

Omid Musawi

Sähköenergian varastointiteknologiat ja varastoinnin hyödyntäminen kotitalouksissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

20.11.2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Omid Musawi Sähköenergian varastointitekniikat ja varastoinnin hyödyntäminen kotitalouksissa 35 sivua 20.11.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Yliopettaja Jarno Varteva
<p>Uusiutuvien energialähteiden integrointi sähköverkoissa on lisääntynyt dramaattisesti viime vuosina. Uusiutuvista energialähteistä saatava teho ei kuitenkaan ole niin turvattu eikä ole helppoa mukauttaa sähkön kysynnän muutoksiin, kuten perinteisten sähköjärjestelmien tarjoama teho. Tämän seurauksena sähkövarastoja tarvitaan ja niitä integroidaan myös sähköverkkoon, jotta varmistetaan tehontasapainon, sähköverkon joustavuuden ja sähkönjakelun laadun ja luotettavuuden.</p> <p>Tämän työn tavoitteena oli tutkia erilaisia sähkön varastointitekniikoita, arvioida niiden haasteita ja etuja, kehitystä tulevaisuudessa, varastojen käyttötarkoituksia, kustannuksia sekä arvioida tutkimuksen perusteella sähkövarastojen soveltuvuutta kotitalouksien sähköenergian hallinnassa. Tavoitteiden saavuttamiseksi tehtiin kirjallisuuskatsaus erilaisten sähkön varastointitekniikoiden ominaisuuksista ja käyttökohteista sekä tietoa kerättiin useista eri julkaisuista, diplomitoista sekä artikkeleista, jotka liittyivät aihepiiriin.</p> <p>Akut ovat sähkön varastointitekniikoista soveltuvimpia pienkuluttajien käyttöön. Tämä johtuu akkupohjaisten varastojen korkeasta hyötysuhteesta, nopeasta vasteajasta ja suuresta energiatiheudesta. Sähköenergian varastointi kotitalouksissa mahdollistaa kulutuksen ajallisen siirron, mahdollisen oman tuotannon tehokkaamman käytön omassa kulutuksessa ja sähkön syötön sähkökatkojen aikana, jolloin varastoinnista voi hyötyä sekä kuluttaja että sähköyhtiöt. Sähkövaraston avulla kuluttaja voi ajoittaa kulutusta edullisten tuntien ajalle, jolloin on mahdollista pienentää sähköstä maksettavaa hintaa.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että energiavarastojen käyttö tulevaisuudessa kasvaa vääjäämättä, koska sähköverkon on kyettävä sopeutumaan tuleviin muutoksiin. Tällä hetkellä sähkövarastojen tuottojen ja elinkaarikustannusten arviointia voidaan pitää yksi sähkön varastointiin liittyvistä haasteista. Sähkövarastojen hinnat laskevat tulevaisuudessa sähkön varastointitekniikoiden kehittyessä ja varastoinnin yleistyessä.</p>	
Avainsanat	Sähkövarasto, kotitalouskuluttaja, varastointitekniikat, akut

Author Title Number of Pages Date	Omid Musawi Energy Storage Technologies and Utilization of Storages in Households 35 pages 20 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Jarno Varteva, Principal Lecturer
<p>Integration of renewable sources in electrical networks has increased dramatically in recent years. However, the power supplied by renewable energy sources is not as secure and easy to adjust to changes in demand, as the power supplied by traditional power systems. As a result, storage systems are also integrated into the electrical network, in order to ensure reliability and quality in the performance of the power system.</p> <p>The purpose of this study was to research different energy storage technologies and evaluate their advantages and disadvantages, costs of storage and applications in electricity grid, and to assess the suitability of storage in households' energy management. To achieve this, a literature review was carried out on uses of various types of storage technology and information was collected by reading several different publications, theses and articles connected with the topic.</p> <p>Battery energy storages are the most suitable energy storage technologies to be used in the households. This is mainly because of their relatively high energy density, high efficiency, fast response time and broad scale of energy capacity. Electrical energy storage in households makes it possible to time-shift electric demand, to supply the power during power outages and to use self-produced energy more efficiently, so that storage can benefit electricity companies and customers. With energy storage, the customer can time-shift demand from high electricity prices to low electricity prices.</p> <p>On the basis of this study, it can be concluded that the use of energy storages will inevitably increase in the future, because the electrical power grid must be able to adapt to future changes. At present, estimating the income and life-cycle costs of electric storage can be considered one of the challenges of electricity storage. The cost of electrical storage will decrease in the future as the electricity storage technologies evolve and storage becomes more common.</p>	
Keywords	Electrical energy storage, batteries, storage technologies

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkön varastoinnin syyt	2
3	Yleiskatsaus energiavarastoihin	3
3.1	Akut	3
3.2	Superkondensaattorit	10
3.3	Vauhtipyörä	11
3.4	Pumppuvoimalaitokset	13
3.5	Paineilmavarastot	15
3.6	Suprajohtava magneettinen energiavarasto	16
3.7	Lämpövarastot	17
4	Sähkön varastointitekniologioiden vertaileva analyysi	18
5	Sähkövarasto standardeissa ja lainsäädännössä	24
5	Sähkövarastojen käyttökohteet Suomen energiajärjestelmässä	26
6	Sähköenergian varastointi kotitalouksissa	28
6.1	Varastointimenetelmät	29
6.2	Sähkön varastoinnin hyödyt kotitalouksissa	30
7	Sähkövarastojen taloudellisuus	31
7.1	Investointikustannukset	31
7.2	Käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä muut kustannukset	32
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	35

Lyhenteet

CAES	Compressed Air Energy Storage. Paineilmalla toimiva energiavarasto.
LAES	Liquid Air Energy Storage. Nesteilmaenergian varastointi.
Li - ion	Lithium – ion. Litium-ioni-akku.
Ni-Cd	Nickel-cadmium batteries. Nikkeli-kadmium-akut.
PHES	Pumped heat electrical storage. Pumpattu lämpö sähkövarasto.
PHS	Pumped Hydro Storage. Pumpattu vesivarasto.
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage. Suprajohtava magneettinen energiavarasto.
VRLA	Valve-Regulated Lead-Acid Battery. Suljettu huoltovapaa lyijyakku.

1 Johdanto

Uusiutuvien energialähteiden integrointi sähköverkoissa on lisääntynyt dramaattisesti viime vuosina. Uusiutuvista energialähteistä saatava teho ei kuitenkaan ole niin turvattu eikä ole helppoa mukauttaa sähkön kysynnän muutoksiin, kuten perinteisten sähköjärjestelmien tarjoama teho. Suomessa sähkön pienimuotoista tuotantoa uusiutuvilla energialähteillä pyritään lisäämään osana energia- ja ilmastostrategiaa. Viime vuosina pien-tuotanto on lisääntynyt voimakkaasti ja sen odotetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa laitteiden hintojen laskiessa ja tällöin kannattavuus myös tulee paranemaan. Tämän seurauksena sähkö välivarastointia tarvitaan ja niitä integroidaan myös sähköverkkoon.

Ilmaston lämpeneminen ja sen seuraukset ovat aiheuttaneet ihmisissä huolen maapallon tilasta tulevaisuudessa. Energiantuotannolla on huomattava osuus ilmaston lämpenemisen suhteen. Viime aikoina onkin yritetty löytämään konsteja, joilla energiantuotannon ympäristövaikutuksia voitaisiin supistaa. Energiatuotannon ympäristövaikutuksia voidaan vähentää esimerkiksi ohjaamalla kulutusta tuotannon mukaan. Sähkötuotannon nopeaa säätöä yleensä yritetään Suomessa toteuttamaan vesivoimalla, mutta säätökapasiteetti ei aina riitä ja kulutushuippujen tehotarve täytyy korvata hiilivoimalla, joka tuottaa paljon päästöjä. Sähköä varastoimalla saataisiin uusi tekijä sähköjärjestelmän joustavuuteen, jolloin voidaan myös vähentää fossiilisia polttoaineita käyttävien huipputeholaitosten tarvetta sähkön tuotannossa ja tulevaisuudessa jopa lopettaa kokonaan niiden käyttöä.

Opinnäytetyön aiheena on selvittää erilaisia sähkön varastointiteknologioita, arvioida niiden haasteita ja etuja, kehitystä tulevaisuudessa, varastojen käyttötarkoituksia, kustannuksia sekä arvioida tämän tutkimuksen perusteella sähkövarastojen soveltuvuutta kotitalouksien sähköenergian hallinnassa. Tässä työssä käydään laajemmin kotitalousta-solla hyödynnettäviä sähkövarastointiteknologioita. Työssä selvitetään sähkövarastojen kykenevyyttä tukemaan suomen energiajärjestelmää, jonka kulutus on vaihtelevaa. Sähkön välivarastoinnin toivotaan vähentävän sekä kantaverkon että jakeluverkkojen kuormitusta.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Jarno Varteva, joka toimii yliopettajana Metropolian Albertinkadun toimipisteessä. Toimeksianto liittyy Vartevan omaan erikoisosaamiseen ja suoritetaan, koska tulevaisuuden sähköverkkojärjestelmissä tarvitaan uusia ratkaisuja tehontarpeen tasapainottamiseen ja ylläpitoon.

2 Sähkön varastoinnin syyt

Tähän asti sähkön varastoinnille ei ole ollut suurta tarvetta, sillä voimalaitokset ovat tuottaneet sähköä kulutuksen mukaan. Viime vuosina kuitenkin uusiutuvien energialähteiden kuten aurinko- ja tuulivoiman tuotanto kasvanut entistä enemmän ja niiden käyttöönoton kasvu jatkuu ympäri maailman. Tulevaisuudessa tarvitaan yhä enemmän erilaisia sähkön varastointiratkaisuja, sillä aurinko- ja tuulivoiman tuotannon kasvu kasvattaa tasapainottavan säätövoiman. Hajautetun tuotannon yhteydessä uudet energialähteet perustuvat pääasiassa uusiutuviin luonnonvaroihin. Energian tuotannon huippu ei kuitenkaan aina ole energiakysynnän mukaista. Niillä voi olla suuria vaihteluita päivittäisissä, kausittaisissa tai jopa vuosittaisissa energiantuotanto kausissa. Siksi tarvitaan sähkövälivarastointia ja energian varastointijärjestelmät voivat olla erittäin hyödyllisiä tehokkaan energiahallinnan kannalta. Sähkönvarastointijärjestelmät voivat varastoida energiaa pienen kulutuksen ja kysynnän aikana ja syöttää tehoa huipputehoaikoina. Sähkövarastojen perusideana on varastoida sähköä silloin, kun tuotanto ylittää sähkönkulutus tarvetta. Kun taas sähkön kulutus ja kysyntä kasvaa, sitä voidaan purkaa varastoista. [1.]

Sähkövarastoilla on mahdollista tasata sähkönkulutusta, tuotantoa sekä niiden avulla voidaan ratkaista uusiutuvan energian haasteita. Esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmässä aurinkoisena päivänä tuotettua sähköä voidaan varastoida ja kulutushuippujen aikaan käytetään varastoitunutta sähköä, jolloin kustannuksia saadaan paljon pienemmäksi ja samalla vähennetään sähköverkon kuormitusta. Sähkön tuotantomuodot, jotka ovat riippuvaisia sään olosuhteista, kuten aurinko- ja tuulivoima, vaativat sähköverkolta tulevaisuudessa nykyistä enemmän joustavuutta. Tällä hetkellä joustoa tuovaa säätövoimaa sähköjärjestelmään saadaan fossiili- ja vesivoimalaitoksilta, mutta sähköä varastomalla saataisiin uusi tekijä sähköjärjestelmän joustavuuteen, jolloin voidaan myös vähentää fossiilisia polttoaineita käyttävien huipputeholaitosten tarvetta sähkön tuotannossa. Sähkövarastoinnin tuoma joustavuus mahdollistaa uusiutuvien energialähteiden käytön kasvua Suomessa. [2.]

Sähkövarastot voisi olla yksi hyvä ratkaisu sähköjärjestelmän tehotasapainon ylläpitämiseen. Varastoinnilla voidaan vaikuttaa myös sähkön kysyntäjoustoon, jolla tarkoitetaan sähkönkäytön siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeisiin. Sähkövarasto esimerkiksi kykenee ohittamaan omatoimisesti lyhyet sähkökatkot, antaa lisää aikaa varavoiman käynnistämiseen pidempikestoisten katkojen tapauksessa ja auttaa taasaamaan sähkönkulutusta sekä poistamaan haitallista loistehoa, jolloin sähkönsiirtomaksut pienenevät. Sähkövarastot tulevat olemaan osa tulevaisuuden älykästä energiajärjestelmää. Sähkön välivarastoinnilla tuotanto ja kysyntä voidaan sovittaa joustavammin yhteen, ja varasto toimii myös sähköverkon vakauttajana vikatilanteissa. Sähkövaraston etuja ovat lisäksi sen nopea käynnistyminen ja helppo säädettävyys. Sähkön varastoinnin avulla sähköyhtiöille ja kuluttajille syntyy jopa uusia liiketoimintamalleja. [3.]

3 Yleiskatsaus energiavarastoihin

Viime vuosisadan aikana energianvarastoteknologiat ovat jatkaneet kehitystä ja on muokautuneet yhä paremmin muuttuviin energia tarpeisiin. Energiavarastojärjestelmät tarjoavat tehokkaita menetelmiä sähköjärjestelmien hallinnoimiseen, joustavamman energiainfrastruktuurin luomiseen ja kustannussäästöjen lisäämiseen sähköverkkoyhtiöille ja kuluttajille. Energiavarastoja voidaan lajitella eri luokkiin: akkupohjaisiin energiavarastoihin, vauhtipyöriin, suprajohtaviin magneettiseen energiavarastoon, pumppuvoimalaitoksiin, paineilmaparastoihin ja lämpövarastoihin. Tässä luvussa kerrotaan, mitkä ovat kunkin energiavarastotavan toiminnan pääperiaatteet ja miten energiavarastot tulevat kehittymään tulevaisuudessa. Akkuja käsitellään laajemmin tässä luvussa, koska ne ovat tavallisimpia sähköenergian varastointiratkaisuja nykyään ja on jo olemassa monia erilaisia akkuja, joita käytetään erilaissa sovelluskohteissa. Osa energian varastointitekno-
gioista on vielä kehitys- ja tutkimustyövaiheessa tai niitä ei ole vielä täysin kehitetty.

3.1 Akut

1700-luvun lopulla Alessandro Volta keksi ensimmäisen akun ja täten akku on vanhin sähköenergian varastointimenetelmä. Siitä lähtien akut ovat kehittyneet vuodesta toiseen ja nykyään akkuvarastot ovat yksi keskeisimpiä osa-alueita tulevaisuuden sähköverkossa. Akkujen kehitystä on ohjanneet kunkin ajan vaatimat tarpeet ja tällä hetkellä

akkukehitystä ohjaavat sähköautot ja kannettavat laitteet, joiden tarpeisiin tarvitaan energiatiheyksiltään mahdollisimman tuhteja akkuja. Teollisuudessa käytetään yleisesti kolmea erilaista akkutyypistä: lyijyhappoakkua, nikkeli-kadmiumakkua ja suljettua huoltovapaa lyijyakkua. [4.]

Akkujen toimintaperiaatteet

Akku on sähkökemiallinen järjestelmä, jonka purkaminen ja lataaminen aiheuttavat kemiallisia reaktioita. Akut ovat tavallisimpia energiavarasto muotoja, jossa energia muuttuu kemiallisesta muodosta sähköksi ja akkua ladattaessa päinvastoin. Sähkökemiallinen kenno sisältää kaksi elektrodia, positiivinen ja negatiivinen, ja elektrolyytti, joka erottaa näitä kahta elektrodia toisistaan. Negatiivista elektrodia kutsutaan anodiksi ja positiivista elektrodia katodiksi. Elektrolyytin on oltava elektroninen eristin, joka estää akun itsestään purkautumisen ja samalla pystyvä tekemään ioneja anodista katodiin. [5, s. 100-102.]

Akusta saadaan virtaa, kun kennot purkautuvat kemiallisten reaktioiden seurauksena. Anodissa tapahtuu hapetusreaktio ja katodissa pelkistymisreaktio. Negatiiviset ionit, joita kutsutaan anioneiksi siirtyvät negatiiviseen elektrodiin ja positiiviset ionit eli kationit liikkuvat positiiviseen elektrodiin. Nämä reaktiot aiheuttavat elektrodien virtauksen negatiivisesta elektrodista positiiviseen elektrodiin ja antavat virtaa liitettyihin laitteisiin kulke-
malla niiden läpi. [5, s. 100–102.]

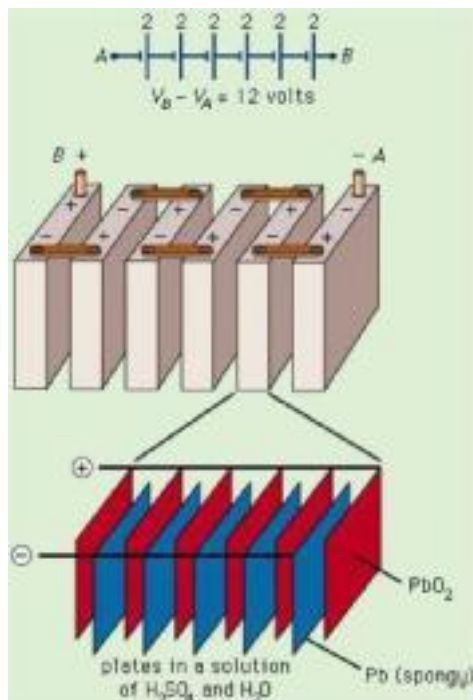
Virtausakut

Virtausakku koostuu kahdesta kemiallisesta komponentista, jotka on liuotettu nestemäisiin elektrolyytteihin, jotka on useimmiten erotettu kalvolla toisistaan. Virtausakun teknologiassa energianlähteenä käytetään nestemäistä elektrolyyttiä sähköä tuottamiseen ja ne voidaan ladata uudelleen saman järjestelmän sisällä. Yksi keskeisimmistä eduista virtausakuissa on se, että ne voidaan välittömästi ladata vaihtamalla elektrolyytinestettä. Virtausakkuja ei ole kaupallisesti kovin paljon tuotettu, koska niillä on matala energiatiheys verrattuna sähkökemiallisiin akkuihin. [6.]

Lyijyhappoakut

Lyijyhappoakut olivat ensimmäisiä kaupallistettuja ladattavia akkuja. Gaston Plante keksi ensimmäisen lyijyhappoakun vuonna 1859. Lyijyhappoakkujen tekniikka on todella vanha, mutta niitä edelleen käytetään. Lyijyhappoakkujen lataus on hidasta eikä niillä ole kovin pitkä elinikä. Ne ovat myös todella raskaita. Tulevaisuudessa tarvitaan kevyempiä akkuja ja paljon enemmän syklejä eliniän aikana. Hidas lataus luo myös rajoituksia muihin akkuihin verrattuna. [7.]

Lyijyakkuja on olemassa kahdella erilaisella rakenteella, putkimaisella ja levymäisellä (engl. Vented / Flooded Lead Acid Batteries). Levymäinen lyijyakku on kestävämpi niin mekaanisesti kuin sähköisestäkin. Kuvassa 1 nähdään levymäisen lyijyakun rakennetta. Putkimallisen lyijyhappoakun elinikä on normaalisti noin 8–10 vuotta. Levymäisellä rakenteella elinikä on 15–20 vuotta. Tämän takia melkein aina teollisuudessa käytettävät akut ovat levymäisiä lyijyakkuja. [7.]



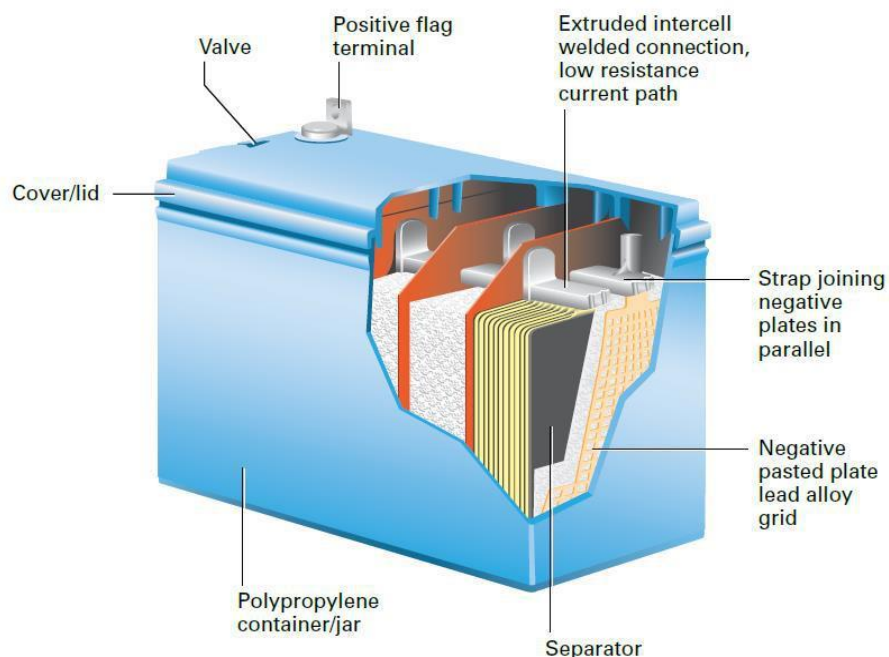
Kuva 1. Levymäisen lyijyakun rakenne. [7.]

Lyijyakkujen huonona puolena on niistä ladattaessa lähtevä korrosoiva höyry. Tämän johdosta akuille rakennetaan oma akkuhuone, jossa korrosoivat höyryt otetaan huomi-

oon ja minimoidaan niiden haitat hyvällä ilmastoinnilla. Haihtumisen takia lyijyhappoakkuja täytyy huoltaa ja tarkistaa säännöllisesti. Huollon yhteydessä akut tarkastetaan ja tarvittaessa lisätään akkunestettä haihtuneen akkunesteen tilalle. Akkuja ei saa kuljettaa ladattuina, ja sen takia akut ladataan täyteen vasta asennuksen jälkeen. Ensi lataus kestää noin 55–90 h, riippuen akuston koosta ja tyypistä. Lyijyhappoakut ovat yleisesti käytössä UPS-järjestelmien varaenergian varastoinnissa. Lyijyakkujen huonot puolet eivät yleensä ole niissä haitaksi, koska teollisuuskohteeseen on helppoa rakentaa akustolle oma tarpeen mukainen huone. [8.]

Suljetut huoltovapaat lyijyakut

Suljetut huoltovapaat akut tunnetaan myös venttiili säänneltynä lyijyhappoakkuna. VRLA-akkuihin (engl. Valve-regulated lead-acid) on suunniteltu turvatoimintona automaattinen paineenpoistoventtiili. Jos akun sisäinen paine nousee, venttiili aukeaa automaattisesti ja päästää paineen ulos. Venttiili sulkeutuu automaattisesti paineen laskettua. Kuvassa 2 käy ilmi VRLA-akun rakenne. [8.]

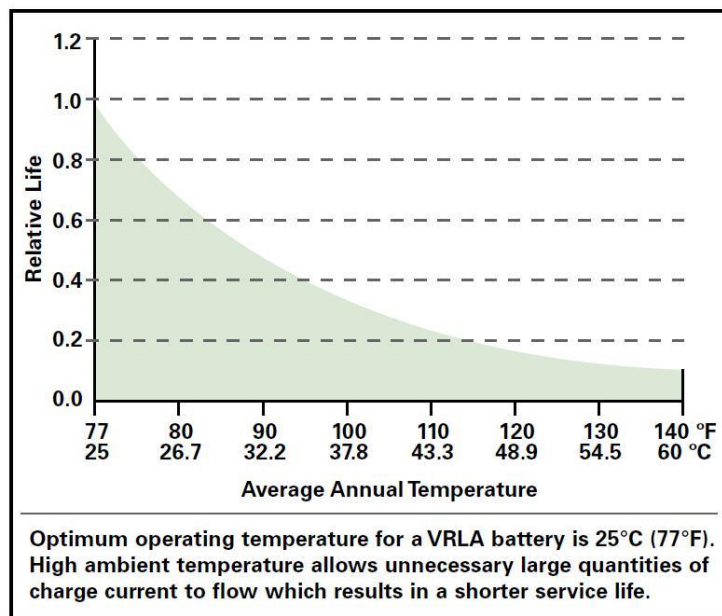


Kuva 2. Suljetun huoltovapaa lyijyakun rakenne. [8.]

Nimensä mukaisesti VRLA-akkujen edut ovat huoltovapaus ja erityinen tuuletusjärjestelmä, joka minimoi kaasujen ulospääsyyvaaran. VRLA-akkujen suurin käyttösovellus kohde on tietokonekeskusten ja kaupallisten kohteiden UPS-järjestelmät. VRLA-akut

ovat suljettuja ja tiiviitä, joka mahdollistaa niiden sijoittamisen lähelle elektroniikka järjestelmiä. [8.]

VRLA-akkujen haittana on lyhyt käyttöikä normaaliin lyijyhappoakkuun verrattuna, vain noin 3–5 vuotta. Käyttöikään tosin vaikuttaa voimakkaasti lataus ja purkaus syklit sekä ympäröivä lämpötila. VRLA-akkuja ei saisi koskaan jättää tyhjiksi yli 72 h, koska tämä vahingoittaa akkuja. Liian pitkään tyhjänä ollessa akkujen negatiiviseen elektrodiin voi alkaa muodostua rikkiä pinnalle, mikä toimii eristimenä. Rikki elektrodin pinnalla alkaa toimia eristimenä ja heikentää akun varauskäkyä. Sallittu käyttölämpötila näille akuille on 15–50 astetta, mutta käyttämällä akkuja vain 15–35 °C:n lämpötilassa kasvattaa akkujen käyttöikää merkittävästi. Lämpötilan vaikutusta akun käyttöikään voi arvioida seuraavalla kaavalla: jokainen 8,3 °C:n ylitys yli 25 °C:n pudottaa akun käyttöikää 50 %. Kuvassa 3 nähdään, miten SMF-akkujen elinikä laskee lämpötilan kohetessa. Kuukaudessa VRLA-akkujen itsepurkautumisnopeus 20 asteessa on noin 3–4 %. [8.]



Kuva 3. VRLA-akkujen eliniän laskeminen suhteessa lämpötilaan. [8.]

Nikkeli-kadmium-akut

Nikkeli-kadmium-akuista haihtuu vety- ja happikaasuja, mutta ei korrosoivaa höyryä kuten lyijyakuista. Tämän takia Ni-Cd-akkuja voidaan asentaa elektroniikan lähistölle. Akkuvettä haihtuu vain vähän ja sen ansiosta akut ovat helppohuoltoisia. Ni-Cd-akkujen käyttöikä on noin 20–25 vuotta. Käyttölämpötila ei vaikuta Ni-Cd-akkuihin samalla tapaa

kuin lyijyakkuihin. Ni-Cd-akkujen huonona puolena ovat korkeat investointikustannukset. Ni-Cd-akut voivat maksaa melkein kolme kertaa niin paljon kuin perinteiset lyijyakut. Lisäksi Ni-Cd-akkujen kennojen jännite on alempi kuin lyijyakuissa. Tämä tulee ottaa huomioon inverttereissä ja latureissa. Ni-Cd-akuilla on pitkä käyttöikä, ja ne ovat luotettavia yksinkertaisella toteutuksella, minkä vuoksi ne ovat edelleen markkinoilla. [9.]

Litium-ioni-akut

Litiumionien kulku anodilta katodille elektrolyytissä aiheuttaa sähkövirran, kun litium-ioniakkua puretaan. Litiumioniakkuja on monia erityyppisiä ja niiden ominaisuudet ja hinnat poikkeavat toisistaan. Vuonna 1991 Sony ja Asahi Kasei julkaisivat ensimmäisen kaupallisen litium-ioniakun. Nykypäivänä Li-ioni-akkuja käytetään laajasti erilaisissa energian varastointisovelluksissa. Erityisesti autoteollisuudessa ja matkapuhelimissa yhä enemmän käytetään litium-ioniakkuja, koska perinteiseen akkuteknologiaan verrattuna litium-ioniakut latautuvat nopeammin, kestävät pidempään ja niissä on suurempi energiatiheys, joka tarjoaa pidemmän käyttöajan kevyemmässä paketissa. [10.]

Litium-ioniakkujen etuina ovat niiden korkea energiatiheys pienikokoisina ja kyky sietää useampia purku- ja latauskertoja, joista on hyvä esimerkki matkapuhelimet. Toisaalta litium-ioniakut ovat epävakaita, niillä on korkea hinta ja ylikuumenevat helposti. Taulukosta 1 selviää eri valmistajien litium-ioniakkujen hyötysuhteet. [11.]

Taulukko 1. Erityyppisten litiumioni-akkujen hyötysuhteet. [1.]

Valmistaja	Teknologia	hyötysuhde
Toshiba	Litium-titanaatti	~86%
BYD	Litiumfosfaatti	~83%
SAFT	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	~84%
Samsung	Litium-mangaani	~85%
FIAMM	Natrium-nikkeli-kloridi	~80%

Taulukosta 1 voidaan havaita, että litiumtitanaattiakulla on korkein hyötysuhde. Litiumtitanaattiakulla on 15 vuotta käyttöikä, ja se kestää elinkaarensa aikana yli 16 000 sykliä. Lisäksi litiumtitanaattiakkujen C-rate-potentiaali on korkea ja lukema voi olla jopa 8C uusimmissa sähköautojen akuissa. Litiumtitanaattiakkujen investointikustannukset ovat tällä hetkellä muita akustotyyppisiä suuremmat ja niiden energiatiheys on hieman pienempi, mutta niiden suorituskyky on erinomainen. [11.]

Akkuteknologioiden vertailu

Akuston teho- ja energiakapasiteetti ovat tärkeitä energiavarojen ominaisuuksia. Kun vertaillaan eri akkuteknologioita keskenään, pitää kuitenkin kiinnittää huomioon teho- ja energiakapasiteetin lisäksi C-rate, DOD, syklimäärä ja hyötysuhdearvoihin. Syklimäärää kertoo, kuinka monta kertaa akkua voidaan ladata täyteen ja purkaa tyhjäksi ennen kuin se on käyttökelvoton. C-rate-arvo kertoo akuston lataus- ja purkunopeuden. DOD (Depth Of Discharge) puolestaan tarkoittaa akuston jäljellä olevaa maksimikapasiteettia uuteen akkuun verrattuna. Taulukossa 2 on vertailtu erilaisten akkutyypin ominaisuuksia. [14.]

Taulukko 2. Erityyppisten akkujen ominaisuuksia. [14.]

Akkutyppi	Hyötysuhde [%]	Kustannukset [€/kWh]	Käyttöikä (syklimäärä/DoD)	Elinikä [a]	Energiatiheys [kWh/m ³]	Käyttölämpötila [°C]
Pb	80-90	50-300	2000 (70% DoD)	3-15	75	-5-40
-NiCd	70-75	200-1000	3000 (100% DoD)	15-20	<200	-40-50
NaS	85-90	200-900	2500(100% DoD)	12-20	<400	300-350
Li-ioni	90-98	200-1800	4000 (80 % DoD)	8-15	250-620	-30-60
NiMH	70-75	240-1200	4000 (80% DoD)	5-10	<350	-20-40
NaNiCl	90	70-150	1800 (80% DoD)	12-20	150-200	-30-40

3.2 Superkondensaattorit

Perinteisten kondensaattorien ominaisuudet, kuten kapasitanssin suuruus, jännitteen- ja virrankesto, eroavat superkondensaattoreista. Superkondensaattorien kapasitanssi suhteessa kokoon on perinteisiin kondensaattoreihin verrattuna hyvin suuri, jopa 4000 F. Tämän vuoksi superkondensaattoreihin voidaan varastoida merkittävästi enemmän energiaa kuin tavalliseen kondensaattoriin. Toisaalta huono puoli superkondensaattoreissa on pieni energiatiheys akkuihin verrattuna sekä hyvin rajallinen jännitekestoisuus, nykyisin maksimissaan 3 V. Kondensaattorin suuruus eli sen kapasitanssiarvon voidaan laskea yhtälön 1 mukaisesti. [12.]

$$C = \frac{\epsilon A}{l} \quad (1)$$

Jossa A on kapasitanssin pinta-ala

l on varattujen pintojen välinen etäisyys

ϵ on väliaineen permittiivisyys.

Jos pinta-ala kasvatetaan tai varattujen pintojen välistä etäisyyttä pienennetään, kapasitanssinarvo kasvaa. [12.]

Superkondensaattori muodostuu kahdesta elektrodista, joiden välissä on paperieriste ja elektrolyytinestettä. Huokoista aktiivihiiltä käytetään elektrodien materiaalina alumiinikalvojen päällä. Latauksen aikana elektrolyytinesteen negatiiviset ionit siirtyvät positiiviselle elektrodille ja vastaavasti positiiviset ionit virtaavat negatiiviselle elektrodille, jolloin kondensaattorin levyt varautuvat. Superkondensaattoreilla on erittäin suuri kapasitanssi elektrodien suuresta pinta-alasta ja varausten välisistä lyhyistä etäisyyksistä johtuen. [13.]

Superkondensaattorien keskeiset edut akkupohjaisiin energiavarastoihin nähden ovat varsin lyhyt lataus- ja purkuaika, suuri tehoteho sekä runsas syväpurkaussyklien lukumäärä (> 500 000) eliniän aikana. Taulukossa 3 superkondensaattorin ominaisuuksia on vertailtu perinteiseen lyijyakkuun ja tavalliseen kondensaattoriin. Superkondensaattorien elinikä katsotaan olevan lopussa, kun sisäinen resistanssi kahdentuu tai täyteen ladatun

kennon kapasitanssi laskee 20–30 %. Superkondensaattorit sopivat erinomaisesti suuritehoisten työkoneiden energiavarastoksi ja ajoneuvojen pienienergisten tehopiikkien tasaajiksi huomioiden niiden ominaisuudet. Superkondensaattoreiden käyttösovellukset ja markkinat ovat kasvaneet nopeasti viimeisen vuosikymmenen aikana, ja erityisesti sähköverkkoon liittyvät sovellukset ovat olleet osa tätä kasvua. [13.]

Taulukko 3. Superkondensaattorin ominaisuuksia verrattuna tavalliseen kondensaattoriin ja lyijyakkuun. [13.]

Parametrit	Kondensaattori (Sähköstaattinen)	Superkondensaattori (sähkökemiallinen)	Lyijyakku
Purkausaika	$10^{-6} - 10^{-3}$ s	1 – 30 s	0,3 – 3 tuntia
Latausaika	$10^{-6} - 10^{-3}$ s	1 – 30 s	1 – 5 tuntia
Energiatiheys Wh/kg	< 0,1	1 – 11	20 – 100
Tehotiheys	>10 000	1000 – 10 000	50 – 200
Lataus/purkaushyötysuhde	~1,0	0,90 – 0,95	0,7 – 0,85
Käyttölämpötila	-40 C – +70 C	-40 C – +70 C	-20C – +60C
Toimintajaksojen lukumäärä	Rajaton	>500 000	500 – 2000

3.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä on pyörivä mekaaninen laite, jolla sähköenergiaa voidaan muuttaa liikeenergiaksi ja toisinpäin. Yksinkertaisesti vauhtipyörä varastoi energiaa pyörivän massan kulmanopeuteen, jota kutsutaan roottoriksi. Massan pyörittämiseen käytetty sähköenergia varastoidaan kineettisen energian muodossa. Vauhtipyöräjärjestelmä muuttaa kineettisen energian takaisin AC-sähköksi käyttämällä ohjaimia ja tehonmuuntojärjestelmiä. Kuvassa 4 käy ilmi vauhtipyörän rakenne ja sen sisäiset komponentit. Useimmissa nykyisissä vauhtipyöräjärjestelmissä on jonkinlainen suoja kuori turvallisuuden ja suorituskyvyn parantamiseksi. Tämä suojaava kuori on tehty useimmiten teräksestä, ja se on muodoltaan astia, joka ympäröi roottoria, moottorigeneraattoria ja muita vauhtipyörän

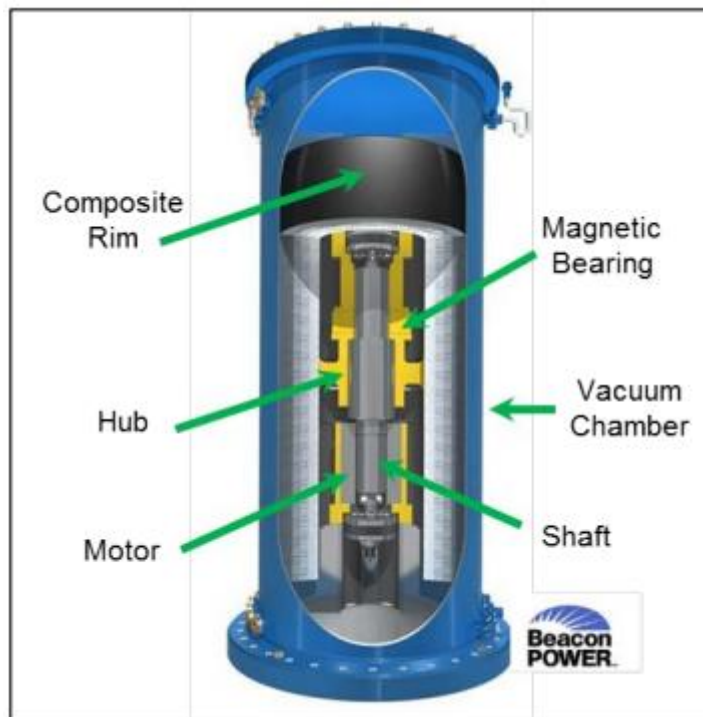
pyöriviä osia. Suojakuori suojaa mahdollisissa vikatilanteissa syntyviltä sirpaleilta, ehkäisee ympäröivien laitteiden vahingot ja jopa parantaa vauhtipyörän suorituskykyä. [15.]

Vauhtipyörät varastoivat energiaa kineettisenä energiana yhtälön 2. mukaisesti

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (2)$$

I on vauhtipyörän inertia momentti

ω on kulmanopeus



Kuva 4. Vauhtipyöräjärjestelmän rakenne. [15.]

Vauhtipyörillä on erinomainen käyttöikä verrattuna muihin energian varastointijärjestelmiin ja on arvioitu, että sitä voi ladata ja purkaa noin 100 000 kertaa elinkaaren aikana eikä sen varastointikyky heikkene syklimäärän kasvaessa toisin kuin akuilla. Päinvastoin kuin monet muut energian varastointijärjestelmät, vauhtipyörillä on harvoin haitallisia ympäristövaikutuksia sekä normaalitilassa että vikatilanteissa. Muita vauhtipyörän etuja ovat mm. nopea reagointi-aika, vähäinen huoltotarve ja se, että vauhtipyörän sisältämä

energiaa voidaan purkaa täysin tyhjäksi. Toisaalta vauhtipyörällä on korkeat investointikustannukset, jotka muodostuvat kalliista komponenteista. [16.]

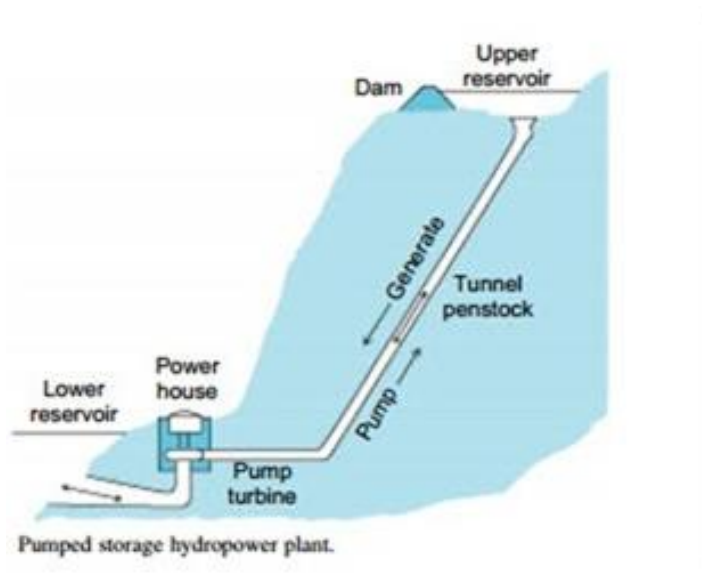
Koska vauhtipyöräjärjestelmät ovat nopeita reagoivia ja tehokkaita, niitä käytetään verkon taajuuden säätöön, jännitepiikkien tasaukseen ja lyhytaikaiseksi varavoimiksi. Tutkimuksia tehdään parhaillaan kehittyneempien vauhtipyöräjärjestelmien kehittämisessä, jotka pystyvät varastoimaan suuria määriä energiaa. Esimerkiksi LLC (Spindle Grid Regulation) on tällä hetkellä kehittämässä megawatin luokan vauhtipyöräjärjestelmän energiakapasiteetiltaan 20 MW:n verkon taajuuden säätöön. [16.]

3.4 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoimalaitos on yksi energiavarastointijärjestelmistä, jossa veden potentiaalienergia muutetaan sähköenergiaksi. Kuva 5 (ks. S. 14) havainnollistaa pumppuvoimalaitoksen toimintaa. Pumppuvoimalaitoksessa hyödynnetään alhaisia sähkön hintoja, jolloin vesi pumpataan matalammalla sijaitsevasta altaasta korkeammalla korkeudella olevaan altaaseen silloin, kun sähkönkulutus on vähäistä (yleensä öisin tai viikonloppuisin). Kun sähkön kysyntä on suuri ja hintakin korkeampi, vesi vapautetaan virtaamaan läpi turbiinia, joka puolestaan pyörittää sähkögeneraattoria tuottaen sähköä, kuten normaaleissa vesivoimaloissa. Pumppuvoimalaitokset ovat yksi vanhimmista ja suurimmista kaupallisista energiavarastointijärjestelmistä, jota käytetään nykyään monissa eri paikoissa Pohjoismaissa ja ympäri maailmaa. Ensimmäinen pumppuvoimalaitos energiakapasiteetiltaan 130 GW, otettiin käyttöön Sveitsissä vuonna 1904. [17.]

Pumppuvoimalaitoksen varastoituu energian määrään vaikuttavat altaiden tilavuus sekä veden pumppauskorkeus. Nyrkkisääntönä altaalla, jonka halkaisija on yksi kilometri, 25 metriä syvä ja putouksen korkeus 200 metriä, on potentiaalienergiaa 10 000 MWh:n sähköenergian tuottamiseen. Pumppuvoimalaitoshankkeita voidaan käytännössä rakentaa jopa 4000 MW:n luokan tarpeisiin toimiakseen noin 76 %– 85 % teholla suunnittelusta riippuen. Pumppuvoimalaitosten varastointikapasiteetti vaihtelee vuorokaudesta jopa kahteen vuoteen riippuen siitä, onko sillä rakennettuja vai luonnonmukaisia vesivarastoja. Energianyksikössä kapasiteetti vaihtelee muutamasta megawattista yli 1 000 megawattiin ja suurimmat kapasiteetit voi olla lähellä 3 000 megawattia. Pumppuvoimalaitoksia löytyy Australiasta, Kiinasta ja eri puolilla Eurooppaa, mutta suurimmat

pumppuvoimalaitokset sijaitsevat Japanissa ja Yhdysvalloissa. Pumppuvoimalaitosten elinikä on arvioitu olevan noin 50–60 vuotta. [17.]



Kuva 5. Pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate. [17.]

Useimmat pumpatut vesivoimalaitokset on rakennettu käyttäen turbiineja, jotka toimivat kiinteällä nopeudella. Pumppuvoimalaitokselta saadaan merkittäviä etuja, jos käytetään muuttuvalla nopeudella toimivia turbiineja. Esimerkiksi pumppu voi toimia ekstra teholla riippuen sähkönkysyntätasosta ja ottaa tehoa vaihtelevasti verkosta, mikä mahdollistaa toiminnan suuremman joustavuuden. Vaihteleva nopeus generaattorissa puolestaan saa mahdolliseksi sen tuottamaan muuttuvaa tehon määrää. Kiinteällä nopeudella toimiva turbiini kykenee ainoastaan syöttämään nimellistehonsa verkkoon. Muuttuvan nopeuden toiminta vaatii tehoelektroniikka verkon ja turbiinigenaattorin väliin, siksi tämänkaltaisen pumppuvoimalaitos on kalliimpi kuin kiinteä nopeusyksikkö. [17.]

Pumppuvoimalaitoksilla on kykyä vastata nopeisiin kuorman muutoksiin sekunneissa ja ottaen huomioon muita pumppuvoimalaitoksen etuja, kuten pitkä elinikä, suuri energiakapasiteetin varastointimahdollisuus ja tehon tuottokyky, niitä voidaan käyttää loistehon kompensointiin, energian pitkäaikaiseen varastointiin sekä nopeisiin taajuus- ja tehosäätötarpeisiin verkon ylikuormitus tilanteissa. Esimerkiksi Dinorwig pumppuvoimalaitos Wales:ssä kykenee siirtymään valmiustilasta 12 sekunnissa toimimaan täydellä teholla, joka on 1320 MW. Pumppuvoimalaitokset lisäävät verkon yleistä tasapainottamista ja stabiilisuutta. [17.]

3.5 Paineilmavarastot

Paineilmavarastojen teho, toiminta, käyttösovellukset ja varastointikapasiteetti ovat melko vastaavalaisia kuin vesipumppuvoimalaitokset. Mutta sen sijaan, että vesi pumpattaisiin matalammalla sijaitsevasta altaasta korkeammalle olevaan altaaseen, tässä sähkön varastointiteknologiassa energiavarastona käytetään korkeaan paineeseen puristettua ilmaa. Toiminta perustuu siihen, että ilmaa puristetaan kovaan paineeseen sille tarkoitettuun varastoon sähköenergia hintojen ollessa matalalla ja vähäisen kulutuksen aikana (yleensä öisin ja viikonloppuisin). Kun sähkön kysyntä on suuri ja hinta korkea, paineilmavarasto puretaan. [18.]

Kun ilmaa puristetaan korkeaan paineeseen, lämpötila kohoaa yhtälön 3 mukaisesti:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(K-1)/K}$$

(3)

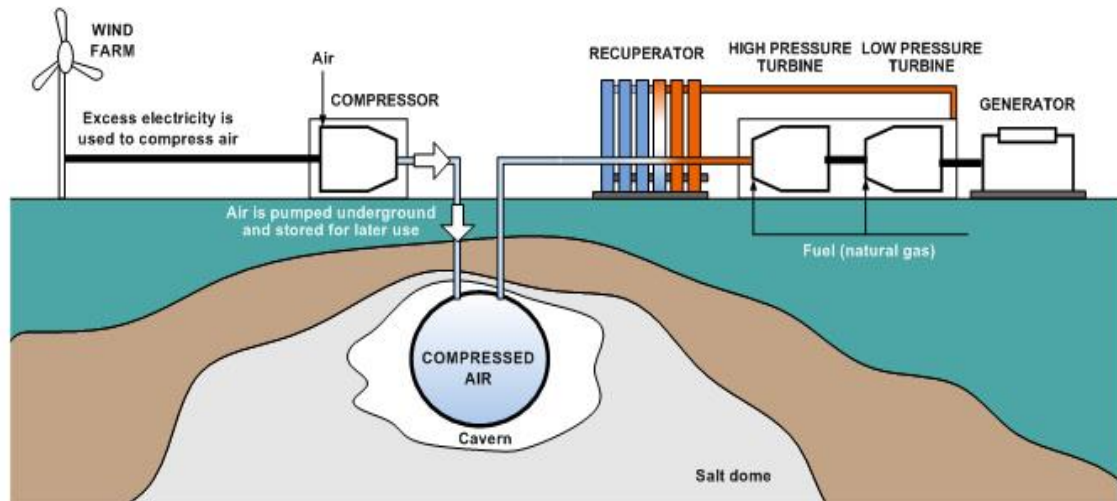
T on lämpötila

P on absoluuttinen paine

K on termodynaamisen prosessin indeksi palauttamattomasta puristuksesta

Alaindeksit 1 ja 2 kertovat prosessin alku- ja lopputilasta. [18.]

Maanalaisia luolia, vanhoja kaivoksia ja luonnonmukaisia muodostelmia, kuten suolavesi- ja suolakiviesiintymiä käytetään paineilmavarastoina. Kun sähköä tarvitaan, ilmaa vapautetaan näistä varastoista, jolloin sitä lämmitetään ennen ilman virratessa turbiinin läpi. Ilmaa laajenee lämpenemisen jälkeen ja pyörittää tehokkaammin sähkögeneraattoria pyörittävää turbiinia. Kuvassa 6. näkyy paineilmavarastojärjestelmän toimintaperiaate ja rakenne. Metallista valmistetusta säiliöstä voidaan myös rakentaa maan päälle paineilmavarasto. [18.]



Kuva 6. Paineilmavaraston toimintaperiaate. [18.]

Maanpäälliset paineilmavarastot, joiden kapasiteetti ovat yleensä 3–50 MW:n luokkaa ja purkausaika 2–6 tuntia, ovat tyypillisesti pienempiä kuin maanalaiset varastot. Maan päällä sijaitsevat CAES-laitokset ovat helppokäyttöisempää, mutta rakennuskustannukset ovat paljon kalliimpaa verrattuna maanalaisiin paineilmasäilytysjärjestelmiin. Maanalaiset CAES-varastointijärjestelmät ovat kustannustehokkaimpia ja niiden varastointi kapasiteetti voi olla jopa 400 megawattia ja purkausaikaa 8–26 tuntia. Tällaisten CAES-laitosten sijoittaminen edellyttää luonnonmukaisia muodostelmia paineilman säilyttämiseen tietyillä alueilla. [19.]

Paineilmavarastojärjestelmässä käytetään energian lähteenä kaasua ilman lämmittämiseen. Tämän vuoksi CAES-järjestelmillä on matala hyötysuhde, jopa alle 70 %. Hyötysuhdetta voidaan parantaa merkittävästi, jos pystyttäisiin varastoimaan erilliseen varastoon ilman paineistettaessa syntyvää lämpöä., jolloin erillistä polttoainetta ei tarvittaisi ilman lämmittämiseen. Hyötysuhteen parantumisen lisäksi hiilidioksidin päästöt myös vähentyisi huomattavasti ja CAES-järjestelmistä tulisi yhä enemmän ympäristöystävällisempi ratkaisu sähkön varastoimiseen. [19.]

3.6 Suprajohtava magneettinen energiavarasto

SMES-varasto (engl. Superconducting Magnetic Energy Storage) on sähkömagneettinen varasto, kuten superkondensaattori. SMES-varasto koostuu suuresta suprajohta-

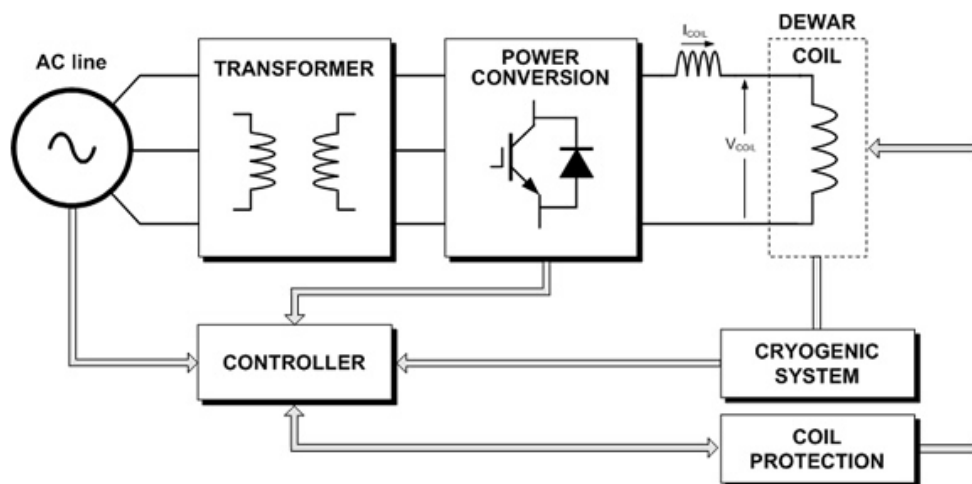
vasta käämistä ja magneetista, muuntojärjestelmästä, ohjaus- ja jäähdytysjärjestelmästä. Suprajohtava käämiä pidetään kryogeenisessä lämpötilassa nestemäisellä heliumilla tai typellä. Varastoitu energian määrä voidaan laskea yhtälön 4 mukaisesti. [20.]

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (4)$$

L on käämin induktanssi (H)

I on virta (A)

Tämän teknologian avulla sähköä saadaan kulutukseen huipputeholla varastoidusta energiamuodosta nopealla vasteajalla. Lisäksi suprajohtava magneettinen energiavarastojärjestelmällä on korkea hyötysuhde, koska suprajohtavassa käämissä ei käytännössä tapahdu häviöitä riittävän alahaisessa lämpötilassa. Kaikki häviöt tapahtuvat muuntojärjestelmässä. Kuva 7 esittää suprajohtavaa magneettista energiavarastojärjestelmän rakennetta. Siinä järjestelmässä sähköverkosta otetaan vaihtovirtaa, joka muunnetaan tasavirraksi, ja sähköenergiaa varastoidaan suprajohtavan käämin magneettikenttään. [20.]



Kuva 7. Suprajohtava magneettinen energiavarastojärjestelmä. [20]

3.7 Lämpövarastot

Lämpövarastot jaetaan kolmeen luokkaan, pumpatun lämmön sähkövarasto, vetyenergian varastointi ja nesteilmaenergian varastointi. Pumpatun lämpö-sähkövaraston eli

PHES:n (Pumped heat electrical storage) toiminta perustuu siihen, että lämpöä pumpataan kylmästä kuumaan energian varastointiin ja jatkamalla tätä toimintaa edestakaisin tuotetaan mekaanista työtä, joka pyörittää generaattoria tuottaen sähköä. PHES-järjestelmä vaatii kaksi säiliötä (tavallisesti teräksestä tehty), jotka ovat täytetty mineraali hiukkasilla kaasun tehokasta puristamista ja laajentamista varten. Argon on ideaali kaasu tähän prosessiin, sillä se kuumenee ja jäähtyy paljon enemmän kuin ilma samalla paineen pudotuksella tai korotuksella. Tämä puolestaan vähentää huomattavasti varastointikustannuksia. Pumpattu lämpö sähkövarastojärjestelmien hyötysuhde vaihtelee 75–80 % välillä. [21.]

Vetyenergian varastoinnissa käytetään elektrolyysiä sähköenergian muuntamiseksi vetyenergiaksi. Vetyenergiaa voidaan muuntaa takaisin sähköenergiaksi polttokennoissa tai kaasuturbiineissa, jossa vety-yhdisteitä käytetään polttoaineena. Tämän prosessin hyötysuhde nykypäivänä on niinkin alhainen kuin 30–40 %, mutta voi nousta jopa 50 %, jos kehitetään tehokkaampia tekniikoita. Huolimatta tästä alahaisesta hyötysuhteesta, vetyenergian varastointia tutkitaan edelleen ja kiinnostus vetyenergian varastointiin kasvaa yhä, johtuen huomattavan suuresta varastointikapasiteetista verrattuna akkuteknologioihin tai pumppuvoimalaitoksiin. [21.]

Nesteilmaenergian varastointi eli LAES (Liquid Air Energy Storage) käyttää sähköä jäähdyttämään ilmaa, kunnes se muuttuu nestemäiseksi. Sen jälkeen nestemäistä ilmaa varastoidaan säiliöihin ja sen jälkeen nestemäinen ilma muutetaan takaisin kaasuksi, jota päästetään turbiinin läpi tuottaen sähköä. Nestemäinen ilma muutetaan takaisin kaasuksi teollisuusprosesseista syntyvällä hukkalämmöllä tai altistamalla ympäröivälle ilmalle. [21.]

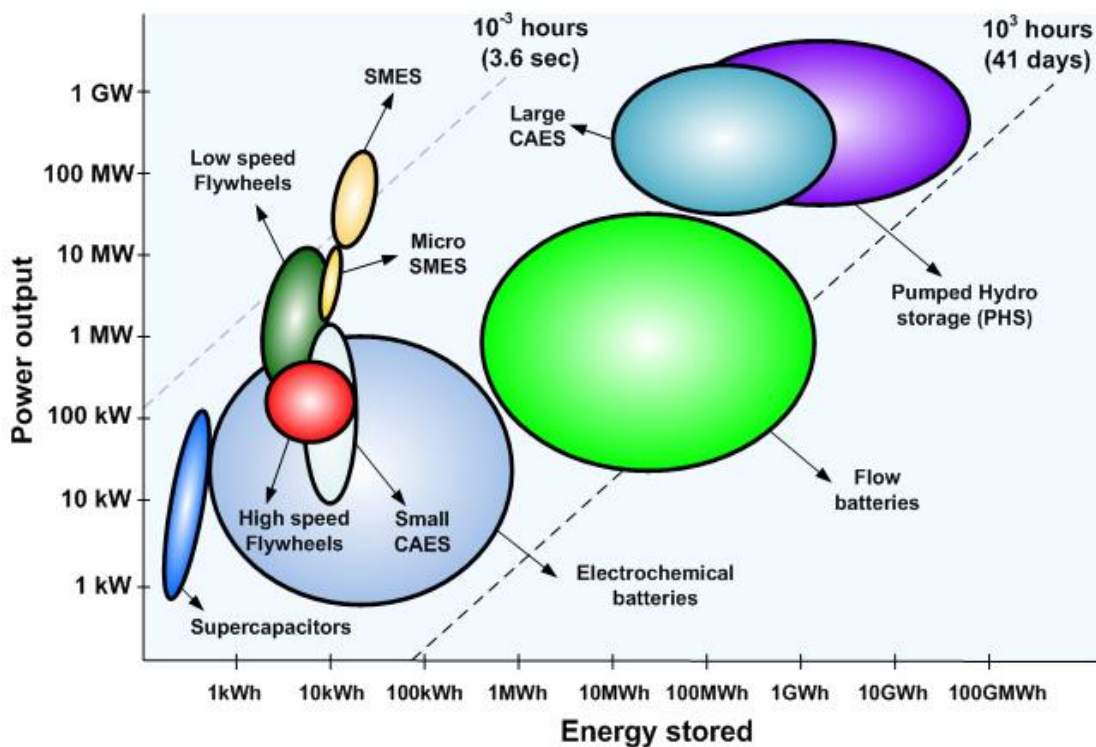
4 Sähkön varastointiteknologioiden vertaileva analyysi

Olennaista varastointiteknologiaa valittaessa on ottaa huomioon järjestelmän koko ja teknologian käyttötarkoitus, eli puhutaanko ns. teho- vai energiavarastokäytöstä. Tehovarastokäytöt viittaavat niihin, jotka vaativat suurta ulostulotehoa suhteellisen lyhyen jakson aikana (sekunteja tai minuutteja). Energiavarastokäytöt vaativat minuuteista tunteihin purkausajoja tai lähellä varastointijärjestelmän nimellistehoa. Jotta saadaan tehokainta ratkaisua erilaisiin käyttöihin, täytyy vertailla eri sähkönvarastointiteknologioiden ominaisuuksia keskenään ja valita sopivimman vaihtoehdon niistä kullekin sovellukseen.

Energiavarastoteknologioita voidaan vertailla keskenään seuraavien ominaisuuksien mukaan:

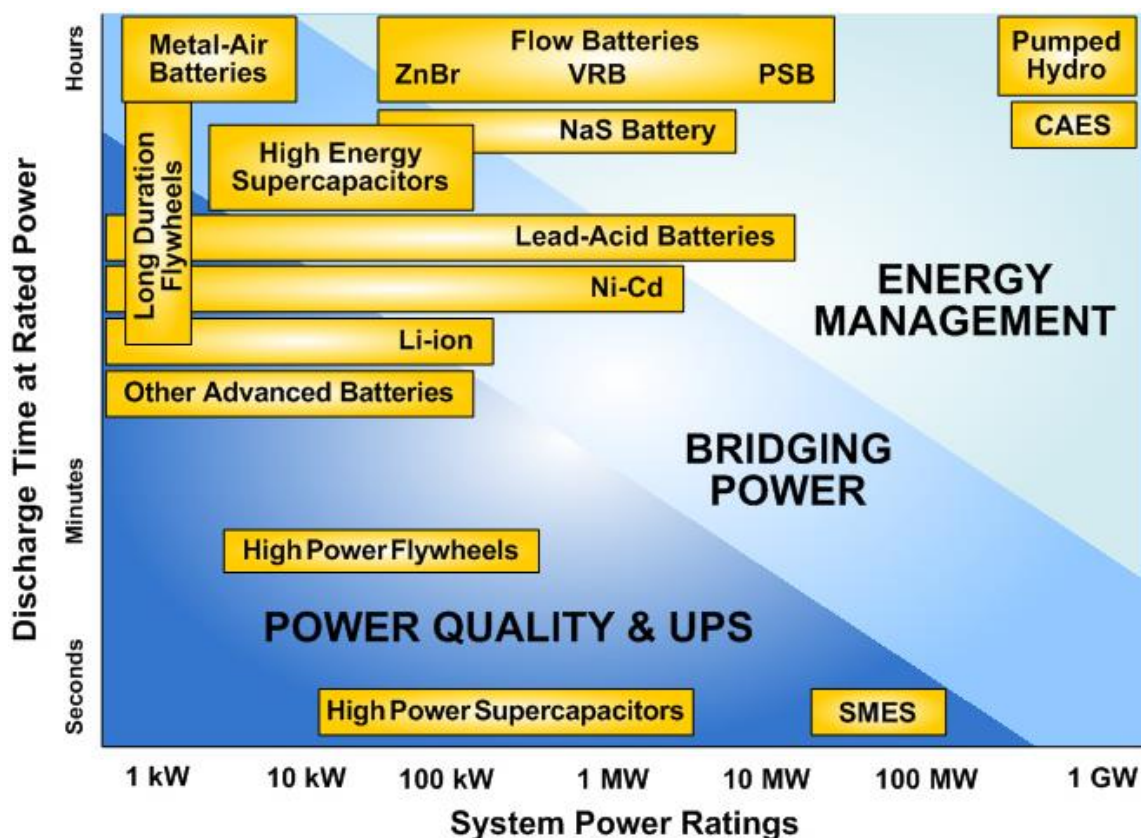
- lataus- ja purkausnopeus (kW)
- energia- ja tehotiheys (kWh/kg), (kW/kg)
- hyötysuhde (%)
- varastointikapasiteetti (kWh)
- tuotetun energian hinta ja investointikustannukset
- vaste- ja pysäytysaika
- syklimäärä eli lataus- ja purkauskertojen määrä käyttöiän aikana
- takaisinmaksuaika
- sijainti ja turvallisuus. [22, s. 86; 23, s. 19.]

Tässä luvussa on esitetty kuvia, jotka vertaavat erilaisia varastointitekniikoiden ominaisuuksia keskenään. Nämä näkökohdat käsittävät varastointitekniikoiden eri osa-alueita, kuten käyttöikä, teknologialla tuotetun energian hintaa ja hyötysuhdetta. Kuva 9 esittää energiavarastointitekniikoiden sovellusalueita, ja siinä vertaillaan eri varastointitekniikoiden ulostulotehoa suhteessa energiakapasiteettiin. Kuvasta voidaan havaita, että pumppuvoimalaitokset ja paineilmalaitokset pystyvät varastoimaan suurimman määrän energiaa, kun taas superkondensaattorit vähiten. Kuvasta 10 voidaan nähdä, mikä varastointitekniikka sopii parhaiten kolmelle tärkeimmälle toimintaluokalle, jotka ovat sähkönlaatu, varavoima ja energian hallinta. Sähkönlaatuun kuuluvat mm. jännite ja taajuuden suurus. Kuvassa on vertailtu varastotekniikoiden purkausnopeutta nimellisteholla suhteessa järjestelmän teholuokkaan.



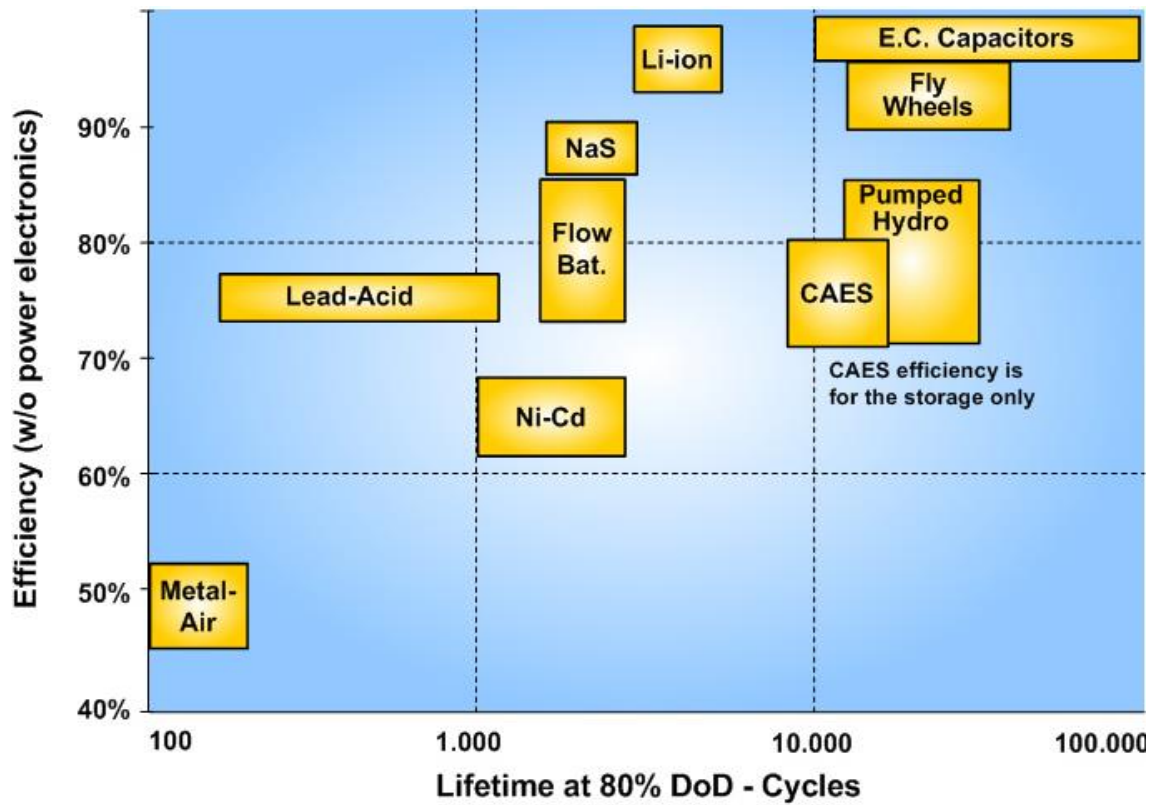
Kuva 9. Varastoteknologioiden ulostuloteho suhteessa varastointikapasiteettiin. [23, s.19]

Varaston purkausnopeudella on suuri vaikutus valittavaan sovellukseen. Sähkövarastot voidaan luokitella varastoitavan energiamuodon lisäksi myös purkausajan perusteella kolmeen luokkaan. Pitkän purkausajan varastot ovat paineilma- ja vedynvarastot, joilla purkaus-aika on tunneista päiviin. Tyypillisesti keskipitkän purkausajan kategoriaan kuuluvat akut, joilla purkaus-aika on minuuteista tunteihin. Lyhyen purkausajan varastoilla purkaus-aika on tyypillisesti sekunneista minuutteihin. Tällaisia varastoja ovat SMES, vauhtipyörä ja superkondensaattori. [24, s. 33–40.]



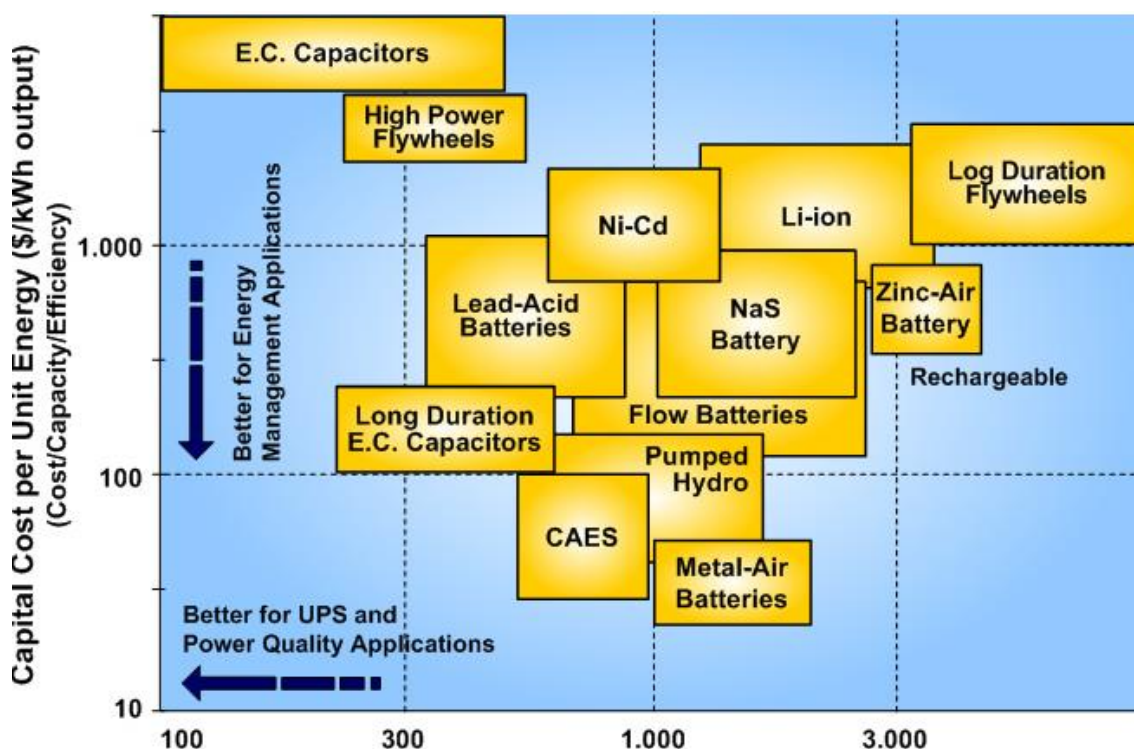
Kuva 10. Varastointiteknologioiden purkausaika luokat nimellisteholla [24, s. 33.]

Käyttöikä ja hyötysuhde ovat kaksi tärkeää parametria, jotka vaikuttavat sähkövarastojärjestelmien kokonaiskustannuksiin. Kuvassa 11. ilmaistaan eri varastoteknologioiden tehokkuutta suhteessa käyttöikään, joka määräytyy syklimäärän ja DOD:n (depth of discharge) perusteella. Syklimäärää kertoo, kuinka monta kertaa varasto voidaan ladata täyteen ja purkaa varastoinutta energiamuotoa takaisin sähköenergiaksi, ja DOD puolestaan tarkoittaa järjestelmän jäljellä olevaa maksimikapasiteettia uuteen järjestelmään verrattuna. Kun on jäljellä ainoastaan 80 % alkuperäisestä kapasiteetista, järjestelmän käyttöikä katsotaan päättyneen. Kuvasta huomataan, että superkondensaattoreilla on pisin käyttöikä ja paras hyötysuhde.



Kuva 11. Varastoteknologioiden hyötysuhde ja käyttöikä [25].

Lisäksi tuotetun energian hinta ja investointikustannukset kullekin varastointijärjestelmille ovat myös tärkeitä taloudellisia parametreja, joita tulee huomioida teknologian valittaessa. Kuvassa 12 nähdään eri varastointiteknologioiden investointikustannuksia yksikköenergiaa kohden.



Kuva 12. Energiateknologioiden investointikustannukset [25].

Seuraavaksi on listattu muutama esimerkki siitä, mikä varastointiteknologia sopii parhaiten eri käyttötarkoituksiin huomioiden niiden ominaisuudet.

- Ottaen huomioon sovellukset, jotka eivät vaadi suurta tehoa ja joissa keskeinen ilmiö on mahdollinen itsepurkautuminen, litiumioniakkuja voidaan pitää menestyneimpänä varastointi teknologiana.
- Tärkein ominaisuus on riippumattomuus ja itsenäisyys muutama kWh-luokan sähköjärjestelmissä, jotka sijaitsevat syrjäisillä alueilla ja perustuvat uusiutuviin voimavaroihin. Tämän perusteella lyijyakkua voidaan pitää sopivinta varastointiteknologiana kyseisiin käyttötarkoituksiin kustannusten ja varastointiomaisuuksien kompromissina.
- Sähköjärjestelmissä, joissa vaaditaan muutama sata kilowattituntia energiakapasiteettia, lyijyakku on edelleen paras vaihtoehto, jopa parempi kuin litiumioniakku kustannusten vuoksi. Muut varastointi teknologiat voivat olla pienet paineilmavarastot ja virtausakut, mutta ne ovat vähemmän tehokkaita ja myös kalliimpia vaihtoehtoja.

- Suuret paineilmavarastot ja virtausakut soveltuvat parhaiten MWh-luokan järjestelmiin.
- Sellaisiin teho-laatusovelluksiin, jotka vaativat nopeaa purkautumista ja korkean syklimäärän, vauhtipyöräjärjestelmät ja superkondensaattorit soveltuvat parhaiten.
- Lopuksi tietyt teknologiat on otettava huomioon, jotta ne kykenevät vastaamaan energian jaksottaisiin vaihteluihin. Tässä yhteydessä puppuvoimalaitoksia voidaan korostaa suurikokoisille järjestelmille ja suprajohtava magneettinen energiavarasto pienikokoisiin järjestelmiin. [25.]

5 Sähkövarasto standardeissa ja lainsäädännössä

Sähkövarastoa ei ole määritelty käsitteenä sähkömarkkinadirektiivissä 2009/72/EY eikä sähkömarkkinalaissa. Tästä syystä sähkövaraston asema eriyttämisvelvollisuuden näkökulmasta on epäselvä. Euroopan parlamentin julkaiseman tutkimuksen mukaan epäselvyyksien vuoksi sähkövaraston katsotaan usein olevan sähkön tuotantolaitos [26]. Energiaviraston suosituksessa sähkö- ja maakaasuliiketoimintojen eriyttämisestä mini-taan: ”Kapasiteetiltaan suuret kiinteät energiavarastot, jotka kykenevät syöttämään keskijänniteverkkoon eivät voi kuulua verkkoliiketoimintaan.” Koska sähkövarastot eivät kuulu verkkotoimintaan, eivät ne myöskään voi kuulua sähköverkko-omaisuuteen eikä niille siten saa kohtuullista tuottoa. [27.]

Sähkömarkkinalain 77. §:n mukaan ”sähkömarkkinoilla toimivan yrityksen on eriytettävä sähköverkkotoiminta muista sähköliiketoiminnoista sekä sähköliiketoiminnot muista yrityksen harjoittamista liiketoiminnoista”. Muut sähköliiketoiminnot koostuvat sähköntuotanto- ja sähkönmyyntitoiminnoista. Sähkömarkkinalain 78. §:n mukaan ”eriyttämisellä tarkoitetaan tässä laissa sitä, että tilikausittain on laadittava tuloslaskelma ja tase eriytetäville sähköliiketoiminnoille sekä yhdistetty tuloslaskelma ja tase muille yrityksen harjoittamille liiketoiminnoille”. [28.]

Sähkövarasto syöttää sähköä verkkoon ja myös kuluttaa sähköä latautuessaan. Sähkömarkkinalaissa on määritelty kantaverkonhaltijan ja oikeudellisesti eriytetyn jakeluverkonhaltijan oikeus hankkia ja toimittaa sähköä. Sähkömarkkinalainlain 30. §:n mukaan

"kantaverkonhaltija ja oikeudellisesti eriytettyä jakeluverkkotoimintaa harjoittava verkonhaltija voi hankkia ja toimittaa sähköä, jos toiminnan tarkoituksena on

- sähköverkon häviöenergian hankinta
- järjestelmävastuuseen kuuluvien tehtävien hoitaminen
- siirtorajoitusten hallinta
- verkon rakentamista, käyttöä ja kunnossapitoa palvelevien siirrettävien varavoimakoneiden käyttö ja niillä tuotetun sähkön toimitus verkkoon
- omakäytösähkön hankinta yhteisön toimitiloihin, sähköasemille tai linkkiasemiin taikka muihin näitä vastaaviin yhteisön kohteisiin
- jakeluverkonhaltijan sähkötoimitus tähän lakiin perustuvan velvollisuuden nojalla loppukäyttäjälle tilanteessa, jossa vähittäismyyjän toimitus on keskeytynyt myyjästä aiheutuvasta syystä.

Oikeudellisesti eriytetty jakeluverkonhaltija voi siis hankkia sähköä varastoon vain sähkömarkkinalain 30. §:n mukaisiin tilanteisiin. Se ei myöskään voi toimittaa sähkövarastoilla tuotettua sähköä, ellei kyse ole 30. §:n mukaisista tilanteista. [28.]

Standardi SFS 6000 määrittelee varavoimajärjestelmän seuraavasti: Varavoimajärjestelmä (standby supply system) on syöttöjärjestelmä, jonka tarkoituksena on varmistaa asennuksen tai sen osan toiminnan jatkuminen muista kuin henkilöturvallisuuteen liittyvistä syistä normaalin syötön keskeytyessä. Turvasyöttöjärjestelmiä käsitellään standardin kohdissa 6000-2, 6000-3-25, 6000-5-56, 6000-7-710. [29.]

Tasasähkösyöttöyksiköiden on kyettävä syöttämään sähköä kaikkiin pysyväisluonteisiin tasasähkökuormiin ja olennaisten käyttötoimintojen vaatimiin kuormiin. Tasasähkösyöttöyksiköt, kuten akut ja laturit, on suositeltavaa varustaa jännitteen ja virran valvontalaitteilla. Tasasähköakut on mitoitettava syöttämään sähköä sähkölaitteiston käyttötarpeisiin vaihtojännitesyötön täydellisessä katkoksesta. Akkujen mitoitukseksi ja valitsemiseksi on arvioitava katkoksen todennäköisin kesto. Akkujen mitoituksen on perustut-

tava pahimpaan mahdolliseen tapaukseen, josta voi aiheutua vaihtojännitesyötön täydellinen menettäminen (ts. valtakunnallinen sähkökatkos, vika laitteiston pääkiskossa tms.). Vähimmäisvaatimuksena voidaan pitää sitä, että tasasähköakkujen kapasiteetin on oltava riittävä laukaisemaan katkaisijat ja kytkimet katkosten alkaessa, syöttämään tehoa pysyviin tasasähkökuormiin ja kytkemään päälle ne laitteiston osat, joiden avulla vaihtosähkönsyöttö voidaan palauttaa. [29.]

Kosketeltavissa olevia jänniteisiä osia sisältävien akustojen on sijaittava huoneessa tai kennossa, johon on pääsy vain valtuutetuilla henkilöillä. Akustotilojen on oltava kuivia ja riittävästi tuuletettuja vedyn kerääntymisen estämiseksi. Sallitut vetytasot ja suositellut ilmanvaihtotasot esitetään kansallisissa määräyksissä. Akustotiloista on oltava helppokulkuinen ulospääsy. Tilan ulkopuolelle, lähelle sen sisäänkäyntiä olisi järjestettävä silmien huuhtelupaikka tai henkilökohtaiset suojavaalineet. Akustot suositellaan erotettaviksi valvomotiloista kaasujen leviämisen ja tahattoman kosketuksen estämiseksi. Jos räjähdysvaara ei voida välttää, on käytettävä räjähdysuojattuja sähkölaitteilla (ks. IEC 60079-0). Avotulen tai hehkuvien osien aiheuttamasta kaasuseosten räjähdysvaarasta on tiedotettava korroosionkestävillä, riittävän suurilla ja selkeillä kilvillä. Avoimia lyijyakkuja sisältävää tilaa pidetään tuuletuksesta huolimatta syövyttämän ympäristönä. Seinien, sisäkattojen ja lattioiden on täytettävä suojausvaatimukset syövyttäviä ja kaasumaisia aineita vastaan. Syövyttävien aineiden pääseminen viemäriverkkoon on estetävä. Muita akkuja koskevia standardeja ovat mm. IEEE 450-2002 Recommended practice for maintenance, testing, and replacement of vented lead-acid batteries for stationary applications, IEC 60896-11987 Stationary battery tests, IEEE 1188-1996 Recommended practice for maintenance, testing and replacement of valve-regulated lead-acid(VRLA) batteries for stationary applications ja IEEE 1184-1994 recommended guide for selection and sizing batteries for uninterruptible power supply (UPS). [29.]

5 Sähkövarastojen käyttökohteet Suomen energiajärjestelmässä

Sähkövarastojen käyttökohteet voidaan jakaa energia- ja tehosovelluksiin. Energiasovellukset vaativat varastolta ominaisuutta luovuttaa sähköenergiaa minuuttien tai tuntien ajan. Tehosovelluksissa varastolta taas vaaditaan suuren ulostulotehon verrattuna varaston syöttämään energiaan. Tehosovelluksiin käytettävät varastot eivät yleensä pysty varastoimaan suuria määriä energiaa tehoyksikköä kohden. Energiasovelluksissa on siis usein pidempi purkausaika kuin tehosovelluksissa, joissa purkausaika on sekuntien ja

minuuttien luokkaa. Seuraavaksi on listattu esimerkkiä sähkövarastojen käyttökohteista sähköverkossa ja markkinoista, joihin osallistumalla keskitetyille sähkövarasto ratkaisulle voidaan jo nyt laskea kaupallista arvoa:

- reservipalvelut, erittäin nopeat reservipalvelut, reagointi aika alle 1sekunttia
- automaattisena palveluna taajuusohjattu häiriöreservipalvelu (FCR-D), Min 1 MW 30 min
- automaattisena palveluna, Taajuusohjattu käyttöreservipalvelu (FCR-N), Min 1 MW 30 min
- automaattinen taajuudenhallintareservi palvelu (FRR-A), Min 5 MW 30 min
- Säätosähkö nopea häiriöreservi (FRR-M), Etäaktivoinnilla - Min 5 MW 30 min
- aurinkovoimalan tuotannon integroinnin tukeminen (suuret kohteet)
- tuotannon vaihtelun tasaaminen
- aurinkotuotannon erittäin nopeiden vaihteluiden vaikutuksen minimointi
- energiatuotannon varastointi ja hyödyntäminen huippukulutuksen tasaajana
- erittäin nopean tuotannon kasvun tasoittaminen ja leikkaaminen
- jakeluverkon häviöiden ja niiden kustannus vaikutuksien minimointi
- loistehon kustannuksen hallinta (raja-arvojen valvonta ja ylityksien estäminen)
- jakeluverkon häviöiden minimointi, esim. akuston loistehon tuotanto/kulutuslähteenä
- jakelunverkon toimituslaadun varmistaminen

- sähköautonlatauksen pisteet, akusto ns. nopean latauksen mahdollistaja ja hetkellisen lataushuipun leikkaajana (vältetään muuntamoiden ylityöajan)
- muiden nopeasti vaihtelevien kuormien leikkaus
- kysynnänjousto
- aurinkovoiman tuotannon hyödyntäminen huipputehon leikkaajana
- sähkötuotannon/myynnin suunnittelun ja käytön joustavuuden lisääminen
- energiavarastokäyttö – tuotetun energian myynnin siirto korkeamman hinnan/tuotanto kustannuksen ajalle
- hätäsähkökäyttö
- akuston käyttö varavoimalähteenä poikkeustilanteissa (Kaasuturbiini käynnistyksen tuki)
- black start toiminnallisuus
- saarekekäyttö mahdollisuus
- käyttö alueella varavoimana kriittisten palveluiden toiminnan turvaamiseksi. [30.]

6 Sähköenergian varastointi kotitalouksissa

Sähkövarastot voivat olla välttämättömiä kotitalouksille tulevaisuudessa, koska on arvioitu, että kuluttajilla tulee olemaan yhä enemmän omaa aurinkosähkötuotantoa. Tällä hetkellä jakeluverkkoyhtiöt veloittavat aurinkosähkön tuottajilta siirtomaksuja, jos ylimääräistä tuotettua sähköenergiaa halutaan syöttää verkkoon ja myös niistä joudutaan maksaa veroja valtiolle. Tämän vuoksi on välttämätöntä käyttää itse kokonaan tuotettua sähköä tai varastoida myöhempää käyttöä varten, mikä olisi järkevintä vaihtoehtoista tässä tapauksessa. [31, s. 79–80]

Aurinkosähkötuotanto on korkeimmillaan päivän aikana, jolloin kulutus on yleensä alhaisimmillaan. Sähkövarastoilla tuotantoa voitaisiin varastoida, kun energian kulutus on vähäistä ja käyttää kulutushuippujen aikana. Tosin tulevaisuudessa aurinkosähkön myyminen saattaa muuttua kannattavammaksi, koska jakeluverkkoyhtiöt saattavat vapauttaa aurinkosähkön tuottajat siirtomaksuista. Tässä konseptissa aurinkosähköjärjestelmän kokonaistehoa kannattaisi kasvattaa, sillä verrattuna nykyiseen tilanteeseen suurinta osaa aurinkoenergiasta ei kannattaisi käyttää ainoastaan omaan kulutukseen. [31, s. 79–80]

6.1 Varastointimenetelmät

Sähköenergian varastoja on kehitetty monella erilaisella menetelmällä ja moniin eri käyttötarkoituksiin, siksi niiden ominaisuudet eroavat merkittävästi toisistaan. Raastasti varastotyypit voidaan jakaa teho- ja energiavarastoihin. Korkean tehon varastoista saadaan suuri teho lyhyellä ajalla. Tällaiset varastotyypit ovat mm. vauhtipyörät ja superkondensaattorit. Tällaisten varastojen ominaisuudet eivät sovellu kotitalouksien energian varastointiin, koska kotitalouksissa on harvoin sellaisia tilanteita, joissa tarvittaisiin suurta tehoa vain lyhyen aikaa. Sen sijaan korkean energian varastot soveltuvat hyvin kuluttajille kuten omakotitaloissa, koska niiden tehtävänä on varastoida suuri määrä energiaa, jota käytetään myöhemmin pitkällä ajalla. Suuria energiavarastoja, kuten pumpattuja vesivarastoja ja paineilmavarastoja, on kehitetty tuotannon tasaamiseen esimerkiksi tuulivoiman yhteydessä. Tällaisilla energiavarastoilla on hyvä hyötysuhde ja niiden kustannukset suhteessa varastoituu energiamäärään ovat pienet. Ne ovat kuitenkin käytännössä liian suuria varastointijärjestelmiä käytettäväksi kotitalouksissa. Parhaiten kotitalouksien sähköenergiavarastoiksi soveltuvat akut, joiden varastoima energiamäärä on kilowattitunneista kymmeneen kilowattitunteihin. [32, s. 814–830.]

Sähkövaraston tärkein ominaisuus kiinteistötasolla on korkea hyötysuhde, koska häviöt heikentävät kannattavuutta huomattavasti. Varaston kustannukset suhteessa varastoidun energian määrään oltava pienet, jotta varastointi olisi kannattavaa. Muita tärkeitä ominaisuuksia, joita vaaditaan varastolta ovat pitkä elinikä, riittävän nopea vasteaika ja erityisesti turvallisuus. [32, s. 814–830.]

6.2 Sähkön varastoinnin hyödyt kotitalouksissa

Kuluttajan kannalta on tärkeää, että sähkön varastoinnilla saataisiin mahdollisimman paljon kustannussäästöjä energian kulutuksessa. Kuluttajan saamaa kustannushyötyä voidaan tarkastella vertaamalla sähköstä maksettavaa hintaa eri tapauksissa. Varastoinnista saatava rahallinen kustannushyöty kehkeytyy kulutuksesta ja sähkön hinnan ajallisesta vaihtelusta ja hintojen erotuksesta. Tällöin sähkön hinnoittelussa täytyy olla käytössä ajallisesti muuttuvaa hinnoittelu esimerkiksi tuntisähkösopimus, jotta varastoinnista voitaisiin hyötyä. Tällaisessa sähkösopimuksessa tietyllä tunnilla kulutetusta sähköstä maksetaan tietty hinta. Hinnakkaammilla tunneilla energiaa otetaan varastosta, jonne se on varastoitu silloin, kun sähkön hinta oli edullisempi, niin tällöin kulutetun sähkön hinnaksi muodostuu varastoidun sähkön hinta. Varastoinnista saadaan sitä enemmän kustannushyötyä sähkön kulutuksessa, mitä suurempi hintojen erotus on ja mitä suurempi sähkön kulutus on. [33, s. 27–30.]

Kuluttaja voi saada sähkön varastoinnista myös rahallista hyötyä oman tuotannon tasoittamisella, jos kuluttajalla on pientuotantoa. Omasta tuotannosta saatava teho ei aina vastaa kulutusta ja tuotannon yli oleva kulutus joudutaan ostamaan verkosta, jolloin sähkön hinta voi olla erittäin korkea. Kun tuotanto on suurempi kuin kulutus, kuluttaja voi saada kustannushyötyä varastoimalla ylimääräistä tuotettua energiaa ja käyttämällä varastoidun sähkön, kun tuotanto on kulutusta pienempää. [33, s. 27–30.]

Kuluttaja kustannushyötyjen lisäksi sähkön varastoinnilla voi saada sähkön saatavuuden parantumisen. Sähkön saatavuuden parantuminen tarkoittaa sähkönjakelun keskeytyksistä aiheutuvia haittojen pienenemistä. Sähkökatkojen aikana varastosta voidaan syöttää kotitalouden sähköverkkoa. Suurin osa katkon aiheuttamaa vajetta voidaan täyttää varastolla riippuen sähkön kulutuksesta, sähkövaraston koosta ja siitä, miten paljon energiaa on varastoituna sähkökatkojen alettua. Sähkön varastoinnilla tavoitettua hyötyä on vaikea arvioida rahallisesti sähkön saatavuuden parantumisessa. [34, s. 55–60]

Sähköyhtiöt hyötyvät myös energian varastoinnista kotitalouksissa kuluttajan lisäksi. Sähköverkon huippukuormat pienenevät, kun kuluttajat ottavat energiaa varastoista kuormitushuippujen aikana ja tällä tavoin sähkön kulutusta voidaan tasoittaa. Tämän seurauksena tuotantolaitokset voivat tuottaa sähköä edullisemmillä menetelmillä ja häiriöreservien tarve vähentyisi sähkövarastojen avulla, koska kulutuksen ennustettavuus

voi parantua. Tällöin sähkön hinta laskisi kuormitushuippujen aikana ja sähköyhtiöt voivat myydä kuluttajille edullisempaa sähköä. Sähkövarastojen ansiosta kulutus tasoittuu huomattavasti ja sähkön hinnan vaihtelu pienenee, kun energiavarastojen käyttö yleistyy. Tällöin kuluttajan saama kustannushyöty myöskin pienenee merkittävästi. Sähkön varastoinnilla saadaan pienennettynä kuormitushuippuja, joka tarkoittaa sähköverkkoyhtiöiden kannalta, että verkon siirtokapasiteetin mitoitus voidaan pienentää ja tällöin sähkön siirtokustannukset pienenevät. Sähkön varastoinnilla on monia muitakin hyötyjä, joita voi olla vaikea tarkastella rahallisesti. [34, s. 55–60]

7 Sähkövarastojen taloudellisuus

Tässä luvussa esitetään sähkövarastojärjestelmien eri osa-alueista aiheutuvia kustannuksia. Sähkövarastojärjestelmän kustannukset koostuvat muuttuvista käyttö- ja ylläpitokustannuksista, vakinaisesta hankintakustannuksesta sekä varaston poistamisesta ja kierrättämisestä. Elinkaarikustannuslaskennassa täytyy ottaa huomioon kaikki kustannukset varaston käyttöajalta nykypäivän rahanarvossa laskettuna, mutta tässä työssä ei ole esitetty eksaktia elinkaarikustannuslaskentoja sähkövarastojärjestelmistä työn laajuuden rajaamiseksi. [35, s. 300–311.]

7.1 Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat varasto-osan C_v , tehoelektroniikan ja muun sähkön muuntamiseen tarkoitetun laitteiston C_{tm} ja varaston muiden oheislaitteiden C_{ol} kustannuksista. Tällöin kokonaisinvestointikustannukset C_{itot} ovat

$$C_{itot} = C_v + C_{tm} + C_{ol} \quad (5)$$

Muuntojärjestelmän kustannuksiin sisältyvät esimerkiksi pumppuvoimalaitoksen generaattorit ja turbiinit tai akuissa käytetty tehoelektroniikkaa. Oheislaitteiden kustannuksiin puolestaan sisältyvät suojalaitteiden, muuntajien ja muiden varaston verkkoon liittämiseen tarvittavat komponentit. Lisäksi varastossa sopivan lämpötilan ylläpitäminen, varaston valvonta ja ohjausjärjestelmässä tarvittavien laitteiden kustannukset myös sisältyvät varaston muiden oheislaitteiden kuluihin. Esimerkiksi akkupohjaisissa varastoissa

oheislaitteiden kustannukset eivät ole kovin suuret, sillä varastot voidaan liittää esimerkiksi voimalaitoksen tai sähköaseman yhteyteen. Mutta puolestaan pumppuvoimalaitoksen oheislaitteiden kustannukset ovat huomattavasti korkeampia, koska voimalaitos voi vaatia omia rakennuksia laitoksen valvontaa ja hallintaa varten sekä pitkiä kaapeleita ja muuntajia laitoksen verkkoon liittämiseksi. [35, s. 300–311.]

7.2 Käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä muut kustannukset

Erityispalveluihin on kehitetty asennetut kustannusarviot ja ne on esitetty asennetun poistokapasiteetin kilowattia kohti (€ / kW asennettuna). Energiakustannukset (LCOE) tai elinkaarikustannusarviot ilmaistaan toimitetun energian kilowattitunteina (€ / kWh) ja kilowattituntia kohti (€ / kW-v). Tekniikan seulontatutkimuksissa nämä kustannusarviot ovat käsitteellisiä arvioita. Ylläpito- ja käyttökustannukset koostuvat muuttuvista ja vakinaisista kustannuksista. Vakinaiset kustannukset eivät riipu järjestelmän käyttöasteesta sen elinkaaren aikana. Lisäksi käyttö- ja ylläpitokustannukset voivat sisältää varasto-osan (esimerkiksi akkujen tapauksessa akuston) vaihdosta aiheutuvia kustannuksia, koska varasto-osan elinikä on yleensä lyhempi kuin muun järjestelmän. [35, s. 300–311.]

Joissakin energiavarastoissa, kuten akuissa, varastojärjestelmän elinikää voidaan pidentää vaihtamalla yksistään varasto-osa. Esimerkiksi akkupohjaisissa sähkövarastojärjestelmissä tehoelektronikan elinkaari on usein pidempi kuin akuston, jolloin on järkevä vaihtaa ainoastaan akusto eikä koko järjestelmää. Sähkövarasto täytyy poistaa verkosta, kun se on saavuttanut elinikänsä. Varastoihin käytetään paljon ympäristölle vaarallisia aineita ja useita muitakin erilaisia materiaaleja, joita tulee kierrättää tai hävittää asiaankuuluvasti. Joistakin sähkövarastojärjestelmien purkamisesta saattaa koitua kuluja, jotka voivat olla merkittäviä varsinkin suurissa varastojärjestelmissä, kuten paineilmaparastoissa ja pumppuvoimalaitoksissa. Näitä kustannuksia on kuitenkin erittäin vaikea arvioida ja yleistää. [35, s. 300–311.]

7 Yhteenveto

Sähkövarastoja pystytään hyödyntämään useimmissa sähkövoimajärjestelmän osissa tuotannosta sähköön loppukäyttöön asti. Sähkövarasto voidaan määritellä resurssiksi, joka ottaa sähköenergiaa verkosta ja varastoi energiaa myöhempää käyttöä varten tai

syöttää sen takaisin verkkoon. Sähkövarastojen avulla saataisiin lisää joustavuutta sähköverkkoon, kun tuotettua sähköä ei tarvitse välittömästi käyttää. Sähkövarastoja tarvitaan tulevaisuudessa, kun sähköä tuotetaan yhä enemmän säästä riippuvien uusiutuvien energialähteiden avulla, kuten aurinko- ja tuulivoimalla, jotka eivät tuota sähköä ennustettavasti ja vakaasti. Sähkövarastojen käyttöön liittyy haasteita, joista useat liittyvät lainsäädäntöön. Sähkövarastoa ei ole määritelty käsitteenä Suomen sähkömarkkina-alueella, mutta sähkövarastot voidaan rinnastaa sähkön tuotantolaitokseksi.

Insinööriyössä tutkittiin eri sähkön varastointitekniikoita ja arvioitiin niiden etuja ja haasteita sekä tulevaisuuden mahdollisuuksia. Suomen osalta arvioitiin sopivimpien energiavarastojen soveltuvuutta pienkuluttajille ja arvioitiin varastoinnin tarpeellisuutta ja mahdollisia kustannushyötyjä kuluttajille kotitalouksissa. Työn aluksi tarkasteltiin, minkä vuoksi kannattaa sähköä varastoida, sekä kuvattiin erilaisten sähkön varastointitekniikoiden ominaisuuksia ja vertailtiin niitä keskenään. Sähkön varastointitekniikoiden teknisen sopivuuden selvittämiseen tehtiin kirjallisuuskatsaus sekä tietoa kerättiin useista eri julkaisuista, diplomitöistä sekä artikkeleista, jotka liittyivät aihepiiriin.

Sähkön varastointitekniikoita ovat useita, ja niitä voidaan luokitella varastoitavan energiamuodon mukaan sähkökemiallisiin, -magneettisiin ja mekaanisiin varastoihin. Sähkökemialliset varastot eli akut ovat soveltuvimpia kotitalouskäyttöön. Akkujen energia- ja tehokapasiteettiskaala on suuri, mikä mahdollistaa akkupohjaisten varastointijärjestelmien käytön niin energiaa kuin tehoa vaativiin sovelluksiin. Akuilla on suuri energiatiheys, jonka vuoksi ne mahtuvat myös pieneen tilaan. Akkupohjaiset sähkövarastot pystyvät reagoimaan nopeasti tehotarpeen muutoksiin, koska akkujen vasteaika on nopea.

Sähkövarastojen elinkaarikustannukset koostuvat ylläpito- ja käyttökustannuksista, investointikustannuksista, poisto- ja purkukustannuksista sekä varasto-osan mahdollisista vaihtokustannuksista. Kustannustiedot vaihtelevat paljon eri lähteiden välillä ja ne perustuvat usein oletuksiin ja arvioihin, koska sähkön varastointitekniikat ovat nuoria ja käyttökokemuksia on harvinaisen vähän. Tämän vuoksi sähkövarastojen kustannuksia ei voi skaalata luotettavasti eri kokoluokan varastoille, vaan kustannuksia tulee arvioida tapauskohtaisesti. Sähkövarastoista saatavia kustannushyötyjä on myös vaikeaa arvioida rahallisesti. Sami Haapamäki Landis+Gyriltä kertoi haastattelussa, että sähkövarastoista saadaan suurin hyöty, kun yhtä varastoa pystytään käyttämään useampaan käyttötarkoitukseen. Tällöin varaston tuotot kasvavat ja lisäksi varastojärjestelmän takaisinmaksuaika lyhenee. Tällä hetkellä tuottojen ja elinkaarikustannusten arviointia voidaan pitää

yksi sähkön varastointiin liittyvistä haasteista. Sähkövarastojen hinnat laskevat tulevaisuudessa sähkön varastointiteknologioiden kehittyessä ja varastoinnin yleistyessä.

Lähteet

- 1 Sähkövarastojen tutkimus ja kehitys. 2017. Verkkodokumentti. Fortum. <<https://www.fortum.com/fi/konserni/tutkimus-ja-kehitys/s%C3%A4hk%C3%B6varasto/pages/default.aspx>> Luettu 1.10.2017.
- 2 Pohjoismaiden suurin sähkövarasto. 2015. Verkkodokumentti. Helen. <<https://www.helen.fi/uutiset/2015/helsinkiin-pohjoismaiden-suurin-sahkova-rasto/>>. Luettu 1.10.2017.
- 3 Älykäs sähköverkko. 2017. Verkkodokumentti. Stek. <https://www.stek.fi/Alykas_sahkon_kaytto/fi_FI/Alykas_sahkoverkko/>. Luettu 1.10.2017
- 4 Batteries. 2017. Verkkodokumentti. Energy Storage Association. <<http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/solid-state-batteries>> Luettu 5.10.2017.
- 5 Hietalahti, Lauri. 2011. Sähkökäyttö ja hybriditekniikka, akut. Tampere. s.100-102.
- 6 Flow Batteries. 2017. Verkkodokumentti. Energy Storage Association. <<http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/flow-batteries>> Luettu 5.10.2017.
- 7 How does the Lead Acid Battery Work. BU-201. Verkkodokumentti. Battery University. <http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries> Luettu 5.10.2017.
- 8 Different types of battery used for auxiliary power supply in substations and power plants. 2012. Verkkodokumentti. <<http://electrical-engineering-portal.com/different-types-of-battery-used-for-auxiliary-power-supply-in-substations-and-power-plants>>. Luettu 5.10.2017.
- 9 Nickel-Cadmium Batteries. 2017. Verkkodokumentti. Energy Storage Association. <<http://energystorage.org/energy-storage/technologies/nickel-cadmium-ni-cd-batteries>> Luettu 5.10.2017.
- 10 Virtanen, Ville. Energian varastointimuodot. 2010. Turun yliopisto. <http://www2.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS2100/muuta/Luk_Virtanen.pdf> Luettu 5.10.2017.
- 11 Leinonen, Antti. Using battery energy storage in the future flexible power systems. 2017. Diplomityö. <<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24524/Leinonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>> Luettu 5.10.2017.

- 12 Electricity storage technologies. 2013. Verkkodokumentti. Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. <<http://www.sandia.gov/ess/publication/doeepri-electricity-storage-handbook/>> Luettu 5.10.2017.
- 13 Hietalahti, Lauri. Sähkökäyttö ja hybriditeknikka, superkondensaattorit, s.107-109. Tampere, 2011.
- 14 Leinonen, Antti. 2017. Akustojen ominaisuuksien vertailun perusteet. Verkkodokumentti. <http://eu.landisgyr.com/blog-fi/ketterat-akustot-tasapainottavat-verkon-taajuutta?__hstc=199419569.e5527d95531e222a75094b723cb3d92a.1505740896610.1505740896610.1505740896610.1&__hssc=199419569.11.1505740896611&__hsfp=47149885> Luettu 5.10.2017.
- 15 Flywheel Energy Storage. 2013. Verkkodokumentti. Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. <<http://www.sandia.gov/ess/publication/doeepri-electricity-storage-handbook/>> Luettu 5.10.2017.
- 16 Application of Fast-Response Energy Storage in NYISO for Frequency Regulation Services. 2010. Verkkodokumentti. Beacon Power Corporation. <<http://beaconpower.com/carbon-fiber-flywheels/>> Luettu 5.10.2017.
- 17 Pumped Storage Hydropower, 2016. Verkkodokumentti. <<http://machineryequipmentonline.com/electrical-power-generation/power-system-energy-storage-technologies/pumped-storage-hydropower/>> Luettu 5.10.2017.
- 18 Compressed Air Energy Storage. Verkkodokumentti. Midwest Independent Transmission System Operator (MISO) Energy Storage Study. <<https://www.epri.com/#/pages/product/000000000001024489/>> Luettu 5.10.2017.
- 19 D. Swider. 2007. Compressed Air Energy Storage in an Electricity System With Significant Wind Power Generation, IEEE Transactions on Energy Conversion. s. 95-102.
- 20 Kouksou, T., Bruel, P., Jamil, A. 2014. Energy storage, applications and challenges, s. 61-63.
- 21 Thermal. 2017. Verkkodokumentti. Energy Storage Association. <<http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/thermal2>> Luettu 5.10.2017.
- 22 Mistä lisäjousto sähköjärjestelmään? Loppuraportti. 2012. Verkkodokumentti. Energiategollisuus ry ja Fingrid Oyj. <http://energia.fi/sites/default/files/mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf> Luettu 31.10.2017.

- 23 Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids. 2009. Verkkodokumentti. IEA. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_storage.pdf> Luettu 31.10.2017.
- 24 Nokelainen, Tomi. 2013. Akkupohjaisten energiavarastojen käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkoissa. Insinöörityö. Metropolia AMK. <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58260/Nokelainen_Tomi.pdf?sequence> Luettu 31.10.2017.
- 25 Electricity storage technologies performance. 2013. Verkkodokumentti. Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. <<http://www.sandia.gov/ess/publication/doeepri-electricity-storage-handbook/>> Luettu 31.10.2017.
- 26 Gouarderes, F. 2015. Energy storage, study for the ITRE committee, European Union. s, 84.
- 27 Sähkönjakeluverkon verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016–2023. 2015. Verkkodokumentti. Energiavirasto. <<https://www.energiavirasto.fi/web/guest/verkkokomponentit-ja-yksikkohinnat-2016-2023>> Luettu 31.10.2017.
- 28 Sähkömarkkinalaki, 2013. 11 luku, sähkömarkkinoiden toimijoiden velvollisuudet.
- 29 SFS-6001. 2015. Suurijänniteasennukset. Tasa- ja vaihtosähkösyötöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 30 Haapamäki, Sami, M.Sc, Senior Smart Grid Solution Consultant, Landis+Gyr, Helsinki. Puhelinhaastattelu 30.9.2017.
- 31 Kitunen, Jukka. 2007. Aurinkosähkön soveltuvuus hajautettuun energiantuotantoon Suomessa, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- 32 Chatzivasileiadi, A., Ampatzi, E., Knight. 2013. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 814-830.
- 33 Koskela, Juho. 2014. Sähköenergian varastointivaihtoehdot kiinteistötasolla, Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- 34 Partanen, J., Honkapuro, S., Tuunanen, S. 2012. Jakeluverkkoyhtiöiden tariffirakenteiden kehitysmahdollisuudet, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- 35 Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. 2016. Energy Storage in Power Systems, United Kingdom, London.

