

SÄHKÖAJONEUVOAKKIJEN TUTKIMUSLABORATORION LAITTEISTOMÄÄRITTELY

Jari Haavisto

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2012
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan
suuntautumisvaihtoehto

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

HAAVISTO, JARI:

Sähköajoneuvoakkujen tutkimuslaboratorion laitteistomäärittely

Opinnäytetyö 46 sivua
Huhtikuu 2012

Sähköajoneuvoja halutaan käyttöön niiden vähäpäästöisyyden, energiatehokkuuden ja alhaisten käyttökustannusten vuoksi, mutta niiden yleistymistä rajoittavat lähinnä sähköenergiavarastojen suorituskyvyn puutteet ja hinta. Sähköajoneuvojen akkuihin kohdistuvat kuormitusprofiilit vaihtelevat merkittävästi ajoneuvon käyttötarkoituksen ja toimintaperiaatteen mukaan ja kuhunkin käyttökohteeseen tarvitaan sovelluksen vaatimukset täyttävä sähköenergiavarasto. Suomalaiset yritykset ja korkeakoulut ovat kiinnostuneita sähköajoneuvojen ja niiden sähköenergiavarastojen kehittämistä, mutta tarvittavaan testaukseen ei Suomessa ole kattavaa laitteistoa.

Testaustarpeiden johdosta VTT:lle perustetaan sähköajoneuvojen energiarastojen tutkimusympäristö, jonka laitteiston vaatimusten määrittely on tämän työn aiheena. Työssä on aluksi esitelty olemassa olevia ja suunnitteilla olevia sähköisiä ajoneuvoja ja niissä käytettyjä akkutekniikoita kirjallisuusselvityksen muodossa. Testauslaitteistolta vaaditut ominaisuudet perustuvat näiden nykyisten sähköajoneuvojen ja niissä käytettyjen sähköenergiavarastojen suorituskykyyn. Suunnittelun lähtökohtana on, että laitteistolla pystytään testaamaan erilaisiin kemioihin perustuvia ja erilaisiin kuormitustyyppisiin suunniteltuja akkuja mukaan lukien tehokkaimmat nykyiset kaupalliset tuotteet. Testaus ja mittaustietojen keruu tulee voida suorittaa tarkkuus- ja luotettavuusvaatimusten vuoksi automaattisesti ennalta ohjelmoidun testausproseduurin mukaan.

Työn tuloksena on kuvaus tavoitteiden mukaisesta akkutestauslaboratoriosta ja sen laitteistosta, jolla voidaan suorittaa tarvittavat testit akkukennoille, -moduuleille ja -paketeille. Laitteistolla voidaan laboratorio-olosuhteissa kuormittaa erilaisissa sähköajoneuvoissa käytettäviä sähköenergiavarastoja niiden todellisia käyttöolosuhteita vastaavalla tavalla sekä sähköisen kuormitusprofiilin että lämpötilojen osalta. Tällaisen testauksen avulla tuotteista on mahdollista saada entistä aiemmin ja helpommin monipuolisia käyttökokemuksia niiden jatkokehitystä varten.

Kenno- ja moduulitestaukseen tarvittava laitteisto koostuu pääasiassa valmiista kaupallisista laitteista, mutta akkupakettien testaukseen tarvittava olosuhdekontti varusteluineen ja oheislaitteineen on räätälöity tämän tutkimusympäristön ehdoilla. Laboratorion laitteistojen suorituskyvylle ja toiminnallisuudelle asetettujen vaatimusten ohella myös kustannustehokkuus on otettu suunnitteluvaiheessa huomioon.

Asiasanat: akkutestaus, sähköajoneuvo, hybridiajoneuvo, ajoneuvoakku

ABSTRACT

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

HAAVISTO, JARI:
Equipment Specification of Traction Battery Testing Laboratory

Bachelor's thesis 46 pages
April 2012

Electric vehicles are attractive because of their low emissions, high energy efficiency and low running costs. Issues like cost and performance limitations of traction batteries are still hindering electric vehicle market penetration. Finnish companies and universities are interested in development of electric vehicles and electric energy storages, but there is no comprehensive testing equipment in Finland.

Traction battery laboratory will be established at VTT in consequence of demand for testing and this thesis will specify the equipment of laboratory. At first in this thesis, different kinds of existing and upcoming electric vehicles and traction batteries are presented on the basis of a literature survey. Laboratory hardware is dimensioned according to the performance of those electric vehicles and traction batteries. Because of accuracy and reliability requirements, testing and recording of measurement data has to be carried out automatically according to pre-programmed test procedure.

The outcome of this thesis is a description of battery testing laboratory and its hardware which fulfill the requirements to test battery cells, modules and packs. Equipment can be used for loading different kinds of electric energy storages in laboratory conditions, simulating their real electric and temperature conditions. Due to this kind of testing it is possible to gather knowledge of battery behavior for technology development.

The hardware used for cell and module testing is mostly composed of commercial devices, but temperature test container and its auxiliary equipment used for battery pack testing is custom made for this purpose. While defining requirements for functions and performance of laboratory hardware, cost efficiency has also been important criteria.

Key words: battery testing, electric vehicle, hybrid electric vehicle, traction battery

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Espoossa Teknologian tutkimuskeskus VTT:lle. Aiheen sain vuoden 2011 lopulla Samu Kukkoselta, joka oli myös työni ohjaaja toimeksiantajan taholta. Työni ohjaajana Tampereen ammattikorkeakoululla toimi Heikki Yli-Rämi. VTT:llä olen osallistunut Mikko Pihlatien johtamassa laboratorion perustamisprojektissa asiantuntijaryhmän työskentelyyn ja sen myötä saanut opinnäytetyötäni varten runsaasti lähdemateriaalia ja arvokasta tietoa, jonka hankkiminen muutoin olisi ollut lähes mahdotonta. Kiitos Samulle ja Mikolle mielenkiintoisesta työstä ja hyvästä ohjauksesta. Kiitos avusta myös muille VTT:n työntekijöille, joiden kanssa olen saanut työskennellä.

Espoossa 20.4.2012

Jari Haavisto

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	SÄHKÖAJONEUVOTYYPIT	8
2.1	Sähköajoneuvojen nimitykset	8
2.2	Akkukäyttöiset sähköajoneuvot	9
2.3	Hybridit.....	9
2.4	Hyötyajoneuvot.....	14
3	AJONEUVOAKUT.....	15
3.1	Käytettyjä akkuteknologioita.....	15
3.1.1	Lyijy-happoakku.....	15
3.1.2	NiMH	16
3.1.3	Li-Ion	16
3.1.4	ZEBRA.....	18
3.2	Superkondensaattorit.....	18
3.3	Akkujen rakenne	20
3.4	BMS	20
3.5	Akuilta halutut ominaisuudet erityyppisissä ajoneuvoissa.....	21
4	AJONEUVOAKKUJEN TESTAUSTARPEET.....	24
4.1	Testattavat yksiköt	24
4.2	Testattavat ominaisuudet	25
4.2.1	Sähkö- ja hybridihenkilöautot	26
4.2.2	Hyötyajoneuvot	28
5	AJONEUVOAKKUJEN TESTAUSLAITTEISTO.....	30
5.1	Laitteistolta halutut ominaisuudet	30
5.2	Laitteiston sähköiset vaatimukset	31
5.3	Hankittava testauslaitteisto ja sen sijoittelu.....	31
5.3.1	Yleistä	31
5.3.2	Akkupakettitesteri.....	34
5.3.3	Akkukenno- ja akkumoduulitesterit	34
5.3.4	Testauskammiot kennoille ja moduuleille	35
5.3.5	Testauskontti akkupaketeille	35
5.3.6	Apulaitekontti	38
5.3.7	Mittalaitteet ja tarvikkeet	40
5.4	Kiinteistötekniikkaan liittyvät vaatimukset.....	40
5.5	Turvajärjestelmät ja sähkötyöturvallisuus.....	41
6	POHDINTA	42
	LÄHTEET.....	44

LYHENTEET JA TERMIT

BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
C	Suhteellisen virran (virta jaettuna kapasiteetilla) yksikkö
DOD	Depth of discharge – purkaussyvyys, %
ECV	Electric Commercial Vehicles
EREV	Extended Range Electric Vehicle
EVE	Sähköisten ajoneuvojen järjestelmät 2011–2015
FCHEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
LCO	Litium-kobolttioksidi
LFP	Rautafosfaatti
Li-Ion	Litium-ioni
LMO	Litium-mangaanioksidi
LTO	Litiumtitanaatti
NCA	Nikkeli-koboltti-alumiinioksidi
NMC	Nikkeli-mangaani-kobolttioksidi
NiCd	Nikkeli-kadmium
NiMH	Nikkeli-metallihydridi
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SLI battery	Starting, lighting and ignition battery
SOC	State of Charge – akun varaustaso, %

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on määritellä, minkälaisella testauslaitteistolla pystytään täyttämään sähköajoneuvoakkujen testaamiseen liittyvät tarpeet Suomessa tällä hetkellä ja lähitulevaisuudessa. Markkinoilla on jo nykyään monenlaisia sähköisiä ajoneuvoja ja niitä tarvitaan lisää korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Myös sähköajoneuvojen vähäpäästöisyys, energiatehokkuus ja edulliset käyttökustannukset puoltavat niiden käyttöä. Toistaiseksi sähköajoneuvojen yleistymistä ovat hidastaneet lähinnä niiden sähköenergiavarastojen suorituskyvyn puutteet ja hinta.

VTT:n, Aalto-yliopiston ja TEKES:n yhteisessä eSTORAGE-projektissa selvitettiin vuosina 2010–2011 sähköajoneuvojen sähköisiin energiavarastoihin liittyviä tutkimustarpeita Suomessa. Projektin tulosten perusteella varsinkin kokonaisten sähköajoneuvojen ja niiden akkupakettien tutkimustarve on ilmeinen. Suomessa ei kuitenkaan ole kattavaa tutkimuslaitteistoa ajoneuvoissa käytettyjen sähköenergiavarastojen tarkkaan tutkimiseen todellista käyttöä vastaavissa olosuhteissa irrallaan sähköajoneuvosta. Niinpä vuoden 2012 alussa käynnistyi TEKES:n EVE-ohjelman alaisuudessa Electric Commercial Vehicles (ECV) -hankekokonaisuus, jonka yhtenä tavoitteena on sähköisten energiavarastojen tutkiminen ja tutkimusympäristön luominen.

Jo nykyisin on käytössä monenlaisia sähköisiä ajoneuvoja, jotka asettavat sähköenergiavarastoille merkittävästi vaihtelevia vaatimuksia. Sähköenergiavarastojen ominaisuudet pyritäänkin optimoimaan kunkin sovelluksen vaatimuksia vastaaviksi. Tämän vuoksi akkujen ja muiden energiavarastojen tutkiminen ja kehittäminen edellyttää niiden toiminnan ja käyttökohteiden tuntemista, joten projektin aluksi on kerätty tietoa sähköisten ajoneuvojen suorituskyvystä ja akkutekniikoista.

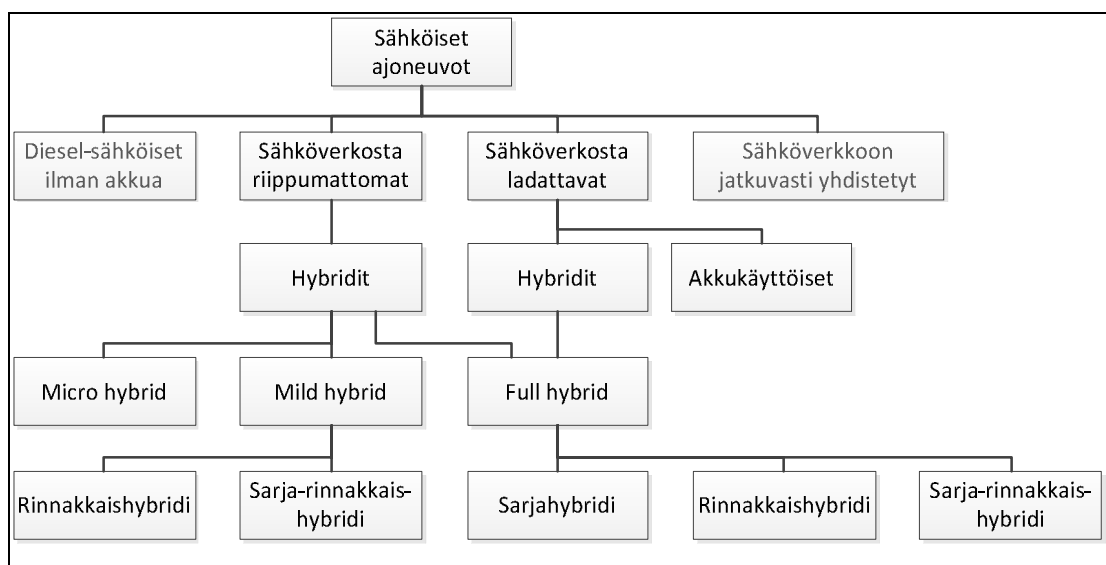
Todellisten sähköajoneuvojen ja niiden energiavarastojen ominaisuuksien perusteella tiedetään, mikä on nykyisten akkujen suorituskyvyn taso sekä mitä niiden kemiallisista ominaisuuksista johtuvia seikkoja täytyy huomioida testauksessa. Näiden tietojen perusteella suunnitellulla laitteistolla voidaan testata laboratorio-olosuhteissa erilaisia sähköajoneuvojen energiavarastoja niiden todellisia käyttöolosuhteita vastaavin menetelmin, jolloin energiavarastojen ominaisuuksista saadaan mahdollisimman relevantteja ja luotettavia mittaustuloksia tuotekehityksen kannalta.

2 SÄHKÖAJONEUVOTYYPIT

2.1 Sähköajoneuvojen nimitykset

Sähkökäyttöiset ajoneuvot jaetaan eri tyyppeihin muun muassa niiden sähkölähteen tai voimalinjan rakenteen mukaan. Ne voivat saada tarvitsemansa sähkön suoraan verkosta johdinta pitkin, kuten junan veturit, raitiovaunut, metrot jne. tai ajoneuvoon sijoitetusta energialähteestä. Tässä työssä käsitellään ajoneuvoja, jotka eivät ole käytön aikana jatkuvassa yhteydessä kiinteään verkkoon. Myös ilman akkua toimivat diesel-sähköiset ajoneuvot jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

Sähköauto ja hybridauto ovat tuttuja termejä, jotka tuovat ensimmäisenä mieleen henkilöauton, mutta tässä työssä käytettävä termi sähköajoneuvo käsittää myös erilaiset hyötyajoneuvot: työkoneet, kuten trukki tai kuormaaja, ja raskaat maantieajoneuvot, kuten bussi tai kuorma-auto. Sähköajoneuvo voi liikkua sähkön voimalla joko kokonaan tai osittain. Toimintaan tarvittava sähköenergia on kokonaan varastoituna akkuun tai sitä tuotetaan ajon aikana polttomoottorikäyttöisellä generaattorilla tai polttokennolla, jolloin akkua käytetään tarpeen mukaan. Akkua voidaan vaihtoehtoisesti ladata myös sähköverkosta ja monissa sähköajoneuvoissa käyttämällä generaattoria sähköjarruna. Kuviossa 1 on havainnollistettu sähkölähteen ja voimalinjan mukaan tehty jaottelu, jota voi pääpiirteittäin soveltaa kaikkiin sähköajoneuvoihin.



KUVIO 1. Sähköajoneuvojen jaottelu

2.2 Akkukäyttöiset sähköajoneuvot

Akkukäyttöisille sähköajoneuvoille on englanninkielinen lyhenne BEV – Battery Electric Vehicle. Nimensä mukaisesti ne saavat kaiken energian akusta, joka ladataan sähköverkosta. Akkutekniikan kehityttyä sähköautoista on saatu entistä suorituskykyisempiä ja käytännöllisempiä, ja toimintasäde on saatu pidemmäksi.

Taulukossa 1 on vertailtu sarjatuotannossa olleiden sähköautojen teknisiä tietoja. Taulukosta nähdään, että kehitys ei ole ollut pelkkiä teknisiä tietoja tarkastellen mitenkään huimaa, mutta esimerkiksi Nissan Leaf on jo sekä tilojensa, toimintasäteensä että hintansa puolesta varteenotettava kilpailija perinteisille henkilöautoille. Taulukon lähteinä ovat verkkodokumentit General Motors EV1, 1997 Peugeot 106 Electric ja 2011 Nissan Leaf Road Test Specs.

Leafin arvioitu myyntihinta 40800 € on vain hieman kalliimpi kuin esimerkiksi suositun perheauto Qashqain noin 23000–37000 € (Nissan Leaf tulee... 2012). Leaf on tulossa myyntiin Suomessa keväällä 2012. Fortum ja Nissan ovat myös kehittäneet Leafiin alkuperäistä tehokkaamman kotilatausyksikön, joka hyödyntää paremmin 230 V 16 A sähkönsyötön kapasiteetin. (Fortum ja Nissan kehittivät... 2012)

TAULUKKO 1. Sarjavalmistettavia sähköautoja

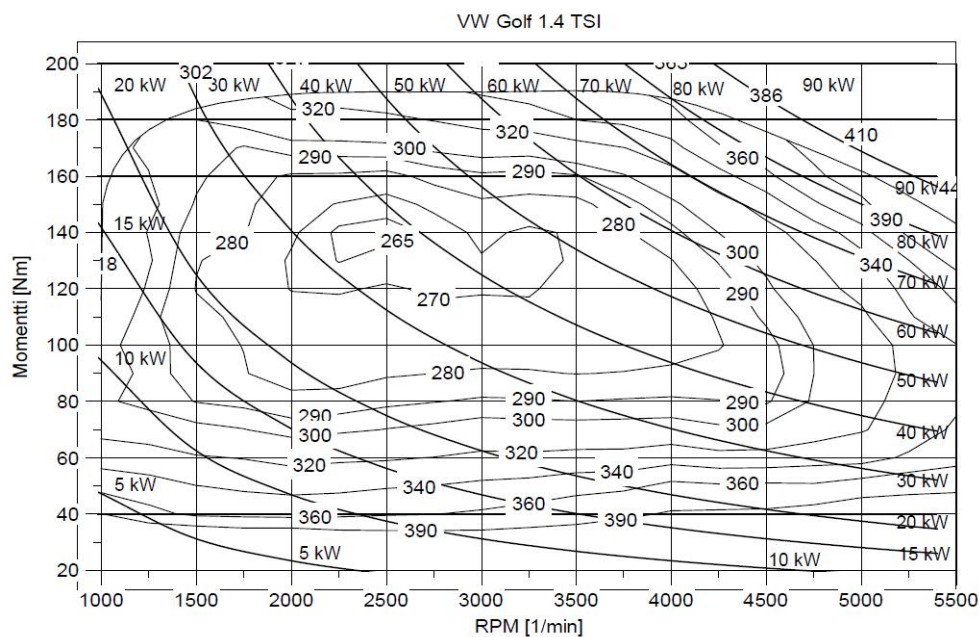
	Akku	Istuinpaikkoja	Teho	Omapaino	Akun kapasiteetti	Toimintasäde	Valmistusvuosi
GM EV1 I	lyijy	2	102 kW	1400 kg	18,7 kWh	130–160 km	1996–1999
GM EV1 II	NiMh	2	102 kW	1320 kg	26,4 kWh	160–220 km	1999–2003
Peugeot 106 Electric	NiCd	5	20 kW	1050 kg	12 kWh	90 km	1998–2004
Nissan Leaf	Li-Ion	5	80 kW	1530 kg	24 kWh	160 km	2010–

2.3 Hybridit

Hybridiajoneuvossa on polttomoottorin ja polttoainesäiliön lisäksi toinen energiavaroitus ja voimanlähde – yleisimmin akku ja sähkömoottori. Järjestelmän etuina ovat sammutus- ja käynnistysautomaatiikka, mahdollisuus ottaa muuten hukkalämmöksi jarrutettavaa liike-energiaa akkuun talteen sähkömoottorilla tai erillisellä generaattorilla ja mahdollisuus avustaa sähkömoottorilla polttomoottoria tarpeen vaatiessa. Siksi hybridiajoneuvon polttomoottori voidaan mitoittaa tavallista pienemmäksi, mikä tarkoittaa lähes aina pie-

nempää polttoaineen kulutusta, koska normaalikokoiseen verrattuna pienempää poltto-moottoria käytetään suuremmalla kuormituksella, jolloin hyötysuhde on parempi. (Hybrids Under the Hood part 1)

Kuviossa 2 on tyypillinen ahdetun bensiinimoottorin ominaiskulutuskäyrästä, joka osoittaa, että pienin ominaiskulutus [g/kWh] ja sen myötä paras hyötysuhde saavutetaan käyntinopeusalueella 2000–3000 kierrosta minuutissa noin 70–80 % kuormalla eli noin 130–150 Nm vääntömomentilla, kun suurin vääntömomentti on noin 190 Nm. Tällöin moottorin 90 kW nimellistehosta on käytössä kuitenkin vain noin 30–50 %. Kulutuksia mitannut tutkija Jukka Nuottimäki (2012) toteaa lisäksi, että verrattaessa keskivertoon vapaasti hengittävään bensiinimoottoriin tämän turboahdetun moottorin hyvän hyötysuhteen alue on laajempi. Siten vapaasti hengittävän moottorin koon optimoinnilla saavutettu etu on vielä suurempi.



KUVIO 2. Nykyaikaisen ahdetun bensiinimoottorin ominaiskulutuskäyrästä (Jukka Nuottimäki 2011, 6)

Monimutkainen voimalinja kuitenkin yleensä lisää painoa, nostaa hintaa ja sisältää enemmän osia, jotka voivat vikaantua. Hybridiajoneuvoille on englanninkielinen lyhenne HEV – Hybrid Electric Vehicle ja ne voidaan jakaa alatyyppeihin sähköjärjestelmän tehon mukaan: micro hybrid, mild hybrid ja full hybrid.

Micro hybridillä tarkoitetaan sammutusautomaatiikalla varustettua ajoneuvoa, joka ei yleensä hyödynnä liikkumiseen sähkömoottoria, mutta saa apulaitteilleen energiaa akusta, kun polttomoottori on sammutettuna. Automaatiikka pysäyttää esimerkiksi auton moottorin pysähdyttäessä liikennevaloihin ja käynnistää sen uudelleen, kun kuljettaja nostaa jalan jarrulta.

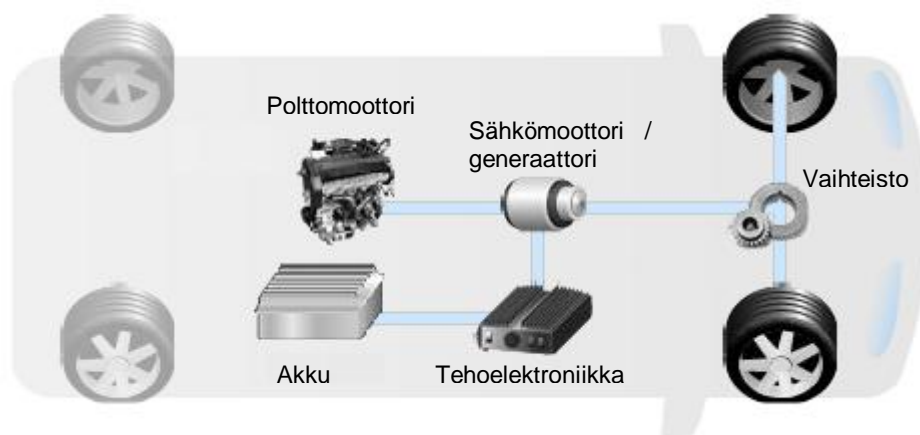
Mild hybridit, joista suomenkielessä puhutaan yleensä vain hybrideinä, liikkuvat pääasiassa polttomoottorin voimin ja sähkömoottori antaa tarvittaessa lisätehoa ja toimii jarrutustilanteessa generaattorina syöttäen energiaa akkuun. Suomessa myytyjä hybridejä ovat esimerkiksi Mercedes Benz S 400 Hybrid, Honda Civic Hybrid ja Honda Insight. Hybridijärjestelmää voi käyttää myös raskaassa kalustossa, kuten tehdään esimerkiksi Volvon FE Hybrid -kuorma-autossa.

Full hybrideissä eli täyshybrideissä on riittävän tehokas sähkömoottori, jotta ne pystyvät liikkumaan ainakin lyhyitä matkoja myös pelkästään sähköllä. Joissakin malleissa voi valita, haluaako auton kulkevan sähköllä vai haluaako säästää sähköä esimerkiksi tulevaa kaupunkiajtoa varten. Todennäköisesti tunnetuin ja maailman myydyin täyshybridiauto on Toyota Prius. Sen osuus kaikista USA:ssa vuosina 2000–2010 myydyistä hybrideistä on hieman yli puolet ja se oli myydyin henkilöauto Japanissa vuonna 2010 (Hybrid Car Statistics).

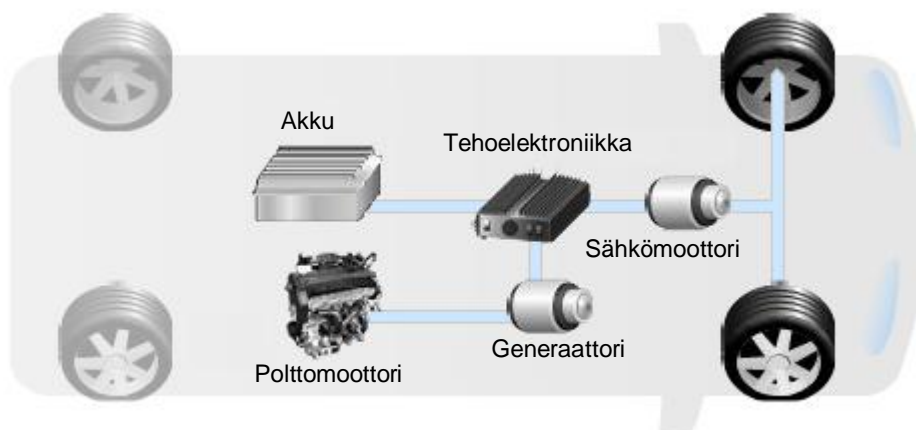
Ladattava hybridiajoneuvo, jonka lyhenne PHEV on peräisin englanninkielisestä termistä Plug-in Hybrid Electric Vehicle, kuuluu full hybrideihin ja siinä on energiakapasiteetiltaan suurempi akkupaketti kuin ”tavallisessa” hybridissä ja riittävän tehokas sähkömoottori, joka tarjoaa täyden suorituskyvyn sähköllä. Akku voidaan ladata sähköverkosta ja ajoneuvo toimii akkukäyttöisenä niin pitkään kuin akuissa on virtaa ja varaustason laskiessa ajoneuvo alkaa toimia automaattisesti polttomoottorin avulla tavallisena hybridinä. Esimerkiksi Toyota Prius on saatavana joissakin maissa myös Plug-in-mallina, jossa on ajo-olosuhteista riippuen 11 mailin eli noin 18 km sähköajoon riittävä 4,4 kWh Li-Ion-akku. (2012 Toyota Prius... 2012)

Kun toimintasäde akkukäyttöisenä on yli 20–40 km, ajoneuvoa voidaan kutsua myös laajennetun toimintasäteen sähköautoksi, jolle on englanninkielisestä termistä Extended Range Electric Vehicle juontava lyhenne EREV. Opel Ampera ja Fisker Karma ovat kaksi esimerkkiä ladattavista hybridiautoista, joita markkinoidaan EREV-termillä.

Rakenteeltaan yleisimmät hybridiajoneuvot ovat rinnakkais- tai sarja-rinnakkais-hybridejä, joissa sähkömoottori ja generaattori tai näiden yhdistelmä on mekaanisessa yhteydessä polttomoottoriin. Opel Ampera esimerkiksi on puolestaan sarjahybridi, jossa polttomoottori pyörittää vain generaattoria eikä ole mekaanisessa yhteydessä sähkömoottoriin ja voimansiirtoon kuin ajettaessa isoilla nopeuksilla (Tulevaisuus myynnissä 2011, 26). Seuraavissa kuvissa on esitetty yksinkertaistettuna rinnakkais- ja sarjahybridien voimansiirto.



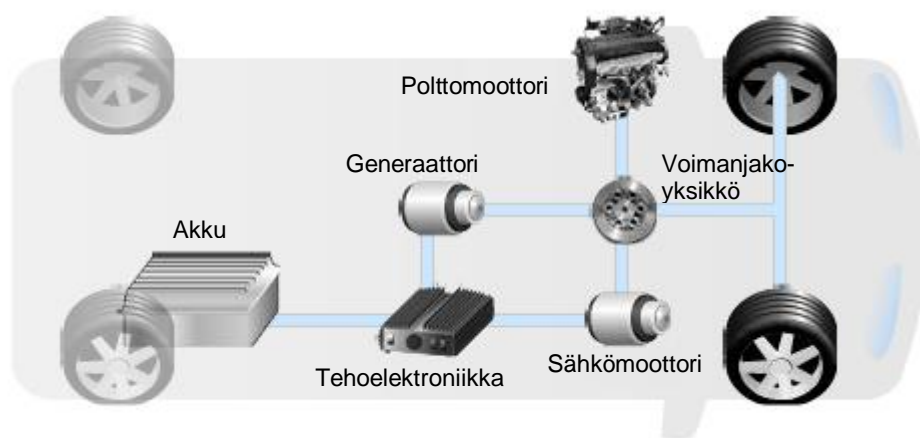
KUVIO 3. Rinnakkaishybridin voimansiirto (Hybrids under the hood part 2, muokattu)



KUVIO 4. Sarjahybridin voimansiirto (Hybrids under the hood part 2, muokattu)

Rinnakkaishybridistä on olemassa myös sarja-rinnakkaisrakente, jolla pyritään monipuolisempiin voimalinjan käyttömahdollisuuksiin. Esimerkiksi Toyota Prius sisältää

tällaisen hybridijärjestelmän. Sen ansiosta polttomoottoria voidaan käyttää useimmiten optimaalisella tavalla. Kun sähkömoottorin teho tai akun varaustila ei riitä sähköllä ajamiseen, polttomoottori käynnistyy ja hitaasti ajettaessa voimanjakoyksikkö välittää sarjahybridin tavoin voiman generaattorille, joka lataa akkua ja syöttää sähköä ajomoottorille. Suuremmissa nopeuksissa voima välitetään rinnakkaishybridin tavoin mekaanisesti pyörille ja moottoria kuormitetaan paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi samalla myös generaattorilla, joka lataa akkua. (Hybrids under...) Seuraavassa kuvassa on esitetty yksinkertaistettuna sarja-rinnakkaishybridien voimansiirto.



KUVIO 5. Sarja-rinnakkaishybridin voimansiirto (Hybrids under the hood part 2, muokattu)

FCHEV Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle eli polttokennohybridiajoneuvo liikkuu sähkömoottorilla, joka saa energian polttokennosta ja akusta tai superkondensaattorista, joka antaa lisätehoa nopeisiin tehon tarpeen muutoksiin ja latautuu myös jarrutustilanteissa. Polttokennohybridejä ei ole varsinaisessa sarjatuotannossa korkean hinnan vuoksi, mutta esimerkiksi Mercedes Benz on valmistanut noin 200 B-sarjan F-Cell-mallia, jotka ovat olleet valmistajan ja valittujen yhteistyökumppaneiden koekäytössä. (Mercedes-Benz B-sarjan F-CELL) Lisäksi Hyundai ix35 FCEV on ollut koekäytössä yhteistyössä Euroopan komission kanssa. (EU officials test hydrogen fuel cell car)

2.4 Hyötyajoneuvot

Monille tunnetuimmat sähköajoneuvo- ja hybridisovellukset ovat henkilöautoja, mutta vastaavaa tekniikkaa käytetään myös hyötyajoneuvoissa. Koska hyötyajoneuvot ovat usein suhteellisen painavia tai niillä käsitellään painavia kuormia, niillä on hyvät edellytykset ottaa jarrutuksissa liike-energiaa ja kuormaa laskiessa sen potentiaalienergiaa talteen sähköenergiavarastoon.

Hyötyajoneuvoissa energiankulutus on usein kuitenkin keskimäärin niin suurta, että täyssähköisen ajoneuvon vaatiman sähköenergian mukana kuljettamiseen vaadittavat akut olisivat epäkäytännöllisen suuret ja niitä olisi ladattava usein ja suurella virralla. NykYTEKNIKALLA järkevimmäksi ratkaisuksi onkin monissa tapauksissa todettu työkoneiden varustaminen hybridijärjestelmällä.

Täyssähköisistä työkoneista esimerkkinä on monissa tuotantotiloissa käytettävät akkukäyttöiset trukit. Hyötyajoneuvoissa on jo käytössä hybriditekniikkaakin. Esimerkiksi Turussa on ollut paikallisliikenteessä neljä hybridibussia toukokuusta 2011 lähtien ja niistä on saatu hyviä käyttökokemuksia. (Hybridibussin säästö riippuu kuskista 2011) Volvolla puolestaan on tuotannossa FE Hybrid -kuorma-automalli painoluokassa 18–26 tonnia. Siinä on 120 kW sähkömoottori ja 600 V 5 kWh Li-Ion-akku. (Volvo FE Hybrid). Ranskan Nizzassa liikennöi hybridiraitiovaununlinja, jonka raitiovaunut ylittävät kaksi historiallista toria Saftin valmistamiin NiMh-akkuihin varatulla sähköenergialla. Näin toreille ei ole tarvinnut asentaa ajojohtimia. (Saft Wins Order... 2005) Hybriditekniikan hyödyntämisestä hyötyajoneuvoissa laajemminkin ollaan ilmeisen kiinnostuneita, sillä esimerkiksi lappeenrantalaisyritys Visedo on kehittänyt konseptin hybridikaivinkoneesta, jossa on diesel-sähköinen voimalinja ja superkondensaattoripaketti (Turha teho pois dieselmoottorista 2012, 20)

3 AJONEUVOAKUT

3.1 Käytettyjä akkuteknologioita

Sähköajoneuvoissa on luultavasti kokeiltu lähes kaikkia mahdollisia akkutyyppisiä vaihtelevalla menestyksellä. Seuraavana on esitelty käytetyimmät ja toimivimmat ajoneuvo-käyttöön soveltuvat akkutyyppit oleellisimmilta ominaisuuksiltaan. Akkutekniikoiden jälkeen on esitelty myös superkondensaattori, joka on tehotiheydensä ja syklikestoisuutensa ansiosta hyvä vaihtoehto akuille tietyissä sovelluksissa.

3.1.1 Lyijy-happoakku

Lyijy-happoakku (lyijyakku) on vanhin ja kemialliselta toimintatavaltaan yksinkertainen akkutyyppi. Sen elektrodit ovat lyijyä ja positiivisen elektrodin pinta on hapetettu lyijyoksidiksi. Elektrolyyttinä käytetään rikkihappoliuosta. Varausta purettaessa elektrolyytin rikki siirtyy elektrodeille muodostaen niille lyijysulfaattia. Ladattaessa positiiviselle elektrodille muodostuu jälleen lyijyoksidia ja negatiivisen elektrodin lyijysulfaatti pelkistyy lyijyksi. Kennon nimellisjännite on 2 V. (Lead–acid battery)

Lyijyakkuja käytetään ajovoima-akkuina esimerkiksi sähkötrukeissa ja golfkärryissä ja niitä on käytetty myös sähköautoissa. Sähköajoneuvojen sijaan yleisempiä käyttökohteita lyijyakuille ovat käyttö autojen käynnistysakkuina, varavoimajärjestelmissä ja aurinkosähköjärjestelmien energiavarastona. Lyijyakkujen etuna on hinta suhteessa tehoon ja kapasiteettiin. Tehokkaat käynnistysakut eivät kestä toistuvia syviä purkauksia, mutta syväpurkusovelluksiin valmistetaan akkuja, joissa on paremmin purkausta kestävätkä paksummat elektrodit.

Lyijyakun lataaminen ei vaadi monimutkaista valvonta- tai ohjausjärjestelmää. Riittää, kun latausvirta ja -jännite on rajattu sopiviin arvoihin. Latauksen aikana elektrolyytistä voi veden hajotessa vapautua happea ja vetyä, mikä voi aiheuttaa räjähdysvaaran ja edellyttää tilan tuulettamista. Nesteen määrää on myös tarkkailtava ja akkuvettä lisättävä tarvittaessa. Suljetuissa huoltovapaiksi kutsutuissa akuissa on katalyyttiä, joka pyrkii

yhdistämään vapautuneen hapen ja vedyn jälleen vedeksi. Elektrolyytti voi olla myös geelimäisessä muodossa tai imeytetty lasikuitumattoon. (Lead Acid Batteries)

3.1.2 NiMH

Nikkeli-metallihydridiakku on tullut käyttöön 1980–90 luvulla parempana vaihtoehtona aiemmin yleiselle nikkeli-kadmiumakulle. Siinä positiivielektrodi on nikkelioksidihydroksidia ja negatiivielektrodi metallihydridiä. Materiaalien johdosta NiMH-akussa on NiCd-akkuun verrattuna parempi energiatiheys eikä se sisällä kadmiumia, joka on terveydelle ja ympäristölle vaarallinen raskasmetalli. Kennon nimellisjännite on 1,2 V. (Nickel–metal hydride battery) NiMH-akkuja käytetään esimerkiksi tavallisten paristojen tilalla suhteellisen paljon virtaa kuluttavissa laitteissa, kuten kameroissa, leluissa sekä käsi- ja otsavalaisimissa.

Nykyisistä hybridautoista esimerkiksi myydyimmät Toyota Prius ja Honda Insight käyttävät NiMH-akkuja, jotka tarjoavat tällä hetkellä hyvän tehosiheyden kohtuullisella kustannuksella ja ovat osoittautuneet kestäviksi käytössä, jossa varaustilasta ja siten kapasiteetista hyödynnetään vain kapeaa aluetta (The 200,000-mile question... 2011).

NiMH-akkujen latausjännite ja -virta täytyy rajoittaa sopiviin arvoihin. Lisäksi akun täyteen varautuminen täytyy tunnistaa ja lataaminen lopettaa tai ainakin pienentää latausvirtaa merkittävästi. Täyden akun voi jättää ylläpitolataukseen pienellä virralla. (Nickel–metal hydride battery)

3.1.3 Li-Ion

Litiumioniakku voi sisältää erilaisia elektrodimateriaaleja, mutta litiumionit toimivat aina elektrolyytissä varauksenkuljettajina. Akkutyypinä se on nykyään kiinnostavin ja aktiivisen kehityksen ja tutkimuksen kohteena, koska litiumioniakkujen energiatiheys on parempi verrattuna lyijy- tai NiMH-akkuihin. Myös teho-optimoitujen litiumioniakkujen tehosiheys on jo parempi kuin NiMH-akuissa. Lähes kaikkien litiumioniakkujen negatiivielektrodimateriaalina on grafiitti ja akut jaotellaan yleisimmin positiivielektrodimateriaalin perusteella. Litiumioniakut vaativat tarkan kennokohtaisen jännitemitta-

uksen, sillä tyypistä riippuen pienetkin yli- ja alijännitteet voivat aiheuttaa muutoksia elektrodeilla ja siten lyhentää niiden ikää ja toistuessaan jopa tuhota kennon, mikä on myös turvallisuusriski. Seuraavissa kappaleissa esitellään lyhyesti yleisimmät litiumioniakkutyypit.

LCO-akku eli litium-kobolttioksidista valmistetun positiivielektrodin sisältävä litiumioniakku on yleisin tyyppi ja sitä käytetään lähinnä puhelinten, kannettavien tietokoneiden ja muun kulutuselektroniikan akuissa. LCO-kennojen nimellijännite on 3,7 V. Kobolttia voidaan seostaa nikkelillä, mangaanilla ja alumiinilla eri ominaisuuksien parantamiseksi. Esimerkiksi $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ -seostuksella (NCA) saadaan suurempi energiakapasiteetti ja $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$ -seostuksella (NMC) parempi turvallisuus. (Vuorilehto 2010, 2)

LMO-akku, jossa on litium-mangaanioksidista (LiMn_2O_4) valmistettu positiivielektrodi, on edullisempi kuin LCO-akku, mutta sen käyttöikä on toistaiseksi ollut riittämätön sähköajoneuvokäyttöön. Tämä ongelma voidaan välttää erilaisilla seosmateriaaleilla. Esimerkiksi Chevrolet Voltin ja Opel Amperan akuissa käytetään runsaasti mangaanioksidia sisältävää LMO-NMC-akkua, jossa on 288 kennoa kytkettynä 3 rinnan ja 96 sarjaan. Näin saadaan nimellijännitteeltään 370 V ja kapasiteetiltaan 16 kWh akkupaketti, jonka energiatiheys on noin 80 Wh/kg (Menahem 2010, 63; Vuorilehto 2010, 3).

LFP-akku, jossa on rautafosfaatista (LiFePO_4) valmistettu positiivielektrodi, on turvallinen, pitkäikäinen ja sallii suuret lataus- ja purkausvirrat. Sen nimellijännite on noin 3,2 V. (Vuorilehto 2010, 2) Esimerkiksi Suomessa valmistettavassa Fisker Karmassa käytetään A123 Systemsin LFP-akkuja. (Fisker Automotive signs...) Myös suomalainen European Batteries käyttää akuissaan tätä kemiaa.

LTO-akku on nimetty negatiivielektrodimateriaalina grafiitin tilalla käytetyn litiumtitanaatin mukaan, joka on turvallisempi materiaali, koska litium ei saostu litiumtitanaatin pinnalle ilman vakavaa väärinkäyttöä, eikä LTO pala. Litiumtitanaatti antaa grafiittia alemman nimellisen kennojännitteen, noin 2,2 V, mutta sen avulla akusta voidaan saada erittäin pitkäikäinen ja käyttää erittäin korkeita lataus- ja purkausvirtoja. (Vuorilehto 2010, 2-3) Esimerkiksi Mitsubishi i-MiEV:ssä käytetään Toshiba valmistamia LTO-akkuja, joiden luvataan kestävän muihin Li-Ion-tyyppeihin verrattuna 2,5-kertaisen määrän latausyklejä ja jotka voisi ladata 80 % varaustasoon 15 minuutissa. Tuotanto-

versioon on kuitenkin valittu 30 min pikalataus, joka silti vaatii 50 kW hetkellisen tehon sähköverkosta. (Explore i-MiEV MY11; Mitsubishi Chooses Super-Efficient...)

3.1.4 ZEBRA

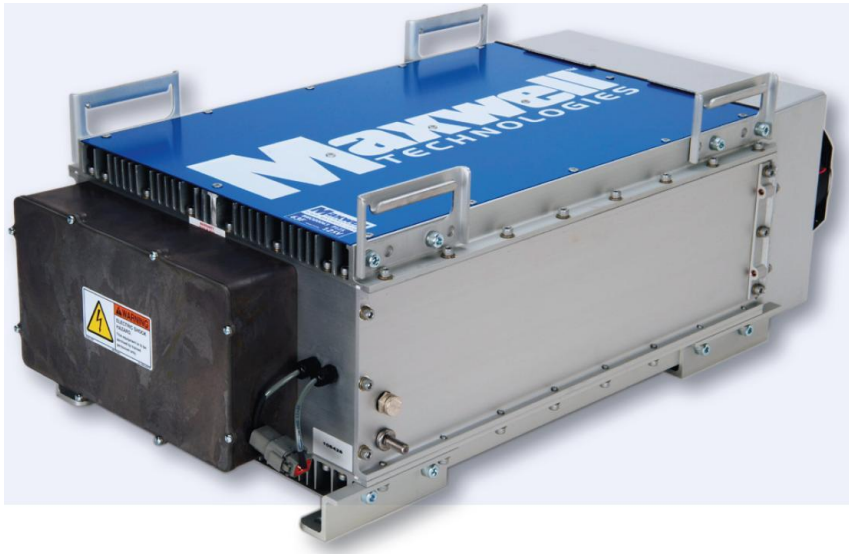
ZEBRA-akku on korkeassa, noin 270–350 °C lämpötilassa toimiva natrium-metallikloridiakku, jossa natrium on sulassa muodossa. Sen raaka-aineet ovat edullisia ja niitä on paremmin saatavilla kuin litiumioniakkuihin tarvittavaa litiumia. (Alternate Battery Systems) ZEBRA-akkujen käyttö on kuitenkin jäänyt vähäiseksi ja vain yksi tehdas valmistaa niitä. Niiden heikkoutena on toimintalämmön ylläpitäminen, joka kuluu vuorokaudessa n. 14 % akun kapasiteetista. (Zebra Batteries)

3.2 Superkondensaattorit

Superkondensaattorissa energia ei varastoidu sähkökenttään samalla tavalla kuin tavallisissa kondensaattoreissa, vaan varaus muodostuu, kun elektrolyyttiin upotetut huokoisesta hiilestä valmistetut elektrodit vetävät varausta ladattaessa puoleensa elektrolyytin vastakkaisesti varautuneita ioneja. Elektrodit on erotettu ohuella erotinkalvolla, joka estää ionien liikkeen niiden välillä, joten erottimen pinnoille kertyvistä vastakkaisesti varautuneista ioneista muodostuu sähkövaraus. Latauksen tai purkauksen aikana ei tapahdu kemiallista rektiota kuten akuissa, joten superkondensaattori ei periaatteessa kulu käytössä, mutta käytännössä ominaisuudet silti heikkenevät hitaasti käytön myötä. (How An Ultra Capacitor Works; Capacitors and SuperCapacitors)

Ulkomitoiltaan vastaavan superkondensaattorin kapasiteetti voi olla satakertainen tavalliseen elektrolyyttikondensaattoriin verrattuna, noin 2–7 Wh/kg. Tämä on vielä kaukana akuista, mutta superkondensaattorin etuina ovat erittäin suuret lataus- ja purkausvirrat ja erinomainen syklikestoisuus. Superkondensaattori ei tarvitse syväpurkaussuojausta eikä se ylilataudu, jos korkeinta sallittua jännitettä ei ylitetä. Superkondensaattorien jännitealue on samaa luokkaa akkukennojen kanssa, mutta jännite vaihtelee huomattavasti enemmän varaustilasta riippuen. Esimerkiksi Maxwell valmistaa ajoneuvokäyttöön soveltuvia superkondensaattorimoduuleja, joiden hetkellinen maksimiteho on 1700 W/kg ja syklikestoisuus noin miljoona sykliä. Kuvassa 1 on Maxwellin 125 V superkonden-

saattorimoduuli ja taulukossa 2 on esitelty moduulin ja yksittäisen superkondensaattorin teknisiä tietoja.



KUVA 1. Superkondensaattorimoduuli (Lähde: Maxwell 125V modules datasheet)

TAULUKKO 2. Superkondensaattorin ja niistä koostuvan moduulin teknisiä tietoja (Lähde: Maxwell K2 Series datasheet ja Maxwell 125V modules datasheet)

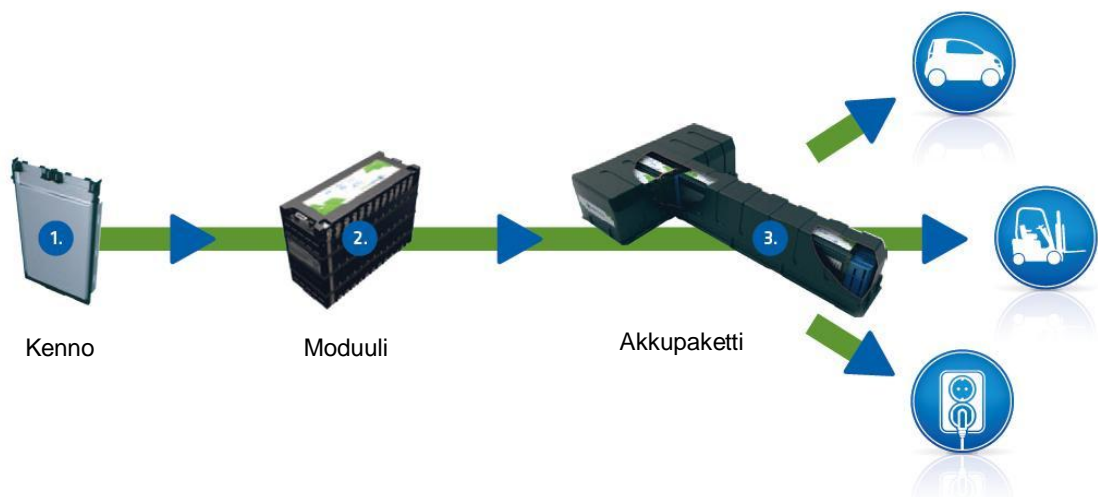
Maxwell	BCAP3000	BMOD0063 P125
Nimellisjännite	2,7 V	125 V
Maksimivirta	210 A	240 A
Hetkellinen maksimivirta	2200 A	1800 A
Tehotiheys	5900 W/kg	1700 W/kg
Energiatiheys	6,0 Wh/kg	2,3 Wh/kg
Kapasiteetti	3,04 Wh	136 Wh
Sykliskestoisuus	yli 1000 000	yli 1000 000
Paino	510 g	60,5 kg

Maxwellin 125 V moduuli koostuu useista sarjaan kytketyistä kondensaattoreista ja tarvittavista apujärjestelmistä ja rakenteista, kuten ohjauselektronikasta, jäähdytysjärjestelmästä ja tukirakenteista. Sen sähköiset ominaisuudet vastaavat noin 45 sarjaan kytkettyä 3000 F superkondensaattoria, joiden yhteispaino olisi noin 23 kg, joten moduulin painosta yli puolet aiheutuu muusta kuin superkondensaattoreista. Taulukosta 3 ilmenee, että superkondensaattoreiden hinta suhteessa kapasiteettiin on huomattavasti korkeampi litiumioniakkuun verrattuna, mutta toisaalta suhteessa tehoon huomattavasti

edullisempi. Tämäkin seikka puoltaa superkondensaattorien käyttöä sovelluksissa, jotka sisältävät paljon toistuvaa, suuritehoista ja lyhytkestoista lataamista ja purkamista vuorotellen.

3.3 Akkujen rakenne

Kuten edellä todettiin, akkukennojen jännite on muutamia voltteja ja ajoneuvokäyttöön riittävän tehon saavuttamiseksi kohtuullisilla virroilla kennoja on kytkettävä useita sarjaan. Riittävän kapasiteetin saavuttamiseksi kennoja on joskus kytkettävä myös rinnakkain. Kennoista voidaan koota ensin moduuleja ja moduuleista halutunkokoinen akkupaketti. Alla on havainnollistava kuva suomalaisen European Batteries Oy:n modulaarisesta akkujärjestelmästä.



KUVIO 6. Modulaarinen akkujärjestelmä (Lähde: European Batteries esite, muokattu)

3.4 BMS

Kun kennoja kytketään sarjaan tai rinnan, niiden tilaa täytyy valvoa. Siihen käytetään akkujen hallintajärjestelmää, joka tunnetaan lyhenteellä BMS – Battery Management System. Hallintajärjestelmän toimintoihin kuuluu muun muassa kennojen jännitteen ja varaustilan valvonta ja säätö siten, että järjestelmä tasoittaa kennojen keskinäistä varaustilaa. Lisäksi BMS ohjaa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmää, joka lämmittää tai jäähdyttää akkua tarpeen mukaan.

BMS sisältää liitännän ajoneuvoon ja ulkoiseen latausjärjestelmään. Sen välityksellä BMS ohjaa akun käyttöä muun muassa rajoittamalla purku- ja latausvirtaa tarpeen mukaan. Tasapainottamalla kennojen varaustilat keskenään yhtä suuriksi ja estämällä niiden yllilatauksen ja syväpurkauksen BMS maksimoi akkupaketin kapasiteetin, energiatehokkuuden ja syklikestoisuuden. (European Batteries esite)

BMS:n asetukset täytyy määritellä jokaiseen sovellukseen erikseen, jotta se tunnistaa akun varaustilan oikein ja pitää sen halutulla alueella. Varaustilan ja energiankulutuksen avulla voidaan laskea jäljellä oleva sähköenergialla ajettava matka tai aika. Kun BMS mittaa akkuun ladattavaa ja siitä purettavaa energiaa ja vertaa sitä varaustilaan, se voi määrittää akun kunnan. Akun kunto voidaan määritellä muun muassa kapasiteetin, sisäisen resistanssin ja itsepurkautuvuuden perusteella. Nämä ominaisuudet heikkenevät ajan ja käytön myötä.

3.5 Akuilta halutut ominaisuudet erityyppisissä ajoneuvoissa

Yleensä ajoneuvoissa akkujen keveys ja pieni koko suhteessa tehoon ja energiamäärään on etu. Siksi ajoneuvoihin pyritään valitsemaan akkuja, joilla on hyvä energia- ja tehotiheys. Raskaissa työkoneissa akkujen painolla ei välttämättä ole merkitystä, vaan sopivaan paikkaan sijoitettujen akkujen painosta voi olla jopa hyötyä. Edullisten lyijyakkujen käytön voi silti tehdä kannattamattomaksi niiden huono syklikestoisuus.

Edellä mainittujen akkutyypin suorituskyvystä kertovia ominaisuuksia on koottu taulukkoon 3. Lukuarvot koskevat yksittäisiä kennoja ja lyijyakkujen tapauksessa kuuden kennon eli 12 V akkuja. Syklikestoisuus on ilmoitettu käytössä, joissa akuista puretaan noin 60–80 % kapasiteetista. Lyijyakkujen kohdalla on otettava huomioon, että suurella teholla niiden kapasiteetista on hyödynnettävissä ehkä vain noin kolmannes, joten ajovoima-akkujen käytetty tehotiheys jää vaihteluvälin alarajalle.

Lukuarvot ovat aiemmin käytetyistä lähteistä koottujen tietojen vaihteluvälejä ja akkujen ominaisuudet riippuvat muun muassa siitä, rakennetaanko ne energia- vai tehooptimoiduiksi. Myös akun syklikestoisuuteen voidaan vaikuttaa sen sisäisellä rakenteella ja käytettävällä purkaussyvyydellä. Lisäksi tekniikka kehittyy jatkuvasti, mutta luvut antavat ainakin käsityksen akkutyypin ominaisuuksien tämän hetkisistä eroista.

TAULUKKO 3. Akkujen ominaisuuksia

Akkutyyppi	Energiatiheys Wh / kg	Tehotiheys W / kg	Hinta € / kWh	Hinta € / kW	Syklikestoisuus syklien lkm
Lyijy-happo	25...40	100...400	100...200	10...100	300...600
NIMH	45...120	250...1000	500...1000	50...200	n. 1000
LCO	180...240	150...400	n. 1000	500...1000	500...2000
LMO	170...180	...800		200...400	500...2000
LFP	135...145	500...2400		100...300	1000...4000
LTO	72	760		100...300	6000...12000
ZEBRA	60...120	150...200			yli 1000
Superkondensaattori	2...7	3000...7000	n. 20 000	15...30	n. 1 000 000

Yhteistä akkujen käytölle eri ajoneuvosovelluksissa on se, että niitä ei ladata 100 % täyteen eikä pureta täysin tyhjiksi. Toisin sanoen varaustila, jossa akku pidetään käytön aikana eli SOC-ikkuna (state of charge) on käyttökohteesta riippuen yleensä välillä 20–95 %. Tämä pidentää akkujen käyttöikää ja mahdollistaa sen, että juuri ladattukin akku voi ottaa ajoneuvon generaattorista varausta vastaan. Akkujen purku- ja latausvirta ilmoitetaan usein suhteessa kapasiteettiin, jolloin virran yksikkö on C.

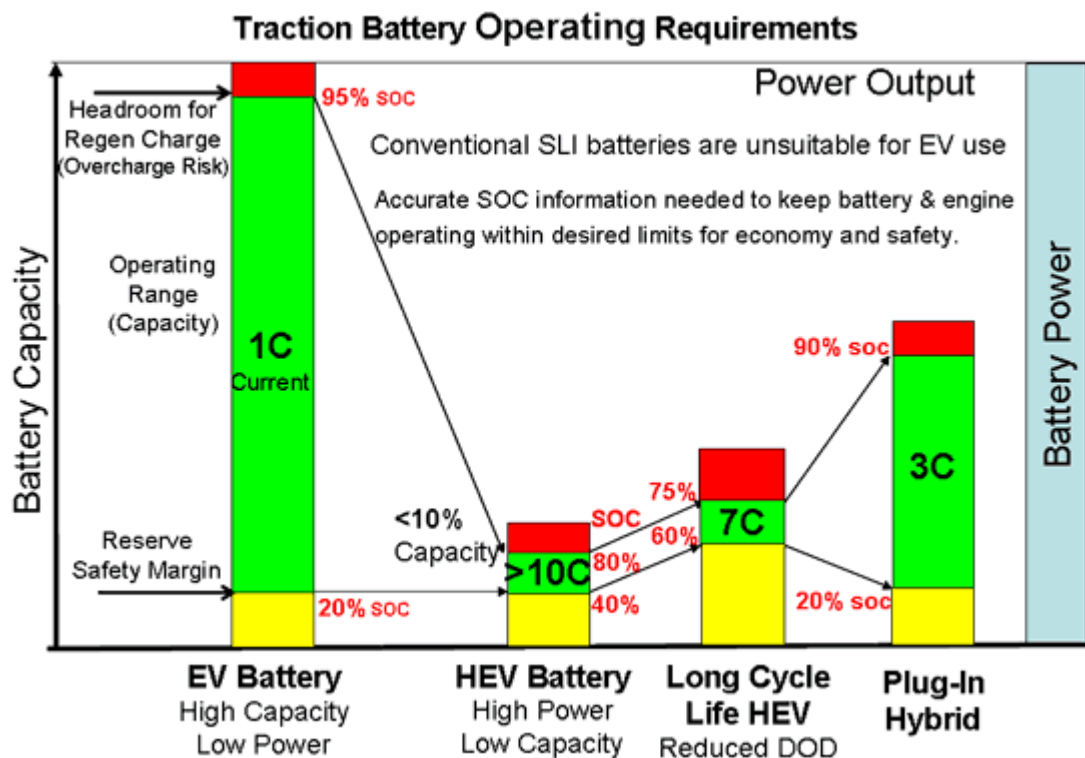
Täyssähköisissä ajoneuvoissa ja työkoneissa haasteena on saavuttaa riittävän pitkä käyttöaika suhteessa latausaikaan. Tällöin akkua täytyy voida ladata joko helposti usein tai nopeasti tai akun energiakapasiteetin täytyy olla riittävän suuri. Tyypillinen akkujen purkausvirta on noin 1–4 C, latausvirta generaattorilla jarrutettaessa noin 1 C, ja normaalissa sähköverkosta latauksessa käytetään alle 1 C virtaa. Akkukäyttöisen sähköajoneuvon akun SOC-ikkuna noin 20–95 %.

Hybridiajoneuvoissa ei akulta vaadita suurta energiakapasiteettia, mutta sen täytyy antaa ja vastaanottaa suhteellisen suuria tehoja hetkellisesti. Akkujen purkaus- ja latausvirta voi olla yli 10 C ja SOC-ikkuna noin 40–80 %.

Ladattavat hybridisovellukset ovat todennäköisesti yleistymässä, koska niissä voidaan nykytekniikalla yhdistää sähköauton vähäpäästöisyys ja edulliset käyttökustannukset pitkään toimintasäteeseen ilman pakollista lataamista. Akulta vaaditaan kohtalaista energiakapasiteettia ja tehoa, mutta lisäteho tai pidempi toiminta-aika voidaan toteuttaa polttomoottorilla tai esimerkiksi polttokennolla. Akkujen purkausvirta on noin 2–6 C ja latausvirta generaattorilla jarrutettaessa noin 1–2 C. Akkukäytössä ladattavan hybridi-

ajoneuvon akun varaustila laskee noin 90:stä 30 prosenttiin ja pysyy noin 20–40 % tasolla hybridikäytössä.

Kuvio 7 havainnollistaa neljän eri akkutyypin vaatimukset omissa sovelluksissaan, joissa akulta vaaditaan yhtä suuri teho. Tätä kuvaa oikeanpuoleinen pylväs ”Battery Power”. Olkoon teho tässä esimerkissä 50 kW. Silloin vasemmanpuoleinen pylväs ”Battery Capacity”. Olkoon teho tässä esimerkissä 50 kW. Silloin vasemmanpuoleinen pylväs on akkukäyttöisen auton noin 50 kWh akku, joka ladataan verkosta 95 % varaustasoon ja puretaan ajamalla alimmillaan 20 % varaustasoon enimmillään noin 1 C virralla. Toinen pylväs on hybridauton 4 kWh akku, jota ladataan ja puretaan ajon aikana 40–80 % välillä jopa yli 10 C virralla. Kolmas pylväs on hybridauton 7 kWh akku, jota ladataan ja puretaan ajon aikana 60–75 % välillä enintään noin 7 C virralla, jolloin se kestää pienemmän virran ja pienemmän purkaussyvyyden käyttämisen ansiosta pidempään, kuin 4 kWh akku. Neljäs pylväs on ladattavan hybridauton 16 kWh akku, joka ladataan verkosta 90 % varaustasoon ja jota ladataan ja puretaan ajon aikana 90 % ja 20 % välillä enimmillään noin 3 C virralla.



KUVIO 7. Akkujen SOC-käyttöalueet (Traction Batteries...)

4 AJONEUVOAKKUJEN TESTAUSTARPEET

eStorage-tutkimuksessa kävi ilmi, että eniten tutkimustarpeita liittyy kokonaisuun akkupaketteihin ja ajoneuvoihin. Tutkimuksen mukaan akkupaketteja halutaan testata irrallaan ajoneuvosta, jotta voidaan todeta niiden toimivuus itsenäisenä tuotteena. Akkupaketteja halutaan testata myös ajoneuvon kytkettynä, jotta voidaan todeta niiden toimivuus osana kokonaisuutta. Toisaalta ajoneuvojen tutkimuksessa ja kehityksessä pidetään tärkeänä mahdollisuutta testata ajoneuvoa ideaalisella tai akkua simuloivalla virtalähteellä. Näin voidaan mitata akulta vaaditut suoritusarvot ja testata itse ajoneuvoa ilman akun mahdollisesti aiheuttamia rajoitteita. (eStorage 2011, 14–15) Tällainen akun ja ajoneuvon erillinen testaaminen paljastaa mahdolliset ristiriitaisuudet järjestelmässä.

Seuraavaksi eniten tarpeita ja kiinnostusta liittyy eri akkutyypin materiaaleihin, valmistustekniikkaan ja sähkökemian, koska erilaisiin sovelluksiin täytyy valita sopiva akkutyypin ja mitoittaa akun koko oikein (eStorage 2011, 15). Näitä ominaisuuksia on luontevaa tutkia ensin kennotasolla ja sen jälkeen selvittää, miten sopivista kennoista muodostetut moduulit ja akkupaketit toimivat.

4.1 Testattavat yksiköt

Tehdyn selvityksen perusteella testausta täytyy tehdä sekä kenno-, moduuli- että akkupakettitasolla. Kennovalmistajat esittelevät tuotteidensa teknisiä tietoja julkisesti verkkosivuillaan ja esitteissä, joten niistä saadaan melko vaivattomasti tietoa testilaitteiston mitoittamiseksi. Akkukennoja valmistetaan standardikokoisina sylinterimäisinä ja lisäksi ajoneuvoakuissa yleensä käytettyinä litteinä niin kutsuttuina prismaattisina tai pussikennoina, jotka ovat kapasiteetiltaan ja teholtaan suurempia kuin sylinterikennot. Esimerkiksi Altairnano, European Batteries ja A123 valmistavat 20–50 Ah pussimaisia litiumionikennoja, joiden paksuus on 7–13 mm ja leveys sekä pituus noin 16 - 26 cm. Kennojen luvataan kestävän hetkellisesti 160–360 A purkausvirtoja ja jopa 300 A latausvirtoja. (50 Amp Hour Cell; A123 amp20 data sheet; EB 45 Ah)

European Batteries valmistaa kennoistaan 12,8–76,8 V moduuleja, joiden leveys on 170 mm, korkeus 317 mm ja pituus 172–556 mm. Niiden suurimmat sallitut jatkuvat purkuvirrat ovat 45–360 A ja latausvirrat 22,5–180 A. Hetkellisesti niitä saa kuormittaa 160–1280 A virroilla.

Kokonaisista akkupaketeista on saatavilla henkilöautojen osalta muun muassa taulukon 4 mukaisia tietoja (Menahem 2010, 61, 63; Nissan Leaf First Responder's Guide, 9). Lähivuosina kehitettävien uusien autojen akut ovat tuskin merkittävästi suorituskykyisempiä, mutta jo kymmenessä vuodessa voi tapahtua huomattavaa kehitystä.

TAULUKKO 4. Ajoneuvojen akkupakettien tietoja

Auto, jossa käytössä	Mitat cm	Paino kg	Jännite V	Kapasiteetti kWh	Max teho kW
Mitsubishi i-MiEV	140 x 70 x 20	200	330	16	60
Chevrolet Volt / Opel Ampera	84x163	190	370	16	110
Tesla Roadster		450	366	53	225
Nissan Leaf	157x119x26,5	294	403	24	80

4.2 Testattavat ominaisuudet

Erityyppisissä sähköajoneuvoissa akut altistuvat huomattavasti toisistaan poikkeaville kuormituksille. Tämä on huomioitu akkujen suunnittelussa ja valmistuksessa siten, että hybrideissä käytetään teho-optimoituja ja ladattavissa sähköautoissa energiaoptimoituja akkuja. Siksi onkin järkevintä ja hyödyllisintä testata akkuja sillä kuormituksella, joka vastaa profiililtaan mahdollisimman hyvin niiden käyttötarkoitusta ja johon ne on todennäköisesti myös suunniteltu. Etukäteen ei voida tietää kaikkia testejä, joita akuille halutaan tehdä, mutta laitteiston suunnittelun lähtökohtana on mahdollisuus pystyä testaamaan akkuja myös niiden äärirajoilla.

Litiumioniakut vaikuttavat tällä hetkellä kiinnostavimmalta akkutyypiltä, joten niiden testaamiseksi on laadittu ja ollaan laatimassa ISO-standardeja. Kun tunnetaan eri akkukemioiden ominaisuudet, testausmenetelmiä voidaan soveltaa myös muihin akkutyyppeihin. Testauslaitteisto kannattaa suunnitella ja rakentaa niin, että sillä pystytään tekemään ainakin standardin mukaiset testit.

4.2.1 Sähkö- ja hybridihenkilöautot

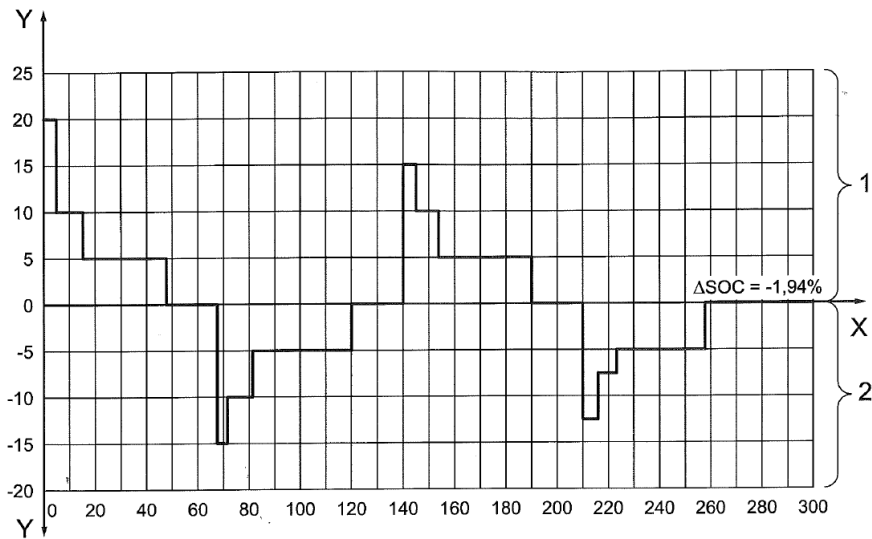
ISO 12405-1 määrittelee erityisesti ajoneuvokäyttöön kehitettyjen teho-optimoitujen ja vielä luonnosasteella oleva ISO 12405-2 energiaoptimoitujen litiumioniakkujen testausmenetelmät, joilla varmistetaan akkujärjestelmän vastaavan autoteollisuuden tarpeisiin. Standardeissa määritellään ennen testausta tehtävät valmistelevat syklit, joilla on tarkoitus varmistaa akkujen yhdenvertainen alkutila sekä varsinaiset testausyykliä, joilla mitataan akun

- energia ja kapasiteetti eri lämpötiloissa ja eri virroilla
- teho ja sisäinen resistanssi eri lämpötiloissa ja varaustiloissa
- itsepurkautuvuus kuormittamattomana ja varastoituna
- suurin käynnistysvirta
- hyötysuhde
- kestoikä
- kosteuden, lämpötilamuutosten, värinän ja iskujen sietokyky.

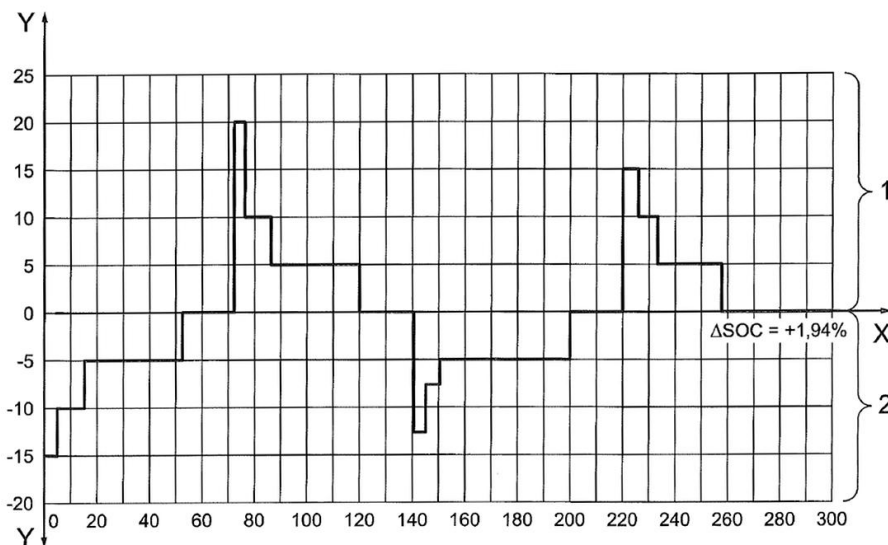
Standardi sisältää myös ohjeet akkujen väärinkäyttötesteille, joilla tutkitaan oikosulku-, ylilataus- ja syväpurkaussuojausten toimivuutta.

Esimerkiksi kapasiteettimittauksessa akkua ladataan ja puretaan eri virroilla huoneen lämpötilan lisäksi 40 °C, 0 °C ja -18 °C lämpötiloissa. Testin aikana ladatut ja puretut energiamäärät tallennetaan. Kylmä- ja kuumakäynnistyskokeissa akku jäädytetään -30 °C lämpötilaan tai lämmitetään 50 °C lämpötilaan, ellei valmistaja rajoita sitä alemmaksi ja akkua kuormitetaan kyseisessä lämpötilassa maksimiteholla.

ISO 12405-1 syklikestotestissä akkua kuormitetaan huoneenlämmössä toistuvalla kuvion 8 mukaisella purkua ja latausta sisältävällä mikrotyklillä niin pitkään, että varaustila laskee 80:sta 30 prosenttiin. Sitten akkua kuormitetaan toistuvalla kuvion 9 mukaisella mikrotyklillä niin pitkään, että varaustila nousee jälleen 30:sta 80 prosenttiin

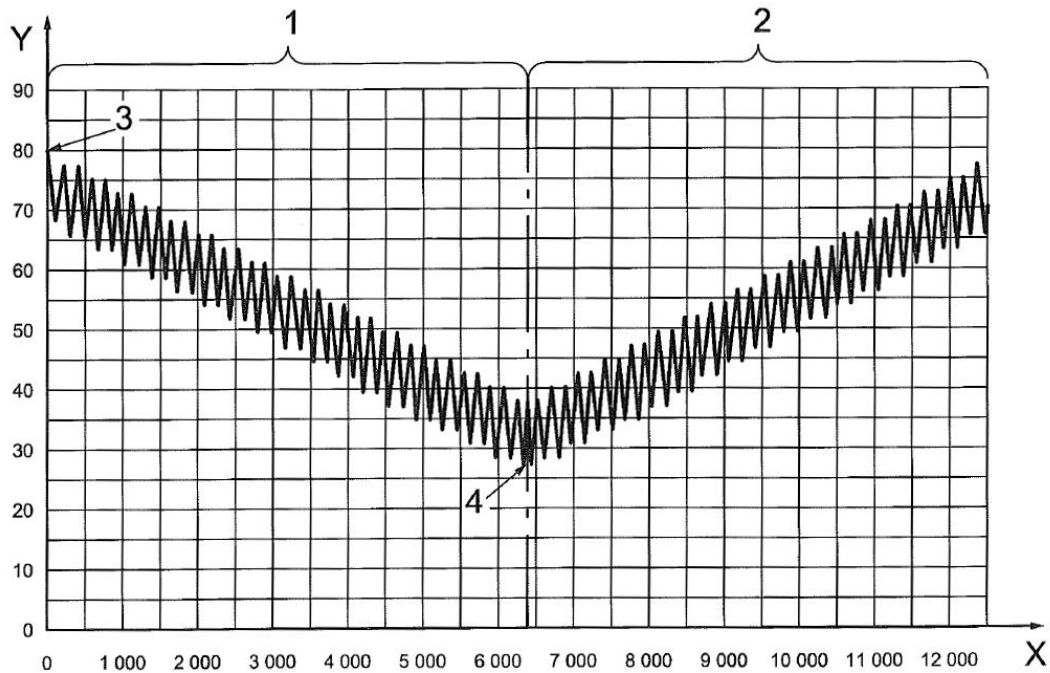


KUVIO 8. Varausta heikentävä kestoprofiili. X-akselilla on aika sekunteina ja Y-akselilla akun virta, jonka positiivinen suunta on akusta kuormaan (ISO 12405-1, 33)



KUVIO 9. Varausta lisäävä kestoprofiili. Akselit ovat kuten kuviossa 8. (ISO 12405-1, 34)

Kuvio 10 esittää akun varaustilaa useasta mikrosyklistä koostuvan yhden testijakson aikana. Jakson osassa 1 toistetaan varausta heikentävää ja osassa 2 varausta lisäävää mikrosykliä. Tätä testijaksoa toistetaan niin kauan, kunnes määritelty raja akun ominaisuuksien heikkenemisessä saavutetaan. Testauksessa käytetään enintään 20 C purkuvirtaa ja 15 C latausvirtaa, mikä tarkoittaa esimerkiksi A123:n valmistaman 20 Ah kennon tapauksessa 300–400 A virtoja ja noin 1–1,2 kW tehoja kennotasolla ja 100 kW tehoa 5 kWh akkupaketitasolla. Syklikestoprofiilin suorittamiseen kuluu aikaa useita viikkoja akun kestävydestä riippuen.



KUVIO 10. Kestotestin jakso. X-kselillä on aika ja Y-akselilla akun varaustila. (ISO 12405-1, 35)

ISO 12405-2 sisältää kaksi kestoestisykliä, jotka mallintavat erityyppisiä käyttötarkoituksia. Toinen mallintaa puhtaasti akkukäyttöisen ja toinen EREV-sähköauton tai ladattavan hybridin akun kuormitusta. Yleisesti energiaoptimoitujen akkujen testisykleissä käytetään hetkellisesti enintään akkuvalmistajan määrittelemiä maksimivirtoja tai 2C virtoja. Toisaalta nämä akut ovat yleensä kapasiteetiltaan suurempia, joten käytettävät tehot ovat samaa luokkaa.

4.2.2 Hyötyajoneuvot

Nykyisissä hyötyajoneuvojen sähkö- ja hybridisovelluksissa käytettävät akut on koottu samankaltaisista kennoista kuin sähkö- ja hybridihenkilöautoissa käytetään. Kuten henkilöautoissakin, akut suunnitellaan ja valmistetaan sovelluskohtaisesti vastaamaan vaadittua kuormitusprofiilia ja kestämaan ympäristöolosuhteet, joille ne käytön aikana altistuvat. Tehot ja kapasiteetti sekä fyysinen koko voivat olla suurempia, kuin kevyissä ajoneuvoissa, mutta käytetystä akkukemiasta ja kuormitusprofiilista johtuvat vaikutukset akun ominaisuuksiin ovat vastaavia.

Ajoneuvon rakenteesta riippuen akkupaketin hinta suhteessa koko ajoneuvon hintaan ei välttämättä ole yhtä suuri kuin henkilöautoissa, joten akun ei aina odoteta kestävän koko ajoneuvon käyttöikä, vaan se voidaan vaihtaa. Toisaalta ajoneuvolle saattaa kertyä jo yhden vuoden aikana tuhansia käyttötunteja ja sen myötä akulle tuhansia syklejä. Sovellusmahdollisuuksien laajuudesta johtuen hyötyajoneuvojen akkujen ominaisuuksille ei ole yhtenäisiä vaatimuksia ja tavoitteita, vaan suunnittelukriteerit riippuvat valmistajasta.

Sähköisten hyötyajoneuvojen työsykleistä tai sähköisesti toteutettavien toimintojen kuormitussykleistä on niukasti tietoa ja sitä tarvittaisiin lisää energiavarastojen tutkimiseksi ja kehittämiseksi. Hyötyajoneuvojen akkujen testaamisessa käytettävistä kuormitussykleistä joudutaankin todennäköisesti sopimaan tapauskohtaisesti ajoneuvovalmistajien kanssa. Hyötyajoneuvosektorilla on kuitenkin potentiaalia koneiden sähköistämiseksi ja hybridijärjestelmien asentamiselle. Esimerkiksi erilaisissa nostureissa ja muissa työkoneissa, jotka nostavat ja laskevat paljon taakkoja, hybridijärjestelmä voi parantaa energiatehokkuutta: laskuvaiheessa jarrutustehoa ei syötetä jarruvastukseen, vaan ladataan akkuun tai superkondensaattoriin, josta energia saadaan sähkömoottorille seuraavan taakan nostamiseksi.

Työkoneiden hybriditekniikkaa on jo käytössä muun muassa Japanissa, missä GS Yuasa on toimittanut 30 Ah Li-ion-akkumoduuleista koostuvat akkupaketit 60 satamakonttulukkiin, joissa kontteja laskettaessa otetaan jarrutusenergiaa talteen akkuihin ja nostovaiheessa syötetään virtaa akuista sähkömoottoreille. Akkujen nimellisjännite on 518–576 V ja ne kestävät 20 C purku- ja latausvirtaa, joka vastaa 310–345 kW tehoa. Hybridijärjestelmän myötä polttomoottoreiden kokoa on voitu pienentää 67 % ja polttoaineen kulutus on pienentynyt 60 % verrattuna perinteisiin lukkeihin sekä sen myötä myös päästöt huomattavasti. (Yamaguchi & Murphy 2012)

Testauslaitteisto rakennetaan toiminnallisuudeltaan sellaiseksi, että sillä pystytään tekemään ainakin ISO 12405 -standardien mukaiset testit sähkö- ja hybridihenkilöautojen akustoille. Silloin laitteistoon voidaan vapaasti ohjelmoida muitakin testisyklejä tarpeen mukaan. Laitteiston teho puolestaan mitoitetaan siten, että se suoriutuu myös hyötyajoneuvosovellukseen suunnitellun akuston testauksesta.

5 AJONEUVOAKKUJEN TESTAUSLAITTEISTO

5.1 Laitteistolta halutut ominaisuudet

Testauslaitteistolla tutkitaan niin yksittäisiä kennoja, niistä koostuvia moduuleja kuin kokonaisia akkupakettejakin, joten laitteistoon kannattaa sisällyttää omat testerit kenno-, moduuli- ja pakettitestaukseen. Akkupakettien testaukseen soveltuva testerit on niin suuritehoinen, että sen on järkevää syöttää akusta purettu sähköteho takaisin verkkoon. Pienempien testerien tapauksessa päästään valmistajien mukaan parempaan tarkkuuteen ja edullisempaan hankintahintaan, kun kuormana toimiva tehoelektroniikka kuluttaa akusta purettua energiaa lämmöksi. Tarvittava jäähdytysteho on silloin kuitenkin useita kilowatteja, joten tarvitaan vesijäähdytystä siirtämään ylimääräinen lämpö pois laboratoriohuoneesta.

Testereiden täytyy olla tietokoneohjattuja, jotta haluttu testisykli voidaan ohjelmoida etukäteen ja suorittaa automaattisesti, mikä on edellytys syklin riittävän tarkalle noudattamiselle. Mittaustulokset täytyy voida kerätä tietokoneella automaattisesti riittävän luotettavuuden ja tarkkuuden saavuttamiseksi. Koska akkumoduuleissa ja -paketeissa on akunhallintajärjestelmä, testerit täytyy voida liittää sen tietojärjestelmään. Yleensä käytetään CAN-väylää.

Testien suorittaminen vaihtelevissa olosuhteissa vaatii laitteistolta lämpötilasäädetyt testausilat kennoille, moduuleille ja akkupaketeille. Kennoille ja moduuleille sopivia kammioita on saatavissa valmiina ja ne mahtuvat laboratoriohuoneeseen, mutta akkupaketit on käytännöllisintä sijoittaa testauksen ajaksi tätä tarkoitusta varten rakennettavaan konttiin, joka sijoitetaan ulos rakennuksen seinustalle. Kontin ominaisuuksia ja varustelua käsitellään tarkemmin omissa kappaleissaan.

Akkupakettitesterin ja testauskontin sijoittaminen VTT:n olemassa olevan ajoneuvodynamometrin läheisyyteen mahdollistaa ajoneuvon käyttämisen sähköenergiavaraston kuormitukseen ja toisaalta ajoneuvon testauksen testerin avulla sähköenergiavarastosta riippumatta. Tärinän, iskujen ja muun mekaanisen rasituksen kesto ei ole tarpeen testata sähköisen testauksen yhteydessä, vaan mekaaniset testit voidaan suorittaa muissa tiloissa olevilla laitteilla.

5.2 Laitteiston sähköiset vaatimukset

Laitteistolla pitää pystyä lataamaan ja purkamaan akkuja vähintään samoilla tehoilla, joille akku altistuu ollessaan ajoneuvoon asennettuna. Yksittäisten kennojen jännite on akkutyypistä riippuen noin 1–4 V ja suurin sallittu virta voi olla tehokkaimmilla kennoilla 300–400 A tai jopa enemmän. Toisaalta pienempiä kennoja testattaessa voi olla tarpeen tehdä tarkkoja mittauksia alle 1 A virroilla.

Akkumoduulien nimellisjännitteet ja sallitut virrat voivat vaihdella paljonkin. Käytännössä moduulitesterin jännitealueen tulisi alkaa jo kennotasolta, eli alle kennotesterin maksimijännitteen, jotta laitteiston toiminta-alue jatkuisi jännitteen osalta saumattomasti. Suurimman jännitteen voidaan moduuleissa olettaa olevan noin 100 V eli alle pienisjännitteen ylärajan, joka on 120 V. Akkumoduulit, joissa on rinnankytkettyjä kennoja, pystyvät luovuttamaan ja ottamaan vastaan suurempia virtoja kuin yksittäiset kennot, mutta merkittävästi suurempia jatkuvia virtoja tuskin käytetään tulevaisuudessaan vaadittavien johdinten poikkipinta-alojen vuoksi, joten 600 A maksimivirran voidaan katsoa olevan riittävä.

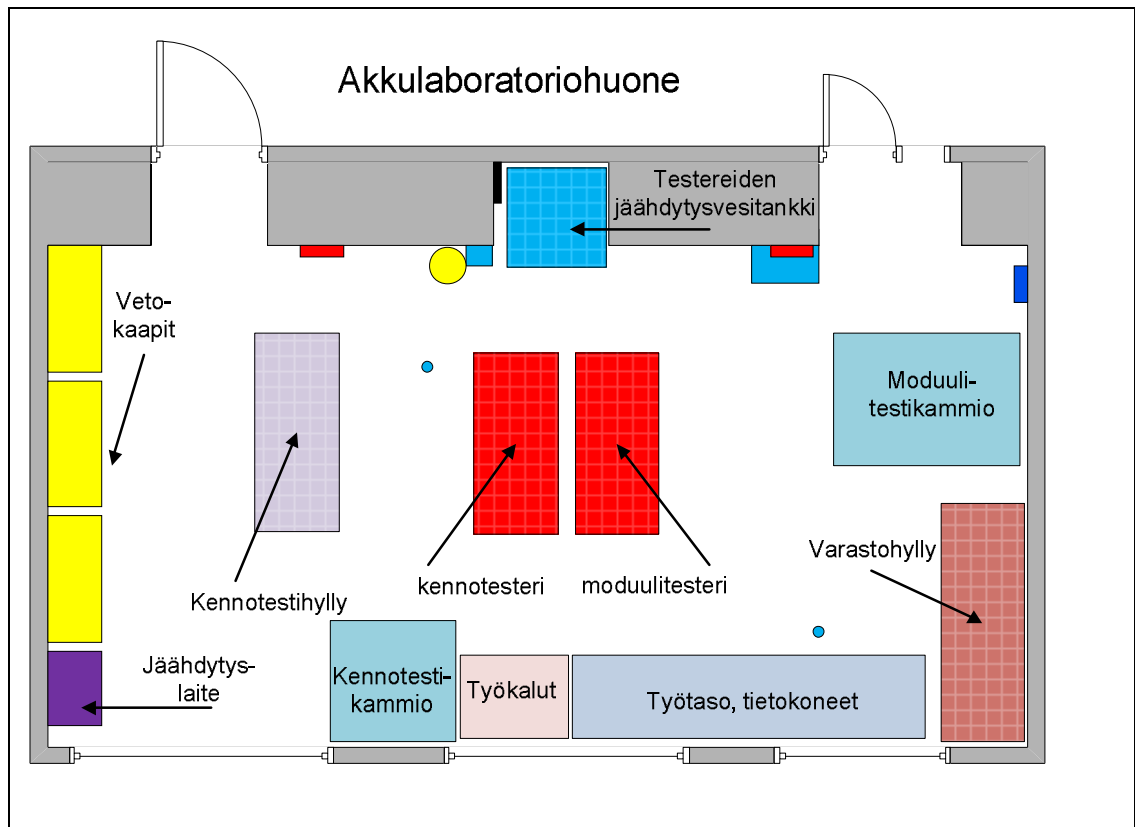
Nykyisten akkupakettien nimellisjännite on muutamia satoja voltteja ja saattaa tulevissa versioissa olla jonkin verran korkeampi, mutta todennäköisesti jatkossakin ajoneuvoissa käytetään alle 1000 V järjestelmiä. Myös akkupakettitasolla 600 A maksimivirran voidaan katsoa olevan riittävä. Noin 300 kW maksimiteho riittää nykyisten tiedossa olevien akkujen ja ajoneuvojen testaamiseen. Akkupakettitesteriä on tarkoitus käyttää akkustauksen lisäksi myös ajoneuvotestaukseen, jolloin se toimii testattavan ajoneuvon akun tilalla sähkölähteenä simuloiden akun toimintaa.

5.3 Hankittava testauslaitteisto ja sen sijoittelu

5.3.1 Yleistä

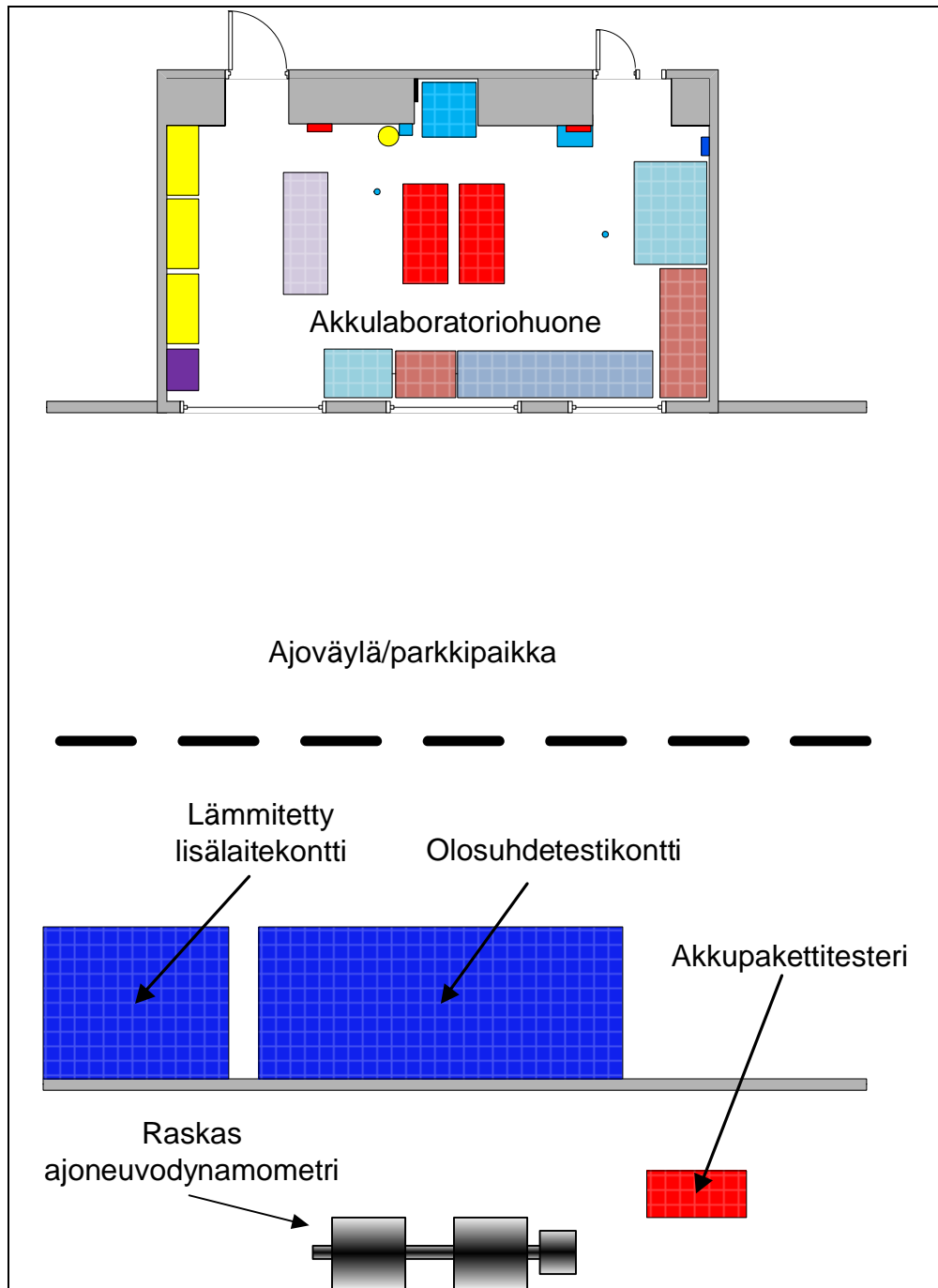
Sähköiseen testaukseen käytettävät laitteet sijoitetaan vierekkäisiin rakennuksiin sekä näiden väliin kuvioden 11 ja 12 mukaisesti. Asetettujen vaatimusten täyttämiseksi laitteistoon täytyy sisältyä erilliset testerit kenno-, moduuli- ja akkupakettitestausta varten. Kennojen ja moduulien testaus tapahtuu rakennuksen 1 laboratoriohuoneessa, jonne

sijoitetaan kenno- ja moduulitesterit ja yksi tai kaksi pientä lämpötilakaappia. Akkupakettien testaus tapahtuu testerillä, joka asennetaan rakennukseen 2 dynamometrin läheisyyteen. Sinne voidaan järjestää testerin vaatima sähkönsyöttö ja siellä se palvelee myös sähköajoneuvojen dynamometritestausta. Ulos rakennuksen seinustalle sijoitetaan lämpötilasäädetty kontti, jossa akkupaketit ovat testauksen aikana. Dynamometrit kevyiden ja raskaiden ajoneuvojen testausta varten ovat jo olemassa ja niitä voidaan käyttää osana testauslaitteistoa.



KUVIO 11. Akkulaboratorion laitesijoittelu

Akkututkimuskäyttöön saatu huone on jo aiemmin varusteltu laboratoriokäyttöön ja olemassa olevia kalusteita voidaan hyödyntää tässäkin käytössä. Tilassa on esimerkiksi testereiden jäähdytykseen tarvittava vesikierto ja mahdollisesti tarvittavien laboratorio-kaasujen liitännät valmiina. Kennoja ja pieniä moduuleja voidaan tutkia myös vetokaapeissa, joihin voidaan sijoittaa alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä valmistetut ja läpinäkyvällä luukulla varustetut kammiot sellaisia testejä varten, joissa kennojen tuhoutuminen on todennäköistä. Kammioiden voidaan järjestää myös tyyppihuuhtelu ja vetokaapeista saadaan ohjattua tuuletus suoraan ulkoilmaan seinässä olevan kanavan kautta.



KUVIO 12. Testauslaitteiston sijoittelu

Kuvion 12 mukaisesti sijoiteltuna laitteet muodostavat suhteellisen kompaktin kokonaisuuden. Tarvittaessa myös akkulaboratoriohuoneeseen voidaan vetää testauskaapelit akkupakettitesteriltä ja sillä suoritettavaa testausta pystytään ohjaamaan lähiverkon kautta akkulaboratoriohuoneesta.

5.3.2 Akkupakettitesteri

Akkupakettitesteriksi hankitaan laite, jonka maksimijännite on 1000 V, virta-alue +/- 600 A ja maksimiteho 320 kW. Testerit toimii kaksisuuntaisena ohjelmoitavana tasavirtalähteenä ja syöttää akusta puretun tai ajoneuvon jarrutuksessa generoiman sähkön takaisin verkkoon. Testerin yhteydessä hankitaan testattavan akun ja ajoneuvon läheisyyteen sijoitettavat tehonjakoyksiköt, joista mitataan käytettävä virta ja jännite sekä kaapelit testerin ja tehonjakoyksiköiden välille. Testerit hallitaan omalla tietokoneellaan, joka sisältää tarvittavat ohjelmistot testerin ohjaamiseen ja mittaustietojen keräämiseen.

5.3.3 Akkukenno- ja akkumoduulitesterit

Yksittäisten kennojen testausta varten hankitaan testerit, jonka maksimijännite on 6 V ja moduulien testausta varten testerit, jonka maksimijännite on 100 V. Ne suorittaa etukäteen ohjelmoituja testisyklejä automaattisesti. Akusta purettu sähkö muutetaan lämmöksi tehoelektronikalla, joka on vesijäähdytteinen. Testereiden yhteydessä hankitaan myös tarvittavat lisälaitteet, kuten testausjohtimet ja testauskanavien rinnankytkentäyksiköt sekä testereiden käyttämiseen ja mittaustietojen keräämiseen tarvittava tietokone ohjelmistoinen. Koska testerit ovat vesijäähdytteisiä, niiden mukana hankitaan lisäksi jäähdytysvesilaitteisto, joka toimii testereiden puskurina ja siirtää lämmön kiinteistön jäähdytysvesikiertoon.

Kenno- ja moduulitesterit ovat monikanavaisia, joten niillä voidaan suorittaa yhtäaikaista usean akun testausta ja tarvittaessa suurempia virtoja kanavia voidaan kytkeä rinnakkain. Kennotesterin kunkin kanavan maksimivirta on 50 A ja maksimiteho 250 W. Kanavia voidaan kytkeä enintään 12 kpl rinnan, jolloin suurin mahdollinen testausvirta on 600 A ja teho 3 kW. Testerin suurin verkosta ottama sähköteho on 7 kW ja suurin jäähdytystehon tarve noin 8 kW.

Moduulitesterin kunkin kanavan maksimivirta on 50 A ja suurin teho 3 kW. Kanavia voidaan kytkeä enintään 12 kpl rinnan, jolloin suurin mahdollinen virta on 600 A ja teho 60 kW. Testerin suurin verkosta ottama sähköteho on 72 kW ja suurin jäähdytystehon tarve noin 36 kW.

5.3.4 Testauskammiot kennoille ja moduuleille

Vaihtelevissa lämpötiloissa suoritettavia testejä varten hankitaan alkuvaiheessa kennoille ja moduuleille yksi olosuhdetestauskammio, johon mahtuu yksi akkumoduuli tai useampi kenno hyllyjen avulla. Testauskammion tilavuus on noin 600 l ja se on sisämitoitetaan suunnilleen kuutiomainen, joten erimuotoisten moduulien ja useamman kennon pitäisi mahtua siihen vaivatta. Turvallisuusvaatimusten vuoksi kammiossa on muun muassa oven sähkölukitus, joka estää oven aukaisemisen kesken testin, liittimet inerttiä kaasuhuuhtelua varten, paloilmaisin, sammutusjärjestelmä ja ylipaineventtiili.

Lämpötila-alueen on oltava vähintään standardissa mainittu -30 – 50 °C ja käytännössä tämän vaatimuksen täyttävään kammioon saadaan -40 – 180 °C lämpötila. Testauskammion kylmäkone on mitoitettu siten, että se pystyy poistamaan kammioista vähintään 1 kW lämpökuorman koko lämpötila-alueella. Myös testauskammio on vesijähdytteinen, koska vesijähdytys on hiljainen eikä tuota ylimääräistä lämpöä laboratoriotilaan.

Huoneen lämpötilassa tehtävät testit, joissa tarkalle lämpötilan säätelylle ei ole tarvetta, suoritetaan laboratorion vetokaapeissa, joihin voidaan asentaa hyllyt useamman kennon samanaikaista testausta varten. Vetokaapeista ohjataan tuuletus suoraan ulkoilmaan laboratorihuoneessa olevan kanavan kautta.

Yhteen vetokaappiin asennetaan suojakammio sellaisia väärinkäyttötestejä varten, joissa akun mekaaninen vaurioituminen on todennäköistä. Kammio varustetaan kaasuliitännällä, jotta siihen voidaan järjestää testin ajaksi typpihuuhtelu estämään akun syttyminen. Kammiossa täytyy olla ikkuna, josta testattavaa akkua voidaan tarkkailla sekä visuaalisesti että lämpökameralla.

5.3.5 Testauskontti akkupaketeille

Akkupakettien testaamiseen vaihtelevissa lämpötiloissa tarvitaan jonkinlainen ulos sijoitettava kontti, koska riittävän suurta sääkammiota ei ole mahdollista sijoittaa sisätiloihin ja akkupakettien kuljetus sisätiloihin voi olla hankalaa. Lisäksi isojen akkupakettien testaaminen on turvallisuusriski. Akkupakettien koosta ja painosta johtuen ne pitää

mahtua nostamaan trukilla kontin sisään. Kontiksi soveltuu esimerkiksi 20 jalan eli noin 6 m kylmäkuljetusmerikontti, johon teetetään riittävän tehokas kylmäkoneisto ja lämmityslaitte sekä lämpötilaa säätävä ohjausjärjestelmä, joka pitää kontin sisälämpötilan halutussa arvossa riippumatta sen sisällä syntyvästä häviölämpötehosta ja ulkolämpötilasta. Seuraavana on kuvaus kontin oleellisimmista osakokonaisuuksista.

Jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmä

Kontin pääasiallinen tarkoitus on toimia lämpötilaohjattuna testikammiona akkupaketeille. Tätä varten siihen tarvitaan automatiikalla ohjattava jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmä, johon voidaan asettaa haluttu sisälämpötila -30 – 50 °C välillä. Jäähdytys täytyy tehdä kylmäkoneella ja lämmitykseen voidaan käyttää sähkövastuksia. Testit suoritetaan vakioämpötilassa, kun akun lämpötila on asettunut haluttuun arvoon. Standardin mukaisia lämpötiloja ovat esimerkiksi -30 °C, -18 °C, 0 °C, 25 °C, 40 °C, 45 °C ja 50 °C. Muitakin lämpötiloja tältä vaihteluväliltä halutaan todennäköisesti käyttää, joten käytännössä haluttu lämpötila täytyy pystyä asettelemaan vapaasti 1 °C välein.

Oletettu akkupaketeista aiheutuva häviölämpöteho, joka lämmittää konttia, on korkeintaan 6 – 10 kW jatkuvasti. Tämä pitää huomioida kylmäkoneen mitoituksessa. Yhtämittaisen testijakson pituus vakioämpötilassa on energiaoptimoiduilla akuilla pisimmilläänkin alle 8 tuntia, joten sulatusjaksot kaksi kertaa vuorokaudessa, jotka mahdollisesti ovat tarpeellisia kylmäkoneen toiminnalle, eivät aiheuta häiriötä mittauksiin varsinkaan, jos ne voi ajoittaa työajan ulkopuolelle. Jossain vaiheessa tehdään todennäköisesti pidempiäkin testejä pakkasessa, mutta silloin pienet lämpötilan heilahtelut voidaan hyväksyä.

Turvajärjestelmät

Sääkonttiin täytyy asentaa mahdollisen akun vikaantumisen aiheuttaman räjähdysvaarallisen tai myrkyllisen kaasupäästön varalta kaasuilmaisim, joka aktivoituessaan keskeyttää testin ja katkaisee sähkönsyötön tilassa olevilta laitteilta. Tällaisessa tilanteessa konttiin voidaan laskea inerttiä kaasua, kuten typpeä tai argonia ja se voidaan tuulettaa.

Tulipalon varalta tarvitaan automaattinen sammutusjärjestelmä, jonka voi laukaista myös manuaalisesti. Sen suunnittelu ja toteutus on asiantuntevan sammutinhuoltoyrityksen vastuualuetta. Koska kontti on melko tiivis, siinä täytyy olla ylipaineventtiili, joka päästää mahdollisen paineen hallitusti ulos.

Sähköliitännät

Kontti liitetään sähköverkkoon kumikaapelilla, joka kytketään kiinteistön seinään asennettavaan tavalliseen 3-vaihepistorasiaan, todennäköisesti 63 A. Sähkö jaetaan jäähdytys- / lämmityslaitteille, valoille, pistorasioille ym. kontin ulkoseinään asennettavan ryhmäkeskuksen kautta.

Mittausinstrumenttiliitännät ja läpiviennit

Sääkontin ja apulaitekontin välille kytketään mittausten ajaksi vaihteleva määrä johtimia, joita varten tarvitaan asialliset läpiviennit. Kun on tiedossa, minkälaisia mittaus- ja ohjauskaapeleita useimmin tarvitaan, ne kannattaa asentaa kiinteästi konttien väliin, jolloin kaapelit vain kytketään testauskontissa akkuun tai testattavasta akusta liittimeen kontin sisällä. Kontteihin kannattaa asentaa myös numeroidut kiinteästi yhteen kytketyt liitinpaneelit, joiden kautta tavalliset mittausjohtimet voidaan kytkeä konttien välille.

Valaistus ja pistorasiat

Kontissa täytyy olla valaisin mittausten valmistelutöiden tekemiseksi ja mittausten aikaisen kameravalvonnan vuoksi. Testattavasta akkupaketista saattaa sen mahdollisen mekaanisen vaurioitumisen seurauksena vapautua räjähdysriskiä kaasua, joten valaisimen tulee olla ex-luokiteltu. Silloin siltä ei tarvitse katkaista virtaa ja kameran välityksellä voidaan nähdä myös mahdollisessa vikatilanteessa, mitä kontissa tapahtuu. Pistorasioita tarvitaan apulaitteiden tarvitsemalle sähkölle ja mahdollisesti valmistelutöissä käytettäville työkaluille ja laitteille.

Valvontakamera

Testauksen aikana on hyvä nähdä, mitä kontissa tapahtuu. Siellähän ei pitäisi tapahtua mitään näkyvää, mutta jos jotain poikkeavaa tapahtuu, testaus voidaan tarvittaessa keskeyttää nopeasti ennen kuin suuria vahinkoja ehtii tapahtua. Tämä onnistuu olosuhteisiin sopivalla tallentavalla valvontakameralla, jonka kuvaa voidaan tarkastella lähiverkon välityksellä.

Jäähdytys- / lämmitysvesikierto akkupaketille

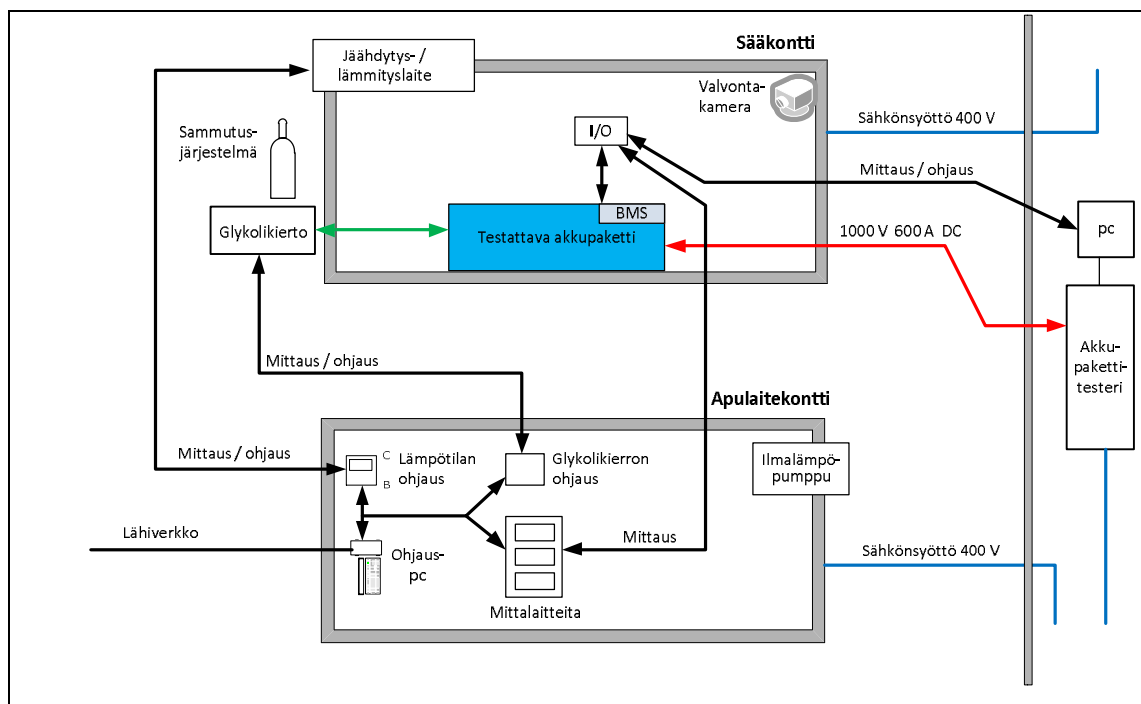
Akkupaketeissa voi olla nestekiertoinen jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmä, jota täytyy voida käyttää testauksen aikana, jotta olosuhteet vastaisivat ajoneuvoon asennettua akkupakettia. Tämän vuoksi testauskontin sisään asennetaan jäähdytysnestekierron liittynät ja ulkopuolelle jäähdytys- / lämmitysjärjestelmä oheislaitteineen. Sen täytyy pystyä syöttämään akkupaketille halutulla virtausnopeudella ja jäähdytys- tai lämmitysteholla noin 10–30 °C jäähdytysnestettä, joka on tyypillisesti vesi-glykoliliuosta. Virtausnopeuden, meno- ja paluuveden lämpötilan sekä paine-eron ja lämmitys- / jäähdytystehon mittaustieto halutaan näkyviin. Lämmitys- tai jäähdytystehon tarve on oletettavasti korkeintaan 6–10 kW jatkuvasti. Akkupaketin jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmään pyrkii pitämään akun noin 20 °C tai muussa valmistajan määrittelemässä arvossa, mutta testausjärjestelmällä täytyy pystyä simuloimaan myös liikkeellelähtöä kylmästä tai kuumasta. Jäähdytysvesikiertolaitteistolle asetetut toiminnalliset vaatimukset edellyttävät siltä ohjausta automatiikan avulla.

5.3.6 Apulaitekontti

Sääkontin viereen on tarpeen sijoittaa toinen kontti mittalaitteille ja muille apulaitteille, joita ei voi asentaa sääkonttiin ja joiden täytyy kuitenkin sijaita akkupaketin läheisyydessä. Apulaitekontin työskentelytilaan sijoitetaan myös tietokone, jolla testausta voidaan ohjata ja jonka avulla kerätään mittaustietoja. Konttien välille voidaan helposti kytkeä tarvittava määrä mittauksessa käytettäviä johtimia ja apulaitekontista mittaustiedot välitetään ulkopuolelle lähiverkon välityksellä. Tarkoituksena on hankkia mahdollisimman hyvin tarpeeseen soveltuva kontti, jota voidaan tarvittaessa parannella.

Kontti liitetään sähköverkkoon kumikaapelilla, joka kytketään kiinteistön seinään asennettavaan tavalliseen 3-vaihepistorasiaan, todennäköisesti 32 A. Sähkö jaetaan ilmalämpöpumpulle, valoille, pistorasioille ym. kontin ryhmäkeskuksen kautta. Konttiin sisältyy yleensä valaisimet ja pistorasioita, mutta niiden määriä ja paikkoja voi olla tarpeen muuttaa myöhemmin. Asennuksissa kannattaa huomioida helppo laajennettavuus ja muunneltavuus jälkikäteen. Mittauskaapelointi asennetaan testauskontin kaltaisesti.

Apulaitekontissa on oltava ulkolämpötilasta riippumatta sopiva lämpötila elektronisten laitteiden ja työskentelyn kannalta. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi ilmalämpöpumpun avulla. Lämmityksen toimivuus kannattaa varmistaa sähköpattereilla. Kontissa on myös tarkoitus säilyttää mittauskytkentöjen tekemisessä tarvittavia tavallisia sähkömiehen työkaluja, jännitetyökaluja, johtimia ja liittimiä, joita voidaan hankkia helposti tarpeen mukaan. Akkupakettien testaukseen käytettävän laitteiston keskeisimmät laitteet ja niiden väliset yhteydet on havainnollistettu kuviossa 13.



KUVIO 13. Akkupakettien testauslaitteiston lohkokaavio

5.3.7 Mittalaitteet ja tarvikkeet

Akkupakettitesterin toimitukseen sisältyy dc-kaapelit testeriltä tehonjakoyksiköille, mutta niiltä testattavalle akulle tai ajoneuvolle menevät johtimet pitää hankkia erikseen. Tehokkaita akkuja testattaessa voidaan joutua käyttämään testerin suurimpia purku- ja latausvirtoja, jolloin kytkentäkaapelilta vaaditaan 600 A virtakestoisuus ja lisäksi kaapelin nimellisjännitteen on oltava vähintään 1000 V. Tähän käyttöön soveltuu esimerkiksi 2 x ATON H07RN-F 1x300 tai vastaava kaapeli. Testattavissa akuissa ja ajoneuvoissa käytettävien liittimien tyypit täytyy selvittää valmistajilta aina tapauskohtaisesti ja hankkia liittimet tarpeen mukaan. Tavoitteena on kerätä kaikki mittausdata testereiden I/O-yksiköiden kautta, mutta todellisuudessa tarvitaan ehkä muitakin mittalaitteita, jotka voidaan hankkia tarpeen mukaan.

5.4 Kiinteistötekniikkaan liittyvät vaatimukset

Testilaitteistolla käsitellään kohtuullisen suuria tehoja, joten sen vaatima kiinteistötekniikka täytyy kartoittaa ja tarpeen mukaan vahvistaa. Taulukossa 5 on tarkasteltu testauslaitteiston tarpeita ja olemassa olevaa kiinteistötekniikkaa. Testauslaitteiston tarvitsemat uudet sähkönsyötöt toteutetaan kiinteistöjen sähkösuunnittelusta vastaavien yritysten toimesta.

TAULUKKO 5. Kiinteistötekniikan päivitystarve

	Laite	Teho	Päivitystarve
Sähkönsyöttö rakennus 2	Akkupakettitesteri	400 V / 320 kW / 600 A	Uusi syöttö PK1
	Sääkontti	400 V / 20 kW / 32 A	Uusi syöttö PK2
	Apulaitekontti	400 V / 20 kW / 32 A	Uusi syöttö PK2
Sähkönsyöttö rakennus 1	Kennotesteri	400 V / 19 kW / 32 A	Tilaan tulee syöttö kytkimelle.
	Moduulitesteri	400 V / 75 kW / 125 A	Uusi syöttö
	Lämpötilatestauskammiot	400 V / 16 A 1–2 kpl	Tilassa on pistorasioita.
Jäähdytysvesikierto rakennus 2	Testereiden jäähdytysvesitankki ja lämpötilatestauskammiot		Tilassa on riittävän tehokas jäähdytysvesikierto.

Testauslaitteisto sisältää arvokkaita laitteita ja testattavat akutkin ovat arvokkaita, joten myös murtovalvontalaitteistoon on kiinnitettävä huomiota. Kenno- ja moduulitestauslaitteistot ovat lukitussa ja valvotussa rakennuksessa, mutta kontit ovat ulkotiloissa, joten niihin täytyy asentaa lukitus ja valvontalaitteet, sekä mahdollisesti valvontakamera tarkkailemaan niitä ulkopuolelta.

5.5 Turvajärjestelmät ja sähkötyöturvallisuus

Akkutestauslaboratorion suunnittelussa, rakentamisessa ja käytössä tulee huomioida ainakin sähköisten testauslaitteistojen asennusta ja käyttöä koskeva standardi SFS-EN 50191 sekä sähkötyöturvallisuusstandardi SFS 6002 ja akkupakettitestauslaitteiston osalta myös laboratorioden täydentävät vaatimukset SFS 6000-8-803. Standardeissa mainittujen sähköturvallisuusnäkökulmien lisäksi on huomioitava akkujen mahdollisesta vikaantumisesta aiheutuvat vaaratekijät. Akuista voi purkautua esimerkiksi vetyä ja häkää ja ne voivat jopa syttyä räjähdysmäisesti tuleen, joten laboratorihuoneessa ja sääkontissa täytyy olla kaasu- ja paloilmaisimet sekä sääkontissa automaattinen sammuusjärjestelmä. Testattavaa akkua ei voi tehdä jännitteettömäksi, mutta testausvirtapiirin voi katkaista virrattomaksi.

Kennojen ja moduulien testauksessa on käytössä alle 120 V tasajännite eli pienoisjännite. Tehokkaita akkuja käsiteltäessä on silti pidettävä mielessä, että jo kennotasolta lähtien oikosulkuilanteessa virta voi olla jopa satoja ampeereja. Mittauskytkennässä voidaan käyttää sulaketta. Sulakesuojaus ei pienennä oikosulkuvirtaa, mutta katkaisee sen tarvittaessa. Akkukennojen navat ovat aina jännitteiset eikä moduuleissa tai akkupaketeissakaan välttämättä ole katkaisijaa, jolla niiden navat voisi tehdä jännitteettömiksi. Siksi mittauskytkentöjä joudutaan tekemään jännitteisinä ja jännitetyömääräykset on otettava huomioon. Kun akku kytketään testeriin, on huolehdittava siitä, että testausvirtapiiri on avoin.

6 POHDINTA

Kappaleessa 5 esitellyllä laitteistolla voidaan suorittaa monipuolisia testejä eri kokoluokkien sähköenergiavarastoille kenno-, moduuli- ja pakettitasolla. Sillä voidaan testata erilaisten sähköenergiavarastojen tärkeimpiä ominaisuuksia todellista käyttöä vastaavalla kuormitusprofiililla ja vaihtelevissa lämpötiloissa. Nämä ominaisuudet olivat sähköajoneuvojen ja niiden akkujen tutkimuksesta kiinnostuneiden tahojen toiveena, kun testaustarpeita kartoitettiin eSTORAGE-projektissa. Laitteiston voidaan todeta täyttävän toiminnallisuutensa ja suorituskykynsä osalta sille asetetut vaatimukset.

Testereihin voidaan ohjelmoida haluttu testisykli etukäteen ja määritellä aloitus- ja lopetus-kriteerit. Itse testaus tiedonkeruineen tapahtuu automaattisesti ja testeri myös valvoo jatkuvasti testin aikana testattavan yksikön tilaa. Testaus jatkuu kunnes jokin määritelty raja saavutetaan – esimerkiksi aika, syklimäärä, tai muutos akun kapasiteetissa. Varsinkin akkumoduulien ja -pakettien testauksessa yksikön lämpötilaa ja kennojännitteitä mitataan useasta paikasta. Jos jokin mittausarvo ylittää turvalliseksi määritellyt rajat, testi keskeytyy automaattisesti, ellei tarkoituksena ole selvittää, mitä poikkeavassa tilanteessa tapahtuu.

Laitteistomäärittely sisältää testauksessa tarvittavat laitteet, mutta lisäksi testausjärjestelyn muodostamiseen tarvitaan johtimia, liittimiä ja muita pienempiä tarvikkeita, joita ei voida määritellä ennen kuin tiedetään, minkälaista akkua ollaan testaamassa. Akkujen valmistajilta tarvitaan testien toteuttamiseksi lisätietoja myös muun muassa akkumoduulien ja -pakettien BMS:n toiminnasta ja siihen kytkeytymiseen vaadittavista liittimistä ja ohjelmista.

Testausympäristöä voidaan sen kykyjen puitteissa käyttää sähköajoneuvojen akkujen testauksen lisäksi muidenkin sähkövarastojen ja teholähteiden testaamiseen. Mahdollista olisi testata esimerkiksi varavoima-akkuja, käynnistysakkuja ja polttokennoja. Myös monien muiden tasajännitteellä toimivien ja laitteiston toiminta-alueelle osuvien teho-komponenttien testaaminen olisi mahdollista. Eräs mielenkiintoinen sovellus on sähköautojen käytettyjen akkujen uusiokäyttö paikallisenergiavarastoina.

Sähköautokäytössä energia- ja tehotehiys ovat tärkeitä ominaisuuksia, mutta paikallisakkujen koko ja paino saavat olla suurempiakin. Vajaakuntoisina sähköautoista poistetut litiumioniakut voivat vielä olla hyvinkin ominaisuuksiltaan uusia lyijyakkuja parempia tai ainakin yhtä hyviä ja siten täysin riittäviä paikallisakkukäyttöön. ABB, 4R Energy, Nissan North America ja Sumimoto Corporation of America arvioivat yhteistyössä Nissan Leafissa käytettyjen litiumioniakkujen käyttöä energiavarastona sähköjakelujärjestelmässä. Ideana on yli 50 kWh paikallisakkupaketti, joka tasaisi sähköverkon kuormitusta ja toimisi varavoimanlähteenä sähkökatkon aikana. (Nissan Leafien vanhat akut... 2012) Testauslaitteisto soveltuisi hyvin myös mittaamaan sähköajoneuvokäytöstä poistettujen akkujen toimivuutta ja soveltuvuutta muihin tarkoituksiin.

Tämän työn valmistuttua sähköajoneuvoakkujen tutkimuslaboratorion perustaminen jatkuu käytännön toimilla, kuten laite- ja tarvikkehankinnoilla sekä tilojen ja kiinteistötekniikan valmistelulla. Laitteiston vaatimuksiin ei ole tehty merkittäviä muutoksia tämän työn edetessä, joten laitteiston määrittely on voinut jatkua pääpiirteittäin alkuperäisten lähtökohtien mukaan. Laitteistosuunnitelma ei ole vielä piirustuksia myöten valmis, vaan joitakin yksityiskohtia on vielä tarkennettava, jotta tiedetään, miten haluttu laite toteutetaan. Muun muassa akkupakettien testauskontin suunnittelu jatkuu vielä tarkemmalla tasolla ennen kuin sitä voidaan alkaa rakentaa. Lisäksi laboratoriossa tarvitaan testaustoiminnan aloittamiseksi muitakin laitteita, kalusteita ja tarvikkeita kuin tässä työssä esiteltyt. Tällainen tarkka suunnittelu on nyt mahdollista, koska laitteisto on onnistuneesti määritelty toiminnallisuutensa ja ominaisuuksiensa puolesta.

LÄHTEET

1997 Peugeot 106 Electric. Luettu 30.1.2012.
<http://www.evalbum.com/659>

2011 Nissan Leaf Road Test Specs. Luettu 8.2.2012.
<http://www.edmunds.com/nissan/leaf/2011/road-test-specs2.html>

2012 Toyota Prius Plug-in Hybrid Performance and Specs. Luettu 9.2.2012
<http://www.toyota.com/prius-plug-in/specs.html>

50 Amp Hour Cell. 2009. Altairnano.

A123 amp20 data sheet. 2011. A123 Systems.

Alternate Battery Systems. Luettu 21.2.2012.
http://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems

Anderman, Menahem. 2010. The Plug-In Hybrid and Electric Vehicle Opportunity Report. Advanced Automotive Batteries.

EB 45 Ah. 2012. European Batteries Oy

eStorage. Sähköajoneuvojen energiavarastot. Loppuraportti 31.5.2011. VTT ja Aaltoyliopisto.

EU officials test hydrogen fuel cell car. Luettu 19.3.2012.
<http://www.thegreencarwebsite.co.uk/blog/index.php/2011/10/04/eu-officials-test-hydrogen-fuel-cell-car/>

European Batteries esite. Ladattu 27.1.2012
http://www.europeanbatteries.com/content/download/403/2573/file/EB_brochure_2011_EN.pdf

Explore i-MiEVMY11. Luettu 8.2.2012.
<http://www.mitsubishi.fi/explores.aspx?id=12789#/Suorituskyky/Tekniikka/Lataus>

Fisker Automotive signs battery supply agreement with A123 systems. Luettu 10.2.2012.
<http://fiskerofrochester.com/fisker-automotive-signs-battery-supply-agreement-with-a123-systems/>

Fortum ja Nissan kehittivät latausyksikön kotikäyttöön. Luettu 2.2.2012.
<http://www.tekniikkatalous.fi/autot/fortum+ja+nissan+kehittivat+latausyksikon+kotikayttoon/a769447>.

General Motors EV1. Luettu 30.1.2012
http://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1

Hybrid Car Statistics. Luettu 15.3.2012.

<http://www.all-electric-vehicles.com/hybrid-car-statistics.html>

Hybridibussin säästö riippuu kuskista. Luettu 2.2.2012.

http://yle.fi/alueet/turku/2011/12/hybridibussin_saasto_riippuu_kuskista_3105036.html

Hybrids under the hood part 1. Luettu 8.2.2012.

<http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood.html>

Hybrids under the hood part 2. Luettu 8.2.2012.

<http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood-2.html>

ISO 12405-1:2011. Electrically propelled road vehicles—Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems—Part 1: High power application

Lead Acid Batteries. Luettu 6.2.2012.

<http://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>

Lead-acid battery. Luettu 6.2.2012.

http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid_battery

Maxwell 125V modules datasheet. Tulostettu 27.1.2012.

http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/DATASHEET_BMOD0063_1014696.PDF

Mercedes-Benz B-sarjan F-CELL. Luettu 19.3.2012.

http://www.autokanta.com/autopokkari/tekniikka_ja_koeajot/?x139047=3580253

Mitsubishi Chooses Super-Efficient Toshiba SCiB Battery For EVs. Luettu 8.2.2012.

<http://integrityexports.com/2011/06/18/mitsubishi-chooses-toshiba-scib-battery-for-evs/>

Nickel-metal hydride battery. Luettu 6.2.2012.

http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel-metal_hydride_battery

Nissan Leaf First Responder's Guide, Ladattu 24.2.2012

<http://www.nissan-techinfo.com/refgh0v/og/FRG/2011-Nissan-LEAF-FRG.pdf>

Nissan Leaf tulee Suomeen ja maksaa 40800 euroa. Luettu 1.2.2012.

<http://tekniikanmaailma.fi/uutiset/nissan-leaf-tulee-suomeen-ja-maksaa-40-800-euroa>.

Nissan Leafien vanhat akut energiavarastoiksi. Luettu 2.2.2012.

<http://www.tekniikkatalous.fi/autot/nissan+leafien+vanhat+akut+energiavarastoiksi/a768236>.

Nuottimäki Jukka. Henkilöautoliikenteen energiatehokkuuden parantaminen käyttäjälähtöisin toimin EFFICARUSE. TransEco seminaari 3.11.2011.

Nuottimäki Jukka. sähköpostiviesti. 22.3.2012.

Saft Wins Order for Innovative Hybrid Tram Batteries for the City of Nice.

Luettu 9.2.2012.

<http://www.nema.org/media/ind/20051025a.cfm>

The 200,000-mile question: How does the Toyota Prius hold up? 16.2.2011.Luettu 21.2.2012.

<http://news.consumerreports.org/cars/2011/02/200000-mile-toyota-prius-still-performs.html>

Tulevaisuus myynnissä. 2011. Tekniikan Maailma 14/2011, 26.

Turha teho pois dieselmoottorista. 2012. Tekniikka & Talous 27.1.2012, 20

Volvo FE Hybrid. Luettu 3.2.2012

<http://www.volvotrucks.com/trucks/global/en-gb/trucks/new-trucks/Pages/volvo-fe-hybrid.aspx>

Vuorilehto K. 2010. Kai Vuorilehdon akkuserivitys FIMAlle, toinen versio, syyskuu 2010. Helsinki.

Yamaguchi M & Murphy, E. Large format Lithium-ion Battery systems for Mobility and Stationary applications. Advanced Automotive Battery Conference 6.–10.2.2012. Orlando.

Zebra Batteries. Luettu 6.2.2012.

<http://www.mpoweruk.com/zebra.htm>