



Tuomas Heikkinen

Älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien akustojen paloturvallisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

19.4.2021

Tiivistelmä

Tekijä:	Tuomas Heikkinen
Otsikko:	Älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien akustojen paloturvallisuus
Sivumäärä:	25 sivua
Aika:	19.4.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat:	Yliopettaja Kari Salmi Suunnittelupäällikkö Anssi Duktig

Insinööritö tehtiin Solnet Finland Oy:n toimeksiannosta ja yhteistyössä Solnetin henkilökunnan kanssa. Insinööritön aiheena oli litiumakkuvarastojen paloturvallisuuteen paneutuminen. Insinööritön tavoitteena oli kartoittaa älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien mahdollisten akkujärjestelmien paloturvallisuuden nykytilaa, selvittää onko niissä parantamisen varaa sekä selvittää, voiko niitä asentajan näkökulmasta mitenkään parantaa.

Opinnäytetyö toteutettiin tutustumalla akkuteknologian, aurinkoenergian ja paloturvallisuusteknologian julkaisuihin sekä käyttämällä yritykseltä saatuja tietoja älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien rakentamiseen liittyen.

Insinööritön tulokseksi on saatu kattavat vaihtoehdot ratkaisuja paloturvallisuuden parantamiseksi aina järkevistä akkuvalinnoista asennettavan kiinteistön henkilökunnan koulutuksen tasolle asti. Haasteita muodostavat alati muuttuva akkuteollisuus sekä uudet teknologiat, joita ei ole vielä tarpeeksi testattu turvallisiksi eikä täten tunnetta riskejä, joita uusien akkuratkaisujen mukana tulee.

Avainsanat: aurinkovoimala, akku, akut, paloturvallisuus

Abstract

Author: Tuomas Heikkinen
Title: Battery Systems of Smart Solar Systems and Their Fire Safety
Number of Pages: 25 pages
Date: 19 April 2021

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering
Professional Major: Energy Production
Instructors: Kari Salmi, Principal Lecturer
Anssi Duktig, Design Manager

This thesis was carried out for Solnet Finland Oy and was made in cooperation with the company's personnel. The thesis explores the fire safety of lithium battery systems. The purpose of the thesis was to research the fire safety of possible battery systems of smart solar systems, and to examine if there is any room for improvement and if an installer can somehow have a positive effect on fire safety.

The thesis was done by exploring publications concerning battery technology, solar energy and fire safety technology and information from the company about building smart solar systems.

The results of the thesis show multiple options on how to improve fire safety, ranging from sound battery choices to the training of the people inside the property where the battery system is being installed. Constantly evolving battery industry and new technologies that are yet to be proved safe pose new challenges concerning new battery solutions.

Keywords: solar power, battery systems, battery, fire safety

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkoenergia yleisesti	2
3	Aurinkoenergia Suomessa	4
4	Älykäs aurinkosähköjärjestelmä	5
5	Akuista	8
5.1	Akkujen historiaa	8
5.2	Lyijyakku	10
5.3	Litium-rautafosfaattiakku	13
6	Paloturvallisuuden toteutus	15
6.1	Lämpökarkaaminen	16
6.2	Sammutustapoja	16
6.3	Sisäänrakennetut sammutusjärjestelmät	18
6.4	Toimittajan ja asentajan vaikutus paloturvallisuuteen	19
6.5	Akuston sijainti	20
7	Henkilökunnan paloihin varautuminen	22
8	Yhteenveto ja päätelmät	24
	Lähteet	25

Lyhenteet

- AGM: *Absorbent glass mat*, lasikuitumattoa hyödyntävä lyijyakkuteknologia
- AVD: *Aqueous vermiculite dispersion*, vesipitoinen vermikuliittidispersio. sammutusteknologia
- kWp: *Kilowattipeak*, tehon yksikkö huipussaan
- SLA: *Sealed lead acid*, sinetöity lyijyakkuteknologia
- TW: Terawatti, tehon yksikkö
- UPS: *Uninterrupted power supply*, keskeytymätön virransyöttö
- VRLA: *Valve regulated lead acid*, venttiiliä hyödyntävä lyijyakkuteknologia

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien akustojen paloturvallisuutta. Tavoitteena on kartoittaa älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien mahdollisten akkujärjestelmien paloturvallisuuden nykytilaa, selvittää onko niissä parantamisen varaa ja selvittää, voiko niitä asentajan näkökulmasta mitenkään parantaa. Työssä on myös sivuttu sitä, miten aurinkovoimala toimii, mikä siitä tekee älykkään ja millaisia sammutuskeinoja aurinkovoimalan akkupalon syntyessä kannattaisi hyödyntää.

Opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Solnet Finland Oy:n kanssa, joka on myös työn toimeksiantaja. Solnet Finland Oy on Suomessa edelläkävijä älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien toimittajana ja maahantuojana, ja sen pääpainopisteenä ovat kaupalliset ja teolliset toimijat.

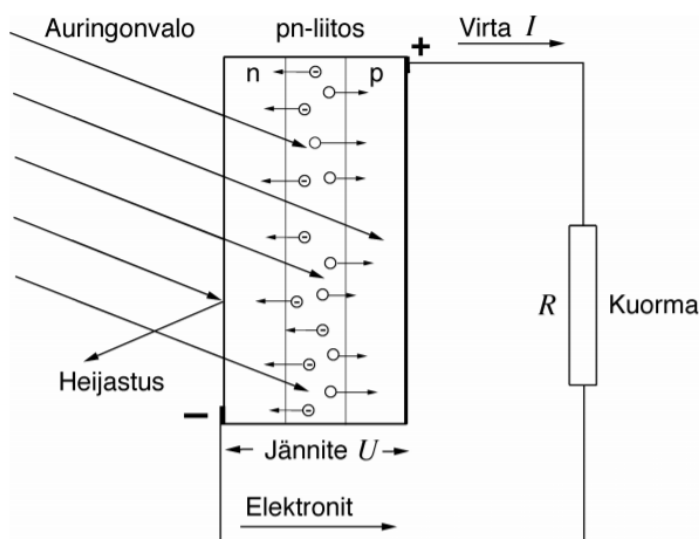
Aurinkoenergia on jatkuvasti kasvava energiantuotannon muoto maailmalla, ja Suomessa on jo herätty sen potentiaaliin. Vaikka Suomi ei saakaan aurinkoa ympäri vuoden ja on sikäli sijainniltaan epäsuotuisa, on kuitenkin kaikki mahdollinen aurinkoenergian hyödyntäminen kotiin päin. Tästä syystä akustot tarjoavat enemmän mahdollisuuksia Suomen aurinkoenergian käytölle ja mahdollistavat ilmastotavoitteissa pysymisen.

Akkuteollisuus on paitsi aurinkosähköakustojen, myös sähköautojen lisääntymisen ansiosta murroksessa, ja akkujen kehitys on huimassa nousussa. Ilmastonmuutos ja siihen liittyvät kansainväliset sopimukset ovat lisänneet akkujen käyttöä ja kehitystä, ja ympäristöystävällisillä akkuteknologioilla on kova kysyntä. Kehityksen kiihtyessä myös turvallisuuden tulee kulkea sen kanssa käsi kädessä, ja tästä syystä akustojen paloturvallisuus on tärkeä aihe tulevaisuutta ajatellen. Akustojen käyttäjät erilaisissa kohteissa ovat harvoin erikoistuneet akkuteknologiaan, jolloin toimittajan rooli akustojen turvallisessa käytössä korostuu.

2 Aurinkoenergia yleisesti

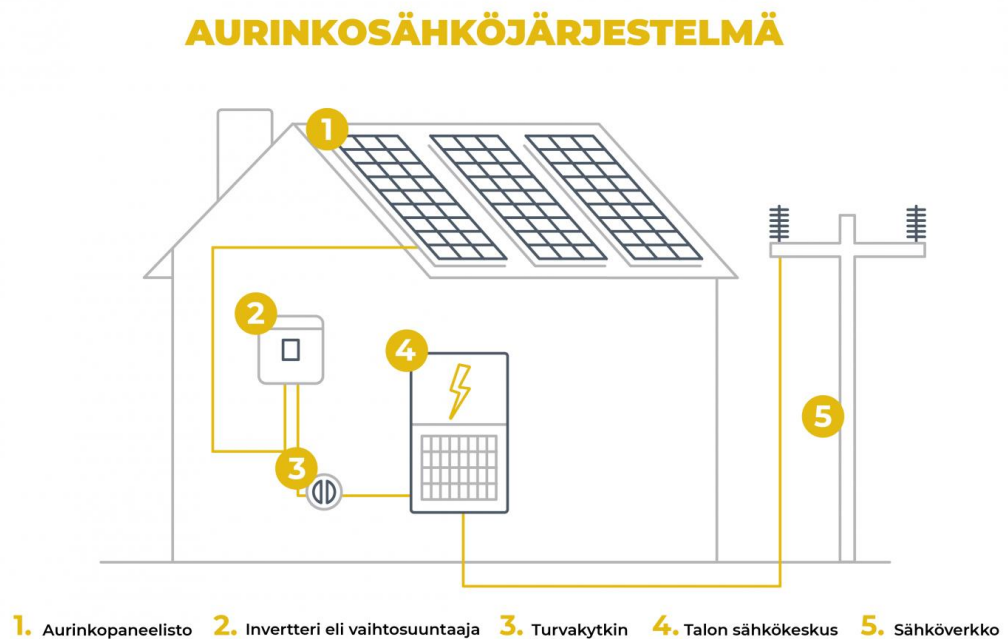
Auringon säteilyn tarjoamaa energiaa kantautuu maapallolle auringosta suoraan tulevana säteilynä sekä hajasäteilynä noin 170 000 TW – tunnissa enemmän mitä ihmiskunta ehtii yhdessä kuluttamaan vuoden mittaan. Hajasäteilyksi kutsutaan säteilyä, joka heijastuu pilvistä ja maasta. Lisäksi ilmakehä heijastaa jonkin verran auringon säteilyä hiilidioksidin ja vesihöyryn kautta. Tästä kokonais säteilystä ei kuitenkaan kyetä hyödyntämään kuin pieni osa, joka muunnetaan aurinkopaneelien avulla sähköksi tai erilaisten aurinkokeräimien avulla lämmöksi. [1; 2.]

Auringon säteilyn sähköksi muuttaminen tapahtuu siten, että auringon fotonit osuvat aurinkopaneelin pii-puolijohdekennoihin, jolloin fotonit luovuttavat säteilyn energian kennojen elektroneille. Varautuneet elektronit siirtyvät edelleen kennon toiseen kerrokseen ja sieltä aurinkokennojen virtajohtimiin ja näin muodostavat sähkövirran [3] (kuva 1).



Kuva 1. Aurinkokennon toimintaperiaate. [3]

Aurinkopaneelilta sähkövirta siirtyy johtoja pitkin invertterille eli tasasuuntaajalle, jonka avulla tasavirta muunnetaan vaihtovirraksi, ja tämä mahdollistaa sähkön käyttämisen. Sähkö voidaan myös syöttää eteenpäin sähköverkkoon, jolloin se pysyy tasavirtaisena. Aurinkosähköjärjestelmät ovat myös varustettu turvakytkimellä vaaratilanteiden ehkäisemiseksi (kuva 2). [4]



Kuva 2. Yksinkertaistettu malli aurinkosähköjärjestelmästä. [4]

Auringon lämpöenergiaa hyödynnetään aurinkokeräimien avulla. Aurinkokeräin voi olla joko nestekiertoinen, jolloin lämmönsiirtoaineena toimii lämmönke-ruuneste, tai ilmakiertoinen, jolloin lämpö siirtyy paineistetun ilman kautta käyt- töön. Aurinkokeräinjärjestelmä koostuu lyhyesti itse keräimistä, johon auringon lämpö kerääntyy, lämmönsiirtoputkistosta, pumpusta, ohjausyksiköstä sekä

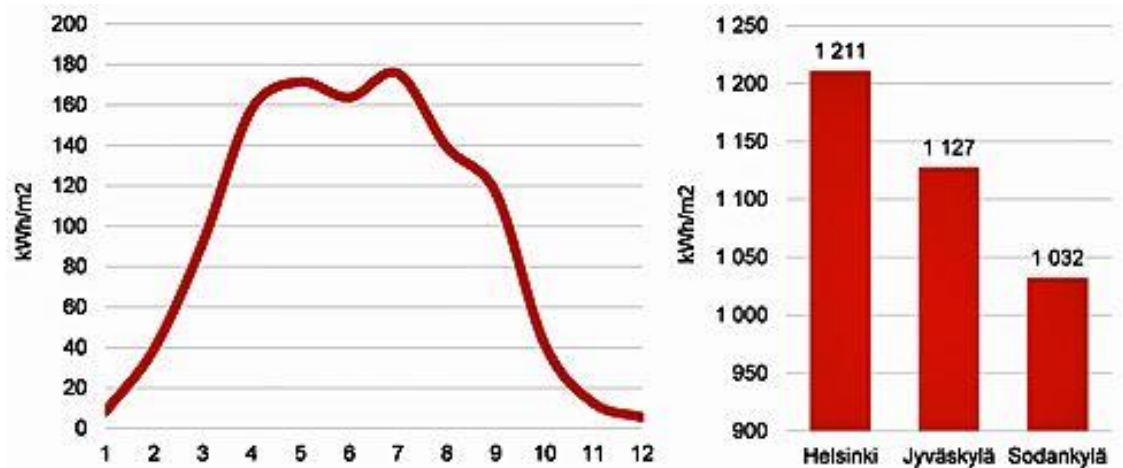
usein varaajasta. Varaaja on etenkin Suomen olosuhteissa tarpeellinen auringon säteilyn epäsäännöllisyyden vuoksi ja siksi, koska usein lämpöä tarvitaan juuri silloin kun aurinko ei paista. Auringon lämpöenergiaa käytetään pääasiassa käyttöveden lämmitykseen sekä esimerkiksi lattialämmitykseen. [5]

Aurinkoenergiaa on usein luonnehdittu päästöttömäksi energiamuodoksi, mutta aurinkopaneelien sekä muiden aurinkosähköjärjestelmien osien valmistaminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Aurinkoenergia on siis periaatteessa hiilidioksidia ”takaisinmaksava” energiamuoto, sillä itse sähköntuotannon aikana ei vapaudu ollenkaan päästöjä. [6]

Aurinkoenergian suurimpia hyödyntäjiä ovat Kiina ja Intia, jotka sijaintinsa puolesta ovatkin ihanteellisessa paikassa aurinkoenergiaa ajatellen. Aurinkoenergia on myös voimakkaassa kasvussa maailmanlaajuisesti, ja Bloomberg New Energy Finance -organisaation mukaan sen ennustetaan kasvavan eniten Afrikassa, Lähi-idässä, Latinalaisessa Amerikassa ja Aasiassa. [7]

3 Aurinkoenergia Suomessa

Etelä-Suomessa kokonaissäteily on suuruusluokaltaan lähes samaa tasoa kuin Pohjois-Saksassa, eli sillä on valtava potentiaali pohjoisesta sijainnistaan huolimatta. Esimerkkinä Helsingissä vuotuinen säteily määrä on parhaimmillaan noin 1 211 kWh/m² ja Sodankylässä se on noin 1 032 kWh/m². Suuntaamalla paneelit etelää kohti 45 asteen kulmassa saadaan Suomessa yleisellä mittakaavalla hyödynnettyä auringon säteilyä parhaiten verrattuna pystysuoraan asennukseen (kuva 3) [8]. Myös pystyyn asennetut julkisivuasennukset ovat kuitenkin Suomessa käytännöllisiä. Hyvänä erimerkkinä pystyyn asennetun paneelin pinnalle ei kerry juurikaan lunta talvisin, ja matalalta paistava aurinko sekä lumesta heijastuva säteily mahdollistavat aurinkoenergian tuotannon myös talvellakin. Suomen pimeistä talvista huolimatta kesäisin aurinko paistaa lähes vuorokauden ympäri, jolloin myös aurinkoenergian tuotanto onkin huipussaan.



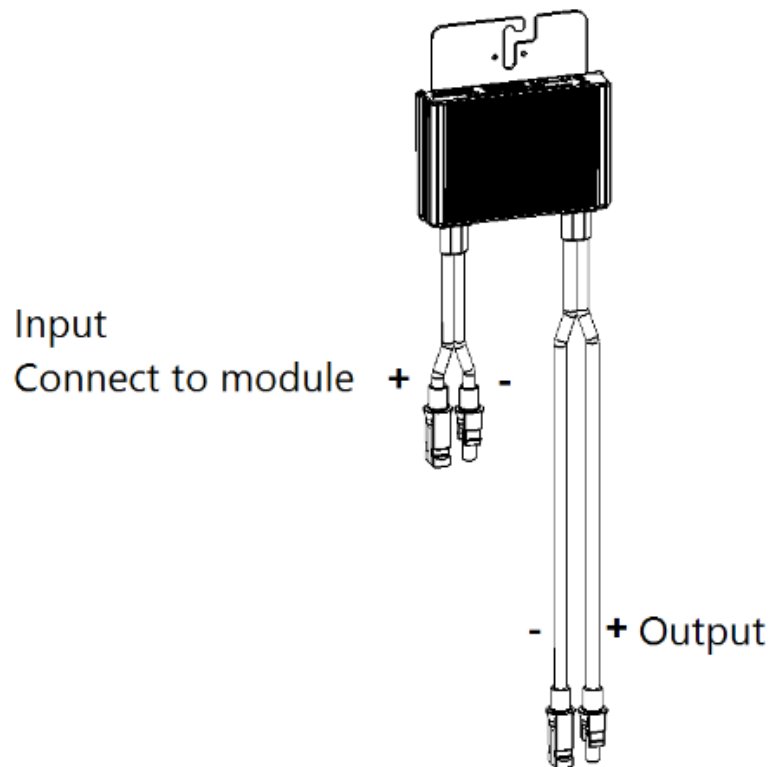
Kuva 3. Keskimääräiset kuukausittaiset säteilymäärät 45 asteen etelään suunnatuissa paneeleissa Suomessa. [8]

Aurinkoenergian osuus Suomen kokonaisenergiatuotannosta on vuodesta 2016 suurin piirtein kaksinkertaistunut vuosittain, ja kansainvälinen energiajärjestö IEA (International Energy Agency) on ennustanut sen kasvavan yhteen prosenttiin vuonna 2022. Tästä syystä aurinkoenergian hinta on myös laskenut, mikä myös osaltaan lisää sen käyttöä. Monessa valtiossa aurinkoenergia onkin yksi edullisimmista energiamuodoista tuulivoiman ohella [9]. Suomen suurimpia aurinkoenergian hyödyntäjiä ovat monet kaupalliset kohteet kuten supermarketit ja ostoskeskukset, teolliset toimijat ja yliopistot. Lisäksi on myös muutamia kunnallisia aurinkovoimaloita, jotka toimivat yhteistyössä muiden energiamuotojen kanssa.

4 Älykäs aurinkosähköjärjestelmä

Älykäs aurinkosähköjärjestelmä koostuu lyhyesti itse aurinkopaneeleista, paneelien telineratkaisusta, kaapeloinnista, sekä invertteristä eli vaihtosuuntaajasta. Olennaisena osana älykästä järjestelmää on myös virran optimoijat, jotka yhdistävät paneelit pareiksi (kuva 4). Kun paneelit on yhdistetty ensin optimoijiin

ja niiden kautta sarjaan, saadaan paras mahdollinen tuotto siinäkin tilanteessa, kun yksi paneeli on varjostunut tai likainen.



Kuva 4. Virranoptimoiija ja sen liitännät. Syöttö (input) yhdistetään paneeleihin ja ulostulot (output) ovat osana optimoijaketjua. [10]

Jos paneelit on kytketty sarjaan ilman optimoijia, tuotto on tällöin heikoimmin tuottavan paneelin varassa. Virran optimoinnin lisäksi optimoijien avulla voidaan seurata paneelien tuottoa paneelikohtaisesti, mikä osaltaan helpottaa järjestelmän huoltoa ja lisää näin myös sen ikää [11]. Optimoijat myös tarkkailevat lämpötilaa, ja esimerkiksi tulipalon sattuessa tai muussa vikatilanteessa järjestelmä osaa itsenäisesti sulkea itsensä ja säätää jännitteen turvalliselle yhden voltin tasolle sammutus- ja huoltotöitä varten.

Nykyään markkinoilla on myös erikseen paloilmoitinkeskukseen liitettäviä moduuleita, joista voidaan kiinteistön tulipalotilanteessa sammuttaa aurinkovoimala jo paloilmoitinkeskuksesta asti. Tämä on suuri etu sammutushenkilökunnan

kannalta verrattuna siihen, jos voimala täytyisi kytkeä pois päältä vaihtosuuntaajalta [12]. Virran optimoijat eivät kuitenkaan havaitse tulipaloa muualla kiinteistössä, jos lämpötila ei ole tarpeeksi korkea, eikä aurinkovoimala silloin välttämättä sammu automaattisesti. Tässä tilanteessa on palokunnankin turvallisuuden kannalta tärkeää, että voimala saadaan sammutettua manuaalisesti jo paloilmoitinkeskuksesta, jonne palokunta yleensä ensimmäisenä saapuu.

Jotta järjestelmän tuottoa voidaan seurata mahdollisimman reaaliaikaisesti, se täytyy yhdistää internetiin, ja usein se on toteutettu yhdistämällä vaihtosuuntaajaan oma modeeminsa. Internet-yhteyden ja oman erillisen käyttöliittymän avulla järjestelmän tuottoa voidaan seurata paneelikohtaisesti, ja heikommin tuottavien paneelien tarkastelun avulla voidaan laatia yksityiskohtaisempia huoltosuunnitelmia ja vikatilanteisiin voidaan reagoida nopeasti (kuva 5). Ilman paneelikohtaista informaatiota jokaisen paneelin tuotto täytyisi käydä erikseen mitaamassa, mikä varsinkin suurempien asennuskohteiden kohdalla hidastaisi ylläpitoa. Käyttöliittymä voidaan yhdistää myös mobiililaitteisiin, mikä myös osaltaan helpottaa huoltoa.



Kuva 5. Esimerkki aurinkovoimalan monitoroinnista sekä tietokoneella että mobiililaitteella. Kuvassa SolarEdgen käyttöliittymä. [13]

5 Akuista

Nykyään aurinkovoimaloissa hyödynnetään erilaisia akustoratkaisuja. Akustojen avulla saadaan muun muassa tasattua tuotanto- ja kulutushuippuja sekä lisääntään kohteen joustavuutta ja omavaraisuutta. Akustot ovat aurinkosähköjärjestelmissä vielä Suomessa lapsen kengissä, ja siihen liittyvä teknologia kasvaa ja muuttuu jatkuvasti. Erilaisia akkuratkaisuja on markkinoilla suuret määrät, mutta kaikki niistä eivät sovellu osaksi aurinkosähköjärjestelmiä. Seuraavissa alaluvuissa on esitelty hieman akkujen historiaa, tunnetuimpien lyijyakkujen ominaisuuksia ja käyttökohteita yleisesti ja paneuduttu tarkemmin litium-rautafosfaattiakkuihin, joita pääasiallisesti käytetään yleisemmin aurinkosähköjärjestelmissä.

5.1 Akkujen historiaa

Ensimmäisenä paristona on pidetty nk. ”parthialaista paristoa”, joka löytyi läheltä Bagdadia vuonna 1936 ja jonka arvellaan olevan yli 2000 vuotta vanha. Paristo on suljettu saviruukku, joka on täytetty etikkaseoksella, ja ruukkuun on työnnetty rautasauva, joka on ympäröity kuparisella sylinterillä (kuva 6). Paristo tuotti noin 1—2 voltin jännitteen. Saviruukun käyttötarkoituksesta on kiistelty, koska siitä ei ole löydetty minkäänlaista kirjoitettua tietoa. Yksi ruukun käyttökohde on voinut olla erilaisten metalliesineiden kullalla pinnoittaminen, mutta alueelta ei ole löytynyt sen aikaisia pinnoitettuja esineitä. Sen on epäilty myös olleen vain yksinkertaisesti ruukku kääreiden säilytystä varten.



Kuva 6. Parthialainen paristo. [14]

Italialainen Alessandro Volta kehitti varhaisimmat nykyaikaiset paristot 1800-luvulla. Volta upotti hopea- ja sinkkilevyjä elektrodina käyttäen suolaveden ja paperin seokseen ja huomasi, että laittamalla näitä sarjaan sai yhä suuremman ja suuremman jännitteen (kuva 7). Kun puhutaan akuista, tarkoitetaan useimmiten uudelleen ladattavia akkuja. Ensimmäisen uudelleen ladattavan akun kehitti ranskalainen fyysikko Gaston Planté vuonna 1859 käyttäen yhä nykypäivänä käytössä olevaa lyijyakkuteknologiaa.



Kuva 7. Alessandro Voltan hopea- ja sinkkilevyt elektrolyytissä. [14]

Vuonna 1899 ruotsalainen Waldmar Jungner kehitti nikkeli-kadmiumakun, josta myöhemmin Thomas Edison jatkokehitti nikkeli-rauta-akun kadmiumin korkean hinnan takia. Nikkeli-rauta-akku ei kuitenkaan menestynyt sen alhaisen ominaisenergian ja korkean itsepurkautumisriskin takia, ja siksi ettei se ollut tarpeeksi kestävä kylmissä olosuhteissa. Nikkeli-kadmiumakkuja kehiteltiin lisää,

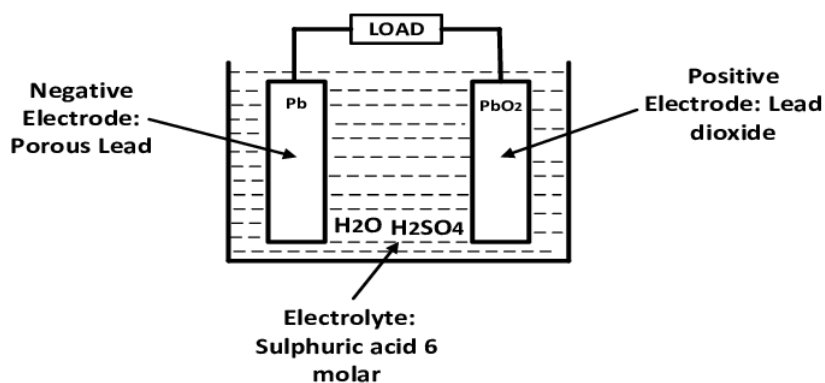
ja vuonna 1947 nikkeli-kadmiumkenno onnistuttiin eristämään. Nikkeli-kadmiumakut olivat laajimmin käytössä erilaisissa kannettavissa elektronisissa laitteissa, kunnes 1990-luvulla huolenaiheeksi nousi nikkeli-kadmiumakkujen ympäristövaikutukset. Nykyisin Euroopassa nikkeli-kadmiumakkujen käyttö ja myynti on rajoitettua vain poikkeustapauksia lukuun ottamatta.

Nykyään suurimmassa käytössä on litiumakut, jotka Sony toi markkinoille 1991 ja joiden ympärillä suurin tutkimustyö pyörii. Litiumakkuja käytetään muun muassa matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa sekä sähkötyökaluissa, mutta myös suuremmissa sovelluksissa kuten liikenteessä sekä varavirtana suuremmissa sovelluksissa kuten aurinkosähkön tukena ja satelliiteissa. [14]

5.2 Lyijyakku

Lyijyakku koostuu negatiivisesta ja positiivisesta elektrodista eli anodista ja katodista, joista negatiivinen on huokoista lyijymateriaalia (Pb) ja positiivinen lyijydioksidia (PbO₂). Elektrolyytinä näiden välissä on vettä ja rikkihappoa (H₂O ja H₂SO₄) seoksena.

Lyijyakuista laajimmin käytössä ovat SLA (sealed lead acid, suljettu lyijyakku), VRLA (valve regulated lead acid, venttiilisäätöinen akku) ja AGM (absorbent glass mat, happo imeytetty lasikuitumattoon, kuva 9). SLA-, VRLA- ja AGM-akut käyttävät kaikki lyijyä elektrolyytinä, mutta niiden toimintatavat, koostumus ja teknologia eroavat toisistaan. Kuvassa 8 on esitelty yksinkertaistetun mallin läpileikkaus tyypillisestä lyijyakkuteknologiasta. [15]



Kuva 8. Negatiivinen elektrodi huokoista lyijyä, positiivinen elektrodi lyijydioksidia, elektrolyytti rikkihappoa ja vettä. [16]

Lyijyakkuja käytetään laajalti liikenteessä käynnistysakkuina, jolloin akusta puristetaan ulos hetkellisesti suuri virtamäärä esimerkiksi auton käynnistystä varten. Lisäksi akku antaa virran auton valoja, elektroniikkaa ja muita sähköä vaativia tarpeita varten. Lyijyakkuja käytetään myös paikallisakkuina esimerkiksi liikennevaloissa, aurinkovoimaloissa ja myös muissa varavirtaa vaativissa sovelluksissa. Varavirtaa tarvitaan myös keskeytymättömän virransyötön (UPS, uninterruptible power supply) järjestelmissä, jotka ovat kriittisten laitteiden kuten lennonjohtojen ja sairaaloiden järjestelmien tukena, joille pienetkin sähkökatkokset voivat tehdä suurta tuhoa. Aurinkovoiman tukena lyijyakut ovat useimmiten pienemmissä verkon ulkopuolisissa kohteissa, kuten joissain omakotitaloissa, kesämökeissä, säätä mittaavissa laitteissa ja joskus jopa piha-alueiden nopeusmittarijärjestelmissä.



Kuva 9. Esimerkki AGM-lyijyakusta. [17]

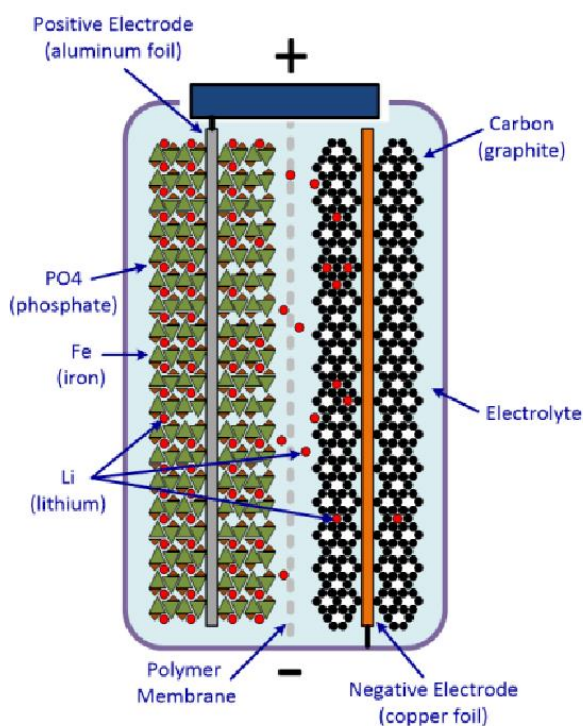
Lyijyakkuja on luonnehdittu huoltovapaiksi ja luotettaviksi, mutta ne usein vaativat silti säännöllistä puhdistusta, mittaamista ja joissain tapauksissa mahdollista elektrolyytin lisäystä. Lisäksi kovassa rasituksessa ongelmaksi muodostuu myös lyijyakkujen lyhyt käyttöikä. Aurinkosähköjärjestelmissä akusta ja järjestelmän koosta riippuen ne voidaan ladata ja purkaa tyhjäksi yleensä noin 1 000—4 000 kertaa. Lyijyakun käyttäminen noin puoliksi tyhjäksi lyhentää akun käyttöikää, ja joissain tapauksissa akun syväpurku, eli purkaminen yli 50 % tyhjäksi, voi vahingoittaa akkua merkittävästi. Markkinoilla on kuitenkin AGM-syväpurkuakkuja, jotka kestävät hyvin syväpurkuja jopa 30 %:iin saakka ja ovatkin näin lyijyakuista huoltovapaimpia. Lyijyakun latautuminen on myös jokseenkin hidasta, ja hidastuu entisestään, kun lataustaso saavuttaa noin 85 %. Lisäksi lyijyakut lämpenevät liian nopeassa lataustilanteessa, mikä voi osaltaan luoda parloriskin. [18]

Suuremmissa määrin käytettynä lyijyakut aurinkosähköjärjestelmissä ovat ongelmallisia myös niiden tilankäytön takia. Akustot sijaitsevat maakohteita lukuun ottamatta usein kiinteistöjen kattojen ilmanvaihdonhuoneessa tai sen läheisyydessä, jolloin tilaa on lähes poikkeuksetta suhteellisen niukasti. Lyijyakkujen säilytyksen tulisi myös olla pystyasennossa, ettei akkuhappoa pääse vuota-

maan ympäristöön. Tämän vuoksi on myös hankala säilyttää useampaa lyijyakua, koska lyijyakujen kasaaminen päällekkäin vaatii erillisen hyllyratkaisun. Lisäksi ongelma on lyijyakujen energiatiheys, joka on noin 30 W/kg (19). Lyijyakut ovat raskaita ja voivat painaa 10—30 kg (autojen akut) tai muista käyttökohteista riippuen jopa 150 kg. Suuren painon ja pienen energiatheyden vuoksi katolle sijoitettava lyijyakusto luo lisähaasteita myös katon kantokyvyn osalta.

5.3 Litium-rautafosfaattiakku

Litium-rautafosfaattiakku on litium-ioniakku, jonka anodin materiaalina toimii yleisesti jonkinlainen huokoinen hiiliseos ja katodin materiaalina toimii litium-rautafosfaatti (LiFePO_4) ja elektrolyytinä on usein litiumsuolan ja jonkin orgaanisen liuottimen seos. Separaattorina elektrodien välillä on yleisesti huokoinen muoviliuska (kuva 10). Litium-rautafosfaattiakut toimivat siten, että ladatessa akkua litiumionit liikkuvat katodista anodiin, ja purettaessa ilmiö tapahtuu toisin päin. [20]



Kuva 10. Litium-rautafosfaattiakun läpileikkaus. [19]

Litiumioniakkuja on laaja kirjo, ja niitä käytetään useissa eri sovelluksissa kuten elektroniikassa ja kodintekniikassa. Nykypäivänä litiumioniakkuja hyödynnetään paljon matkapuhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa. Litiumioniakut ovat kevyitä, kestäviä, turvallisia ja suurena etuna perinteisiin lyijyakkuihin nähden on niiden energiatiheys. Heikkouksia litiumioniakuilla ovat muun muassa niiden herkkyys lämpötilan ja sähkön suhteen – ne vaativat erillisen sisäänrakennetun suojaapiirin, joka pitää virran ja jännitteen turvallisilla tasoilla. Ilman suojaapiiriä liian suuren virran kohdalla akku menee herkästi käyttökelvottomaan tilaan, ja myös yli- ja alijännite voi pilata akun. Liian kylmässä lämpötilassa akut vanhenevat myös nopeasti. Toinen heikkous litiumioniakuilla on niiden hinta, joka koostuu paitsi materiaaleista, myös akkujen poikkeuksellisista kuljetusolosuhteista. Lisäksi litiumioniakkujen elektrolyytteinä ei voi käyttää vesipohjaisia elektrolyyttejä, koska litium reagoi herkästi veden kanssa, jolloin siitä muodostuu litiumhydroksidia ja vetyä. [21,30.]

Litium-rautafosfaattiakkuja käytetään, kuten lyijyakkuja, muun muassa aurinkosähkön varastointiin, teolliseen valaistukseen, varavirtana kriittisissä yhteiskunnan sovelluksissa sekä sairaaloissa. Litium-rautafosfaattiakku soveltuu hyvin aurinkosähköjärjestelmien akustoratkaisuksi sen pitkäikäisyyden, kestävyys- ja turvallisuuden vuoksi. Lisäksi sen energiatiheyden ja akun rakenteen ansiosta niitä voidaan kasata useampi päällekkäin, mikä säästää merkittävästi tilaa asennuskohteissa. Lisäksi litium-rautafosfaatti on litiumioniakuista turvallisin: raudan, fosforin ja hapen kovalenttinen sidos on vahvempi kuin muissa litiumioniakuissa eli jos akku vahingoittuu, esimerkiksi oikosulun tai ylikuumenemisen takia, ei akun materiaalien kemiallinen rakenne rikkoudu yhtä herkästi. Kemiallinen rakenne pysyykin vielä yli 200 °C:een termodynaamisesti vakaana, ja vasta äärimmäisissä, yli 8 000 °C:n lämpötiloissa rakenne alkaa hajota. Mahdollisen hapenpuutteenkin aikana, jolloin litium-rautafosfaattiakut tyypillisesti vapauttavat lämpöä, ne kestävät huomattavan pitkään. [22]

6 Paloturvallisuuden toteutus

Litiumakustojen paloturvallisuus on ketju, joka alkaa jo valmistajan päädyssä. Korkealaatuiset materiaalit ja oikeanlainen kuljetus varmistavat, etteivät akut pääse vikaantumaan jo ennen aurinkosähköjärjestelmään yhdistämistä. Esimerkiksi akkujen putoamiset, kolhiintumiset ja kovat lämpötilavaihtelut kuljetuksen aikana ovat omiaan lisäämään akun vikaantumisen riskiä [27]. Itse asennustilanteessa paloturvallisuutta voidaan parantaa asentajan näkökulmasta parhaiten tekemällä akkukytken oikeaoppisesti ja sijoittamalla akusto järkevään paikkaan: esimerkiksi pölyinen, kostea tai lämpötilaltaan epävakaa paikka tai kaikki nämä yhdistettynä eivät ole sopiva paikka akustolle.

Litiumakkujen suurin palovaaraa aiheuttava ominaisuus on lämpökarkaaminen. Riskit riippuvat pääosin akuissa käytetyistä materiaaleista, niiden laadusta ja akkujen oikeaoppisesta käsittelystä. Lämpökarkaaminen johtuu siitä, että kennoissa tapahtuu oikosulku, joka johtaa niiden lämpötilan nousuun. Se on eksoterminen eli lämpöä vapauttava reaktio, jolloin akussa syntyy palavia kaasuja, jotka voivat purkautuessaan aiheuttaa tulipaloja. Akuissa on nykyään sisäänrakennettuja suoja mekanismeja, kuten purkausventtiilejä, elektroniikkaa suoja pölyjen muodossa ja jäähdytysmekanismeja, mutta ne suojelevat akkuja syttyimiseltä vain tiettyyn pisteeseen asti. [27]

Paloturvallisuutta voidaan edistää passiivisilla tai aktiivisilla ratkaisulla tai organisaationallisilla toimilla, mutta parhaiten nämä kaikki toimivat yhdistettynä. Passiivisia ratkaisuja ovat esimerkiksi talon rakenteiden ja tilojen hyödyntäminen eli akuston järkevä sijoitus, akkujärjestelmän suoja ominaisuudet esimerkiksi telien ja kaappien osalta sekä muut suojausratkaisut, kuten käsisammuttimet ja muu alkusammutuskalusto. Aktiivisia ratkaisuja ovat paloilmoin, automaattiset vesisammuttimet sekä muu automatiikka ja suojausjärjestelmät mitä akkujärjestelmään tai kiinteistöön on yhdistetty. Organisaation toimilla voidaan kehittää henkilökunnan valmiutta toimia palotilanteessa sammutuskoulutuksilla, evakointisuunnitelmilla, yleisillä toimintaohjeistuksilla sekä ohjaamalla vaarassa olevia ihmisiä turvaan palotilanteessa. [29]

6.1 Lämpökarkaaminen

Litiumioniakuissa lämpökarkaamista voi syntyä akun nopeasta purkautumisesta oikosulun takia tai altistumisesta ulkoiselle lämmönlähteelle. Akun rakenteesta ja/tai kemiallisesta koostumuksesta riippuen sille on jokin lämpötila, jonka ylittyessä lämpötila jatkaa nousuaan itsestään. Tätä kutsutaan kriittiseksi lämpötilaksi. Sen yläpuolella akku tuottaa enemmän lämpöenergiaa mitä se pystyy siirtämään ulos, ja kierre on valmis. Lämpöreaktio synnyttää kaasuja, ja tietyssä pisteessä akun rakenne ja varoventtiilit pettävät ja kaasuja pääsee ulos. Tarpeeksi kuumassa lämpötilassa kaasut ja elektrolyytinesteet voivat syttyä itsestään. Lämpökarkaaminen voi jatkua pahimmillaan kennosta kennoon ketjureaktiona.

Lämpökarkaamista aiheuttavia sisäisiä oikosulkuja voi aiheuttaa akun fyysinen kaltoin kohtelu (kolhiminen, pudottaminen, läpäisy, tärinä). Ulkoinen oikosulku tai akun liiallinen kuormittaminen, lataaminen pakkasella, varauksen kokonaan purkaminen, tai yksinkertaisesti valmistusvirheet lisäävät myös lämpökarkaamisen riskiä. Akun sijoittaminen myös liian kuumaan tilaan, jossa se ei pysty luovuttamaan synnyttämäänsä lämpöä kuormittaa akkua ja aiheuttaa palovaaran. [27]

6.2 Sammutustapoja

Syttyessään litiumakkupalo ruokkii itse itseään, koska reaktio tuottaa palamiseen tarvitsemansa hapen itse. Tämä luo erityisiä haasteita litiumakkupalojen sammuttamisen suhteen. Litiumakkupalon sammuttaminen vaatii jonkin näistä kolmesta poistamista: palava aine, lämpö tai happi. Koska litiumakkupalo roihuaa niin voimakkaasti, hapen poistaminen tukahduttamalla on vaikeaa, ja koska reaktio tuottaa happea itse, lähes mahdotonta. Palava aine loppuu itsestään jossain vaiheessa, mutta siinä vaiheessa voi palo olla siirtynyt jo muihin tiloihin, jolloin kustannukset kasvavat huomattavasti. Paras vaihtoehto on siis

akun jäädyttäminen, ja tämä onnistuu parhaiten suurilla määrillä vettä. Vesisammutus ja -jäädyttäminen kuitenkin muodostavat vetykaasua, joka voi puolestaan kiihdyttää paloa.

Erilaisten vaahtoa, jauhetta ja hiilidioksidia hyödyntävien käsisammuttimien käyttäminen on keuhko vaihtoehto, koska ne eivät jäädytä kennoja riittävästi eivätkä estä lämmön johtumista kennosta toiseen. Lisäksi litiumakkupaloissa syntyy runsaasti haitallisia kaasuja, jolloin sammuttajan oma turvallisuus on vaarassa. Litiumioniakkujen sammutuskalustoa on vaikea arvioida ja vertailla, koska akkutyyppejä on monia ja standardoitua testimenetelmää litiumakkupalojen sammuttamiseen ei vielä ole. [23]

Käsisammuttimet kuitenkin kehittyvät, ja niille on valmisteilla oma teholuokka litiumakkupaloja varten. Esimerkiksi Dupré Mineralsin kehittämä AVD (aqueous vermiculite dispersion, vesipitoinen vermikuliittidispersio) on juuri litiumakkupaloja varten kehitetty käsisammutinteknologia (kuva 11). Se sisältää alumiini-rauta-magnesiumsilikaattihiukkasia, joissa on mikroskooppisia vesikerroksia. Hiukkasia sumutetaan palavan akun päälle, jolloin silikaatit muodostavat akun ympärille eristävän kerroksen, joka jäädyttää paloa ja luo sille hapettomat olosuhteet eristävän kerroksen kuivuessa kuoreksi, näin ollen poistaen siis kaksi kolmesta palon edellytyksistä. [24]



Kuva 11. Esimerkki AVD-sammuttimesta. Pitkä sammutusvarsi helpottaa sammutettavan kohteen lähelle pääsemistä turvallisesti. [25]

6.3 Sisäänrakennetut sammutusjärjestelmät

Koska litiumakkupalo leviää herkästi, niiden sammuttaminen on etenkin käsisammuttimilla vaarallista. Jos palo on päässyt jo leviämään, sammuttaja voi tukehtua palamisreaktiossa syntyneisiin kaasuihin tai muihin palosta leviäviin yhdisteisiin. Akkujen rakenteiden pettäessä kaasut voivat purkautua voimakkaasti ulos akusta ja syttyä, mikä on myös sammuttajalle turvallisuusriski. Kuitenkaan perinteiset automaattiset sprinklerivesisammuttimet eivät riitä voimakkaan litiumakkupalon sammuttamiseen, koska ne eivät suihkuta tarpeeksi vettä tarpeeksi nopeasti jäähdyttääkseen akkua. Tästä syystä sisäänrakennetut sammutusjärjestelmät ovat tehokas keino välttää suuria vahinkoja, koska palo saadaan

sammutetuksi tai vähintään rajatuksi pienelle alueelle suhteellisen nopeassa ajassa.

Kiinalainen litiumakkuvalmistaja Sunwoda Electronic on kehittänyt akkuvarastoja varten oman automaattisen palonsammutusjärjestelmän, joka voidaan laukaista automaattisesti tai manuaalisesti hätätilanteissa. Tulipalon havaitsee joko lämpömittari, savunilmaisin, henkilökunta tai nämä kaikki yhdessä. Lämpömittari tai savunilmaisin ohjaavat tiedon eteenpäin palohälytysohjaimelle, tai henkilökunta laukaisee palohälytyksen manuaalisesti sekä välittää tiedon pelastuslaitokselle. Palohälytyksen lauetessa järjestelmä avaa itse tuuletus- ja savunpoistokanavat ja laukaisee mahdolliset tuulettimet käyntiin. Tämän jälkeen yleensä noin 30 sekunnin päästä solenoidi avaa sammutusaineen, paineilman sekä hydraulikan sylinterien venttiilit, jolloin automaattinen sammutus alkaa kestäen noin 10 sekuntia. Mikäli palo on ehtinyt jo ennen automaattisammutusta niin voimakkaaksi ettei automaattinen alkusammutus riitä, on palokunta jo kutsuttu paikalle ja henkilökunta on ehtinyt reagoimaan tulipaloon. [26]

6.4 Toimittajan ja asentajan vaikutus paloturvallisuuteen

Akustot istuvat usein valvomattomissa olosuhteissa, jolloin toimittajan rooli korostuu paitsi sähköturvallisuuksessa myös paloturvallisuuksessa, varsinkin jos akustoon ei ole liitetty itsenäistä palonsammutusjärjestelmää. Tärkeää on suosia luotettavia akkutoimittajia, välttää väärennöksiä ja käyttää akkuja, jotka täyttävät alan standardit. Standardeja ovat antaneet mm. IEC (International Electrotechnical Commission), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ja UL (Underwriters Laboratories Inc). Akkuja hankkiessa kannattaa pitää silmällä, onko niihin liitetty BMS:iä (battery management system, akun valvontajärjestelmä), joka pitää jännitteet ja virrat oikealla tasolla, sekä hankkia akkutyyppille sopiva latausjärjestelmä.

Suuriin akustojärjestelmiin voi toimittaja liittää jo valmiiksi omia jäähdytys- ja ilmastointitekniikkaa ja muuta turvallisuusautomaatiikkaa, jaärkevintä onkin hankkia kokonaisuus, jossa turvallisuus on huomioitu. Etävalvontamahdollisuudet ovat myös olennainen osa paloturvallisuuskokonaisuutta, ja ne pitäisi ottaa huomioon aina ryhdyttäessä uuden akuston toimittamiseen ja asentamiseen. Asentajan puolesta on tärkeää noudattaa kaikkia asennukseen, käyttöön ja huoltoon annettuja ohjeita. Akkupalojen syynä on useimmiten akkujen vääränlainen käsittely, asentaminen ja niiden kaltoin kohtelu ennemmin kuin tehtaalta peräisin oleva tekninen vika. Tästä syystä vahinkojen ehkäisyjen kannalta on tärkeää asennushenkilökunnan kouluttaminen, riittävä tietotaito sekä käyttöohjeiden saatavuuden varmistaminen. On hyvä ottaa myös huomioon vanhojen akkujen uusiminen niiden käyttöiän päätyttyä tai tehokkuuden dramaattisesti laskiessa, jos ei paloturvallisuuden niin akustonärkevän käytön kannalta. [27]

6.5 Akuston sijainti

Yksi tapa parantaa paloturvallisuutta akustojen suhteen on sijoittamalla ne oikein. Kun suunnitellaan akuston hankkimista aurinkosähköjärjestelmän tueksi, täytyy aina muistaa, millaiseen kiinteistöön akusto on tulossa. Esimerkiksi sairaanhoitolaitokset ovat hankalia evakuoita tulipalon sattuessa mahdollisten liikuntarajoitteisuustekijöiden vuoksi, ja kauppakeskuksissa suurten ihmismäärien evakuoiminen nopeasti ja turvallisesti voi tuottaa lisähaasteita. Myös pelastuslaitoksen toimintamahdollisuudet, etenkin palokohteen sammutuksen ja poistamisen mahdollisuudet tulee ottaa huomioon. [28]

Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimusstandardi vaatii akkujen sijoittamista suojattuun tilaan. Käytettäviä tiloja ovat rakennuksissa olevat erilliset akkuhuoneet, sähkötilassa olevat akkuja varten erotetut alueet, kaapit tai kotelot rakennusten sisä- tai ulkopuolella ja yhdistelmäkaapit. Akuston läheisyydessä, etenkin sen yläpuolella ei saisi olla palokuormaa, koska tulipalotilanteessa palo jatkuu ensi tilassa suoraan ylös päin. Lisäksi sen alustan tulisi olla heikosti

syttyvää materiaalia tai mieluiten palamatonta [27]. Mikäli mahdollista, moduulitelineet voidaan sijoittaa erilleen toisistaan, mikä voi merkittävästi vähentää suuren tulipalon leviämisen riskiä tai jopa estää sen. Sammuttaminen myös helpottuu, kun sammutushenkilöstöllä on paremmin tilaa työskennellä.

Akkujen napojen tulee olla suojattuja, mutta tämä onnistuu yleisesti jo asennustilanteessa, kun akkujen navat yhdistetään kaapeleilla, ellei akustoon jostain syystä liitetä ylimääräisiä akkuja, jotka eivät ole yhdistettynä muihin akkuihin. Akustojen kanssa käytettävien sähkökaapelien täytyy olla palosuojattuja, ja sama pätee kaapeleiden liitoksiin. Lisäksi tiloissa, joissa ei ole automaattista sammutusjärjestelmää, olisi akuilla hyvä olla noin 2,5 metrin etäisyys muihin palaviin materiaaleihin. Lisäksi täytyy muistaa muu talotekniikka kuten ilmastointi, jotta saadaan estettyä tulipalossa myrkyllisten palokaasujen leviäminen muuhun kiinteistöön. Suunnittelussa tulee huomioida eri tavoin kaasujen hallintakeinoja niiden ohjaamiseksi ulos rakennuksesta turvallisesti.

Paloturvallisuuden kannalta järkevin paikka sijoittaa akusto onkin erillinen, palosuojattu kontti (kuva 12). Kontista palo ei pääse leviämään muuhun kiinteistöön nopeasti, koska se on jo sijaintinsa puolesta rajattu erilleen muista rakenteista. Lisäksi kontti voidaan myös nostaa omille tukirakenteilleen, jolloin mahdolliset elektrolyyttivuodot eivät valu maahan, vaan erilliselle valuma-alustalle. Tämä myös estää pahimmat maastopaloriskit, koska kontti ei ole kosketuksissa esimerkiksi nurmikkoon. Markkinoilla onkin juuri litiumioniakustoja varten suunniteltuja konttiratkaisuja, joissa alkusammutus, automatiikka ja valuma-alustat on otettu huomioon.



Kuva 12. Esimerkki litiumakkukontista. [28]

7 Henkilökunnan paloihin varautuminen

Kun suunnitellaan akuston hankkimista aurinkosähköjärjestelmän tueksi, täytyy aina muistaa, millaiseen kiinteistöön akusto on tulossa. Esimerkiksi sairaanhoitolaitokset ovat hankalia evakuoida tulipalon sattuessa mahdollisten liikuntarajoitteisuustekijöiden vuoksi, ja kauppakeskuksissa suurten ihmismäärien evakuointi nopeasti ja turvallisesti voi tuottaa lisähaasteita. Myös pelastuslaitoksen toimintamahdollisuudet, etenkin palokohteen sammutuksen ja poistamisen mahdollisuudet tulee ottaa huomioon.

Litiumioniakkujen käyttötiloissa olisi hyvä olla paloilmamaisimet ja muuta turvallisuusautomaatiikkaa tai jopa valvontakamerat, jotta ongelmatilanteet havaitaan ajoissa ja tulipalotilanteessa vahingot saataisiin minimoitua. Mikäli henkilökunta epäilee akussa olevan vikaa, paras merkki viallisesta akusta ja lämpökarkaamisesta on polttavan kuuma akku, ja mikäli akusta pakenee savukaasuja, se on jo

piste, jossa kohtaa on ryhdyttävä välittömiin toimenpiteisiin. Tästä syystä akuston läheisyydessä tulisi olla alkusammutuskalustoa, kuten pikapaloposti tai neste- tai vaahtosammutin, jonka tulee myös olla jännitteisiin paloihin sopiva. Häätöilmoituksen tekemisen kynnyksellä sekä muut toimet eri akkuvaaratilanteissa tulee myös suunnitella huolella ja opettaa henkilökunnalle. Henkilöstön alkusammutuksen jälkeen on syytä myös huolehtia jälkivartioinnista, koska liekkien sammuttua akusta saattaa silti tapahtua lämpökarkaamista, jolloin palo voi syttyä uudelleen.

Koska akkupalon sammuttaminen voi viedä paljon aikaa, on tärkeää suunnitella huolellisesti ihmisten turvallinen paloalueelta evakuoiminen ja arvioida riskille altistuvien ihmisten määrä ja seurausten vakavuus. Tämän takia rakennuksen henkilöstö pitäisi perehdyttää huolellisesti kiinteistön hätäpoistumisteihin ja kouluttaa järjestämällä hätäpoistumisharjoituksia säännöllisesti. Akkujen kanssa tekemisissä olevan henkilöstön tulisi oppia tunnistamaan akkujen lämmönkehitys ja pohtia voisiko lämpökarkaamista kennosta toiseen estää tavalla tai toisella. Tämä onnistuu yleensä akkujen oikeaoppisella käytöllä, sekä turvautumalla ammattilaisten apuun vikatilanteissa. [27]

8 Yhteenveto ja päätelmät

Litiumakkupalojen ennakointi, hallitseminen ja sammuttaminen älykkäiden aurinkosähköjärjestelmien osalta on yhtä vaikeaa, kuin minkä tahansa muunkin akun tai akuston kohdalla. Erona on se, että älykäs järjestelmä kykenee ilmoittamaan palosta ajoissa, jolloin siihen voidaan reagoida nopeasti. Myös mahdolliset automaattiset sammutusjärjestelmät helpottavat sammutustyötä ja vähentävät vahinkoja ja täten myös korjauskustannuksia.

Tavoitteena oli kartoittaa akustojen turvallisuuden nykytilaa, selvittää onko siinä parantamisen varaa sekä sitä, voiko sitä asentajan näkökulmasta parantaa. Akustot aurinkosähköjärjestelmissä ovat pääsääntöisesti paloturvallisia, koska litiumioniakut ovat yleisesti ottaen turvallisia. Litiumakkujen ympärillä on tehty viime vuosikymmeninä eniten tutkimustyötä, ja niiden teknologia jatkaa kehitystään koko ajan. Litiumakut eivät kuitenkaan ole täysin pomminvarma ratkaisu, koska silloin tällöin mediassa on esitelty tapauksia, kun matkapuhelimen tai sähköauton akku on päässyt lämpökarkaamisen seurauksena syttymään tulleeseen. Tästä syystä huolellisuus on ensiarvoisen tärkeää litiumakkujen kanssa.

Akkuvalinnoilla ja akkujen oikeaoppisella käytöllä päästään jo pitkälle paloturvallisuuden kannalta. Asentajan näkökulmasta akustojen paloturvallisuutta voidaan parhaiten parantaa noudattamalla suunnittelussa annettuja ohjeita akustojen sijoituksen ja kytkennän suhteen sekä hyödyntämällä akustolle tarkoitettuja tiloja harkitusti.

Lähteet

- 1 Aurinkosähkö. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima>>. Luettu 12.3.2021.
- 2 Lewis, Nathan S., Nocera, Danigel G. 2006. Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. Verkkoaineisto. <<https://www.pnas.org/content/103/43/15729.full>>. Luettu 12.3.2021.
- 3 Paneelit. Verkkoaineisto. Suntekno Oy. <<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>>. Luettu 13.3.2021.
- 4 Aurinkosähköjärjestelmään kuuluvat laitteet. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <<https://aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkosahko-kokoonpano/>>. Luettu 13.3.2021.
- 5 Aurinkolämpöjärjestelmät. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat>. Luettu 15.3.2021.
- 6 Ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Finsolar. <<https://finsolar.net/aurinkoenergia/ymparistovaikutukset/>>. Luettu 15.3.2021.
- 7 Aurinkoenergian kirkas tulevaisuus. Verkkoaineisto. Wärtsilä Oy Abp. <<https://www.wartsila.com/fi/suomi-100/teknologia/aurinkoenergian-kirkas-tulevaisuus>>. Luettu 17.3.2021.
- 8 Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Verkkoaineisto. Motiva oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Luettu 17.3.2021.

- 9 Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Verkkoaineisto. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT. <https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>. Luettu 18.3.2021.
- 10 Power optimizer module add-on. Verkkoaineisto. SolarEdge Technologies, Inc. <<https://www.solaredge.com/products/power-optimizer#/>>. Luettu 19.3.2021.
- 11 Mikä on aurinkovoimalan virran optimoija? Verkkoaineisto. Solnet Finland Oy. <<https://www.solnet.group/fi/blogi/mik%C3%A4-on-virran-optimoija>>. Luettu 19.3.2021.
- 12 Firefighter Gateway – Palomiehen paras kaveri aurinkovoimalassa. Verkkoaineisto. Solnet Finland Oy. <<https://www.solnet.group/fi/blogi/firefighter-gateway-palomiehen-paras-kaveri-aurinkovoimalassa>>. Luettu 20.3.2021.
- 13 SolarEdge inverters – SolarEdge monitoring. Verkkoaineisto. Empower Energy. <<https://empowerenergy.co.uk/solaredge/>>. Luettu 22.3.2021.
- 14 BU-101: When Was the Battery Invented? Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/learn/article/when_was_the_battery_invented>. Luettu 16.4.2021.
- 15 BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lead_based_batteries>. Luettu 22.3.2021.
- 16 Dynamic model development for lead acid storage battery. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Lead-acid-battery-construction_fig1_337293302>. Luettu 23.3.2021.
- 17 Common uses for small solar panel kits. Verkkoaineisto. RNG Group Inc. <<https://www.renogy.com/blog/common-uses-for-small-solar-panel-kits/>>. Luettu 24.3.2021.

- 18 Akku. Verkkoaineisto. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Akku>>. Luettu 24.3.2021.
- 19 Akut. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvo-tekniikka/akut>. Luettu 24.3.2021.
- 20 How to Find Happiness with LiFePo4 (Lithium-Iron) Batteries. Verkkoaineisto. Solacity Inc. <<https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>>. Luettu 25.3.2021.
- 21 BU-204: How do Lithium Batteries Work? Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries>. Luettu 26.3.2021.
- 22 Lithium. Harding Energy Inc. Verkkoaineisto. <<https://www.hardin-genergy.com/lithium-2/#phosphate>>. Luettu 28.3.2021.
- 23 Litiumioniakkujen paloturvallisuus. Verkkoaineisto. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes. <<https://tukes.fi/documents/5470659/10576880/Niemi+Meurman+Litiumioniakkujen+paloturvallisuus/cce05acc-6b48-e69e-70b6-14c27781b93e/Niemi+Meurman+Litiumioniakkujen+paloturvallisuus.pdf>>. Luettu 2.4.2021.
- 24 What is Aqueous Vermiculite Dispersion (AVD)? Verkkoaineisto. Dupré Minerals Ltd. <<https://www.avdfire.com/what-is-aqueous-vermiculite-dispersion/>>. Luettu 16.4.2021.
- 25 4.8 I käsisammutin HOUSEGARD – AVD-sammutin litiumille. Verkkoaineisto. SLO Oy. <<https://verkkokauppa.slo.fi/fi/6411744>>. Luettu 16.4.2021.
- 26 Sunwoda Electronic Co. Henkilökohtainen tiedonanto. Luettu 16.4.2021.
- 27 Opas teollisuuden litiumioniakkujen turvalliseen käyttöön. Verkkoaineisto. Gaia Consulting Oy. <<https://tukes.fi/docu->

- ments/5470659/8237195/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalli-
seen+k%C3%A4ytt%C3%B6n/c5c7fefe-7979-4344-ba25-
ba18a6f9f234/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalli-
seen+k%C3%A4ytt%C3%B6n.pdf>. Luettu 17.4.2021.
- 28 Litiumakkukontti. Verkkoaineisto. Suomen Vuokrakontti Oy. <<https://vuokrakontti.fi/erikoiskontit/litiumakkukontti/>>. Luettu 17.4.2021.
- 29 Muuttuva rakennettu ympäristö ja uudet teknologiat – paloturvallisuus ja riskinhallinta. Verkkoaineisto. Suomen pelastusalan keskusjärjestö SPEK. <https://issuu.com/spek_ry/docs/muuttuva_rakennettu_ymparisto_toukokuu_2020?fr=sYWVhYTE0NDkxOTU>. Luettu 17.4.2021.
- 30 Litium. Verkkoaineisto. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Litium>>. Luettu 1.5.2021.