

VIHREÄN SIIRTYMÄN TUOTEKEHITYS

- Akkutekniikan perusteet



Akkutekniikan perusteet

Akulla tarkoitetaan uudelleenladattavaa, yhdestä tai useammasta **akkukennosta** koostuvaa yksikköä. Akkuja on monenlaisia, perinteisestä auton lyijyakusta korvanappikuulokkeiden litiumioniakkuihin.

Meistä jokainen käyttää päivittäin akkuja tai paristoja. Arkisin esimerkki lienee puhelimen akku, joka on nykyisin litiumioniakku, jota voi ladata satoja, jopa tuhansia kertoja uudelleen. Puhelimen akku koostuu yhdestä litiumionikennosta, jonka jännite on noin 3,7 voltia. Suuritehoisemmissa sovelluksissa, kuten kannettavissa tietokoneissa, akku koostuu useammasta sarjaankytketystä kennosta: kennoja sarjaankytkeällä koko akun jännite nousee, jolloin energian siirtämiseen ei tarvita niin suurta virtaa.

Käyttökohteissa joissa energiankulutus on hyvin pientä, kuten palovaroittimissa ja kaukosäätimissä, käytetään vieläkin kertakäyttöisiä paristoja. Monessa käyttökohteessa, kuten lasten leluissa, litiumioniakut ovat pitkälti syrjäyttäneet kertakäyttöiset paristot.

Keskeistä akku- ja paristosanastoa

Paristo (engl. primary battery) yhdestä tai useammasta kennosta koostuva laite, jota ei ole suunniteltu uudelleenladattavaksi: paristo sisältää tietyn energiamäärän, jonka luovutettuaan se on loppuun käytetty

Akku (engl. secondary battery) yhdestä tai useammasta kennosta koostuva laite, joka on suunniteltu uudelleenladattavaksi.

Kenno (engl. cell) tai sähköpari: akun tai pariston pienin toiminnallinen yksikkö, joka koostuu elektrolyytistä, elektrodeista (anodi ja katodi), navoista ja kotelosta.

Pelkkä englannin kielen sana *battery* voi tarkoittaa sekä akkua että paristoa. Sana paristo tarkoittaa kirjaimellisesti, että se koostuu useammasta parista (vrt. sanat lipasto tai tykistö). Paristo on kuitenkin vakiintunut tarkoittamaan myös yhdestä sähköparista koostuvaa yksikköä: tavallista käyttäjää ei kiinnosta, onko paristossa yksi vai useampi sähköpari.

Kapasiteetti (engl. capacity) akun, pariston tai kennon energia- tai varausmäärä, jonka sieltä voi purkaa tietyissä määritellyissä olosuhteissa. Kapasiteetin SI-yksikkö on ampeerisekunti eli coulombi, mutta tavallisesti yksikkönä käytetään ampeerituntia (Ah) tai wattituntia (Wh tai kWh).

Purkaminen (engl. discharge) tapahtuma, jossa akku luovuttaa kennojen kemiallista energiaa sähköenergiaksi ulkopuoliseen virtapiiriin

Varaaminen eli **lataaminen** (engl. charge) tapahtuma, jossa akun kennoihin syötetään sähköenergiaa, joka varastoituu kemiallisena energiana kennoihin

Nimellisjännite (engl. nominal voltage) tarkoittaa arviota kennon tai akun jännitteelle, jolla tuote tunnustetaan. Esimerkiksi tavallisen henkilöauton lyijyakun nimellisjännite on 12 V, vaikka akun

tarkka napajännite (napojen välistä mitattu jännite) riippuu muun muassa akun varaustilasta ja kuormituksesta.

Varaus- ja purkausnopeus (engl. charge/discharge rate tai C-rate) tarkoittaa akun lataus- tai purkausvirtaa jaettuna akun kapasiteetilla, eli kuinka suurella virralla kapasiteettiinsa nähden akkua puretaan. Esimerkiksi jos 10 Ah akkua puretaan 10 A virralla, purkausnopeus on 1C. Jos samaa akkua puretaan 30 A virralla, purkausnopeus on 3C ja niin edelleen. C-arvo kertoo siis, kuinka moninkertaisella nopeudella yhteen tuntiin verrattuna akku varataan tai puretaan.

C-arvo (engl. C-rating) tarkoittaa valmistajan ilmoitusta siitä, kuinka suurta purkausvirtaa akku on suunniteltu kestävänsä. Termin ongelma on, että C-arvolle ja sen testaamiselle ei ole standardoitua määritelmää, se on vain valmistajan lupaus kennon virrankestolle. Esimerkiksi teoksessa Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, From Toys to Towns, Volume 1 (sivut 7–8) (<https://metropolia.fi/Record/nelli15.4100000011321898?sid=3445829728>) kirjoittaja kritisoi määritelmää, koska se ei kerro mitään akun todellisista ominaisuuksista suurilla virroilla purettaessa ja on lähinnä "epämääräinen markkinointitermi".

Varaustila eli **SoC** (engl. state of charge) tarkoittaa, kuinka monta prosenttia akussa on sen suunnitellusta maksimivarausten ja minimivarausten erotuksesta. Jos SoC on 100 %, akku on täysi ja jos SoC on 0 %, akku on tyhjä. Huomaa, että akkua on mahdollista purkaa myös SoC = 0 %:n jälkeen, mutta se voi vaurioitua. SoC = 0 % tarkoittaa, että akku on purettu niin tyhjäksi kuin se on suunniteltu purettavan, se ei ole jännitteetön.

Lataus-purkaussykli eli lyhyemmin **sykli** tarkoittaa tapahtumaa, jossa täyteen varattu akku puretaan tyhjäksi (SoC = 0 %) ja varataan taas täyteen (SoC = 100 %). Valmistaja ilmoittaa usein kennoille syklikeston (engl. cycle life), eli montako sykliä kenno kestää. Halvoilla matkapuhelinakuilla syklikesto voi olla muutamia satoja syklejä, kalliilla sähköajoneuvoissa käytetyillä kennoilla useita tuhansia tuhansia, litiumtitanaattiakulla jopa kymmeniä tuhansia.

Sanastolähteet:

- Kansainvälisen sähköalan standardointijärjestö IEC:n paristo- ja akkusanastostandardi (IEC 60050-482)
- Energiasanasto 1989
- Andrea 2020: Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, From Toys to Towns, Volume 1, Batteries

IEC:n sanastostandardi ja Energiasanasto löytyvät molemmat kätevästi TEPA-termipankista (<https://termipankki.fi/>). Andreaan kirja löytyy Metropolian e-kirjapalvelun kautta ja on luettavissa Metropolian tunnuksilla maksutta. Määritelmien sanamuodot vaihtelevat hieman lähteestä riippuen, pääsisältö ei.

Akkua kutsutaan – hieman sovellusalasta riippuen – joskus myös akkupaketiksi tai akustoksi. Esimerkiksi varavoimajärjestelmissä useista erillisistä akuista koottua energiavarastoa kutsutaan akustoksi. Sähköautoissa taas kennoista kootaan moduuleja, joista puolestaan kootaan ajoakku eli auton akkupaketti eli ajoakusto.

Termien käytöstä

Oleennaista termien käytössä on se, että ne ovat yksikäsitteisiä: vaikka varaaminen on standardien mukainen termi, on täysin yhtä oikein puhua lataamisesta. **Oleennaista on, että sekä termin kirjoittaja että lukija ymmärtävät, mihin asiaan viitataan.** Kieli myös muuttuu ja kehittyy: Energiasanasto vuodelta 1989 määrittelee, että "Paristot jaotellaan kahteen pääluokkaan, primääriparistoihin ja akkumulaattoreihin." Nykyään suomen kielessä paristo viittaa aina kertakäyttöiseksi suunniteltuun tuotteeseen, ja sanaan akkumulaatori (nyk. akku) törmää vain historiallisissa artikkeleissa.

Osalle termeistä ei ole yhtä vakiintunutta suomennosta, esimerkiksi cycle life suomennetaan usein syklikestävyudeksi, syklinkestävyudeksi, sykli-ikäksi, sykliseksi käyttöiäksi tai lyhyesti syklikestoksi tai syklinkestoksi.

Esimerkkejä

Puhelimen (yhdestä litiumionikennosta koostuvan) akun kapasiteetti on 2700 mAh (= 2,7 Ah) ja nimellisjännite 3,7 V. Akussa on karkeasti energiaa $2700 \text{ mAh} \times 3,7 \text{ V} = 9,99 \text{ Wh} \approx 10 \text{ Wh}$. Todellisuudessa energiaa on **vähemmän**, koska akun napajännite pienenee koko ajan purettaessa.

Kannettavan tietokoneen akku koostuu neljästä sarjaankytketystä litiumionikennosta. Yhden kennon nimellisjännite on 3,8 V ja kapasiteetti 4500 mAh. Koko akun nimellisjännite on tällöin $3,8 \text{ V} \times 4 = 15,2 \text{ V}$ ja kapasiteetti 4500 mAh. Energiana ilmoitettuna kapasiteetti on alle $15,2 \text{ V} \times 4,5 \text{ Ah} = 68,4 \text{ Wh}$. Jos tietokone kuluttaa virtaa 20 W, akku riittää noin 3 tunnin käyttöön.

Jos samoista kennoista kootaan akkupaketti kytkemällä ne rinnan, saadaan akku, jonka nimellisjännite on 3,8 V ja kapasiteetti $4 \times 4,5 \text{ Ah} = 18 \text{ Ah}$. $3,8 \text{ V} \times 18 \text{ Ah} = 68,4 \text{ Wh}$ eli saman verran kuin edellisessä esimerkissä, koska kennojen kytkentätapa ei vaikuta niiden kapasiteettiin.

Akkujen ja paristojen historiasta

Paristo mullisti sähkötekniikan kehityksen reilut 200 vuotta sitten

Sähkötekniikan historiassa kääntyi uusi lehti vuonna 1800, kun italialainen fyysikko ja kemisti Alessandro Volta keksi **sähköparin**. Aiemmin sähköä osattiin tuottaa ainoastaan hankaussähkönä. Volta havaitsi, että upottamalla kahta eri metallia olevat kappaleet veteen, niiden välille syntyi sähkövaraus (tällöin ei vielä tunnettu termiä jännite). Hän havaitsi myös, että varauksen suuruus riippui siitä, mitä metalleja käytettiin.

Volta huomasi myös, että kytkemällä useita pareja sarjaan **paristoksi**, jännite kasvoi – ja jos parit kytketään sarjaan niin, että samaa metallia olevat navat kytketään yhteen, jännitteet kumosivat toisensa.

Voltan patsaaksi kutsutussa paristossa oli pinottu päällekkäin kupari- ja sinkkilevyjä niin, että niiden välissä oli kostutettu pahvi.

Myöhemmin Humphry Davy osoitti, että paristossa oli tärkeää käyttää suola- tai happoliuosta: tislattulla vedellä paristo ei toiminut.

Jatkuvana sähkönlähteenä paristo mullisti sähkötekniikan kehityksen: 1810-luvulla keksittiin käsitteet jännite ja virta (joita tosin kutsuttiin intensiteetiksi ja kvantiteetiksi). Erilaisia paristoja

kehiteltiin 1800-luvun alkupuolella, kunnes ranskalaisen Georges Leclanchén vuonna 1865 kehittämä 1,5 voltin sinkki-hiili-sähköpari vakiinnutti asemansa: se oli vaaraton ja myrkytön eikä kehittänyt vaarallisia kaasuja. Sinkkielektrodin luona oli ammoniumkloridia eli salmiakkiliuosta ja hiilielektrodin ympärillä hiili- ja mangaanioksidipulverin seosta.

Akkumulaattori eli akku

Ladattava paristo eli akkumulaattori (eli nykyisin akku) tuli keksintönä mielekkääksi vasta, kun sähkögeneraattori oli keksitty (mikä tapahtui 1830-luvulla): eihän ladattavassa akussa ole mitään järkeä, jos sitä joudutaan lataamaan aina uudella paristolla. Vuonna 1859 ranskalainen Gaston Planté keksi ensimmäisen käytännöllisen uudelleenladattavan pariston eli akun, joka perustui laimeaan rikkihappoon upotettuihin lyijylevyihin. Sama periaate on käytössä nykyisissäkin lyijyakuissa, joskin rakennetta on kehitetty vuosikymmenien saatossa.

Muita merkittäviä keksintöjä ovat nikkeli-kadmiumakku (NiCd, 1899), nikkeli-metallihydridiakku (NiMH, 1983) ja litiumioniakku (Li-ion, 1991).

Lähde historiaosuudelle: Ismo Lindell: Sähkön pitkä historia (2017)

Erilaisia akkuja

Lyijyakku

Lyijyakku on keksintönä vanha (1859), muttei vanhentunut. Lyijyakkuja käytetään vielä 2020-luvullakin autojen käynnistysakkuina, aurinkosähköjärjestelmien akkuina sekä esimerkiksi varavoima-akkuina. Myös sähkötrukeissa käytetään lyijyakkuja, koska tässä käytössä akkujen suuri paino on etu: trukkiin ei tarvitse laittaa erillisiä lisäpainoja kaatumisen estämiseksi, kun lyijyakku toimii samalla painona.

Lyijyakun hyviä puolia ovat halpa hinta, yksinkertainen rakenne ja kierrätettävyys. Lyijyakku on myös paloturvallinen, koska siinä ei ole muita palavia osia kuin muovikuoret. Elektrolyytti on laimeaa rikkihappoliuosta eli suurelta osin vettä.

Yksi lyijykenno tuottaa noin 2 V jännitteen, eli 12 V auton akussa on kuusi kennoa sarjassa.

Nikkelikadmiumakku (NiCd)

Nikkelikadmiumakut eli NiCd-akut olivat yleisiä kuluttajaelektroniikan ladattavissa akuissa aina 1990-luvun alkupuolelle asti. Yksi NiCd-kenno tuottaa 1,2 V jännitteen. 1990-luvulla nikkelimetallihydridiakut (ja kalliimmissa tuotteissa litiumioniakut) syrjäyttivät NiCd-akut, ja viimeinen naula NiCd-akkujen arkkuun kuluttajakäytössä oli 2000-luvun alussa voimaan tullut RoHS-direktiivi, joka asetti tiukat vaatimukset terveydelle haitallisten aineiden käyttöön elektroniikassa.

NiCd-akkuja käytetään nykyään enää joissain erikoissovelluksissa, kuten lentokoneiden akkujärjestelmissä.

Nikkelimetallihydridiakku (NiMH)

Nikkelimetallihydridiakut eli NiMH-akut syrjäyttivät 1990-luvulla NiCd-akut kuluttajakäytössä. Yhden NiMH-kennon nimellisjännite on 1,2 voltia, kuten NiCd-kennossakin. Tunnetuin sovellus NiMH-akulle ovat ladattavat sormiparistot: koska kennon jännite on melkein sama kuin tavallisella sormiparistolla (1,2 V vs. 1,5 V), monessa paristokäyttöisessä laitteessa paristot voi korvata ladattavilla NiMH-akuilla.

Nikkelihydridiakku kutsutaan joskus virheellisesti nikkelimetallihybridiakuiksi: muun muassa Wordin oikoluku "korjasi" sanan väärin vielä 2010-luvun alussa. Hydridi viittaa vety-yhdisteeseen ja hybridi yhdistelmään tai sekaikiöön. Ehkä sekaannusta aiheutti myös se, että ensimmäisissä hybridiautoissa käytettiin nikkelimetallihydridiakkuja.

Kuten lyijyakuissa, NiMH-akuissakin on vesipohjainen elektrolyytti, joten ne ovat erittäin paloturvallisia. NiMH-kennot eivät myöskään vaurioidu pienestä ylilataamisesta, joten niistä on helppo koota akku ilman että tarvitaan monimutkaista akunhallintaelektroniikkaa. Kennot kestävät myös suurella virralla lataamista: ne voidaan ladata lähes täyteen reilussa kymmenessä minuutissa.

Litiumioniakku

Litiumioniakut ovat syrjäyttäneet kannettavassa kuluttajaelektroniikassa muut akkutekniikat käytännössä kokonaan. Ainoa poikkeus ovat paristokäyttöiset laitteet: koska litiumionikennon jännite on tyypillisesti 3,7 V, sitä ei voi laittaa suoraan 1,5 V pariston tilalle, vaan näissä sovelluksissa käytetään edelleen NiMH-kennoja.

Aluksi on todettava, että litiumioniakkuja on monenlaisia: kyse on akkuperheestä, ei yksittäisestä akkutekniikasta. Usein puhutaan "akkukemiasta" kun tarkoitetaan tiettyä litiumioniakkutyyppeä. Eri litiumioniakkujen ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi akkukemiasta riippuen: esimerkiksi NCA-akkukemia on alttiimpi lämpöryntäykselle ja siitä johtuvalle tulipalolle kuin vaikkapa litiumtitanaatti- tai litiumrautafosfaattikemia.

Litiumioniakku on monessa suhteessa ylivoimainen muihin edellä mainittuihin muihin akkutekniikoihin verrattuna.

Litiumioniakutkaan eivät ole täydellisiä, merkittävimmät huonot puolet ovat:

- **Hinta.** Monessa litiumioniakkukemiassa käytetään harvinaisia maametalteja, jotka nostavat hintaa. Lisäksi valmistusprosessi on paperin valmistamisen kaltainen rullalta rullalle - prosessi, jossa käytetään kalliita koneita. Litiumioniakkujen hinta on laskenut 2010-luvulla merkittävästi.
- **Paloturvallisuus:** toisin kuin esimerkiksi lyijy- ja NiMH-akuissa, litiumioniakkujen elektrolyytti on palavaa materiaalia. Litiumioniakkukenno palaa aggressiivisesti ja sen sammuttaminen on hankalaa.

- Heikko ylilatauksen ja ylipurkamisen kesto: litiumioniakku voi vaurioitua pysyvästi, jos sitä ylliladataan tai ylipuretaan.

Puhekielessä litiumioniakku lyhenee usein litiumakuksi. Termi litiumioniakku korostaa, että litium on akussa ionimuodossa, ei metallina. Kun nykyaikainen litiumioniakku keksittiin 1990-luvun alussa, akkuteollisuus korosti litium**ioni**akku-nimeä, koska litiumakku-sana oli pahasti ryvettynyt vuonna 1989-tapahtuneen akkupalon seurauksena: kanadalaisen Moli Energyn litiumakku paloi, aiheutti palovammoja ja osoittautui tarkemmassa tutkimuksessa epästabiiliksi tekniikaksi. Kertakäyttöisissä litiumparistoissa litium on nykyäänkin metallisessa muodossa. Uudelleenladattavat litiumakut (joissa litium on metallisessa muodossa) ovat kehitteillä, mutta kaupallistamiseen on vielä matkaa.

Eri akkujen pääominaisuudet ja -sovellukset

Akkutestauslaittevalmistaja Cadexin ylläpitämällä Battery University -verkkosivustolla on tiivistetty vertailu (<https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>) yleisimpien akkutekniikoiden numeerisista ominaisuuksista:

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion ¹		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life ² (80% DoD)	200–300	1,000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time ⁴	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁶	1.2V ⁶	3.6V ⁷	3.7V ⁷	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C ⁸ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C ⁹ (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 149°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months ¹⁰ (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory ¹¹		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency ¹²	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High ¹³		

Ominaisenergia (specific energy) tarkoittaa kapasitettia massayksikköä kohti (Wh/kg). Akulle voidaan ilmoittaa myös **energiatiheys** eli kapasiteetti tilavuusyksikköä kohti (Wh/l). Sovelluksesta riippuu, kumpi näistä on suunnittelun pullonkaula. Esimerkiksi henkilöautokäytössä tilavuus on

suurempi ongelma kuin massa (vaikkei turha massakaan toivottua ole), samoin kannettavassa elektroniikassa. Paikallisakustoissa, kuten rakennusten energiavarastoissa, kumpikaan ei yleensä ole ongelma.

Sisäinen resistanssi (internal resistance) vaikuttaa kennon lataus- ja purkuhäviöihin ja määrää kuinka paljon kennon napajännite putoaa kun kennosta otetaan virtaa. Pieni sisäinen resistanssi on tavoiteltava asia.

Syklikesto (cycle life) on ilmoitettu taulukossa 80 % purkusyvyydellä (DoD, depth of discharge), eli montako lataus-purkusykliä kenno kestää ennen kuin se on käyttöikänsä lopussa. Käyttöiän lopun määrittelylle ei ole sitovaa standardia, mutta litiumioniakuilla valmistajat määrittelevät sen olevan siinä pisteessä, kun kennon kapasiteetti on alentunut 80 %:iin alkuperäisestä. Tämänkin jälkeen kenno on yleensä vielä käyttökelpoinen, kapasiteetti vain on alentunut.

Latausaika (charge time) kertoo tyypillisen akkukennon latausajan normaalissa käytössä. Latausaikaan voidaan vaikuttaa usein suunnitteluratkaisuilla: esimerkiksi kunnollisella jäähtytyksellä NiMH-kennoja voidaan ladata lähes täyteen noin kymmenessä minuutissa.

Ylilatauksen sieto (overcharge tolerance) on nimensä mukaisesti sanallinen arvio siitä, kuinka hyvin kennotyyppi kestää ylilatausta. Huonosti ylilatausta (tai ylipurkua [joskus puhutaan myös alipurusta] eli liian tyhjäksi purkamista) sietävät kennotyypit tarvitsevat käytännössä aina suojapiirin tai akunhallintajärjestelmän. Mikäli akku koostuu useasta sarjaankytketystä kennosta jotka eivät siedä ylilatausta eikä ylipurkua, akunhallintajärjestelmän tulee tavallisesti pystyä huolehtimaan myös kennojen **tasapainottamisesta** (cell balancing): sarjaankytketyt kennot eivät ole keskenään täsmälleen samanlaisia, joten akkua käytettäessä kennojen varaustilat ryömivät pikkuhiljaa erilleen. Ilman tasapainotusta tämä johtaisi siihen, että kun heikoin kenno on tyhjä, akkua ei voi enää purkaa (ja kun vahvin kenno on täysi, muita ei voisi enää ladata). Tasapainottamista käsitellään tarkemmin myöhemmin kurssilla. Mikäli kennot kestävät ylilataamista hyvin, tasapainottaminen voidaan tehdä helposti ylläpitovarauksella (trickle charging): kun akku on täysi tai lähes täysi, jatketaan lataamista pienellä virralla, jolloin kaikki kennot lopulta varautuvat täyteen. Tätä tekniikkaa käytetään lyijyakuissa ja nikkeli-metallihydridiakuissa, litiumioniakuille se ei sovellu.

Itsepurkautuvuus (self-discharge) tarkoittaa, kuinka monta prosenttia akun varaustila heikkenee kuukaudessa, vaikka akkua ei kuormiteta.

Kennon **nimellisjännite** (nominal voltage) tarkoittaa arviota kennon tai akun jännitteelle, jolla tuote tunnustetaan. Kennon jännite on sitä matalampi, mitä tyhjempi kenno on. Kuinka jyrkästi jännite laskee varaustilan funktiona, riippuu kennotyypistä. **Maksimijännite** ja **minimijännite** (charge cutoff voltage ja discharge cutoff voltage) kertovat kuinka täyteen kennon saa ladata ja kuinka tyhjäksi sen saa purkaa.

Maksimi kuormitusvirta (peak load current) tarkoittaa käytännössä samaa kuin C-arvo, eli kuinka suuren virran kennosta voi ottaa ulos sen. Sarakkeessa kerrotaan myös tyypillinen sopiva kuormitusvirta, jolla kenno toimii parhaiten (= kennosta saadaan ulos lähes sama energia kuin sinne on varattu).

Varauslämpötila (charge temperature) kertoo, missä lämpötilassa kennoja voi ladata turvallisesti. Esimerkiksi kuluttajaelektronikkalaitteissa käytetään tavallisesti kennoja, joita ei voi ladata pakkaslämpötiloissa. Litiumionikennojen lataaminen pakkasella onnistuu sopivalla kennojen lisäaineistuksella. Esimerkiksi sähköautoissa käytetään yleensä tällaisia kennoja.

Purkulämpötila (discharge temperature) tarkoittaa vastaavasti sitä, missä lämpötilassa kennoja voi purkaa turvallisesti.

Huoltovaatimukset (maintenance requirement) tarkoittavat tässä yhteydessä sitä, pitääkö kennoille suorittaa jotain erityisiä toimenpiteitä (tarpeeseen perustuvan lataamisen ja purkamisen lisäksi) jotta ne pysyvät toimintakuntoisena. Avoimissa lyijyakuissa tällainen toimenpide on nestemäärän tarkistus ja tislattun veden lisääminen tarvittaessa.

Turvallisuusvaatimuksissa (safety requirements) esitetään tiivistetysti, millaisia toimenpiteitä akun turvallinen käyttö vaatii. Sen alla olevassa sarakkeessa kerrotaan, kuinka kauan akkutekniikka on ollut käytössä.

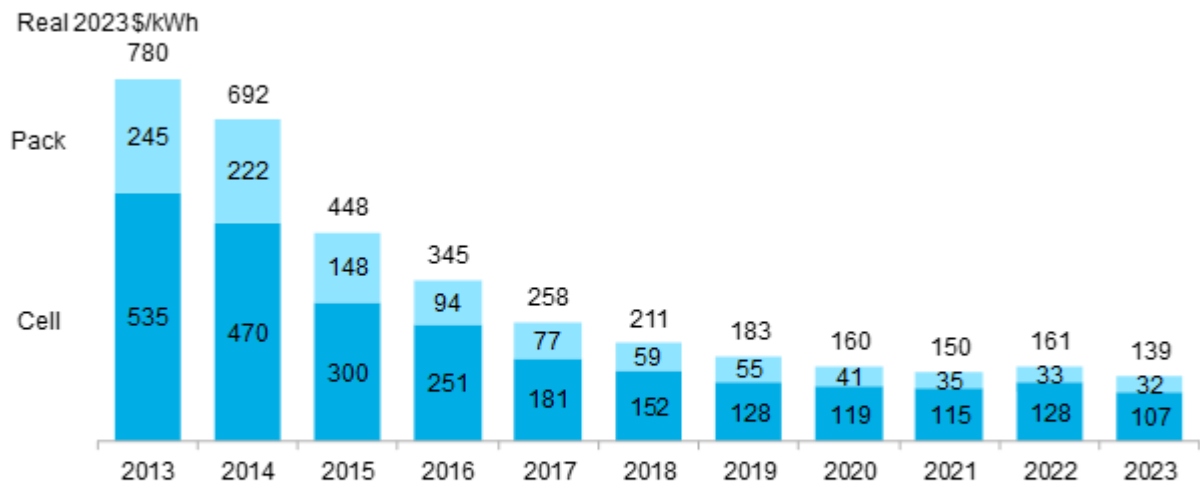
Myrkyllisyys on arvio akussa käytettävien materiaalien myrkyllisyydestä. On huomattava, että vaikka litiumioniakuissa käytetyt materiaalit eivät ole yhtä myrkyllisiä kuin esimerkiksi nikkelikadmiumakun kadmium, litiumioniakkujen palokaasut ovat erittäin myrkyllisiä.

Coulombinen hyötysuhde (coulombic efficiency) tarkoittaa, kuinka suuri osa akkuun syötetystä varauksesta (yksikkönä ampeerisekunti eli coulombi) saadaan purettaessa takaisin. Tätä ei tule sekoittaa energiahyötysuhteeseen joka kertoo paljonko akkuun syötetystä energiasta saadaan purettaessa käyttöön.

Viimeisellä rivillä esitellään **hinta** sanallisesti. Akkukapasiteetin hinnalla tarkoitetaan tavallisesti **suurten erien tukkuhintaa** (euroa tai dollaria per kilowattitunnin kapasiteetti). Esimerkiksi lyijyakkujen tapauksessa hinta on alle 100 dollaria kilowattitunnilta. Kuluttajahinta (kun ostaa yksittäisen auton 12 V lyijyakun) on vastaavasti korkeampi.

Litiumioniakkujen tukkuhinta on laskenut voimakkaasti koko 2010-luvun, ja tasoittunut 2020-luvun alussa:

Figure 1: Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013-2023



Source: BloombergNEF. Historical prices have been updated to reflect real 2023 dollars. Weighted average survey value includes 303 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles, and stationary storage.

Kuvassa esitetään analytiikkayhtiön arvio ajoneuvo- ja energiavarastoteollisuuden keskimääräisestä litiumioniakkujen hankintakustannuksista. Alempi palkki on kennojen hinta, ja koko palkki tarkoittaa koko akun hintaa. Esimerkiksi vuonna 2020 akkukennot maksoivat autoteollisuudelle 119 dollaria kilowattitunnilta ja koko akku 160 dollaria kilowattitunnilta. Varaosahinta kuluttajalle on moninkertainen (5000 dollarista kymmeneen tuhansiin, akun koosta ja automallista riippuen). Sähköautossa akun hintaa nostavat korkeat turvallisuusvaatimukset (akun on mentävä läpi törmäys- ja palotesteistä, ja niissä on oltava tehokas lämmönhallintajärjestelmä).

Huom! Bloombergin kuvaaja on hyvin suosittu lähde ja siitä julkaistaan joka vuosi päivitetty versio. Eri vuosina julkaistujen kuvaajien dollarihinnat poikkeavat hieman toisistaan, koska hinnat inflaatiokorjataan aina julkaisuvuoden hintoihin (jotta akkujen hinnan vertailu olisi totuudenmukaista, otetaan huomioon rahan arvon aleneminen).

Huomaa, että Battery Universityn ominaisuusvertailutaulukon arvot ovat suuntaa-antavia: esimerkiksi vaikka lyijyakulle on annettu pienimmäksi purkulämpötilaksi -20 astetta, ajoneuvokäyttöön tarkoitetut lyijyakut toimivat kylmemmissäkin. Monelle arvolle ei myöskään ole kiveenhakattua määritelmää ja testauskriteeriä.

VIHREÄN
SIIRTYMÄN
TUOTEKEHITYS

