



**TURUN  
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen  
tiedekunta

# Superkondensaattorit hybridienergiajärjestelmissä

Otto Hoffren

Materiaalikemian tutkimusryhmä

Kemian laitos

LuK-tutkielma

Turun Yliopisto

29.5.2025

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

**Pääaine:** Kemia

**Tekijä:** Otto Hoffren

**Otsikko:** Superkondensaattorit hybridienergiajärjestelmissä

**Ohjaaja:** Pia Damlin

**Sivumäärä:** 28 sivua

**Päivämäärä:** 29.5.2025

---

Yhteiskuntamme jatkuvan energiankulutuksen lisääntyessä tehokkaan energiankulutuksen tarve on kasvanut entisestään. Lisäksi uusiutuvan energian talteenoton optimointi on noussut keskeiseksi haasteeksi kestävässä kehityksessä. Superkondensaattorit ja etenkin superkondensaattorien hyödyntäminen hybridienergiajärjestelmissä ovat lupaavia ratkaisuja energiankulutuksen optimoimisessa.

Hybridienergiajärjestelmät (HESS) koostuvat kahdesta tai useammasta erilaisesta energiaa varastoivasta laitteesta (ESS). HESS:n keskeinen toimintaperiaate on se, että hybridijärjestelmään kuuluvat laitteet täydentävät toistensa sähkökemiallisia ominaisuuksia luoden tehokkaamman tavan varastoida ja kuluttaa energiaa. Yksi tehokas HESS saadaan yhdistämällä akku ja superkondensaattori.

Akku-superkondensaattori-HESS:lla on saatu parannettua huomattavasti energiajärjestelmän keskeisiä ominaisuuksia. Näitä ovat mm. käyttöikä, energiatehokkuus, tehontiheys, kylmän- ja kuumen kestävyys sekä joustavuus erilaisiin sovelluksiin. HESS:n tarkemmat ominaisuudet riippuvat laajalti siitä, millaisista materiaaleista akun ja superkondensaattorin elektrodit ja elektrolyytit ovat valmistettu. Hiilen nanomateriaalit ja hiilihybridimateriaalit ovat suosituimpia elektrodimateriaaleja superkondensaattoreissa.

Akku-superkondensaattori-HESS:lla on monia sovelluskohteita. Yksi merkittävä sovellus on uusiutuvan energian talteenotossa. Etenkin tuuli- ja aurinkovoimaloissa voidaan hyödyntää superkondensaattorin nopeita varauksen latautumis- ja purkautumisnopeuksia vaihtelevien virransuuruuksien tasoittamisessa ja energian tehokkaassa talteenotossa. HESS:lla on myös sovelluksia esimerkiksi sähkö- ja hybridiajoneuvoissa

---

**Avainsanat:** Energiankulutus, uusiutuva energia, superkondensaattorit, hybridienergiajärjestelmä, akku-superkondensaattori-hybridienergiajärjestelmä, akku

# Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Superkondensaattorit</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Superkondensaattorien materiaaleja</b> .....	<b>9</b>
2.1.1	EDLC .....	10
2.1.2	PC.....	11
2.1.3	Hybridi.....	11
2.1.4	Elektrolyytti .....	13
<b>3</b>	<b>Akku-superkondensaattori hybridienergiajärjestelmä</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Superkondensaattorin vaikutus akun käyttöikään</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Akku-superkondensaattori HESS:n erilaiset kytkennät</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Sovelluskohteita</b> .....	<b>21</b>
3.3.1	Uusiutuva energia.....	21
3.3.2	Sähkö- ja hybridiajoneuvot .....	22
<b>4</b>	<b>Yhteenveto</b> .....	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Viitteet</b> .....	<b>26</b>

## Lyhenteet

SC – superkondensaattori (engl. supercapacitor)

PC – pseudokondensaattori (engl. pseudocapacitor)

EDLC – sähköinen kaksikerroskondensaattori (engl. electric double layer capacitor)

HESS – hybridienergiajärjestelmä (engl. hybrid energy storage system)

ESS – energian varastointijärjestelmä (engl. energy storage system)

rGO – pelkistetty grafeenioksidi (engl. reduced grapheneoxide)

CNT – hiilinanoputki (engl. carbon nanotube)

PANI – polyaniliini

PEDOT - poly 3,4-etyleenideoksitiofeeni

TEABF<sub>4</sub> – tetraetyyliammonium tetrafluoroboraatti

PVA - polyvinyylialkoholi

BCL – akun käyttöikä (engl. battery cycle life)

DC – tasavirta (engl. direct current)

# 1 Johdanto

Maailman yhteiskuntien kehittyessä energian kulutus on kasvanut suuresti.<sup>1</sup> Fossiilisia polttoaineita käytetään entistä enemmän ja uusiutuvia energianlähteitä pyritään tuomaan esille ja kehittämään entisestään.<sup>1,2</sup> Eteenkin uusiutuvan ja päästöttömän energian tarve on kasvanut liikenteessä, sekä optoelektroniikan ja kannettavan elektroniikan lisääntyessä.<sup>3</sup> Näiden ja monien muiden tekijöiden takia jokaisen ihmisen elämään kuuluu suuri päivittäinen energian kulutus.<sup>2</sup> Tämän takia energian tehokas käyttö ja sähkölaitteiden kulutuksen optimointi on entistä tärkeämpää.<sup>2,4</sup>

Suuri osa laitteistamme saa virtansa akuista. Akut ovatkin tunnetuin tapa tarjota virtaa sähkölaitteelle, kun laite toimii irrallaan sähköverkosta.<sup>5</sup> Akuilla on kuitenkin omat heikkoutensa, joiden takia niiden käyttö jatkuvasti lisääntyvässä energian kulutuksessa on epäoptimaalista.<sup>5,6</sup> Akkujen huomattavia heikkouksia ovat niiden lyhyt käyttöikä ja pieni tehon tiheys.<sup>6</sup> Akkujen vahvuuksien kuten suuren energian tiheyden ja pienen varauksen itsestään purkautumisen takia akkuja käytetään kuitenkin entistä enemmän.<sup>5</sup> Superkondensaattorit ja tarkemmin superkondensaattorien sisällyttäminen sähkölaitteiden energian varastointiin on yksi lupaava vaihtoehto energiankulutuksen optimoimiseen.<sup>1,6,7</sup>

Superkondensaattorit (SC) tai toiselta nimeltään sähkökemialliset kondensaattorit ovat energian varastointi laitteita, joilla on suuri tehon tiheys, pitkä elinikä, korkea kapasitanssi sekä erittäin nopeat varauksen latautumis- ja purkautumisnopeudet.<sup>2,6,7</sup> Superkondensaattoreita ovat pseudokapasitanssiset superkondensaattorit (PC), sähköiset kaksikerros kondensaattorit (EDLC) ja hybridisuperkondensaattorit. Näistä pseudokapasitanssiset superkondensaattorit perustuvat erittäin nopeisiin hapetus-pelkistysreaktioihin ja EDLC-superkondensaattorit toimivat elektrolyytin ionien väliseen elektrostaattiseen adsorptioon ja elektrodien varaukseen.<sup>4</sup> Superkondensaattoria, jossa yhdistetään kahta erilaista elektrodimateriaalia, kutsutaan hybridi superkondensaattoriksi.<sup>4</sup> Superkondensaattoreilla on myös omat

heikkoutensa muihin energianvarastointimenetelmiin verrattuna, joiden takia ne eivät välttämättä sovellu monien sähkölaitteiden energianvarastointiin. Yksi merkittävä heikkous on superkondensaattorin varauksen nopea itsestään purkautuminen.<sup>5</sup> Yksi lupaava tapa hyödyntää superkondensaattorien edut ja samalla minimoida niiden heikkouksia on hybridienergiajärjestelmät.<sup>5,8</sup>

Hybridienergiajärjestelmät (HESS) ovat energianvarastointilaitteita (ESS), joissa yhdistetään kaksi tai useampi erilainen energianvarastointilaitte. Superkondensaattorin ja akun yhdistämällä voidaan luoda akku-superkondensaattori hybridienergiajärjestelmä.<sup>5</sup> On olemassa kolme erilaista tapaa koota akku-superkondensaattori hybridienergiajärjestelmä: passiivinen, puoliaktiivinen ja aktiivinen konfiguraatio.<sup>5,6,8</sup> Hybridienergiajärjestelmän tarkoitus on luoda tehokas energianvarastointilaitte täydentämällä akun ja superkondensaattorin heikkouksia toistensa vahvuuksilla.<sup>5</sup> Tällöin hybridienergiajärjestelmä on tehokkaampi kuin kumpikin komponentti olisi yksistään.<sup>5</sup>

Tässä tutkielmassa käydään läpi perusta superkondensaattoreista ja niissä käytetyistä materiaaleista, selvitetään hybridienergiajärjestelmän toimintaperiaate ja tarkastellaan sitä akku-superkondensaattori-HESS:n kannalta sekä esitetään kyseisen hybridienergiajärjestelmän sovelluksia. Tutkielmassa materiaalien ja sovelluksien hyötyä tarkastellaan kestävän kehityksen näkökulmasta ottaen huomioon esimerkiksi EU:n direktiivit alkuaineiden käytöstä.

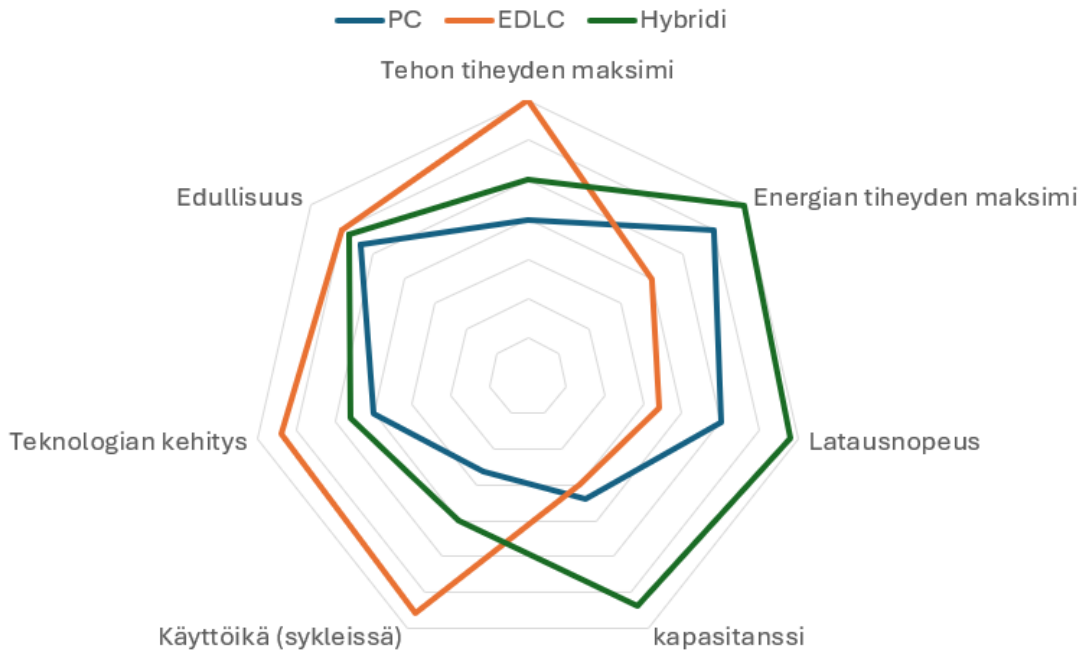
## 2 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit ovat saaneet viime vuosina paljon huomiota tutkimuksessa niiden uniikkien vahvuuksien ja eroavaisuuksien muihin energianvarastointilaitteisiin verrattuna.<sup>2</sup> Superkondensaattoreiden ominaisuuksia on verrattu erityisesti akkuihin.<sup>2</sup> Varsinkin superkondensaattorien tehokkuus on saanut huomiota.<sup>2</sup> Superkondensaattorien tehokkuus on huomattavasti parempi akkuihin verrattuna.<sup>2</sup> Tätä voidaan havainnollistaa taulukon 1. avulla. Taulukosta nähdään superkondensaattoreiden tehon tiheyden olevan yli kymmenkertainen akkuihin verrattuna.<sup>9</sup> Superkondensaattoreilla on myös suuri kapasitanssi, ne toimivat sekä kuumissa, että kylmissä olosuhteissa ja niiden käyttöikä on huomattavasti suurempi akkuihin verrattuna.<sup>2</sup> Superkondensaattori koostuu elektrodeista, elektrolyytistä sekä separaattorista. Superkondensaattorin ominaisuudet määräytyvät käytettyjen elektrodimateriaalien mukaan. Superkondensaattori tyyppiä on kolme, jotka ovat sähköiset kaksikerros kondensaattorit (EDLC), pseudokapasitanssiset kondensaattorit (PC) ja hybridikondensaattorit.<sup>1,2,4</sup> Kaikille superkondensaattorityypeille on ominaista niiden suuri kapasitanssi, suuri tehon tiheys, kestävyys ja nopeat varuksen latautumis- ja purkautumisajat.<sup>1,2,6,7</sup> Eri superkondensaattorityypeillä on kuitenkin omat vahvuutensa ja heikkoutensa.<sup>1,2</sup> Esimerkiksi pseudokondensaattoreilla on suurempi kapasitanssi mutta pienempi tehon tiheys EDLC-kondensaattoreihin verrattuna.<sup>2</sup> Superkondensaattoreille oleellisten ominaisuuksien vertailua superkondensaattori tyyppien välillä esitetään kuvassa 1. EDLC- ja PC-kondensaattoreita kuvattuna kuvassa 2.

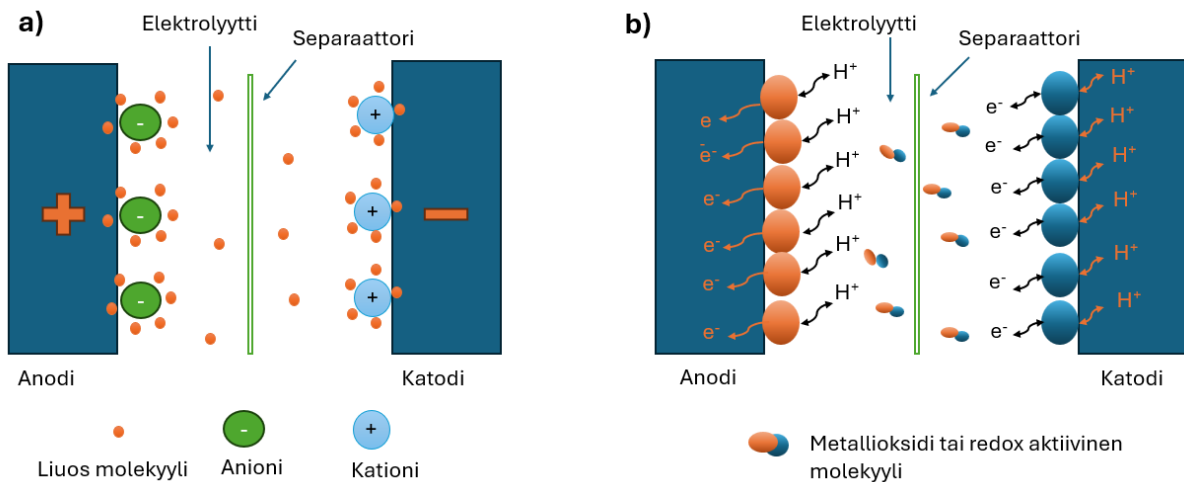
Taulukko 1. Yleistetty vertailu akkujen ja superkondensaattoreiden tehon- ja energian tiheyksistä. Taulukko on muokattu artikkelista, joka toimii Creative Commons CC BY-NC 4.0 license- lisenssin alla ja oikeuttaa artikkelin ei kaupallisen käytön<sup>9</sup>

	Superkondensaattori	Akku
Tehon tiheys	Noin 10 kW/kg	< 1 kW/kg
Energian tiheys	10 – 100 Wh/kg	> 300 Wh/kg

## Erilaisten superkondensaattorien ominaisuuksia



Kuva 1. PC-, EDLC- ja hybridikondensaattorien ominaisuuksia kuvattuna säteittäisellä kaaviolla. Kuva on muokattu avoimen julkaisun artikkelista, jota voidaan jatkolevittää ja muokata Creative Commons Attribution CC-BY-licence – lisenssillä <sup>7</sup>



Kuva 2. Luonnostelma a) EDLC-kondensaattorista b) PC-kondensaattorista. Kuva on luonnos ja todellisuudessa anionit, kationit ym. asettuvat laajasti huokoisen elektrodimateriaalin pinnalle. Kuva on muokattu avoimen julkaisun artikkelista, jota voidaan jatkolevittää ja muokata Creative Commons Attribution CC-BY-licence - lisenssillä <sup>1</sup>

## 2.1 Superkondensaattorien materiaaleja

Superkondensaattorin suorituskyky riippuu laajalti siitä, millaisesta materiaalista superkondensaattorin elektrodit ja elektrolyytti on valmistettu.<sup>2,7</sup> Superkondensaattorin suorituskykyyn vaikuttaa lisäksi se, onko elektrolyytti nestemäinen vai kiinteä.<sup>2,7</sup>

Tärkeitä superkondensaattorin elektrodimateriaalin piirteitä ovat: hyvä johtavuus, kemiallinen pysyvyys, vähäinen korrosio, suuri pinta-ala (huokoisuus), suuri tehon tiheys, suuri kapasitanssi, lämmön- ja kylmän kestävyys ja pitkä käyttöikä.<sup>7</sup> Lisäksi superkondensaattorin elektrodimateriaalin tulisi olla edullista, sillä lähes 90 % superkondensaattorin hinnasta koostuu elektrodimateriaalista.<sup>10</sup>

Superkondensaattoreissa käytetyt materiaalit voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Nämä ryhmät ovat: EDLC-materiaalit, pseudokapasitanssiset materiaalit ja akkumateriaalit.<sup>2</sup> Superkondensaattoreissa käytetyt materiaalit ovat joko hiilipohjaisia, siirtymämetallien oksideja tai sähköä johtavia polymeereja.<sup>7</sup> Nimiensä mukaan EDLC- ja PC-materiaaleja käytetään erikseen EDLC- ja PC-kondensaattoreissa.<sup>2</sup> Hybridikondensaattoreissa voidaan sen sijaan yhdistää näitä kahta ja myös hyödyntää akkumateriaaleja.<sup>2</sup>

Osa superkondensaattorien elektrodimateriaaleista valmistetaan luonnonvaroista, joita on niukasti jäljellä maapallolla. EU:n asetusten mukaan esimerkiksi litiumin, nikkelin, lyijyn ja koboltin käyttöä tulisi rajoittaa huonon saatavuuden ja ympäristöllisten vaikutusten takia. Tulevaisuuden elektrodimateriaalit valmistetaan siis runsaammilla ja ympäristöystävällisillä materiaaleilla kuten erilaisilla hiili- ja polymeerimateriaaleilla.<sup>11,12</sup>

Superkondensaattorien elektrodimateriaaleja on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Superkondensaattorien elektrodimateriaaleja. Taulukko on muokattu artikkelista, joka toimii Creative Commons CC-BY-NC-ND license- lisenssin alla ja oikeuttaa artikkelin ei kaupallisen käytön.<sup>2</sup>

EDLC	PC	Hybridi
<ul style="list-style-type: none"><li>• rGO</li><li>• CNT</li><li>• Aktivoitu hiili</li><li>• Grafeeni</li><li>• Hiiliaerogeeli</li><li>• Grafiitti</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Siirtymämetallioksidit (esim. MnO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub> tai RuO<sub>2</sub>)</li><li>• Johtavat polymeerit (esim. PANI tai PEDOT)</li><li>• Hybridimateriaalit (esim. rGO/PANI tai grafeeni/MnO<sub>2</sub>)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• EDLC/PC materiaalit</li><li>• PbO<sub>2</sub></li><li>• TiO<sub>2</sub></li></ul>

### 2.1.1 EDLC

EDLC-kondensaattoreissa käytetään suurimmaksi osaksi hiilipohjaisia elektrodimateriaaleja.<sup>2,12</sup> Varsinkin hiilinanomateriaalit ovat suosittuja superkondensaattorimateriaaleja. Hiilen etuja ovat sen huokoinen koostumus, edullisuus ja saatavuus sekä hallittavat sähkökemialliset ominaisuudet.<sup>7</sup> EDLC-kondensaattoreissa käytettyjä hiilielektrodimateriaaleja ovat muun muassa: aktivoitu hiili, grafeeni, pelkistetty grafeenioksidi, hiilinanoputket, grafiitti ja hiiliaerogeeli.<sup>2,7,12</sup> Elektrodimateriaalin huokoisuus on tärkeä tekijä EDLC-kondensaattorissa.<sup>2,7,10</sup> Materiaalin huokoisuus on yksi suurimmista tekijöistä, jolla saadaan kasvatettua kondensaattorin kapasitanssia ja energian tiheyttä.<sup>2,7,10,12</sup> Pienillä huokosilla, voidaan saavuttaa suurempia kapasitanssin ja energian tiheyksiä kuin suuremmilla huokosilla.<sup>7</sup> Toisaalta liian pienet huokokset estävät ionien liikkumista elektrodilla, mikä laskee materiaalin kapasitanssia.<sup>2</sup> Materiaalin huokosten halkaisijoiden tulisi olla välillä 2-50 nm. Tällöin kapasitanssi ja energian tiheys kasvavat.<sup>2</sup>

Hiilimateriaaleilla huokokset ovat usein sopivan kokoisia.<sup>2,12</sup> Esimerkiksi aktivoitun hiilen huokosten halkaisijat esiintyvät alueella

1–20 nm.<sup>2</sup> Lisäksi hiilimateriaaleilla huokosia esiintyy tiiviisti, mikä myös kasvattaa pinta-alaa ja kapasitanssia huomattavasti.<sup>12</sup>

### 2.1.2 PC

PC-kondensaattorin elektrodimateriaalille tyypillisiä ominaisuuksia ovat hyvä sähkön johtavuus, pitkä käyttöikä, alahainen virran tiheys, korkea tehon tiheys ja korkea kapasitanssi.<sup>2,10</sup>

PC-kondensaattoreissa hyödynnetään erilaisia siirtymämetallioksiedeja ja sähköä johtavia polymeerejä.<sup>2</sup> Yleisesti käytettyjä siirtymämetallioksiedeja ovat esimerkiksi MnO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> ja RuO<sub>2</sub>.<sup>2,10</sup> RuO<sub>2</sub>:lla ja IrO<sub>2</sub>:lla on näistä korkeimmat kapasitanssit, mutta niitä käytetään nykyään harvemmin niiden korkean hinnan takia.<sup>10</sup>

Yleisesti käytettyjä polymeerimateriaaleja ovat esimerkiksi polyaniliini (PANI) tai poly 3,4-etyylideoksitiofeeni (PEDOT).<sup>2</sup> Polymeerimateriaalien korkean sähkön johtavuuden ansiosta niillä on usein nopeammat latautumis- ja purkautumisnopeudet metallioksideihin verrattuna.

Näiden lisäksi PC-kondensaattoreissa on käytetty erilaisia hybridimateriaaleja. Näitä ovat esimerkiksi pelkistetty grafeenioksidi/polyaniliini (rGO/PANI) tai grafeeni/manganiidioksidi.<sup>2,13</sup> Hybridimateriaalin avulla voidaan kasvattaa elektrodin pinta-alaa, kapasitanssia, parantaa lämmön- ja kylmän kestävyyttä ja pienentää superkondensaattorin sisäistä resistanssia.<sup>13</sup> Hybridimateriaalien kehitys on painottunut erilaisten hiilihybridimateriaalien kehitykseen hiilen erinomaisten sähkökemiallisten ominaisuuksien takia.<sup>12,13</sup>

### 2.1.3 Hybridi

Hybridisuperkondensaattoreissa ei nimestään huolimatta käytetä välttämättä hybridimateriaaleja. Hybridi nimike tulee siitä, että hybridisuperkondensaattori käyttää kahta erilaista elektrodimateriaalia.<sup>1,2,4</sup> Suuri osa hybridisuperkondensaattoreista

esimerkiksi käyttää toisena elektrodina EDLC-materiaalia ja toisena PC-materiaalia.<sup>2,4</sup> Toinen yleinen hybridiyhdistelmä on EDLC- ja akkumateriaalit.<sup>1,4</sup> On huomattavaa, että koska hybridisuperkondensaattoreita voidaan koota monella eri tavalla, hybridisuperkondensaattorit jaetaan kolmeen pääryhmään niissä käytettyjen materiaalien perusteella.<sup>2,4</sup> Nämä ryhmät ovat asymmetriset hybridit, akkuhybridit ja komposiittihybridit.<sup>2,4</sup> Näistä asymmetriset hybridit ovat yleisimpiä hybridisuperkondensaattoreita.<sup>2,4</sup>

Asymmetrisissä superkondensaattoreissa itsessään on useampia alalajeja.<sup>4</sup> Tyypillisin asymmetrinen superkondensaattori on kuitenkin superkondensaattori/akku yhdistelmä.<sup>4</sup> Tässä hybridissä toinen elektrodi on superkondensaattori materiaalia ja toinen akku materiaalia.<sup>2,4</sup> Tällöin superkondensaattorin sisällä tapahtuvat sähkökemialliset reaktiot ovat asymmetrisiä.<sup>2,4</sup> Asymmetrisen hybridin voi koota myös EDLC/PC yhdistelmästä.<sup>2</sup>

Hybridisuperkondensaattori pääasiassa hyödyntää EDLC-materiaaleille tyypillistä elektrostaattista adsorptiota ja PC-materiaaleille tyypillisiä hapetus-pelkistysreaktioita samanaikaisesti saavuttaakseen korkean ominaisenergia ja -tehon.<sup>4</sup> Hybridisuperkondensaattorilla voidaan moninkertaistaa energian tiheys tyypillisiin EDLC- ja joihinkin PC-kondensaattoreihin verrattuna.<sup>4</sup> Elektrodimateriaalit tulee valita hybridisuperkondensaattoriin niin, että varauksen latautumis-purkautumisnopeuksissa ei tule suurta epätasapainoa materiaalien välillä.<sup>2</sup>

Hybridisuperkondensaattoreissa voidaan käyttää kaikkia aikaisemmin mainittuja materiaaleja.<sup>2,4</sup> Superkondensaattorin akkumateriaalina voidaan käyttää aikaisemmin mainittuja  $MnO_2$  ja  $RuO_2$  tai perinteisille akuille tyypillistä  $PbO_2$ .<sup>2,4</sup> HESS:n akku komponentille tyypillisiä materiaaleja ovat litium, litium polymeerit, lyijyhappo, nikkeli ja natriumkloridi.<sup>5</sup>

Alkuaineiden kuten litiumin, lyijyn ja nikkelin käyttö elektrodimateriaaleina tulee kuitenkin vähentymään tulevaisuudessa osaksi EU:n direktiivien ja osaksi niiden rajoittuneen saatavuuden tai korkean hinnan takia.<sup>11</sup>

#### 2.1.4 Elektrolyytti

Elektrolyytillä on suuri vaikutus siihen, millä jännitevälillä superkondensaattori toimii. Jänniteväli on suoraan verrannollinen superkondensaattorin energiatiheuteen, joten oikeanlaisen elektrolyytin valitseminen on tärkeää.<sup>2,14</sup> Toinen tärkeä ominaisuus elektrolyytin valinnassa on elektrolyytin ioninen johtavuus. Sopivalla ionisella johtavuudella voidaan kasvattaa superkondensaattorin tehontihelyttä.<sup>14</sup> Elektrolyytti superkondensaattoreissa voi olla joko nestemäinen tai kiinteä.<sup>2,4</sup> Nestemäisiä elektrolyyttejä ovat vesiliukoiset elektrolyyttiliuokset, orgaaniset elektrolyyttiliuokset ja ioniset nesteet.<sup>2,4</sup> Nestemäisillä elektrolyyteillä on yleensä suurempi johtavuus ja niiden on helpompi saavuttaa elektrodimateriaalin huokokset, jonka avulla voidaan saavuttaa suurempia kapasitanssin ja tehon tiheyden arvoja.<sup>4</sup>

Vesipohjaiset elektrolyytit ovat yksi suosituimmista elektrolyyttivaihtoehdoista superkondensaattoreissa. Niiden etuja ovat mm. suuri ioninen johtavuus, pieni sisäinen resistanssi, pieni molekyylikoko, edullisuus ja turvallinen käyttö. Vesipohjaiset elektrolyytit ovat myös ympäristöystävällisin vaihtoehto muihin elektrolyytteihin verrattuna. Pienen molekyylikoon ansiosta molekyylit läpäisevät elektrodin huokokset helposti. Vesipohjaisten elektrolyyttien merkittäviä heikkouksia ovat niiden haihtuvuus, pieni jänniteväli ja korroosion riski. Varsinkin happamilla ja emäksisillä elektrolyyteillä on korkea riski kuluttaa elektrodin pintaa ajan myötä. Suosituttuja vesipohjaisia elektrolyyttejä ovat KCl, KOH ja H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vesiliuokset.<sup>14</sup>

Orgaaniset elektrolyytit ratkaiset osan vesipohjaisten elektrolyyttien ongelmista. Orgaanisilla elektrolyyteillä on suurempi toimiva jänniteväli, pieni haihtuvuus ja korkea sähkökemiallinen pysyvyys. Orgaaniset elektrolyytit tarvitsevat kuitenkin täysin kuivat olosuhteet toimiakseen optimaalisesti. Orgaanisilla elektrolyyteillä on myös riski syttyä tuleen. Tämä tekee orgaanisten elektrolyyttien kanssa

työskentelystä hankalaa ja hidasta vesipohjaisiin verrattuna. Orgaaniset elektrolyytit ovat myös hieman kalliimpia vesipohjaisiin verrattuna, mutta niillä ei ole yhtä suuri riski syövyttää elektrodimateriaalia. Yleisiä orgaanisissa elektrolyyteissä käytettyjä suoloja ovat mm. TEABF<sub>4</sub> ja LiPF<sub>6</sub>. Liuottimena voidaan käyttää esimerkiksi asetonitriiliä tai propyleenikarbonaattia.<sup>14</sup>

Ioniset nesteet ovat uusia elektrolyytti vaihtoehtoja superkondensaattori sovelluksissa. Ioniset nesteet ovat suosittuja niiden ympäristöystävällisyyden ja hyvien sähkökemiallisten ominaisuuksien ansiosta. Ionisilla nesteillä on laaja toimiva jänniteväli, lähes olematon haihtuvuus, suhteellisen hyvä johtavuus, matala korrosio ja ne ovat myrkyttömiä. Ionisen nesteen heikkous on niiden suuri viskositeetti, joka vaikeuttaa niiden kanssa työskentelyä ja voi aiheuttaa huonon kontaktin elektrodeihin. Ioniset nesteet ovat myös kalliita. Tästä huolimatta ioniset nesteet ovat suosittuja elektrolyyttejä kemian kestävän kehityksen sovelluksissa, joissa niitä käytetään erityisesti EDLC-kondensaattoreissa. Ionisissa nesteissä yhdistetään kationi ja anioni ostan nesteen. Yleisiä kationi osia ovat mm. fosfonit, ammonium, pyridinium ja sulfonium. Yleisiä anioni osia ovat mm. BF<sub>4</sub><sup>-</sup>, PF<sub>6</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup> ja Cl<sup>-</sup>.<sup>14</sup>

Kiinteät elektrolyytit ovat niiden olomuodon ansiosta kaikista erikoisin vaihtoehto superkondensaattorin elektrolyytiksi. Kiinteän olomuodon ansiosta kuitenkin voidaan saavuttaa asioita, joita nestemäinen elektrolyytti ei kykenisi. Yksi merkittävä etu kiinteällä elektrolyytillä on sen vaatima tila. Kiinteä elektrolyytti ei tarvitse separaattoria, minkä avulla voidaan rakentaa hyvin pieniä superkondensaattoreita.<sup>4,14</sup> Kiinteän elektrolyytin superkondensaattoreita voidaan tämän ansiosta kehittää kannettavien sähkölaitteiden sovelluksiin.<sup>4</sup> Muita kiinteän elektrolyytin etuja ovat niiden kestävyys ja se, että elektrolyyttiä ei pääse vuotamaan superkondensaattorista sen käytön aikana. Kiinteän olomuodon takia niillä on huomattavasti huonompi johtavuus nestemäisiin elektrolyytteihin verrattuna, jonka takia nestemäisiä elektrolyyttejä suositaan monissa superkondensaattori

sovelluksissa. Kiinteät elektrolyytit ovat yleensä polyvinyylialkoholi geelejä. Yksi käytetty kiinteä elektrolyytti on PVA/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.<sup>14,15</sup> Elektrolyyttien ominaisuuksien vaikutusta superkondensaattorin ominaisuuksiin on kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Elektrolyytin superkondensaattoriin vaikuttavat tekijät taulukoituna. Reprinted from Journal of Energy Storage, Vol 50, T.S. Bhat<sup>a,b</sup>, P.S. Patil<sup>b</sup>, R.B. Rakhi<sup>c</sup><sup>d</sup>, Recent trends in electrolytes for supercapacitors, Pages No. 3, Fig 2b Copyright (2022), with permission from Elsevier. Lisenssinumerolla 6014280333707<sup>14</sup>

Kapasitanssi	Energian tiheys	Tehon tiheys	Käyttöikä (sykleissä)	ESR	Lämpötila stabiilisuus
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ionikoko</li> <li>• Ionien ja huokosien koko ero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsentraatio</li> <li>• Sähkökemiallinen stabiilisuus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ioninen johtavuus</li> <li>• Jänniteikkuna</li> <li>• Ionien ja elektrodien vuorovaikutus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lämpötila</li> <li>• Kennon jännite</li> <li>• Elektrodien ja elektrolyytin vuorovaikutus</li> <li>• purkautumisnopeus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luontainen resistanssi</li> <li>• Ioninen resistanssi</li> <li>• Viskositeetti</li> <li>• Ionien liikkuvuus</li> <li>• Ioninen johtavuus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suolan liukoisuus</li> <li>• Kiehumispiste</li> <li>• Jäätymispiste</li> </ul>

### **3 Akku-superkondensaattori hybridienergiajärjestelmä**

Hybridienergiajärjestelmä eli HESS on kahdesta tai useammasta erilaisesta energiaa varastoivasta laitteesta (ESS) koostuva laite. HESS:n keskeinen toimintaperiaate on se, että HESS:n valitut komponentit täydentäisivät toistensa sähkökemiallisten ominaisuuksien heikkouksia omilla vahvuuksillaan. Luotu HESS tulisi aina olla siis tehokkaampi sen yksittäisiin komponentteihin verrattuna. Tällöin voidaan luoda kestävä, edullinen ja tehokas uusi tapa varastoida ja kuluttaa energiaa.<sup>4,5</sup>

HESS voi koostua monenlaisista erilaisista ESS komponenteista. Akku on kuitenkin yleensä mukana jokaisessa variaatiossa. Tämä johtuu akkujen laajasta käytöstä. Nykyinen energiainfrastruktuurimme suosii akkujen laajaa käyttöä ja monet sähkölaitteet kehitetään akkujen ympärille. Akkujen energiankulutuksen optimointi on siis erityisen tärkeää.<sup>4,5,8</sup>

HESS:n avulla akkujen energiankulutusta voidaan optimoida huomattavasti. Erityisesti akusta ja superkondensaattorista koottu HESS on lupaava tapa parantaa akun energiatehokkuutta. Akku-superkondensaattori-HESS:n tehokkuus perustuu sen komponenttien yhteensopivuuteen. Esimerkiksi superkondensaattorin merkittävä heikkous on sen pieni energiantiheys ja akun merkittävä vahvuus on sen suuri energiantiheys. Tällöin akun vahva energiantiheys tukee superkondensaattorin heikkoa energiantihyyttä. Muita akun ja superkondensaattorin toisiaan täydentäviä ominaisuuksia ovat virran latautumis- ja purkautumisnopeudet, tehontiheys, käyttöikä sekä lämmön ja kylmän kestävyys.<sup>1,2,4-6,8</sup>

### 3.1 Superkondensaattorin vaikutus akun käyttöikään

Akku-superkondensaattori-HESS:lla on monia hyötyjä. Näistä keskeisimpiä ovat kuitenkin HESS:n tuoma pidempi käyttöikä ja tähän liittyvä kustannustehokkuus. Vaikka HESS maksaa useampien komponenttiansa ja superkondensaattorien korkean hinnan takia enemmän kuin yksinkertainen akku-ESS, HESS:n pitkä käyttöikä tekee siitä kuitenkin edullisemman vaihtoehdon. Edullisuuteen vaikuttaa myös HESS:n suurempi tehokkuus.<sup>16,17</sup>

Akun käyttöikä voidaan mitata akun lataussykliä eli BCL:n (battery cycle life) avulla. BCL kuvaa lataussykliä määrää, jonka jälkeen akun kapasitanssi on pudonnut 20 % alkuperäisestä kapasitanssista. Akun kapasitanssin laskuun vaikuttaa moni eri tekijä. Näitä ovat esimerkiksi akun purkaussyvyys, ympäristön lämpötila ja akun latautumis- ja purkautumisnopeudet. Näitä tekijöitä säätämällä voidaan kiihdyttää tai hidastuttaa akun kokonaiskapasitanssin laskua ja muuttaa akun BCL arvoa. Korkea purkaussyvyys on erityisen vahingoittava tekijä akkujen kapasitanssin vähenemisessä. Nämä tekijät ovat kuitenkin usein vaikeita optimoida, sillä purkaussyvyys sekä latautumis- ja purkautumisnopeudet ovat enimmäkseen akku- ja elektrolyyttimateriaalien ominaisuuksia. Näitä voi kuitenkin optimoida erilaisilla hybridimateriaaleilla ja sen kautta korottaa akun BCL arvoa. Akku voidaan myös eristää ympäristön lämpötilalta, mutta tämä voi johtaa akun ylikuumentumiseen sekä elektrodien- ja elektrolyytin vahingoittumiseen. Liian kylmässä akun suorituskyky laskee myös huomattavasti. Alhaisen lämpötilan vaikutuksena akun sisäinen resistanssi on huomattavasti korkeampi. Akkujen optimaalinen käyttölämpötila on huoneenlämmössä.<sup>17-19</sup>

Yksi superkondensaattorin merkittävä vahvuus on sen kestävyys ja pitkä käyttöikä. Superkondensaattori kestää miljoonia lataussyklejä ennen kuin sen sähkökemialliset ominaisuudet heikkenevät huomattavasti. Superkondensaattorin käyttöikä on siis käytännössä

loputon ja HESS:n käyttöikä määräytyy täysin akun suorituskyvyn mukaan. Superkondensaattorin sisällyttämisellä hybridijärjestelmään voidaan kuitenkin vaikuttaa suoraan akun BCL arvoon vaikuttaviin tekijöihin. Superkondensaattorin tärkein tehtävä HESS:ssä on siis pidentää akun käyttöikää omilla ominaisuuksillaan.<sup>17</sup>

Ominaisuuksia, joilla superkondensaattori voi korottaa akun BCL arvoa, ovat ominaisuuksia, jotka ovat heikkoja akuilla. Akku ei esimerkiksi kykene purkamaan varaustaan kokonaan ilman, että se vahingoittaisi akun kokonaiskapasitanssia. Superkondensaattori sen sijaan kykenee 100 % purkaussyvyyteen ilman vahinkoa superkondensaattorin ominaisuuksiin. Tällöin varauksen purkautuminen voidaan ohjata superkondensaattorin kautta eteenpäin, jolloin suuresta virran purkautumisesta ei aiheudu vahinkoa akulle.<sup>19,20</sup>

Toinen superkondensaattorin eduista on sen kylmän- ja kuumen kestävyys. Superkondensaattori toimii noin  $-40\text{ °C} - 70\text{ °C}$  välissä. Tämä laaja lämpötilaikkuna tekee superkondensaattorista kestäväen monissa erilaisissa ja muuttuvissa olosuhteissa. Superkondensaattoriin vaikuttaa kuitenkin samat ilmiöt kuin akkuihin lämpötilan ääripäissä. Näitä ovat eteenkin elektrodien ja elektrolyytin korroosio kuumassa ja korkea sisäinen resistanssi ja alahainen ioninen johtavuus kylmässä. Laajemman lämpötilaikkunan ansiosta nämä ongelmat ovat kuitenkin vähemmän merkittäviä superkondensaattoreille. Hybridijärjestelmässä superkondensaattori vähentää akkuun kohdistuvaa kulumaa alhaisissa- ja korkeissa lämpötiloissa. Korkeissa lämpötiloissa superkondensaattori voi toimia tasaajana virran kuormitushupuissa, jolloin akkuun kohdistuu pienempi kuormitus ja akun lämpötila pysyy matalampana vähemmän käytön ansiosta. Alhaisissa lämpötiloissa superkondensaattori kykenee ohittamaan akun korkean sisäisen resistanssin, ja toimittamaan suuria määriä virtaa lyhyessä ajassa. Molemmista tapauksissa superkondensaattori pyrkii vähentämään akkuun kohdistuvaa kulumaa akun ollessa erityisen herkkä lämpötilan vaikutuksesta.<sup>18,21-23</sup>

### 3.2 Akku-superkondensaattori HESS:n erilaiset kytkennät

Kaikissa akku-superkondensaattori hybridiennergiajärjestelmissä järjestelmä koostuu akusta ja superkondensaattorista. Akku ja superkondensaattori voidaan kuitenkin kytkeä erilaisilla tavoilla toisiinsa, minkä kautta hybridijärjestelmän avulla voidaan optimoida komponenttien sähkökemiallisia ominaisuuksia ja parantaa systeemin tehokkuutta.<sup>5,6,24</sup> Akku-superkondensaattori HESS voidaan koota kolmella eri tavalla. Nämä ovat passiivinen-, puoliaktiivinen-, ja aktiivinen konfiguraatio.<sup>5,6,8,24</sup>

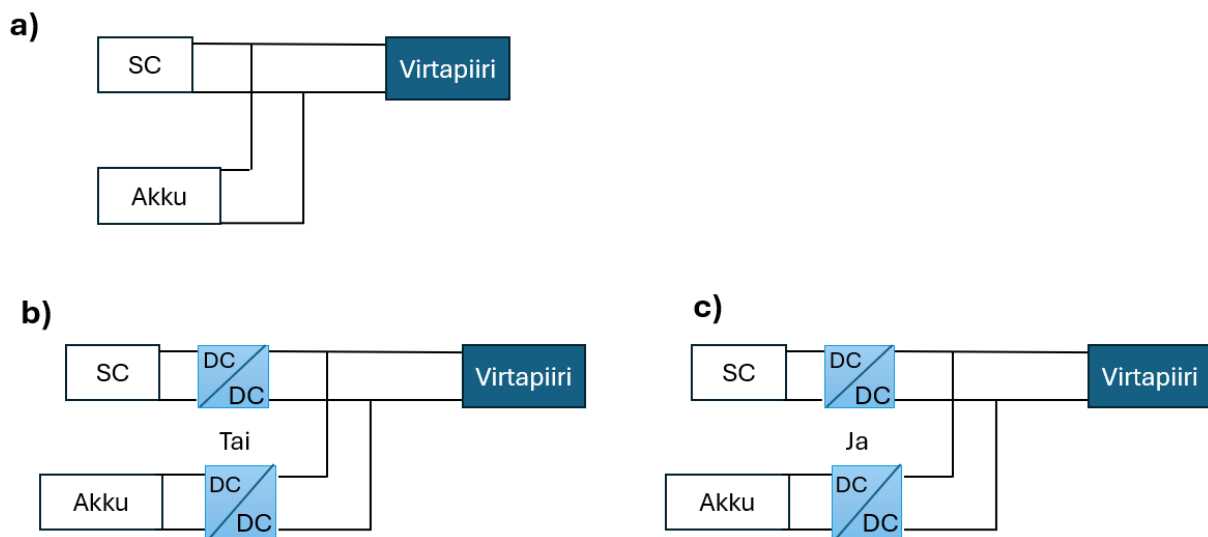
Yksinkertaisin metodi luoda akku-superkondensaattori HESS on passiivinen konfiguraatio.<sup>8</sup> Passiivisessa konfiguraatiossa superkondensaattori ja akku ovat kytkettynä rinnan virtapiiriin.<sup>5,6,8</sup> Järjestelmässä akku toimii ensisijaisena energianvarastona ja superkondensaattori auttaa huipputehojen tasoittamisessa.<sup>6</sup> Passiivisessa konfiguraatiossa akulla ja superkondensaattorilla on myös sama jännite, jolloin hybridijärjestelmän tehonjakosuhde määräytyy kytkennän sisäisen resistanssin mukaan.<sup>5</sup> Passiivinen konfiguraatio on myös halvin kolmesta konfiguraatiosta, sillä kytkentä ei vaadi akun ja superkondensaattorin lisäksi minkäänlaisia jännitteen tai virran muuntimia. Vaikka passiivinen konfiguraatio on kustannustehokas ja yksinkertainen, sillä ei ole minkäänlaisia aktiivisia ohjausmekanismeja, joiden avulla systeemiä voitaisiin optimoida entisestään.<sup>8</sup>

Puoliaktiivisessa konfiguraatiossa superkondensaattorin ja akun lisäksi kytkentään on lisätty yksi kaksisuuntainen DC-DC muunnin.<sup>5,6,8,24</sup> DC-DC muunnin on laite, jonka avulla voidaan muuttaa virtapiirissä kulkevan jännitteen suuruutta.<sup>5</sup> Puoliaktiivisen konfiguraation tarkoituksena on tuoda aktiivista kontrollia akun ja superkondensaattorin läpi kulkevaan virtaan ja jännitteeseen.<sup>8</sup> DC-DC muunnin voidaan kytkeä sarjaan superkondensaattorin kanssa tai sarjaan akun kanssa.<sup>6,8</sup> Jännitetasoa muuntamalla voidaan pienentää akkuun sisään tai ulos virtaavan virran suuruutta ja täten pidentää akun käyttöikä.<sup>5</sup> Sisäistä resistanssia saadaan myös pienennettyä, mikä

pienentää järjestelmän energiahäviötä ja pidentää akun varauksen purkautumisaikaa.<sup>5</sup>

Täysin aktiivisessa konfiguraatiossa superkondensaattoriin ja akkuun on kumpaankin kiinnitetty DC-DC muunnin.<sup>5,6,8,24</sup> Tämä mahdollistaa sen, että superkondensaattorin ja akun sisään- ja ulos virtaavan virran suuruutta voidaan muuttaa itsenäisesti kummallekin komponentille niille optimaalisimmille suuruuksille. Aktiivinen konfiguraatio tuottaa parhaan suorituskyvyn hybridienergiajärjestelmälle kaikista vaihtoehdoista.<sup>8</sup> Aktiivisen konfiguraation heikkouksia on kuitenkin sen hinta, suuri koko ja monimutkaisuus passiiviseen konfiguraatioon verrattuna.<sup>8,24</sup>

Akku-superkondensaattori-HESS:n erilaiset kytkennät ovat esitettynä kuvassa 3.



Kuva 3. Akku-superkondensaattori-HESS:n a) passiivinen kytkentä b) puoliaktiivinen kytkentä c) aktiivinen kytkentä. Kuva on muokattu artikkelista, joka toimii Creative Commons CC-BY-NC-ND license- lisenssin alla ja oikeuttaa artikkelin ei kaupallisen käytön.<sup>8</sup>

### 3.3 Sovelluskohteita

Akku-superkondensaattori HESS:lla on monia erilaisia sovelluksia. Näitä ovat esimerkiksi käyttö sähköajoneuvoissa ja liikenteessä, uusiutuvan energian talteenotossa, elektroniikassa sekä teollisuudessa ja energianhallinnassa. Näistä tarkastellaan tässä tutkielmassa käyttöä uusiutuvan energian tuotannossa sekä sähkö- ja hybridiajoneuvoissa.<sup>1,5-8,25,26</sup>

Lähes kaikissa sovelluksissa superkondensaattori toimii ”puskurina” akkuun kohdistuvalle kuormitukselle ja auttaa akkua toimimaan tehokkaammin käyttämällä superkondensaattorin sähkökemiallisia ominaisuuksia. Hybridijärjestelmässä akku toimii pääosassa energian varastoinnissa ja antaa tasaista virtaa virtapiiriin. Superkondensaattori tasaa suuria virtapiikkejä ja lähettää suuria purkauksia energiaa eteenpäin tarvittaessa. Superkondensaattori saavuttaa nämä ominaisuudet käyttämällä kaksoiskerroskapasitanssia tai pseudokapasitanssia. Tällä tavoin superkondensaattori kykenee parantamaan akun tehokkuutta suojaen samalla akkua liialliselta kulumalta. Luotu systeemi on joustava ja sopeutumiskykyinen moniin erilaisiin tarkoituksiin.<sup>4-6,26</sup>

#### 3.3.1 Uusiutuva energia

Uusiutuvia energianlähteitä on tutkittu ja kehitetty laajasti korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Uusiutuvien energianlähteiden sähköntuotannossa on vielä kuitenkin useita haasteita, jotka tulisi ratkaista, jotta uusiutuvan energian saisi integroitua tehokkaasti sähköverkkoon. Yksi merkittävä haaste on monien uusiutuvien energialähteiden vaihteleva luonne. Varsinkin tuuli- ja aurinkovoiman vaihteleva energiantuotanto sään ja päivänajan mukaan on merkittävä haaste uusiutuvan energian tuotossa. Tuulen voimakkuus voi vaihdella hyvin paljon lyhyessä ajassa, mikä puolestaan tekee energian talteenotosta epäsäännöllistä ja tehotonta. Myös auringon valon voimakkuus vaihtelee sään mukaan, josta seuraa samankaltaisia

ongelmia. Vaihtelevat olosuhteet voivat myös kuluttaa akkua nopeasti. Akku-superkondensaattori HESS on toimiva ratkaisu vähentämään näitä ongelmia.<sup>1,5-7</sup>

Kuten aiemmin mainittiin superkondensaattorin tehtävä HESS:ssä on tukea akkua sekä tasata jännite- ja virtapiikkejä, kun akku toimii ensisijaisesti energianvarastona. Akku ei kykene ottamaan tehokkaasti vastaan suuri virtapiikkejä en hitaampien lataus- ja purkausnopeuksien takia. Näitä virtapiikkejä voi esiintyä esimerkiksi kovan tuulen puuskan aikana tai kovan auringonpaisteen aikana. Tällöin iso osa mahdollisesta talteen otettavasta energiasta menee hukkaan. Superkondensaattori kykenee vastaan ottamaan ja tasaamaan virtapiikin omilla erittäin nopeilla lataus- ja purkautumisnopeuksien avulla ja HESS voi täten kerätä energiaa tehokkaammin. Tämä suuri energian talteenotto voi kuitenkin johtaa systeemin ylilatautumiseen, joka vahingoittaa HESS:n komponentteja. Ylilatautumisen välttämiseksi on valittava oikea suhde akku ja superkondensaattori komponentteja, jotta energian keräys on tehokasta mutta turvallista HESS:n komponenteille. HESS on erityisen hyödyllinen uusiutuvan energian talteenotossa alueilla, joissa sääolosuhteet ja sähköverkko ovat erityisen epävakaita. Paremman kestävyuden ja pidemmän käyttöiän ansiosta akku-superkondensaattori HESS voidaan asentaa tällaisille alueille ilman, että HESS:ä tulee huoltaa usein. Usein kyseessä on myös HESS:n passiivinen konfiguraatio, jolloin yhden komponentin hajoaminen ei aiheuta katkoa sähköverkossa rinnankytkennän ansiosta.<sup>1,4-7</sup>

### 3.3.2 Sähkö- ja hybridiajoneuvot

Toinen merkittävä akku-superkondensaattori HESS:n sovelluskohde löytyy sähkö- ja hybridiajoneuvoista. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen kehitys ja tuotanto on kasvanut eksponentiaalisesti lyhyessä ajassa. Näiden ajoneuvojen yksi pääperiaatteista on luoda ajoneuvo, joka ei kuormita ilmastoa ajamisesta syntyvillä kasvihuonekaasuilla. Sähköauton ja eteenkin sähköauton akun valmistus kuormittaa kuitenkin ilmastoa ja ympäristöä erittäin paljon. Tämän takia

valmistettavat autot tulisivat toimia tehokkaasti ja pitkäaikaisesti, jotta uusia akkuja ja autoja ei tarvitse valmistaa usein. Akun käyttöikä ja tehokkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä superkondensaattoreita hybridienergiajärjestelmällä.<sup>8,26,27</sup>

Sähkö- ja hybridiautojen kehittyessä on huomattu, että auton pääenergianlähteenä toimiva akku kuluu nopeasti käytön aikana. Varsinkin jatkuvat pysähdykset ja kiihdytykset kuluttavat akun materiaaleja nopeasti. Akku ei pysy tahdissa auton vaatimien nopeiden suoritusvaatimusten kanssa. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi on hyödynnetty superkondensaattoreita auton energiajärjestelmässä. Superkondensaattori antaa nopeasti virtaa autolle, kun auto käynnistyy tai kiihdyttää. Lisäksi superkondensaattoreita on hyödynnetty ”regeneroivassa jarrutuksessa”, jossa auton jarrutuksesta syntyvä lämpöenergia on ohjattu superkondensaattorin kautta takaisin auton virtapiiriin. Tällä menetelmällä on saatu vähennettyä auton energiahävikkiä ja lisätty tehokkuutta. Superkondensaattorit myös auttavat autoa toimimaan paremmin, kun lämpötila on epäsuotuisa akulle. Esimerkiksi auton käynnistys kylmässä voi olla vaikeaa akulle suuren sisäisen resistanssin ja huonon ionisen johtavuuden takia. Tällöin käynnistyksessä vaadittu energia saadaan ohjattua superkondensaattorin kautta ilman, että akkuun kohdistuu kulutusta.<sup>8,18,24–27</sup>

Sähkö- ja hybridiajoneuvojen HESS:n tehokkuutta voidaan parantaa käyttämällä aktiivisia ohjausmekanismeja. HESS:sä voidaan käyttää kaikkia kolmea erilaista kytkentää. Koska tavoitteena on kuitenkin luoda mahdollisimman tehokas järjestelmä, usein suositaan aktiivista ja puoliaktiivista konfiguraatiota, kun HESS kootaan. Jos tarvitaan maksimaalinen tehokkuus, käytetään aktiivista konfiguraatiota. Aktiivinen konfiguraatio on kuitenkin huomattavasti kalliimpi vaihtoehto puoliaktiiviseen verrattuna. Tämän takia yleisin konfiguraatio sähkö- ja hybridiajoneuvojen HESS:ä on puoliaktiivinen konfiguraatio.<sup>25</sup>

## 4 Yhteenveto

Superkondensaattorit ovat toimiva tapa parantaa energian varastointia ja energian tehokasta kulutusta. Superkondensaattorien monipuolinen valikoima antaa joustavuutta monille erilaisille sovelluksille. Lisäksi uusien ja tehokkaampien elektrodimateriaalien kehitys tulee parantamaan superkondensaattorien ja superkondensaattorien hybridijärjestelmien tehokkuutta.

Hybridienergiajärjestelmät ovat avainasemassa tehokkaan energianvarastoinnin- ja kulutuksen kehityksessä. HESS:en kuten akku-superkondensaattori HESS:n avulla voidaan ylittää yksittäisen ESS:n ominaisuudet ja parantaa järjestelmän tehokkuutta ja käyttöikää huomattavasti. HESS:n keskeisimpiä etuja näiden lisäksi on niiden joustavuus, muokattavuus, kestävyys ja kustannustehokkuus. Erilaisilla HESS:n konfiguraatioilla ja niiden tuomilla aktiivisilla ohjausmekanismeilla voidaan korottaa HESS:n komponenttien sähkökemiallisia ominaisuuksia entisestään.

Akku-superkondensaattori-HESS:lla on monia sovelluksia. Kestävän kehityksen kannalta HESS:n tuoma energiatehokkuus on keskeinen hyöty, jota tulisi hyödyntää. Akku-superkondensaattori-HESS on tärkeä osa uusiutuvan energian tuotannossa. HESS:n avulla voidaan tasoittaa ja hyödyntää tuuli- ja aurinkovoiman vaihtelevat virtapiikit ja siirtää tämä energia käyttöön. HESS:n avulla voidaan myös luoda luotettava ja kestävä sähköverkko epävakaille alueille. Nykyisten järjestelmien päivittäminen hybridijärjestelmiin on kuitenkin iso ja kallis työ, minkä takia laajaan käyttöönottoon voi kulua aikaa.

Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa HESS:n avulla voidaan minimoida auton akkuun kohdistuvaa kulumaa ja pidentää akun käyttöikä. Tämän avulla voidaan vähentää akkujen valmistuksessa syntyviä päästöjä. HESS tuo myös tehokkuutta ja kestävyttä ajoneuvon järjestelmiin.

HESS:n ominaisuudet perustuvat akku- ja superkondensaattorikomponenteissa käytettyihin materiaaleihin. Monet materiaaleista käyttävät vielä kuitenkin harvinaisia tai haitallisia alkuaineita, joiden takia uusia materiaaleja tulisi kehittää. HESS:n

avulla voidaan myös pidentää esimerkiksi litiumin käyttöikää akuissa, jonka ansiosta uusia litiumakkuja ei tarvitse valmistaa yhtä usein, mikä puolestaan auttaa ylläpitämään maapallon litiumvarastoja. Tulevaisuudessa kehittyneemmät materiaalit lisäävät sekä tehokkuutta että ympäristöystävällisyyttä ja kestävyyttä hybridijärjestelmässä.

## 5 Viitteet

- (1) Zhang, J.; Gu, M.; Chen, X. Supercapacitors for Renewable Energy Applications: A Review. *Micro and Nano Engineering* 2023, 21, 100229. <https://doi.org/10.1016/J.MNE.2023.100229>.
- (2) Sharma, S.; Chand, P. Supercapacitor and Electrochemical Techniques: A Brief Review. *Results Chem* 2023, 5, 100885. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2023.100885>.
- (3) Alam, S.; Fizza Fiaz, M. I. K.; Iqbal, M. Z.; Alam, F.; Ahmad, Z.; Hegazy, H. H. Advancements in Asymmetric Supercapacitors: Material Selection, Mechanisms, and Breakthroughs with Metallic Oxides, Sulfides, and Phosphates. *J Energy Storage* 2023, 72, 108208. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108208>.
- (4) Gao, D.; Luo, Z.; Liu, C.; Fan, S. A Survey of Hybrid Energy Devices Based on Supercapacitors. *Green Energy & Environment* 2023, 8 (4), 972–988. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2022.02.002>.
- (5) Moloelang, K. M.; Le Roux, P. F.; Abe, B. T.; Nnachi, A. F.; Ratau, T. P. Modeling and Analysis of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System (HESS) for Renewable Energy Applications. In *2023 6th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, REPE 2023*; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023; pp 293–299. <https://doi.org/10.1109/REPE59476.2023.10511902>.
- (6) Ma, T.; Yang, H.; Lu, L. Development of Hybrid Battery–Supercapacitor Energy Storage for Remote Area Renewable Energy Systems. *Appl Energy* 2015, 153, 56–62. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.12.008>.
- (7) Dissanayake, K.; Kularatna-Abeywardana, D. A Review of Supercapacitors: Materials, Technology, Challenges, and Renewable Energy Applications. *J Energy Storage* 2024, 96, 112563. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.112563>.
- (8) Gopi, C. V. M.; Ramesh, R. Review of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles. *Results in Engineering* 2024, 24, 103598. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103598>.
- (9) Zhang, Z. *Comparative Study of Supercapacitor, Battery and Supercapattery*; 2023; Vol. 2022.
- (10) Kötz, R.; Carlen, M. Principles and Applications of Electrochemical Capacitors. *Electrochim Acta* 2000, 45 (15–16), 2483–2498. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00354-6).
- (11) *Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1542, akuista ja paristoista ja jäteakuista ja -paristoista*; 2023.
- (12) Miao, L.; Song, Z.; Zhu, D.; Li, L.; Gan, L.; Liu, M. Recent Advances in Carbon-Based Supercapacitors. *Mater Adv* 2020, 1 (5), 945–966. <https://doi.org/10.1039/D0MA00384K>.
- (13) Zhao, Y.; Hao, H.; Song, T.; Wang, X.; Li, C.; Li, W. MnO<sub>2</sub>-Graphene Based Composites for Supercapacitors: Synthesis, Performance and Prospects. *J Alloys Compd* 2022, 914, 165343. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2022.165343>.

- (14) Bhat, T. S.; Patil, P. S.; Rakhi, R. B. Recent Trends in Electrolytes for Supercapacitors. *J Energy Storage* 2022, *50*, 104222. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104222>.
- (15) Alipoori, S.; Mazinani, S.; Aboutalebi, S. H.; Sharif, F. Review of PVA-Based Gel Polymer Electrolytes in Flexible Solid-State Supercapacitors: Opportunities and Challenges. *J Energy Storage* 2020, *27*, 101072. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.101072>.
- (16) Wieczorek, M.; Lewandowski, M.; Jefimowski, W. Cost Comparison of Different Configurations of a Hybrid Energy Storage System with Battery-Only and Supercapacitor-Only Storage in an Electric City Bus. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 2019, *67* (6), 1095–1106. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2019.131567>.
- (17) Powade, R.; Bhatashvar, Y. Design of Semi-Actively Controlled Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System. *Mater Today Proc* 2023, *72*, 1503–1509. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.09.378>.
- (18) Bhatt, J. M. Effect of Temperature on Battery Life and Performance in Electric Vehicle. *IJSR-INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH*. IJSR-INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH 2013. <http://www.battcon.com/PapersFinal2003/McCluer->.
- (19) Yüksek, G.; Alkaya, A. *Effect of the Depth of Discharge and C-Rate on Battery Degradation and Cycle Life*.
- (20) Ramesh, P.; Prakash, R.; Dept, E. *Improvement of Battery Lifetime Using Supercapacitors and Current Controller*; 2014. [www.ijert.org](http://www.ijert.org).
- (21) Zhou, W.; Liu, Z.; Chen, W.; Sun, X.; Luo, M.; Zhang, X.; Li, C.; An, Y.; Song, S.; Wang, K.; Zhang, X. A Review on Thermal Behaviors and Thermal Management Systems for Supercapacitors. *Batteries*. MDPI February 1, 2023. <https://doi.org/10.3390/batteries9020128>.
- (22) Köps, L.; Kreth, F. A.; Klein, M.; Balducci, A. An In-Depth Investigation into the Influence of Temperature on the Electrochemical Behavior of Electric Double-Layer Capacitors Containing Ethyl Isopropyl Sulfone-Based Electrolytes. *J Power Sources* 2023, *581*, 233480. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2023.233480>.
- (23) Kötz, R.; Hahn, M.; Gally, R. Temperature Behavior and Impedance Fundamentals of Supercapacitors. *J Power Sources* 2006, *154* (2), 550–555. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.10.048>.
- (24) Barcellona, S.; Piegari, L.; Villa, A. Passive Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles at Very Low Temperatures. *J Energy Storage* 2019, *25*, 100833. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.100833>.
- (25) Lemian, D.; Bode, F. Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*. MDPI August 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15155683>.
- (26) Krishna, N. G.; Sreelekshmi, R. S.; Nair, M. G. Comprehensive Review on the Developments in Battery/Supercapacitor-Based Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. In

*Lecture Notes in Electrical Engineering*; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023; Vol. 1022 LNEE, pp 341–361. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-0915-5\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-99-0915-5_24).

- (27) Hung, Y. H.; Wu, C. H. An Integrated Optimization Approach for a Hybrid Energy System in Electric Vehicles. *Appl Energy* 2012, 98, 479–490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.012>.