



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SUPERKONDENSAATTORIT

Valto Hulttinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

HULTTINEN VALTO:
Superkondensaattorit

Opinnäytetyö 30 sivua
Toukokuu 2019

Opinnäytetyössä käsiteltiin superkondensaattoreita, koska ne yleistyvät energian varastoinnissa. Opinnäytetyön tarkoituksena ja tavoitteena oli antaa lukijalle kattava käsitys superkondensaattoreista kertomalla niiden toimintaperiaatteesta, tyypeistä, käyttökohteista ja tulevaisuudennäkymistä. Superkondensaattoreita myös vertailtiin muihin energian varastointimenetelmiin. Tutkimusmenetelmänä oli aihetta käsitteleviin lähteisiin perehtyminen ja asiantuntijan kanssa kommunikoiminen.

Saatiin tietää, että superkondensaattorit jaetaan energian varastointitavan mukaan kolmeen tyyppiin: kaksikerroksisiin kondensaattoreihin, pseudokondensaattoreihin ja edellisten ominaisuuksia yhdistäviin hybridikondensaattoreihin. Opinnäytetyön tuloksena selvisi, että mikään superkondensaattorityyppi ei ole korvaamassa akkuja lähitulevaisuudessa, vaikka ne kaikki ovatkin edistysaskelia kondensaattoriin nähden. Selville saatiin myös, että superkondensaattoreita käytetään sähkön laadun hallinnassa ja sääriippuvien energiantuotantomuotojen tuotantotehon vaihteluiden tasaamisessa. Osoittautui, että superkondensaattorit edistävät sähköajoneuvojen yleistymistä mahdollistamalla korkean lataustehon akkujen rinnalla käytettynä paikallisessa energiavarastossa. On useita vaihtoehtoisia energian varastointimuotoja, kuten akku, energian varastointi vetyyn tai lämmöksi, pumppuvoimalaitos, paineilmaparasto, vauhtipyörä ja suprajohtava magneettinen energiavarasto.

Pääteltiin, että energian varastointimuotona superkondensaattori soveltuu parhaiten käytettäväksi, kun energiavarastolta edellytetään suurta tehoa, mutta pieni energia riittää. Vertailu muihin energian varastointimuotoihin antaa käsityksen, että superkondensaattorin yleistymistä hidastaa suhteellisen alhainen energiatiheys. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että superkondensaattorien energiatiheiden parantaminen lisää niiden käyttömahdollisuuksia.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical engineering
Power engineering

HULTTINEN VALTO:
Supercapacitors

Bachelor's thesis 30 pages
May 2019

The purpose of this thesis was to further the reader's understanding of supercapacitors. The theory of operation, different types, uses and prospects of supercapacitors were elaborated on. Supercapacitors were also compared with other energy storage methods. The research methods used were to delve into the source material on the subject matter and to communicate with an expert.

There are three supercapacitor types based on energy storage principle: double-layer capacitors, pseudocapacitors and hybrid capacitors, which combine the properties of the first two types. Supercapacitors are not about to replace rechargeable batteries in the near future, although they represent considerable progress from the capacitor. Supercapacitors are used in power quality management and to even out variations in the power output of weather dependent forms of power production. Supercapacitors facilitate the commercial success of electric vehicles by enabling higher charge power when used in parallel with rechargeable batteries in a local energy storage.

The best applications for a supercapacitor have a high power demand accompanied by a low energy need. Comparison with other forms of energy storage implies that the relatively low energy density of supercapacitors hinders their commercial success. In conclusion, improving the energy density of supercapacitors will increase their application potential.

Key words: supercapacitors, energy supply, electricity supply

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	KONDENSAATTORI	7
2.1	Kondensaattorin toimintaperiaate	7
2.2	Kondensaattorin ominaisuuksia.....	8
3	SUPERKONDENSAATTORITYYPIT.....	10
3.1	Superkondensaattorien luokittelu	10
3.2	Kaksikerroksiset kondensaattorit.....	11
3.3	Pseudokondensaattorit	13
3.4	Hybridikondensaattorit	14
3.5	Yhteenveto superkondensaattoreista.....	16
4	SUPERKONDENSAATTORIT KÄYTÄNNÖSSÄ	18
4.1	Energiavarastojen tarve.....	18
4.2	Superkondensaattorin sovelluksia.....	18
4.3	Vertailu vetyyn ja polttokennoihin	19
4.4	Vertailu pumppuvoimalaitokseen	21
4.5	Vertailu sähköenergian varastointiin lämmöksi.....	23
4.6	Vertailu muihin energian varastointiratkaisuihin.....	25
5	POHDINTA.....	29
	LÄHTEET.....	30

ERITYISSANASTO

A	levyjen kohdakkain oleva pinta-ala, m^2
C	kondensaattorin kapasitanssi, F
d	levyjen välinen etäisyys, m
i_c	virta, A
t	aika, s
u_c	jännite, V
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys, $8,854187 \cdot 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	eristeen suhteellinen permittiivisyys, yksikötön suhdeluku

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään superkondensaattoreita kondensaattorin toimintaperiaatteesta alkaen. Tekstin tavoitteena on antaa lukijalleen kattava käsitys superkondensattoreista aina niiden toiminnasta, tyypeistä ja käyttökohteista tulevaisuudennäkymiin asti. Superkondensaattoria verrataan muihin suuren kokoluokan energian varastoinnin teknologioihin.

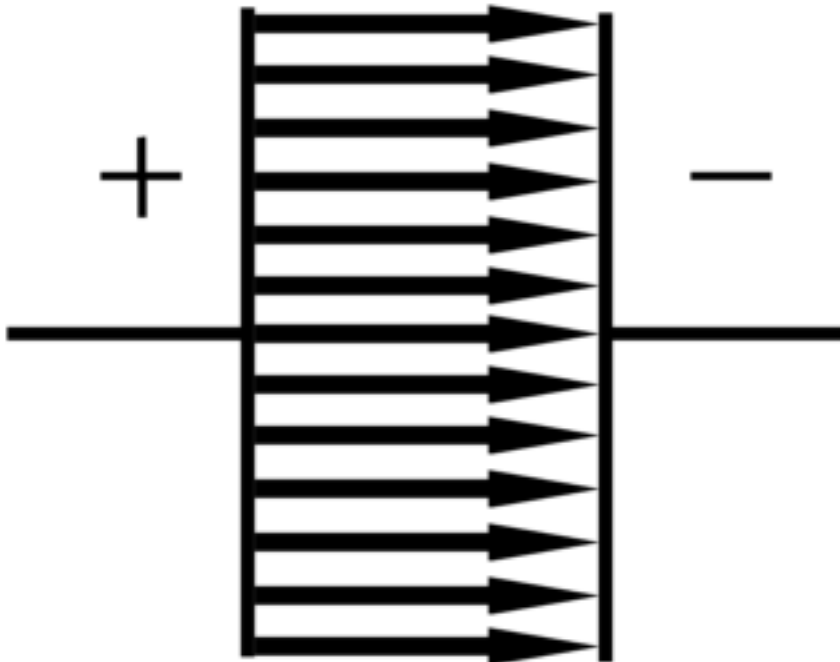
On olemassa kaksikerroksisia kondensaattoreita, pseudokondensaattoreita ja hybridikondensaattoreita. Hybridikondensaattorit yhdistävät kahden muun kondensaattorityypin teknisiä ominaisuuksia hyödyntääkseen niiden parhaita puolia, kuten suurempaa energia- ja tehotiheyttä, ja välttääkseen niiden huonoja puolia, kuten kalleutta ja lataamis- ja purkamisjaksoista johtuvaa ominaisuuksien heikkenemistä.

Suuren kokoluokan energian varastointiin on olemassa ja kehitteillä superkondensaattorien lisäksi useita erilaisia teknologioita. Akut ovat yleisessä käytössä oleva teknologia. Yhdessä superkondensaattorien kanssa akut muodostavat hybridienergiavaraston, josta saadaan suurempi teho halvemmalla kuin pelkistä akuista, joiden käyttöikää yhdistelmä pidentää. Vetyyn ja polttokennoihin pohjautuva energiatalous voi olla tulevaisuuden yhteiskunnalle kustannustehokas. Pumppuvoimalaitos on energian varastointiteknologian teknis-taloudellisen kehityksen huippua vuonna 2019. Energiaa voi varastoida myös lämmöksi, ja tämä vähentää sähkölämmitykseen käytettävän ostosähkön määrää. Paineilma-varastoissa energiaa säilötään paineistettuun ilmaan maanalaisiin luoliin, vauhtipyörässä pyörivän kappaleen liike-energiaksi ja suprajohtavassa magneettisessa energiavarastossa suprajohtavan käämin magneettikenttään.

2 KONDENSAATTORI

2.1 Kondensaattorin toimintaperiaate

Hassin, Hatakan, Saarikon ja Valjakan (1998, 66) mukaan kondensaattori on sähköenergiaa varastoiva passiivikomponentti. Se muodostuu kahdesta kohdakkain olevasta johtavasta levystä, jotka on eristetty toisistaan. Näitä levyjä kutsutaan myös elektrodeiksi. Kun kondensaattorin napojen välille luodaan jännite, elektrodit saavat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset varaukset. Yhdellä puolella olevat varauksenkuljettajat vetävät puoleensa toisella puolella olevia vastakkaismerkkisiä varauksenkuljettajia ja hylkivät samanmerkkisiä. Tällöin levyjen välille muodostuu sähkökenttä, johon energia varastoituu. (Hassi, Hatakka, Saarikko & Valjakka 1998, 66.) Kuviossa 1 on esitetty kondensaattorin kohdakkain olevat elektrodit, joilla on vastakkaismerkkiset varaukset, ja niiden välinen sähkökenttä, jota nuolet kuvaavat.



KUVIO 1. Kondensaattori

On aiheellista korostaa, että kondensaattorissa sähköenergia varastoituu sähköenergiana, ja näin ollen muunnosta energiamuodosta toiseen ei tarvita energiaa varastoitaessa tai va-

rastosta otettaessa. Tämä eroaa esimerkiksi akusta, jossa energia varastoidaan kemiallisessa muodossa, ja pumppuvoimalaitoksesta, jossa energia varastoidaan veden potentiaalienergiana.

2.2 Kondensaattorin ominaisuuksia

Pöyhösen (1975, 24) mukaan levykondensaattorin kapasitanssi saadaan kaavalla 1.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

Kaavassa 1 C on levykondensaattorin kapasitanssi (F). ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, $8,854187 \cdot 10^{-12}$ F/m (NIST n.d.). ϵ_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys, joka on yksikötön suhdeluku, A on levyjen kohdakkain oleva pinta-ala (m^2), ja d on levyjen välinen etäisyys (m).

Pöyhösen (1975) mukaan eriste estää tasavirtaa kulkemasta kondensaattorin läpi. Kun kondensaattori kytketään muuttuvaan jännitteeseen, levyjen varaus muuttuu. Tällöin kondensaattori latautuu tai purkautuu, ja virta alkaa kulkea jännitelähteestä levyihin tai levyistä jännitelähteeseen. Virran suuruus noudattaa kondensaattorin yleistä virta-jännite-yhtälöä, joka on esitetty kaavassa 2. (Pöyhönen 1975, 24.)

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

Kaavassa 2 i_c on virta (A), C on kondensaattorin kapasitanssi (F), u_c on jännite (V) ja t on aika (s).

Kaava 2 tarkoittaa, että kondensaattorin virta on yhtä suuri kuin kondensaattorin kapasitanssin ja jännitteen ensimmäisen aikaderivaatan tulo. Toisin sanoen, kondensaattorin virta on suoraan verrannollinen sen kapasitanssiin ja sen yli olevan jännitteen muutokseen ajan suhteen. Kondensaattorin virta riippuu sen kapasitanssista ja sen yli olevan jännitteen muutosnopeudesta.

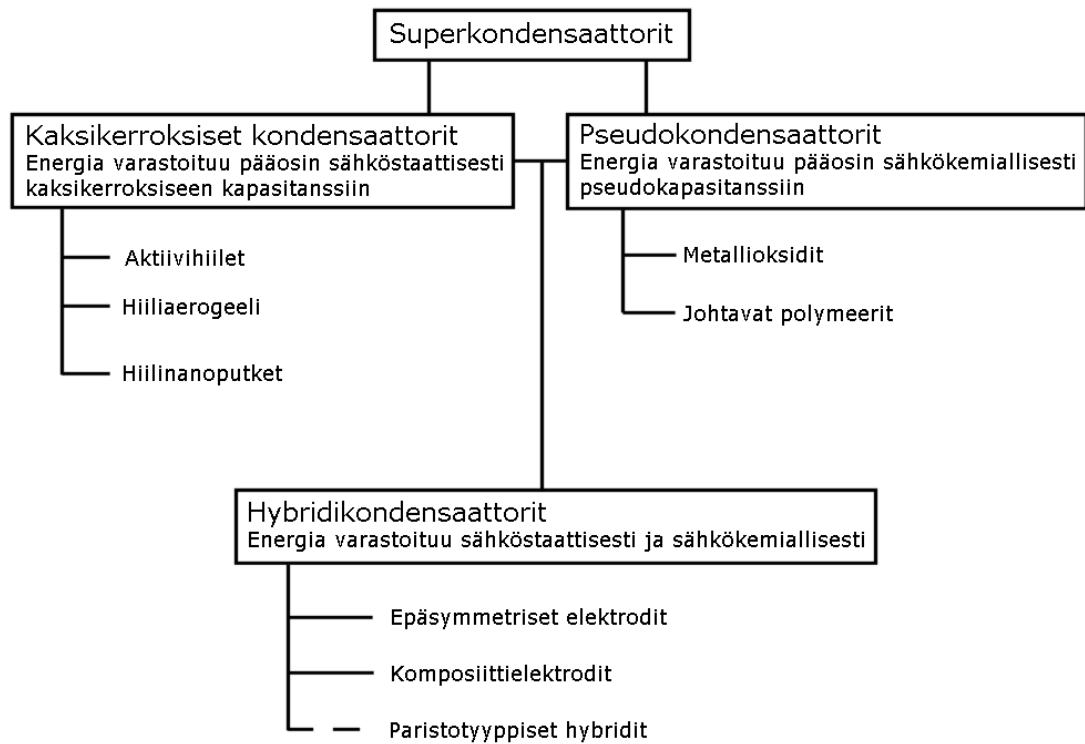
Ehjän kondensaattorin eristeestä ei kulje läpi tasa- eikä vaihtovirtaa. Kuten kaavasta 2 nähdään, jos kondensaattorin virta on nolosta poikkeava, on kondensaattorin jännitteen muututtava ajan suhteen, kun kapasitanssi pysyy vakiona. Korpela (2018a) selventää, että kun kondensaattoriin varastoituu lisää sähköenergiaa, jännite kasvaa, ja kun kondensaattorista purkautuu sähköenergiaa, jännite pienenee. Kun vaihtovirran tapauksessa yhdelle kondensaattorin levyille saapuu tietty määrä varauksenkuljettajia jonkin ajan kuluessa, toiselta lähtee sama määrä varauksenkuljettajia samassa ajassa. Tämä luo illusion kondensaattorin läpi kulkevasta virrasta. Vaikka vaihtovirtaa käsiteltäessä käytetään ilmaisua ”kondensaattorin läpi kulkeva virta”, varauksenkuljettajat eivät läpäise eristettä. (Korpela 2018a.)

3 SUPERKONDENSAATTORITYYPIT

3.1 Superkondensaattorien luokittelu

Superkondensaattorit voidaan luokitella kolmeen eri tyyppiin energian varastointitavan perusteella. On olemassa kaksikerroksisia kondensaattoreita, pseudokondensaattoreita ja hybridikondensaattoreita. Kaksikerroksisissa kondensaattoreissa energia varastoituu pääosin sähköstaattisesti kaksikerroksiseen kapasitanssiin. Pseudokondensaattoreissa energia varastoituu pääosin sähkökemiallisesti pseudokapasitanssiin. Hybridikondensaattoreissa energia varastoituu sekä sähköstaattisesti että sähkökemiallisesti. (Halper & Ellenbogen 2006, 6.) Superkondensaattorityyppiä yhdistää huokoisesta rakenteesta johtuva korkea elektrodien pinta-ala ja ohuesta elektrolyyttikerroksesta johtuva pieni elektrodien välinen etäisyys (Halper & Ellenbogen 2006, 1; Korpela 2018b, 22–23). Kaavasta 1 voidaan päätellä, että nämä ominaisuudet johtavat korkeaan kapasitanssiin.

Kuviossa 2 on esitetty, miten superkondensaattoreita on luokiteltu teknisen toteutustavan mukaan. Halperin ja Ellenbogenin (2006) mukaan kaksikerroksisten kondensaattorien elektrodeissa on käytetty aktiivihiiltä, hiiliaerogeeliä ja hiilinanoputkia. Pseudokondensaattorien elektrodeissa on käytetty erilaisia metallioksideoita ja johtavia polymeerejä. Hybridikondensaattoreita on toteutettu epäsymmetrisillä elektrodeilla ja komposiittielektrodeilla, ja lisäksi on olemassa paristotyyppisiä hybridejä. (Halper & Ellenbogen 2006, 10–17.)

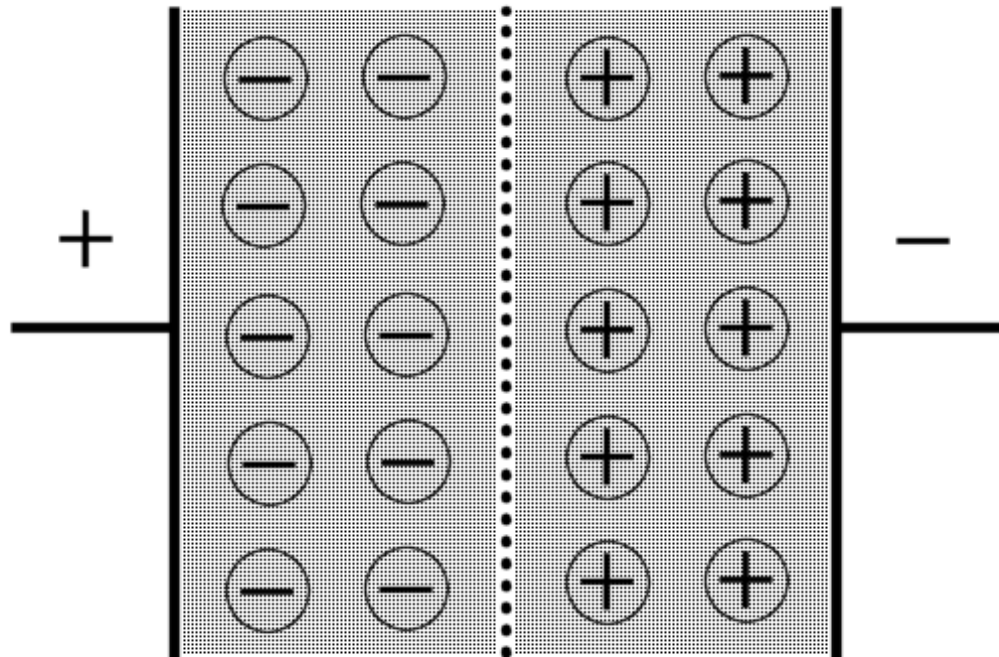


KUVIO 2. Superkondensaattorien luokittelu

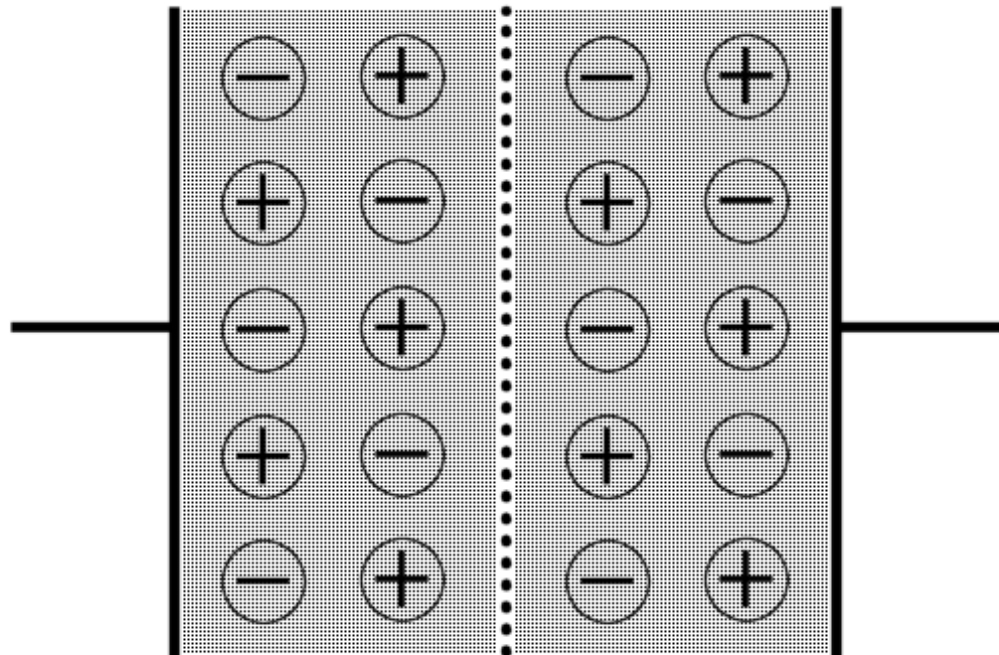
3.2 Kaksikerroksiset kondensaattorit

Kaksikerroksisissa kondensaattoreissa on kaksi elektrolyytillä päällystettyä hiilipohjaista elektrodiä, joiden välissä on kalvo, jonka läpi elektrolyytin ionit pääsevät diffundoitumaan. Varaus varastoituu sähköstaattisesti, kuten tavallisissa kondensaattoreissa, eivätkä varaukset liiku elektrodin ja elektrolyytin välillä. Kun jännite kytketään, varaukset kertyvät elektrodien pinnoille. Elektrolyytin ionit diffundoituvat kalvon läpi vastakkaismerkkisesti varautuneen elektrodin huokosiin. Näin kummankin elektrodin pinnalle muodostuu kaksi varauskerrosta. (Halper & Ellenbogen 2006, 9.) Kuviossa 3 on esitetty kaksikerroksinen kondensaattori varautuneena, ja kuviossa 4 on esitetty kaksikerroksinen kondensaattori ilman varausta. Harmaa alue on huokoisen elektrodin elektrolyytin päällystämä pinta. Pisteviiva on kalvo, joka erottaa elektrodit toisistaan. Kuviossa 3, kaksikerroksisen kondensaattorin ollessa varautuneena, elektrolyytin ionit ovat diffundoituneet kalvon läpi. Positiivisesti varautuneen elektrodin pinnalla on negatiivisesti varautuneita ioneja, ja negatiivisesti varautuneen elektrodin pinnalla on positiivisesti varautuneita ioneja. Kuviossa 4, kun kaksikerroksinen kondensaattori on ilman varausta, elektrodeilla ei

ole varausta, joka vetäisi vastakkaismerkkisesti varautuneita ioneja puoleensa, joten ionit ovat asettuneet elektrolyyttiin satunnaisesti.



KUVIO 3. Kaksikerroksinen kondensaattori varautuneena



KUVIO 4. Kaksikerroksinen kondensaattori ilman varausta

Kaksikerroksisessa kondensaattorissa ei tapahdu rakenteellisia eikä kemiallisia muutoksia, koska varaukset eivät siirry elektrodin ja elektrolyytin välillä. Tästä johtuen kaksikerroksisen kondensaattorin ominaisuudet eivät juurikaan muutu käytössä, vaan pysyvät vakaina jopa miljoona varaamis- ja purkamisjaksoa. Vakautensa vuoksi kaksikerroksiset kondensaattorit sopivat hyvin käytettäväksi paikoissa, joihin on vaikea päästä. (Halper & Ellenbogen 2006, 9.)

Aktiivihiili on yleisin kaksikerroksisen kondensaattorin elektrodimateriaali, koska se on halvempaa kuin muut hiilipohjaiset materiaalit, ja koska aktiivihiilellä on suurempi pinta-ala. Aktiivihiilen huokoinen rakenne muodostuu mikro-, meso- ja makrohuokosista. Mikrohuokosten halkaisija on alle 2 nm, meso- ja makrohuokosten 2–50 nm ja makrohuokosten yli 50 nm. Empiirisissä tutkimuksissa suuremmat kaksikerroksisen kondensaattorin aktiivihiilielektrodin huokoskoot korreloivat korkeamman tehosiheyden kanssa, ja pienemmät huokoskoot korreloivat korkeamman energiatiheyden kanssa. Hiiliaerogeelit muodostuvat johtavien hiilinanohiukkasten verkosta, jossa on joukossa meso- ja makrohuokosia. Hiiliaerogeelielektrodeilla on matalampi ekvivalenttinen sarjaresistanssi kuin aktiivihiilielektrodeilla. Hiilinanoputket puolestaan muodostavat kudoksen, jossa on avoin meso- ja makrohuokosten verkosto. Hiilinanoputkielektrodin kapasitanssi on verrattavissa aktiivihiilielektrodin kapasitanssiin. Vaikka hiilinanoputkielektrodin pinta-ala on pienempi kuin aktiivihiilielektrodilla, sen avoin rakenne mahdollistaa pinta-alan tehokkaamman hyödyntämisen. Elektrolyytti-ionit diffundoituvat helpommin hiilinanoputkielektrodin meso- ja makrohuokosten verkostoon, joten sillä on matalampi ekvivalenttinen sarjaresistanssi kuin aktiivihiilielektrodilla. Hiilinanoputkien kudokset mahdollistavat muihin hiilipohjaisiin elektrodimateriaaleihin verrattavan energiatiheyden. Matalampi ekvivalenttinen sarjaresistanssi taas mahdollistaa korkeamman tehosiheyden. (Halper & Ellenbogen 2006, 10–12.)

3.3 Pseudokondensaattorit

Toisin kuin kaksikerroksiset kondensaattorit, pseudokondensaattorit varastoivat varauksen sähkökemiallisesti, eli niissä siis tapahtuu kemiallisia reaktioita. Pseudokondensaattorit saavuttavat suurempia kapasitansseja ja energiatiheyksiä kuin kaksikerroksiset kondensaattorit. Pseudokondensaattoreissa varaus siirtyy elektrodin ja elektrolyytin välillä. Varaus voi siirtyä hapetus-pelkistysreaktiossa, elektrosorptiossa ja interkalaatiossa. (Halper & Ellenbogen 2006, 14.) Elektrosorptio on elektrodin pinnalla tapahtuvaa adsorptiota.

Interkalaatiossa ioni päättyy elektrodin atomikerrosten väliin muodostamatta kovalenttista sidosta.

Pseudokondensaattoreissa on varauksen varastointiin käytetty elektrodimateriaaleina johtavia polymeerejä ja metallioksiedeja. Verrattuna hiilipohjaisiin elektrodimateriaaleihin, johtavilla polymeereillä on korkeampi kapasitanssi ja parempi johtavuus, halpa hinta ja alhaisempi ekvivalenttinen sarjaresistanssi. Hapetus-pelkistysreaktioiden aiheuttama mekaaninen rasitus kuitenkin heikentää johtavilla polymeereillä toteutetun pseudokondensaattorin ominaisuuksia varaamis- ja purkamisjaksojen myötä. (Halper & Ellenbogen 2006, 14.)

Pseudokondensaattorien elektrodimateriaalina on käytetty myös metallioksiedeja niiden korkean johtavuuden vuoksi. Erityisesti ruteniumoksidia on tutkittu, koska sen avulla on saavutettu korkeampia kapasitansseja kuin muilla metallioksiedeilla. Ruteniumoksidihydraateilla on saavutettu suurempia kapasitansseja kuin hiilipohjaisilla tai johtavista polymeereistä tehdyillä elektrodimateriaaleilla. Ruteniumoksidihydraateilla on myös matalampi ekvivalenttinen sarjaresistanssi kuin muilla elektrodimateriaaleilla. Vaikka ruteniumoksidipseudokondensaattoreilla voi saavuttaa korkeampia energia- ja tehotiheyksiä kuin kaksikerroksisilla kondensaattoreilla tai johtaviin polymeereihin pohjautuvilla pseudokondensaattoreilla, ruteniumoksidin käyttöä rajoittaa sen kalleus. (Halper & Ellenbogen 2006, 15.)

3.4 Hybridikondensaattorit

Hybridikondensaattoreissa varaus varastoituu sekä sähköstaattisesti että sähkökemiallisesti. Hybridikondensaattorit yrittävät hyödyntää kaksikerroksisten kondensaattorien ja pseudokondensaattorien parhaita puolia ja välttää niiden huonoja puolia. Hybridikondensaattoreilla on saavutettu suurempia teho- ja energiatheyksiä kuin kaksikerroksisilla kondensaattoreilla. Toisaalta hybridikondensaattoreilla on pystytty välttämään pseudokondensaattoreiden kalleus ja varaamis- ja purkamisjaksojen myötä tapahtuva ominaisuuksien heikkeneminen. (Halper & Ellenbogen 2006, 15.)

Epäsymmetrisissä hybridikondensaattoreissa toinen elektrodi toimii sähköstaattisesti kuin kaksikerroksisessa kondensaattorissa ja toinen sähkökemiallisesti kuin pseudokondensaattorissa. Negatiivisen aktiivihiilielektrodin ja johtavasta polymeeristä tehdyn positiivisen elektrodin yhdistelmä on huomionarvoinen, sillä näin toteutetut epäsymmetriset hybridikondensaattorit saavuttavat korkeammat teho- ja energiatiheddet kuin verrattavat kaksikerroksiset kondensaattorit. Ne myös kestävät varaamis- ja purkamisjaksoja paremmin kuin verrattavat pseudokondensaattorit, joiden ominaisuudet heikkenevät nopeammin. Johtavalla polymeerielektrodilla saavutetaan korkeampi kapasitanssi ja matalampi resistanssi kuin aktiivihiilielektrodilla. Aktiivihiilielektrodilla puolestaan on korkeampi maksimijännite, ja sen ominaisuudet heikkenevät hitaammin kuin johtavan polymeerielektrodin. (Halper & Ellenbogen 2006, 17.)

Komposiittielektrodeissa käytetään sekä hiilipohjaista materiaalia että johtavaa polymeerimateriaalia tai metallioksidimateriaalia samassa elektrodissa. Tällöin varaus varastoituu elektrodille sähköstaattisesti ja sähkökemiallisesti. Hiilipohjainen materiaali mahdollistaa kaksi varauskerrosta ja laajan pseudokapasitiivisen materiaalin ja elektrolyytin välisen kosketuspinnan. Erityisen menestyksekkäitä ovat olleet hiilinanoputkista ja polypyrrolista tehdyt elektrodit. Niillä on saavutettu korkeampia kapasitansseja kuin pelkistä hiilinanoputkista tai pelkästä polypyrrolista valmistetuilla elektrodeilla. Hiilinanoputkien avoin kudosis rakenne mahdollistaa tasaisen polypyrrolipeiton ja rakenteellinen vahvuus vähentää ionien liikkeestä johtuvaa mekaanista rasitusta polypyrrolissa. Nämä komposiitit kestävät varaamis- ja purkamisjaksoja yhtä hyvin kuin kaksikerroksiset kondensaattorit. (Halper & Ellenbogen 2006, 16.)

Paristotyyppisissä hybrideissä on superkondensaattorielektrodi ja paristoelektrodi. Paristojen energiaominaisuudet yhdistyvät superkondensaattorien varaamis- ja purkamisjaksojen sietokykyyn, tehoon ja latausaikaan. Toinen elektrodi on yleensä aktiivihiilielektrodi, ja toisen elektrodin materiaalina on nikkelihydroksidi, lyijydioksidi tai $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Tehtyjen kokeiden perusteella paristotyyppisillä hybrideillä luultavasti voidaan kattaa superkondensaattoreiden ja paristojen sähköisten ominaisuuksien väli. (Halper & Ellenbogen 2006, 17–18.)

3.5 Yhteenveto superkondensaattoreista

Kaksikerroksisissa kondensaattoreissa varaus varastoituu sähköstaattisesti kiinteän elektrodimateriaalin huokosten ja elektrolyytin väliseen rajapintaan (Burke 2000, 39). Kaksikerroksisissa kondensaattoreissa ei tapahdu käytettäessä kemiallisia eikä rakenteellisia muutoksia, joten niiden ominaisuudet pysyvät pitkään vakaina. Kaksikerroksisilla kondensaattoreilla on varaamis- ja purkamisjaksoina mitattuna pitkä käyttöikä, ja näin ollen ne soveltuvat hyvin käytettäväksi vuorilla ja syvämeressä. (Halper & Ellenbogen 2006, 9.) Pseudokondensaattoreissa varaus varastoituu sähkökemiallisesti varauksensiirtoreaktioiden myötä (Burke 2000, 41; Halper & Ellenbogen 2006, 14). Pseudokondensaattoreissa tapahtuu kemiallisia reaktioita, jotka käytön myötä heikentävät niiden ominaisuuksia (Halper & Ellenbogen 2006, 14–15). Pseudokondensaattoreilla saavutetaan suurempi kapasitanssi ja energiatiheys kuin kaksikerroksisilla kondensaattoreilla (Burke 2000, 41; Halper & Ellenbogen 2006, 14). Hybridikondensaattorissa yksi elektrodi on kuin kaksikerroksisessa kondensaattorissa ja toinen elektrodi on kuin pseudokondensaattorissa (Burke 2000, 41). Hybridikondensaattorissa varaus varastoituu sähköstaattisesti ja sähkökemiallisesti, ja niillä saavutetaan suurempia energia- ja tehotiheyksiä kuin kaksikerroksisilla kondensaattoreilla (Burke 2000, 41; Halper & Ellenbogen 2006, 15). Hybridikondensaattorit ovat halvempia kuin pseudokondensaattorit, ja niiden ominaisuudet pysyvät käytössä vakaampina kuin pseudokondensaattorien (Halper & Ellenbogen 2006, 15).

Superkondensaattoreita tutkitaan ja kehitetään Euroopassa, Japanissa, Yhdysvalloissa ja Venäjällä (Burke 2000, 41, 46). Superkondensaattoreita on tarkoitus soveltaa sähkö- ja hybridiajoneuvoissa, lääketieteellisessä elektroniikassa ja kuluttajaelektroniikassa (Burke 2000, 41). Kaksikerroksisten kondensaattorien korkeimmat energiatiheydet ovat 5–6 Wh/kg. Kaksikerroksisten kondensaattorien tehotiheydet ovat 0,5–2 kW/kg. Tulevaisuudessa saavutettaneen 8–10 Wh/kg ja 2–3 kW/kg. (Burke 2000, 43–44.) Pseudokondensaattorilla, jossa käytettiin ruteniumoksidihydraatin ja hiilen komposiittia, on toteutettu 8,5 Wh/kg:n energiatiheys ja 6 kW/kg:n tehosiheys. On myös metallioksideihin pohjautuvia prototyyppisiä, joiden energiatiheys on 10–15 Wh/kg. Johtavien polymeerien käytöllä pseudokondensaattoreissa on päästy 1 Wh/kg:n energiatiheuteen ja 1,8 kW/kg tehosiheuteen. Johtavilla polymeereillä arvioidaan päästävän arvoihin 8 Wh/kg ja 4 kW/kg. (Burke 2000, 45.) Venäjällä on kehitetty hybridikondensaattoreita, joiden negatiivinen elektrodi on valmistettu aktiivihiilikankaasta ja positiivinen elektrodi lyijyoksidista.

Näillä hybridikondensaattoreilla on väitetysti 10–20 Wh/kg:n energiatiheys ja 300 W/kg tehosiheys. Kyseiset hybridikondensaattorit 10–20 minuutin lataus- ja purkuaikoinen muistuttavat ominaisuuksiltaan lähinnä suuritehoisia paristoja, joilla on matala energiatiheys. Ohuisiin elektrodeihin pohjautuvilla ohutkalvohybridikondensaattoreilla odotetaan päästävän 10–20 Wh/kg:n energiatiheyteen. Näiden hybridikondensaattorien tehosiheys on todennäköisesti useita kilowatteja kilogrammaa kohden. (Burke 2000, 46.)

4 SUPERKONDENSAATTORIT KÄYTÄNNÖSSÄ

4.1 Energiavarastojen tarve

Suuren kokoluokan energian varastoinnin tarve on kirjoitushetkellä vuonna 2019 lisääntymässä. Tämä johtuu ainakin sääriippuvaisen energiantuotannon, kuten tuulivoimaloiden ja aurinkosähkön, lisääntymisestä ja sähköajoneuvojen yleistymisestä (Korpela 2019). Sääriippuvainen energiantuotanto on ajoittaista, ja sähköverkkotason kulutus jatkuva. Kun tuotettu energia varastoidaan, ja energia kulutetaan tästä varastosta, tuotannon vaihtelut eivät aiheuta välittömiä häiriöitä kuluttajalle.

Sähköajoneuvon latausajan on oltava lyhyt, jotta ajoneuvo on käytännöllinen. On kuitenkin hyvin mahdollista, että sähköliittymä rajoittaa lataustehoa varsinkin sellaisissa tapauksissa, joissa useampaa sähköautoa ladataan samanaikaisesti. Energiavarasto mahdollistaa nopean latauksen vähemmän tehokkaasta sähköliittymästä. Energiavarasto latautuu jatkuvasti suoraan verkosta, jotta energiaa on saatavilla välittömästi paljon. Ajoneuvoa ladattaessa energiaa otetaan sekä suoraan verkosta että energiavarastosta. (Korpela 2019.)

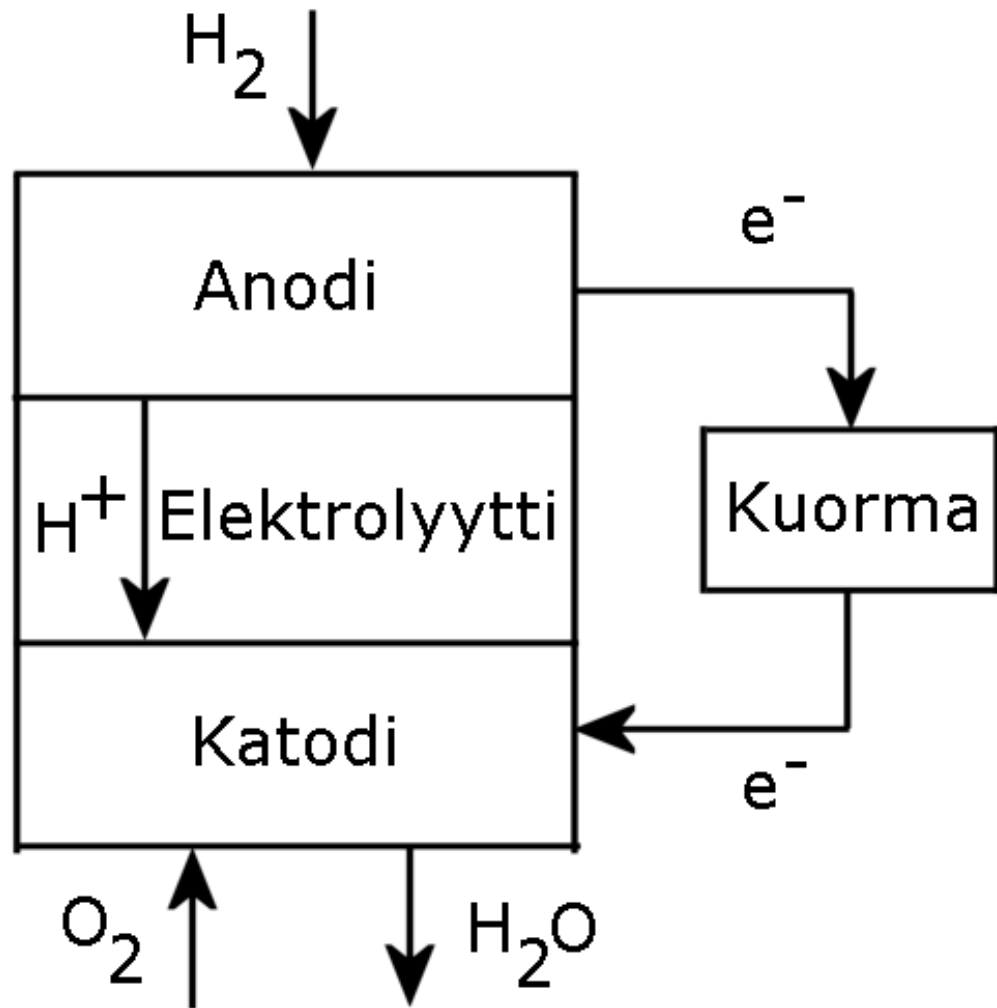
4.2 Superkondensaattorin sovelluksia

Edellä mainituissa tapauksissa käytetään akkuja, joiden teknologia on kehittynyt merkittävästi kuluneina vuosikymmeninä. Akkuun saa varastoitua paljon energiaa suhteessa massaansa. Litiumionikennoon voi varastoida tyypillisesti 300 Wh/kg. (Korpela 2018b, 16.) Superkondensaattoriin voidaan varastoida noin 8 Wh/kg (Korpela 2018b, 21). Vaikka akut ovat kehittyneet, superkondensaattoreista saa suuremman tehon kuin akuista. Litiumionikennosta saadaan noin 3 kW/kg:n teho (Korpela 2018b, 16). Superkondensaattorista saadaan 10–20 kW/kg:n teho (Korpela 2018b, 21). Näistä ominaisuuksista johtuen on olemassa hybridienergiavaraston käsite. Hybridienergiavarastossa akkuja käytetään superkondensaattoreiden rinnalla. Hybridienergiavarastossa superkondensaattoreista otetaan suurimmat tehot. Tämä lisää akkujen käyttöikää sekä mahdollistaa sellaisten akkutyypin käytön, joiden teho-ominaisuudet eivät yksin riitä, ja laskee akuston hintaa. (Korpela 2018b, 25; Korpela 2019.)

Superkondensaattorin luontevin käyttökohde on sovellus, jossa tarvitaan suuri teho ja tehoon verrattuna suhteellisen pieni energiamäärä. Jos suuri energiamäärä on tarpeen ja pienempi teho riittää, akkujen käyttö on todennäköisesti taloudellisempaa. Superkondensaattoreilla on käyttömahdollisuuksia sähköisessä liikenteessä, energiavarastona tuotantolaitosten vikatilanteissa, sähköverkon taajuuskontrollissa, sähköverkon tuotanto- ja kulutusvaihteluiden tasaamisessa ja sääriippuvien energiamuotojen tuotantotehon tasaamisessa. Tuotantolaitosten vikatilanteissa tarvittava teho on alle 100 MW ja energia alle 0,4 MWh. Sähköverkon taajuuskontrollissa tarvitaan tehoa alle 1000 MW ja energiaa alle 10 MWh. Sähköverkon tuotanto- ja kulutusvaihteluiden tasaamisessa tehoa tarvitaan alle 100 MW ja energiaa alle 0,15 MWh. Sääriippuvien energiamuotojen tuotantotehon tasaamisessa tarvittava teho on alle 500 MW ja energia alle 5 MWh. (Korpela 2018b, 23–25.)

4.3 Vertailu vetyyn ja polttokennoihin

Esillä on ollut ajatus vetyyn ja polttokennoihin pohjautuvasta energiataloudesta. Siinä fossiilisten polttoaineiden sijasta käytettäisiin vetyä. Vety tuotettaisiin elektrolyysillä vedestä. Tässä tarvittava sähkö olisi peräisin tuulivoiman ja aurinkosähkön ylituotannosta, vesivoimasta tai jopa ydinvoimasta. Tärkeää on, että toiminta ei tuottaisi hiilidioksidipäästöjä ja olisi ilmastoneutraalia. Vety voidaan varastoida metallihydridiksi, kaasuna 200–800 barin paineessa tai energiatiheämmin nestemäisenä -250 celsiusasteen lämpötilassa, jonka ylläpitäminen kuluttaa energiaa. Vedystä tuotetaan sähkö- ja lämpöenergiaa syöttämällä sitä polttokennoon. Matalan lämpötilan polttokennot tuottavat pääasiassa sähköä. Korkean lämpötilan polttokennot soveltuvat sekä sähkön- että lämmöntuotantoon. (Korpela 2018b, 26, 27, 31.) Kuviossa 5 on esitetty vetypolttokennon toiminta. Anodilla vety hapettuu, eli luovuttaa elektronin. Elektroni kulkee kuorman kautta katodille. Positiivisesti varautunut vetyioni kulkee elektrolyytin kautta katodille. Katodilla positiivisesti varautunut vetyioni ja elektroni reagoivat hapen kanssa ja muodostavat vettä.



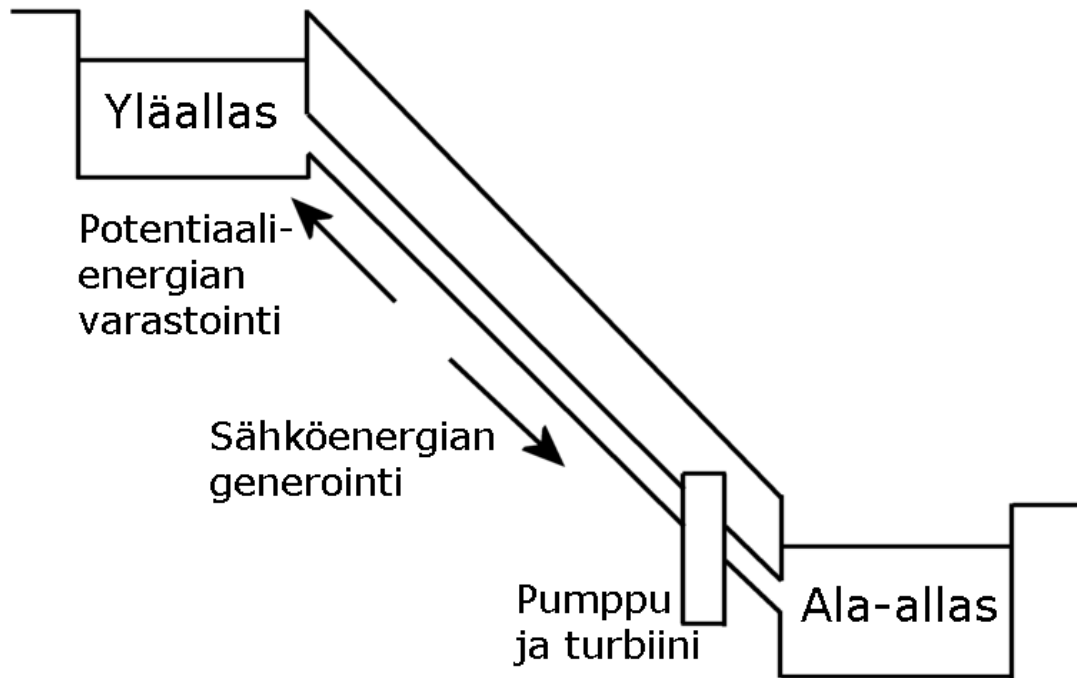
KUVIO 5. Vetypolttokennon toiminta

Tällä hetkellä vetyä tuotetaan yleisimmin höyryreformoinnilla. Höyryreformoinnissa vety erotetaan yleensä hiilivety-yhdisteestä. Prosessi tarvitsee korkean lämpötilan ja tuottaa hiilidioksidia. Ekologisempia tapoja tuottaa vetyä ovat alkalielektrolyysi ja polymeerielektrolyysi. Alkalielektrolyysilaitos tuottaa 100–1000 kuutiometriä normaalipaineista vetykaasua tunnissa ja käyttää tähän 0,5–5 megawattia sähkötehoa. Tarvitaan siis 5 kWh yhden vetykaasukuutiometrin tuottamiseen. Polymeerielektrolyysissä käytetään kiinteäpolymeeripolttokennoa eli PEM-polttokennoa. PEM-polttokennoa voi käyttää sähköntuotannon lisäksi myös vedyn tuotantoon, koska laitteessa reaktiot saadaan toteutumaan käänteisestikin. PEM-polttokennossa saadaan siis vedystä ja hapesta sähköenergiaa ja vettä ja sähköenergiasta ja vedestä vetyä ja happea. Polymeerielektrolyysi kuluttaa suunnilleen saman verran energiaa kuin alkalielektrolyysi, joskin paikallisen pientuotantoyksikön sähköteho on yleensä alle 100 kW. (Korpela 2018b, 28–29.)

Hyötysuhde vedyn tuottamisesta varastoinnin kautta sähköntuotantoon polttokennolla on noin 45 %, kun sähköenergian varastoinnin hyötysuhde superkondensaattorissa on tyypillisesti ainakin 95 % (Korpela 2018b, 22, 30, 48). Vedyllä ja superkondensaattoreilla on mahdollista varastoida energiaa yhden megawattitunnin suuruusluokassa, mutta superkondensaattoreilla voidaan tuottaa lyhytaikaisesti 100 MW teho verrattuna vedyllä saavutettavaan yhteeseen megawattiin (Korpela 2018b, 21, 48). Energiaa on nykyhetkellä mahdollista varastoida vetyyn. Vetytalous on parhaimmillaan lähes päästötön ja fyysisesti täysin toteutettavissa nykyteknologialla. Vetytalouden toteuttamisen kustannukset olisivat valtavat, koska infrastruktuuria ei ole. Näin ollen kustannustehokas energian varastointi vetyyn ei luultavasti toteudu 2020-luvulla. Kaikesta huolimatta markkinoille on tulossa polttokennoajoneuvoja, jotka pohjimmiltaan ovat sähköautoja, joissa energia tuotetaan auton sisällä polttokennolla vedystä. (Korpela 2018b, 27, 31.) Vety saattaa siis tulevaisuudessa olla hyvin vartenotettava ja kustannustehokas energian varastointimuoto. Superkondensaattorit ovat joihinkin käyttötarkoituksiin sellainen jo nyt.

4.4 Vertailu pumppuvoimalaitokseen

Vuonna 2019 merkittävin suuren kokoluokan energian varastointitekniikka on veden potentiaalienergian säilyttäminen. Vesivoimalaitos tavanomaisesti säätelee yläaltaassaan olevan veden määrää, mutta tästä huolimatta vesivoimalaitosta ei pidetä energiavarastona. Pumppuvoimalaitos on energian varastointitekniikan teknis-taloudellisen kehityksen huippua. Pumppuvoimalaitoksessa vettä voidaan pumpata ala-altaasta yläaltaaseen. Kun sähköä tuotetaan yli tarpeen, ja kun sähkö on edullista, sitä käytetään veden pumppaamiseen yläaltaaseen. Kun sähköä tarvitsee tuottaa enemmän, ja sen hinta on korkea, käytetään yläaltaaseen varastoitua vettä sähköntuottamiseen. (Korpela 2018b, 32–33.) Kuviossa 6 on esitetty pumppuvoimalaitoksen toiminta. Kun energiaa on paljon, sitä varastoidaan potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä ala-altaasta yläaltaaseen. Kun halutaan generoida sähköenergiaa, vettä lasketaan turbiinin läpi yläaltaasta ala-altaaseen.



KUVIO 6. Pumppuvoimalaitoksen toiminta

Pumppuvoimalaitos on oikein toteutettuna kustannustehokas, ja saavuttaa tyypillisesti noin 80 % hyötysuhteen (Korpela 2018b, 34). Vertailun vuoksi superkondensaattorilla on yleensä vähintään 95 % hyötysuhde (Korpela 2018b, 22). Pumppuvoimalaitoksessa häviöt muodostuvat enimmäkseen veden yläaltaaseen pumppaamisesta. Pumppuvoimalaitoksen kyky päästä tuotantotehonsa maksimiin muutamassa minuutissa mahdollistaa sen käytön sähkön laadun parantamiseksi. Sähkön tuotantoa ja kulutusta voidaan tasata, ja äkillisissä vikatilanteissa pumppuvoimalaitosta voidaan käyttää varavoimana. On myös mahdollista palauttaa sähköt siirtolinjoille pumppuvoimalaitosten avulla, kun verkko kaa-tuu, tai kun voimalassa on vikatilanne. Pumppuvoimalaitos mitoitetaan siten, että se kykenee tuottamaan maksimitehoaan, joka on tyypillisesti 200–350 MW, kahdeksan tuntia. Energiaa on siis varastosta otettavissa yleensä 1600–2800 MWh. (Korpela 2018b, 34.) Superkondensaattoreilla on mahdollista tuottaa vertailukelpoinen teho, mutta energiaa riittää niissä tähän vain sekuntien ajan (Korpela 2018b, 21, 23, 24, 48).

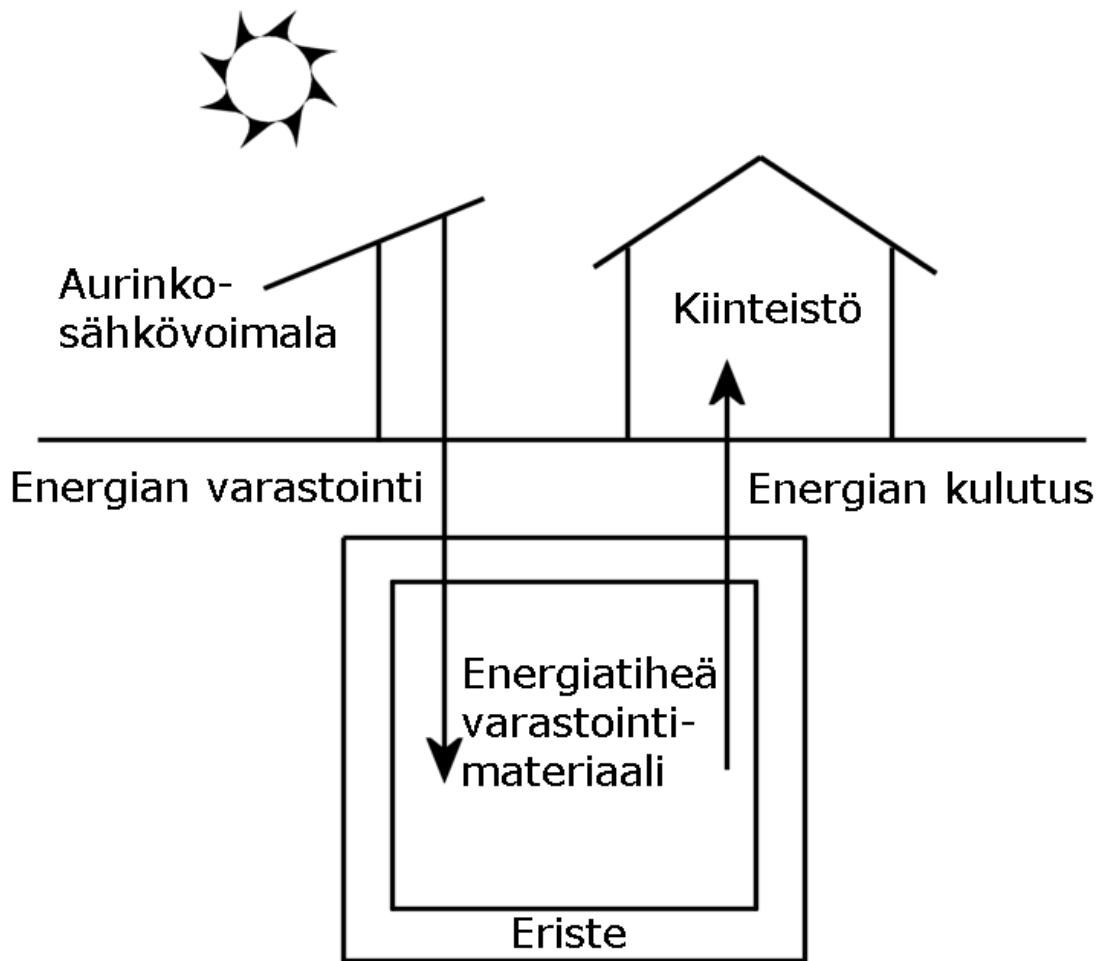
Pumppuvoimalaitosten toteuttamista vaikeuttavat olennaiset tekniset vaatimukset sen sijainnin ominaisuuksista. Jotta pumppuvoimalaitos kannattaa toteuttaa, maan pinnanmuotojen on oltava sopivat ja vettä saatavilla tarpeeksi. Korkeuseron ylä- ja ala-altaan välillä

on oltava riittävän suuri. Sopivia sijainteja ei Suomessa juurikaan ole, ja ympäristönsuojelulliset syyt rajoittavat mahdollisuuksia entisestään. Pyhäjärven kaivokselle on kuitenkin suunniteltu pumppuvoimalaitosta. Pumppuvoimalaitokset mahdollistaisivat sääriippuvaisen uusiutuvan sähköenergian tuotannon paremman hyödyntämisen, kuten Länsi-Euroopassa. Teknologia on kypsää, ja kehitys kohdistuu lähinnä hyötysuhteen ja vasteajan parantamiseen. (Korpela 2018b, 33–35.)

4.5 Vertailu sähköenergian varastointiin lämmöksi

Sähkökäyttöinen lämminvesivaraaja on yleisesti tunnettu esimerkki sähköenergian varastoinnista lämmöksi (Korpela 2018b, 36). Energian varastointi juuri tällä tavalla sopii oivallisesti sääriippuvaisten sähkön tuotantomuotojen hyödyntämiseen. Tuulivoimasta ja aurinkosähköstä saa energiaa hyötykäyttöön lämminvesivaraajan sähkövastuksessa hyvällä hyötysuhteella muunlaisiin sovelluksiin verrattuna sillä perusteella, että sähkövastus muuttaa sähköenergiaa lämmöksi välittämättä lävitseen kulkevan sähkön aaltomuodosta. Tässä nimenomaisessa lämminvesivaraajasovelluksessa voidaan siis välttyä vaihtosuuntaajan ja akun käytöltä, jotka muutoin laskevat järjestelmän hyötysuhdetta.

Yli puolet suomalaisen omakotitalon noin 15000 kilowattitunnin sähköenergian vuosikulutuksesta menee lämmitykseen. 25 kilowatin aurinkosähkövoimalan hinta on maalämpöjärjestelmän kanssa samassa suuruusluokassa. Etelä-Suomelle tavanomaisella 800 tunnin huipunkäyttöajalla kyseinen voimala tuottaa 20000 kWh sähköenergiaa vuodessa, joten määrällisesti omakotitalon sähköenergian vuosikulutus on katettavissa aurinkosähköllä. Käytännössä tähän tarvitaan energian varastointia, koska aurinkosähkövoimalan tuotanto tapahtuu enimmäkseen huhtikuun ja syyskuun välisenä aikana, kun taas omakotitalon kulutus tapahtuu suurimmalta osaltaan lokakuun ja maaliskuun välisenä aikana. (Korpela 2018b, 36–37.) Kuviossa 7 on esitetty lämpöenergiavaraston toiminta. Kun aurinkosähkövoimala tuottaa energiaa, energia varastoidaan eristettyyn energiatiheään varastointimateriaaliin. Kun kiinteistö tarvitsee energiaa lämmitykseen, energiaa kulutetaan lämpöenergiavarastosta.



KUVIO 7. Lämpöenergiavaraston toiminta

Vaikka kuumavesiakulla saavutetaan kohtuullinen 70 % hyötysuhde, sillä on matala energiatiheys. Käytännössä tämä tarkoittaa suurta tilavuutta, josta aiheutuu tarve runsaalle eristykselle. Näistä syistä perinteinen lämminvesivaraaja ei sovellu pitkäaikaiseen energian varastointiin. Viime aikoina lämpöenergian varastoinnin kehityksessä on pyritty kasvattamaan energiatiheyttä vanhaan vesivarastoteknologiaan verrattuna, ja tällöin tavoitteena on nimenomaan hyödyntää kesän aikana varastoitua energiaa syys- ja talvikaudella. Puhutaan siis kuukausitason lämpöenergian varastoinnista. Lämpöenergiavaraston lisääminen kiinteistön energiajärjestelmään maksaa arviolta ainakin saman verran kuin aurinkosähkövoimala, mahdollisesti kaksinkertaisestikin. Lämpöenergiavarastojen lähitulevaisuuden teknis-taloudelliset näkymät ovat parhaat suuremmissa kiinteistöissä, eli teollisuuskiinteistöissä ja rivi- ja kerrostaloissa. Enimmäkseen potentiaalisista huoltokustannuksista muodostuvat käyttökulut jäävät lämpöenergiavarastojärjestelmässä pieniksi. Vaikka lämpöenergiavarastosta ei suoraan seuraa sähköenergiaomavaraisuus, lämmitykseen käytettävän ostosähkön määrä vähenee, kun lämmitykseen käytetään varastoitua

lämpöenergiaa suoran sähkölämmityksen sijasta. (Korpela 2018b, 38–40.) Kuten taulukosta 1 nähdään, energian varastointi superkondensaattoreihin maksaa noin 1000 euroa kilowattituntia kohden, ja energian varastointi lämmöksi maksaa noin 30 euroa kilowattituntia kohden (Korpela 2018b, 48). On teknis-taloudellisesti kannattavampaa varastoida omakotitalon lämmitykseen käytettävää energiaa lämmöksi kuin superkondensaattoreihin.

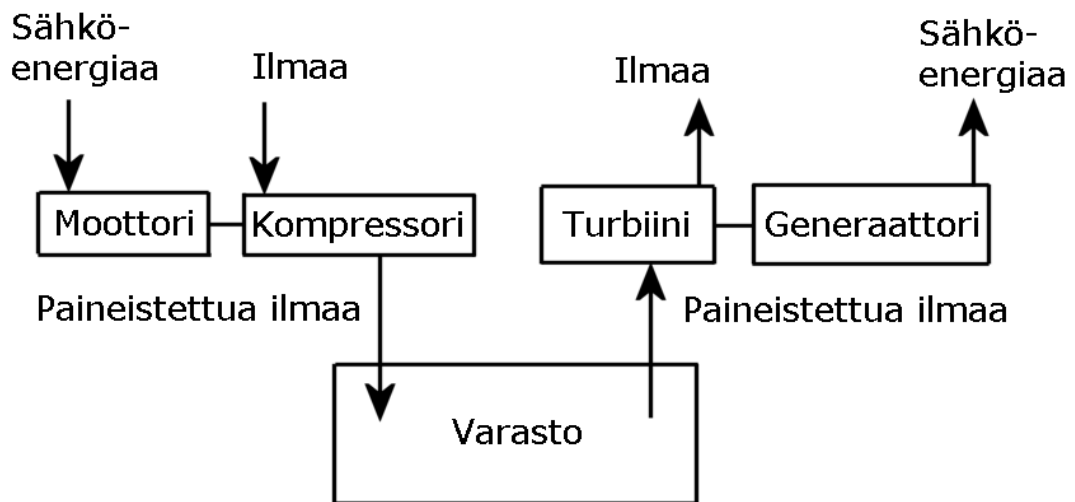
TAULUKKO 1. Energiavarastoteknologioiden tunnuslukuja (Korpela 2018b, 48, muokattu)

Teknologia	hyötysuhde	Energia (MWh)	teho (MW)	kustannus	elinkaari (sykliä)	mahdollisuudet Suomessa
akku	70–95 %	1	1	400 €/kWh 400 €/kW	10 000	hyvät
superkondensaattori	95 %	1	100	1000 €/kWh 100 €/kW	500 000	hyvät
vety	45 %	1	1	100 €/kWh 1000 €/kW	10 000 h	hyvät
pumppuvoimalaitos	80 %	2000	200	100 €/kWh 1000 €/kW	50 000	rajoittuneet
varastointi lämmöksi	75 %	1000	1	30 €/kWh 500 €/kW	10 000	hyvät
paineilma	75 %	1000	1000	100 €/kWh 1000 €/kW	10 000	rajoittuneet
vauhtipyörä	95 %	0.01	1	5000 €/kWh 300 €/kW	300 000	hyvät
suprajohde	95 %	0.1	10	1000 €/kWh 500 €/kW	500 000	hyvät

4.6 Vertailu muihin energian varastointiratkaisuihin

Paineilmavarastossa energia säilötään paineistettuun ilmaan esimerkiksi maanalaiseen luolaan. Perinteisesti paineilmavarastojen energian tuotannossa on käytetty fossiilisia polttoaineita. Nyt kehitteillä olevissa kolmannen sukupolven paineilmavarastoissa niitä

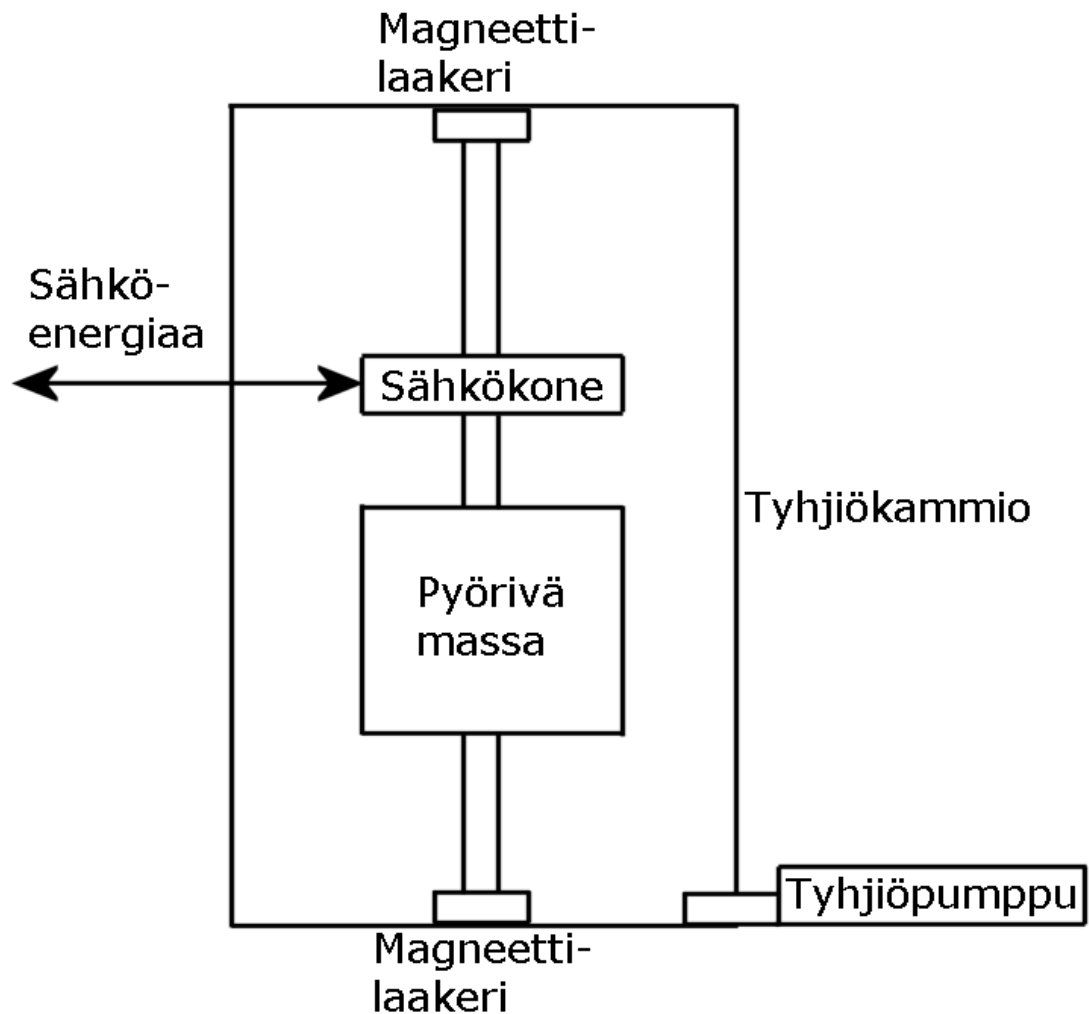
nimenomaan vältetään. (Korpela 2018b, 41–42.) Kokonaishyötysuhteet ovat parhaimmillaan 80 % luokkaa, verrattuna superkondensaattorin 95 % hyötysuhteeseen (Korpela 2018b, 22, 42). Superkondensaattoriin verrattuna paineilmaan saa varastoitua energiaa tuhatkertaisen määrän ja tehoa kymmenkertaisen määrän. Energian varastoimisen hinta on kymmenesosa superkondensaattorin vastaavasta, ja tehon varastoimisen hinta on kymmenkertainen. (Korpela 2018b, 48.) Kuviossa 8 on esitetty paineilmaparaston toiminta. Kun energiaa varastoidaan, moottorille syötetään sähköenergiaa. Moottori käyttää kompressoria. Kompressori paineistaa ilmaa talteen varastoon. Kun energiaa tarvitaan, paineistettua ilmaa lasketaan varastosta turbiinin läpi ulos. Turbiini pyörii, ja käyttää generaattoria. Generaattori generoi sähköenergiaa.



KUVIO 8. Paineilmavaraston toiminta

Vauhtipyörässä energia varastoidaan useimmiten pyörivän kappaleen liike-energiانا. Nykypäivän sovelluksissa pyörivä massa on tyhjiössä magneettisesti laakeroituna. Kun energiaa varastoidaan, sähkökone kasvattaa massan kulmanopeutta ja liike-energiaa. Kun energiaa otetaan varastosta, sähkökone toimii generaattorina, joka tuottaa sähköenergiaa pyörivän massan liike-energiasta. Yleisen näkemyksen mukaan vauhtipyörä ei sovellu suuren energiakapasiteetin käyttökohteisiin, vaikka sillä onkin erinomaiset teho-ominaisuudet. (Korpela 2018b, 42–43.) Hyötysuhde on 95 %, kuten superkondensaattorilla (Korpela 2018b, 22, 43). Vauhtipyörä pystyy varastoimaan noin sadasosan superkondensaattorin energiasta ja tehosta moninkertaisella hinnalla (Korpela 2018b, 48). Kuviossa 9 on esitetty nykyaikaisen vauhtipyörän toiminta. Tyhjiökammion sisällä on magneettisesti laakeroitu akseli, jossa on pyörimään tarkoitettu kappale. Akselilla on myös sähkökone.

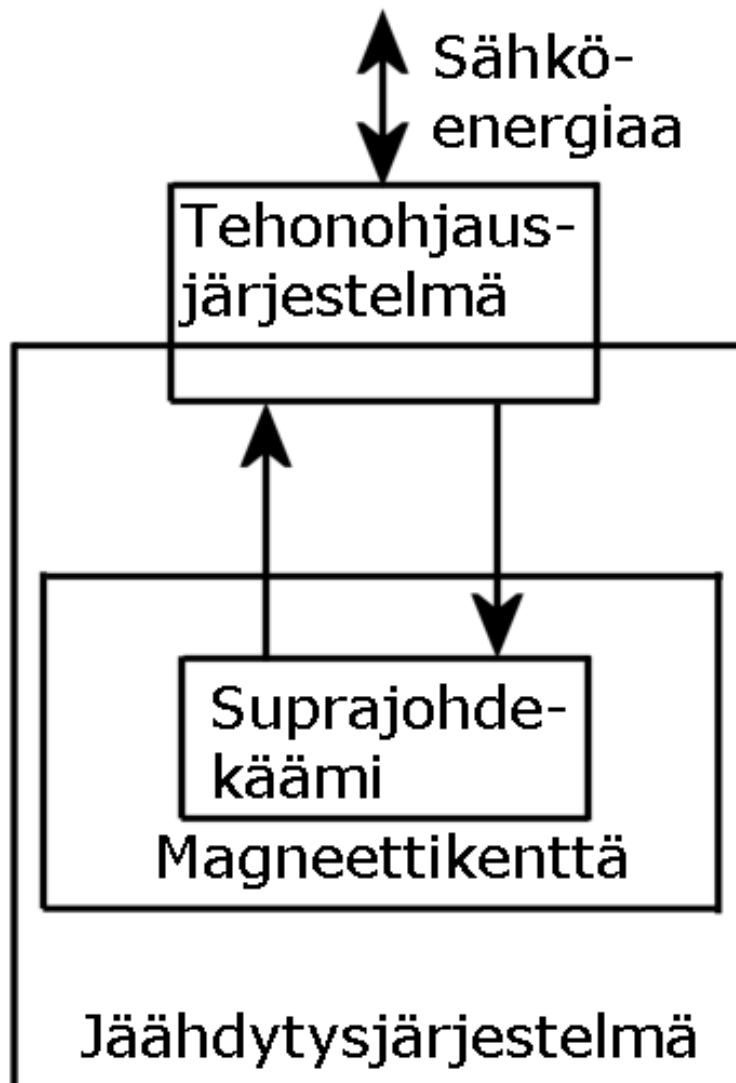
Tyhjiöpumppu poistaa ilmanvastusta aiheuttavat kaasut tyhjiökammioista. Kun energiaa varastoidaan, sähkökoneelle syötetään sähköenergiaa. Sähkökone toimii moottorina, ja kiihdyttää massan pyörimisliikettä. Kun sähköenergiaa otetaan varastosta, massan pyörimisliike käyttää sähkökonetta generaattorina ja hidastuu.



KUVIO 9. Vauhtipyörän toiminta

Suprajohtavassa magneettisessa energiavarastossa ei tapahdu muunnosta energiamuodosta toiseen. Tämä mahdollistaa suuren tehon. Suprajohtavassa magneettisessa energiavarastossa energia varastoituu magneettikenttään, jonka käämeissä kulkeva sähkövirta synnyttää ympärilleen, kun superkondensaattorissa energia varastoituu sähkökenttään. Suprajohtavuus on välttämätöntä, sillä muutoin energiaa kuluu resistiivisiin häviöihin käämeissä. Häviöt ovat pääosin lähtöisin matalan lämpötilan ylläpitämisestä. (Korpela 2018b, 44–45.) Hyötysuhde on 95 %, kuten superkondensaattorilla (Korpela 2018b, 22, 45). Suprajohtava magneettinen energiavarasto pystyy varastoimaan noin kymmenesosan

superkondensaattorin energiasta ja tehosta, ja on noin viisi kertaa kalliimpi tehon varastointiin (Korpela 2018b, 48). Kuviossa 10 on esitetty suprajohtavan magneettisen energiavaraston toiminta. Jäähdytysjärjestelmä pitää suprajohdekäämin niin kylmänä, että se pysyy suprajohtavana. Kun energiaa varastoidaan, tehonohjausjärjestelmä syöttää suprajohdekäämiin tasasähköä. Suprajohdekäämin ympärille muodostuu magneettikenttä. Energia varastoituu magneettikenttään. Vaikka sähkönsyöttö lopetetaan, suprajohtavuuden vuoksi virta käämissä ei heikkene, ja magneettikenttä säilyy. Kun energiaa halutaan käyttää, se voidaan ottaa tehonohjausjärjestelmän kautta ulos suprajohdekäämin magneettikentästä.



KUVIO 10. Suprajohtavan magneettisen energiavaraston toiminta

5 POHDINTA

Superkondensaattori on merkittävä edistysaskel kondensaattoriin nähden. Tästä huolimatta se ei ole korvaamassa akkuja lähitulevaisuudessa. Superkondensaattorilla on paikka akkujen rinnalla hybridienergiavarastossa, jossa se tarjoaa suuren tehon, ja akut suuren energian. Superkondensaattorit mahdollistavat sääriippuvien energiantuotantomuotojen ja sähköajoneuvojen edistystä tasaamalla tuotantotehon vaihteluita ja parantamalla lataus-tehoa. Matala energiatiheys hidastaa superkondensaattorien yleistymistä, joten energiatiheden parantaminen lisää superkondensaattorien käyttömahdollisuuksia.

Vety voi tulevaisuudessa olla hyvin yleinen, ekologinen ja kustannustehokas energian varastointimuoto, mutta superkondensaattorit ovat sellainen jo nyt suuren tehon vaativille sovelluksille, jotka pärjäävät pienellä energialla. Superkondensaattorien tehoa voi verrata jopa pumppuvoimalaitoksen tehoon. Varastoitavan energian määrässä se häviää selkeästi pumppuvoimalaitokselle, joka kykenee ylläpitämään maksimitehoaan yleensä kahdeksan tuntia, ja superkondensaattorin energia riittää tähän sekunneiksi. Pumppuvoimalaitosta ei ole kuitenkaan yhtä helppo sijoittaa. Myös kiinteistön lämmittäminen aurinkosähköstä saatavalla energialla onnistuu lämpöenergiavaraston avulla huomattavasti superkondensaattoreita kustannustehokkaammin.

Paineilmavarastoon energiaa mahtuu tuhatkertaisesti ja tehoa kymmenkertaisesti superkondensaattoriin verrattuna. Superkondensaattori kykenee tuottamaan monin verroin halvemmalla satakertaisesti vauhtipyörän energian ja tehon. Superkondensaattori pystyy tuottamaan kymmenkertaisesti suprajohtavan magneettisen energiavaraston energian ja tehon noin viidesosalla tehon varastoimisen kustannuksista.

Opinnäytetyö on luotettava, koska tiedot ovat peräisin luotettavista lähteistä. Eettisessä mielessä en pidä tätä opinnäytetyötä moraalisesti paheksuttavana. Sen toteuttamisessa nojaututtiin annettuihin kirjallisen raportoinnin ohjeisiin. asiat esitettiin sellaisina kuin ne lähteiden perusteella ymmärrettiin niitä tietoisesti vääristelemättä. Ympäristöystävällisyyteen ei ole suhtauduttu halveksuvasti. Työ onnistui, koska siitä saa muodostettua ymmärryksen superkondensaattoreista ja niiden suhteesta muihin energian varastointitekologioihin.

LÄHTEET

Burke, A. 2000. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources* 91 (1), 37–50.

Halper, M. & Ellenbogen, J. 2006. Supercapacitors: A Brief Overview. USA: The MITRE Corporation. Luettu 17.1.2019. https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf

Hassi, S., Hatakka, J., Saarikko, H. & Valjakka, J. 1998. *Lukion fysiikka, Sähkö ja magnetismi 1*. Porvoo: WSOY.

Korpela, A. yliopettaja. 2018a. RE: Opinnäytetyö. Sähköpostiviesti. aki.korpela@tamk.fi. Luettu 4.10.2018.

Korpela, A. 2018b. *Suuren kokoluokan energianvarastointiteknologioiden teknis-taloudelliset näkymät*. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.

Korpela, A. yliopettaja. 2019. RE: Opinnäytetyö. Sähköpostiviesti. aki.korpela@tuni.fi. Luettu 30.1.2019.

NIST. N.d. CODATA Value: electric constant. Luettu 1.10.2018. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ep0>

Pöyhönen, O. 1975. *Sähkötekniikan käsikirja I*. Tammi.