

Akkuteknologioiden hyödyntäminen datakeskusten taajuusreservitoiminnan kehittämisessä

Atte Heikkinen

OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2025

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

HEIKKINEN, ATTE:

Akkuteknologioiden hyödyntäminen datakeskusten taajuusreservoiminnan kehittämisessä

Opinnäytetyö 61 sivua
Tammikuu 2025

Opinnäytetyössä tarkastellaan erilaisia datakeskusympäristöissä esiintyviä akkutyyppejä, varavoimajärjestelmien toimintaa sekä niiden hyödyntämis- ja kehitysmahdollisuuksia pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla lanseeratun nopean taajuusreserviin liityttäessä.

Työn myötä löydettiin varteenotettavia vaihtoehtoja datakeskuksissa yleisille litiumioniakuille, joiden raaka-aineiden louhinta on ekologisesti kuormittavaa ja tuotantoketjut ovat keskittyneet huoltovarmuuden näkökulmasta geopolitiisesti haastaville alueille, mikä korostaa vaihtoehtoisten akkuteknologioiden kehityksen tarvetta. Datakeskusten teknisten ominaisuuksien kehityskohteita katselmoitiin akkuteknologioiden sekä nopean taajuusreservoiminnan näkökulmasta. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Granlund Oy, joka on Pohjoismaiden suurin datakeskusten suunnitteluun ja konsultointiin erikoistunut asiantuntijayritys.

Työssä tutkittiin nopean taajuusreservin merkitystä ja tarvetta valtakunnallisissa sähköverkoissa sekä reservikohteiden teknisiä vaatimuksia taajuusreservoiminnassa. Datakeskusten toimintaperiaatteita varavoimajärjestelmien ja niihin liitettyjen akustojen toimintaa käsitellään normaalien käyttötilanteiden sekä nopean taajuusreservin aktivointisykliä näkökulmasta. Keskeisiä datakeskusten energiavarastoina hyödynnettäviä akkuteknologioita käsiteltiin teknisiltä ominaisuuksiltaan. Työssä käsitellään myös nykyisten sekä lähitulevaisuudessa mahdollisesti yleistyvien akkuteknologioiden soveltuvuutta datakeskusten käyttövarmuuden ja taajuusreservoiminnan kehittämisessä.

Opinnäytetyön lopputuloksena on kattava tekninen katsaus suuren teholuokan akkuteknologioihin sekä yksityiskohtainen kuvaus nopean taajuusreservin toiminnasta. Johtopäätöksinä löydettiin varteenotettavia vaihtoehtoja litiumioniakuille lähitulevaisuudessa teollisissa sähköenergiavarastoissa sekä kehityskohtia datakeskusten varavoimajärjestelmien toiminnasta nopeassa taajuusreservissä.

Asiasanat: akkuteknologia, datakeskus, taajuusreservi

ABSTRACT

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

HEIKKINEN, ATTE:

Utilizing Battery Technologies in Improving Frequency Reserve Operations of Data Centers

Bachelor's thesis 61 pages
January 2025

The objective of this thesis was to examine the various battery technologies utilized in data center milieus, their functionality as part of their backup power systems and their combined potential in utilization and improvement of operations within the fast frequency reserve of the Nordic electricity markets.

The study highlighted the importance of fast frequency reserve products in stabilizing national electrical grids and outlines the technical requirements for participation. It examined backup power systems both in normal operations and during fast frequency reserve activation cycles. The thesis looked into the technical properties of some of the more prevalent battery types in data centers. It also investigated the potential utilitarian capabilities of existing and future battery technologies in the improvement of fast frequency operations and the general dependability of the electrical infrastructure of data centers.

The findings of the thesis are an extensive technical overview of high-power battery storage technologies and a detailed description of the function of fast frequency reserves, ultimately identifying potential alternatives for lithium-ion batteries as well as improvements in the fast frequency reserve operations of data centers.

Key words: battery technology, data center, frequency reserve

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	DATAKESKUKSET OSANA TAAJUUSRESERVIMARKKINOITA	8
	2.1 Nopea taajuusreservi (FFR)	12
	2.2 Datakeskukset	14
	2.3 Reservitoiminta	16
3	TAAJUUSRESERVIMARKKINOIDEN TEKNISET VAATIMUKSET	19
	3.1 Reservikohteen hyväksyttämisen prosessi	19
	3.2 Reservikapasiteetin aktivointi	21
	3.3 Reservikapasiteetin palautuminen ja uudelleen aktivoituminen ...	23
4	AKKUTEKNOLOGIAT OSANA VARAVOIMAJÄRJESTELMIÄ	25
	4.1 Akustot	25
	4.2 Nopean taajuusreservin ohjausjärjestelmä	26
	4.3 Akustot datakeskuksissa	29
5	AKKUTEKNOLOGIOIDEN TEKNISET OMINAISUUDET	30
	5.1 Lyijyhappoakku	35
	5.2 Litiumioniakku	40
	5.3 Nikkelikadmiumakku	46
	5.4 Nikkeli-sinkkiakku	47
	5.5 Natriumioniakku	48
	5.6 Metallililma-akut	51
6	POHDINTA	53
	LÄHTEET	56

LYHENTEET JA TERMIT

A	Ampeeri, sähkövirran yksikkö
AGM	lyijyakkutyypin
Ah	Ampeeritunti, virransyöttökyky tunnin aikana
DoD	Depth of discharge, purkausaste
EMEA	Euroopan, Lähi-Idän ja Afrikan muodostama yhteis- markkina-alue
FFR	Fast frequency reserve, nopea taajuusreservi
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
LFP	Litiumrautafosfaatti, litiumioniakkutyypin
LMO	Litium-mangaanioksidi, litiumioniakkutyypin
LTO	Litiumtitanaatti, litiumioniakkutyypin
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, litiumioniakku- tyypin
NiCd	Nikkelikadmiumakku
NMC	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, litiumioniakku- tyypin
STS	Static transfer switch, staattinen siirtokytkin
UPS	Uninterruptable power supply, keskeytymätön virran- syöttö
V	Voltti, jännitteen yksikkö
VLRA	Valve regulated lead acid, suljettu lyijyakku
W	Watti, tehon yksikkö

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä käsitellään sähköverkkojen taajuuden vakauttamisessa käytetyn nopean taajuusreservin liittymisen vaatimuksia. Työssä esitellään nopean taajuusreservin aktivointisyklien profiileja sekä markkinoiden toimintaperiaatteita pohjoismaissa. Työssä tutkitaan erilaisia datakeskuksissa käytössä olevia, ja lähitulevaisuudessa mahdollisesti yleistyviä akkuteknologioita, niiden teknisiä ominaisuuksia, sekä hyödyntämismahdollisuuksia reservitoiminnan kehittämisessä.

Pohjoismaat ovat nousseet viime vuosina merkittäväksi kasvukohteeksi kansainvälisten teknologiayhtiöiden investointien määrässä datakeskusliiketoimintaan useiden erinäisten taloudellisten ja poliittisten kannusteiden johdosta (Verne 2024).

Datakeskuksien tehonkäyttöluonteen takia käyttöaste pyritään pitämään mahdollisimman korkeana varavoimajärjestelmien avulla. Varavoimajärjestelmien energiavarastoina käytetään suuren tehomäärän hetkelliseen syöttöön kykeneviä akustoja, joiden avulla liiketoiminnan katkoton jatkuminen kyetään varmistamaan sähkönjakeluverkon pudotessa pois. Datakeskuksien tehonkulutusprofiili on käyttösuhteeltaan korkea ja ajan suhteen pitkälti vakio. Datakeskuksia pyritään tästä syystä kannustamaan sektori-integraatioon lämmön talteenoton suhteen, sekä taloudellisin hyödyin osallistumaan sähköverkon vakauttamiseen akustojensa avulla tarpeen tullessa nopean taajuusreserviin liittymällä. (Alaperä 2021)

Nopeassa taajuusreservitoiminnassa datakeskukset pystyvät aktiivisesti hyödyntämään akkukapasiteettejaan rahallisin kannustein ilman merkittäviä vaikutuksia varsinaiseen liiketoimintaan. Reservituotetta hankitaan tuntikohtaisesti edeltävänä päivänä vain osalle tunneista tarpeen mukaan. Nopean taajuusreservin hankinta painottuu pitkälti kevätkuukausilta syyskuukauksille jolloin sähköverkon inertian määrä on tyypillisesti matalimmillaan. (Fingrid n.d)

Akkuteknologioina on perinteisesti käytetty lyijyakkuja, mutta teknisiltä ominaisuuksiltaan verrannollisesti paremmat litiumioniakut ovat pitkälti syrjäyttäneet ne datakeskusten käyttökohteissa (Titanpower 2018).

Litiumioniakut ovat kuitenkin raaka-aineidensa osalta ympäristölle rasittavia louhintaa käytänteiden sekä kierrätysaasteiden takia. Vaihtoehtoisten akkuteknologioiden kehittäminen eri käyttötarkoituksiin onkin nopeasti etenevä tutkimuksen ja tuotekehityksen sektori teollisuuden- ja teknologianalalla. Akkuteknologioissa käytettyjen raaka-aineiden valinnalla ja tuotantoketjuja keskittämällä huoltovarmuuden kannalta vakaammille alueille mahdollistaa ympäristövaikutuksien, sekä potentiaalisesti myös akustojen kokonaiskustannuksia pienentämisen. (Lohum 2024)

Akkuteknologian valinnassa täytyy ottaa huomioon akkujen tekniset sekä elinkaarelliset ominaisuudet. Uusien teknologioiden läpimurto suuren kokoluokan energiavarastoissa vaatii mahdollisesti liian suuria investointeja tai yksittäisten tekijöiden valmiutta riskin ottamiseen toiminnallisuudeltaan epävarmojen akkutyypin saralla. Monella tasolla kilpailevat akkuteknologiat kulkevat jatkuvasti askeleen perässä alati kehittyviä litiumakkuja, joiden tekniset ominaisuudet ovat vuosi vuodelta parempia. Usean uuden akkuteknologian raaka-aine kustannukset ovat litiumioniakkuja matalammat. Tuotekehityksen ja suhteellisen pienen tuotantomassan taloudelliset vaikutukset ovat kuitenkin kynnyskysymys asiakkaan hankintavaiheessa. Käytännössä muiden akkuteknologioiden kilpailuvalttien täytyy voittaa vertailussa litiumakut selkeästi ja teknisten ominaisuuksien täytyy olla vähintäänkin vertailukelpoiset, jotta kysyntä akkumarkkinoilla kasvaisi.

2 DATAKESKUKSET OSANA TAAJUUSRESERVIMARKKINOITA

Uusiutuvien energiamuotojen lisääntymisen takia on pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden täytynyt enenevissä määrin löytää varteenotettavia ratkaisuja sähköverkkojen teho- ja taajuustasapainon ylläpitämisessä. Sähkölaadullisesti heikossa verkossa ajankohdasta ja olosuhteista johtuvat häiriöt saattavat näkyä kulutuspaikoissa jännitteen ja taajuuden ailahtelevana käyttäytymisenä. (Nortio 2019)

Sähköverkon kokonaiskulutuksen ollessa tuotantoa suurempi, reagoi verkon taajuus laskemalla alle 50 Hz, vastaavasti sähkön ylituotanto tilanteessa taajuus nousee yli 50 Hz. Verkon taajuuden epävakaas saattaa vahingoittaa verkkoon liitettyjä laitteita ja komponentteja. Sähköverkossa kulkevaa virtaa rajoittaa järjestelmän impedanssi. Impedanssi jakautuu vaihtosähkötekniikassa resistiivisiin ja reaktiivisiin komponentteihin, joista reaktiivinen komponentti on taajuusriippuvainen. Reaktanssi koostuu sähkökenttä riippuvaisesta kapasitiivisesta, sekä magneettikenttä riippuvaisesta induktiivisesta komponentista. Sähköverkkojen siirtolinjojen pitkät etäisyydet johtavat siihen, että johto-osuuksien impedanssin reaktiivinen komponentti on pitkälti kapasitiivinen. Kapasitiivinen reaktanssi on käänteisesti riippuvainen järjestelmän taajuuteen. Taajuuden kasvaessa johdinjärjestelmän impedanssi pienenee, mikä tarkoittaa, että ylläpitääkseen järjestelmän tehotasapainoa täytyy siirtolinjoja pitkin syöttää korkeampia virtoja. Virran kasvu aiheuttaa johtimissa lämpenemää, mikä pahimmassa tapauksessa heikentää verkkoon kytkettyjen laitteiden ja johtimien eristemateriaalien rakennetta. (Günther 2023)

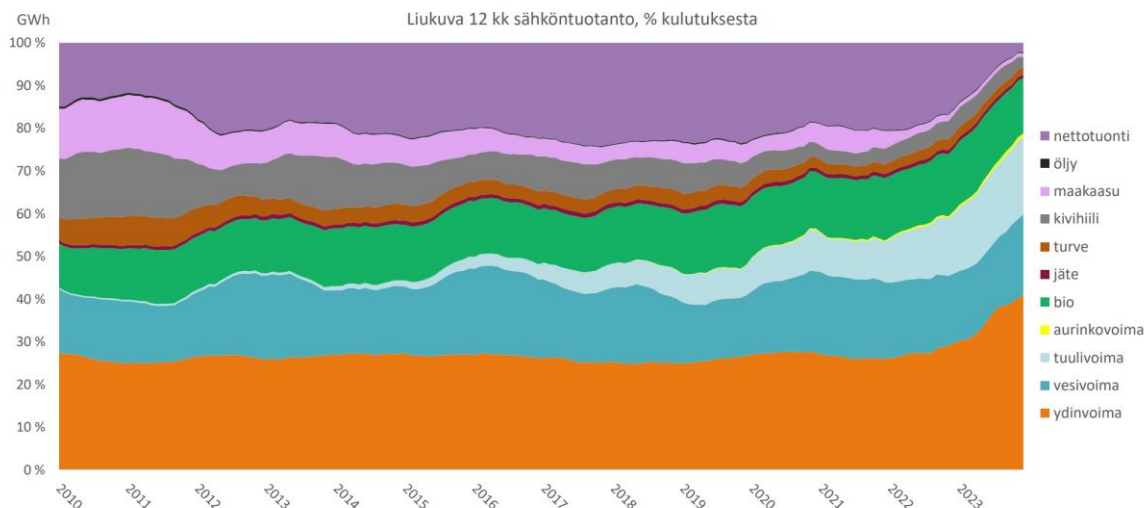
Induktiivisissa kuormissa, kuten moottoreissa ja muuntajissa, impedanssi käytetty suoraan verrannollisesti taajuuteen. Taajuuden laskiessa impedanssi pienenee ja virta kasvaa. Taajuuden lasku normaaliarvosta aiheuttaa verkkoon kytkettyjen komponenttien toiminnallisuuden heikentymistä. Poikkeustilanteissa taajuuden epävakaudella saattaa olla pitkäaikaiset vaikutukset infrastruktuurin ja kulutuslaitteiden elinkaareen. (Günther 2023)

Perinteisesti sähkön tuotanto on perustunut lähes täysin pyörivien massojen tuottamaan sähköön. Verkkoon kytketyt generaattorit pyörivät synkronoidusti sähköverkon taajuuden mukaisesti. Suorakytkentäiset verkkoon tahdistetut generaattorit ja moottorit tuottavat itseisarvillisesti verkkoon taajuuden muutosta vastustavaa kineettistä inertiaa. Vahvan inertian verkossa suuren kokoluokan kulutus- ja tuotantopiikit eivät kykene aiheuttamaan taajuusepätasapaino verkossa. Ison voimalaitoksen, esimerkiksi suuritehoisen ydinvoimalan, putoaminen tuotannosta voi aiheuttaa kriittisen taajuushäiriön sähköverkossa, mikäli korvaavia taajuutta tasapainottavia inertian lähteitä ei ole saatavilla. Pahimassa epätasapaino tilanteessa täytyy verkosta kytkeä pois suuria kuormia tehotasapainon säilyttämiseksi. (Fingrid n.d)

Ympäristöpoliittisista syistä on fossiilisten energianlähteiden polttoreaktioon perustuvat lämpövoimalaitokset pyritty ajamaan alas ympäristöstävällisempiä tuotantomuotoja suosien. Lämpövoimalaitoksella tarkoitetaan energian tuotantoon käytettyä voimalaitosta, jossa polttoreaktion höyrystämä vesi pyörittää turbiinin avulla generaattoria. Suorakytkentäinen generaattori syöttää pyöriessään sähköverkkoon tehoa tietyllä taajuudella, samalla vahvistaen tätä. Lämpövoimalaitoksia voidaan hyödyntää lämpö- ja sähköenergian yhteistuotannossa kaukolämpöverkkoon (vastapainevoimalaitos), tai siirtää lämpöenergia ympäristöön (lauhdevoimalaitos). (Krabbe 2022)

Sääriippuvaliset tuotantomuodot eivät tue itsearvoisesti sähköverkon taajuutta. Aurinko- ja tuulivoimalaitokset liitetään sähköverkkoon kineettistä inertiaa tuottamattoman tehoelektroniikan avulla. Aurinkovoimalaitokset tuottavat auringonvaloa sekä kennojensa puolijohderakennetta hyödyntäen tasasähköä, joka muunnetaan vaihtosuuntaajan avulla jakeluverkon käyttöön soveltuvaksi vaihtosähköksi. Tuulivoimalat ovat pyöriviä koneita, mutta niitä ei kuitenkaan tyypillisesti kytketä suoraan verkkoon tuuliolosuhteiden vaihtuvuuden, ja täten jännite- sekä taajuusarvojen epävakauden takia. Taajuusmuuttajat, tai suuntaajat, syöttävät tehoa verkkoon lukittauduttuaan sen taajuuteen, eikä näin ollen siis tue verkon taajuutta samalla tavalla kuten perinteiset generaattoreiden pyörintään perustuvat voimalaitokset, vaan seuraavat sitä. Sääriippuvaisten tuotantomuotojen

yleistyessä ja näiden osuuden kasvaessa sähköenergian kokonaistuotantokapasiteetista (kuvio 1), verkkoon tuotetun inertian määrä on vähentynyt, ja teho-
tasapainon ylläpitämiseen on täytynyt löytää uusia keinoja. (Krabbe 2022)



KUVIO 1. Sähköntuotanto tuotantomuodoittain 2010–2023 (Energiateollisuus 2024)

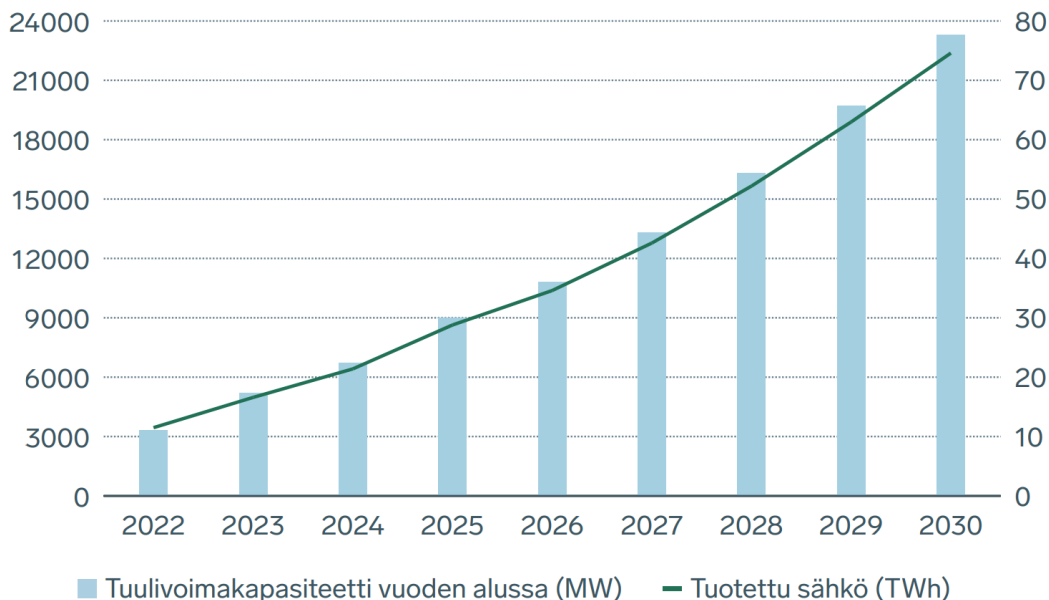
Tulevaisuudessa suuntaajavaltaisissa sähköverkoissa voidaan mahdollisesti markkinaehtoisesti vaatia tuotantoyksiköiltä verkkoa luovaa toimintaa, eli synteettisen energian luontia suoraan sähköverkkoon. Käytännössä suuntaajien verkon luonti on kuitenkin tällä hetkellä kehitysasteella. (Krabbe 2022)

Uusien sähköntuotantolaitosten investoinnit ovat keskittyneet viime vuosikymmeninä sääriippuvaisten voimalaitoksien rakentamiseen. Verkkoa luovaa sähköntuotantoa ei ole lähitulevaisuudessa odotettavissa suurissa määrin (Fingrid 2023a, 75). Yhtenä potentiaalisena kineettisen inertian lähteenä ovat synkronikompensaattorit. Synkronikompensaattorit, suoraan verkkoon kytketyt pyörivät massat, pyörivät tahdistetusti verkon taajuuden mukaisesti, ja tasaavat sähköverkon taajuuden muutoksia. Synkronikompensaattorit mahdollistavat verkko-suuntaajia hyödyntävien tuotantomuotojen lisääntymisen, vakauttamalla sähköverkkoa taajuuden ja jännitteen muutoksia vastustamalla. (Veijalainen 2024)

Suomessa tuulivoiman tuotantokapasiteetin odotetaan jatkavan kasvuaan noin 2000 MW vuodessa seuraavan kymmenen vuoden aikana (kuvio 2). Fingridin

kasvuennusteen mukaan tuulivoimalla tuotetun sähköenergian kokonaismäärä kolminkertaistuisi vuoden 2024 ja 2030 välisellä ajanjaksolla. (Fingrid 2023a, 76)

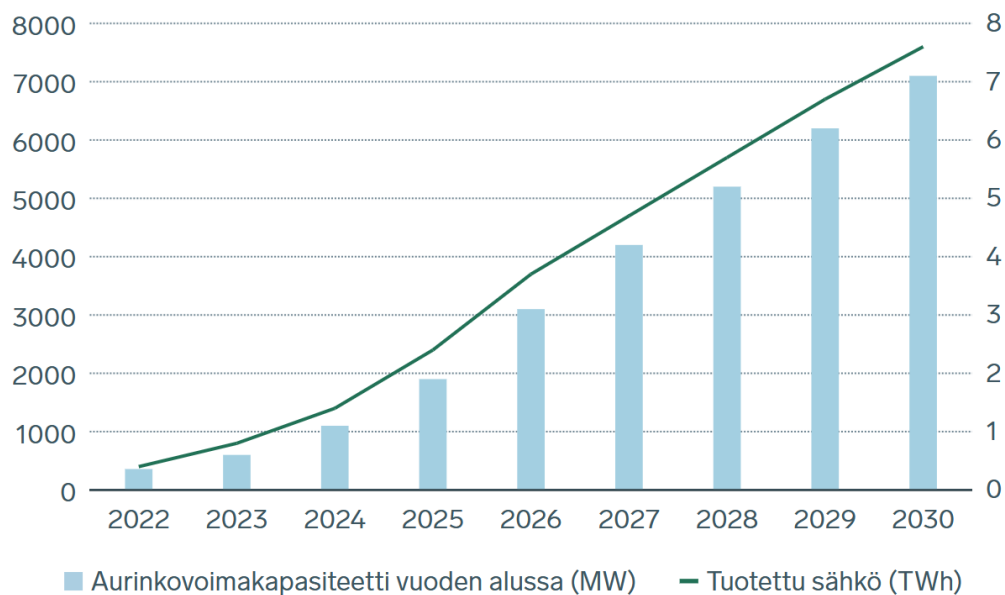
Tuulivoiman tuotantokapasiteetti ja sähköntuotanto



KUVIO 2. Suomen tuulivoimakapasiteetin kasvuennuste vuosina 2022–2030 (Fingrid 2023a)

Aurinkovoiman lisääntyminen Suomessa on aurinkokennojen kustannuksien laskemisen, sekä täten tuotannon kannattavuuden kasvun myötä johtanut suurten mittakaavojen voimalaitoksien investointien määrään nousuun. Vuoteen 2030 mennessä aurinkovoiman vuosittainen tuotantokapasiteetti saattaakin jopa kymmenkertaistua vuoden 2023 kapasiteettiin verrattuna (kuvio 3). (Fingrid 2023a, 79).

Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti ja sähköntuotanto



KUVIO 3. Suomen aurinkovoimakapasiteetin kasvuennuste vuosina 2022–2030 (Fingrid 2023a)

2.1 Nopea taajuusreservi (FFR)

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla lanseerattiin toukokuussa 2020 uusi markkinatuote sähköverkkojen matalan inertian tilanteille, nopea taajuusreservi (FFR), jolla pyritään tuottamaan aiempia reservituotteita nopeammalla varoitusaajalla markkinaehtoisesti sähköverkkoon synteettistä, verkon taajuutta tukevaa inertiaa. Sähkömarkkinoilla ennestään käytössä olleet reservituotteet poikkeavat käyttötarkoitukseltaan ja aktivointinopeudeltaan nopeasta taajuusreservistä (kuva 1).

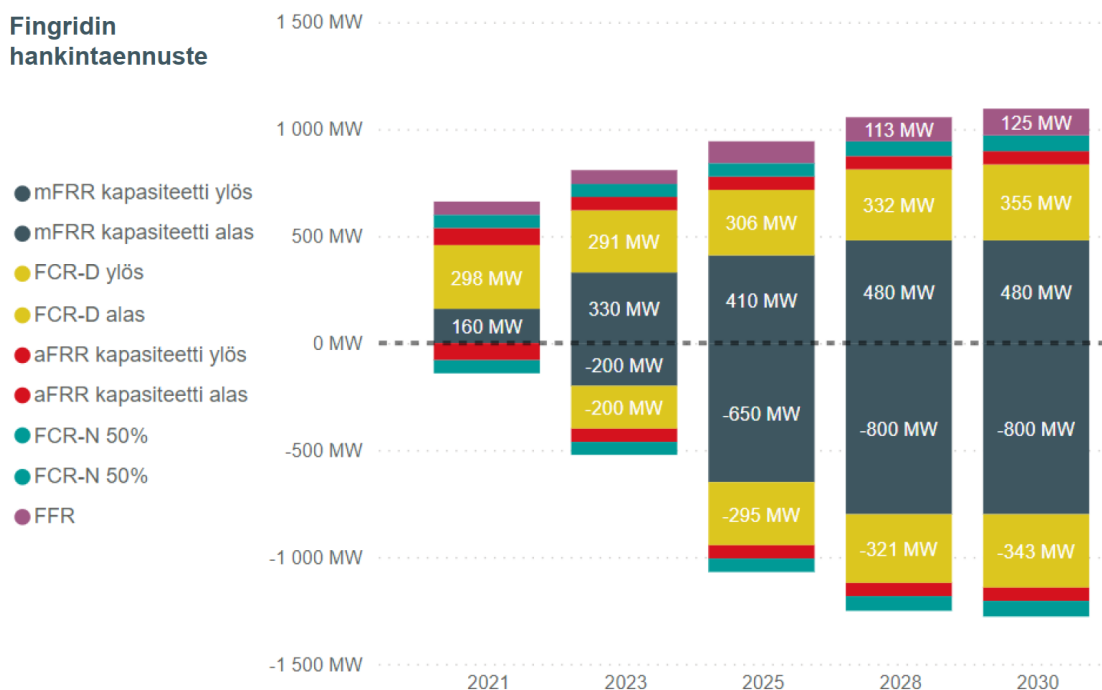
	FFR	ED	FCR-N	aFRR	mFRR
	Nopea taajuusreservi, Suomi 20 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi 290 MW, Pohjoismaissa 1 450 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi 120 MW, Pohjoismaissa 600 MW	Automaattinen taajuudenhallinta-reservi, Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoittava vika + tasevastaavien tasevirhe
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Parissa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa
					

KUVA 1. Reservimarkkinat suomessa (Fingrid 2019)

Reservikohteet myyvät energiavarastojensa kapasiteettia reservitoimittajien kautta järjestelmävastaavien (i.e kantaverkkoyhtiöiden) käyttöön matalan inertian hetkillä. Nopean taajuusreservin aktivointiaika on reservikohteen sopimuksesta riippuen alle 0,7–1,3 s. Reservikohteet voivat osallistua taajuusreservitoimintaan joko vaihtamalla tehon syöttösuunnan sähköverkon suuntaan, tai vähentämällä omaa kulutustaan hetkellisesti aktivointiajanjakson puitteissa. (Fingrid 2023d, 5)

Nopean taajuusreservin arvioitu tarve on tällä hetkellä pohjoismaissa korkeintaan 300 MW (Fingrid n.d). Vuonna 2024 pohjoismaiden nopean taajuusreservin kokonaistarpeista 35 prosentista vastaa Ruotsin kantaverkkoyhtiö Svenska kraftnät, 39 prosentista Norjan kantaverkkoyhtiö Statnett, 18 prosentista Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid, sekä 8 prosentista Tanskan Energinet (Svenska kraftnät 2024).

Fingridiltä veloitettu osuus yhteisen Pohjoismaisen nopean taajuusreservimarkkinan kapasiteetista on vuonna 2024 n. 60 MW, ennusteena vuoteen 2030 mennessä hankintakapasiteetin odotetaan kasvavan noin 125 MW:n (kuvio 4).



KUVIO 4. Fingridin hankintaennuste reservituotteille (Fingrid 2023b)

2.2 Datakeskukset

Digitalisaation myötä on serveritoiminnan sekä datankäsittelyn merkitys yhteiskunnassa kasvanut vuosi vuodelta merkittävämmäksi. Datakeskukset ovat teollisia laitoksia, joiden sisältämät suuria datamääriä käsittelevät palvelimet vaativat toimiakseen huomattavasti sähköenergiaa. Suurten kokoluokkien datakeskusten sähkön kulutus vaihtelee kymmenistä megawateista, tekoälybuumin myötä jopa satoihin megawatteihin (Singh & Spencer 2024). Korkeat tehot vaativat ympärilleen toimivan ja luotettavan infrastruktuurin, jotta liiketoiminta olisi mahdollisimman kannattavaa.

Pohjoismaiden ilmastolliset olosuhteet, ympäristöystävällinen sähköenergian tuotanto, verrattain edullinen sähkönhinta, sekä vakaa poliittinen tilanne ovat osaltaan edesauttaneet datakeskus investointien lisääntymistä. Ympäristön lämpötila on merkittävä tekijä datakeskusten jäähdytyskustannuksien minimoinnissa, viileää ulkoilmaa pystytään hyödyntämään energiatehokkaasti konealien jäähdytyksessä. Datakeskustoimijan energiakustannukset Pohjoismaissa voivat potentiaalisesti olla jopa 80 % pienemmät, keski-Euroopan vastaavista kokonaiskustannuksista. (Verne 2024)

Pohjoismaiden datakeskusektorin kasvu viime vuosina ollut merkittävää. EMEA-alueella (Eurooppa, Lähi-Itä, Afrikka), investoinnit Pohjoismaiseen datakeskus liiketoimintaan kattavat noin 12 % koko alueen investoinneista. (Albers 2024).

Datakeskuksien lisääntyminen on mahdollistanut niiden hyödyntämistä paikallisen infrastruktuurin kehittämisessä sekä mahdollistanut lämmön- ja sähköntuotannon sektori-integraation. Pohjoismaissa laajojen kaukolämpöverkkojen avulla datakeskuksien hukkalämpöä on pystytty hyödyntämään lähialueilla monessa tarkoituksessa. Suomessa datakeskukset voivat saada merkittävän veroedun, jos konesalien hukkalämpöä hyödynnetään keskuksen ulkopuolella (Kähkönen & Tauriainen 2024).

Datakeskuksien täytyy olla kykeneviä sähköverkon mahdollisten häiriöiden aikana varmistamaan katkoton sähkönsyöttö konesalien toiminnan jatkumisen takaamiseksi. Konesalien käyttöaste pyritään pitämään mahdollisimman korkeana, jotta liiketoiminta olisi jokaisella ajanhetkellä mahdollisimman tuottoisaa. Lyhytkin katkos tuotannossa saattaa aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä. Sähkönsyötön varmistamiseksi poikkeustilanteissa, datakeskuksissa hyödynnetään erilaisia vikatilanteiden kestoista riippuvia varavoimaratkaisuja, tai redundanttisia syöttösuuntia. Redundanttisuudella tarkoitetaan sähkötekniikassa järjestelmän kykyä korvata kuormaa syöttävä pääasiallinen sähkönjakelu suunta syöttösuunnan estyessä vika- tai muissa poikkeustilanteissa, varmistamalla vaihtoehtoisilla syöttösuunnilla kuormalle katkottoman teholähteen. (Lovett 2024)

Tyypillisesti datakeskuksien varavoimaratkaisuna käytetään diesel generaattoreita. Pääasiallisen syöttösuunnan katketessa, diesel generaattoreiden täysitehoiseen käynnistymiseen kuluu kuitenkin kymmeniä sekunteja. Sähköverkon syötön katkeamisen, ja generaattorin käynnistymisen välinen aika täytetään UPS-järjestelmään liitetyn akuston avulla. UPS (uninterruptible power supply), eli katkoton sähkönsyöttö, varmistaa akustoillaan, että liiketoimintaa kyetään jat-

kamaan häiriöttä niin kauan, että varavoima käynnistyy ja toimii täydellä teholla. UPS-varmennetun kuorman määrä korreloi tarvittavan akkukapasiteetin kokonaisuutta. (Borgini 2024)

2.3 Reservitoiminta

Datakeskuksien akkuvarmennetut UPS-järjestelmät soveltuvat reservituotteista parhaiten nopeaan taajuusreserviin, reservituotteen verrattain lyhyen aktivointiajanjaksonsa takia. Nopeaan taajuusreserviin liitetyt UPS-järjestelmät saavat sähköverkon reaaliaikaiset tilatiedot reservitoimittajalta järjestelmään kytketyn ohjausjärjestelmän avulla. UPS-järjestelmän aktivointi nopeaan taajuusreserviin tapahtuu automaattisesti sopimusehtojen mukaisten parametrien täytyttyä ohjausjärjestelmään kytketyn antennin kautta. Aktivointikäskyn tullessa on reservikohde velvollinen toimittamaan sopimuksessa määritetyn tehokapasiteetin ennalta määritetyn aktivointiajan kuluessa (0,7; 1; tai 1,3 s). Nopean taajuusreservin aktivoinnin kesto on sopimuksen mukaisesti 5 sekuntia tai 30 sekuntia. Reservikohde pystyy osallistumaan FFR-toimintaan syöttämällä tehoa verkon suuntaisesti, tai vähentämällä verkosta otettua tehoa hyödyntämällä akkukapasiteettiaan kuormansa syöttämiseen.

Nopean taajuusreservin järjestelmävastaavat hankkivat kilpailuttaen kansallisilta FFR-markkinoilta tuntikohtaiset tarjoukset edellisenä päivänä seuraavalle vuorokaudelle. Reservitoimittaja voi jättää useita tarjouksia FFR-markkinoille, jättämän tarjouksen vähimmäiskapasiteetti nopealle taajuusreserville on 1 MW, enimmäiskapasiteetti 10 MW, tarjouksien tarkkuus on 0,1 MW. FFR-tarjouksen täytyy sisältää seuraavat tiedot:

- tyyppi (tuotanto, kulutus tai aggregoitu)
- kapasiteetti (MW)
- kapasiteetin hinta (€/MW, h)
- tunti

(Fingrid 2024, 6)

Järjestelmävastaava hyväksyy tarjoukset hintajärjestyksessä halvimmasta tarjouksesta alkaen (kapasiteetin hinta), tarjouksen saapumisaika prioriteettina tar-

jouksien hinnan ollessa samat. Järjestelmävastaava maksaa kapasiteettikorvauksen reservitoimittajalle mittauksin todennetun kapasiteetin mukaisesti, mikäli reservitoimittaja ei kykene toimittamaan sopimuksen mukaista reserviä, sanktiot vähennetään laskutusjakson kapasiteettikorvauksista. Kapasiteettikorvauksen sekä sanktioiden suuruudet määräytyvät seuraavasti (Fingrid 2024, 9):

- Kapasiteettikorvaus (€) = ylläpidetty reservikapasiteetti (MW,h) × FFR-markkinoiden hinta (€/MW,h) – sanktiot (€)
- Sanktio (€) = toimittamaton reservikapasiteetti (MW,h) × 3 × FFR-markkinoiden hinta kyseiseltä tunnilta (€/MW,h)

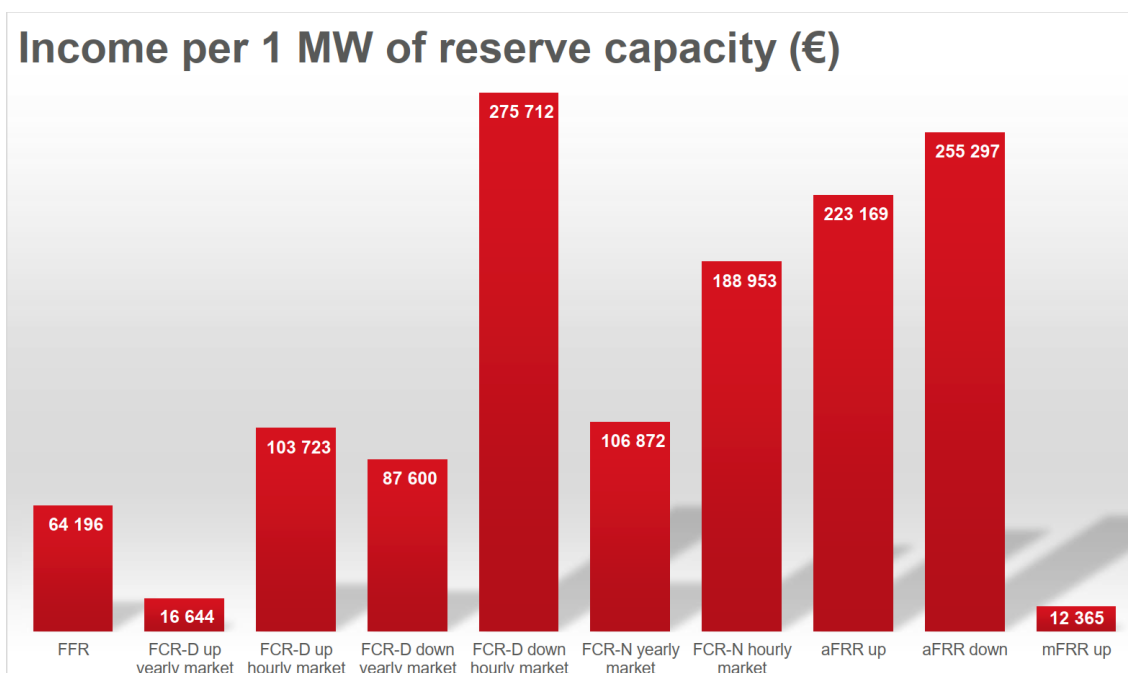
Mikäli reservikapasiteetin toimittamisen estymisen syynä on ennalta-arvaamaton ylitsepääsemätön este, kuten esimerkiksi poikkeukselliset sääolosuhteet tai ilkkivalta, ei sanktioita määräydy (Fingrid 2024, 9). Järjestelmävastaava on oikeutettu tarkistamaan reservikohteiden säätöominaisuudet, mikäli tarkistuksessa tai muussa sopimusehtojen mahdollistamista kokeista ilmenee sovitusta poikkeava reservikapasiteetin suuruus tai säätökyky, on reservitoimittaja velvollinen korvaamaan kantaverkkoyhtiölle suurempaan kapasiteettiin perustuen takaisin reservitoiminnasta aiemmin maksetut tulot (Fingrid 2024, 10).

Reservitoimittaja voidaan sulkea tilapäisesti (1–3 kk) pois FFR-markkinoilta jonkun seuraavista ehdoista täytyttyä:

- Reservitoimittaja jättää ilman hyväksyttävää syytä reserviä toimittamatta, järjestelmävastaavan huomautuksesta huolimatta
- Reservitoimittaja on muuttanut säätöasetuksia tietoisesti siten, että säätöominaisuudet ovat muuttuneet merkittävästi
- Reservitoimittaja on jättänyt tekemättä järjestelmävastaavan vaatiman reservin säätöominaisuuksien tarkistuksen
- Reservitoimittaja on rikkonut nopean taajuusreservin sopimuksessa hyväksymiään reservitoimittajan ehtoja ja edellytyksiä

(Fingrid 2024, 11)

Kuviossa 5 nähdään esimerkki nopean taajuusreservitoiminnan vuotuisella tasolla kertyneiden tulojen määrästä euroissa, yhden megawatin kapasiteettia kohden, nopean taajuusreservin keskihinnan ollessa 45,4 €/MW/h. Muihin tuoteteisiin verrattuna



KUVIO 5. Reservituotteiden vuotuiset ansiot euroissa yhden megawatin kapasiteettia kohden (Fingrid 2023c, 19)

Nopean taajuusreservin vuosituotot ovat muihin taajuusreservituotteisiin verrattuna suhteellisen matalat FFR:n lyhyen aktivointiajan, ja täten reservikohteelle liiketoiminnan kannalta minimaalisten vaikutuksien takia (kuvio 6).

Minimum dimensioning for continuous activation at full reserve power

FFR	Fast Frequency Reserve	5-30 s
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbances	20 min
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Normal Operation	1 h (for both up and down regulation)
aFRR	Automatic Frequency Restoratin Reserve	1 h
mFRR	Balancing Energy Market	1 h
mFRR	Balancing Capacity Market	3 h

KUVIO 6. Reservituotteiden aktivointiajat (Fingrid 2023c, 21)

3 TAAJUUSRESERVIMARKKINOIDEN TEKNISET VAATIMUKSET

Reservikohteen liittäminen nopeaan taajuusreserviin vaatii reservitoimittajalta kantaverkkoyhtiön asettamien vaatimusten noudattamista. Reservitoimittajan ei tarvitse olla reservikohteen omistaja, mutta sillä täytyy olla reservikohteen omistajan kirjallinen hyväksyntä reservitoimittajan ja kantaverkkoyhtiön välisen FFR-markkinasopimuksen toimeenpanemisesta ja sopimuksen mukaisesta reservin hyödyntämisestä (Fingrid 2024, 4). Reservitoimittajan tulee osoittaa, että reservikohte täyttää kantaverkkoyhtiön asettamat vaatimukset todentamalla säätökokein säätöominaisuuksien toteutuminen (Fingrid 2024, 5).

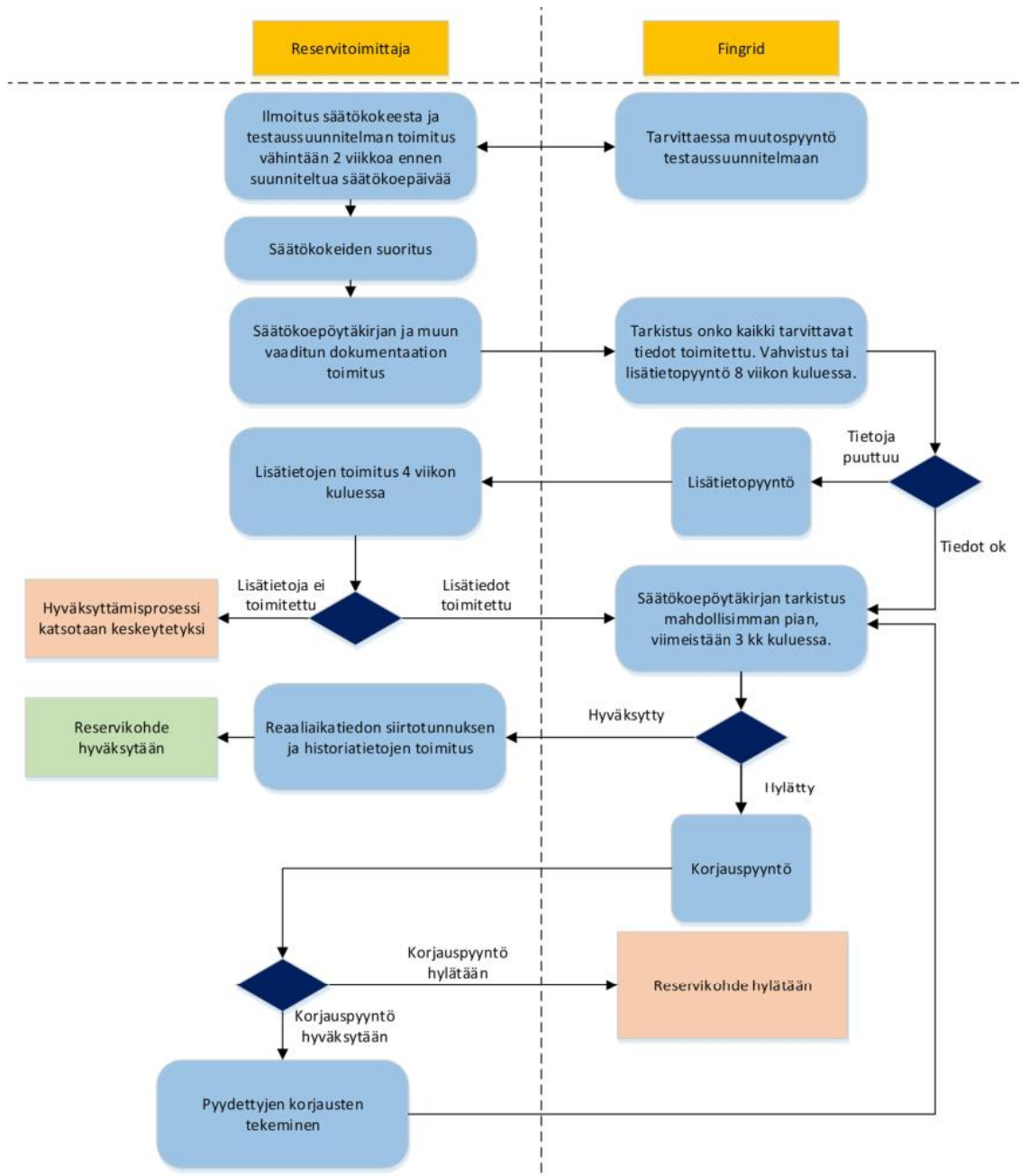
Saareketilanteessa, jossa sähkön tuonti muista sähköverkoista ei ole mahdollista, eikä nopea taajuusreservi kykene kattamaan tuntikohtaista reservitarvetta, on kantaverkkoyhtiö oikeutettu velvoittamaan reservitoimittajaa pitämään kaikkia reservikohteitaan taajuussäädöllä korvausta vastaan. Reservitoimittaja toimittaa järjestelmävastaavalle reaaliaikaista tietoa reservikohteittain reservikapasiteetin määrästä, sekä historiatietoa, jotta järjestelmävastaava kykenee todentamaan reservikohteiden aktivoitumishistorian. (Fingrid 2024, 5)

3.1 Reservikohteen hyväksyttämisen prosessi

Reservikohteen hyväksyttämisen prosessin kulku noudattaa kuvioa 4. Reservitoimittaja laatii ja toimittaa kantaverkkoyhtiölle säätökokeen toteutussuunnitelman vähintään kaksi viikkoa ennen kokeiden suorittamista. Jos reservikohteena on energiavarasto, täytyy seuraavat tiedot lähettää kantaverkkoyhtiölle:

- nimellisteho (MW)
- energiakapasiteetti (MWh)
- varaustason ylä- ja alaraja (MWh tai %)
- tekninen kuvaus säätöjärjestelmän toiminnasta, mukaan lukien mahdollinen varaustason hallinta

(Fingrid 2023d, 4)



KUVIO 7. Hyväksyttämisen prosessin kulku (Fingrid 2023d, 3)

Säätökokeella todennetaan vaatimusten täyttyminen tavanomaisessa käyttötilanteessa, sekä todennetaan kaikkien säätöasettelujen toiminta. Varsinainen säätökoe toteutetaan reservikohteen pienimmällä ja suurimmalla kapasiteettiarvolla. Mikäli teknisten vaatimusten täyttyminen ei ole riippuvainen kapasiteetin määrästä, voidaan kantaverkkoyhtiön kanssa yhteisesti sovittuna jättämään pienemmän kapasiteettiarvon testaukset tekemättä. Säätökokeissa määritetään reservikohteen kapasiteetti, joka voidaan tarjota reservimarkkinoiden käyttöön. Reservikapasiteetin tehomäärän tarkkuus määritellään taulukon 1 mukaisten kategorioiden mukaan:

- Kattegoria A: 0,01 MW tarkkuudella
- Kattegoriat B & C+D: 0,1 MW tarkkuudella

TAULUKKO 1. Pätötehomittauksen tarkkuusvaatimukset (Fingrid 2023d, 10)

Kattegoria	Nimellisteho	Sallittu epätarkkuus
A	$P < 1,5 \text{ MW}$	$\pm 5 \%$
B	$1,5 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$\pm 1 \%$
C+D	$\geq 10 \text{ MW}$	$\pm 0,5 \%$

Nopean taajuusreservin säätökokeet suoritetaan sähköverkkoon kytkettynä, muut mahdolliset reservituotteet pois kytkettynä. Testisignaalina käytetään syn-teettistä taajuussignaalia, jolla simuloidaan aktivointitaajuusarvoa. Mittaukset aloitetaan vähintään kaksi minuuttia ennen testisignaalin syöttämistä, ja jatke-taan koko aktivointisyklin ajan deaktivoinnista seuraavan aktivoinnin valmiusti-laan saakka.

Säätökokeiden valmistuttua dokumentaatio toimitetaan kantaverkkoyhtiölle. Va-paamuotoiseen säätökoepöytäkirjaan tulee sisällyttää seuraavat tiedot:

- mittauksien suoritus päivämäärä,
- reservikohteen nimi,
- valittu aktivointitaajuus, sekä
- mittaustulosten perusteella piirretty kuvaaja testitaajuudesta ja pätöte-hosta ajan suhteen.

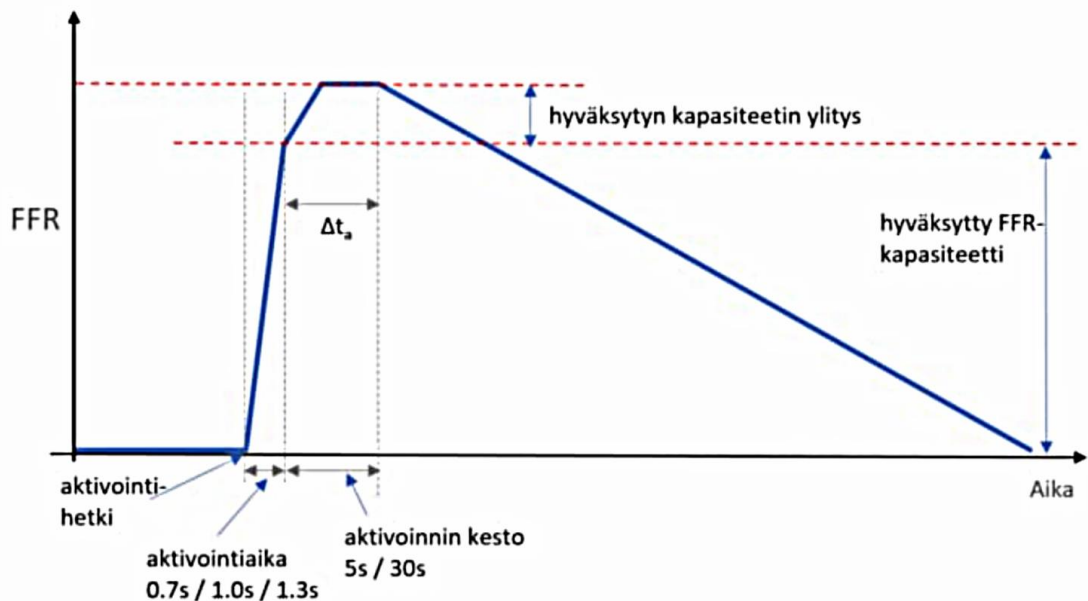
(Fingrid 2023d, 11)

Mikäli tarpeellista, reservitoimittaja toimittaa kantaverkkoyhtiölle tarvittavat lisä-tiedot, sekä suorittaa säätökoepöytäkirjan tarkistuksessa ilmenneet korjaus-pyyntöet ennen reservikohteen hyväksyntää. (Fingrid 2023d)

3.2 Reservikapasiteetin aktivointi

Reservitoimittaja mittaa sähköverkon taajuutta itse valitsemassaan pisteessä alu-eellista sähköenergiajärjestelmää. Reservitoimittajalta vaadittu taajuusmittauk-

sen tarkkuus on vähintään 10 mHz, näytteenottoväli saa olla korkeintaan 0,1 sekuntia. Sähköverkon taajuuden alittaessa asetetut taajuusarvot lähetetään reservikohteeseen automaattisesti aktivointikäsky, jolloin kohteen energiavarastot alkavat aktivointiajan kuluttua syöttämään hyväksytyin kapasiteetin mukaisen tehomäärän takaisin sähköverkkoa kohti (kuvio 8).



KUVIO 8. Nopean taajuusreservin aktivointi (Fingrid 2023d, 6)

Reservin aktivointiajalla tarkoitetaan aktivoinnin ja hetken, jolla reservikohte saavuttaa koko FFR- toimintaan hyväksytyin kapasiteettinsa välistä aikaa. Reservitoimittaja valitsee reservikohteelle yhden taulukon 2 mukaisen aktivointitaajuus / -aika yhdistelmän.

TAULUKKO 2. Reservin aktivointi taajuudet ja ajat (Fingrid 2023d, 5)

Aktivointitaajuus (Hz)	Aktivointiaika (s)
≤ 49,7	≤ 1,3
≤ 49,6	≤ 1,0
≤ 49,5	≤ 0,7

Nopean taajuusreservin aktivoinnin vähimmäiskestolle on kaksi vaihtoehtoa (taulukko 3). Aktivoinnin kesto on verkon taajuudesta riippumaton arvo, eli vaikka aktivointitaajuus ylittyy aktivoinnin vähimmäiskeston aikana, ei aktivointi kuitenkaan

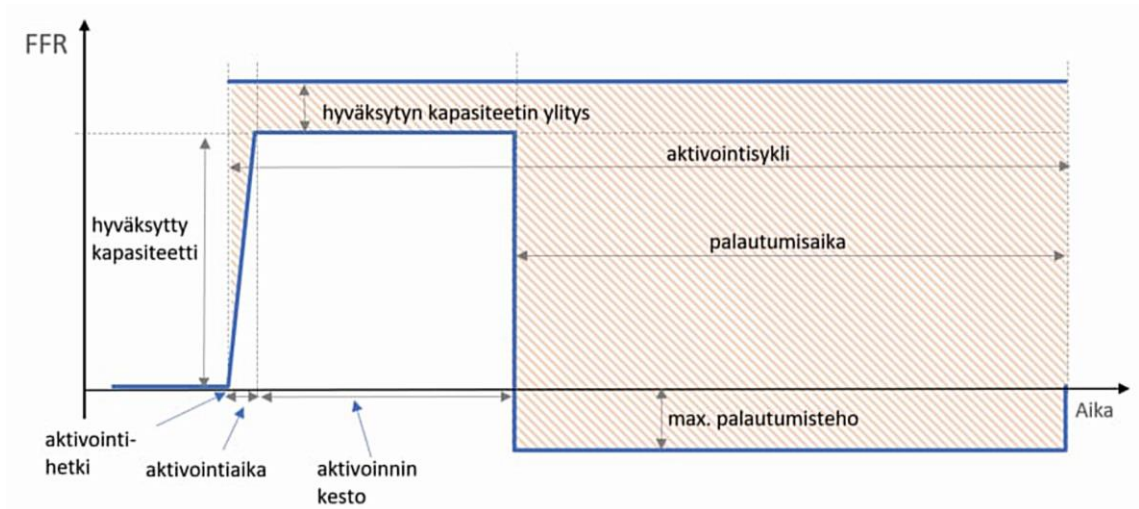
keskeydy. Reservikohteen palautumista aktivointia edeltävään tilaan, eli deaktivoitua, rajoitetaan aktivoinnin aikana vain, jos aktivoinnin vähimmäiskesto on 5 sekuntia, missä tapauksessa tehon sallitaan laskevan korkeintaan 20 % reservikapasiteetista sekuntia kohden. Jos deaktivoinnin nopeus ylittää 20 % raja arvon, kasvaa aktivoinnin vähimmäiskesto 30 sekuntiin.

TAULUKKO 3. Nopean taajuusreservin vähimmäiskesto (Fingrid 2023d, 5)

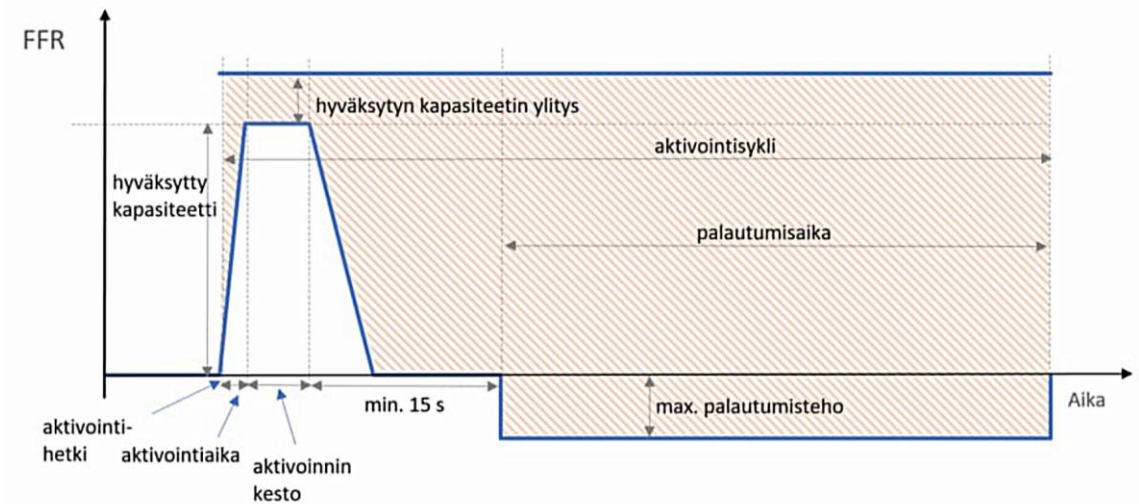
Aktivoinnin vähimmäiskesto (s)	Deaktivoinnin maksiminopeus
30 s	ei rajoitettu
5 s	enintään 20 % reservikapasiteetista sekunnissa

3.3 Reservikapasiteetin palautuminen ja uudelleen aktivoituminen

Nopeaan taajuusreserviin liittyvän reservikohteen palautumiselle ja uudelleen aktivoitumiselle reservikapasiteetin deaktivoinnin jälkeen on vaatimuksena 15 minuuttia. Vaikka reservikohde kykenisi alle 15 minuutin palautumiseen, täytyy sen joka tapauksessa olla aktivointikykyinen 15 minuutin kuluttua edellisestä aktivoinnista. Reservikapasiteetin palautumiseen käyttämä teho saa olla korkeintaan 25 % hyväksytystä kapasiteetista. Aktivointiajaltaan 30 sekunnin reservikohde voi aloittaa aktivointisyklinsä palautumisajan välittömästi aktivoinnin jälkeen (kuviot 9), kun taas 5 sekunnin aktivointiajan reservikohteen täytyy odottaa vähintään 15 sekuntia aktivoinnin jälkeen, ennen kun kohteen energiavarastojen palautumisen voi aloittaa (kuviot 10). Aktivointisykli on 15 minuuttia riippumatta varsinaisen aktivoinnin kestosta. (Fingrid 2023d, 6)



KUVIO 9. Nopean taajuusreservin aktivointisykli, 30 s aktivointiajalla (Fingrid 2023d, 7)



KUVIO 10. Nopean taajuusreservin aktivointisykli, 5 s aktivointiajalla (Fingrid 2023d, 7)

4 AKKUTEKNOLOGIAT OSANA VARAVOIMAJÄRJESTELMIÄ

Tyypillisesti kunkin energiavaraston hankinnassa datakeskus ympäristöön täytyy akkuteknologioiden tekniset ominaisuudet ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Akkujen vaatima tila, käyttöikä, tekniset ominaisuudet, sekä elinkaarikustannukset asettavat rajoituksia akkuteknologioiden valinnan suhteen.

Viime vuosiin asti yleisin akkuteknologia datakeskuksissa on ollut lyijyhappoakku, mutta litiumioniakut ovat enenevässä määrin korvanneet ne. Litiumioniakut soveltuvat teknisiltä ominaisuuksiltaan erinomaisesti datakeskusten käyttötarkoituksiin. Akkujen suuri energiatiheys mahdollistaa akustojen vaatiman pinta-alan minimoimisen verrattuna vastaavan teholuokan lyijyakustoihin. Hankintakustannukset ovat kuitenkin litiumioniakkujen suurin kynnyskysymys. (Titanpower 2018)

Vaihtoehtoisten akkuteknologioiden kehitystyötä on edesauttanut litiumioniakkujen raaka-aineiden saatavuus ja tuotantolinjastojen geopoliittinen keskittymien. Huoltovarmuus sekä ekologisuus ovat olleet johtavia tekijöitä litiumakkuja haastavien teknologioiden kehittämisen investoinneissa. Akkuteknologioiden teknisten ominaisuuksien sekä kustannuksien täytyy olla verrannollisia litiumioniakkuihin käyttökohteissaan, mikäli teknologioilla pyritään murtautumaan samoille markkinoille. (Stephan 2024)

4.1 Akustot

Varavoimajärjestelmien akustot koostuvat sarjaan- ja rinnankytkettyjen akkukennojen kokonaisuuksista, jotka on sijoitettu kompakteihin akkukaappeihin tai -hyllyihin. Kennojen sarjakytkennällä akuston jännite saadaan nostettua riittävän korkealle, jotta akustolta UPS-järjestelmälle syötetty virta, ja täten tehonsyötön lämpöhäviöt jäävät mahdollisimman pieniksi. Rinnankytkennällä akustojen kapasiteetti, eli tehonsyöttökyky kasvatetaan varmennetun jakelun varakäyntiajan vaatimalle tasolle. (Andersen 2023)

Akkukaappeihin on tyypillisesti integroituna akunhallintajärjestelmä, joka monitoroi akuston toimintaa, sekä yleistä kuntoa latauksen ja purkauksen aikana. Akunhallintajärjestelmä vastaa pääasiallisesti akkujen turvallisuudesta mittaamalla akkujen toiminnan kannalta relevantteja tehosuureita, ja varmistamalla täten, ettei akku pääse vahingoittamaan itseään tai ympäristöään ylikuormituksen tai muun vikaantumisen takia. (Andersen 2023)

Akustot voidaan sijoittaa joko omaan akkuhuoneeseensa tai yhteisiin sähkötiloihin. Erillisessä akkuhuoneessa tilan olosuhteiden hallinta on yksinkertaisempaa, mikäli akkutyypin lämpötila- ja kosteusvaatimukset edellyttävät tehokkaampaa kontrollia. Akkuhuone rajoittaa myös mahdollisten vikatilanteiden aiheuttamat riskit pienemmälle alueelle. Sijoittamalla akustot yhteiseen sähkötilaan muiden kojeistojen kanssa UPS-laitteiston ja akustojen välisten kaapeleiden pituus vähenee etäisyyksien pienentyessä. (Andersen 2023)

Akkujen varaustasoa ylläpidetään akkutyypistä riippuen eri metodein. Perusvarausmenetelmät ovat:

- Vakiovirtavarauus (CC)
- Vakiojännitevaraus (CV)

Akkujen varauksessa käytetään yleensä vakiovirta-, sekä vakiojännitevarausmenetelmien yhdistelmää, jotta akkujen varaustaso saadaan nostettua kapasiteetin ylärajalle mahdollisimman tehokkaasti. (SFS-EN IEC 62485-2 2018, 33)

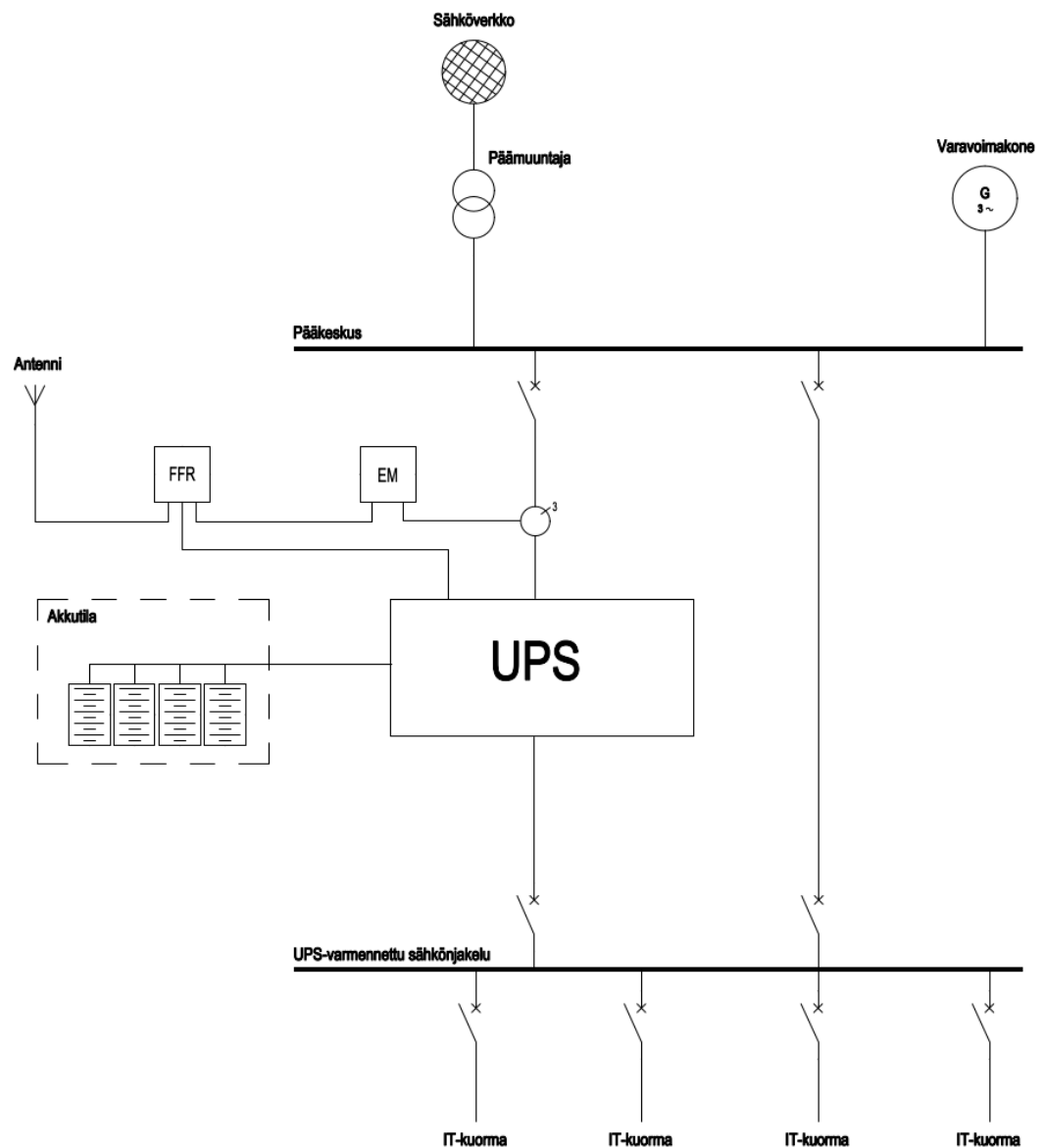
Akkujen varaustason ylläpito on haastavinta FFR-aktiivointisyklissä akuston palautumisajanjakson aikana, jolloin hyväksytyyn taajuusreservikapasiteetin sallittu verkosta otettu teho ei saa ylittää 25 % normaalista (Fingrid 2023d, 6). Akkujen palautuminen ja seuraavaan aktiivointisykliin valmistuminen saattaa akkutyypien varausominaisuuksista riippuen johtaa suunnitteluvaiheessa muuntajan, pääkeskuksen, UPS-laitteiston, sekä johdinjärjestelmien ylivoimittamiseen.

4.2 Nopean taajuusreservin ohjausjärjestelmä

UPS-laitteisto on datakeskuksissa osa yksittäisten muuntamoiden muodostamia jakelukokonaisuuksia, tai power blockeja. Varmennetun sähkönjakelun syöttö kulkee pääkeskukselta UPS-laitteiston välivirtapiiriin kautta UPS-varmennetulle

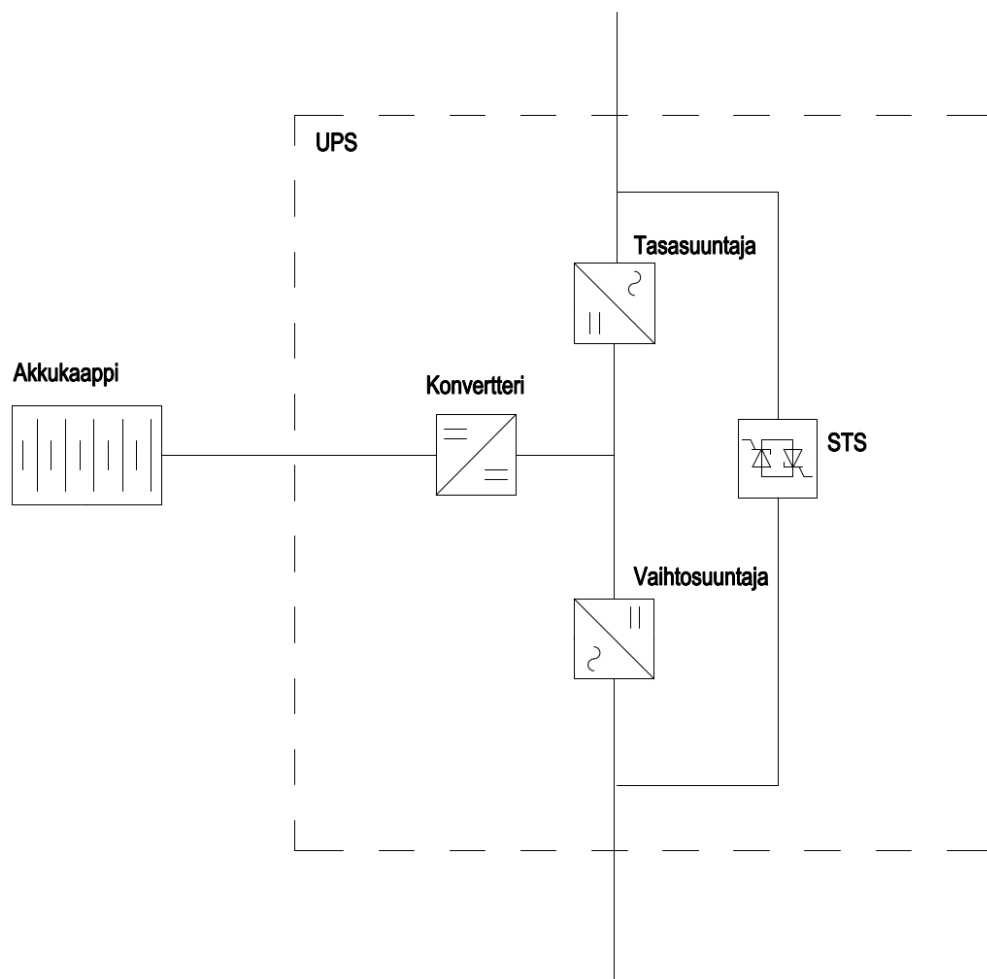
keskukselle. UPS-laitteiston sisäinen staattinen siirtokytkin (STS), sekä erillinen ohituskytkin varmistavat varmennetun sähköjakelun syötön UPS-laitteiston huolto- tai vikaantumistilanteissa. Pääkeskusta syöttävä sähköverkko ylläpitää UPS-laitteiston sisäisten suuntaajien avulla akuston varaustasoa, sekä mahdollistaa tehon syöttösuunnan muuttamisen verkon suuntaiseksi nopean taajuusreservin aktivointitilanteessa. (Loeffler & Spears 2020)

Sähköverkon taajuuden alittaessa ennalta asetellut raja-arvot, reservitoimittaja antaa automaattisesti aktivointikäskyn antennin kautta FFR-laitteistolle (ml. teollisuustietokone, energiamittari), joka puolestaan välittää käskyn UPS-laitteistolle (kuva 2).



KUVA 2. Esimerkki datakeskuksen power blockin jakelukaaviosta

Normaalitilanteessa varmennettu sähkösyöttö tapahtuu UPS:n välipiirin kautta (kuva 3). Tasasuuntaaja muuntaa UPS-laitteiston kaksoismuunnostilassa 400 V verkkojännitteen välipiirin jännitetasoon tasajännitteeksi, josta vaihtosuuntaajan kautta takaisin verkkojännitteenä kuormalle. Akustolla ylläpidetään DC-DC konverterin avulla välipiirin sähkönlaatua yhdessä järjestelmän sisäisten suotimien kanssa, mikä puolestaan pienentää sähköverkosta johtuvien taajuus- ja jännitehäiriöiden vaikutusta sähkönjakelun toimintaan. Staattinen siirtokytkin ohittaa katkottomasti välipiirin syötön kriittisessä vikatilanteessa, nopeammin kun mitä kuorma kykenee reagoimaan.



KUVA 3. UPS-järjestelmän välipiiri

Syöttävän sähköverkon katketessa, akuston täytyy kyetä syöttämään UPS-varmennettua kuormaa kokonaisuudessaan koko varakäyntiaikansa ajan, tai niin kauan, että varavoimakone toimii täydellä teholla ja kykenee kattamaan kuorman vaatiman sähköntarpeen.

Nopeaan taajuusreserviin liitetty UPS-järjestelmä saa aktivointikäskynsä teollisuustietokoneelta, johon on kytketty reservitoimittajaansa yhteydessä oleva antenni. FFR-sopimuksen mukaisen aktivointiaikamäärän jälkeen UPS-laitteisto lakkaa tehon syöttämisen verkkoon, ja alkaa lataamaan akustoja sopimuksessa asetettujen palautumisteho raja-arvoja noudattaen.

Joissain kohteissa toteutetuissa nopean taajuusreservin ratkaisuihin, FFR-laitteisto ei kykene todentamaan tai kommunikoimaan reservikapasiteetin aktivointia taajuusreservin käyttöön, vaan se kykenee vain vastaanottamaan aktivointikäskyn, eikä käskyn suorittamista käytännössä kyetä varmentamaan ilman erillisiä toimintatestejä.

4.3 Akustot datakeskuksissa

Akustot toimivat datakeskuksissa osana UPS-järjestelmää. IT-kuorma on herkkä sähkönlaadulle, eikä kestä katkoksia sähkönsyötössään. Jopa neljäsosa sekunnin katkos saattaa estää IT-laitteen käytön 15 minuutista useaan tuntiin (Loeffler & Spears 2020, 2). UPS-laitteiston elektroniikka ylläpitää akustoa hyväksikäyttäen varmennetun kuorman sähkönlaatua ja varmentaa täten katkottoman konesalitoiminnan.

Tyypillinen datakeskuksien UPS-järjestelmien akusto kykenee tarjoamaan varavoimaa 5–15 minuutin purkaussykleissä (Loeffler & Spears 2020, 5). Käytännössä akuston täytyy kyetä varmentamaan sähkön saanti niin kauan, että IT-laitteet saadaan ajettua alas hallitusti, tai kunnes varavoimageneraattori saadaan käynnistettyä. UPS-järjestelmä ylläpitää kuormaa generaattorin käynnistyessä ja siirtää kuorman synkronoidusti portaittain generaattorille täyden tehon saavutettuaan (Kohler 2023).

5 AKKUTEKNOLOGIOIDEN TEKNISET OMINAISUUDET

Akku on sähkökemialliseen reaktioon perustuva energiavarasto, joka kytetään uudelleen varaamaan purkautumisen jälkeen. Latautuneessa akussa positiivisesti varautuneen katodin ja negatiivisesti varautuneen anodin välillä vallitsee potentiaaliero, eli jännite. Kun akun navat yhdistetään galvaanisesti, virtaavat anodimateriaalin säilyttämät elektronit anodista katodiin ulkoisen virtapiirin kautta, ja katodimateriaalin säilyttämät positiivisesti varautuneet ionit akun elektrolyytin kautta anodiin. Purkautuessaan akun napojen välillä vallitseva jännite pienenee, niin kauan kunnes napojen varaustaso on samansuuruinen. Akkua ladatessa virran kulkusuunta on purkautumiseen nähden päinvastainen, kuten myös akkumateriaaleissa tapahtuva kemiallinen reaktio. (Bhatt, Forsyth, Withers & Wang n.d.)

Akut koostuvat anodista, katodista sekä elektrolyytistä. Kemiallista reaktiota jossa elektronit siirtyvät aineesta toiseen kutsutaan hapetus-pelkistysreaktioksi, tai redox-reaktioksi. Redox-reaktiossa molemmissa akun elektrodeissa tapahtuu yhtäaikaaisesti toinen puolireaktioista, joko hapetus- tai pelkistysreaktio. Hapetusreaktiossa elektrodiaine menettää elektroneja. Pelkistysreaktiossa elektrodiaine vastaanottaa elektroneja. (Bhatt et al. n.d.)

Akun napojen toiminta perustuu interkalaatioon, eli anodi- ja katodimateriaalien kemialliseen kykyyn sitoa varautunut partikkeli kerrosmaisesta rakenteestaan ilman kahden aineen välisen kovalenttisen sidoksen muodostumista. Kulakin aineella on ominainen pelkistymispotentiaalinsa, joka ilmaisee aineen taipumusta elektronien vastaanottamiseen ja täten pelkistymiseen. Pelkistymispotentiaali, tai redoxpotentiaali ilmaistaan verrannollisena jännitteenä vetyatomien sähkökemiallisen potentiaaliin, missä atomi menettää elektroninsa 25°C lämpötilassa. Vedyn normaalipotentiaali E^0 , on täten 0 V. Aineen normaalipotentiaali kertoo kuinka hyvän hapetus- tai pelkistymisreaktion se omaa. (Bhatt et al. n.d.)

Taulukossa 4 nähdään puolireaktioiden normaalipotentiaalit. Reaktionuolen vasemmalla puolella nähdään kunkin aineen hapettunut muoto, ja oikealla pelkis-

tynyt muoto. Puolireaktiossa positiivisesti varautuneet ionit, eli kationit, ja negatiivisesti varautuneet ionit eli anionit, muodostavat elektronien kanssa yhdistyessään sähköiseltä potentiaaliltaan eriävän kemiallisen yhdisteen. Esimerkkinä litiumatomien hapetusreaktiossa litiumatomista irrottautuu elektroni, synnyttäen samalla positiivisesti varautuneen litiumionin ja yhden vapaan elektronin. Normaalipotentiaaliltaan negatiiviset puolireaktiot ovat vahvoja pelkistimiä, kun taas positiiviset puolireaktiot ovat vahvoja hapettimia. (Bhatt et al. n.d.)

TAULUKKO 4. Aineiden normaalipotentialit 25°C lämpötilassa (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2020, 197)

Normaalipotentialiarvot mitattu +25. °C:ssa normaalivetyelektrodiin NHE nähden.

Pelkistymisreaktio	Normaalipotentiali E^0/V
$\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$	-3,05
$\text{K}^+ + e^- \rightarrow \text{K}$	-2,93
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Ca}$	-1,66
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$2 \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow 2 \text{OH}^- + \text{H}_2$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,40
$\text{PbSO}_4 + 2e^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,35
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Co}$	-0,28
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,25
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	-0,00
$\text{Sn}^{4+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	+0,15
$\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$	+0,15
$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,20
$\text{AgCl} + e^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0,22
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$ (kyll. KCl)	+0,22
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,34
$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$	+0,40
$\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,52
$\text{I}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{I}^-$	+0,53
$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- \rightarrow 2 \text{Hg}$	+0,79
$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,80
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \rightarrow \text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,96
$\text{AuCl}_4^- + 3e^- \rightarrow \text{Au} + 4 \text{Cl}^-$	+1,00
$\text{Br}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{Br}^-$	+1,07
$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6e^- \rightarrow 7 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{Cl}^-$	+1,36
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,46
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	+1,50
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1,52
$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,68
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,52
$\text{Co}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	+1,82
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-}$	+2,01
$\text{F}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{F}^-$	+2,87

Hapettimen vahvuus kasvaa ↓
Pelkistimen vahvuus kasvaa ↑

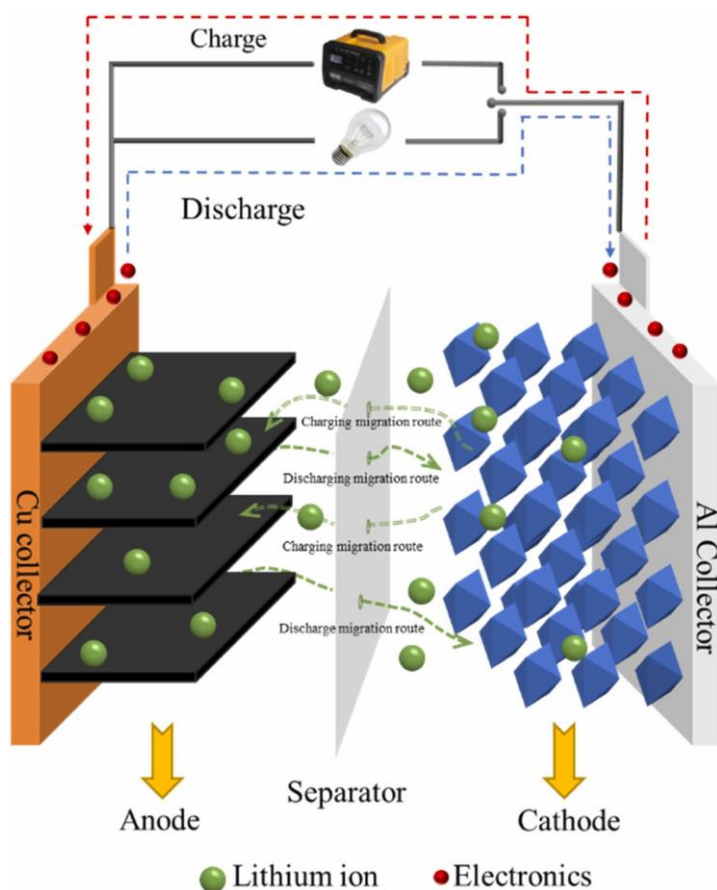
Anodi- ja katodimateriaalien muodostaman sähköisen parin välinen jännite, tai elektrodipotentiali E^0_{kenno} määrittelee akun kennokohtaisen napojen välisen

jännitteen. Taulukon 4 vahvin pelkistin litium ja vahvin hapetin fluoridi muodostaisivat teoreettisena anodi–katodi parina potentiaaliltaan parhaan sähkökemiallisen parin (kaava 1), mutta käytännössä akun anodi–katodi yhdistelmän valintaan vaikuttaa vahvasti kemiallisten reaktioiden aiheuttamat haasteet ja epävakaudet. (LibreTexts n.d)

- Anodi (hapetusreaktio): $\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li} \quad : \quad E^0 = -3,05 \text{ V}$
- Katodi (pelkistysreaktio): $\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^- \quad : \quad E^0 = +2,87 \text{ V}$

$$E^0_{\text{kenno}} = E^0_{\text{katodi}} - E^0_{\text{anodi}} = 2,87 \text{ V} - (-3,05 \text{ V}) = 5,92 \text{ V} \quad (1)$$

Akkua purkaessa positiivisesti ja negatiivisesti varautuneiden elektrodien yhdistyksessä syntyy potentiaalien välille galvaaninen yhteys. Negatiivisesti varautunut anodi luovuttaa ylimääräiset elektroninsa positiivisesti varautuneelle katodille. Metallioni akkujen tapauksessa akkukennossa anodin ja katodin välinen elektrolyytti sallii positiivisesti varautuneiden ionien kulun tasapainottamaan elektronien virtausta ulkoisessa virtapiirissä. Reaktiivisten komponenttien väliset kemialliset reaktiot saattavat aiheuttaa resistiivisen kuona-aineen kasautumista napojen materiaalien ympärille, mikä heikentää akun toimintaa sekä lyhentää sen käyttöikää. Pelkistymis- ja hapettumisreaktioiden aiheuttama elektronien ja ionien virtaus väliaineissa vähentää akun varaustasoa, ja napojen potentiaaliero pienenee. Akun kytkeytyessä ulkoiseen virtalähteeseen, aiheuttaa latausvirta akun purkaukseen verrattuna vastakkaisen reaktion napojen anodi- ja katodimateriaaleissa (kuvio 11). Akun latautuessa varaustaso nousee, ja napojen välinen potentiaaliero kasvaa. (Bhatt et al. n.d.)



KUVIO 11. Litium-ioni akun toimintaperiaate (Yin, Du, Shi, Cao, Wu & Zheng 2023)

Akkukemikaalien reaktiivisten luonteiden takia saattaa tietyissä normaalikäytöstä poikkeavissa tilanteissa aiheutua akun sisäisesti haitallisia reaktioita. Reaktioista saattaa vapautua ympäristölle haitallisia kaasuja ja vaarallisen suuria lämpöenergian määriä. Lämpöryntäys, tai terminen karkaaminen, tarkoittaa kemiallista itseään ruokkivaa reaktiota, jossa akun sisäinen pieni äkillinen lämpötilanmuutos aiheuttaa kontrolloimattoman lämpötilan nousun. Lämpöryntäyksessä akku ei kykene luovuttamaan lämpöä yhtä nopeasti kuin tuottamaan sitä. Parhaimmassa tapauksessa lämpöryntäys aiheuttaa vahinkoa vain akun sisäisesti, mutta akkumateriaalien ollessa tulelle arkoja, tai kaasuuntuneina myrkyllisiä, saattaa ympäristölle aiheutuva vaara olla merkittävä. Lämpöryntäyksen vaara kyetään ehkäisemään kontrolloimalla akkutilan lämpötilaa, välttämällä akkujen varaamista yli kapasiteetin, ja yleisellä tasolla monitoroimalla akustojen toimintaa käytön aikana. Akkujen ikääntyessä vikatilanteiden riski kasvaa, joten turvallisuudenkin kannalta on akkujen uusiminen järkevää. (Mitsubishi Electric n.d)

Akun purkautumis- ja latautumisaikojen kuvaamiseen käytetään termiä C-rate, tai C-arvo. Akun kapasiteetti ilmaistaan tyypillisesti arvolla 1C, joka tarkoittaa, että kapasiteetiltaan 100 Ah akku, kykenee purkautumaan 100 A virralla yhden tunnin ajan. C-arvon tuplaantuessa (2C) purkautumisaika puolittuu (30 min), ja käänteisesti C-arvon puolittuessa (0,5C) on purkautumisaika kaksinkertainen (2 h) (taulukko 5). Vastaavasti C-arvoa käytetään kuvaamaan akun lataamiseen kuluvaa aikaa latausvirran suhteen. Ladattaessa kapasiteetiltaan 100 Ah akkua 200 A virralla, kuluisi ideaalilanteessa täyden kapasiteetin saavuttamisessa 30 minuuttia. Todellisuudessa eri akkutyypin latautumis- ja purkautumiskarakteristiikat kykenevät seuraamaan vain tiettyyn pisteeseen asti C-arvon kasvua. Latausvirran kasvattaminen vahingoittaa akkua, mikäli valmistajan antamat raja-arvot ylitetään. Akkutyypin ominaisuudet asettavat rajoituksia akkujen mahdollisille käyttökohteille. (Battery University 2021)

TAULUKKO 5. C-raten ja ajan korrelaatio akkujen lataamisessa ja purkaamisessa (Battery University 2021)

C-RATE	TIME
5C	12 min
2C	30 min
1C	1h
0.5C or C/2	2h
0.2C or C/5	5h
0.1C or C/10	10h
0.05C or C/20	20h

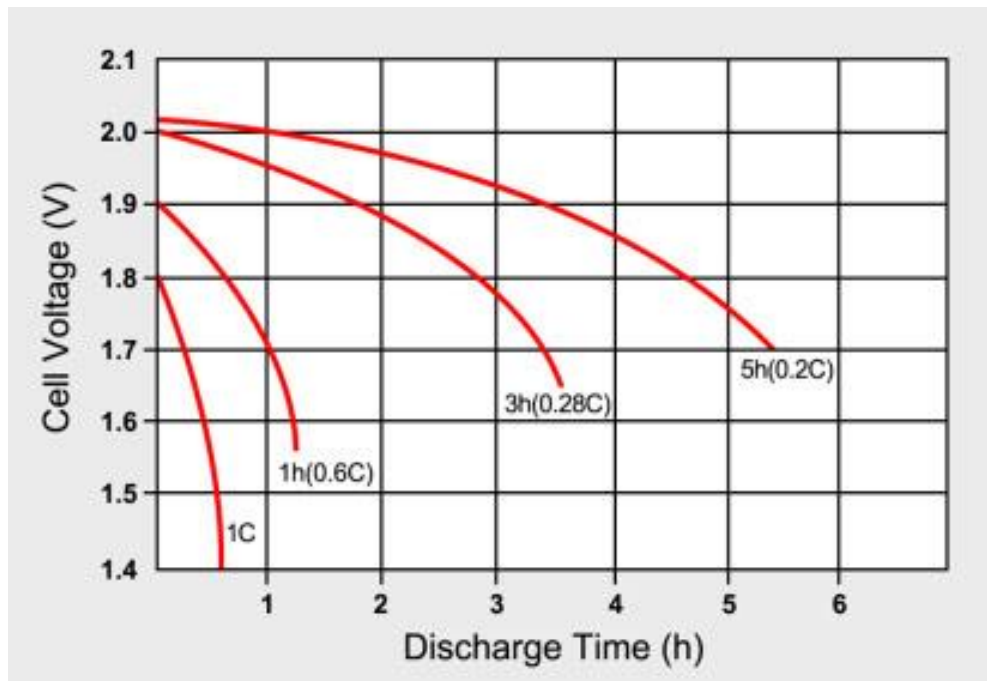
5.1 Lyijyhappoakku

Lyijyakut koostuvat pääasiallisesti kahdesta lyijyvalmisteisesta elektrodista, sekä rikkihappoisesta elektrolyytistä. Lyijyhappoakkujen luotettava toiminta osana varavoimajärjestelmiä on vuosien aikana kartutetun kokemuksen ansiosta pysynyt pitkään korkean teholuokan UPS-järjestelmien kivijalkana. Suurimassaisten ja lyhytikäisten lyijyakkujen tekniset ominaisuudet ovat jättäneet akkutyyppien tehonsyöttöominaisuuksien ja pitkien varakäyntiaikojen kilpailuvaltit monessa

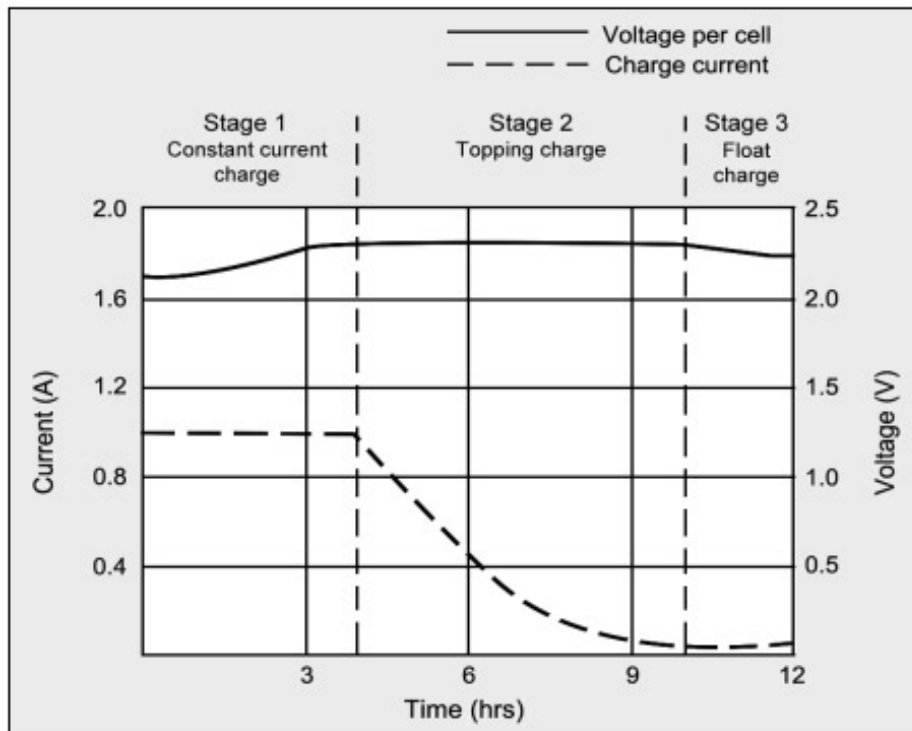
käyttökohteessa toissijaiseksi vaihtoehdoksi litiumioniakkujen yleistyttyä. (Titanpower 2018)

Suljetut lyijyakut (VRLA) ovat tyypillisesti olleet yleisin lyijyakkutyyppe datakeskuskohteissa viime vuosiin saakka. Akkumateriaalien edullisuus ja saatavuus, hyvät kierrätysmahdollisuudet, vähäinen huoltotarve, sekä yleinen käyttöturvallisuus normaalissa käytössä ovat edesauttaneet lyijyakkujen hegemoniaa osana datakeskusten varavoimajärjestelmiä. (Titanpower 2018)

VRLA-akut kykenevät pientä sisäistä resistanssiaan hyödyntämällä luovuttamaan hetkellisesti suuria virtoja (kuvio 12), mutta lyijyakkujen latausajat ovat suhteellisen pitkiä (kuvio 13). (Battery University 2021a)



KUVIO 12. Esimerkki lyijyakun purkautumisajoista (Battery University 2021a)



Stage 1: Voltage rises at constant current to V-peak.

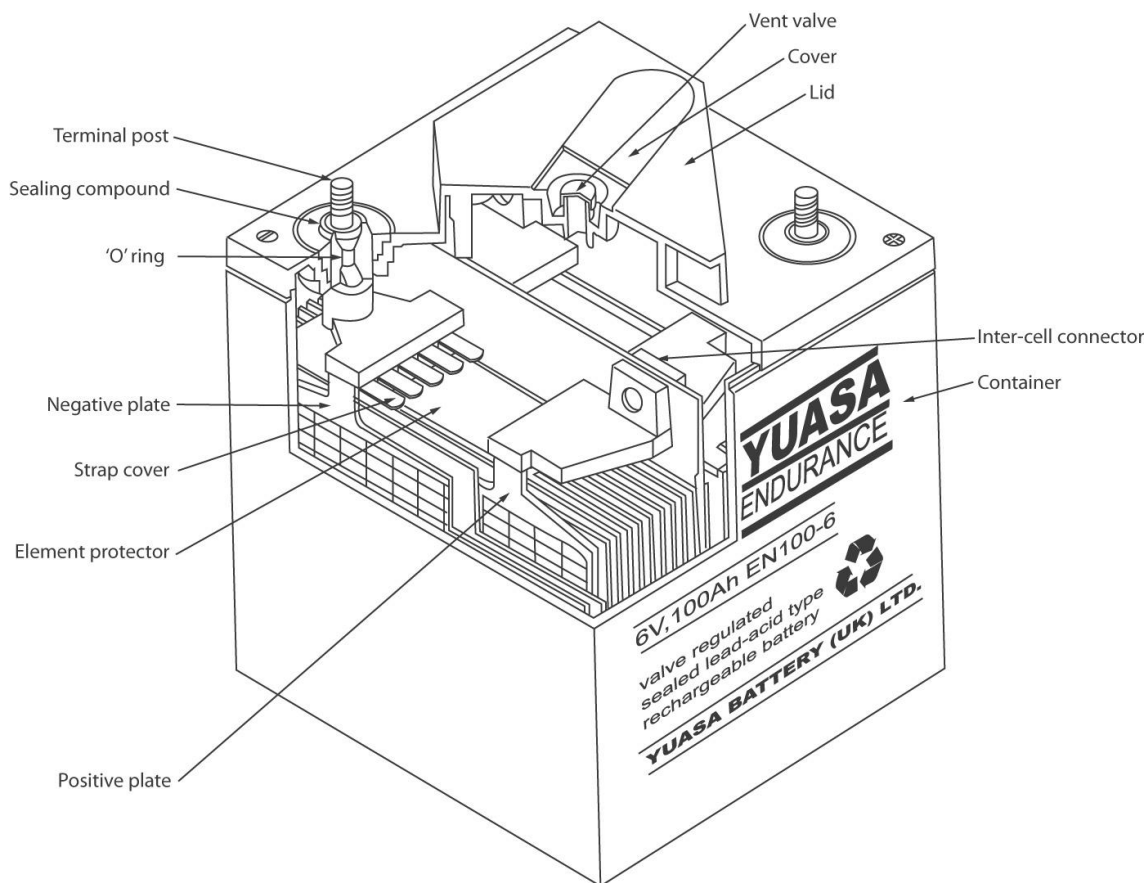
Stage 2: Current drops; full charge is reached when current levels off

Stage 3: Voltage is lowered to float charge level

KUVIO 13. Lyijyakun latausperiaate (Battery University 2023a)

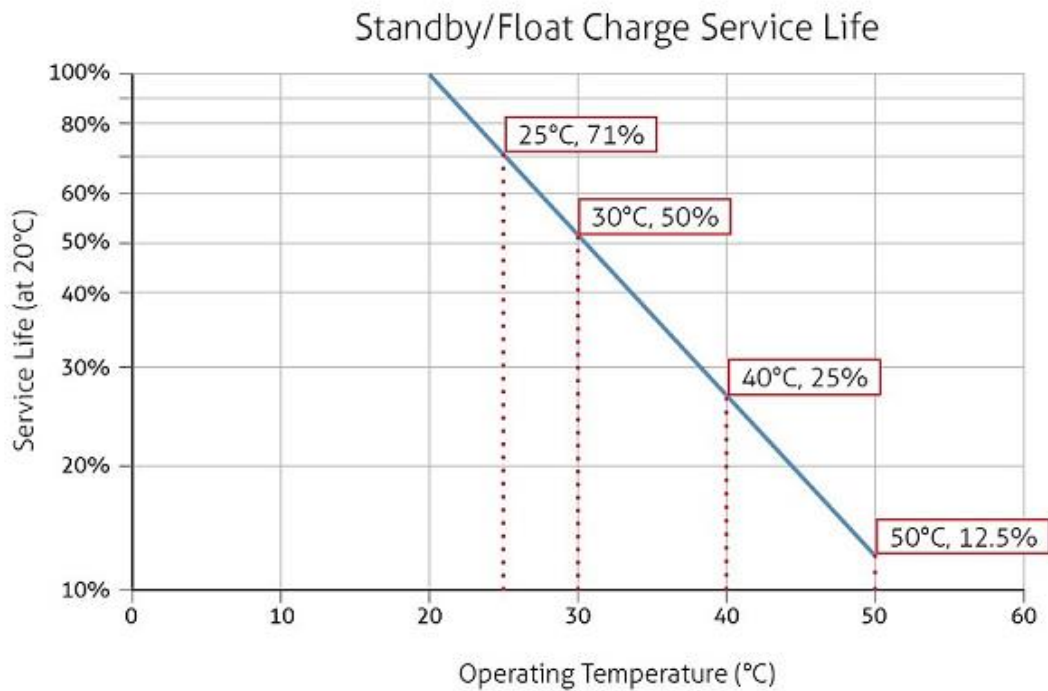
VRLA-akuissa voidaan käyttää kahta erilaista elektrolyytti rakennetta, lasikuitu-mattoon imeytetty (AGM), tai geelitetty elektrolyytti. AGM on vaihtoehdoista yleisemmin käytetty hintansa, pienemmän sisäisen resistanssinsa, sekä lataus- ja purkauskarakteristikkansa takia. Geelityyppisen lyijyakun korkeampi sisäinen resistanssi pidättää UPS-käyttökohteet matalatehoisimmissa käytöissä, vaikka lämpötilavaateet ja pidempi käyttöikä puoltavat geelityyppiä. (Yleiselektronikka n.d)

Lyijyakun toiminta perustuu limittäin asetettujen elektrolyyttiin upotettujen lyijylevyjen välisiin kemiallisiin reaktioihin (kuva 4). Akkua ladatessa levyjä peittävä lyijysulfaatti (PbSO_4) muuttuu virran vaikutuksesta katodissa lyijyoksidiksi (PbO_2), ja anodissa puhtaaksi lyijyksi (Pb). (Yleiselektronikka n.d)



KUVA 4. Suljetun lyijyakun rakenne (Riello UPS n.d)

Lyijyakkujen optimaalinen toimintalämpötila on 20–25°C. Toimintalämpötilan noustessa 10°C lyhenee akkujen elinikä puolella (kuvio 14). VRLA-akkujen säilytysympäristössä on lämpötila otettava huomioon, jotta akustojen uusimiseen liittyvät kustannukset pysyisivät mahdollisimman pieninä. Akun kapasiteetin laskeessa alla 80 %:n on akku elinkaarensa lopussa. Laskennallisesti VRLA-akkujen käyttöikä voi olla jopa yli 10 vuotta mikäli olosuhteet ovat täydelliset käytön ja ympäristö olosuhteen saralla. Vaativassa UPS-käytössä lyijyakkujen kapasiteetti laskee alle 80 %:n laskennallista elinikää nopeammin, ja täytyy akut vaihtaa. (Riello UPS 2020, 1–2)

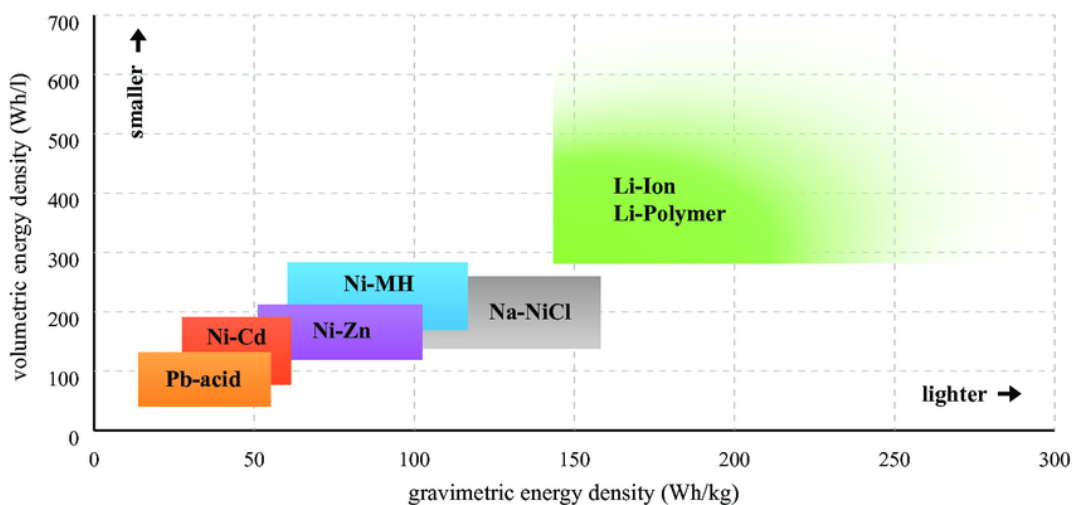


KUVIO 14. Lämpötilan vaikutus suljettujen lyijyakkujen käyttöikään (Riello UPS, n.d)

Lyijyakkujen kapasiteetin syväpurkautuminen lyhentää akkujen elinikää. 80 % DoD (depth of discharge, purkausaste) muodostaa akun elektrodeille lyijysulfaattia mikä vähentää akun elinkaaren aikaisten mahdollisten syväpurkautumissyklien määrää (Mirdiansyah, Taqwa & Bow 2020, 1). Lyijyakkujen käytön kannalta DoD-arvo kannattaa optimoida noin siten, että akkujen käyttöikä saadaan mahdollisimman korkeaksi, sekä sähkötekninen hyöty maksimoitua. Tämä kuitenkin tarkoittaa, että akuston kapasiteetista vain osa on säännöllisesti käytettävissä, mikäli elinkaari halutaan säilyttää mahdollisimman pitkänä.

Lyijyakkujen huonot puolet ovat jättäneet ne monessa tilanteessa toisarvoiseksi vaihtoehdoksi varavoimajärjestelmiä suunnitellessa. Verrattain lyhyt käyttöikä edellyttää akustojen uusimisesta johtuvien kustannuksien kasvavan matalasta hankintahinnasta riippumatta usein pitkällä aikajänteellä vaihtoehtoja suuremmiksi. Lyijyakut ovat energiatiheydeltään kilpailevia akkuteknologioita selvästi huonompia (kuvio 15), tämä tarkoittaa sitä, että lyijyakut vaativat enemmän säilytystilaa verrattuna muihin akkutyyppeihin. Lyijyakkujen herkkyys toimintaympäristöjensä lämpötilalle vaatii akkutiloille tarkan lämpötilakontrollin, jotta akustojen elinkaari pysyy valmistajien asettamissa yläraja-arvoissa. Akkutilojen jäähdytys-

tarve kasvattaa lyijyakkujen elinkaarikustannuksia. Lyijyakkujen hankintakustannukset ovat pysyneet melko vakaana vuosien aikana, kustannukset ovat pysyneet noin 50–150 \$/kWh hintahaarukassa (Lohum 2024).



KUVIO 15. Akkuteknologioiden energiatiheyyksiä (Pichler 2016, 13)

VRLA-akuissa sisäisen lämpötilan aiheuttamat vauriot voidaan havaita voimakkaan hajuisena vetysulfidi purkauksena, jossa tapauksessa on akun virtalähde irrotettava välittömästi säästyäkseen vakavista lämpöryntäyksen aiheuttamista seuraamuksista (Mitsubishi Electric n.d).

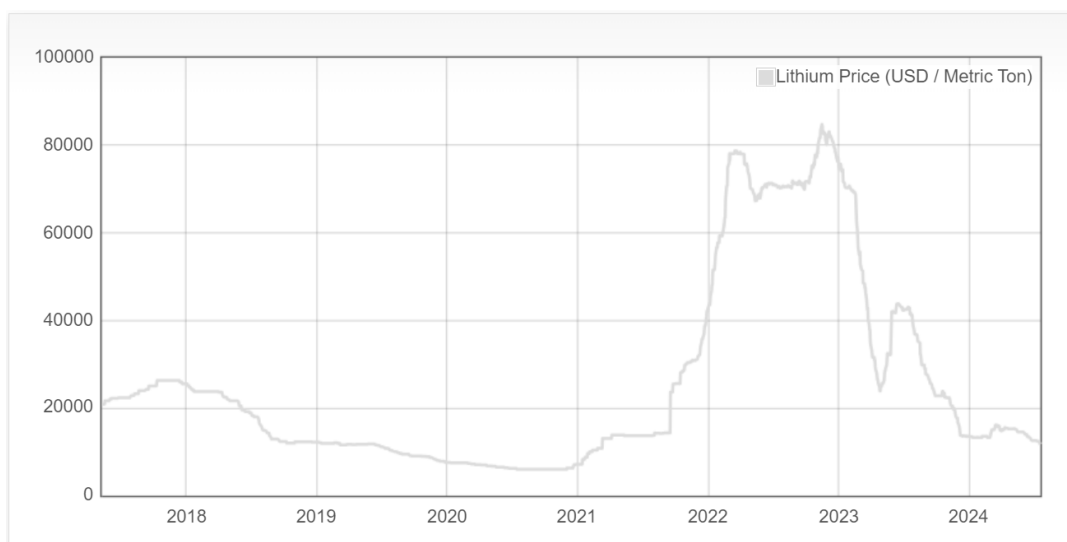
5.2 Litiumioniakku

Litiumakkujen keskuudessa tapahtunut kehitys on aiheuttanut merkittävää nousua akkutyypin kysynnässä. Litiumioniakkujen teknisten ominaisuuksien ansiosta ne ovat syrjäyttäneet useimmissa tapauksissa VRLA-akut datakeskus kohteissa (Titanpower 2018). Akkutyypin on energiatihedeltään huomattavasti kilpailevia teknologioita parempi, joten akustojen viemä tilantarve on verrokkejaan pienempi (Legrand 2022, 11). Litiumioniakkujen vaatima alkuinvestointi tasaantuu akkujen pitkän käyttöiän ja jäähdytysvaatimusten puutteen takia pitkällä aikavälillä lyijyakkua edullisemmaksi (Legrand 2022, 17).

Litiumin louhiminen on ympäristölleen raskasta, ja raaka-aineen jalostaminen monivaiheinen prosessi. Maailman suurimmat litiumin tuottajat ovat Australia (49 %), Chile (28 %), Kiina (13 %), Argentiina (6 %), sekä Brasilia (3 %). Ne kattavat

yhdessä 99 % koko maailman litiumin kokonaistuotannosta, kun taas Euroopan Unionin alueen valtiot vain 0,1 % kokonaisuudesta. Litiumin jalostaminen on myös erittäin keskittynyttä. Kiina jalostaa maailman litiumista jopa noin 70 %. (Euroopan Komissio n.d)

Litium teollisuuden keskittyminen geopolittisesti haasteellisiin, tai epävakaisiin alueisiin, on osaltaan pakottanut vaihtoehtoisten teknologioiden kehittämisen edistämistä (Heiskanen 2024). Raaka-aineena litiumin hinta seuraa metallin kysyntää (kuvio 16). Vuonna 2022 litiumin kysyntä oli reilusti tuotantokapasiteettia suurempi, joten hinta kasvoi korkeimmillaan jopa yli 80000 \$/Mg. Tuotannon ylitäessä kysynnän hinta laski lähemmäs normaalihintaansa (Daily Metal Prices 2024).

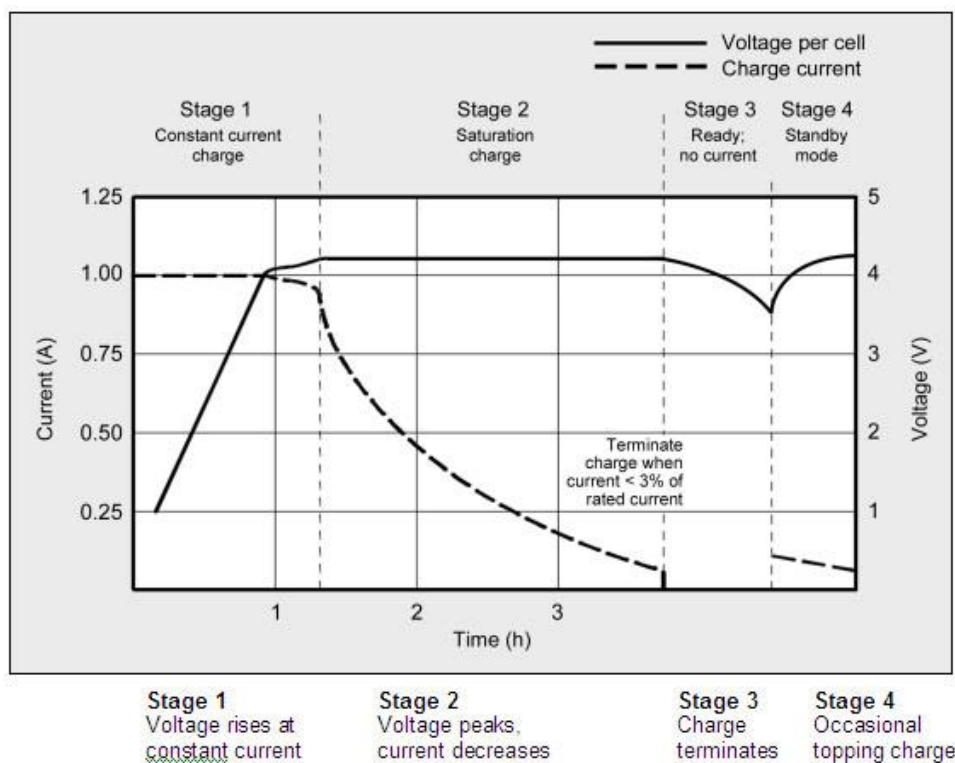


KUVIO 16. Litiumin hinnan kasvutrendi (Daily Metal Prices 2024)

Litium on raaka-aineena todella reaktiivinen ilman kanssa. Tästä johtuen akkujen rakenteelliset vauriot saattavat johtaa akun tuhoutumiseen litiumin spontaanisti syttyvästä, itseään ruokkivassa ja vaikeasti sammutettavassa paloreaktiossa. (Presto n.d)

Litiumioniakkua varatessa akkua ladataan vakiovirralla, kunnes huippujännite saavutetaan ja virran syöttöä aletaan pienentämään, jotta kennon jännite pysyisi vakiona (kuvio 17). Useat litiumakkukemiat ovat kykeneviä nopeaan lataamiseen,

esimerkiksi yli 2C latausvirralla, mutta käytännössä datakeskuksien tehonkäyttöprofiililla nopea lataaminen vaatisi jakelujärjestelmältä liian suurta ylirajoitusta, että se olisi kannattavaa tiettyyn pisteeseen saakka. (Battery University 2021c)



KUVIO 17. Litiumioniakun latausperiaate (Battery University 2021c)

Kaupallisten litiumioniakkujen tyypillisin anodimateriaali on grafiitti. Se sitoo varautuneet litiumionit rakenteensa sisään, ja vapauttaa ne purkautumistilanteessa. Grafiittiin kohdistuva stressi syklien aikana heikentää anodin kemiallista rakennetta, joka puolestaan saattaa johtaa akun toiminnalliseen heikentymiseen, tai pahimmassa tapauksessa lämpöryntäykseen ja akun tuhoutumiseen. (Battery University 2023b)

Katodimateriaalina litiumioniakuissa käytetään käyttötarkoituksen mukaan useita erilaisia kemioita. Teollisissa UPS-käytöissä merkittävimmät akkukemiat ovat:

- Litium-mangaanioksidi (LMO)
- Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi (NMC)
- Litiumrautafosfaatti (LFP)
- Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA)
- Litiumtitanaatti (LTO)

(Hocken 2023)

Litium-mangaanioksidinkemian (LMO) pieni sisäinen resistanssi mahdollistaa nopean lataamisen, sekä suuren virran purkautuessaan (Hocken 2023). LMO pysytään purkamaan 30 A virralla vähäisillä lämpövaikutuksilla, lyhyillä pulsseilla jopa 50 A:lla, mutta korkeat virrat lämmittävät kennoja, eikä LMO-kennon lämpötila saa nousta yli 80°C (Battery University 2023b). Verrattain matalatasoista kapasiteettia sekä lyhyttä käyttöikää voidaan kompensoida yhdistämällä LMO- ja NMC-materiaaleja, korostaen samalla molempien tyyppien vahvuuksia. LMO:ta ei juurikaan käytetä muussa kuin NMC-yhteiskäytössä (Hocken 2023).

Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidikemia (NMC) on käyttökohteisiin hyvin mukautuva ja monipuolinen kemia. Nikkelille ominainen korkea energiatiheys muodostavat mangaanin mahdollistaman matalaresistiivisen rakenteen avulla yhdessä NMC:stä kapasiteetiltaan hyvän akkukemian. Nikkeli tekee katodimateriaalista kuitenkin suhteellisen epävakaa. (Hocken 2023)

Litiumrautafosfaatti (LFP) on grafiittia anodimateriaalinaan käyttävistä litiumionia-kuista turvallisimman ja vakain kemia. Se säilyttää termisen vakautensa haastavissakin tilanteissa, vähentäen lämpöryntäyksen vaaraa. LFP:t ovat kapasiteetiltaan muita valtavirran litiumioniakkukemioita heikompia, mutta purkauskarakteristiikka, korkea sykli-ikä, sekä yleinen käyttöturvallisuus ovat edesauttaneet niiden saamaa jalansijaa datakeskusten UPS-laitteistojen yhtenä yleisimmistä akkukemioista litiumioniakkujen sarjalta. (Hocken 2023)

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidikemia (NCA) on kemiallisiltaan ominaisuuksiltaan verrattavissa NMC:en (Battery University 2023b). Katodimateriaaliin lisätty alumiini parantaa NCA:n vakautta, sekä energiatiheyttä NMC:n verrattuna. Alumiini heikentää kuitenkin NCA:n käyttöikää, mistä johtuen NCA ei juurikaan ole kyennyt tekemään läpimurtoa paikallisakuissa (Hocken 2023).

Litiumtitanaatti (LTO) eroaa aiemmin mainituista kemioista siinä, että litiumtitanaatti korvaa anodimateriaalina grafiitin. LTO on tästä syystä turvallinen litiumioniakkutyyppi, eikä lämpöryntäyksestä juurikaan ole vaaraa. LTO on vakaa kemia, sen sykli-ikä on suurempi kuin muilla verrokeilla, mutta kääntöpuolena matala kennokohtainen nimellisjännite johtaa energiatiheyksellisten ominaisuuksien

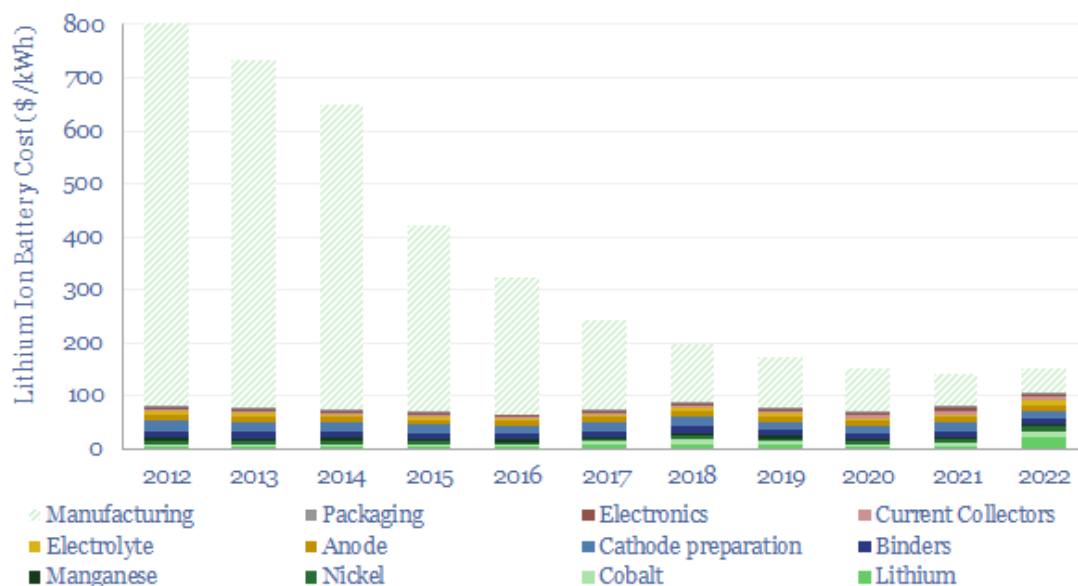
myötä verrattain heikkoihin arvoihin. LTO:n teknisten ominaisuuksien, raaka-aineiden hintojen sekä yleisten turvallisuusominaisuuksien takia on akkujen valmistaminen kallista, eikä se tästä syystä sovellu useimpiin käyttötarpeisiin. (Hocken 2023)

Litiumioniakkujen kemiallisten ominaisuuksien optimointi tutkimus- ja kehitystyössä on johtanut etumatkan muodostumiseen kilpailevien akkuteknologioiden suhteen. Litiumakkujen eri kemioiden teknisten ominaisuuksien mukautuvuus (taulukko 6) mahdollistavat monipuolisia käyttökohteita paikallisakuista sähköautoihin. (Lohum 2024)

TAULUKKO 6. Litiumioniakkutyypin tekniset ominaisuudet (Battery University 2023b)

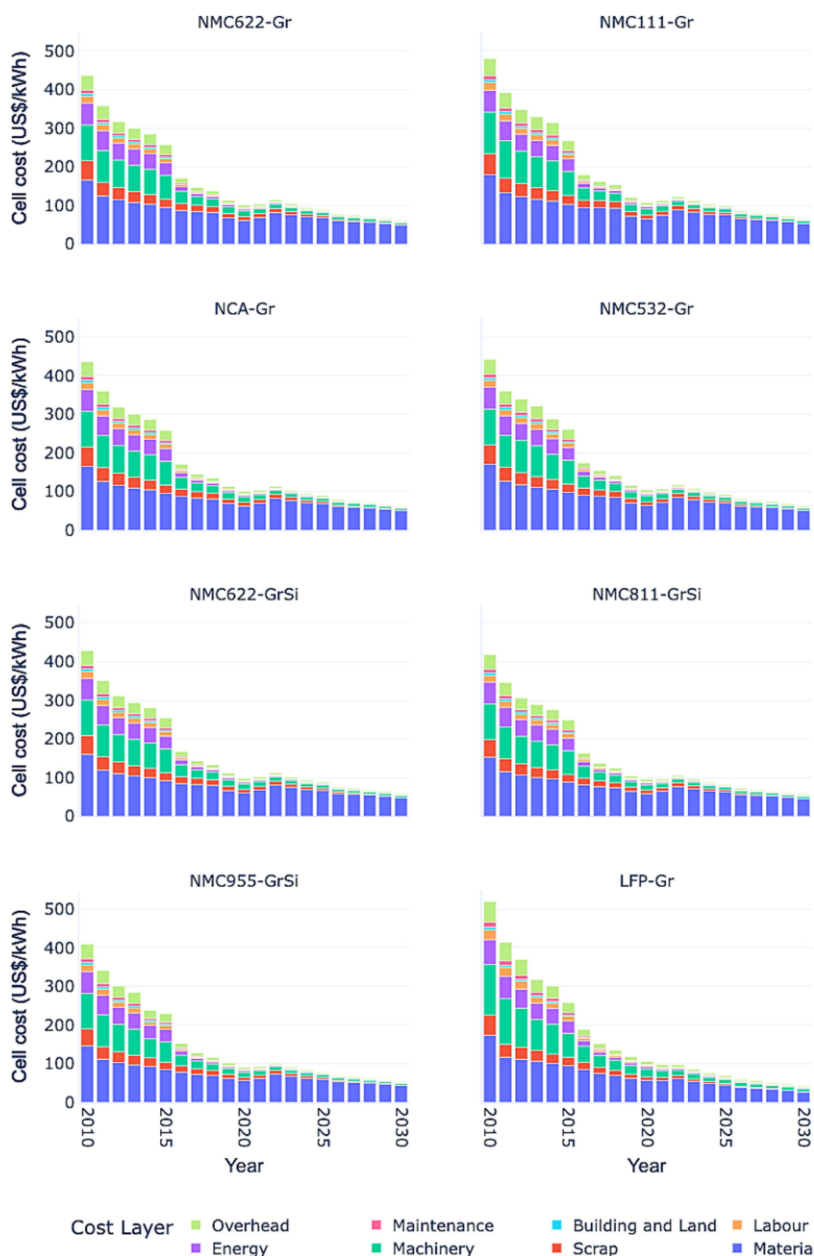
	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
Jännite (V)	3,7 (3,0–4,2)	3,7 (3,0–4,2)	3,3 (2,5–3,65)	3,6 (3,0–4,2)	2,4 (1,8–2,85)
Energiatiheys	100–150 Wh/kg 350 Wh/l	150–220 Wh/kg 500 Wh/l	90–120 Wh/kg 330 Wh/l	200–260 Wh/kg 550 Wh/l	50–80 Wh/kg 177 Wh/l
Lataus (C-rate)	0,7–1C; 3C max	0,7–1C	1C	0,7C	1C; 5C max
Purkaus (C-rate)	1C; 10C; 30C pulssi	1C; 2C	1C; 25C	1C	1C; 10C; 30C pulssi
Sykli-ikä	300–700	1000–2000	>2000	500	3000–7000
Lämpöryntäys (°C)	250°C	210°C	270°C	150°C	Ei vaaraa

Litiumioniakustojen hinnat ovat selkeässä laskusuhteessa kysynnän kasvun vaikutuksesta, vaikka varsinaisen metallin hinnan osuus kokonaiskustannuksista on kasvanut. Kysynnän kasvu on johtanut samalla myös valmistuskustannuksien pienenemiseen (kuvio 18). (Thunder Said Energy 2023)



KUVIO 18. Litiumioniakkujen hankintakustannukset 2012–2022 (Thunder Said Energy 2023)

Litiumioniakkujen eri kennokemioiden vaikutukset akun hintaan ovat myös taasaantuneet suurin piirtein samalle tasolle toistensa kanssa (kuvio 19). Akkumateriaalien raaka-aineiden osuudet kattavat jo suurimman osan kokonaiskustannuksista. (Orangi, Manjong, Clos, Usai, Burheim & Strømman 2024)



KUVIO 19. Litiumioniakkujen kennokemioiden hintatrendit (Orangi et al. 2024)

5.3 Nikkelikadmiumakku

Nikkelikadmiumakut (NiCd) ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan VRLA-akkuihin rinnastettava akkuteknologia. Nikkelikadmiumakut kykenevät saavuttamaan jopa 20 vuoden käyttöiän. Niiden toiminnallinen sietokyky suurille lämpötilavaihteluille (-20°C – $+40^{\circ}\text{C}$), ei vaikuta käyttöiän lyhenemiseen merkittävästi. Lyijyakkuihin verrattuna korkeampi energiatiheys mahdollistaa pienemmät akkutilat, mutta moderneihin akkuteknologioihin verrattuna nikkelikadmiumakut eivät pärjää energiatihedessään. NiCd-akut kykenevät nopeaan latausaikaan, mutta niin sanotun muistiefektin takia, täytyy akkujen purkaussyklinä aikana purkautua kokonaan

ennen uudelleen varausta. Muistiefektin vaikutuksia pystytään minimoimaan jokseenkin oikealla lataustavalla, mutta sen vaikutus akun toimintaan saattaa ajan kuluessa olla merkittävä. Pitkän aikavälin energiavarastoina nikkelikadmiumakkujen itsepurkautuminen muodostuu ongelmaksi, jos akkujen lataaminen on epäsäännöllistä tai harvaa. Optimoidulla käytöllä NiCd-akkujen sähkötekniset ominaisuudet pysyvät vakaana koko käyttöikänsä ajan. (City Labs 2024)

Nikkelikadmiumakkujen hankintakustannukset ovat merkittävästi VRLA-akkuja suuremmat. Kapasiteettiaan kohden NiCd-akun hankintahinta saattaa olla jopa 400 \$/kWh (Battery University 2021b). Nikkelikadmiumakut vaativat koko elinkaarensa ajan huoltoa tarkoituksenmukaisen toiminnan varmistamiseksi, joten hankintahinnan lisäksi myös elinkaarikustannukset ovat suhteellisen korkeat.

Akkutyypin pääraaka-aineet, nikkeli ja kadmium, ovat molemmat myrkyllisiä aineita, joten niiden kierrätys on haasteellisuutensa takia kallista. Erityisesti ympäristöregulaatioiltaan tiukoilla markkina-alueilla NiCd-akkujen käyttäminen kone-sali toiminnassa ei ole kannattavaa. Nikkelikadmiumakkujen käyttökohteet rajoituvatkin ympäristöllisesti ääriolosuhteissa sijaitseviin datakeskuksiin. (Riello n.d.)

5.4 Nikkeli-sinkkiakku

Nikkeli-sinkkiakut ovat viime vuosina nousset varteenotettavaksi kilpailijaksi datakeskuksien varavoimajärjestelmissä. Raaka-aineiden saatavuus on selkeä kilpailuvaltti litiumioniakkuihin. Nikkelin ja sinkin louhinta ja jalostusprosessin on merkittävästi vähemmän ympäristöään kuormittavaa, kun litiumin. UPS-järjestelmien valmistajat, kuten ABB, ovatkin ottaneet nikkeli-sinkkiakut vaihtoehtoisiksi akustoiksi lyijy- ja litiumioniakkujen rinnalle. Nikkeli-sinkkiakut tarjoavat paremman tehosiheyden kilpaileviin teknologioihin verrattuna, ilman lämpöryntäyksen vaaraa, tästä syystä niiden olosuhdevalvonnalliset vaatimukset eivät ole yhtä tiukat, kun muilla teknologioilla. (Judge 2023)

Nikkeli-sinkkiakkujen suhteellisen turvallisen rakenteen takia, ne kyetään kuljettamaan käyttökohteidensa akutiloihin yhtenä pakettina, akkukaappeihin valmiiksi asennettuina. Näin varmistetaan, että akusto on toimintakykyinen, eikä akkujen asennusvirheet estä akuston toimintaa. (Guerra 2023)

Nikkeli-sinkkiakut tarjoavat kaksinkertaisen tehotiheyden lyijyakkuihin nähden, koon ja massan ollessa puolet lyijyakkujen vastaavasta. Lämpöryntäyksen vaaran puuttuessa kykenee akkutyypin purkamaan suuria virtamääriä suhteellisen pienellä lämpenemällä. Nikkeli-sinkkiakkujen energiatiheys on selkeästi litiumioniakkuja heikompi. Mikäli varakäyntiajan tarve on suuri kasvaa akustojen tilantarve myös nopeasti. (Guerra 2023)

UPS-käyttöön tarkoitettujen, markkinoilla jo olevien nikkeli-sinkkiakkujen kykenevät purkautumaan yli 10C-arvolla varakäyntiajan ollessa alle viisi minuuttia ja purkautuva virta maksimissaan 1200 A. Latausaika vaihtelee latausvirrasta riippuen kahdesta viiteen tuntiin. (ZincFive 2023)

Nikkeli-sinkkiakkujen tehotekniset ominaisuudet, käyttövarmuus sekä potentiaalinen edullisuus kilpaileviin teknologioihin verrattuna mahdollistaa laajemmassa mittakaavassa tapahtuvan murroksen datakeskusten varavoimajärjestelmissä lähitulevaisuudessa. UPS-valmistajien valmiudet ottaa nikkeli-sinkkiakustoja laitteistojensa tarjontaan osoittaa teknologian kehityksen saavuttaneen pisteen, missä soveltuvuus käyttökohteisiin on huomioitavalla tasolla (Judge 2023).

5.5 Natriumioniakku

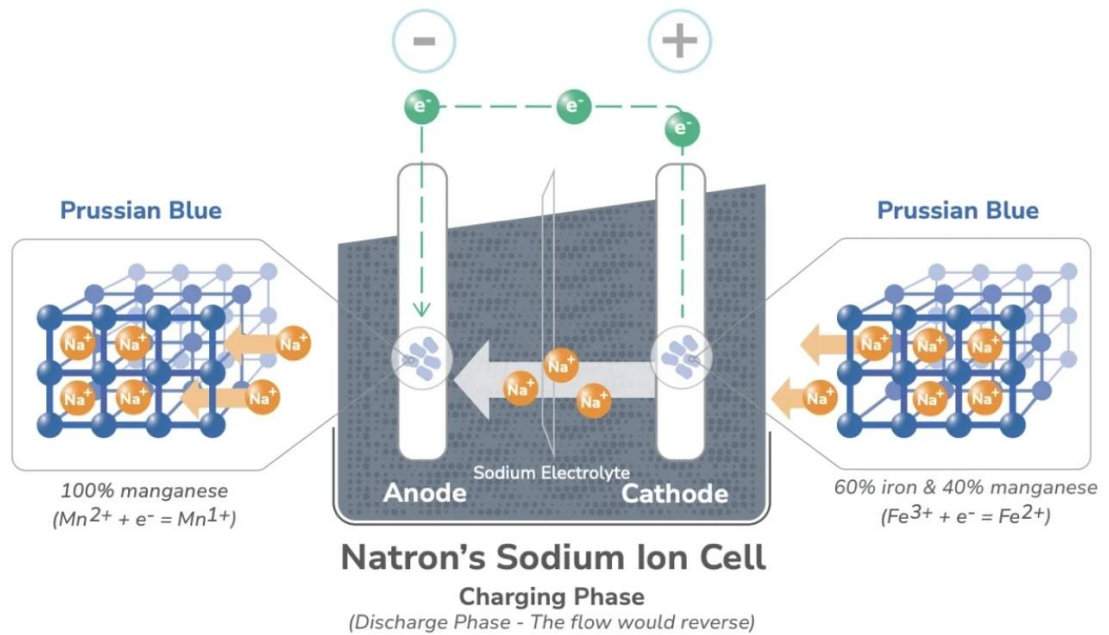
Natriumioniakku on rakenteensa peruseräiteeltään litiumioniakkua vastaava. Raaka-aineena natriumia on runsaasti saatavilla globaalilla mittatasolla, eikä sen louhintaprosessi ole ympäristölle läheskään yhtä haitallista kuin litiumin. Litiumioniakkujen osalta paras verrokki on LFP. Natriumioniakkujen energiatiheys on kehityksen myötä alkanut lähestymään LFP:n energiatiheys lukemia. Kustannuksiltaan natriumioniakut ovat noin 30 % litiumrautafosfaattiakkujen materiaalikustannuksia edullisempia. (Siddiqi 2024)

Natriumioniakkujen anodimateriaalina voidaan käyttää metallioksideoja, preussinistä tai kovahiiltä. Katodimateriaalina käytetään tyypillisesti metallioksidikerroksia, kuten osassa litiumioniakkukemioissakin, fosfaattiyhdisteitä, sekä preussinistä tai -valkoista. (Hocken 2024)

Metallioksidikerrostettujen katodien potentiaali natriumioniakkujen massatuotantoa ajatellen on olemassa olevien tuotantoketjujen takia varteenotettava vaihtoehto akkuteknologian yleistymistä ajatellen. Metallioksidikatodit mahdollistavat korkean energiakapasiteetin ja -tiheyden, mutta materiaalin syklinen vakaus heikenee ajan mittaan varaus- ja purkautumistilanteissa. Metallioksidit ovat herkkiä kosteuden aiheuttamille ongelmille, joten akun säilytysympäristöissä on otettava huomioon ilmankosteuden aiheuttamat negatiiviset vaikutukset. (Hocken 2024)

Fosfaattiyhdisteet ovat kemiallisen vakautensa takia vaihtoehtoisia materiaaleja turvallisempia. Fosfaattiyhdisteiden valmistusprosessi on kuitenkin haastava, joten akkujen tuotantokustannukset ovat suhteellisen korkeat. Teknisiltä ominaisuuksiltaan parhaat fosfaattiyhdisteet sisältävät harvinaista vanadiinia, joka hapettuna vanadioksidina on ihmiselle myrkyllistä. Vaikka fosfaattiyhdisteininen katodi on sykliseltä elinkaareltaan vakaa, jää se teknisiltä ominaisuuksiltaan muiden vaihtoehtoisten katodimateriaalien varjoon heikon energiakapasiteettinsa takia. (Hocken 2024)

Osa natriumioniakuista hyödyntää anodi–katodi rakenteessaan materiaalina preussinsinistä ja -valkoista. Preussinsininen, tai rautaheksasyanoferraatti, on kuutiomuodosteininen epäorgaaninen yhdiste, joka huokoisen rakenteensa ansiosta soveltuu erityisen hyvin varautuneiden natriumionien säilyttämiseen akun elektrodeissa. Preussinsinisen rauta pystytään korvaamaan muilla metalleilla, kuten mangaanilla, nikkelillä, koboltilla, sinkillä, natriumilla yms. Preussinvalkoinen sisältää lähinnä natriumia ja mangaania raudan lisäksi. Litiumioniakkujen elektrodien grafiitti rakenteeseen verrattuna preussinsiniseen ei kohdistu kitkasta aiheutuvaa stressiefektiä, vaan natriumioni kykenee kulkemaan esteettä molekyyli-rakenteen läpi (kuva 5). Tästä syystä kyseistä anodi–katodi rakennetta käyttävillä natriumioniakuilla ei esiinny lainkaan lämpöryntäysongelmaa. Natriumioniakkujen käyttölämpötila-alue on laaja. Valmistajasta ja kemiallisesta rakenteesta riippuen natriumioniakkujen alue on laajempi kuin litiumioniakuilla. (Hocken 2024)



KUVA 5. Natriumioniakun periaatekuva (Natron Energy n.d)

Varavoimajärjestelmissä tärkeimmät natriumioniakkukemiat ovat tällä hetkellä:

1. Kerrostettu metallioksidi (katodi) ja kovahiili (anodi)
2. Preussinsininen/-valkoinen (katodi) ja kovahiili (anodi)
3. Preussinsininen (katodi) ja preussinsininen (anodi)

(Hocken 2024)

Kerrostettu metallioksidi-kovahiili natriumioniakku on elinkaareltaan, energia-kapasiteetiltaan sekä tehosiheydeltään ominaisuuksiltaan VRLA-akkuja parempi. Akkujen toimintalämpötila on tyypillisesti korkeampi kuin litiumioniakuissa, kovahiilen takia lämpöryntäyksen vaara on kohtalainen. Yli kymmenen minuutin varavoima-aika sekä raaka-aineiden suhteellisen edullinen hinta litiumioniakkuihin verrattuna, mahdollistavat potentiaalisen markkinaraon syntymisen. Isossa mitakaavassa kyseistä akkukemiala ei juurikaan vielä hyödynnetä osana UPS-laitteistoja. (Hocken 2024)

Preussinsininen /-valkoinen ja kovahiili parin käyttökohde on LFP-akkuun verrannollisen tehosiheydensä takia lähinnä sähköauto käytössä. Kovahiilen aiheuttamat

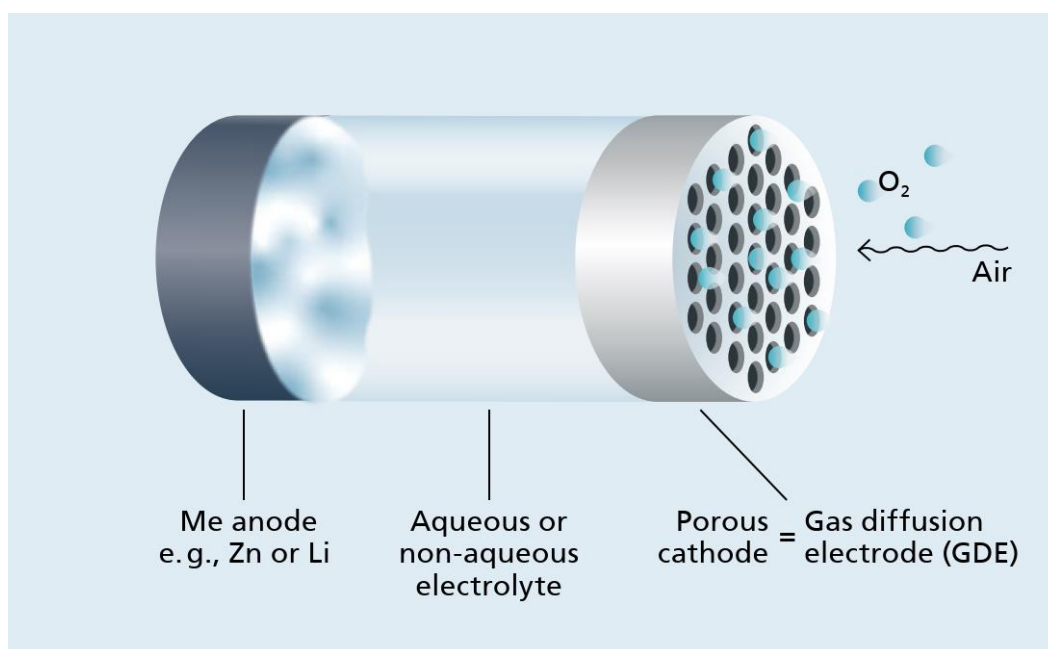
lämpenemäongelmat ovat tässäkin kemiallisessa parissa kohtalaiset. (Hocken 2024)

Preussinsinisen hyödyntäminen akun molemmissa navoissa poistaa lämpöryntäys ongelman kokonaan sekä parantaa akkutyypin lataus ja purkaus ominaisuuksia. Energiakapasiteetiltaan tyyppi on aiemmin mainittuja kemioita heikompi, mutta korkea tehotiheys mahdollistaa soveltuvuuden varavoimakäyttöön. Alle viiden minuutin varakäyntiaika on lyhyt, mutta soveltuu korkeatehoisiin käyttökohteisiin, joissa akustojen ylläpitämisen varavoiman käyntiajan tarve on lyhyempi. Kyseisen tyyppin natriumioniakkuja hyödynnetään tietyissä määrin UPS-käytössä, mutta uuden teknologian markkinahinta on toistaiseksi vielä suhteellisen korkea (Hocken 2024). Kyseinen kemia mahdollistaa todella nopean varausajan (5–15 minuuttia) sekä jopa 50000 syväpurkauksen sykli-iän (Natron Energy n.d).

Natriumioniakkujen ekologisuus, raaka-aineiden edullisuus ja turvallisuus, sekä hyvät tekniset ominaisuudet mahdollistavat akkutyypin nousemista potentiaalisesti varteenotettavaksi vaihtoehdoksi litiumioniakkujen dominoimissa UPS-käytöissä. Kehityksen nopeudesta, sekä kysynnän määräämisen skaalautuvan valmistusprosessin edistymisestä riippuen natriumioniakkujen yleistyminen on lyhyelläkin aikajänteellä mahdollinen.

5.6 Metallililma-akut

Metallililma-akut ovat anodirakenteeltaan verrannollisia metalli-ioni-akkuihin. Metallililma-akuissa katodi on kuitenkin avonainen ja ympäristönsä happea hyödyntävä. Akun purkautuessa anodin aktiivinen metallikomponentti hapettuu ruosteeksi, latautuessaan hapettunut metalli vapauttaa happi molekyylin takaisin ilmaan (kuvio 20). (Clemmensen 2024)



KUVIO 20. Metalli-ilma-akun toimintaperiaate (Stephan et al. 2023, 75)

Korkean tehon mittakaavassa metalli-ilma-akkuja ei ole vielä käytössä, mutta tutkimustyö on vilkasta. Metalli-ilma-akut ovat energiatihedeltään korkeita, sekä kustannuspotentiaailtaan kilpailukykyiset. Käyttökohteiltaan metalli-ilma-akkujen odotetaan soveltuvan pitkällä aikavälillä parhaiten paikallisakkuihin. (Stephan, Hettesheimer, Neef, Schmaltz, Link, Stephan, Heizmann & Thielmann 2023, 74)

Tällä hetkellä suurin haaste metalli-ilma-akuilla on heikot latautumiskarakteristikat. Katodimateriaalin kehityksellä akun varaaminen pyritään saamaan nopeammaksi materiaalia huokoistamalla ja parantamalla vettymisominaisuuksia. Kaasudiffuusioelektrodia kehittämällä hapettumisen tehokkuutta saadaan parannettua. (Fenske n.d.)

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava kuvaus nopean taajuusreservin taustasta osana sähköverkkoa sekä varsinaisen reservituotteen toimintamallista, reservin liittymisvaatimuksista, hyväksyttämisprosessista ja aktivointisyklistä. Akkuteknologioiden osalta keskityttiin muutaman vuoden aikajänteellä potentiaalsimpiin vaihtoehtoihin litiumioniakuille.

Nopean taajuusreservin vaatimukset sekä ohjeet ovat julkisesti saatavilla ja yleispäteviä kaikilla pohjoismaisen synkronialueen sähkömarkkinoilta, joten työtä voidaan soveltaa tarpeen vaatiessa Suomen lisäksi myös Norjan, Ruotsin sekä Tanskan alueilla. Nopean taajuusreservin toteutuneista kaupoista on saatavilla kattavaa historiatietoa osalta järjestelmävastaavien nettisivuista.

Erilaisia akkuteknologioita tutkiessa huomioitavana seikkana on, että teknologioiden kehitys on todella nopeaa ja jo parin vuoden ikäiset lähteet akkujen teknisistä ominaisuuksista ovat vanhentuneet merkittävästi. Erityisesti litiumioniakkujen energiatehokkuus sekä turvallisuus ovat ottaneet huomionarvoisia harppauksia lähivuosina LFP-akkujen yleistyessä eri käyttökohteissa. Lyijyakit ovat jääneet siinä määrin kehityksessä jälkeen, ettei niiden valinta datakeskuksen varavoimajärjestelmien energiavarastoiksi enää useimmissa tapauksissa ole varteenotettava vaihtoehto tilanhallinnallisten ja elinkaarellisten tekijöiden takia. Litium- ja lyijyakuista poikkeavien akkukemioiden teknisten ominaisuuksien löytäminen on suhteellisen haastava, sillä suuren teholuokan energiavarastojen valmistajien tarjoama data on vähäistä, eikä ajankohtaista kokemukseräistä tietoa juurikaan ole helposti saatavilla.

Datakeskuksissa perinteisempien akkuteknologioiden lisäksi natriumioniakut ovat huomattavan potentiaalinsa omaava akkuteknologia. Rakenteeltaan litiumioniakkuihin verrattava akkuteknologia kykenee hyödyntämään olemassa olevia tuotantoketjuja kennojensa valmistuksessa, joten tuotantomäärien kasvattaminen nopealla aikavälillä on mahdollista. Natriumioniakuissa käytetyt raaka-aineet ovat runsaasti saatavilla ympäri maailma, toisin kuin litiumioniakuissa, eikä louhinnan ympäristövaikutukset ole suuret. Akkuteknologiaa puoltavat tekijät

huoltovarmuuden ja akkukemian teknisten ominaisuuksien kannalta ovat edesauttaneet kehitystyötä, mutta suuren mittakaavan tuotantolinjastot eivät ole vielä kyenneet ujuttamaan akustojaan korkean teholuokan energiavarastoihin.

Isona tekijänä akkuteknologioiden yleistymisessä on UPS-toimittajien valmius tarjota akustoja osana varavoimajärjestelmiään. Tutut ja turvalliset VRLA ja litiumioniakut ovat tarjolla jokaisella toimittajalla, osa tarjoaa myös erikoistarpeisiin hyödynnettäviä teknologioita kuten superkondensaattoreita tai nikkelikadmiumakkuja, joiden hyödyntämismahdollisuudet varavoimajärjestelmissä ovat tapauskohtaista. Nikkeli-sinkkiakut ovat esimerkki UPS-valmistajien tarjolla olevista akkuteknologioista, joiden teho-ominaisuudet soveltuvat datakeskusten varavoimatarpeeseen kuten myös nopeaan taajuusreservikäyttöön.

Kynnyskysymyksenä akkuteknologioiden yleistymiselle on usein kokemuksen puute. Tuntemattomampien akkutyyppeiden on haastavaa saada jalansijaa markkinoilla, mikäli soveltuvuutta ei pystytä kokemuspohjaisesti osoittamaan akustojen koko elinkaaren ajalta. Mikäli kysynnän luomaa tarjontaa ei kyetä kasvattamaan, ei massatuotannon etuja pystytä hyödyntämään, eikä tuotantoketjujen loppukustannuksia ja -hintaa saada madallettua. Uusien akkuteknologioiden tuomisessa markkinoille ei kuitenkaan välttämättä tavoitella litiumioniakkujen kokonaisvaltaista korvaamista, vaan tuodaan vaihtoehtoja eri käyttökohteisiin ja -tarpeisiin.

Erilaisten varavoimaratkaisujen ilmaantuminen datakeskusympäristöihin tulevaisuudessa vaikuttaisi mahdollisesti myös koko sähköjärjestelmän topologiaan. Viime vuosina vetyteknologian kehitys on ollut temaattisesti esillä monessa energiapoliittisessa asiayhteydessä. Diesel generaattorien korvaaminen polttokennoilla mahdollistaisi ekologisten mainehyötyjen lisäksi myös varavoiman nopeammat käynnistysajat. Isommassa skaalassa täydellistä vetytaloutta lähennyttäessä voisi polttokennot toimia pääasiallisena syöttösuuntana datakeskuksissa, ja varsinainen sähköverkko varavoimana. Skenaarion vaikutuksista UPS-järjestelmien akustoihin on haastavaa spekuloida, mutta todennäköisesti sähköverkkoa vahvistavan toiminnan tarpeellisuus nopean taajuusreservin muodossa ei olisi enää tarpeellista.

Yhteenvetona akkuteknologioiden kehitykseen panostetut resurssit tuottavat jatkuvasti tulosta globaalissa mittakaavassa tuotantomuotojen vihreän siirron edessä ja sähköenergian varastointikapasiteetin roolin kasvaessa. Energiavarastoja hyödyntämällä siirtymästä aiheutuvat negatiiviset vaikutukset sähköverkkojen tasapainossa kyetään järjestelmällisesti minimoimaan ja vakauttamaan. Akkuteknologian valinnan mitoitustekniset vaikutukset datakeskusten jakelutopologiaan täytyy suunnitteluvaiheessa käsitellä tapauskohtaisesti akustojen ominaisuuksien asettamien parametrien puitteissa. Kustannustehokkuuden ja toimivan sähköteknisen infrastruktuurin yhteensovitus vaatii lähes poikkeuksetta kohdekohtaista räätälöintiä parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi.

LÄHTEET

- Alaperä, I. 2021. Verkon taajuus laskussa? Apuun rientää datakeskus! Verkkosivu. Viitattu 25.12.2024. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/forthedoers-blogi/verkon-taajuus-laskussa-apuun-rientaa-datakeskus>
- Albers, J. 2024. Global Data Center Market Comparison. Verkkosivu. Viitattu 5.7.2024. <https://www.cushmanwakefield.com/en/insights/global-data-center-market-comparison>
- Andersen, L. 2023. What is a Battery Charging Cabinet? Verkkosivu. Viitattu 27.12.2024. <https://blog.storemasta.com.au/what-is-a-battery-charging-cabinet>
- Battery University. 2021a. BU-402: What Is C-rate? Verkkosivu. Viitattu 12.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate>
- Battery University. 2021b. BU-203: Nickel-based Batteries. Verkkosivu. Viitattu 13.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries>
- Battery University. 2021c. BU-409: Charging Lithium-ion. Verkkosivu. Viitattu 13.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>
- Battery University. 2023a. BU-403: Charging Lead Acid. Verkkosivu. Viitattu 12.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>
- Battery University. 2023b. BU-205: Types of Lithium-ion. Verkkosivu. Viitattu 12.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- Bhatt, A., Forsyth, M., Withers, R., & Wang, G. n.d. How a Battery Works. Verkkosivu. Viitattu 30.10.2024. <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>
- Borgini, J. 2024. Data center power backup options to deal with downtime. Verkkosivu. Viitattu 27.12.2024. <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/Data-center-backup-power-systems-standards-to-address-downtime>
- City Labs. 2024. The Importance of Nickel-Cadmium Batteries. Verkkosivu. Viitattu 31.8.2024. <https://citylabs.net/nickel-cadmium-batteries/>
- Clemmensen, S. 2024. Maailman suurin akku voi edistää vihreää siirtymää. Verkkosivu. Viitattu 28.12.2024. <https://tieku.fi/teknologia/maailman-suurin-akku-voi-edistaa-vihreaa-siirtymaa>
- Daily Metal Prices. 2024. Metal Spot Price Charts: Lithium Prices. Verkkosivu. Viitattu 22.7.2024. <https://www.dailymetalprice.com/metal-pricecharts.php?c=li&u=mt&d=0>

Energiateollisuus. 2024. Sähkövuosi 2023. Viitattu 5.7.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Sahkovuosi-2023_paivitetty.pdf

Euroopan Komissio. n.d. Raw Materials Profile: Lithium. Verkkosivu. Viitattu 22.7.2024. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Lithium>

Fenske, D. n.d. Development of metal-air batteries and gas diffusion electrodes. Verkkosivu. Viitattu 28.12.2024. <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/magazine/metal-air-batteries-and-gas-diffusion-electrodes.html>

Fingrid. 2023a. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033. PDF. Viitattu 5.7.2024. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/fingrid_kehittamissuunnitelma_luonnos_26.6.pdf

Fingrid. 2023b. Tervetuloa reservimarkkina-webinaariin. PDF. Viitattu 1.8.2024. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/reservimarkkinat-tuiksi-tuulivoima-alan-sidosryhmille_kaikki-esitykset.pdf

Fingrid. 2023c. Reserve products and reserve market places. PDF. Viitattu 1.8.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/electricity-market/reserves/reserve-products-and-reserve-market-places.pdf>

Fingrid. 2023d. Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. Viitattu 4.7.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksettamismenettely.pdf>

Fingrid. 2024. Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle. PDF. Viitattu 8.8.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservitoimittajien-ffr-ehdot-ja-edellytykset-voimaantulo-29.5.2024.pdf>

Fingrid. n.d. Nopea taajuusreservi (FFR). Verkkosivu. Viitattu 2.7.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi>

Fingrid. n.d. Reservimarkkinat. Verkkosivu. Viitattu 5.7.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Guerra, M. 2023. Weighing the Pros and Cons of Nickel-Zinc Batteries. Viitattu 4.11.2024. <https://www.batterytechonline.com/batteries/weighing-the-pros-and-cons-of-nickel-zinc-batteries>

Günther, R. 2023. The Hidden Force: Reactive Power and its Impact on the Grid. Viitattu 25.12.2024. Verkkosivu. <https://clouglobal.com/the-hidden-force-reactive-power-and-its-impact-on-the-grid/>

Heiskanen, M. 2024. Kiinalaisilla on akkujen tuotannossa hurja etumatka, Euroopan tutkimus ei muutu gigatehtaisi. Verkkosivu. Viitattu 29.12.2024. <https://tekniikanmaailma.fi/kiinalaisilla-on-akkujen-tuotannossa-hurja-etumatka-euroopan-tutkimus-ei-muutu-gigatehtaisi/>

Hocken, J. 2023. Exploring The Five Main Lithium-Ion Battery Chemistries For UPS Use Cases. Verkkosivu. Viitattu 12.10.2024. <https://www.mitsubishicritical.com/resources/blog/the-runaway-review/exploring-the-five-main-lithium-ion-battery-chemistries-for-ups-use-cases/>

Hocken, J. 2024. The Runaway Review: Sodium-ion. Verkkosivu. Viitattu 7.9.2024. <https://www.mitsubishicritical.com/resources/blog/the-runaway-review/sodium-ion/>

Judge, P. 2023. ABB adds ZincFive nickel-zinc batteries to UPS systems. Verkkosivu. Viitattu 24.7.2024. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/abb-adds-zincfive-nickel-zinc-batteries-to-ups-systems/>

Kähkönen, S. & Tauriainen, A. 2024. Datakeskusten hukkalämpöä on pian pakko hyötykäyttää, ja Suomella on siihen tarkoitukseen hyvä kohde. Verkkosivu. Viitattu 5.7.2024. <https://yle.fi/a/74-20078877>

Krabbe, K. 2022. Aurinko- ja tuulivoiman suuri osuus vaatii toimia verkon stabiiliuden varmistamiseksi. Verkkosivu. Viitattu 26.12.2024. <https://www.fingrid-lehti.fi/aurinko-ja-tuulivoiman-suuri-osuus-vaatii-toimia-verkon-stabiiliuden-varmistamiseksi/>

Kohler. 2023. How to pair your UPS system and generator. Verkkosivu. Viitattu 27.12.2024. <https://www.kohler-ups.co.uk/how-to-pair-your-ups-and-generator/>

Legrand. 2022. Li-Ion vs VRLA batteries in UPS applications. PDF. Viitattu 29.12.2024. https://ups.legrand.com/media/document/WP_Li-Ion%20vs%20VRLA%20batteries_print.pdf

LibreTexts. n.d. 6.2: Standard Electrode Potentials. Verkkosivu. Viitattu 28.12.2024. https://chem.libretexts.org/Courses/Mount_Royal_University/Chem_1202/Unit_6%3A_Electrochemistry/6.2%3A_Standard_Electrode_Potentials#title

Loeffler, C. & Spears, E. 2020. UPS-järjestelmän perusteet. PDF. Viitattu 27.12.2024. <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/buildings/critical-power/documents/eaton-ups-basics-whitepaper-WP153005EN-fi-fi.pdf>

Lohum. 2024. Evolution of Batteries: Lithium-ion vs Lead Acid. Verkkosivu. Viitattu 13.10.2024. <https://lohum.com/media/blog/evolution-of-batteries-lithium-ion-vs-lead-acid/>

- Lovett, C. 2024. A Deep Dive into Data Center Redundancy. Verkkosivu. Viitattu 27.12.2024. <https://www.tierpoint.com/blog/data-center-redundancy/>
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2020. Tekniikan kaavasto. 21. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- Mitsubishi Electric. n.d. Thermal runaway: What is it and how to prevent it. Verkkosivu. Viitattu 24.7.2024. <https://www.mitsubishicritical.com/resources/blog/thermal-runaway/>
- Mirdiansyah, Taqwa, A. & Bow, Y. 2020. Monitoring Depth of Discharge of a Valve Regulated Lead Acid Battery in a Standalone PV System. PDF. Viitattu 28.12.2024. <https://www.atlantis-press.com/article/125952456.pdf>
- Natron Energy. n.d. The Science of Sodium. Verkkosivu. Viitattu 1.9.2024. <https://natron.energy/our-technology>
- Nortio, J. 2019. Paljon uutta reservirintamalta. Verkkosivu. Viitattu 4.7.2024. <https://www.fingridlehti.fi/nopea-taajuusreservi/>
- Orangi, S., Manjong, N., Clos, D., Usai, L., Burheim, O. & Strømman, A. 2024. Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective. Verkkosivu. Viitattu 13.10.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23031985#f0035>
- Pichler, B. 2016. Increasing Electric Vehicle Range with a Recommendation App providing ContextSpecific Trip Rankings. PDF. https://www.researchgate.net/publication/312376975_Increasing_Electric_Vehicle_Range_with_a_Recommendation_App_providing_ContextSpecific_Trip_Rankings
- Presto. n.d. Litiumioniakku ja litiumakkupalot – hallitse paloriskit. Verkkosivu. Viitattu 29.12.2024. <https://www.presto.fi/litiumakku-ja-akkupalot>
- Riello UPS. 2020. Lifespan of UPS batteries. PDF. Viitattu 28.12.2024. https://www.riello-ups.com/uploads/file/767/2767/Riello_UPS_WhitePaper_02-20_Lifespan_of_UPS_Batteries_EN.pdf
- Riello UPS. n.d. Different types of UPS batteries. Verkkosivu. Viitattu 31.8.2024. <https://www.riello-ups.com/questions/60-different-types-of-ups-batteries>
- Riello UPS. n.d. How does temperature affect UPS batteries? Verkkosivu. Viitattu 18.7.2024. <https://www.riello-ups.co.uk/questions/28-how-does-temperature-affect-ups-batteries>
- SFS-EN IEC 62485-2. 2018. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Paikallisakut. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry. Viitattu 27.12.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/>

Siddiqi, S. 2024. Sodium-Ion Batteries Will Diversify the Energy Storage Industry. Verkkosivu. Viitattu 31.10.2024. <https://www.idtechex.com/en/research-article/sodium-ion-batteries-will-diversify-the-energy-storage-industry/30405>

Singh, S. & Spencer, T. What the data center and AI boom could mean for the energy sector. Verkkosivu. Viitattu 21.12.2024. <https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector>

Stephan, A., Hettesheimer, T., Neef, C., Schmaltz, T., Link, S., Stephan, M., Heizmann, J. & Thielmann, A. 2023. Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+. PDF. Viitattu 28.12.2024. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/ea395bdf-6a1e-4951-bfa0-1e1a31694e66>

Stephan, A. 2024. Alternatives to lithium-ion batteries: potentials and challenges of alternative battery technologies. Verkkosivu. Viitattu 27.12.2024. <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/alternative-batterie-technologien-lithium-ionen-potenziale-herausforderungen.html>

Svenska kraftnät. 2024. Behov av FFR. Verkkosivu. Viitattu 4.7.2024. <https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/ffr/behov-av-ffr/>

Thunder Said Energy. 2023. Grid-scale battery costs: \$/kW or \$/kWh? Verkkosivu. Viitattu 13.10.2024. <https://thundersaidenergy.com/2023/11/18/grid-scale-battery-costs-kw-or-kwh/>

Titanpower. 2018. VRLA vs. lithium-ion batteries in the data center. Verkkosivu. Viitattu 18.7.2024. <https://www.titanpower.com/vrla-vs-lithium-ion-batteries-in-the-data-center/>

Veijalainen, N. 2024. Suomen ensimmäinen synkronikompensaattori mahdollistaa tuulivoimatuotannon kasvun. Verkkosivu. Viitattu 26.12.2024. <https://www.fingridlehti.fi/suomen-ensimmainen-synkronikompensaattori-mahdollistaa-tuulivoimatuotannon-kasvun/>

Verne. 2024. The Nordic advantage for high performance compute. Verkkosivu. Viitattu 1.8.2024. <https://verneglobal.com/the-nordic-advantage-for-high-performance-compute/>

Yin, R., Du, M., Shi, F., Cao, Z., Wu, W., Shi, H. & Zheng, Q. 2013. Risk analysis for marine transport and power applications of lithium-ion batteries: A review. Verkkosivu. Viitattu 5.7.2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.015>

Yleiselektroniikka. n.d. AGM-Akku vai geeliakku - Mitä eroa on erilaisilla lyijyakuilla? Verkkosivu. Viitattu 8.9.2024. <https://www.yeint.fi/uutiset/akkujen-erot>

ZincFive. 2023. BC 2 UPS Battery Cabinets. Datalehti. Viitattu 4.11.2024.
<https://zincfive.com/wp-content/uploads/2023/11/ZincFive-BC-2-Battery-Cabinet-Data-Sheet-MKT-LIT-0062-REV-3.pdf>