



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Timo Tenhunen

Korkeajänniteakkujen turvallisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

21.5.2020

Tekijä Otsikko	Timo Tenhunen Korkeajänniteakkujen turvallisuus
Sivumäärä Aika	31 sivua 21.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pasi Kovanen
<p>Tässä insinööriyössä tarkastellaan korkeajänniteakkujen turvallisuuteen liittyviä asioita. Tavoitteena on selvittää Suomen lainsäädännön vaatimukset korjaamoille ja mekaniikoille sekä se, mitä akkukemioita on nykypäivän sähkö- ja hybridi ajoneuvoissa ja mitä tapahtuu mahdollisissa vikatilanteissa. Lisäksi kuvataan korkeajänniteakkujen hallinta- ja turvajärjestelmän toimintoja ja lopuksi akkupakettien huoltamiseen liittyviä asioita ja niihin liittyviä vaaratekijöitä.</p> <p>Selvityksessä on perehdytty sähkö- ja hybridi ajoneuvojen huoltamiseen liittyvään lainsäädäntöön, kirjallisuusaineistoon ja ajoneuvon valmistajien julkaisemiin ohjeistuksiin.</p> <p>Selvityksessä havaittiin, että työntekijöiden sähköturvallisuuteen liittyvät lainsäädäntö ja ajoneuvovalmistajien ohjeet ohjeistavat työntekijöitä suorittamaan asennus- ja korjaustyöt turvallisesti. Poikkeamat työnsuorituksessa voivat aiheuttaa vaaratilanteita työnsuorittajalle ja ympärillä oleville työntekijöille. Tämän selvityksen perusteella voidaan todeta, että sähkö- ja hybridi ajoneuvojen käyttäminen on yhtä turvallista kuin polttomoottorilla varustettu ajoneuvon.</p>	
Avainsanat	Korkeajänniteakku, turvallisuus, litiumioniakku

Author Title	Timo Tenhunen Safety of High Voltage Batteries
Number of Pages Date	31 pages 21 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pasi Kovanen, Senior Lecturer
<p>This thesis deals with issues related to high voltage battery safety. The objective was to find out the Finnish legislation requirements for workshops and mechanics, what battery chemistries are used in modern electric and hybrid vehicles, and what happens in possible malfunction situations. In addition, the control and safety functions of high voltage batteries are described and finally, issues related to maintenance of the battery packs and risk factors connected to them are discussed.</p> <p>The thesis examines legislation related to maintenance of electric and hybrid vehicles, literature and instructions published by vehicle manufacturers.</p> <p>It was noticed that the legislation and the instructions of the vehicle manufacturers related to the electrical safety of the workers guide the workers to perform the installation and repair work safely. Workers who do not follow these instructions may face risk situations and may cause risks to other workers working in their vicinity. Based on this thesis it seems that it is possible to state that electric and hybrid vehicles are as safe to use as vehicles equipped with a combustion engine.</p>	
Keywords	High voltage battery, safety, lithium battery

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hybridi- ja sähköajoneuvojen korjaus ja lainsäädäntö	1
2.1	Korjaamon vaatimukset	1
2.2	Mekaanikon vaatimukset	5
3	Akkukemiat	6
3.1	Vanhemmat akkukemiat ajoneuvoissa	6
3.2	Akkukemiat uusimmissa henkilöautoissa	6
3.2.1	LMO	8
3.2.2	NMC	9
3.2.3	LFP	10
3.2.4	NCA	11
3.2.5	LTO	11
3.3	Reaktiot vikatilanteessa	12
3.4	Palamisreaktio	15
4	Akustojen turva- ja hallintajärjestelmät (BMS)	16
4.1	Toimintaperiaatteet	16
4.2	Suojatoiminnot	18
5	Korkeajänniteakkujen huoltaminen	19
5.1	Määräaikaishuollot ja vikadiagnoosi	19
5.2	Akkupaketin, -moduulien ja -kennojen vaihtaminen	20
5.3	Korkeajänniteakkujärjestelmän sisäiset komponentit	22
5.3.1	Pääsulake	22
5.3.2	Kontaktorit	23
5.3.3	Liittimet ja johtosarjat	24
5.3.4	Esilatausvirtapiiri	25
5.4	Vaaratekijät	26

5.4.1	Sähkö	26
5.4.2	Kemikaalit	27
5.4.3	Lämpötila	27
6	Yhteenveto	28
	Lähteet	29

Lyhenteet

AKL = Autoalan Keskusliitto

BMS = Battery Management System (akkuhallintajärjestelmä)

LMO = Litium-mangaanioksidi

NMC = Nikkelimangaani-kobolttioksidi

LFP = Litium-rautafostaatti

NCA = Litium-nikkelikoboltti-alumiinioksidi

LTO = Litium-titanaatti

NiMH = Nikkelimetallihydridi

SEI = Solid Electrolyte Interface

SOC = State of Charge (varaustaso)

1 Johdanto

Sähkö- ja hybridi ajoneuvot ovat yleistyneet Suomessa viime vuosina, ja maailmassa ollaan siirtymässä polttomoottorista kohti sähköisiä voimajärjestelmiä ajoneuvoissa. Vuonna 2015 rekisteröidyistä henkilöautoista 243 oli täyssähköajoneuvoja ja erilaisia hybridi ajoneuvoja 3 261. Vuonna 2019 rekisteröitiin 1 897 täyssähköajoneuvoa ja erilaisia hybridi ajoneuvoja 21 538. (1) Siksi on hyvä perehtyä sähkö- ja hybridi ajoneuvojen korkeajänniteakkujen turvallisuuteen ja siihen, mitä toimilaitteita ne pitävät sisällään.

Tässä insinööriyössä kuvataan, mitä lainsäädännöllisiä vaatimuksia korjaamoilla on näiden ajoneuvojen kanssa toimiessa ja mitä mekaanikolta vaaditaan työn suorittamiseen. Lisäksi tarkastellaan erilaisia akkukemioita ja niiden eroavaisuuksia suorituskäytössä sekä kuvataan, millaisia reaktioita tapahtuu akun kennoissa mahdollisissa vikatilanteissa. Tämän jälkeen käsitellään akkujen hallinta- ja turvajärjestelmiä ja lopuksi vielä korkeajänniteakkujärjestelmän huoltamiseen liittyviä asioita. Tarkoituksena on selvittää, mitä on sähkö- ja hybridi ajoneuvoa huoltavan mekaanikon huomioitava ja ketkä kaikki saavat kyseisiä ajoneuvoja korjata.

2 Hybridi- ja sähköajoneuvojen korjaus ja lainsäädäntö

2.1 Korjaamon vaatimukset

Vuonna 2017 astui voimaan uusi sähköturvallisuuslaki 16.12.2016/1135, jossa muutettiin tieliikennekäyttöön soveltuvien ajoneuvojen voimajärjestelmien sähkötöiden vaatimuksia. Uuden sähköturvallisuuslain mukaan sähkötöistä ei tarvitse enää tehdä urakointi-ilmoitusta Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle (Tukes), joka lain 55 §:ssä (Sähkötöiden tekemisen edellytykset) momentissa 4 mainitaan. Tämän takia ei myöskään työpaikalla tarvitse olla sähkötöiden johtajaa. (2) Sähköturvallisuuslain 55 §:ssä edellytetään:

Toiminnanharjoittaja saa tehdä sähkötyötä seuraavilla edellytyksillä:

1) töitä johtamaan on nimetty henkilö, jolla on riittävä kelpoisuus (sähkötöiden johtaja);

- 2) itsenäisesti töitä suorittavalla ja valvovalla henkilöllä on riittävä kelpoisuus tai muuten riittävä ammattitaito;
- 3) toiminnanharjoittajan käytössä on töiden tekemisen kannalta tarpeelliset työvälineet sekä sähköturvallisuutta koskevat säännökset;
- 4) toiminnasta on tehty ilmoitus sähköturvallisuusviranomaiselle ennen kuin sähkötöitä koskeva toiminta aloitetaan.

Edellä 1 momentin 4 kohdassa tarkoitettussa ilmoituksessa on selvitettävä, että 1 momentissa ja 58 §:ssä asetetut vaatimukset täyttyvät. Ilmoituksesta on käytävä ilmi sähkötöiden johtajan suostumus tehtäväänsä. Ilmoituksessa on myös mainittava rekisteriin merkitsemistä varten 86 §:n 2 momentin 1–3 kohdassa tarkoitettut tiedot. Rekisteriin merkittyjen tietojen muutoksista on kuukauden kuluessa ilmoitettava kirjallisesti sähköturvallisuusviranomaiselle. Ilmoituksen voi tehdä myös sähköisesti. (2)

Sähköturvallisuuslain 56 §:ssä (Sähkötöiden tekemisen edellytyksiä koskevat poikkeukset) on eroteltuna poikkeuksena tieliikennekäyttöön soveltuvat sähköajoneuvot, ja sen perusteella sähkö- ja hybridiajoneuvojen parissa työskennellessä voidaan poiketa lain 55 §:ssä olevista edellytyksistä. (2) Kokonaisuudessaan lain 56 § kuuluu seuraavasti:

Edellä 55 §:ssä säädetyistä vaatimuksista voidaan poiketa:

- 1) tieliikennekäyttöön soveltuvan sähköajoneuvon voimajärjestelmän sähkötöissä, jos henkilö on riittävästi perehtynyt tai perehdytetty kyseisen ajoneuvomallin sähköjärjestelmään ja sähkön vaaroihin;
- 2) maakaapeliin asentamiseen liittyvässä osatyösuorituksessa, joka käsittää vain kaapelin laskemisen kaapeliojaan ja sen peittämisen tai aurauksen, jos työn tekijä täyttää 73 §:ssä säädetyt vaatimukset ja työtä ohjaa ja valvoo 55 §:ssä säädetyt edellytykset täyttävä toiminnanharjoittaja, joka myös vastaa maakaapeli-asennuksen kokonaisuudesta;
- 3) sellaisessa vähäisessä kertaluonteisessa sähkötyössä, jonka tekijällä on 66–71 §:ssä tarkoitettu kyseisen työn tekemiseen oikeuttava pätevyystodistus;
- 4) tilapäisen sähkölaitteiston rakentamisessa opetustarkoituksessa, jos työ tehdään sähköalan oppilaitosten laboratoriotiloissa ja työtä ohjaa ja valvoo 73 §:ssä tarkoitettu sähköalan ammattihenkilö;
- 5) sähkötyössä, jonka tekee 73 §:ssä tarkoitettu sähköalan ammattihenkilö ja joka kohdistuu tämän omassa tai lähisukulaisen hallinnassa olevan asunnon tai asuinrakennuksen sähkölaitteistoon; tällaisella ammattihenkilöllä tulee olla kelpoisuudesta pätevyysarviointilaitoksen antama todistus ja tällaiselle työlle tulee teettää varmennustarkastus vähäisiä töitä lukuun ottamatta.

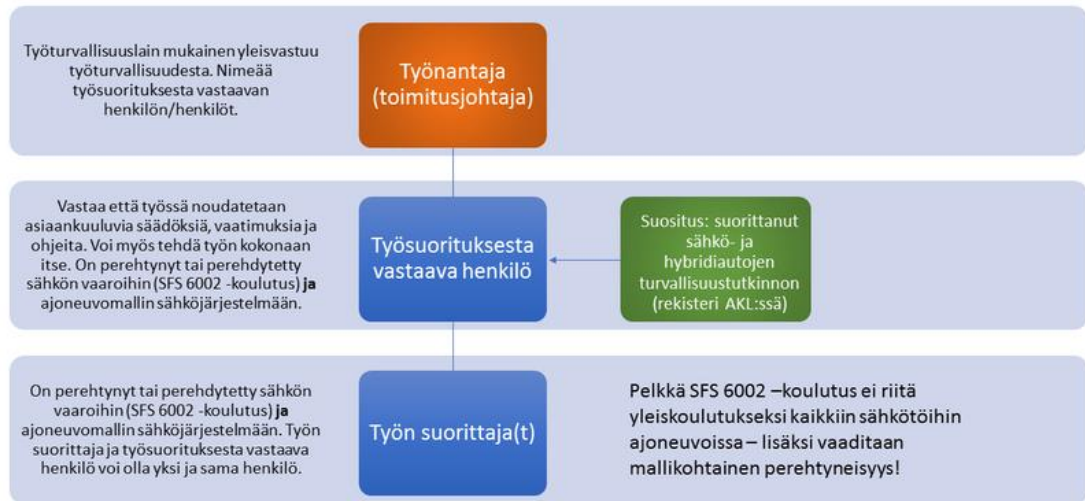
Edellä 55 §:ssä säädetyistä vaatimuksista voidaan lisäksi poiketa seuraavissa maallikkotöissä:

- 1) enintään 250 voltin nimellisjännitteisten asennusrasioiden peitekansien irrotus ja kiinnitys, yksivaiheisten pistotulppien, liitosjohtojen, jatkojohtojen ja sisustusvalaisimien asennus-, korjaus- ja huoltotyöt sekä näihin rinnastettavat työt;
- 2) nimellisjännitteeltään enintään 50 voltin vaihtojännitteisiin tai 120 voltin tasajännitteisiin laitteistoihin kohdistuvat sähkötyöt;
- 3) omaan käyttöön rakennettujen sähkölaitteiden korjaaminen, jos tämä liittyy sähköalan harrastustoimintaan.

Valtioneuvoston asetuksella säädetään tarkemmin 1 ja 2 momentissa tarkoitettuja sähkötöistä ja töiden kohteista. (2)

Sähkötyöturvallisuusstandardi SFS 6002:n (3, s. 11) mukaan työnantajan on nimettävä työsuorituksesta vastaava henkilö, joka vastaa toiminnallisesta työstä sähkötöitä tehdessä. Vastuuhenkilön on varmistettava, että työssä noudatetaan asiaankuuluvia vaatimuksia, säädöksiä ja ohjeita. Tällä henkilöllä ei tarvitse olla sähköturvallisuuslakiin kirjattuja pätevyyskatsastuksia, mutta hänellä täytyy olla riittävät sähköalan perustiedot ja kokemus. Tällä tarkoitetaan, että hän tuntee sähköajoneuvojen sähköjärjestelmien erityispiirteet ja niihin liittyvät vaaratekijät. AKL:n, eli Autoalan Keskusliiton (4) mukaan nimeämisen voi tehdä esimerkiksi työmääräimeen ja pääasia on, että aina on selvää, kuka vastaa ajoneuvossa tehtävästä sähkötyöstä. Kuvassa 1 on AKL:n kuvaus vastuualueista sähköajoneuvonkorjauksessa.

Vastuut sähköajoneuvokorjauksessa



Kuva 1. Vastuualueiden jaottelu (4)

Kun korjaamalla suoritetaan korkeajännitejärjestelmään korjaustoimenpiteitä, on ajoneuvon ympärys eristettävä lippusiimalla ja ilmoitettava varoituskylteillä jännitetyöstä. Tällöin muut työntekijät tietävät, että eristetylle alueelle ei saa mennä. Työnantajan vastuulla on, että kyseiset alueen eristystä tarvittavat välineet ja muutkin suojavälineet ovat saatavilla ja tarvittaessa hankittava puuttuvat työvälineet, jotta työ on turvallista suorittaa. (4) Tämä on mainittuna standardin SFS 6002:2015 + A1:2018 julkaistussa liitteessä U (Sähköajoneuvoja koskevat vaatimukset) kohdassa U.2 Kilvet ja ohjeet. Kokonaisuudessaan standardin liitteen vaatimukset ovat seuraavat:

Mikäli sähköajoneuvossa tehdään sähkötyötä, on ajoneuvo merkittävä selkeästi esimerkiksi lippusiimalla ja vaarallisesta jännitteestä kertovalla varoituskilvellä, joka sijoitetaan näkyvään paikkaan esimerkiksi ajoneuvon katolle.

Korjaamotila ja työntekijöiden sosiaalitila on varustettava ensiapuohjetaululla. Korjaamotilan kaikki henkilökulkutiet on varustettava vaarallisesta jännitteestä varoitavilla kilvillä sekä pääsy asiattomilta kielletty-maininnalla.

Sähkö- tai hybridi ajoneuvoja huollettaessa ja korjattaessa on työntekijällä aina oltava käytettävissä ajoneuvomallikohtaiset huolto/korjausohjeet, jotka sisältävät ohjeet ajoneuvon jännitteettömäksi tekemiseksi. (5)

2.2 Mekaanikon vaatimukset

Sähköturvallisuuslaki edellyttää mekaniikoilta, jotka työskentelevät ajoneuvojen korkeajännitejärjestelmien parissa tiettyjä asioita. Lain 56 §:n (sähkötöiden tekemisedellytyksiä koskevat poikkeukset) kohdalla mainitaan:

Edellä 55 §:ssä säädetyistä vaatimuksista voidaan poiketa:

1) tieliikennekäyttöön soveltuvan sähköajoneuvon voimajärjestelmän sähkötöissä, jos henkilö on riittävästi perehtynyt tai perehdytetty kyseisen ajoneuvomallin sähköjärjestelmään ja sähkön vaaroihin; (2).

Sähkötyöturvallisuusstandardin SFS 6002:2015 + A1:2018 liitteessä U mainitaan sähkö- ja hybridi-ajoneuvojen parissa työskentelystä seuraavaa:

Sähköturvallisuuslain mukaan tieliikennekäyttöön soveltuvan sähköajoneuvon voimajärjestelmän sähkötöissä ei vaadita sähkötöiden johtajaa, jos työn suorittaja on riittävästi perehtynyt tai perehdytetty kyseisen ajoneuvomallin sähköjärjestelmään ja sähkön vaaroihin. Työn tekijän on tällöin huolehdittava työnaikaisesta sähköturvallisuudesta, ks. asetus sähkötyöstä ja käyttötyöstä (1435/2016). (5)

Näillä edellä mainituilla asioilla tarkoitetaan sitä, että sähkö- tai hybridi-ajoneuvon parissa työskentelevä henkilö on täytynyt käydä perehdytyskoulutus kyseiseen ajoneuvoon, jotta hän saa suorittaa korjaustoimenpiteitä korkeajännitejärjestelmään. Lisäksi mekaanikon vaatimuksia ovat sähkötyöturvallisuuskurssin eli SFS 6002:n ja ensiapukoulutuksen suorittaminen. Molemmat ovat voimassa määräaikaaisesti ja niiden on oltava voimassa, kun suoritetaan töitä korkeajännitejärjestelmille. Koulutuksesta SFS 6002:2015 + A1:2018 liitteessä U kohdassa U.3 Henkilöstön koulutus mainitaan seuraavaa:

Hybridi- ja sähköajoneuvoja korjattaessa tämän standardin mukainen sähkötyöturvallisuuskoulutus soveltuvin osin ja tarvittava ajoneuvomallia koskeva koulutus, on annettava kaikille ajoneuvon huolto- ja korjaustoimenpiteitä tekeville.

Ne korjaamohallissa työskentelevät, jotka eivät osallistu sähköajoneuvojen huolto- ja korjaustöihin, eivät tarvitse varsinaista sähkötyöturvallisuuskoulutusta. Heille riittää perehdytys sähkön vaaroihin ja toimintaan onnettomuustilanteessa. (5)

Ajoneuvon määräaikaishuollot, 12/24 voltin järjestelmän sähkötyöt ja korikorjaukset eivät edellytä mekaanikolta sähkövoimajärjestelmään perehtymistä. Korikorjauksissa ehtona on kuitenkin se, että korkeajännitejärjestelmä on ensin tehty jännitteettömäksi. (4)

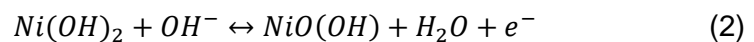
3 Akkukemiat

3.1 Vanhemmat akkukemiat ajoneuvoissa

Sähkö- ja hybridiajoneuvoihin kuuluu kaksi eri akkua, jotka toimivat eri toimialueilla ajoneuvossa. Ensimmäinen on yleisesti lyijyakku tai jokin muu pienikokoinen akku, jonka tehtävänä on ylläpitää 12 voltin järjestelmän käyttöjännitettä ja ohjainlaitteiden muistitoimintoja. Tämän takia olisi suotavaa, että ajoneuvoa ei pidetä käyttämättömänä pitkiä aikajaksoja, jottei akkuvaraus pääse tyhjenemään. Akun lataukseen hyödynnetään toisena järjestelmässä olevaa korkeajänniteakun virtaa, joka syötetään muuntimen kautta järjestelmästä ja 12 voltin akun lämpötilasta ja kunnosta riippuen noin 14 voltin jännitteellä. (6)

Ensimmäisissä hybridiajoneuvojen korkeajänniteakuissa on käytetty nikkeli-metallihydridiseosta, jossa elektrolyyttinä toimii kaliumhydroksidi, negatiivisena elektrodina metalliseokseen imeytetty vety ja positiivisena elektrodina nikkeli-happihydroksidia. NiMH-akkuja on käytetty muun muassa Toyota Priuksessa ja Honda Insightissa.

Kemialliset reaktiot negatiiviselle elektrodille ja positiiviselle elektrodille menevät seuraavalla tavalla (7):



3.2 Akkukemiat uusimmissa henkilöautoissa

Uusimmissa hybridi- ja sähköautoissa korkeajänniteakuissa käytetään litiumioniakkenoja. Litiumioniakuista on olemassa useita eri variaatioita, eli niiden akkukemiat eroavat toisistaan. Yleisimpiä litiumioniakkujen kemioita ovat seuraavat:

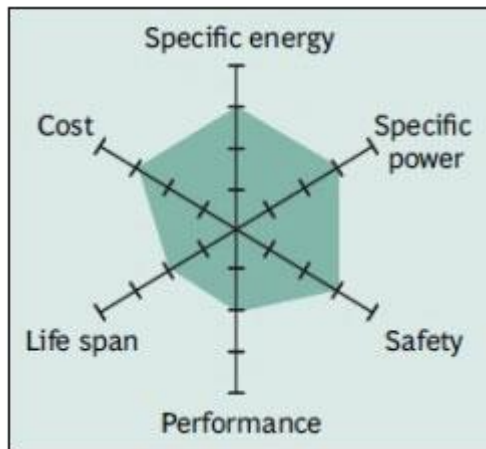
- LMO eli litium-mangaanioksidi
- NMC eli nikkelimangaani-kobolttioksidi
- LFP tai LiFePo eli litium-rautafostaatti

- NCA eli litium-nikkelikoboltti-alumiinioksidi
- LTO eli litium-titanaatti.

Jokaisella akkukemialla on omat ominaisuutensa, jotka vaikuttavat akun energiatiheyteen, tehottiheyteen, turvallisuuteen, suorituskykyyn, elinkaareen ja hintaan. Energiatiheydellä tarkoitetaan kykyä sitoa energiaa akun painon kilogrammaa kohden eli akun kapasiteettia. Tehottiheydellä tarkoitetaan puolestaan kykyä tuottaa tehoa akun painon kilogrammaa kohden. Turvallisuudella tarkoitetaan sitä, että kuinka korkeassa lämpötilassa syntyy lämpökarkaamista, joka johtaa hallitsemattomaan lämpötilan nousuun kennossa ja pahimmassa tapauksessa aiheuttaa lopuksi tulipalon. Lämpöä voi syntyä muun muassa oikosulussa, liiallisesta latauksesta tai korkeasta purkuvirrasta. Suorituskyky kuvastaa akun kykyä suoriutua erilaisissa olosuhteissa, kuten miten lämmönhallinta onnistuu kylmissä ja kuumissa olosuhteissa. Elinkaarella tarkoitetaan akun toimintakuntoisena pysymistä ajan mittaan. Tähän vaikuttaa kuinka monta lataussykliä akku kestää ja myös, miten ajan kuluessa akku vanhenee. Hinta puolestaan kuvastaa akkukennon kustannustehokkuutta. Litiumioniakuissa näitä on helppo kuvata niin sanotulla ”hämähäkkiverkko-kuvaajalla” (Spiderweb). Nämä edellä mainitut vaikuttajat ovat sijoitettu kuvaajaan ja omaavat asteikon, joka kuvastaa sitä, kuinka hyvin kyseinen akkukemia pärjää missäkin osa-alueessa. Litiumionikemioiden taulukoissa olevat spesifikaatiot ovat yleisiä arvoja ja niitä tulee tarkastella aina kennokohtaisesti. (8, s. 2–5.)

3.2.1 LMO

Ensimmäisenä tarkastellaan LMO-kennon seittikuvaajaa, joka on kuvassa 2.



Kuva 2. LMO:n seittikuvaaja (8)

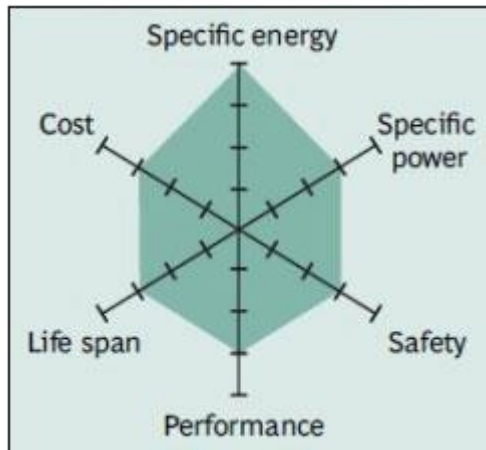
Kuvasta voidaan havaita, että LMO-akulla on keskinkertaiset ominaisuudet kaikilla osalueilla. Ainoastaan suorituskyvyssä ja elinkaareissa on pientä heikkoutta. LMO-kennoja sekoitetaan NMC-kennojen kanssa, jotta kennojen elinkaarta ja energiatiheyttä akkumoduulissa saadaan parannettua. Kennojen sekoittamisella tarkoitetaan sitä, että kennoja laitetaan samaan moduuliin eri kytkennöillä kuten sarjaan tai rinnan. Yhdistelmällä saadaan molemmissa kemioissa parhaat puolet esiin, ja sitä on käytetty muun muassa Nissan Leafissä, BMW i3:ssa ja Chevrolet Voltissa. LMO-kennojen osuus moduulissa voi olla esimerkiksi 30 %, jolloin saadaan parannusta kiihdyttämisessä, kun voidaan syöttää korkeajännitejärjestelmään suurempaa virtaa. NMC-kennoilla puolestaan voidaan kasvattaa kapasiteettia ja täten kasvattaa ajomatkaa. (9) LMO-kennon spesifikaatiot ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. LMO-kennon spesifikaatiot (9)

Jännite	Nimellisjännite 3,7 V Toimintajännite 3–4 V/kenno
Kapasiteetti	100–150 Wh/kg
Latausvirta	0,7-1 C, maksimissaan 3 C.
Purkuvirta	1 C, 30 C 5 sekunnin pulssina
Elinkaari	300–700 latausykliä (kennon purkauksen syvyys ja lämpötila vaikuttavat määrään)
Lämpökarkaaminen	250 °C

3.2.2 NMC

Kuten luvussa 3.2.1 mainittiin, NMC-kennoja käytetään LMO-kennojen parina tuomaan parhaat puolet molemmista esille. NMC-kennoja voidaan pitää yhtenä onnistuneimpana litiumioniakkukemiana, koska niillä on hyvät ominaisuudet varastoida energiaa ja myös vapauttaa sitä. (9) Kuvasta 6 nähdään NMC-kennon seittikuvaaja:



Kuva 3. NMC:n seittikuvaaja (8)

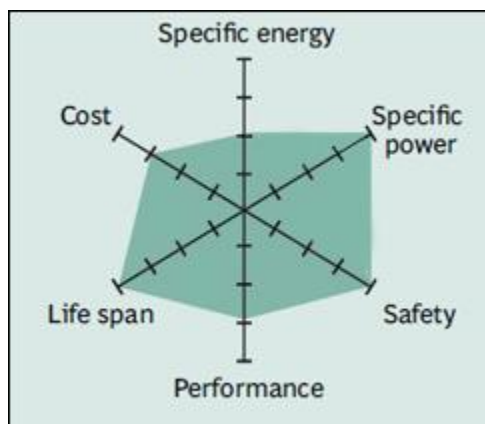
Kuten kuvaajasta näkee, niin NMC-kennolla on kaikki asteikot keskiarvoa korkeammalla. Akkukemia siis sopii hyvin sähköajoneuvoille ja lisäksi NMC-kenno lämpenee hitaimmin käytössä verrattuna muihin litiumioniakkuihin. NMC-kennoilla on mahdollista saada erilaisia ominaisuuksia riippuen sen katodin kolmen ainesosan (nikkeli, koboltti ja mangaani) sekoitussuhteesta. Yleisesti näitä sekoitetaan 1-1-1-seoksella, mutta muitakin sekoituksia kokeillaan jatkuvasti maailmalla. (9) NMC-kennon spesifikaatiot näkyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. NMC-kennon spesifikaatiot (9)

Jännite	Nimellisjännite 3,6-3,7 V Toimintajännite 3-4,2 V/kenno
Kapasiteetti	150-220 Wh/kg
Latausvirta	0,7–1 C, ladattaessa yli 1 C:n virralla lyhentää akun elinkaarta
Purkuvirta	1 C
Elinkaari	1000–2000 lataussykliä (kennon purkauksen syvyys ja lämpötila vaikuttavat määrään)
Lämpökarkaaminen	210 °C

3.2.3 LFP

LFP-kennoja käytetään yleensä hybridi- ja sähköajoneuvoissa korvaamaan perinteisiä lyijyakkuja 12 voltin järjestelmissä. LFP-kennot kestävät täyteen lataamista paremmin eivätkä kuormitu siitä niin paljon kuin muut litiumioniakkukemiat. LFP tarjoaa pienen sisäisen resistanssin ja hyvän suorituskyvyn. Pääkohtia ovat korkea virranantokyky, pitkä elinkaari, hyvä lämpötilahallinta ja turvallisuus. Jotta pystytään takaamaan kennon pitkä elinkaari, valmistusolosuhteiden on oltava erittäin puhtaat. Valmistusprosessissa suurin ongelman aiheuttaja on kosteus, joka voi kennoon päästessään pudottaa elinkaaren vai- vaiseen 50 lataussykliin. (9) Kuvassa 4 näkyy LFP-kennon seittikuvaaja.



Kuva 4. LFP:n seittikuvaaja (8)

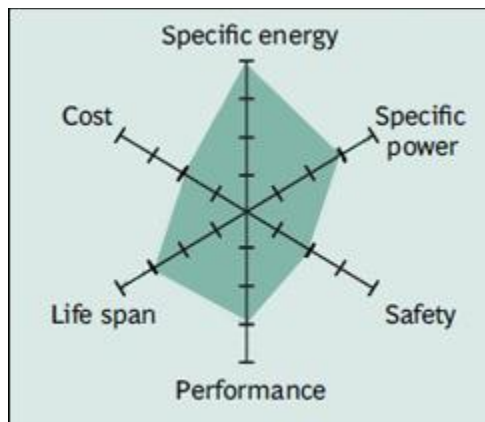
Kuten kuvaajasta näkyy, niin LFP-kenno suoriutuu turvallisuuden, elinkaaren ja tehotiheyden osalta hyvin. Energiatiheydessä jäädyään kuitenkin heikolle tasolle, joten LFP-kenno ei voi varata itseensä paljoa energiaa. LFP-kennon spesifikaatiot näkyvät taulukossa 3.

Taulukko 3. LFP-kennon spesifikaatiot (9)

Jännite	Nimellisjännite 3,3 V Toimintajännite 2,5–3,65 V/kenno
Kapasiteetti	90-120 Wh/kg
Latausvirta	1 C
Purkuvirta	1C, 25 C joillakin kennoille, 40 A 2 sekunnin pulssi
Elinkaari	2000+ lataussykliä (kennon purkauksen syvyys ja lämpötila vaikuttavat määrään)
Lämpökarkaaminen	270 °C

3.2.4 NCA

Seuraavaksi käsitellään NCA-kennoa, jonka seittikuvaaja on kuvassa 5.



Kuva 5. NCA:n spiderweb-kuvaaja (8)

NCA-kennolla on samanlaisia ominaisuuksia kuin NMC:llä: korkea energiatiheys, suhteellisen hyvä tehotehitys ja pitkä elinkaari. NCA-kennolla on kuitenkin suuret valmistuskustannukset, ja turvallisuuden osalta se on heikoilla tasolla. Pääsääntöisesti kennoja valmistaa Panasonic, ja niitä käytetään Teslan ajoneuvoissa. (9) NCA-kennon spesifikaatiot näkyvät taulukossa 4.

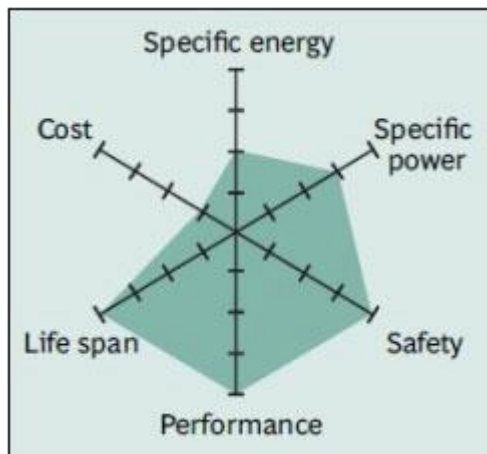
Taulukko 4. NCA-kennon spesifikaatiot (9)

Jännite	Nimellisjännite 3,6 V Toimintajännite 3–4,2 V/kenno
Kapasiteetti	200-260 Wh/kg
Latausvirta	0,7 C
Purkuvirta	1 C
Elinkaari	500 latausykliä (kennon purkauksen syvyys ja lämpötila vaikuttavat määrään)
Lämpökarkaaminen	150 °C

3.2.5 LTO

LTO-kennossa korvataan yleisesti litiumionikennoissa anodina oleva grafiitti titanaatilla. LTO-kennolla on mahdollista suorittaa pikalatausta korkeilla C-arvoilla, ja sillä on lisäksi pitkä elinkaari. Se on myös turvallinen eikä korkeissa pakkasissaan pura juuri virtaa

eikä pudota varaustasoan. LTO-kenno säilyttää 80 % varaustason -30 °C:n lämpötilassa ilman kuormitusta. (8) LTO-kennon seittikuvaaja näkyy kuvassa 6.



Kuva 6. LTO:n seittikuvaaja (8)

Kuten kuvaajasta näkyy, LTO-kennoilla on suorituskyky, turvallisuus ja elinkaari erittäin korkealla tasolla, mutta energiatiheys on pieni ja ennen kaikkea valmistuskustannukset ovat korkealla. Kennon valmistuskustannukset ovat noin 930 €/kWh. Koska kennolla on erinomainen kyky pikalataukseen, tällä akkukemialla on hyvät valmiudet ajoneuvokäyttöön. Mitsubishi i-MiEV- ja Honda Fit EV -ajoneuvoissa käytetäänkin tätä akkukemiaa. (9) LTO-kennon spesifikaatiot näkyvät taulukosta 5.

Taulukko 5. LTO-kennon spesifikaatiot (9)

Jännite	Nimellisjännite 2,4 V Toimintajännite 1,8-2,85 V/kenno
Kapasiteetti	50–80 Wh/kg
Latausvirta	1 C tyypillisesti, 5 C maksimissaan
Purkuvirta	10 C mahdollinen, 30 C 5 sekunnin pulssi
Elinkaari	3000-7000
Lämpökarkaaminen	Yksi turvallisimmista Litiumioni-akuista.

3.3 Reaktiot vikatilanteessa

Litiumioniakun vikaantuminen aiheuttaa kennon kapasiteetin laskemisen ja sisäisen resistanssin kasvamisen ja täten tuottaa ylimääräistä lämpöä toimiessaan. Vikaantumisen

voi aiheuttaa kennojen jäähdytyksen heikkous tai lataaminen tai purkaminen liian suurella tehokkuudella, joka ylittää kennon spesifikaation rajat. Ladattaessa liian suurella teholla kennon jännite saattaa ylittää toimintajännitteen. Tämän ei pitäisi olla mahdollista, mikäli BMS on varustettu suojaavilla ominaisuuksilla ja kommunikoi laturin kanssa. Jos kennon jännite kuitenkin ylittää toimintajännitteen, seurauksia on kahdenlaisia:

- Litiumkerrostuminen, jossa litiumionit eivät kykene siirtymään grafiittianodin kerroksissa vaan kerrostuvat anodin pinnalle ja muodostavat metallista litiumia ja täten vähentää vapaiden litiumionien määrää. Seurauksena on kapasiteetin lasku sekä mahdollinen oikosulku elektrodien välillä, koska litiumkerrokset eivät välttämättä ole homogeenisiä.
- Ylikuumeneminen, koska virran suuruus kasvaa.

Mikäli jännite pääsee putoamaan kennon alarajan alapuolelle esimerkiksi liiallisen kenno-
purkauksen takia, aiheuttaa se elektrodimateriaaleille seuraavia vaurioita:

- Anodien tapauksessa ensiksi anodin kuparinen kollektori liukenee elektrolyyttiin ja täten lisää kennon purkuvirtaa. Lisäksi kun jännite kennossa nousee taas alarajan yläpuolelle, kupari, joka on liuennut elektrolyyttiin, ei palaudu kollektorille vaan kiteytyy metalliksi siihen paikkaan, jossa kupari-ioni sattuu olemaan. Tämä saattaa johtaa kennon sisäiseen oikosulkuun.
- Esimerkiksi LMO-kennojen katodissa alkaa vapautumaan happea, mikäli alijännitetila jatkuu tarpeeksi kauan, mikä johtaa pysyvään kapasiteetin laskuun. Hapen vapautuminen voi myös johtaa mahdolliseen räjähdysvaaraan, mutta kennojen valmistuksessa kennonpakkaus on suunniteltu siten, että se sitoo ylimääräisen hapen itseensä, jolloin paine kennon sisällä ei pääse kasvamaan. (10)

Lämpötila vaikuttaa litiumioniakkujen toimivuuteen. Arrheniuksen yhtälön mukaan kemiallisen reaktion nopeus riippuu lämpötilasta. Sillä voidaan määrittää nopeusvakio useimmille reaktioille. Arrheniuksen yhtälö menee seuraavan kaavan mukaan:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (3)$$

jossa k on reaktionopeus, A reaktion taajuustekijä, E_a reaktion aktivoitumisenergia [kJ/mol], R yleinen kaasuvakio ja T lämpötila kelvineissä.

Suurimmassa osassa kemiallisista reaktioista E_a on huomattavasti suurempi kuin RT , joten reaktionopeus k kasvaa nopeasti T :n kasvaessa. Arrheniuksen yhtälön mukaan siis matalissa lämpötiloissa akkujen kemialliset reaktiot hidastuvat ja aiheuttavat tällöin muun

muassa akun kapasiteetin laskua väliaikaisesti, kunhan akkukkenno ei altistu jatkuvasti pakkaselle. Pakkasolosuhteissa litiumionien liike kerrosten välillä hidastuu ja ylijännitetilassa, kuten akun latauksessa, voi helposti aiheuttaa litiumkerrostumista. Liian korkeat lämpötilat puolestaan voivat aiheuttaa kennojen tuhoutumisen, Arrheniuksen yhtälön avulla voimme huomata, että lämpötilan kasvaessa akusta voidaan purkaa suurempia tehoja. Suurempi virransyöttö myös aiheuttaa korkeamman lämpötilan nousun kennossa. Lämpötilan nousu ei hallittuna ole huono asia, sillä lämpöä voidaan jäähdytysjärjestelmän avulla siirtää esimerkiksi ajoneuvon sisätiloihin talvella, jolloin lämmöntuottoon ei tarvitse käyttää erillistä lämmitysvastusta. Hallitsemattomana lämpötilan nousu voi johtaa lämpökarkaamiseen, jolloin akun kennossa sisäinen rakenne alkaa tuhoutua. (10)

Lämpökarkauksessa ensimmäisenä kennosta alkaa hajota SEI-kerros (Solid Electrolyte Interface). SEI-kerros estää kennossa anodia reagoimasta voimakkaasti elektrolyytin kanssa, eli toimii passivoivana kerroksena. SEI-kerroksen hajotessa anodi pääsee reagoimaan vapaammin elektrolyytin kanssa ja täten nopeuttaa lämpötilan nousua kennossa. SEI-kerroksen hajoaminen voi alkaa jo 80 °C:n lämpötilassa. Lämpötilan noustessa alkaa hiilipohjaisesta anodista muodostumaan hiilivetykaasuja, kuten etaania ja metaania. Hapetta ei muodostu tässä vaiheessa, koska metallioksidikatodissa ei tapahdu hajoamisreaktiota. Tämä reaktio alkaa tyypillisesti 110 °C:n lämpötilassa, mutta joidenkin elektrolyyttien kanssa reaktio voi ilmetä jo 70 °C:ssa. (10)

Kaasujen muodostuminen kennossa aiheuttaa paineen nousua kennon sisällä. Kaasut ovat lämpötilallisesti syttymispisteessä, mutta koska kennon sisällä ei ole vapaata happea, ne eivät syty palamaan. Kennot ovat varustettu ylipaineventtiilillä, jotta kennon sisäinen paine ei pääse nousemaan tavallisessa käytössä. Vikatilanteessa kaasun muodostuminen saattaa olla niin nopeaa, että venttiin ilmavirtaus ei ole riittävä ja siten aiheuttaa kennon puhkeamisen räjähdysmäisesti. Tällöin kennossa ollut hiilivetykaasu pääsee reagoimaan vapaasti ilman hapen kanssa ja syttyy palamaan. Mikäli kenno pysyy vielä kasassa ja lämpötila kasvaa 135 °C:seen, kennon polymeeriseparaattori sulaa ja aiheuttaa oikosulun elektrodien välillä. Lopulta lämpötilan nousu aiheuttaa metallioksidikatodissa hajoamisreaktion, jossa vapautuu happea mahdollistaen elektrolyytin ja kaasujen palamisen kennon sisällä. Katodin hajoamisreaktio on erittäin eksoterminen tapahtuma, jolloin kennon lämpötila ja paine kasvavat, mikä lopulta johtaa räjähdysmäiseen tapahtumaan. Katodin hajoaminen alkaa noin 200 °C:ssa LCO- eli litium-kobolttioksidi

kennoissa, joita ei käytetä ajoneuvoissa. Muilla litiumakkukemioilla lämpötila on korkeampi. (10)

3.4 Palamisreaktio

Kun akkukkenno syttyy palamaan, siitä alkaa vapautua myrkyllisiä vetyfluori kaasuja. Akkukennojen elektrolyytti muodostuu erilaisista litiumsuoloista, kuten litiumhexafluorofosfaatti LiPF_6 , litiumtetrafluoroboraatti LiBF_4 ja litiumperkloraatti LiClO_4 . Lämpökarkauksen aikana akkukennon elektrolyytti hajoaa ja litiumhexafluorofosfaatti hajoaa litiumfluoridiksi LiF ja fosforipentafluoridiksi PF_5 . Tämän jälkeen, kun yhdisteet pääsevät kosketukseen ilman kosteuden kanssa kennon kuoren pettäessä, syntyy vetyfluorikaasua. (11) Kaavassa 4 on kuvastettuna lämmön aiheuttama reaktio ja kaavassa 5 on ilman kosteuden aiheuttama reaktio.



Fosforyylifluoridi POF_3 voi vielä reagoida veden kanssa ja muodostaa lisää vetyfluorikaasua, ja lopulta muodostuu lopputuotteena fosforihappoa H_3PO_4 .

Sähkö- ja hybridiajoneuvojen akkupalat eivät ole kovin yleisiä suhteutettuna muihin ajoneuvoihin liittyviin tulipaloihin. Perinteiset lyijyakut ja hybridiajoneuvojen NiMH-akut palavat todella huonosti eivätkä aiheuta ajoneuvon sammutustyössä ongelmia. Nykypäivänä litiumioniakkujen lisääntyminen ajoneuvoissa tuottaa vaikeuksia sammutustyössä, sillä ne palavat voimakkaasti ja saattavat sammutuksen jälkeenkin syttyä uudelleen palamaan. Koska akkupalosta syntyy myrkyllisiä kaasuja, on hyvä jättää sammutustyöt palomiesten hoidettavaksi. (11)

4 Akustojen turva- ja hallintajärjestelmät (BMS)

Jotta sähkö- tai hybridiajoneuvon akkua voidaan hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla, vaatii se rinnalleen järjestelmän, joka tarkkailee ja hyödyntää akkumoduulin kennojen potentiaalin. Tämä järjestelmä on BMS eli Battery Management System.

4.1 Toimintaperiaatteet

Erlaisia BMS toimintaperiaatteita ovat seuraavat:

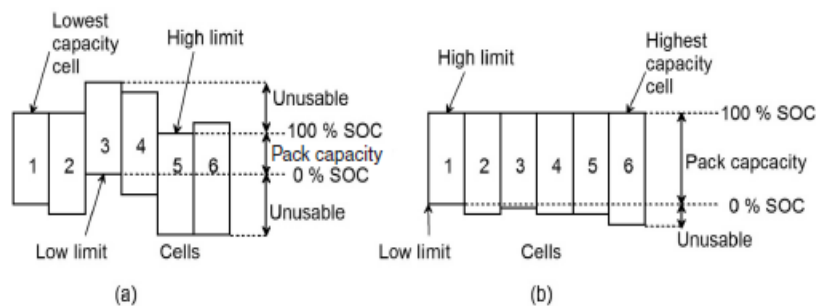
- CCCV laturi BMS, josta puuttuu monitorointi ja ei estä kennojen ylilatautumista, syväpurkausta eikä balansoi akkupakettia. Käytetään akun latauksen ohjauksessa.
- Reguloiva BMS, joka on yksinkertaisimmillaan virtamittari ja shuntti-vastus, eli sivuvirta kennon rinnalla. Kennojännitteen lähestyessä täyttä jännitettä, se kuluttaa ylimääräisen latausvirran säilyttäen jännitteen. Tämä järjestelmä ei selviä tilanteessa, jossa laturi tuottaa enemmän virtaa kuin se voi kuluttaa. Reguloiva BMS ei myöskään estä ylilatausta ja syväpurkausta.
- Mittaava tai monitoroiva BMS, joka toimii käytännössä vain akkupaketin tilojen tarkkailijana ja se ei estä kennojen ylilatautumista, syväpurkausta eikä balansoi akkupakettia.
- Balansoiva BMS, joka säätelee, monitoroi ja balansoi akkumoduulia, mutta se ei katkaise akun käyttöä vikatilanteissa tai ylilatauksen sattuessa.
- Suojaava BMS, joka tekee kaiken, mitä edellä mainitut järjestelmät ja suojaavat akun sekä ajoneuvojärjestelmän vikatilanteissa.

Kaikkia BMS toimintaperiaatteita ei välttämättä käytetä ajoneuvokäytössä, mutta kaikista löytyvät monitoroiva, balansoiva ja suojaavat toimenpiteet. (12, s. 35–41; 13.)

Monitoroiva BMS mittaa akkujärjestelmästä jännitettä, virtaa, lämpötilaa ja eristysvastusta. Jännitettä mitataan kennon yli sarjassa alle sekunnin välein ja jopa 1 mV:n tarkkuudella ajoneuvokäytössä. Jännitemittauksella voidaan määrittää kennojen SOC (State of Charge) eli lataustaso. Virran mittauksessa käytetään shunttivastuksia tai Hall-antureita tuottamaan tarpeellista tietoa akun toimitiloja tarkkaileviin laskelmiin, kuten kennojen purkuvirtojen tarkkailuun, kennon purun syvyyden laskennan apuna, virrankulutuksen mittaamiseen ja kennojen sisäisen tasavirtavastuksen laskentaan. Akkupaketin tai akkukennojen lämpötilaa mitataan, jotta niiden lämpötila ei pääse nousemaan vaaralliselle tasolle. Eristysvastusta mitataan, jotta akkupaketin voidaan todeta olevan fyysisesti

kunnossa, eikä ole päässyt vaurioitumaan ja täten vuotamaan jännitettä muualle. (12, s. 38–40.)

Kennojen balansointiin käytetään erilaisia algoritmeja, joiden avulla saadaan käyttöön akkumoduuleissa olevien kennojen suurin käytettävissä oleva potentiaali. Mikäli akkumoduulin kennoja ei ole balansoitu, niin käytettävissä oleva käyttöenergia voi olla esimerkiksi vain 10 % saatavilla olevasta energiasta. Kuva 3 esittää balansoimattoman ja balansoidun akkumoduulin eroavaisuudet.



Kuva 7. Vasemmalla balansoimaton akkumoduuli ja oikealla balansoitu (12, s. 64)

Balansointialgoritmeja ovat kennojännitteen mukaan balansointi, lopullisen jännitteen mukaan balansointi ja SOC-historian mukainen balansointi. Kaikissa pyritään määrittämään kennon SOC eli varaustaso. Kennojännitteen mukaan balansoidessa pyritään taasaamaan kaikkien kennojen jännite samalle tasolle, jolloin kaikissa kennoissa olisi tämän perusteella sama SOC. Tämä on yksinkertainen tapa balansoida kennoja, mutta jännitteen mukaan SOC:n määrittäminen ei ole tarkoin mahdollinen tapa. Käyttämällä tätä balansointialgoritmia tuottaa ongelmia kennoa ladattaessa latauskurvin ollessa keski-osassa. Lopullisen jännitteen mukaisessa balansoinnissa suoritetaan balansointi latauksen loppuhetkillä, kun SOC lähestyy 100 %:n rajaa. Kun SOC saavuttaa 100 %:n rajan, niin kennon jännite alkaa heittelemään nopeasti. Tällöin latausvirtaa lasketaan tai katkaistaan kokonaan, jotta voidaan pienentää virheellisen tunnistuksen suuruutta. Koska tunnistus suoritetaan latauksen lopussa, on BMS:llä lyhyt aika suorittaa balansointi, sillä kennon varaus lähtee nopeasti laskemaan balansointivirran takia. SOC-historian mukaisessa balansoinnissa suoritetaan kennojen balansointia jatkuvasti ja pyritään saamaan kennojen purun syvyys täsmäämään toisiinsa. Tässä balansointivirta on matala, mutta

vaatii BMS:ltä enemmän laskentatehoa ja muistia, jotta jokaisen kennon historiatietoa voidaan varastoida. (12, s. 22–31, 40–41.)

4.2 Suojatoiminnot

BMS:n suojatoimintoihin kuuluvat lämmönhallinta, balansointi ja kennojen energian jaottelu, kontaktorien ohjaus ja turvarajojen asettaminen. Lämmönhallinnan osalta BMS:n tulee huolehtia, että akkupaketin lämpötila on toiminnan kannalta lämpötilarajojen sisäpuolella. Kylmällä säällä lämpöä tulee tuottaa ja ohjata jäähdytysnesteen avulla akkupaketille. Kun akkupaketin lämpötila on nousemassa liian korkeaksi, jäähdytysjärjestelmän avulla lämpö vietään pois akkupaketista. (12, s. 54, 63–64.)

Kun hybridi- tai sähköajoneuvossa kytketään päälle käyttöjännite sähkövoimajärjestelmään, on käytettävä kahta kontaktoria jännitteen kytkentään. Joissakin korkeajännitejärjestelmissä käytetään 600 voltin jännitettä ja johtimissa kulkee useamman ampeerin virta. Mikäli sähkövoimajärjestelmään kytkettäisiin niin sanottu täysiteho päälle jokaisella kytkentäkerralla, kontaktorin kärki palaisi puhki jo muutaman käytön jälkeen ja tekisi ajoneuvon toimintakyvyttömäksi. Myös pääsulake voi vaurioitua tästä. Tämän takia järjestelmään kytketään esilatausvirtapiiri esilatauskontaktorin avulla, jota kytkennässä edeltää vastus sarjaan kytkettynä. Vastuksen tarkoituksena on laskea korkeajännitejärjestelmään tulevaa virtaa, koska korkeajännitejärjestelmässä on kapasitanssia, eli se varaa itseensä sähköenergiaa samantapaisesti kuin kondensaattori. Kun järjestelmän jännite kasvaa, niin kytkentävirta laskee pääkontaktorilla. Tämä tapahtuu muutamassa sekunnissa, joten ajoneuvon käyttäjä ei joudu odottamaan päästäkseen liikkeelle. (14)

Turvarajoja asettamalla voidaan pitää yllä akkupaketin toiminnallisuutta pidemmän aikaa. Esimerkiksi kun BMS mittaa jännitettä, se ei reagoi hetkellisiin jännitepudotuksiin, mikäli se kestää sallitun ajan. Mikäli jännitepudotus kestää liian kauan, BMS tulkitsee sen siten, että akkukennon jännitetaso on liian alhainen, jotta kennoa voisi käyttää ja täten suojaa sitä kytkemällä sen pois järjestelmästä siihen saakka, kunnes akkua ladataan. Kuvassa 4 on esitetty mahdollinen jännitteen vaihtelu ja kynnystaso vian havaitsemiseen. (12, s. 60)

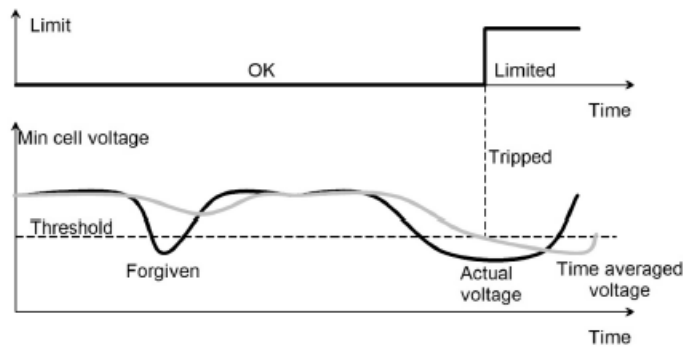


Figure 3.8 Delayed reaction to low cell voltage: a short pulse doesn't result in a fault, a long pulse does.

Kuva 8. Kennojännitteen mittaaminen. Tumma viiva kuvastaa mitattua jännitettä ja harmaa viiva ajallista keskiarvoa (12, s. 60)

Lämpötilan kanssa puolestaan voidaan virran kulutusta koettaa laskea, jotta akkupaketti ei lämpenisi liikaa, kun jäähdytysjärjestelmä ei enää kykene jäähdyttämään tarpeeksi tehokkaasti (12, s. 60).

5 Korkeajänniteakkujen huoltaminen

5.1 Määräaikaishuollot ja vikadiagnoosi

Sähkö- ja hybridautojen korkeajänniteakut ovat käytännössä huoltovapaita. Akkuihin ei kohdistu mitään määräaikaishuoltotoimenpiteitä, mutta se ei tarkoita, ettei ajoneuvoa tarvitsisi huoltaa säännöllisesti. Kaikissa ajoneuvoissa on kuluvia osia, kuten jarrut, joita pitää huoltaa säännöllisesti, jotta ajoneuvo säilyy turvallisena ajaa. Akkujärjestelmän jäähdytysneste tulisi vaihtaa esimerkiksi Hyundain Ioniq -hybridaajoneuvossa ensimmäisen kerran 120 000 km:n jälkeen ja sen jälkeen kerran kahdessa vuodessa. (15, s. 478) Tällä varmistetaan, että jäähdytysjärjestelmä toimii halutulla tavalla ja lämpö saadaan siirrettyä akkupaketista pois, jolloin vältetään akuston ylikuumeneminen.

Mikäli akustoon itseensä tulee vikaa, akuston oma tarkkailujärjestelmä Battery Management System (BMS), antaa tiedon viasta suoraan moottorinohjausyksikölle tai erilliselle ohjainlaitteelle ja tämän kautta lopulta kuljettajalle esimerkiksi vikavalon avulla. Korjaamalla vikaa voidaan alkaa tutkimaan vikakoodien perusteella testerin avulla. Merkkikoh-

taisilla testereillä on myös mahdollista lukea suoraan akkumoduulien jännite- ja varaus-tasoja. Joissakin tapauksissa on tarpeellista tehdä akkupaketille eristysvastusmittaus, jossa voidaan mahdollisesti todeta akkupaketin olevan viallinen. (16, s. 6)

5.2 Akkupaketin, -moduulien ja -kennojen vaihtaminen

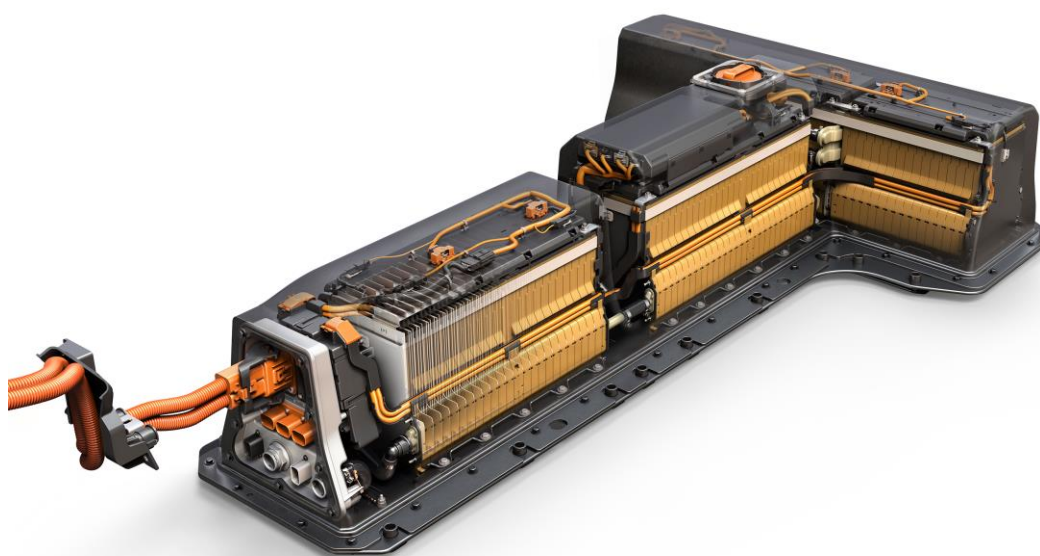
Sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajännite komponenteille kuten akulle myönnetään yleensä kahdeksan vuoden takuu jollakin kilometrirajalla. Esimerkiksi Opelilla on kilometrirajana 120 000 kilometriä. Näin varmistetaan, että ajoneuvo säilyy turvallisesti ajettavana koko ajoneuvon odotetun elinkaaren ajan. Taulukossa 6 on Taloustaito-sivuston julkaistussa artikkelissa (17) oleva listaus autonvalmistajien sähköautojen korkeajänniteakun takuusta.

Taulukko 6. Autonvalmistajien myöntämät takuuajat korkeajänniteakulle (17)

Automerkki	Korkeajänniteakun takuu
Nissan Leaf	5 vuotta 100 000 km, uusi malli 8 vuotta tai 160 000 km
Volvo	5 vuotta tai 100 000 km
Mercedes-Benz	6 vuotta tai 100 000 km
Volkswagen	8 vuotta tai 160 000 km
Audi e-tron	8 vuotta tai 160 000 km
Renault Zoe	8 vuotta tai 160 000 km
BMW	8 vuotta tai 100 000 km täyssähköautoilla, 6 vuotta tai 100 000 km plug-in-hybrideillä
Hyundai	8 vuotta tai 200 000 km
Kia	7 vuotta tai 150 000 km
Honda	5 vuotta tai 100 000 km
Toyota	5 vuotta tai 150 000 km, mutta hybridiakkaturva, jonka voimassaolon edellytyksenä on määräaikaishuoltojen yhteydessä tehtävä akun tarkistus, kattaa 10 vuotta tai 350 000 km
Tesla	8 vuotta ilman kilometrirajoitusta

Akkupaketin komponenttien vaihtaminen riippuu täysin siitä, kuinka se on suunniteltu huollettavaksi tai korjattavaksi. Joissakin ajoneuvoissa akustosta ei ole mahdollista vaihtaa korjaamoilla akkupaketista moduuleja saatikka kennoja erikseen, vaan korjaamon täytyy tilata koko akkupaketti korjaamolle ja toimittaa vanha akkupaketti tehtaalle, jossa

se kunnostetaan uuden veroiseksi. Näin toimitaan esimerkiksi Opel Amperan akkupaketin kanssa. Tämä johtuu auton valmistajan omasta tehtaan toimintatavasta esimerkiksi takuutapauksissa. Mutta toisaalta Chevrolet Voltin tapauksessa on korjaamon mahdollista tilata yksittäisiä moduuleita akkupakettiin ja vaihtaa niitä itse. Vaikka Ampera ja Volt ovat periaatteessa sama ajoneuvo varustettuna eri merkeillä, toimintatapa on silti jostain syystä eri. Opel ja Chevrolet ovat olleet ajoneuvon julkaisun ja tuotannon aikaan General Motorsin omistuksessa. Kuvassa 2 näkyy Chevrolet Voltin akkupaketti, joka on myös Opel Amperassa.



Kuva 9. Chevrolet Voltin akkupaketti (18)

Nissan Leaf -mallisissa autoissa on mahdollista vaihdattaa jopa kennoja akkumoduuleista. Vaihtamisen edellytyksenä on, että korjaamolla henkilökunta on käynyt tarpeelliset koulutukset työhön ja Nissan on antanut korjaamolle oikeudet suorittaa kyseistä työtä. Joillakin korjaamoilla on tämän takia mahdollista vaihtaa vain koko akkupaketti kerrallaan eikä yksittäisiä moduuleja tai kennoja. Tilanteissa, joissa ajoneuvo tulee Nissan-merkkikorjaamolle ja akkupaketissa on pimeänä vain yksittäisiä kennoja tai moduu-

leja, mutta koko akkupaketti ei ole viallinen ja korjaamolla ei ole oikeuksia suorittaa moduulin tai kennon vaihtoa, korjaamo ei voi vaihdattaa koko akkupakettia. Tässä tilanteessa auto on kuljetettava korjaamolle, jossa on Nissanin myöntämät oikeudet vaihtaa vialliset kennot tai moduulit. (19)

Kun akkupakettia korjataan, on huolehdittava työturvallisuudesta. Tämä tarkoittaa sitä, että komponentteja irrottaessa ajoneuvosta on ajoneuvon korkeajännitejärjestelmä tehty valmistajan ohjeiden mukaisesti jännitteettömäksi ja asentajalla on tarvittavat suojaimet, kuten esimerkiksi kumihansikkaat, jotka ovat soveltuvia korkeajännitetyöhön, sekä työalue on eristetty merkkilipuilla. Akkupaketin korjauksessa on huomioitava, ettei akkujärjestelmä ole päässyt ylikuumenemaan jäähdytysjärjestelmän vikaantumisen takia tai muusta syystä eikä akkupaketissa ole havaittavissa visuaalisia vaurioita, kuten painaumia tai pullistumia moduuleissa tai kennoissa. Myös akkupaketti on puhdistettava mahdollisesta pölystä ja liasta, jotta sitä ei moduulin tai kennon vaihtamisen aikana päädy esimerkiksi liittimien väliin. Aina, kun akkupaketista irrotetaan jokin liitin, on kyseiset liittimet suojattava valmistajan määrittelemällä suojamateriaalilla, esimerkiksi asiaan soveltuvalla teipillä, jotta ne eivät altistu ulkoilman kosteudelle ja lialle ja täten eivät aiheuta asentajan tai ohjainlaitteiden suorittamisessa mittauksissa häiriöitä. Kosteus voi aiheuttaa korroosiota liittimessä ja täten kasvattaa sen resistanssia, joka lopulta aiheuttaa lämmöntuottoa liittimessä ja ei halutussa paikassa akkupakettia. Moduulien lämpötilasensoreiden paikat on hyvä merkitä esimerkiksi tarralla tai tussimerkinnällä, jotta koamisvaiheessa ne tulevat oikeille paikoilleen. (19)

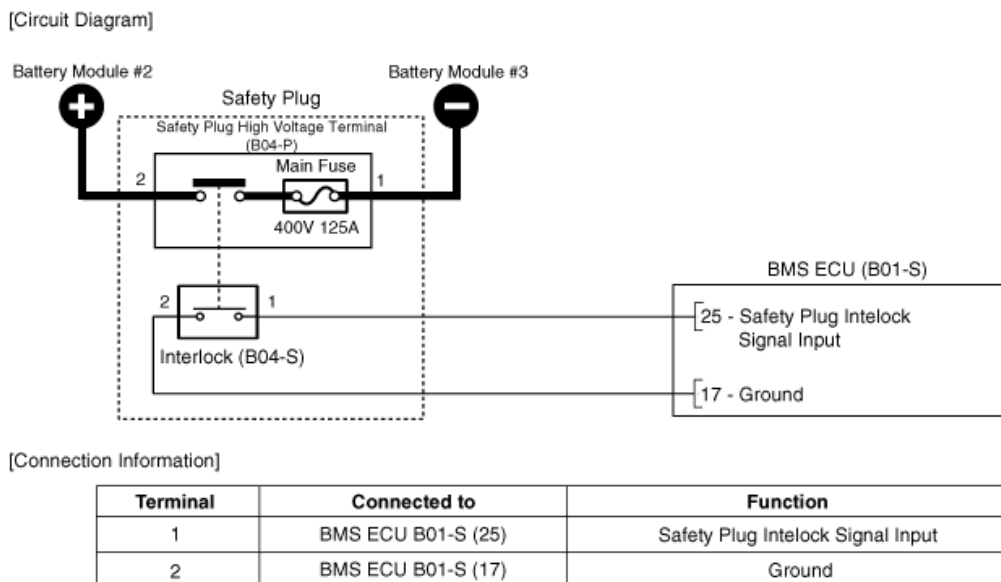
5.3 Korkeajänniteakkujärjestelmän sisäiset komponentit

Korkeajänniteakkujärjestelmään kuuluu kennojen ja BMS:n lisäksi muita komponentteja, jotka ovat oleellisia osia järjestelmän toiminnan kannalta. Näihin lukeutuvat pääsulake, kontaktorit, liittimet, johtosarja ja esilatausvirtapiiri. Tässä kappaleessa käsitellään huomioitavia asioita niiden kanssa työskentelyyn.

5.3.1 Pääsulake

Korkeajänniteakkujärjestelmän pääsulakkeen tehtävänä on suojata muuta sähkö- tai hybridiajoneuvon korkeajänniteakkua ja sen virtapiirejä mahdollisilta virtapiikeiltä, joita

saattaa syntyä akun sisäisestä viasta, kuten oikosulku kennojen välillä. Mikäli pääsulake vaurioituu virtapiikin takia, jännite kytkeytyy pois akkumoduulien väliltä (20). Pääsulake on yleisesti sijoitettuna huoltoliittimen sisälle akkupaketissa. Kuvassa 10 on kytkentäkaavio Kia Niron huoltoliittimestä.



Kuva 10. Kia Niron huoltoliittimen kytkentäkaavio (21)

Huoltoliittintä irrotettaessa on kytkettävä virrat pois ajoneuvosta ja varmistettava, että ajoneuvon korkeajännitejärjestelmä on jännitteetön. Kun ajoneuvon on jännitteetön voidaan huoltoliitin irrottaa turvallisesti. Joissakin tapauksissa on myös irrotettava 12 voltin akun miinuskaapeli, jotta jännite kytkeytyy pois autosta kokonaisuudessaan ja kaikki kontaktorit ovat auki asennossa. On myös hyvä varmistaa, että jännite laskee järjestelmässä esimerkiksi tarkistamalla inverterin liittimestä jännite. Kia Niron huolto-ohjeissa mainitaan, että jännitteen inverterissä olisi oltava alle 30 voltia, kun huoltoliitin on irrotettuna. (22; 23)

5.3.2 Kontaktorit

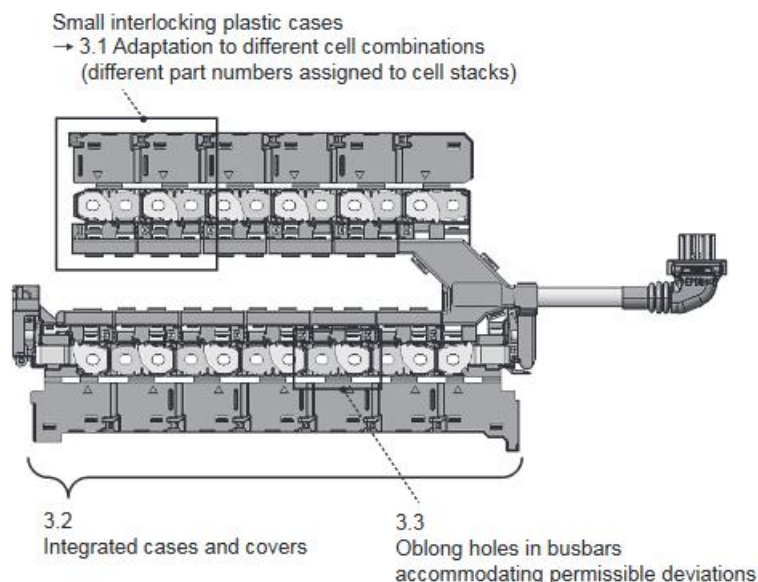
Sähkö- ja hybridiajoneuvojen korkeajänniteakuissa käytetään kontaktoreita korkeajännitteen kytkemisessä päälle ja pois. Kontaktorit toimivat samalla tavalla kuin releet, mutta ne on suunniteltu kestävämpiä suurempia virtoja. Kontaktorin sisällä on suojaakaasua, joka

suojaa kontaktorin kärkeä, kun korkeajännite kytketään. Kytkenässä syntyy valokaari-ilmiö, ja mikäli kontaktorin kärki on hapen kanssa tekemisissä, on valokaaren vaikutus voimakkaampi kuin suojakaasussa. Valokaari kuluttaa kontaktorin kärkeä ja lisää sen resistanssia. Valokaari syntyy kahden sähköä johtavan osan välillä, mikäli niiden välinen potentiaali- eli jännite-ero on tarpeeksi suuri ja niiden etäisyys riittävän pieni. Tällöin ilma osien välillä alkaa johtamaan sähköä ja muuttuu plasmaksi. Akkupaketti sisältää yleensä kolme kontaktoria. Positiivisella ja negatiivisella linjalla sekä esilatausvirtapiirillä on omat kontaktorinsa. (24)

Kontaktoreita ohjataan 12 voltin jännitteellä. Mikäli 12 voltin akku on pois kytkettynä järjestelmästä, jäävät kontaktorien kärjet auki asentoon eikä korkeajännite pääse kytkeytymään päälle. Yleisin vikaantumisen syy kontaktorille on kärjen resistanssin kasvaminen käytön seurauksena. Voi myös olla mahdollista, että kontaktorin kärki on hitsaantunut kytkeytyessään kiinni-asentoon ja kun 12 voltin ohjaus kytkeytyy pois, jää kontaktorin kytkentä voimaan. Tämä on harvinaisempi vikatilanne kontaktorille, ja mikäli positiivisen ja negatiivisen linjan kontaktorien kärjet hitsaantuvat kiinni, korkeajännitettä on lähes mahdotonta kytkeä pois päältä ja tekee korkeajänniteakun irrottamisen haastavaksi. (24)

5.3.3 Liittimet ja johtosarjat

Korkeajännitejärjestelmän johtosarjat ovat väriltään oransseja, jotta ne on helppo erottaa muista johtosarjoista. Näissä johtimissa kulkee suuria jänniteitä ja virtoja ja ovat sen takia paksumpia kuin muut ajoneuvon johtimet. Korkeajänniteakun sisällä akkukennot on kytkettynä akkumoduulissa johtomoduuleissa. Näissä johtomoduuleissa on kennot kytkettynä sarja- ja rinnankytkentöinä muovisen kuoren sisällä. (25) Kuvassa 11 on esitettyinä johtomoduulin rakenne.



Kuva 11. Johtomuuli korkeajännite akkumoduulissa (25)

Johtomuulien rakenne vaihtelee valmistajan mukaan. Joissakin johtomuuleissa on käytetty pehmeämpää ja joustavampaa muovia, jolloin johtomuulia irrotettaessa sen kotelointi ei pääse vaurioitumaan, mikäli se taipuu hieman irrotustyössä (19; 25).

5.3.4 Esilatausvirtapiiri

Luvussa 4.2 kuvattiin esilatausvirtapiirin tarkoitus suojatoimintona. Esilatausvirtapiirin on siis tarkoituksena suojata kontakteita liian suurelta virralta sähkö- ja hybridiajoneuvon korkeajännitejärjestelmän kytkeytyessä päälle. Esilatausvirtapiirissä on kytkettynä vastus ja kuvitteellinen kondensaattori sarjassa. Vastus kondensaattori kytkentää kutsutaan RC-piiriksi. Esilatausvirtapiiri tulee mitoittaa järjestelmän mukaan, koska akkupaketeissa ja korkeajännitejärjestelmissä on eroja eri ajoneuvomallien välillä. Kondensaattorin latausajasta käytetään termiä aikavakio. Yleisesti kondensaattorin latautuminen lähes täyteen kestää viiden aikavakion verran, ja sitä käytetään esilatausvirtapiirin mitoituksessa. RC-piirin aikavakio lasketaan kaavalla 6:

$$\tau = R * C \quad (6)$$

jossa τ on aikavakio, R vastus ja C kapasitanssi.

Tämän kaavan avulla on mahdollista mitoittaa esilatausvirtapiirin nopeus haluamalleen nopeudelle. Esimerkiksi, jos halutaan, että korkeajännitejärjestelmän käyttöjännite on laadattuna puolessa sekunnissa ja ajoneuvon korkeajännitejärjestelmän kapasitanssi on 10 000 μF , saadaan sopiva vastus piirille.

$$R = \frac{5\tau}{C} = \frac{500 \text{ ms}}{\frac{10\,000 \mu\text{F}}{5}} = 10 \text{ ohm}$$

Komponentteja valittaessa on kuitenkin huomioitava, että akkupaketista tuleva jännite on todella suuri, ja sen takia on huomioitava vastukseen ja korkeajännitejärjestelmään kohdistuvat sähköenergiat. Väärin mitoitettuna voi korkeajännitejärjestelmä vaurioitua. (14)

Esilatausvirtapiirin takia on korkeajännitejärjestelmää korjattaessa huomioitava varoaika, sillä korkeajännitejärjestelmä on varautuneena käytettävän jännitteen suuruisen jännite. Jännite voi purkautua sekunnissa, mikäli se pääsee maadoittumaan johonkin kuten kosketuksesta ihmiseen. Jännite kuitenkin purkautuu itsestään ajan myötä, kun sille ei enää syötetä jännitettä akustolta. Tämä johtuu siitä, kun kontaktorit ovat auenneet, niin korkeajännitejärjestelmässä oleva energia muuttuu johtimissa sähkömagneettikentäksi ja vastuksessa lämmöksi. Tämä haluttu oikeantapainen purkautuminen kestää useita minuutteja. (26; 27)

5.4 Vaaratekijät

Sähkö- ja hybridiautojen korkeajännitejärjestelmän parissa työskennellessä on monia vaaratekijöitä, jotka liittyvät sähköön, kemikaaleihin tai korkeaan lämpötilaan. Tämän takia on noudatettava ajoneuvon valmistajan turvaohjeita aina korkeajännitejärjestelmän kanssa. (28)

5.4.1 Sähkö

Sähkö- ja hybridiajoneuvon korkeajännitejärjestelmässä on käytössä jopa 600 voltin jännite, ja jo 110 voltin tasajännite on hengenvaarallinen ihmiselle. Järjestelmän ollessa

päällä kulkee johtimissa myös korkea virta. Mikäli korkeajännitejohtimeen kosketaan paljaalla kädellä ja järjestelmässä kulkisi vain 30 mA:n virta, voi seurauksena olla rytmihäiriöitä, ja korkeammalla virralla alkaa ilmetä ihon sisäisiä palovammoja ja kammiovärinää sydämessä. Myös oikosulkuilanteessa voi ilmetä valokaari-ilmiö, kun irrotetaan komponentteja järjestelmästä. Valokaaren lämpötila voi olla yli 1000 °C, ja se aiheuttaa kosketuksessa vakavia palovammoja, ja sen osuessa syttyvään materiaaliin voi seurata tulipalo. Korkeajännitejärjestelmän johtimissa kulkeva korkea virta aiheuttaa sähkömagneettikentän, joka voi häiritä sydämentahdistimen toimintaa. (29; 30)

5.4.2 Kemikaalit

Akkukennon elektrolyytti voi aiheuttaa nestemäisenä tai kaasuna erilaisia oireita tullessaan kosketukseen ihmisen kehon kanssa. Iholla ja silmissä elektrolyytti aiheuttaa ärsytystä tai kemiallisen palovamman. Mikäli elektrolyytti pääsee esimerkiksi ihon kanssa kosketuksiin, tulee kosketusalue huuhtoa vedellä välittömästi ja hakeutua terveydenhoitoon. Hengityselimiin elektrolyytti aiheuttaa suurta ärsytystä, ja tämän tapahtuessa tulee altistunut henkilö siirtää raittiiseen tilaan ja ohjata terveydenhoitoon. Nieltynä elektrolyytti aiheuttaa kemiallisen palovamman suuhun, nieluun ja maha-suolikanavaan. Tässä tapauksessa on suu huuhdeltava huolella ja oltava myrkytyskeskukseen yhteydessä ja hakeuduttava terveydenhoitoon. (31)

5.4.3 Lämpötila

Akkupaketti ja sähkömoottori tuottavat lämpöä ollessaan käytössä. Sähkömoottorin lämpötila voi nousta 60 °C:seen kun ajoneuvo on liikkeessä. Tämän takia on oltava varovainen, kun sähkö- ja hybridiajoneuvo on tullut suoraan ajosta korjaamolle ja osat ovat lämpimiä. Myös akkukennon vikaantuessa voi kennon sisäinen lämpötila nousta, vaikka ajoneuvo olisi tuotu siirtokuljetuksella korjaamolle. Kuten luvussa 3.3 mainitaan, kennon lämpötila voi olla 80 °C, kun SEI-kerros alkaa hajota. Oikeilla suojarusteilla voi suojautua mahdollisilta palovammoilta. (30; 31)

6 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin korkeajänniteakkujen turvallisuuteen. Suomen lain-säädäntö sähköturvallisuuden suhteen takaa sen, että aivan kuka tahansa ei voi suorittaa korjaustoimenpiteitä sähkö- ja hybridiajoneuvoille. Täten ajoneuvot pysyvät turvallisina ja toimintakuntoisina koko ajoneuvon elinkaaren ajan. Myös korkeajänniteakuille myönnettävä pitkä takuu on kannustimena suorittaa kaikki huolto- ja korjaustoimenpiteen merkkikorjaamoilla. Toisin on Sri Lankassa, jossa BMW:n piirimyyjä Prestige Automobile (Pvt) Ltd:n jälkimarkkinointipäällikkö Laksiri De Silva on huolissaan, että korkeajännitejärjestelmään tehdään korjauksia liikkeissä, joilla ei ole BMW:n myöntämää korjauslupaa tai tarvittavaa koulutusta (32).

Akkujärjestelmien hallinta- ja turvallisuuslaitteisto pitää huolen siitä, että korkeajännitejärjestelmä toimii oikealla tavalla ja vikatilanteissa ilmoittaa kuljettajalle viasta sekä estää lisävaurioiden syntymisen. Myös akkukemiat kehittyvät kovaa vauhtia, jolloin akkukenoista tulee parempia suorituskyvyltään ja niiden turvallisuus paranee ohessa. Kaiken tämän perusteella voidaan sanoa, että sähkö- ja hybridiajoneuvot ovat yhtä turvallisia käyttää kuin polttomoottorilla varustettu ajoneuvo. Myös akkujärjestelmien korjaaminen on turvallista, kun noudatetaan valmistajan antamia ohjeita ja korkeiden koulutusvaatimusten takia työt osataan tehdä turvallisesti ja oikein.

Korkeajänniteakkujen vaihtokäsittelyssä olen käyttänyt omaa saamaani tietoa takuu-käsittelijänä ja tämän insinööriyön teon aikana olen saanut kasvatettua omaa korkeajänniteakkujen turvallisuuteen ja huoltamiseen liittyvää tietämystäni. Korjaamojen työmäärä tulee muuttumaan vuosien varrella, kun täyssähköautot alkavat olemaan yleisempiä liikenteessä kuin polttomoottoriajoneuvot. Täyssähköautot eivät tarvitse samanlaista vuosihuolto-ohjelmaa, ja se voi johtaa työmäärän laskuun. Nykyisellä kehityksellä tämä voi tapahtua monien vuosien päästä, koska hybridiajoneuvoja on kuitenkin käytössä reippaasti enemmän kuin täyssähköautoja.

Lähteet

- 1 Henkilöautojen käyttövoimatilastot. 2020. Verkkoaineisto. Autoalan Tiedotuskeskus. <http://www.aut.fi/tilastot/ensirekisteroinnit/kayttovoimat/henkiloautojen_kayttovoimatilastot>. Luettu 29.4.2020.
- 2 Sähköturvallisuuslaki. 2016. 1135/2016.
- 3 SFS 6002. Sähkötyöturvallisuusstandardi. 2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 4 Sähkö- ja hybridiajoneuvojen korjaamiseen liittyvät tärkeimmät muutokset. Verkkoaineisto. Autoalan keskusliitto. < http://www.akl.fi/akl-sertifiointi_oy/sahkotyoturvallisuus_sfs6002_ja_tyosuorituksesta_vastaava_henkilo/sahko-_ja_hybridiajoneuvojen_korjaamiseen_liittyvat_muutokset >. Luettu 26.3.2020.
- 5 SFS 6002:2015 + A1:2018. Sähkötyöturvallisuusstandardi. 2018. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 6 Why is a 12 volt battery needed in a Toyota Hybrid? Why not just use the high voltage battery for everything?. Verkkoaineisto. e Learn Aid. <<http://www.elearnaid.com/whysis12voban.html>>. Luettu 4.2.2020.
- 7 Batteries for Electric Cars. 2010. Verkkoaineisto. The Boston Consulting Group. <<https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>>. Luettu 11.2.2020.
- 8 2019. Nickel Metal Hydride (NiMH) Chemistry FAQ. Verkkoaineisto. PowerStream. <<https://www.powerstream.com/BatteryFAQ-nickel-metal-hydride.html>>. Luettu 4.5.2020.
- 9 Types of Lithium-ion. 2019. Verkkoaineisto. Battery University Group. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 11.2.2020.
- 10 Lithium Battery Failures. 2005. Verkkoaineisto. Electropaedia. <https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm>. Luettu 10.3.2020.
- 11 Linja-Aho, Vesa. 2020. Hankala sammutettava. Suomen autolehti 2.2020, s. 20-23. Helsinki.
- 12 Andrea, Davide. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. Norwood: Artech House.

- 13 STMicroelectronic. 2020. Automotive Battery Management System (BMS). Verkkoaineisto. <<https://www.st.com/en/applications/electro-mobility/automotive-battery-management-system-bms.html>>. Luettu 21.4.2020.
- 14 Andrea, Davide. 2016. Precharge. Verkkoaineisto. <<http://liionbms.com/php/pre-charge.php>>. Luettu 21.4.2020.
- 15 Ioniq omistajan käsikirja. 2017. Verkkoaineisto. Hyundai. <https://www.hyundai.fi/wp-content/uploads/2019/01/IONIQ_electric_ka%CC%88sikrija_2017-.pdf>.
- 16 2014. DMC Battery testing platform. Verkkoaineisto. DMC. <<https://www.dmcinfo.com/Portals/0/White%20Papers/DMC%20EV%20Battery%20Test%20White%20Paper.pdf>>. Luettu 11.2.2020.
- 17 Partanen, Juha. 2019. Tiesitkö tämän? Sähköauton akulla vain 100 000 kilometrin takuu. 17.4.2019. Verkkoaineisto. <<https://www.taloustaito.fi/vapaalla/tiesitkotaman-sahkoauton-akulla-vain-100-000-kilometrin-takuu/#b33b7ca4>>. Luettu 21.4.2020.
- 18 Romain, Nicolas. 2015. The 2016 Volt and its Voltec propulsion system. 1.12.2015. Verkkoaineisto. <<https://www.car-engineer.com/wp-content/uploads/2015/01/2016-Chevrolet-Volt-battery.jpg>> Luettu 11.2.2020.
- 19 Replacing a Li-ion Battery cell or module. 2011. Verkkoaineisto. Nissan North America. <http://www.nissantechicianinfo.mobi/htmlversions/Fall_2011/Li-ion_Battery_Cell_Module.html>. Luettu 11.2.2020.
- 20 Kia Niro: High Voltage Battery Control System / Main Fuse Description and operation. 2017. Verkkoaineisto. Kia Niro car manuals & technical info. <http://www.kniro.net/main_fuse_description_and_operation-848.html>. Luettu 20.4.2020.
- 21 Kia Niro: High Voltage Battery Control System / Main Fuse Schematic diagrams. 2017. Verkkoaineisto. Kia Niro car manuals & technical info. <http://www.kniro.net/main_fuse_schematic_diagrams-849.html>. Luettu 20.4.2020.
- 22 Kia Niro: High Voltage Battery Control System / Main Fuse Repair procedures. 2017. Verkkoaineisto. Kia Niro car manuals & technical info. <http://www.kniro.net/main_fuse_repair_procedures-850.html>. Luettu 20.4.2020.
- 23 Kia Niro: General Information / High voltage shut-off procedures. 2017. Verkkoaineisto. Kia Niro car manuals & technical info. <http://www.kniro.net/high_voltage_shut_off_procedures-692.html>. Luettu 29.4.2020.

- 24 Jenkins, Jeffrey. 2018. A Closer look at contactors. Verkkoaineisto. <<https://charge-devs.com/features/a-closer-look-at-contactors/>>. Luettu 20.4.2020.
- 25 Hirano, Yuko; Tsuji, Tomofumi; Yaita, Hisayoshi & Hirai, Hiroki. 2015. High Voltage Battery Wiring Module Corresponding to Changes in Number of Battery Cells. Verkkoaineisto. <<https://global-sei.com/technology/tr/bn80/pdf/80-10.pdf>>. Luettu 21.4.2020.
- 26 Kia Niro: Hybrid Control System / High voltage shut-off procedures. 2017. Verkkoaineisto. Kia Niro car manuals & technical info. <http://www.kniro.net/high_voltage_shut_off_procedures-818.html>. Luettu 22.4.2020.
- 27 Kondensaattorin varautuminen ja purkautuminen. 2017. Verkkoaineisto. Hutasu.net. <<https://www.hutasu.net/elektroniikka/teoriaa/kondensaattorin-varautuminen-ja-purkautuminen/>>. Luettu 28.4.2020.
- 28 Electric and hybrid vehicles. Verkkoaineisto. Health and Safety Executive. <<https://www.hse.gov.uk/mvr/topics/electric-hybrid.htm>>. Luettu 29.4.2020.
- 29 Thompson, Rob. 2013. Automotive maintenance & light repair. Clifton Park: Delmar CENGAGE Learning.
- 30 Basic information about risks posed by high-voltage vehicles & systems and measures taken in terms of occupational health & safety. 2018. Verkkoaineisto. Skoda. <https://www.vwgroupsupply.com/one-kbp-pub/media/shared_media/documents_1/einkaufsbedingungen/_koda_auto_a_s_/weitere_dokumente/arbeitschutz_elektromobilitaet/EN_Osnova_BOZP_elektromobilita.pdf>. Luettu 29.4.2020.
- 31 Safety data sheet. 2016 Verkkoaineisto. Inspired Energy LCC. <<https://www.zimmerbiomet.com/content/dam/zimmer-biomet/medical-professionals/support/safety-data-sheets/sds-lithium-batteries.pdf>>. Luettu 29.4.2020.
- 32 The danger of repairing a BMW High Voltage Battery – Prestige Automobile (Pvt) Ltd. 2019. Verkkoaineisto. BIZ. <<http://bizenglish.adaderana.lk/the-danger-of-repairing-a-bmw-high-voltage-battery-prestige-automobile-pvt-ltd/>>. Luettu 30.4.2020.