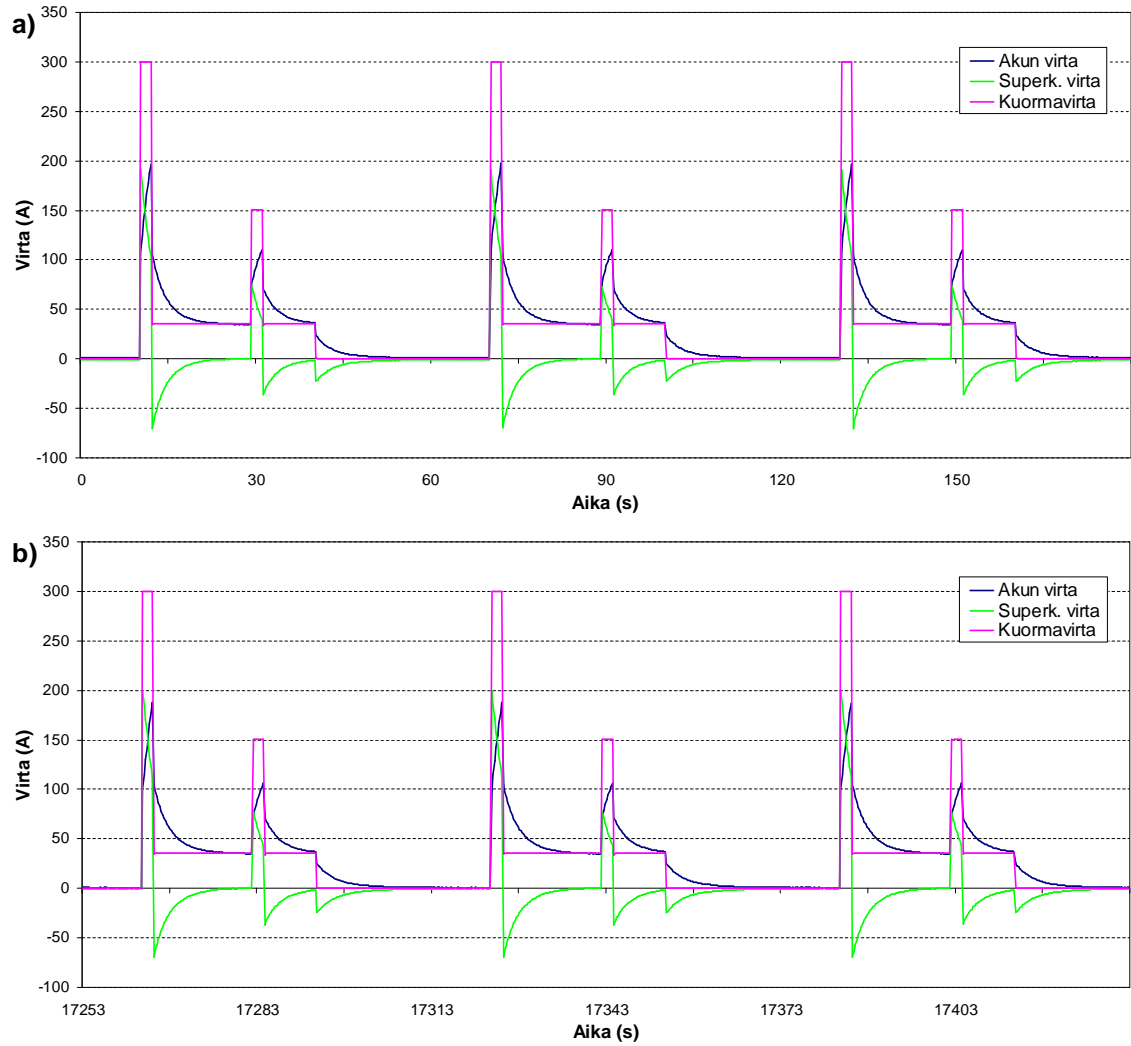
Kuva 6.11. Hybridijärjestelmän tehon (165 F superkondensaattori) jakautuminen yhden ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin 0,5.

Kuvassa 6.12 on esitetty akun ja superkondensaattorin varaustilojen (SoC) muutos pitkän ajon aikana. Akun SoC on ajon alussa 1,0, ja se putoaa 8000 s aikana noin 0,78:aan. Superkondensaattorin SoC on suoraan riippuvainen väyläjännitteestä kaavan (3.1) mukaisesti. Kuvan perusteella nähdään, että superkondensaattorin varauskapasiteetista käytetään hyväksi vain hyvin pieni osa, vain noin 5 %.



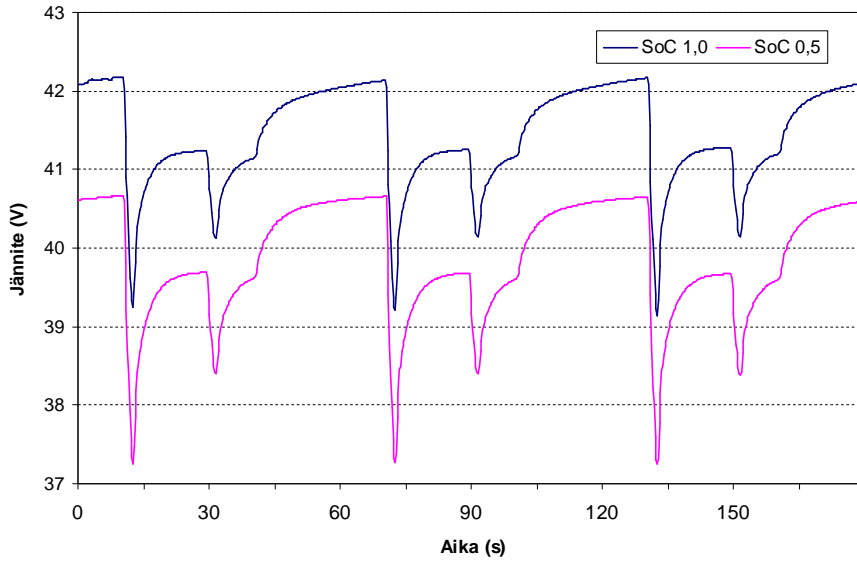
Kuva 6.12. Akun ja 165 F superkondensaattorin SoC:n muutos ajon aikana.

165 F:n superkondensaattorimoduulin tilalla lyijyakun rinnalla ajettiin myös 83 F:n moduulia. Kokoonpanolla ajettiin vastaavat mittausajot kuin edellisellä kokoonpanolla. Kuormavirta ja sen jakautuminen akun ja 83 F:n superkondensaattorin välillä on esitetty kuvassa 6.13. Pienemmän superkondensaattorin rinnalla lyijyakun huippuvirta on mittauksen alussa (SoC 1,0) noin 200 A, ja mittauksen lopussa (SoC 0,5) noin 175–180 A. Ero akun eri varaustilojen välillä on nyt hieman suurempi kuin suuremmalla 165 F superkondensaattorilla.



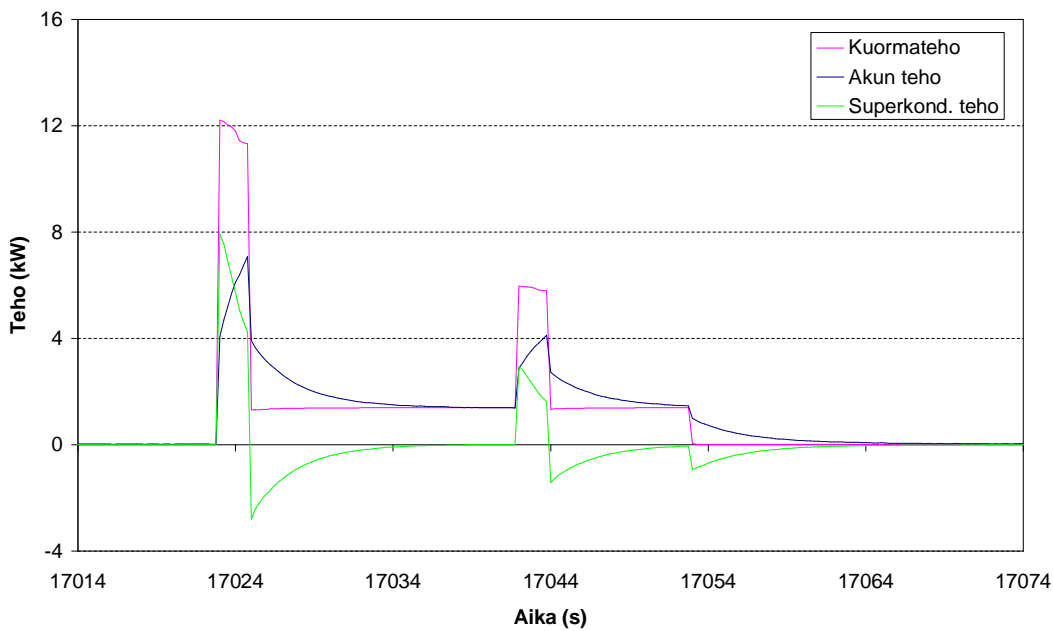
Kuva 6.13. Akun virta, superkondensaattorin virta sekä kuormavirta 83 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle a) ajon alussa (akun SoC on 1) ja b) ajon lopussa (akun SoC on 0,5).

83 F:n superkondensaattorin pienensi odotetusti akun jännitteen vaihteluita 165 F:n superkondensaattoria vähemmän. Kuvassa 6.14 on esitetty akun jännitteen vaihtelu ajon alussa ja lopussa. SoC:n ollessa 1,0 jännite laskee 300 A:n virtapiikin aikana lähes 3 V, ja SoC:n ollessa 0,5 lähes 3,5 V.



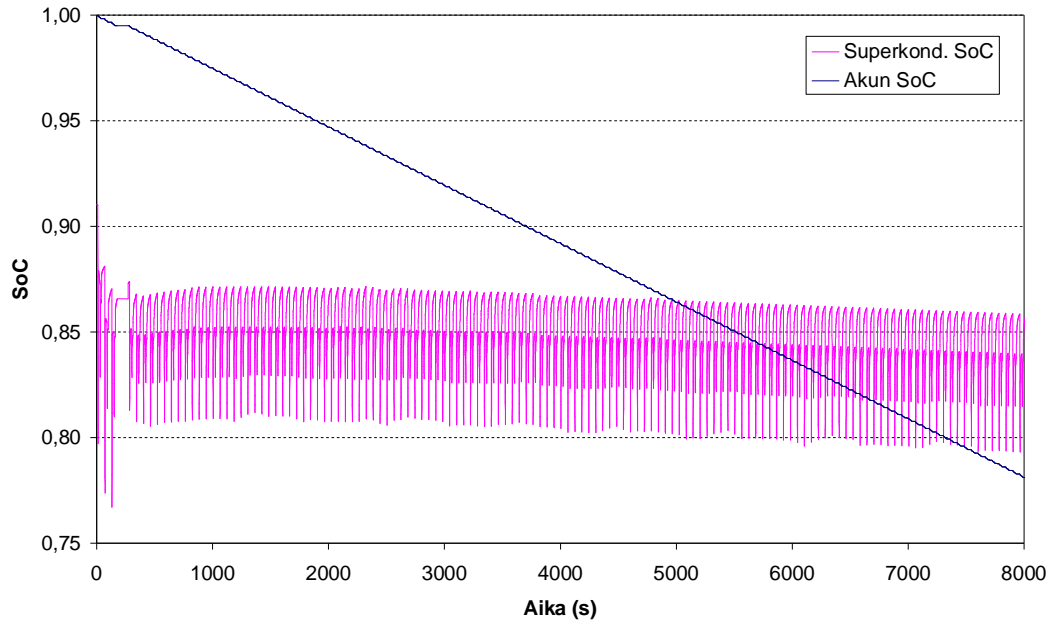
Kuva 6.14. Akun jännite kolmen ajosyklin aikana 83 F:n superkondensaattorin ja lyijyakun rinnankytkennälle ajon alussa (SoC 1,0) ja lopussa (SoC 0,5).

Kuvassa 6.15 on laskettu hybridijärjestelmän tehon jakautuminen mitattujen virtojen ja väyläjännitteen tulona yhden ajosyklin aikana. Superkondensaattori ottaa järjestelmän huipputehosta 300 A piikin aikana noin 8 kW.



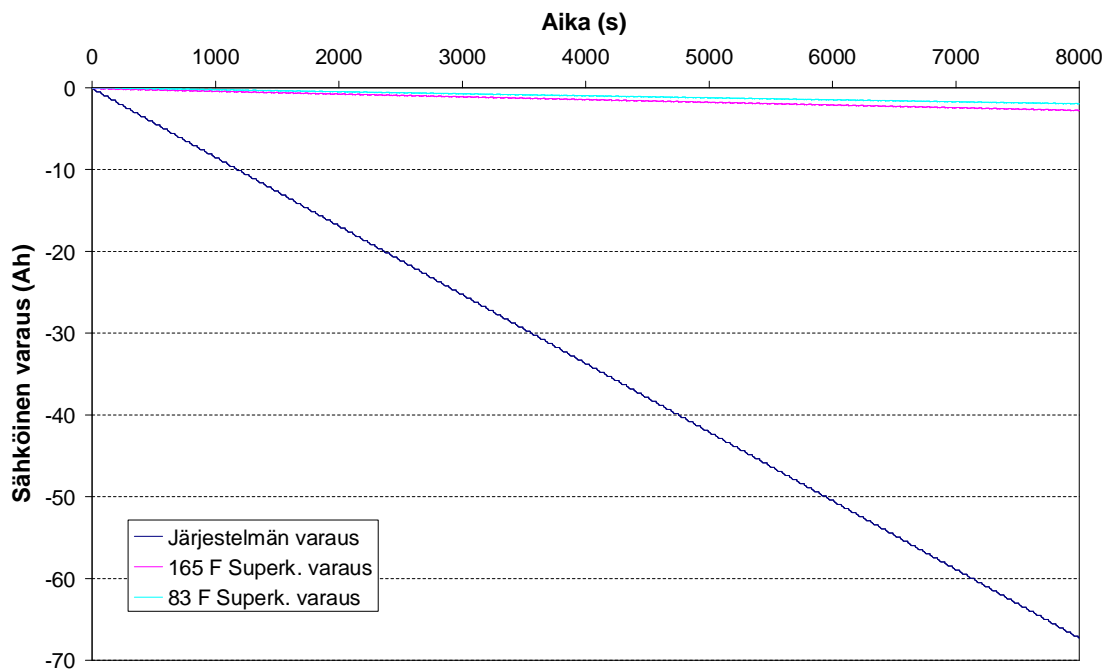
Kuva 6.15. Hybridijärjestelmän tehon (83 F superkondensaattori) jakautuminen yhden ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin 0,5.

Kuvassa 6.16 on esitetty akun ja 83 F superkondensaattorin varaustilojen (SoC) muutos pitkän ajon aikana. Akun SoC on ajon alussa 1,0, ja se putoaa 8000 s aikana noin 0,78:aan. Pienemmän 83 F superkondensaattorin SoC vaihtelee hieman 165 F superkondensaattoria (kuva 6.12) enemmän. Tästä huolimatta superkondensaattorin koko varauskapasiteetista ei vielääkään käytetä hyväksi kuin pieni osa, noin 7 %.



Kuva 6.16. Akun ja 83 F superkondensaattorin SoC:n muutos ajan aikana.

Kuvassa 6.17 on esitetty vielä kumulatiivisesti 83 F ja 165 F superkondensaattorimoduulilta purettu sähkövaraus verrattuna koko järjestelmästä purettuun sähkövaraukseen. Kuvaaja kertoo siis, kuinka suuri osa koko järjestelmän tuottamasta sähköenergiasta kulkee superkondensaattorin kautta. Vaikka hetkelliset superkondensaattorin virtapiikit ovat hyvin korkeita, vastaa se ainoastaan noin 4–4,5 % koko järjestelmän energiasta. Varauksen arvot ovat negatiivisia, eli superkondensaattoreita puretaan ajan aikana enemmän kuin ladataan.

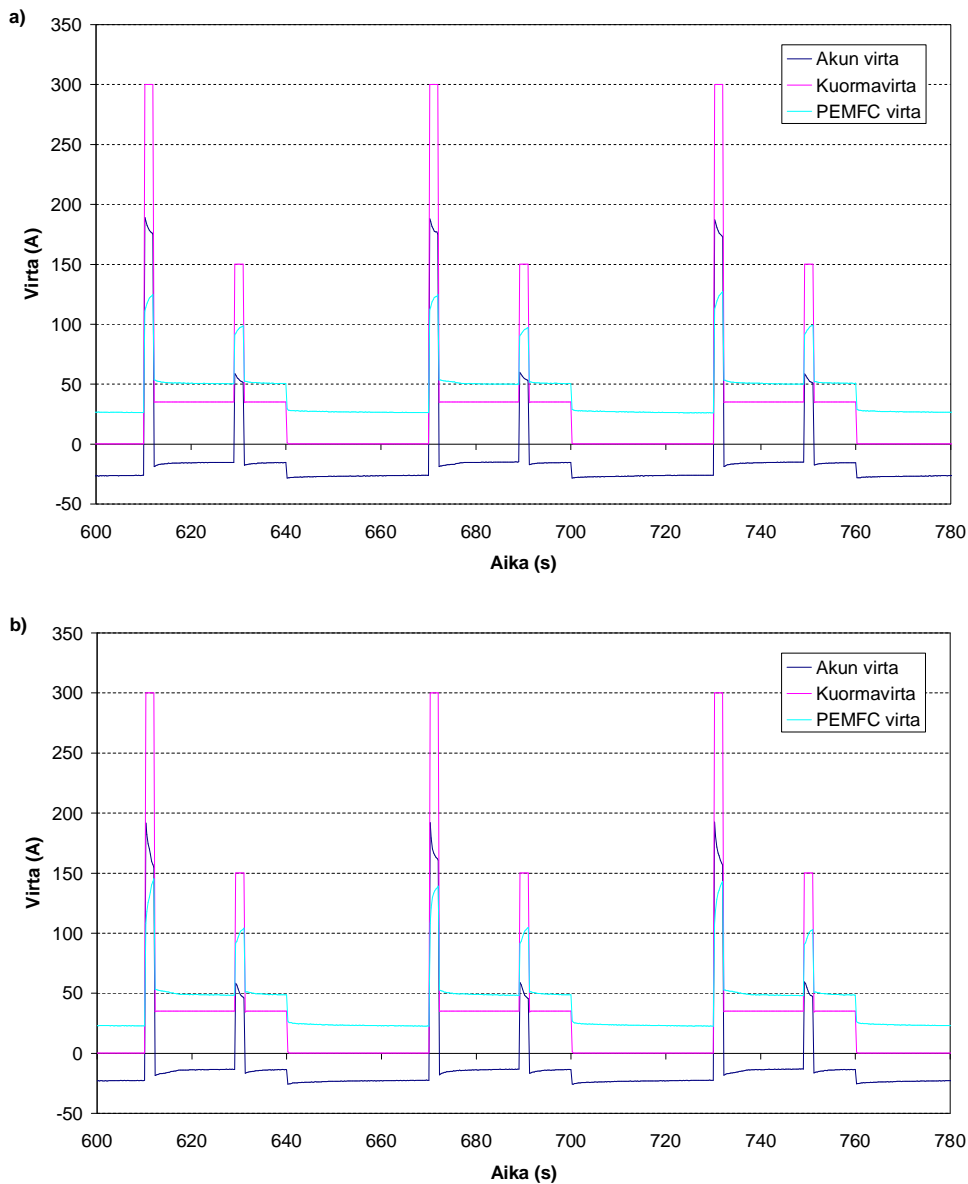


Kuva 6.17. Kummankin superkondensaattorimoduulin ”läpi kulkenut” kumulatiivinen sähkövaraus verrattuna koko järjestelmän varaukseen.

6.3. Polttokennojärjestelmä ja lyijy Akku

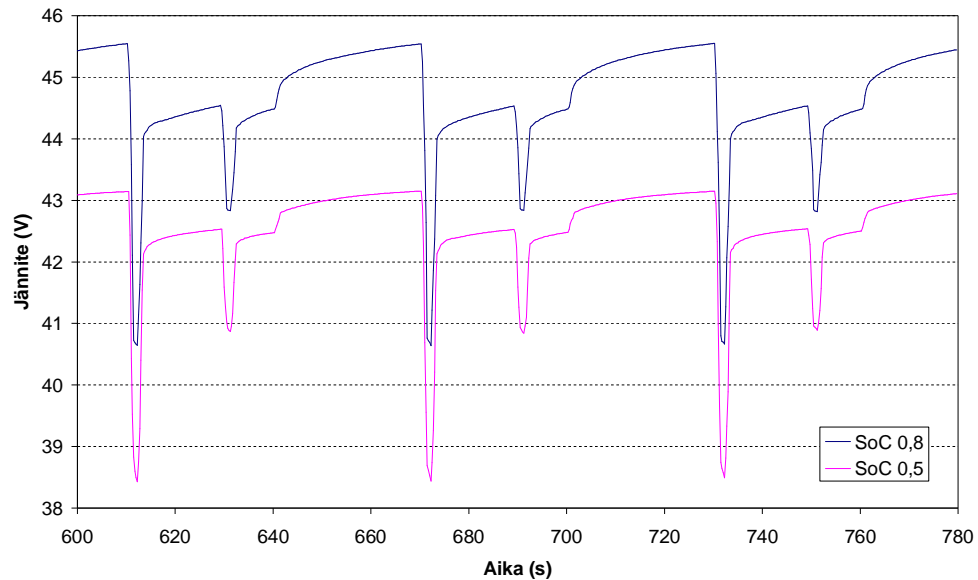
PEMFC-järjestelmän ja lyijyakkupaketin muodostamalla kaksoishybridillä tehtiin kaksi noin 1,5 tunnin mittausajoa. Ajojen aikana akun SoC nousi noin 0,5:stä 0,56:een ja 0,8:sta 0,83:een polttokennon ladatessa akkua. Hybridijärjestelmän virtojen jakautuminen polttokennon ja akun kesken akun varaustiloilla 0,5 ja 0,8 on esitetty kuvassa 6.18.

Kuormavirran ollessa nolla polttokenno lataa akkua noin 25 A keskivirralla. Kuormavirran ollessa 35 A latausvirta on noin 15–20 A. SoC kasvoi tehtyjen ajojen aikana niin vähän, että suurta eroa ei varaustilojen välillä latausvirroissa ole. Akun virta kääntyy positiiviseksi (eli akkua puretaan) ainoastaan ajosyklin 300 A ja 150 A virtapiikkien kohdalla. 300 A virtapiikistä akku ottaa yli puolet, huippuvirran noustessa noin 190 A:iin. PEMFC:n virranmuutos 300 A piikin aikana on suurimmillaan noin 120 A (25 A:sta 145 A:iin).



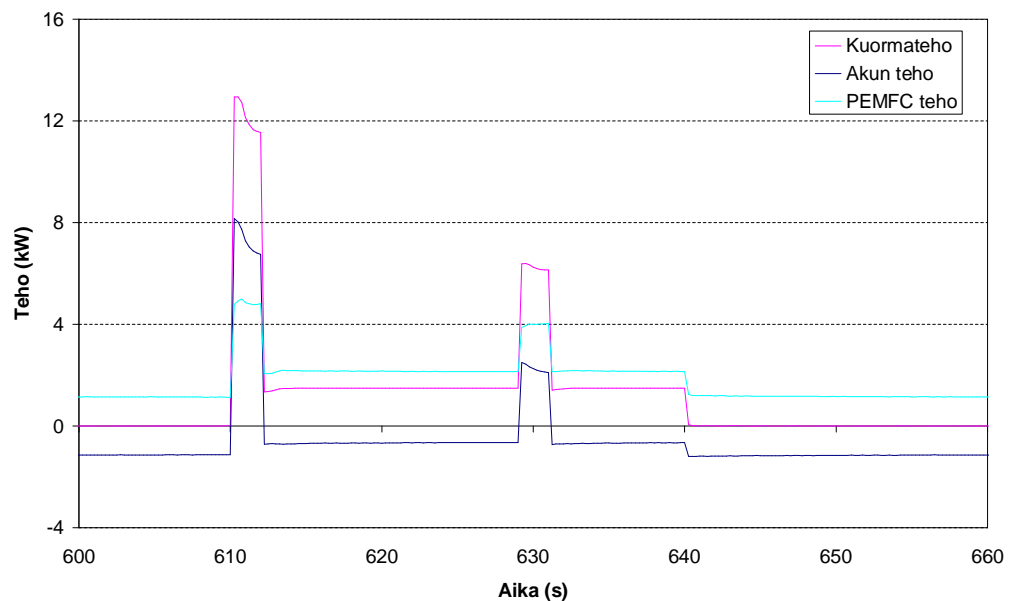
Kuva 6.18. PEMFC:n ja akun virta akun SoC:n ollessa a) 0,5 ja b) 0,8.

Kuvassa 6.19 on esitetty väyläjännitteen vaihtelu kolmen peräkkäisen syklin aikana akun SoC:lla 0,5 ja 0,8. Akun lataaminen nostaa väyläjännitteen melko korkeaksi kuormavirran ollessa nolla, joten virtapiikkien aikana akkua purettaessa jännite laskee melko paljon. 300 A virtapiikin aikana jännite putoaa SoC:lla 0,8 noin 5 V ja SoC:lla 0,5 noin 4,7 V.



Kuva 6.19. Väyläjännitteen vaihtelu kolmen perättäisen syklin aikana akun SoC:n ollessa 0,5 ja 0,8.

Kuvassa 6.20 on esitetty hybridijärjestelmän tehojen jakautuminen PEMFC:n ja akun kesken akun SoC:n ollessa noin 0,5. Polttokennojärjestelmä ottaa järjestelmän 13 kW huipputehosta noin 5 kW, kun akun huipputeho on noin 8 kW. PEMFC:n suurin tehonmuutos on noin 4 kW.

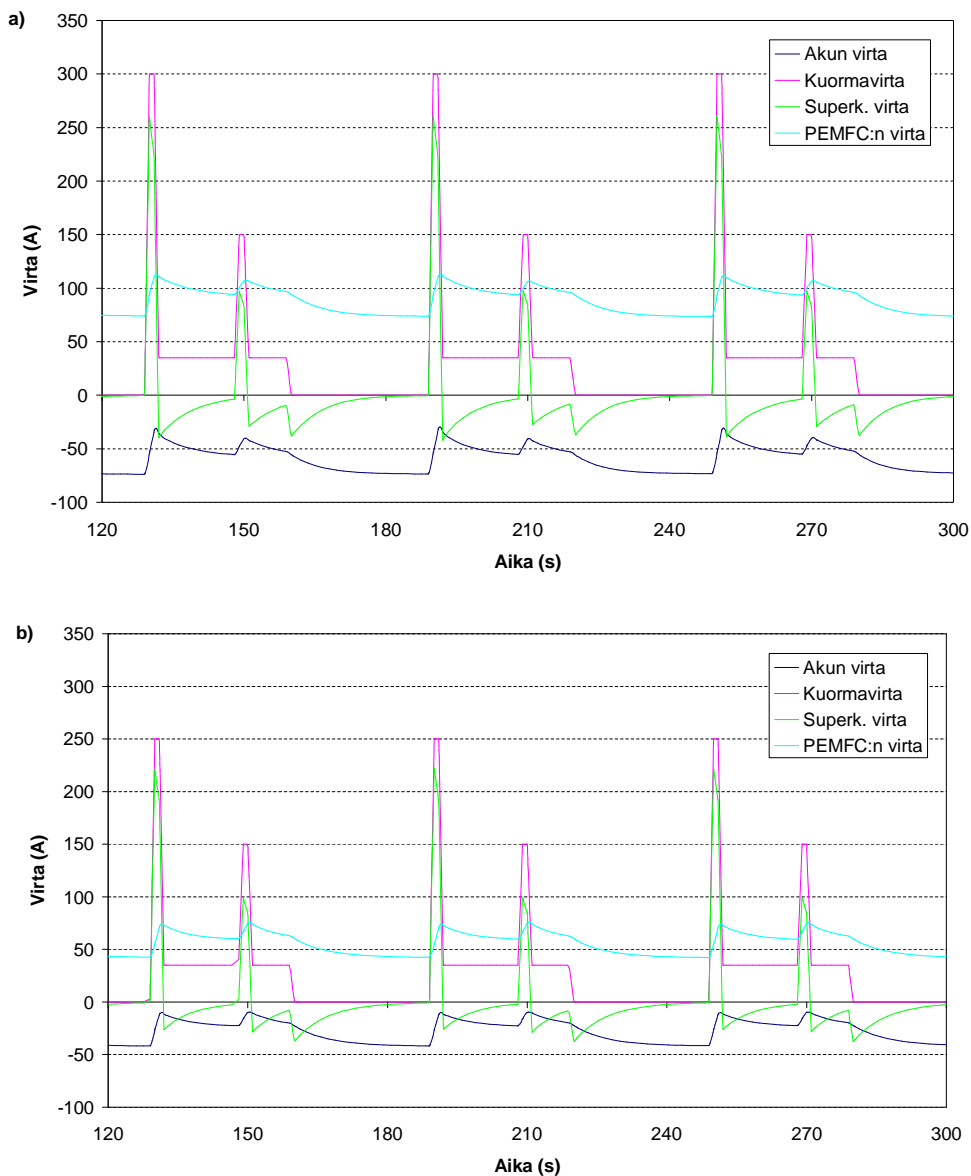


Kuva 6.20. Tehon jakautuminen akun ja PEMFC:n kesken yhden syklin aikana akun SoC:n ollessa noin 0,5.

6.4. Polttokennojärjestelmä, lyijyakku ja superkondensaattori

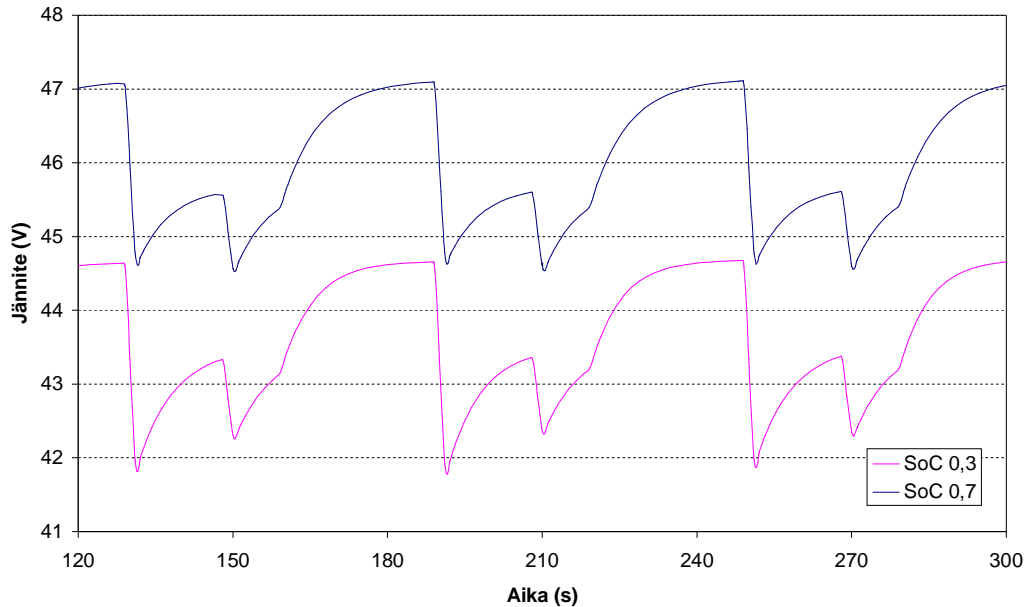
6.4.1. Simulointi

Polttokennojärjestelmän, lyijyakun ja superkondensaattorin kolmoishybridin simulointiajot tehtiin kappaleessa 4.2 esitellyllä hybridimallilla. Simuloidut järjestelmän virrat 165 F superkondensaattorilla akun varaustiloilla 0,3 ja 0,7 on esitetty kuvassa 6.21. Kokeellisissa mittauksissa ajosyklin 300 A virtapiikkiä jouduttiin pienentämään 0,5:tä suuremmilla varaustiloilla 250 A:iin (katso kappale 6.4.2), joten niin tehtiin myös simulointiajossa. Akun SoC:ssa 0,3 akku latautuu voimakkaasti latausvirran ollessa suurimmillaan lähes 80 A. Simulointitulosten mukaan ajosyklin aikana akulta ei pureta virtaa ollenkaan.



Kuva 6.21. Simuloidut järjestelmän virrat 165 superkondensaattorilla akun SoC:lla a) 0,3 ja b) 0,7. SoC:lla 0,7 ajosyklin korkeampi virtapiikki on 250 A.

Väyläjännitteen vaihtelu varaustiloilla 0,3 ja 0,7 on esitetty kuvassa 6.22. SoC:lla 0,3 väyläjännite putoaa 300 A virtapiikin aikana lähes 3 V, kun varaustilassa 0,7 jännite putoaa noin 2,5 V. SoC:lla 0,7 kuormasyklin korkeampi virtapiikki oli kuitenkin laskettu 300 A:sta 250 A:iin.

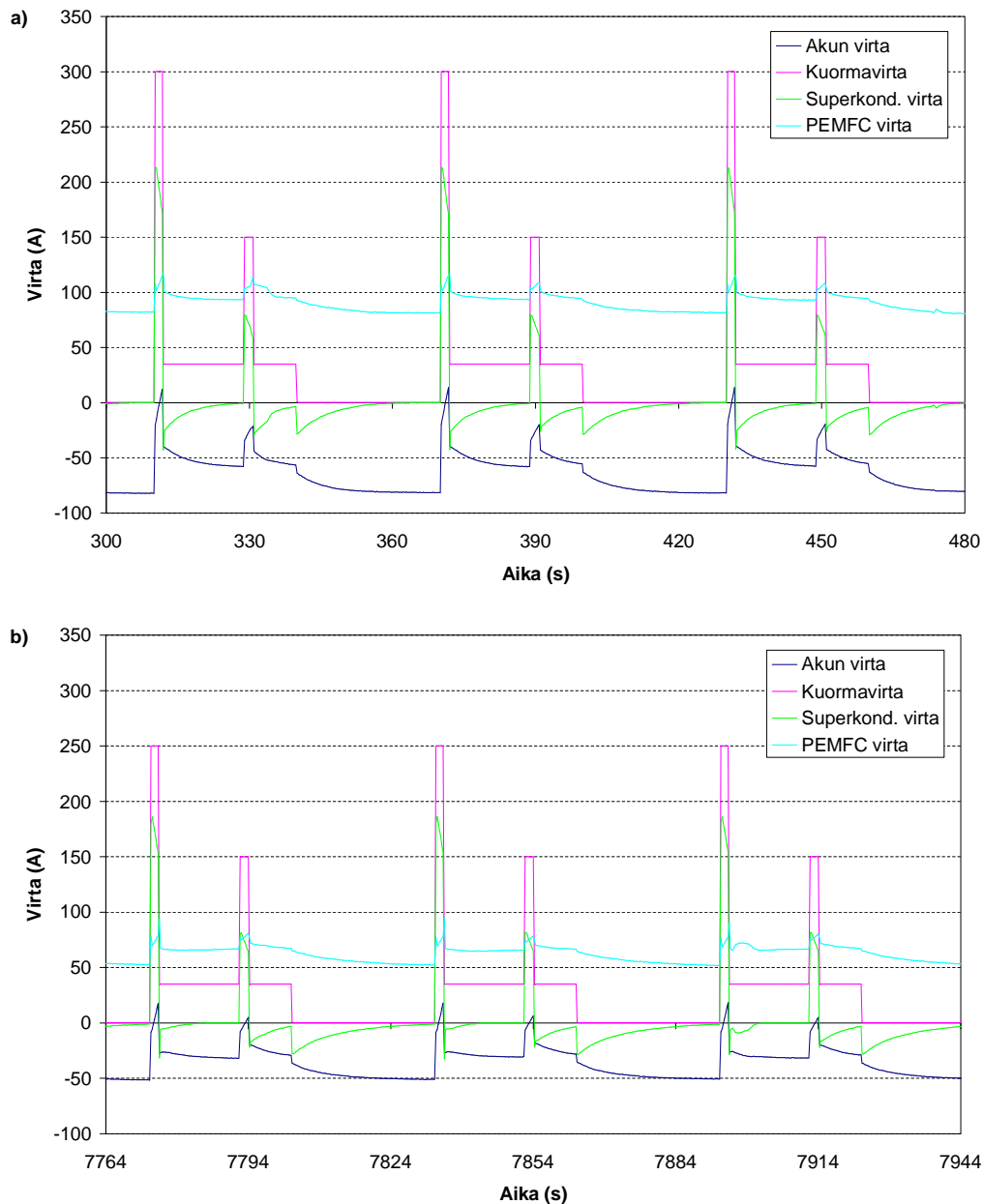


Kuva 6.22. Simuloitu väyläjännitteen vaihtelu akun varaustiloilla 0,3 ja 0,7. SoC:lla 0,7 ajosyklin korkeampi virtapiikki on 250 A.

6.4.2. Kokeelliset tulokset

Kolmoishybridimitauksissa polttokennon ja lyijyakun rinnalle kytkettiin suurempi 165 F:n superkondensaattorimoduuli. Järjestelmällä ajettiin noin 2 h 45 min pitkä ajo, jonka aikana akun varaustila nousi noin 0,3:sta 0,74:ään. Kuormavirta ja sen jakautuminen polttokennon, akun ja superkondensaattorin välillä on esitetty kuvassa 6.23. Akun SoC:n ollessa noin 0,5 väyläjännitteet nousivat niin korkeiksi, että mittauksissa käytetyn kuormalaitteen maksimiteho (noin 14 kW) saavutettiin 300 A virtapiikin aikana. Jotta mittauksia voitiin jatkaa, piti ajosyklin korkeampaa virtapiikkiä pienentää 250 A:iin. Tällä ajosyklillä jatkettiin mittauksen loppuun.

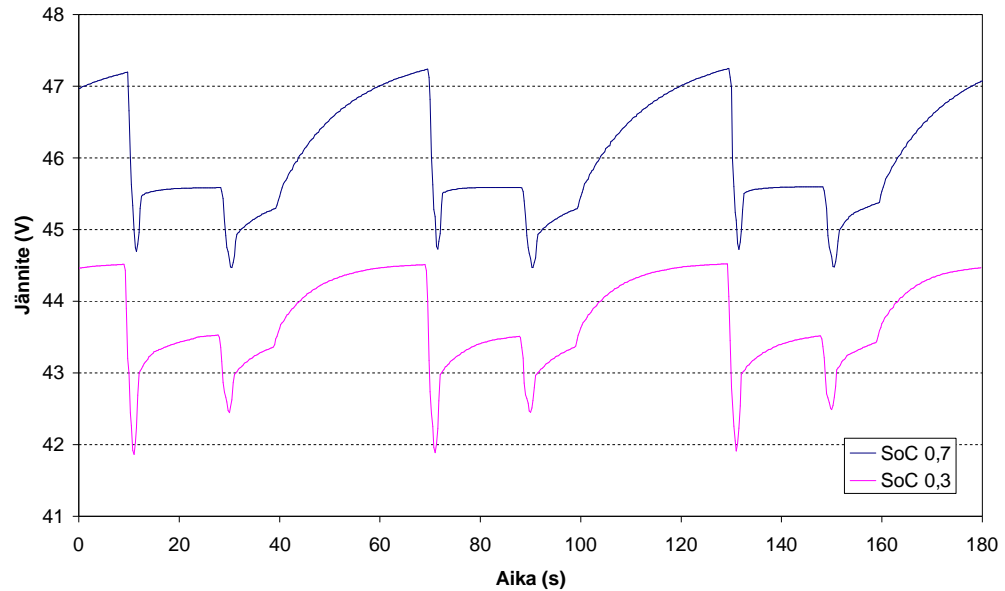
Akku latautuu voimakkaasti mittausajon aikana. Akun varaustilan ollessa 0,3 ainoastaan 300 A virtapiikin aikana virta on hetken positiivinen (eli akkua puretaan). Akun latausvirta kuormavirran ollessa nolla on noin 80 A. Superkondensaattorin huippuvirta 300 A piikin aikana on noin 210 A. Varaustilassa 0,7 myös alhaisemman kuormavirtapiikin aikana akun virta nousee positiiviseksi. Kuormavirran korkeamman virtapiikin suuruus on nyt 250 A, ja superkondensaattori ottaa siitä noin 190 A. PEMFC:n virranmuutos on ajon aikana korkeimmillaan noin 40 A.



Kuva 6.23. Hybridijärjestelmän (165 F superkondensaattori) virtojen jakautuminen kolmen peräkkäisen ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin a) 0,3 ja b) 0,7. SoC:lla 0,7 ajosyklin korkeampi virtapiikki on 250 A.

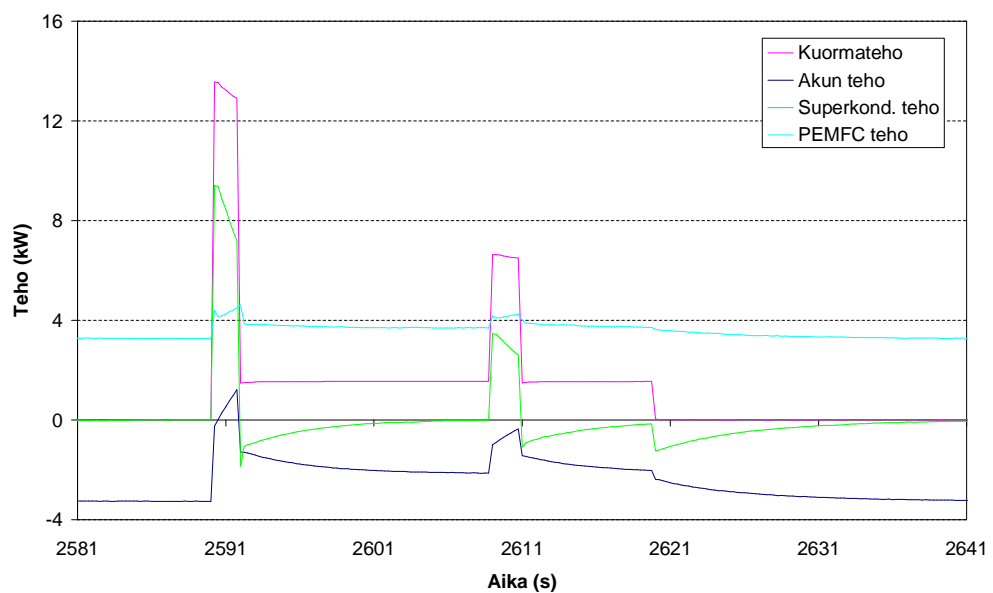
Kuvan 6.23 a. ensimmäisen syklin matalamman kuormavirtapiikin, ja kuvan 6.23 b. viimeisen syklin korkeamman kuormavirtapiikin jälkeen PEMFC:n virta kohoaa hieman muutaman sekunnin ajaksi. Tämä johtuu anodipuolen päästöventtiilin aukeamisesta (hydrogen purge), jonka jälkeen myös katodipuolen ilmapuhallinta käytetään hetki täydellä teholla. Ilman ja vedyn stoikiometrinen suhde kasvaa hetkellisesti, ja stackilta saadaan enemmän virtaa. Stoikiometrisen suhteen vaikutusta PEMFC-stackin toimintaan on käsitelty kappaleessa 3.3.1, kohdassa polttokennoteholähteen dynamiikka.

Kuvassa 6.24 on esitetty väyläjännite ajan funktiona kolmen peräkkäisen ajosyklin aikana 165 F superkondensaattorilla varustetulle järjestelmälle akun SoC:n ollessa 0,3 ja 0,7. Väyläjännitteen maksimiarvo ajon aikana on noin 47,2 V, joten superkondensaattorin maksimikäyttöjännitettä ei saavutettu.



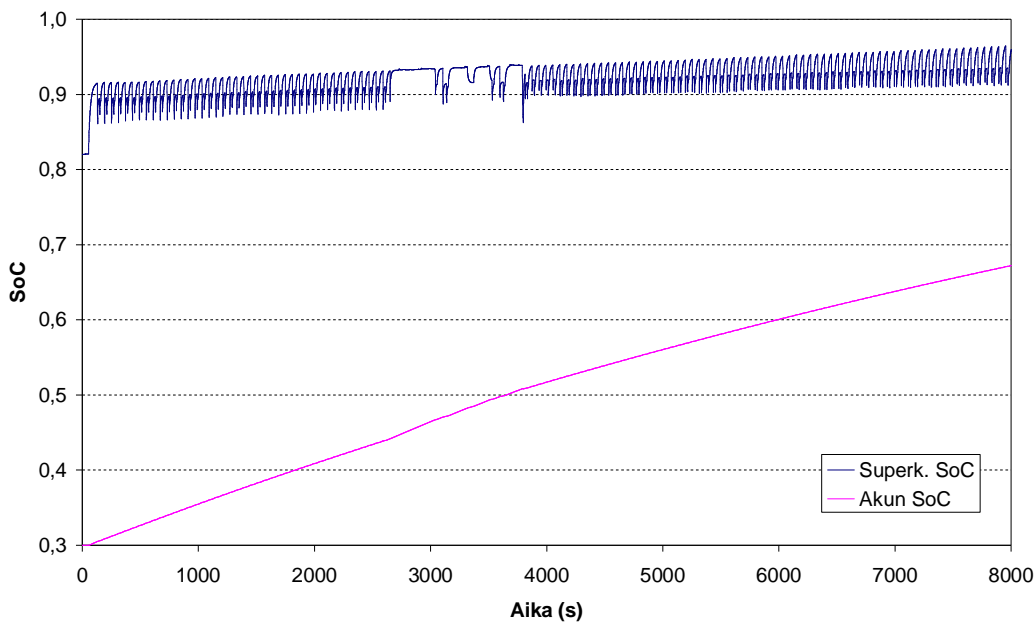
Kuva 6.24. Väyläjännitteen vaihtelu kolmen peräkkäisen syklin aikana 165 F superkondensaattorin järjestelmällä akun SoC:n ollessa 0,3 ja 0,7.

Kuvassa 6.25 on esitetty kuormatehon jakautuminen PEMFC:n, akun ja superkondensaattorin kesken akun SoC:n ollessa noin 0,5. Järjestelmän huipputeho 300 A virtapiikin aikana on noin 14 kW, josta superkondensaattori ottaa noin 9,5 kW, ja PEMFC noin 4,5 kW. Akun teho on positiivinen (eli akkua puretaan) ainoastaan 300 A virtapiikin aikana. PEMFC:n suurin tehonmuutos on noin 1,3 kW.



Kuva 6.25. Kolmoishybridijärjestelmän (165 F superkondensaattori) tehojen jakautuminen yhden ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin 0,5.

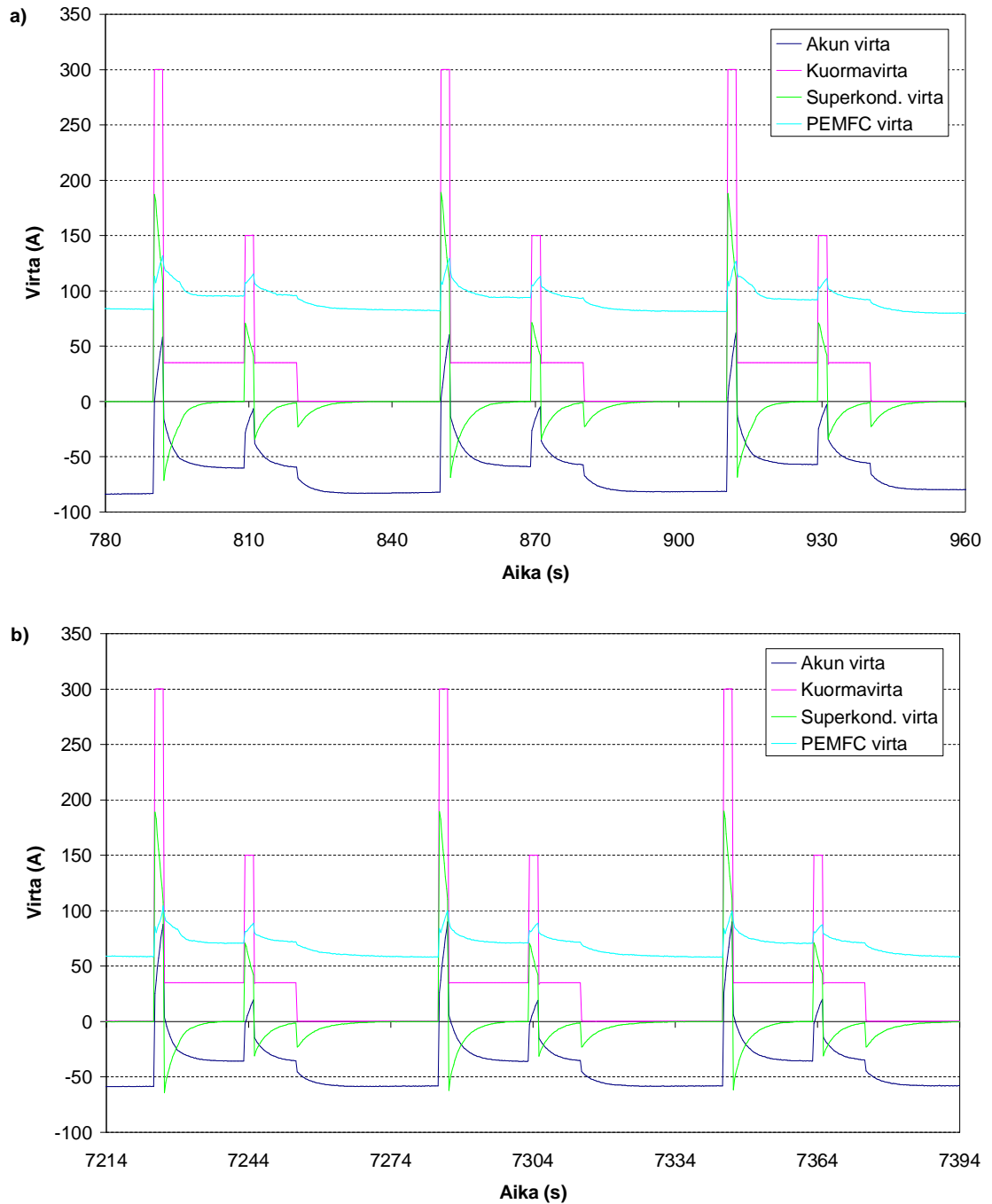
Kuvassa 6.26 on esitetty akun ja 165 F superkondensaattorin varaustilojen (SoC) muutos mittausajon aikana. Akun SoC on ajon alussa 0,3, ja se kasvaa 8000 s aikana noin 0,67:aan (kuvassa ei ole esitetty koko mittausajoa). Superkondensaattorin SoC vaihtelee väyläjännitteen mukana. Superkondensaattorin varauskapasiteetista käytetään hyväksi noin 5 %. Superkondensaattorin SoC:n kuvaajassa voidaan nähdä 2700 s jälkeen kohta, jossa kuormalaitteen tehorojoitus katkaisi kuorman ohjauksen, ja kuormasykliä oli muokattava.



Kuva 6.26. 165 F superkondensaattorin ja akun SoC:n muutos ajon aikana.

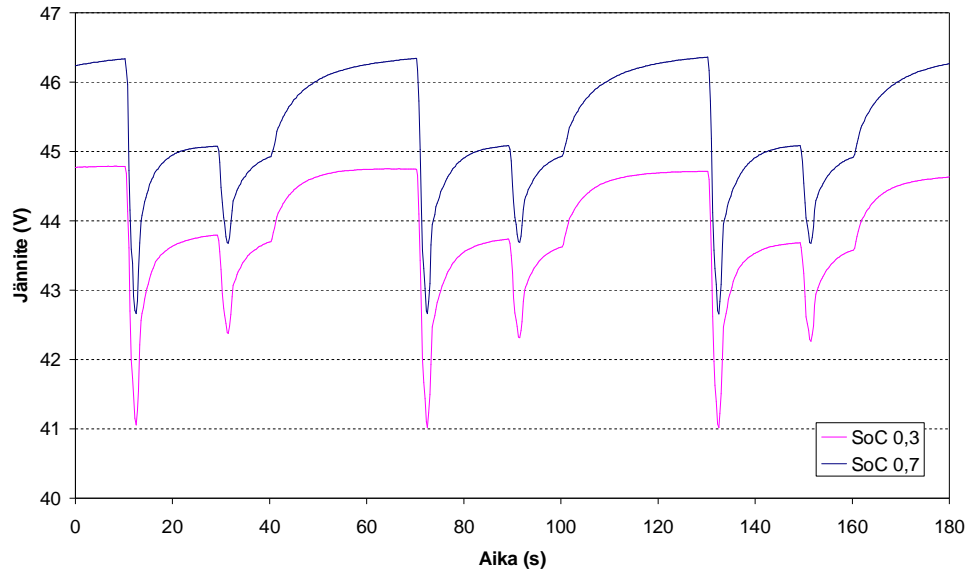
165 F:n superkondensaattorimoduulin lisäksi PEMFC:n ja lyijyakun rinnalla ajettiin myös 83 F:n moduulia. Kokoonpanolla ajettiin vastaavat mittausajot kuin 165 F superkondensaattorin kanssa. Kuormavirta ja sen jakautuminen hybridijärjestelmän komponenttien välillä akun varaustiloilla 0,3 ja 0,7 on esitetty kuvassa 6.27. Tällä järjestelmän kokoonpanolla kuormalaitteen tehorojoja ei saavutettu, joten alkuperäisellä ajosyklillä päästiin ajamaan mittaus loppuun asti.

Myös pienemmällä superkondensaattorimoduulilla ajettaessa akku latautuu voimakkaasti ajon aikana. Tosin virtapiikkien aikana akun virta nousee nyt selkeämmin positiiviseksi. Akun latausvirta kuormavirran ollessa nolla on noin SoC:ssa 0,3 noin 80 A ja SoC:ssa 0,7 noin 60 A. Superkondensaattorin huippuvirta 300 A piikin aikana on varaustilasta riippumatta noin 190 A. PEMFC:n virranmuutos on ajon aikana korkeimmillaan noin 50 A. Purgen aiheuttama hetkellinen PEMFC:n virran nousu voidaan nähdä jälleen joidenkin virtapiikkien jälkeen.



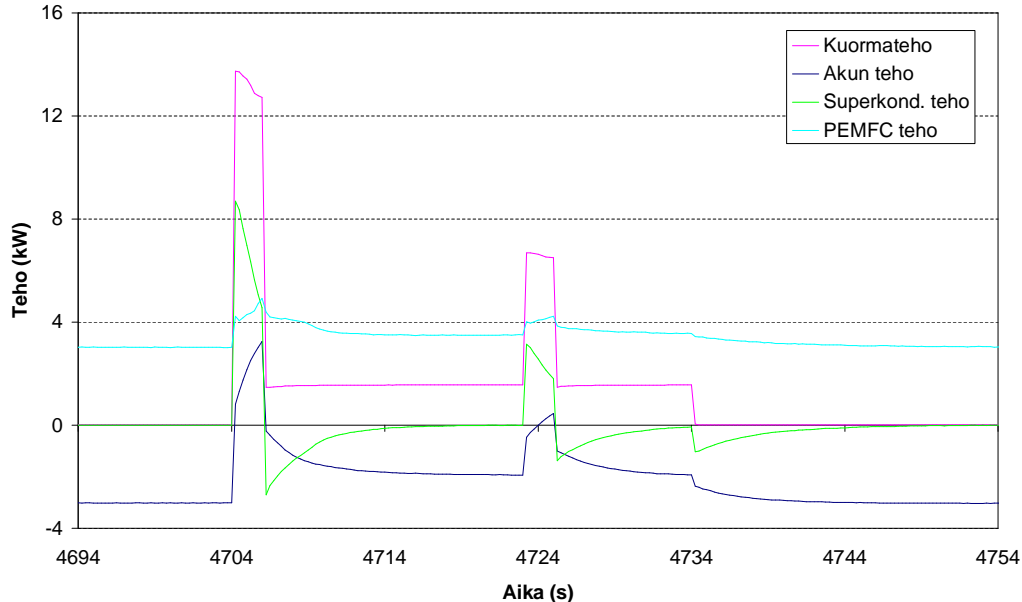
Kuva 6.27. Hybridijärjestelmän (83 F superkondensaattori) virtojen jakautuminen kolmen peräkkäisen ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin a) 0,3 ja b) 0,7.

Kuvassa 6.28 on esitetty väljännitte ajan funktiona kolmen peräkkäisen ajosyklin aikana 83 F superkondensaattorilla varustetulle järjestelmälle. Akun SoC on kuvassa 0,3 ja 0,7. Väljännitteen suurin arvo on noin 46,4 V, ja jännite putoaa kummallakin SoC:lla noin 3,8 V.



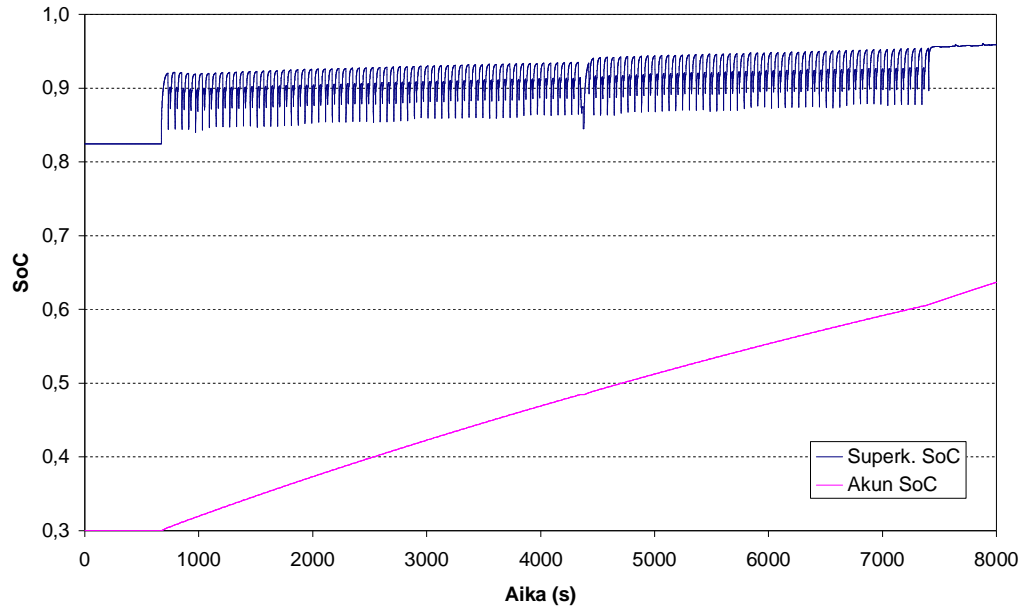
Kuva 6.28. Väyläjännitteen vaihtelu kolmen perättäisen syklin aikana 83 F superkondensaattorin järjestelmällä akun SoC:n ollessa 0,3 ja 0,7.

Kuvassa 6.29 on esitetty kuormatehon jakautuminen PEMFC:n, akun ja 83 F superkondensaattorin kesken akun SoC:n ollessa noin 0,5. Korkeamman tehopiikin aikana superkondensaattorin maksimiteho on noin 8,5 kW, akun noin 3 kW ja PEMFC:n noin 5 kW. PEMFC:n suurin tehonmuutos on noin 1,5 kW.



Kuva 6.29. Hybridijärjestelmän (83 F superkondensaattori) tehojen jakautuminen yhden ajosyklin aikana akun SoC:n ollessa noin 0,5.

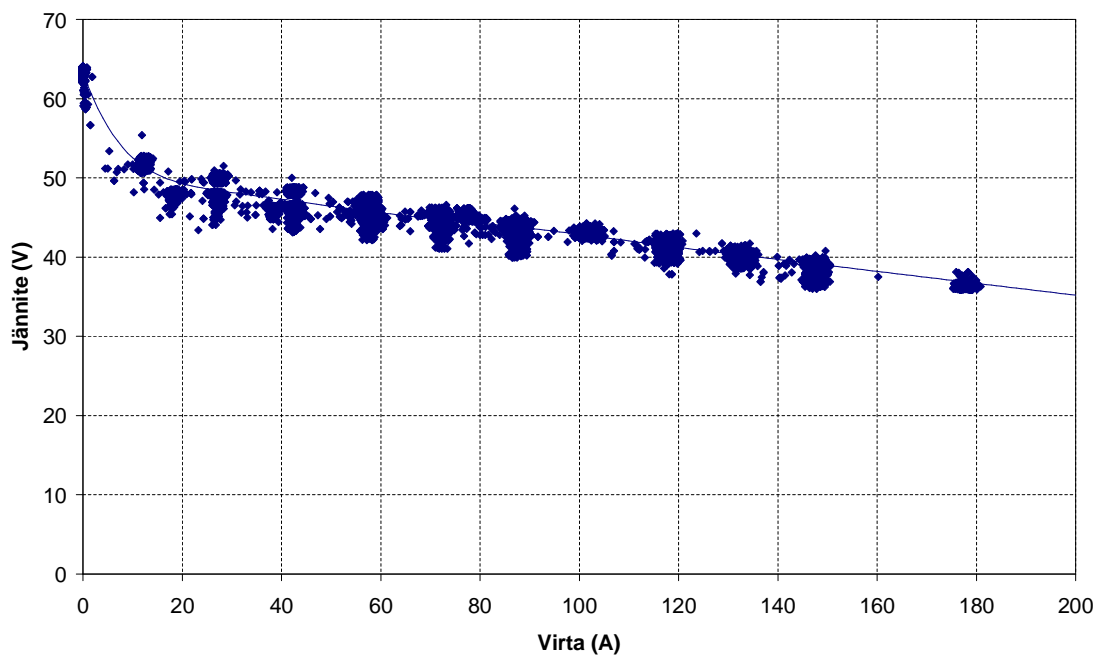
Kuvassa 6.30 on esitetty akun ja 83 F superkondensaattorin varaustilojen (SoC) muutos mittausajon aikana. Akun SoC on ajon alussa 0,3, ja se kasvaa 8000 s aikana noin 0,64:aan. Superkondensaattorin varauskapasiteetista käytetään hyväksi noin 8 %, kun 165 F superkondensaattorilla siitä käytettiin noin 5 %.



Kuva 6.30. 83 F superkondensaattorin ja akun SoC:n muutos ajon aikana.

6.5. Polttokennojärjestelmän karakterisointi

PEMFC-järjestelmälle suoritettiin mittauksia sen transientitilojen hyötysuhteen tutkimiseksi. Kuormavirtaa kasvatettiin askeleittain nollassa 120–180 A:iin, minkä jälkeen palattiin askeleittain takaisin nolnaan. Mittaukset suoritettiin ilman lyijyakkupakettia ja superkondensaattoreita. Samalla mitattiin vedyn moolivirtaa, oheisjärjestelmien (24 V) akuilta otettavaa virtaa, ja ilmapuhaltimen ottamaa virtaa. Mittaustuloksista saatu PEMFC:n VI-käyrä (jännite virran funktiona) on esitetty kuvassa 6.31.

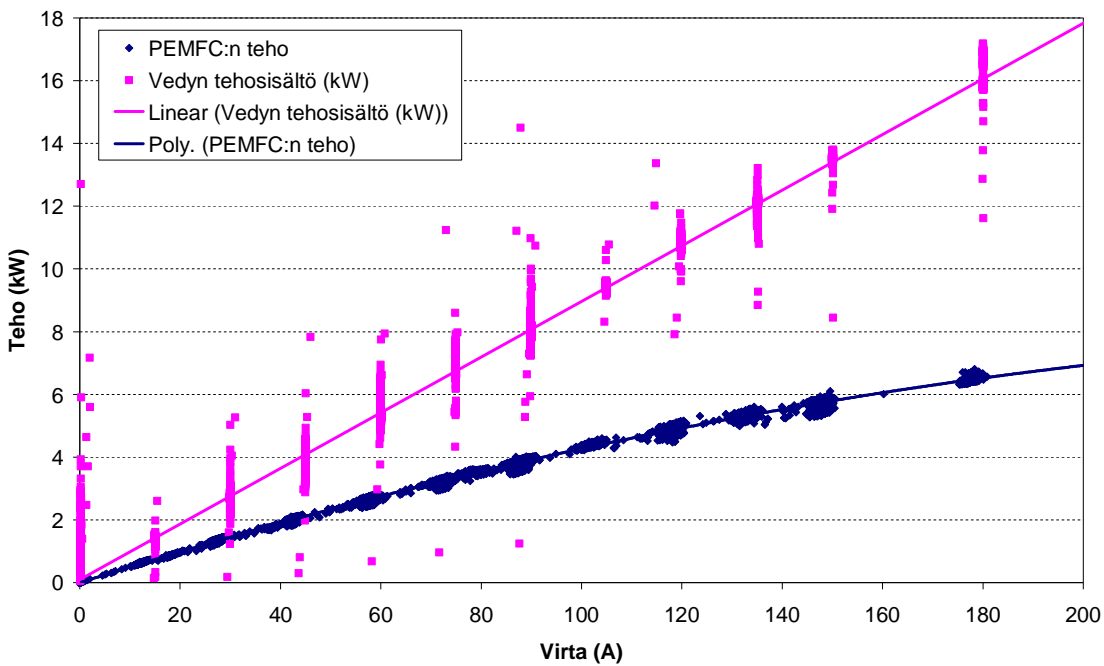


Kuva 6.31. PEMFC-järjestelmälle mitattu VI-käyrä.

Kuvassa 6.32 on esitetty PEMFC-järjestelmän bruttoteho ja anodipuolen vetyvirtauksen tehosisältö (kilowatteina) PEMFC:n virran funktiona. Bruttoteho on laskettu PEMFC:n virran ja jännitteen tulona. Vetyvirtauksen tehosisältö \dot{E} (kJ/s tai kW) on laskettu

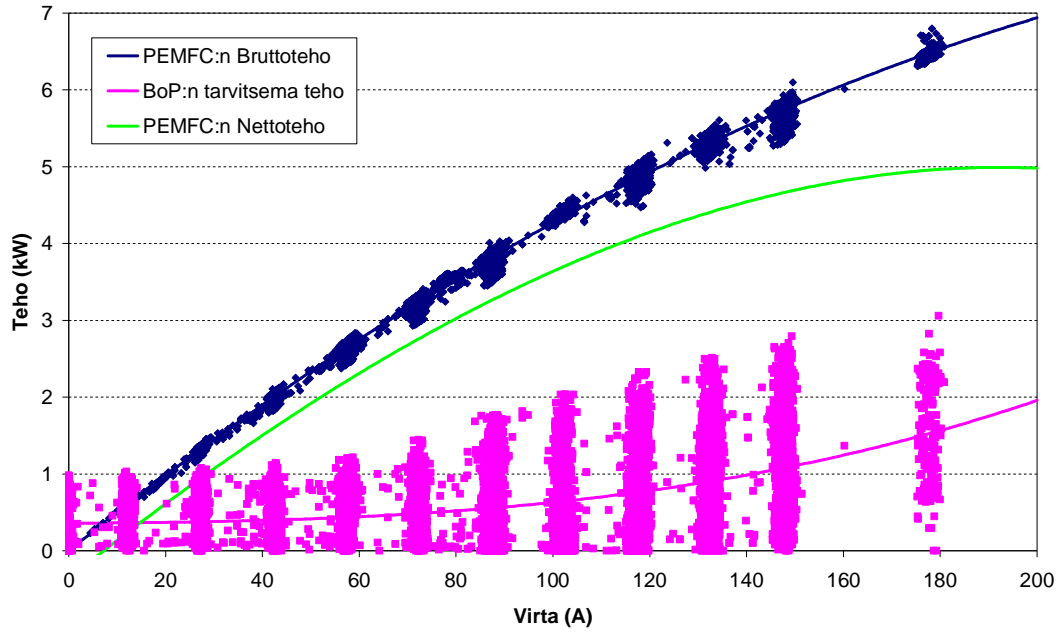
$$\dot{E} = \dot{N} \cdot HHV_{H_2}, \quad (6.1)$$

missä \dot{N} on mitattu vedyn moolivirta (mol/s), ja HHV_{H_2} on vedyn ylempi lämpöarvo (286,02 kJ/mol (Barbir 2005)).



Kuva 6.32. PEMFC:n bruttoteho ja vetyvirtauksen tehosisältö kilowatteina (vedyn ylempään lämpöarvoon perustuen) virran funktiona.

Kuvassa 6.33 on esitetty PEMFC:n bruttoteho, BoP:n tarvitsema teho ja PEMFC:n nettoteho virran funktiona. BoP:n tarvitsema teho on laskettu mitatun akulta BoP:lle menevän virran ja akun jännitteen tulona. Akun jännitettä ei mitattu, joten se on oletettu vakioksi (24 V). PEMFC:n nettoteho on laskettu bruttotehon ja BoP:n tehon erotuksena.

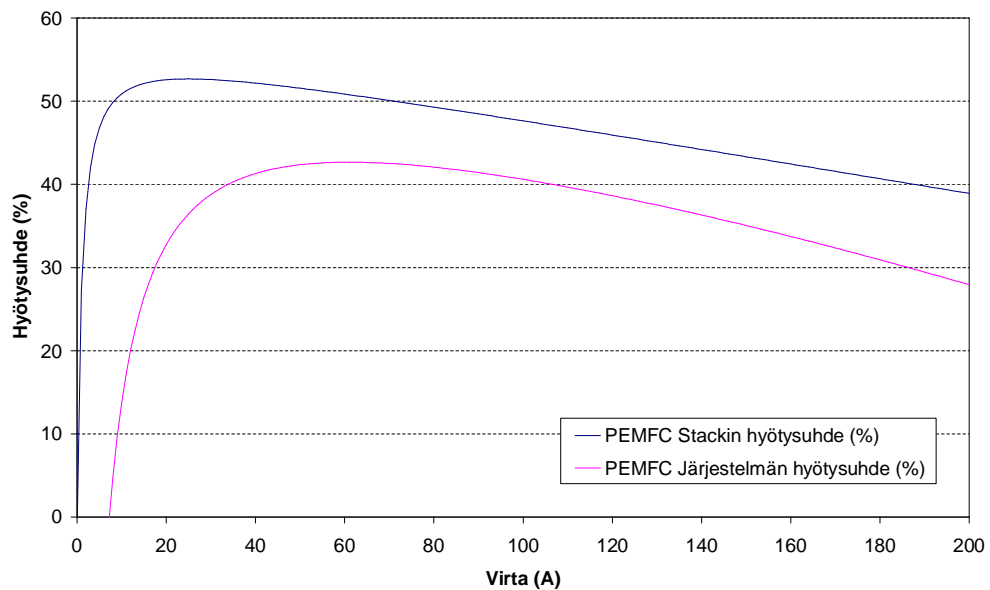


Kuva 6.33. PEMFC-järjestelmän bruttoteho ja BoP:n tarvitsema teho, sekä näiden erotuksena laskettu järjestelmän nettoteho virran funktiona.

PEMFC-stackille ja PEMFC-järjestelmälle mittausten pohjalta lasketut hyötysuhteet virran funktiona on esitetty kuvassa 6.34. Polttokennon hyötysuhde voidaan esittää

$$\eta = \frac{P}{\dot{E}}, \quad (6.2)$$

missä \dot{E} on polttoainevirtauksen sisältämä energiavirta ja P on polttokennon ulostuloteho. PEMFC-stackin hyötysuhde on laskettu PEMFC:n bruttotehon ja vetävirtauksen tehosisällön osamääränä.



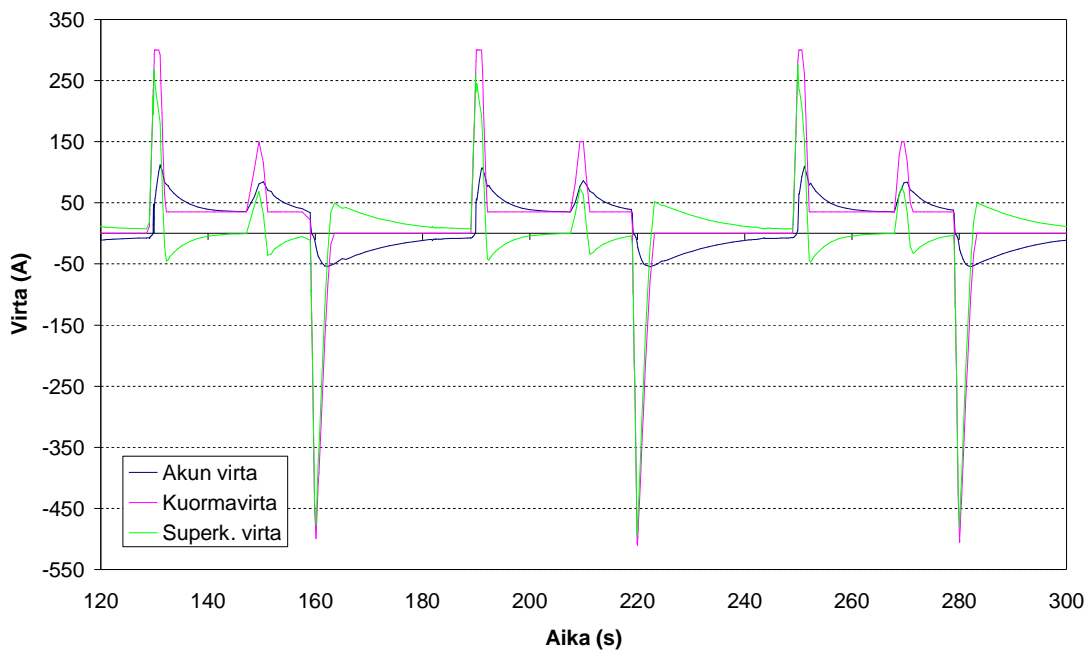
Kuva 6.34. PEMFC-stackin ja PEMFC-järjestelmän hyötysuhde virran funktiona.

PEMFC-järjestelmän hyötysuhde on laskettu PEMFC:n nettotehon ja vetyvirtauksen tehoisällön osamääränä. Järjestelmän hyötysuhde on pienillä virroilla negatiivinen, koska BoP:n tehontarve ei ole nolla PEMFC:n bruttotehon ollessa nolla. Vasta virran ollessa noin 8 A PEMFC:n nettoteho nousee positiiviseksi. Mitatut hyötysuhteet vastaavat tyypillisiä PEMFC:llä saavutettuja arvoja.

6.6. Regeneratiivisen jarrutustehon simulointi

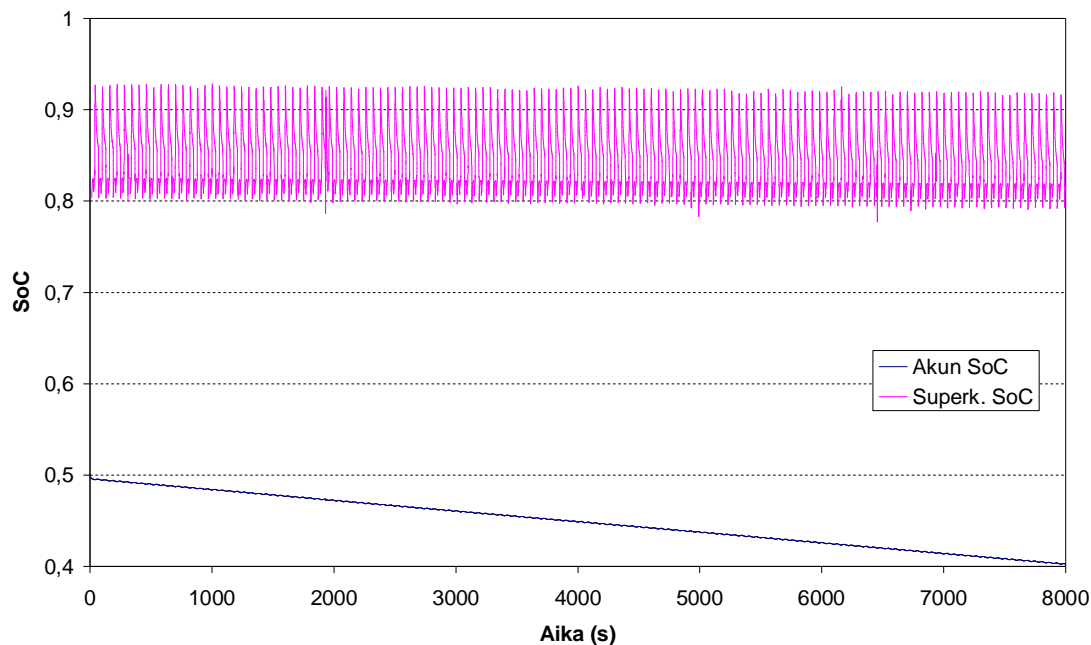
Regeneratiivista jarrutustehoa mallinnettiin sekä lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kaksoishybridimallilla, että PEMFC:n, lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kolmoishybridimallilla. Ajosyklinä käytettiin kuvan 4.11 ajosykliä, jossa lyhyt negatiivinen 520 A virtapiikki kuvaa regeneratiivista jarrutustehoa.

Akun varaustilassa 0,5 kaksoishybridijärjestelmälle simuloitut virrat on esitetty kuvassa 6.35. Regeneratiivisen jarrutustehon piikin aikana superkondensaattori ottaa lähes koko virtapiikin. Akku reagoi hitaasti, ja sen huippulatausvirta piikin aikana on noin 50 A. Virtapiikin jälkeen kuormavirran ollessa nolla superkondensaattori lataa akkua. 300 A kuormapiikin aikana superkondensaattorin huippuvirta nousee hieman korkeammaksi (noin 260 A) kuin ilman regeneratiivista virtapiikkiä ajetuissa simulaatioissa.



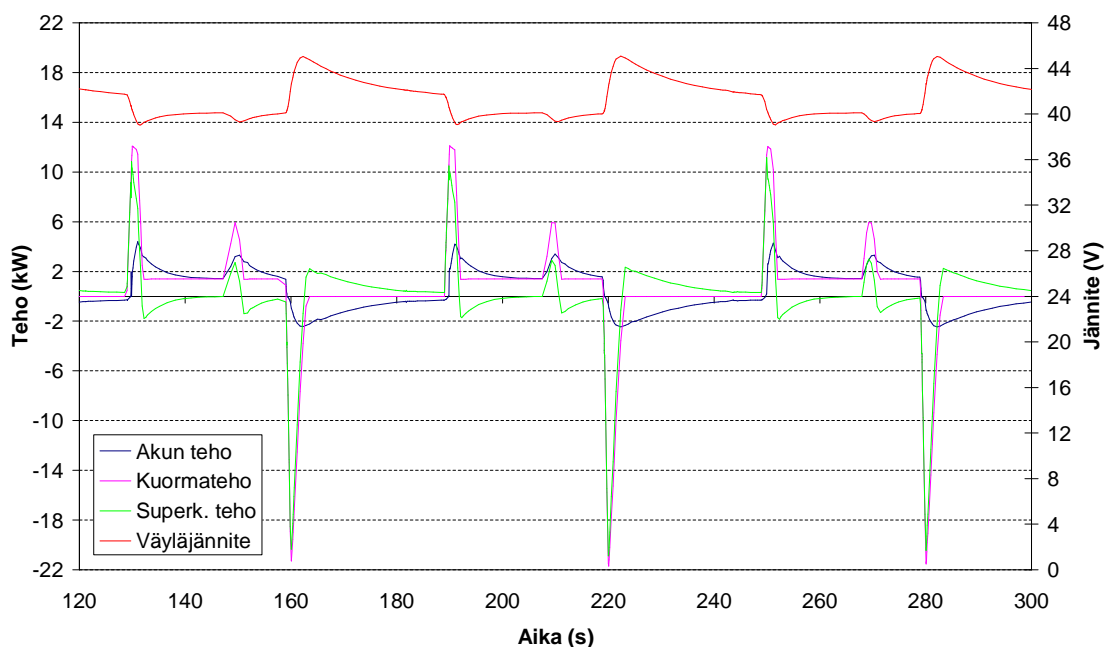
Kuva 6.35. Simuloitujen virtojen jakautuminen lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kaksoishybridimallissa regeneratiivisen jarrutustehon ajosyklillä akun SoC:n ollessa 0,5.

Kaksoishybridimallin laskemat akun ja superkondensaattorin SoC:n vaihtelut 8000 s simulointiajan aikana on esitetty kuvassa 6.36. Akun SoC putoaa ajon aikana 0,5:stä noin 0,4:ään. Superkondensaattorin SoC:n vaihtelu ajosyklin aikana on noin 13 %.



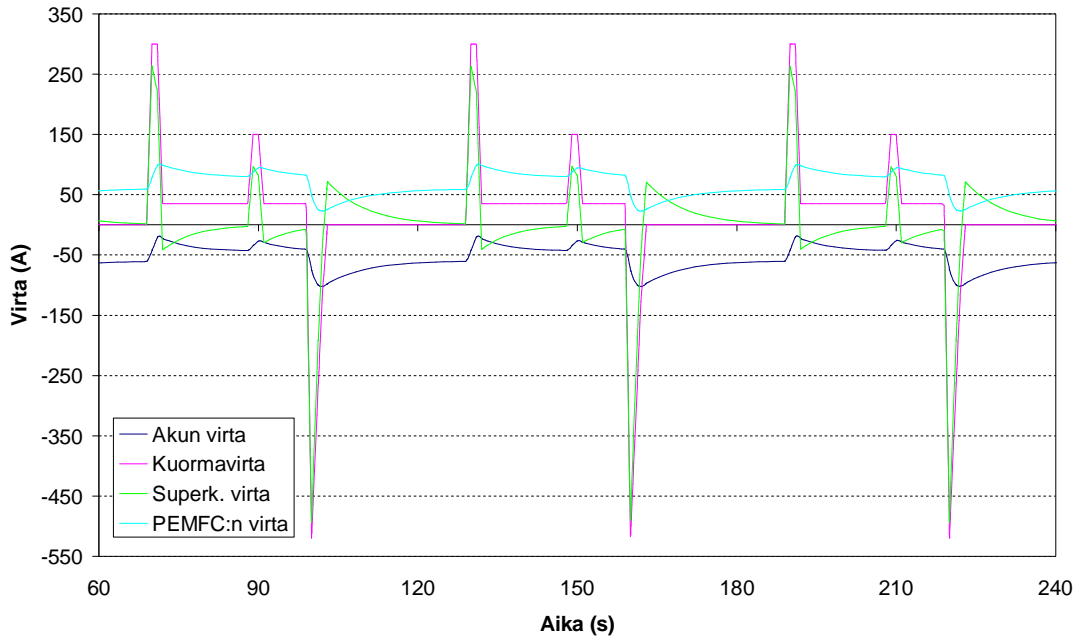
Kuva 6.36. Akun ja 165 F superkondensaattorin SoC:n vaihtelu pitkän simulointiajan aikana regeneratiivisen jarrutustehon ajosyklillä.

Kuvassa 6.37 on esitetty simuloidun kuormatehon jakautuminen akun ja superkondensaattorin kesken kaksoishybridillä, ja väyläjännitteen vaihtelu. Akun varaustila on noin 0,5. Väyläjännite nousee noin 45 V:iin regeneratiivisen jarrutustehon talteenoton aikana, joten superkondensaattorin jänniterajat eivät tule vielä vastaan.



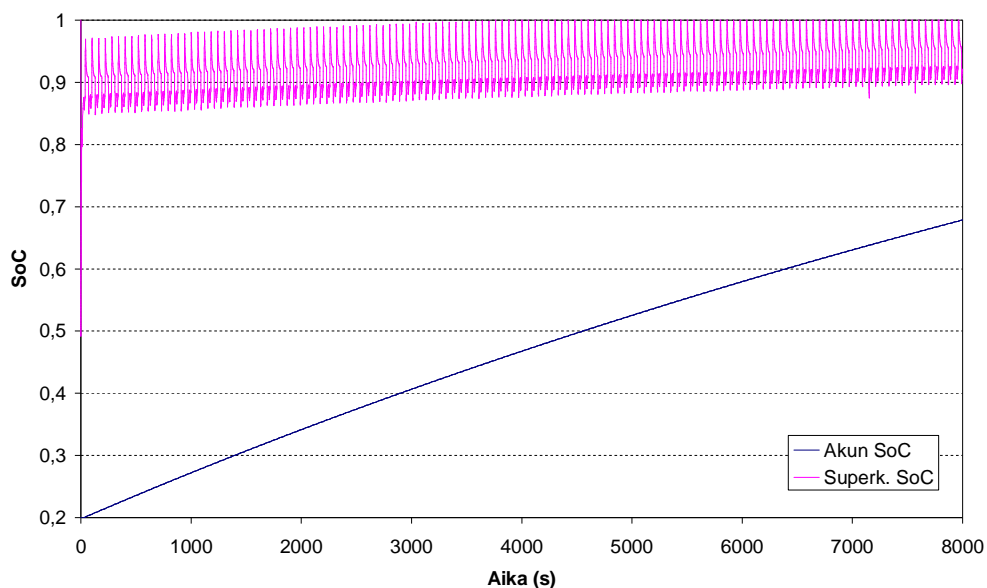
Kuva 6.37. Simuloidun tehon jakautuminen ja väyläjännitteen vaihtelu lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kaksoishybridimallissa regeneratiivisen jarrutustehon ajosyklillä akun SoC:lla 0,5.

Regeneratiivista jarrutustehoa simuloitiin myös PEMFC:n, lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kolmoishybridimallilla. Järjestelmälle akun varaustilassa 0,5 simuloitujen virtojen esitys on esitetty kuvassa 6.38. Järjestelmä käyttäytyy regeneratiivisen virtapiikin aikana vastaavalla tavalla kuin kaksoishybridijärjestelmä, mutta nyt akun virta on koko syklin ajan negatiivinen PEMFC:n ladatessa akkua.



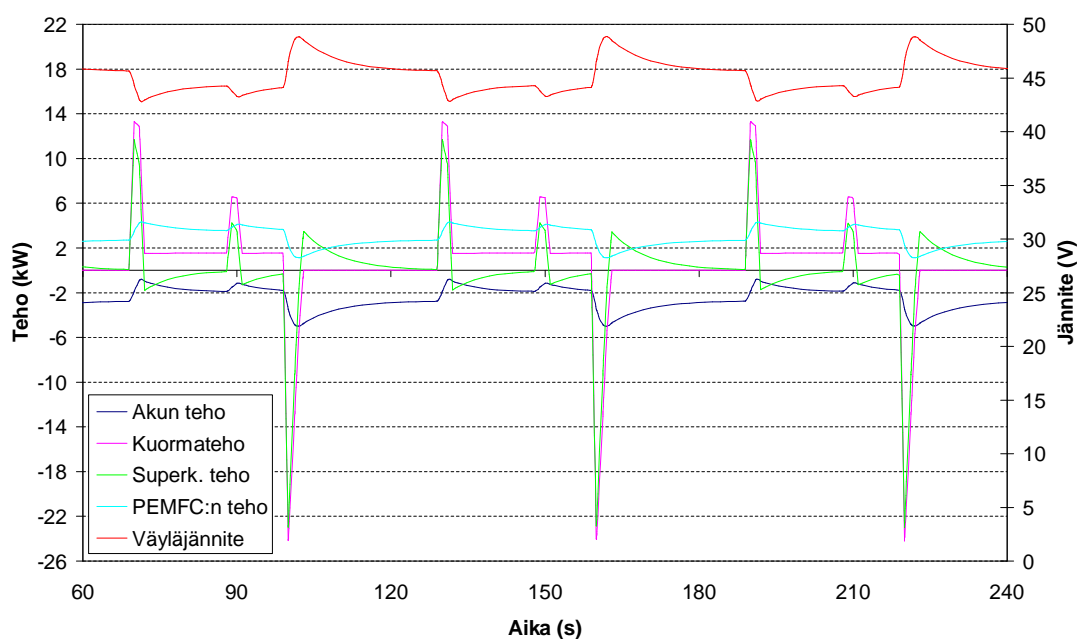
Kuva 6.38. Simuloitujen virtojen jakautuminen PEMFC:n, lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kolmoishybridimallissa regeneratiivisen jarrutustehon ajosyklillä akun SoC:n ollessa 0,5.

Kolmoishybridimallin laskemat akun ja superkondensaattorin SoC:n vaihtelut 8000 s simulointiajan aikana on esitetty kuvassa 6.39. Akku latautuu ajon aikana, jolloin keskimääräinen väyläjännite nousee yli superkondensaattorin maksimikäyttöjännitteen (48,6 V) noin akun SoC:ssa 0,43. Tällöin superkondensaattorin SoC nousee yli yhden. Superkondensaattoria on kuitenkin mahdollista ylikuormittaa hetkellisesti, sillä lyhyet muutaman sekunnin pituiset maksimikäyttöjännitteen ylitykset eivät riko superkondensaattorimoduulia. Moduuli hajoaa vasta syöksyjännitteen 50,4 V ylittyessä.



Kuva 6.39. Kolmoishybridin akun ja 165 F superkondensaattorin SoC:n vaihtelu pitkän simuloitajan aikana regeneratiivisen jarrutustehon ajosykliillä.

Kuvassa 6.40 on esitetty simuloidun kuormatehon jakautuminen PEMFC:n, akun ja superkondensaattorin kesken kolmoishybridillä, ja väyläjännitteen vaihtelu. Akun SoC on noin 0,5. Väyläjännite nousee noin 49 V:iin regeneratiivisen jarrutustehon talteenoton aikana, mikä on jo yli superkondensaattorin maksimikäyttöjännitteen. Maksimikäyttöjännitteen ylittyminen on kuitenkin melko lyhytaikaista, ja toisaalta simuloinnissa käytetty jarrutuspiikki on mitoitettu suurimpien odotettavissa olevien latausvirtojen mukaan (katso kappale 4.3).



Kuva 6.40. Simuloidun tehon jakautuminen ja väyläjännitteen vaihtelu PEMFC:n, lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kolmoishybridimallissa regeneratiivisen jarrutustehon ajosykliillä akun SoC:n ollessa 0,5.

7. POHDINTAA TULOKSISTA

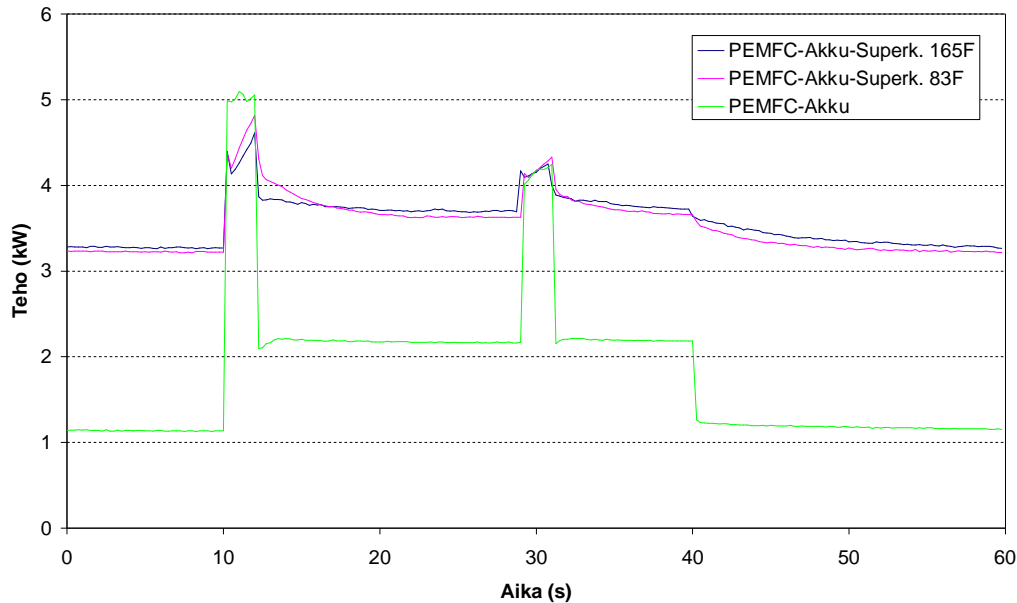
7.1. Hybridijärjestelmän topologioiden vertailu

Lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kaksoishybridillä saatiin väyläjännitteen vaihtelua pienennettyä alle puoleen verrattuna ajoon pelkällä lyijyakulla. Pienemmällä 83 F superkondensaattorillakin jännitevaihtelu ja akun huippuvirta pieneni yli kolmasosalla pelkkään akkuun verrattuna. Baisden ja Emadi (2004) ovat saaneet omissa mittauksissaan samansuuntaisia tuloksia (katso kappale 3.2.1, kuva 3.7).

Pienemmät huippuvirran arvot tarkoittavat pienempää rasiutusta akulle ja pidempää elinikää. Ne mahdollistavat myös pienemmän ja halvemmän akun käyttämisen. Pienemmät jännitepoikkeamat tyhjäkäyntijännitteestä merkitsevät parempaa akun energiahyötysuhdetta. Akun häviöt siis pienenevät, kun jännitevaihtelu pienenee. Suuri akun virta ja suuri jännitepoikkeama tarkoittavat suurta tehohäviötä akussa, joka toistuessaan ja jatkuessaan nostaa akkupaketin lämpötilaa. Ajettaessa pitkiä ajoja polttokennoilla akkujen lämpötilan nousu on varsin oleellinen asia, koska akuista lämpöä ei voida siirtää jäädyttämällä kovinkaan helposti pois. Superkondensaattorimoduuleista taas on melko helppoa tehdä jäädytettäviä.

Kuvaan 7.1 on koottu PEMFC:n teho yhden ajosyklin aikana tarkastelluilla hybridijärjestelmillä (joissa PEMFC on mukana). Akun SoC on kussakin tapauksessa noin 0,5. PEMFC ja lyijyakun kaksoishybridissä PEMFC:n tehonvaihtelu on suurimmillaan noin 4 kW. Kolmoishybrideillä tehon vaihtelu on noin 1,3 kW (165 F superkondensaattorilla) ja 1,5 kW (83 F superkondensaattorilla). Vaikka kaksoishybridillä tehonvaihtelu on vertailluista topologioista suurin, on se silti vain noin yksi kolmasosa koko kuormatehosta. Kolmoishybrideillä tehotransientti saadaan pienennettyä noin kymmenesosaan koko kuormatehosta. Kummallakin hybridijärjestelmän topologialla voidaan saavuttaa siis merkittäviä hyötyjä PEMFC:n toiminnan kannalta.

PEMFC:n tehotransienttien pienentämisellä on huomattava vaikutus polttokennostackin elinikään. Kuten Ouyang et al. (2006) ovat omissa tutkimuksissaan todenneet (katso kappale 3.3.1, kuva 3.39), kapeampi polttokennon tehoalue ja hitaammat tehotransientit hidastavat polttokennon ikääntymistä eli suorituskyvyn laskua. PEMFC:n tehotransienttien lisäksi myös lyijyakun virranmuutokset ja jännitevaihtelu ovat huomattavasti pienemmät kolmoishybrideissä kuin PEMFC:n ja akun kaksoishybridissä. PEMFC:n akun ja superkondensaattorin hybridillä voidaan siis minimoida sekä PEMFC:n että lyijyakun koko (ja samalla hinta), ja saavuttaa paras komponenttien elinikä ja hyötysuhde.



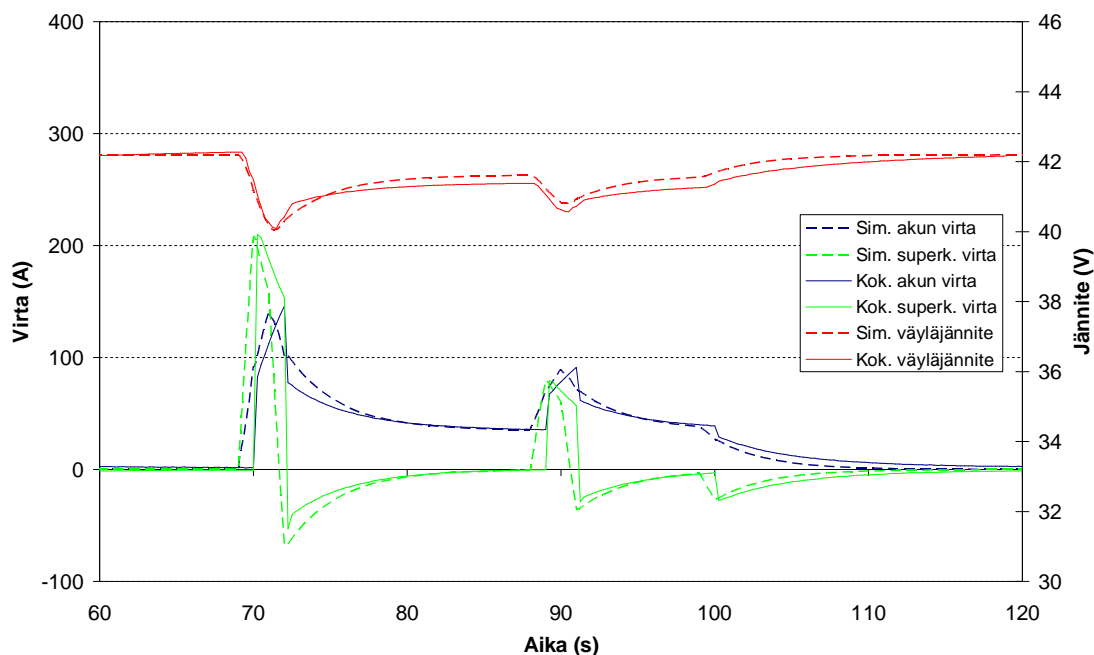
Kuva 7.1. PEMFC-järjestelmän tehon vertailu yhden ajosyklin aikana eri hybridijärjestelmien välillä akun SoC:n ollessa noin 0,5.

Kolmoishybridijärjestelmässä superkondensaattori vastaa käytännössä suurimmasta osasta järjestelmän dynamiikasta. Polttokennoteholähde käy melko tasaisella teholla ladaten lyijyakua kuormatehon ollessa alhainen tai nolla. Lyijyakun varaustilan noustua riittävälle tasolle voidaan polttokenno haluttaessa ajaa alas, ja käyttää järjestelmää akun ja superkondensaattorin kaksoishybridinä. Akun varaustilan laskiessa tietylle tasolle voidaan polttokenno jälleen käynnistää, ja jatkaa ajoa kolmoishybridinä.

Superkondensaattorin varauskapasiteetista käytetään kaikissa tutkituissa topologioissa hyväksi vain hyvin pieni osa. Käytetyt superkondensaattorimoduulit ovat siis näihin topologioihin ylimitoitettuja, koska väyläjännite vaihtelee niin kapealla välillä. Tilanne olisi toinen, jos superkondensaattori kytkettäisiin väyläjännitteeseen DC/DC-muuntimen kautta. Tällöin superkondensaattorin käyttöjännite voisi vaihdella täysin väyläjännitteestä riippumatta, ja suurempi osa kapasiteetista saataisiin käyttöön.

7.2. Simulointimallien validointi

Lyijyakun ja superkondensaattorin rinnankytkennälle saatiin sekä simuloituja että kokeellisia tuloksia. Verrattaessa simuloitua ja kokeellista dataa toisiinsa voidaan havaita, että virtojen ja jännitteiden huippuarvot ovat melko lähellä toisiaan. Kuvaajien muodossa on kuitenkin eroavaisuuksia. Kaksoishybridille kokeellisesti mitattuja ja simuloituja arvoja on vertailtu keskenään kuvassa 7.2. Erot johtuvat ainakin osittain siitä, että kuormavirran muutosta ei Simulinkin piirimallissa voi tehdä diskreetiksi, vaan virranmuutos on loiva kokeelliseen dataan verrattuna. Myös väyläjännitteen kuvaajan muodossa on eroja. Kokeellisesti mitattu jännite palautuu simuloitua hitaammin tyhjäkäyntijännitteeseen kuormavirran ollessa nolla. Lyijyakun dynamiikan mallintamista tulisi siis jatkossa parantaa.

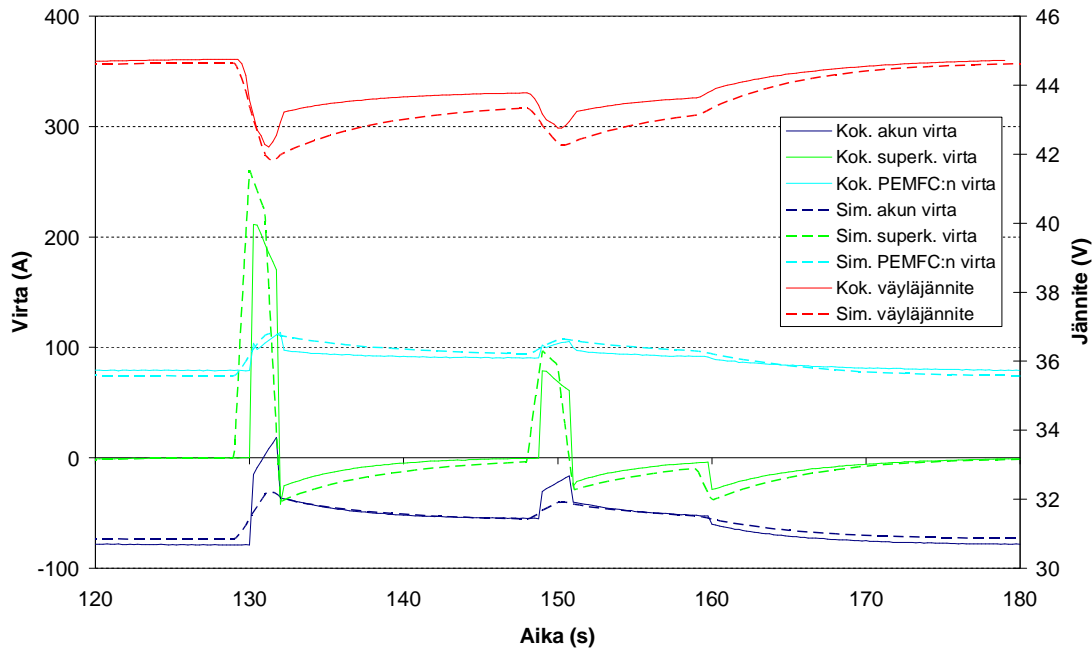


Kuva 7.2. Lyijyakun ja 165 F superkondensaattorin kaksoishybridille kokeellisesti mitatut (yhtenäinen viiva) ja simuloitunut (katkoviiva) virrat ja väyläjännite.

Simulointimalli ei myöskään ota huomioon akun sisäresistanssin muutosta varaustilan funktiona. Simuloidussa datassa virtojen jakautuminen komponenttien kesken, ja jännitteenlasku kuormitettaessa on samanlaista riippumatta akun varaustilasta. Mallia voisi näiltä osin jatkossa parantaa mallintamalla akun sisäresistanssin muutosta SoC:n funktiona.

PEMFC:n, lyijyakun ja superkondensaattorin simulointitulokset poikkeavat kokeellisista hieman kaksoishybridimallia enemmän. Kokeellisesti mitattuja ja simuloituja tuloksia on vertailtu kuvassa 7.3. Akun ja superkondensaattorin huippuvirrat poikkeavat 300 A virtapiikin aikana kokeellisista tuloksista muutamalla kymmenellä ampeerilla. Tähän voi vaikuttaa muun muassa simuloitun kuormavirran epädiskreettiys, ja että komponenttien mallien dynaamiset vasteet poikkeavat hieman mitatusta datasta. Muut simuloitujen virtojen arvot ovat melko lähellä mitattuja arvoja, mutta kuvaajien muodot poikkeavat jälleen hieman toisistaan. Esimerkiksi purgen vaikutusta polttokennon virtaan ei mallinnettu. Simuloitun jännitteen muodossa on kaksoishybridimallin tavoin poikkeavuutta.

Vaikka simuloitujen ja kokeellisesti mitattujen tulosten välillä on eroavaisuuksia, ovat saavutetut tulokset lupaavia. Hybridijärjestelmän komponenteille tehdyt mallit olivat rakenteeltaan melko yksinkertaisia. Malleja on mahdollista kehittää jatkossa ottamaan paremmin huomioon esimerkiksi akun varaustilan ja toimintaolosuhteiden vaikutukset.



Kuva 7.3. PEMFC:n lyijykyun ja 165 F superkondensaattorin kolmoishybridille kokeellisesti mitatut (yhtenäinen viiva) ja simuloidut (katkoviiva) virrat ja väyläjännite.

7.3. Polttokennoteholähteen karakterisointi

Polttokennoteholähteen ominaisuuksia saatiin karakterisoitua onnistuneesti kokeellisissa mittauksissa. PEMFC-järjestelmälle mitattu VI-kuvaaja (kuva 6.32) vastaa muodoltaan tyypillistä polymeeripolttokennon kuvaajaa.

Polttokennostackin vedynkulutus (ja siten myös vedyn tehosisältö, kuva 6.33) kasvaa lineaarisesti virran funktiona. Kulutus tosin eroaa nolasta virran ollessa nolla, koska vetypuolen päästöventtiili aukeaa (hydrogen purge) määrääjain, aiheuttaen näin häviöitä vetykierrossa.

PEMFC-järjestelmälle mitattujen brutto- ja nettotehojen sekä vedynkulutuksen avulla pystyttiin määrittämään järjestelmän ja stackin hyötysuhteet virran funktiona. Mitatut hyötysuhteet ovat PEMFC:lle tyypillisiä. Esimerkiksi Bauman ja Kazerani (2008) ovat mitanneet Hydrogenicsin HyPM-polttokennostackille vastaavia tuloksia (katso kuva 3.9). Polttokennostackin hyötysuhde voidaan ilmoittaa myös ulostulojännitteen ja avoimen piirin jännitteen suhteena, jolloin hyötysuhde on suurimmillaan virran ollessa nolla. Vedynkulutuksen perusteella laskettu hyötysuhde kääntyy kuitenkin laskuun pienillä virroilla, koska vedynkulutus ei tuolla alueella purgen takia käyttyä täysin lineaarisesti. PEMFC-järjestelmän hyötysuhde on negatiivinen alle 8 A virroilla, koska nettoteho on BoP:n minimitehon takia negatiivinen.

Ilmapuhallin vastaa suurimmasta osasta BoP:n tehontarpeesta, joten sen ohjauksella pystytään vaikuttamaan huomattavasti polttokennoteholähteen hyötysuhteeseen ja suorituskykyyn. Corbo, Migliardini ja Veneri (2008a) ovat tutkineet ohjauksen vaikutuksia PEMFC-järjestelmän dynaamisiin ominaisuuksiin (katso kappale 3.3.1,

kohta Polttokennoteholähteen dynamiikka). Hybridisoinnilla saadaan vasteaikaa puhaltimen ohjaukseen, ja siten siis parannettua kokonaishyötysuhdetta.

7.4. Regeneratiivisen jarrutustehon talteenotto

Regeneratiivisen jarrutustehon simuloinnista saadut tulokset ovat melko odotetun kaltaisia. Kaksoishybridissä superkondensaattori ottaa vastaan regeneratiivisen virtapiikin lähes kokonaan akun reagoidessa hitaammin. Piikin jälkeen superkondensaattori lataa akkua. Superkondensaattorin varauskapasiteetista käytetään suurempi osa (noin 13 %) kuin tavallisella ajosyklillä ajettaessa. Väyläjännitteen nousu on kohtuullista pienestä akun latausvirrasta johtuen, joten superkondensaattorin maksimikäyttöjännite ei rajoita hybridijärjestelmän toimintaa.

Kolmoishybridillä jännitetaso on korkeampi, koska regeneratiivisen virran lisäksi myös polttokenno lataa akkua. Väyläjännite nouseekin yli superkondensaattorin maksimikäyttöjännitteen 48,6 V akun SoC:n ollessa noin 0,43. Superkondensaattorin hetkellinen (joitakin sekunteja) ylikuormittaminen on kuitenkin mahdollista, sillä moduuli hajoaa vasta syöksyjännitteen 50,4 V ylittyessä. On myös huomioitava, että ajosyklissä käytetty regeneratiivinen virtapiikki on mitoitettu hyvin voimakkaan jarrutuksen mukaan. Näin suuria virtoja ei siis käytännön ajossa saada kovinkaan usein.

Käytännön sovelluksessa superkondensaattori on suojattava ylijännitteeltä. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kokeellisissa mittauksissa käytetyllä jänniteohjatulla relesuojauksella, joka kytkee superkondensaattorin irti väyläjännitteestä jännitteen noustessa yli sallitun arvon. Vaihtoehtoisesti superkondensaattori voidaan kytkeä väyläjännitteeseen DC/DC-muuntimen kautta.

Käytännössä PEMFC-järjestelmän BoP:n tehontarve auttaisi myös tilannetta hieman. Kolmoishybridimallin PEMFC-mallissa ei oteta huomioon BoP:n tarvitsemää tehoa (eli malli antaa PEMFC:n bruttotehon). Regeneratiivisen tehopiikin kohdalla PEMFC:n teho olisi siis simuloidun datan 1,2 kW:n sijaan käytännössä noin 0,8 kW (kuvan 6.34 perusteella). Näin ollen akun latausvirta olisi hieman pienempi, mikä laskisi myös väyläjännitettä.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUUNNITELMA JATKOTYÖLLE

8.1. Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin erilaisia polttokennoteholähteen hybridisointitapoja simulointimallien ja kokeellisten mittausten avulla. Aiheesta tehtiin myös kattava kirjallisuusselvitys, jonka tuloksia käytettiin apuna simulointimallien ja kokeellisten mittausten suunnittelussa.

Polttokennoteholähteen hybridisoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä polttokennon eliniän ja järjestelmän hyötysuhteen kannalta. Hybridisoinnista saatava hyöty riippuu ajoneuvosovelluksesta ja odotettavissa olevasta ajosyklistä. Tämän takia hybridijärjestelmän topologia ja komponenttien mitoitus on optimoitava erikseen jokaiselle sovelluskohteelle. Erilaisista simulointimalleista ja -työkaluista voidaan saada suurta apua tähän suunnittelutyöhön.

Regeneratiivisen jarrutustehon talteenottoa mallintavaa ajosykliä simuloitiin hybridijärjestelmille luoduilla simulointimalleilla. Hybridijärjestelmien toiminnasta regeneratiivisten virtapiikkien aikana saatiin paljon tietoa mahdollisesti tehtävää kokeellista työtä varten.

8.2. Suunnitelma jatkotyölle

Tarkastelluissa hybridijärjestelmän topologioissa superkondensaattorin varauskapasiteetista käytettiin hyväksi vain pieni osa. Olisikin tärkeä tutkia hybridijärjestelmän topologiaa, jossa superkondensaattori olisi kytketty väyläjännitteeseen DC/DC-muuntimen kautta. Ottaen huomioon akkuteknologioiden kehityksen viime vuosina, myös nyt käytettyjen lyijyakkujen korvaaminen ominaisuuksiltaan paremmilla Li-ion-akuilla olisi mielenkiintoista.

Laadittujen hybridijärjestelmien simulointimallien tarkkuutta on yhä mahdollista parantaa. Tämä lisäisi mahdollisuuksia käyttää malleja hybridijärjestelmän topologian optimointiin ja komponenttien mitoitukseen erilaisissa ajoneuvosovelluksissa. Malleja tulisi myös täydentää ottamaan huomioon erilaiset toimintaolosuhteet, kuten lämpötila, ilmankosteus ja stoikiometria.

LÄHTEET

- A123Systems 2009, 20 Ah Li-ion-kennon tuotetiedot. Saatavilla: <http://www.a123systems.com/~a123/a123/products> [viitattu 2009, 6.10.].
- AltairNano 2009a, 11 Ah Li-ion-kennon tuotelehtinen. Saatavilla: http://www.b2i.cc/Document/546/11Ah_Datasheet-012209.pdf [viitattu 2009, 6.10.].
- AltairNano 2009b, 50 Ah Li-ion-kennon tuotelehtinen. Saatavilla: http://www.b2i.cc/Document/546/50Ah_Datasheet-012209.pdf [viitattu 2009, 6.10.].
- Arsie, I., DiDomenico, A., Pianese, C. & Sorrentino, M. 2007, "Modeling and Analysis of Transient Behavior of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Hybrid Vehicles", *J.Fuel Cell Sci.Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 261-271.
- AVL 2009, ADVISOR-simulointityökalun tuotetiedot. Saatavilla: http://www.avl.com/wo/webobsession.servlet.go/encoded/YXBwPWJjbXMmcGFnZT12aWV3Jm1hc2s9dmllZyZub2RldGI0bGVpZD0zMjc0Mg_3D_3D.html [viitattu 2009, 7.10.].
- Baisden, A.C. & Emadi, A. 2004, "ADVISOR-based model of a battery and an ultracapacitor energy source for hybrid electric vehicles", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 1, pp. 199-205.
- Ballard Power Systems 2009a, FCVelocity HD6 -tuotelehtinen. Saatavilla: http://www.ballard.com/files/pdf/Spec_Sheets/FCvelocity-HD6_docmetrics.pdf [viitattu 2009, 5.10.].
- Ballard Power Systems 2009b, Tuotelehtinen. Saatavilla: http://www.ballard.com/files/pdf/Spec_Sheets/PEM_FC_Product_Portfolio_docmetrics.pdf [viitattu 2009, 5.10.].
- Barbir, F. 2005, *PEM Fuel Cells*, Academic Press. 456 p.
- Bauman, J. & Kazerani, M. 2008, "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 2, pp. 760-769.
- Borup, R., Davey, J., Garzon, F., Wood, D. & Inbody, M. 2006a, "PEM fuel cell electrocatalyst durability measurements", *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 76-81.

Borup, R., Davey, J., Garzon, F., Wood, D., Welch, P. & More, K. 2006b, "PEM fuel cell durability with transportation transient operation", *Proton Exchange Membrane Fuel Cells 6 - 210th Electrochemical Society Meeting, October 29,2006 - November 03*, Electrochemical Society Inc, Cancun, Mexico, pp. 879.

Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y.S., Mukundan, R., Garland, N., Myers, D., Wilson, M., Garzon, F., Wood, D., Zelenay, P., More, K., Stroh, K., Zawodzinski, T., Boncella, J., McGrath, J.E., Inaba, M., Miyatake, K., Hori, M., Ota, K., Ogumi, Z., Miyata, S., Nishikata, A., Siroma, Z., Uchimoto, Y., Yasuda, K., Kimijima, K. & Iwashita, N. 2007, "Scientific Aspects of Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability and Degradation", *Chemical reviews*, vol. 107, no. 10, pp. 3904-3951.

Brown, D., Alexander, M., Brunner, D., Advani, S.G. & Prasad, A.K. 2008, "Drive-train simulator for a fuel cell hybrid vehicle", *Journal of Power Sources*, vol. 183, no. 1, pp. 275-281.

Catherino, H.A., Burgel, J.F., Shi, P.L., Rusek, A. & Zou, X. 2006, "Hybrid power supplies: A capacitor-assisted battery", *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 2, pp. 965-970.

Chandrasekaran, R., Bi, W. & Fuller, T.F. 2008, "Robust design of battery/fuel cell hybrid systems-Methodology for surrogate models of Pt stability and mitigation through system controls", *Journal of Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 546-557.

Corbo, P., Migliardini, F. & Veneri, O. 2008a, "Experimental analysis of a 20 kW_e PEM fuel cell system in dynamic conditions representative of automotive applications", *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 10, pp. 2688-2697.

Corbo, P., Migliardini, F. & Veneri, O. 2008b, "An experimental study of a PEM fuel cell power train for urban bus application", *Journal of Power Sources*, vol. 181, no. 2, pp. 363-370.

Du Pasquier, A., Plitz, I., Menocal, S. & Amatucci, G. 2003, "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications", *Journal of Power Sources*, vol. 115, no. 1, pp. 171-178.

EG&G Technical Services, Inc. 2004, *Fuel Cell Handbook*, 7th edn, U.S. Department of Energy. 427 p.

Gao, D., Jin, Z. & Lu, Q. 2008, "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus", *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311-317.

Gao, W. 2005, "Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel cell-ultracapacitor hybrid powertrain", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 3, pp. 846-855.

Gasteiger, H.A., Gu, W., Makharia, R., Mathias, M.F. & Sompalli, B. 2003, "Beginning-of-life MEA performance - Efficiency loss contributions", *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, and Applications, Vol.3*, vol. 3.

GS Yuasa 2009, *LEV50 Li-ion-kennon tuotelehtinen*. Saatavilla: <http://www.gsyuasa-lp.com/Products/GSYuasa-LEV50.pdf> [viitattu 2009, 6.10.].

Hydrogenics 2009, *HyPM-tuotelehtinen*. Saatavilla: <http://www.hydrogenics.com/assets/pdfs/HyPM%20HD-XR-2009-Brochure.pdf> [viitattu 2009, 5.10.].

International Battery 2009, *Tuotelehtinen*. Saatavilla: <http://www.internationalbattery.com/pdf/LiFePO4-SpecSheet.pdf> [viitattu 2009, 6.10.].

Johnson Mattheu PMM 2009, *Platinan hinnan kehitys*. Saatavilla: http://www.platinum.matthey.com/prices/price_charts.html [viitattu 2009, 20.5.].

Knights, S.D., Colbow, K.M., St-Pierre, J. & Wilkinson, D.P. 2004, "Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC", *Eight Ulmer Electrochemische Tage, June 20,2002 - June 21* Elsevier, , Neu-Ulm, Germany, pp.127.

Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, G., Enzinger, P., Fankhauser, R., Ortner, M., Muhr, M. & Aronson, R.R. 2000, "Alkaline fuel cells applications", *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1-2, pp. 162-165.

Maxwell 2009a, *125 V Superkondensaattorimoduulien tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_BMOD0063_1014696.pdf [viitattu 2009, 8.10.].

Maxwell 2009b, *48 V Superkondensaattorimoduulien tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_48V_series_1009365.pdf [viitattu 2009, 6.10.].

Maxwell 2009c, *75 V Superkondensaattorimoduulien tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_75V_series_1014243.pdf [viitattu 2009, 8.10.].

MSc Electronics 2009, *MSc ESC -tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.mscelectronics.fi/extra/ext/cms_liitteet/830MSc%20ESC%20-%20Brochure%20ENG%20Rev4.pdf [viitattu 2009, 7.10.].

Nesscap 2009, *48 V Superkondensaattorimoduulien tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.nesscap.com/data_nesscap/spec_sheets/EMHSR-0000C0-048R0_REV0_20090831.pdf [viitattu 2009, 6.10.].

NuCellSys 2005, *HY-80-tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.nucellsys.com/dyn/mediaout.dhtml/604ac9a463469534747l/mime/PDF/HY-80-PDF/HY-80_2009.pdf [viitattu 2009, 5.10.].

Nuvera Fuel Cells 2009a, *HDL-82 Power Module -tuotelehtinen*. Saatavilla: <http://www.nuvera.com/products/hdl82.php> [viitattu 2009, 5.10.].

Nuvera Fuel Cells 2009b, *Powerflow tuotelehtinen*. Saatavilla: <http://www.nuvera.com/pdf/PowerFlow.pdf> [viitattu 2009, 5.10.].

Ouyang, M., Xu, L., Li, J., Lu, L., Gao, D. & Xie, Q. 2006, "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies", *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 467-479.

Princeton University electronic lexical database 2009, *WordNet 3.0*. Saatavilla: <http://wordnetweb.princeton.edu/perl/webwn?s=fuzzy%20logic> [viitattu 2009, 29.9.].

Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009a, *PM Basic A 20 -tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.proton-motor.de/fileadmin/images/img_content_pm/downloads/Fuel_cell_systems_for_municipal_vehicles.pdf [viitattu 2009, 5.10.].

Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009b, *PM Basic A 50 -tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.proton-motor.de/fileadmin/images/img_content_pm/downloads/City_Bus_with_PM_fuel_cell_Triple_Hybrid_drive.pdf [viitattu 2009, 5.10.].

Proton Motor Fuel Cell GmbH. 2009c, *PM Basic -tuotelehtinen*. Saatavilla: http://www.proton-motor.de/fileadmin/images/img_content_pm/downloads/PM_Basic.pdf [viitattu 2009, 5.10.].

Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G. & Peng, H. 2004, *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*, Springer. 161 p.

Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F. & Hirscher, M. 2007, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1121-1140.

Sinha, J., Lasher, S., Yang, Y. & Kopf, P. 2008, *Fuel Cell Tech Team Review: Direct hydrogen PEMFC manufacturing cost estimation for automotive applications*.

U.S Environmental Protection Agency 2008, *Dynamometer Driver's Aid*. Saatavilla: <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm> [viitattu 2009, 19.10.].