



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joona Knuutila

SUPERKONDENSAATTORI KUOR- MANKÄSITTELIJÄSSÄ

Case, Pesimal Oy

Tekniikka
2019

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joona Knuutila
Opinnäytetyön nimi	Superkondensaattori kuormankäsittelijässä
Vuosi	2019
Kieli	suomi
Sivumäärä	48
Ohjaaja	Kari Jokinen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella superkondensaattoriteknologiaa ja sen hyödyntämistä Pesmel Oy:n kuormankäsittelijässä akun rinnalla. Syöttöjärjestelmän suunnittelussa kuormankäsittelijää tarkastellaan tehokkuuden ja kannattavuuden näkökulmasta sekä huomioidaan superkondensaattorin ja akun hybridikäyttöä energiahallinnan ja oikeanlaisen mitoituksen mukaan. Syöttävän järjestelmän periaatteena on varastoida suuria määriä energiaa kuormankäsittelijän tarpeisiin sekä kattaa kuormituksen aiheuttamia suuria tehopulsseja.

Kuormankäsittelijää syöttävää energiajärjestelmää tarkastellaan vertaamalla passiivista sekä aktiivista ohjausjärjestelmää sekä näihin liittyviä tehon ohjausta jakavia toimintatiloja. Energiansyöttöjärjestelmän komponenttien tärkeimpiä kriteerejä ovat energiatiheys ja tehoherkkyys, joihin kiinnitetään huomioita tutkimuksen teoriaosuuksissa. Energiasyöttöjärjestelmän laskentaa kuormankäsittelijälle arvioidaan laskentaesimerkein, joiden mukaan syöttöjärjestelmän komponentit voidaan valita. Laskentaa tarkastellaan pääasiassa kuormankäsittelijän suorittaman työsyklin maksimitohon, energiakulutuksen sekä ajan suhteen.

Laskentatulosten mukaan järjestelmän toteutus tarkasteltavan kuormankäsittelijän suorittamalle työsyklille voidaan toteuttaa soveltamalla ainoastaan superkondensaattoreita kuormankäsittelijävaunun lyhyen työjakson vuoksi. Laskennan mukaisen arvion tuloksena superkondensaattorit riittävät noin 5 vuoden mittaiselle käyttöjaksolle.

Avainsanat superkondensaattori, hybridienergiajärjestelmä, ohjausstrategia

ABSTRACT

Author	Joona Knuuttila
Title	The Application of an Ultracapacitor in Cargo-Handling Machine
Year	2019
Language	Finnish
Pages	48
Name of Supervisor	Kari Jokinen

In this thesis the basics of ultracapacitor is examined as well as the replacement of of a cable feed in the Pesimal Oy cargo-handling machine using the battery and ultracapacitor hybrid operation method. In the design of the feed system, the cargo-handling machine looks at the perspective of efficiency and cost-effectiveness, and also considers the hybrid use of the ultracapacitor and the battery according to the energy management and correct sizing. The purpose of the feeding system is to store large amounts of energy for the cargo-handling machine and to be able to cover the high-power peaks caused by the load.

The energy system which feeds the cargo-handling machine was considered by comparing the passive and active control system and the related power control sharing modes. The most important criteria for energy density and power sensitivity lifetime and price and system maintenance, which are addressed in the theoretical parts of the research. The calculations of the power supply system to the load handler was estimated by calculation examples according to which components of the supply system are selected. The calculation was mainly considered in terms of maximum load cycle power, power consumption and time for the load handler.

According to the results of the calculation, the implementation of the system for the duty cycle of the load handler, can be achieved by applying only supercondensators due to the short duty cycle of the load handler. As a result of the calculation, supercapacitors are suitable for a lifetime of about 5 years.

Keywords	ultracapacitor, hybrid energy storage system and control strategy
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO	8
2	KONDENSAATTORI	9
	2.1 Kondensaattorin rakenne ja ominaisuudet	9
	2.2 Kondensaattorin kapasitanssi suhteessa jännitteeseen ja virtaan	10
	2.3 Kapasitanssi ja energian varastoituminen	11
3	SUPERKONDENSAATTORI	13
	3.1 Superkondensaattorikennon rakenne	13
	3.1.1 Sähköinen tuplakerros	14
	3.1.2 Superkondensaattorin ja akun vertailu	14
	3.1.3 Superkondensaattorin elinikä ja lataussykli	18
	3.1.4 Lämpötilan vaikutus superkondensaattoriin	19
4	SUPERKONDENSAATTORI-AKKU JÄRJESTELMÄ	21
	4.1 Akun ja superkondensaattorin hybridikäyttö	21
	4.2 Passiivisen ja aktiivisen ohjausjärjestelmän vertailu	21
	4.3 Superkondensaattori-akkujärjestelmän passiiviohjaus	24
	4.4 Superkondensaattori-akkujärjestelmän aktiiviohjaus	25
	4.5 Erilaisten aktiiviohjattujen topologioiden vertailu	27
	4.6 Ohjausperiaatteet	29
5	SYÖTTÄVÄN ENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS	
	30	
	5.1 HESS-mallin asetusten tarkastelu	30
	5.2 DC-väylän jännitetasot	31
	5.3 Käyttötoimintatilat	31
	5.3.1 Käyttötoimintatila 1	32
	5.3.2 Käyttötoimintatila 2	33
	5.3.3 Käyttötoimintatila 3	34
	5.3.4 Käyttötoimintatila 4	35
	5.4 Ohjausstrategia tarkasteltavalle HESS järjestelmälle	36

5.4.1	Ohjaustila 1	37
5.4.2	Ohjaustila 2	37
5.4.3	Ohjaustila 3	38
6	SUPERKONDENSAATTORIN SOVELTAMINEN	
	KUORMANKÄSITTELIJÄN VARASTOKÄYTÖSSÄ	40
6.1.1	Järjestelmän esittely	40
6.1.2	Superkondensaattorimoduulin mitoitus kuormankäsittelijävaunulle	41
6.1.3	Superkondensaattorimoduulin elinikä varasto-olosuhteissa	44
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	47
	LÄHTEET	48

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Kondensaattorin perusrakenne /9/	9
Kuva 2. Jännitteen ja virran suhde kapasitanssiin /10/.....	10
Kuva 3. Superkondensaattoripariston rakenne /2/.....	13
Kuva 4. Superkondensaattorin sähköstaattinen tuplakerros. /1/.....	14
Kuva 5. Superkondensaattorin ja akun teho- ja energiaherkkyyksikaavio. /3/	17
Kuva 6. Superkondensaattorin elinkaari. /1/	19
Kuva 7. Superkondensaattorin heikentyminen vakioämpötiloissa. /1/	20
Kuva 8. Superkondensaattorin heikentyminen vakioämpötiloissa. /1/	22
Kuva 9. Passiivisen ja aktiivisen hybridijärjestelmän energiahäviöt suhteessa työjakson energiaan. /1/	24
Kuva 10. Passiiviohjattu akku-superkondensaattoritopologia. /14/	24
Kuva 11. Rinnakkainkytketty aktiiviohjattu HESS. /14/.....	26
Kuva 12. Aktiiviohjattu HESS. /1/	27
Kuva 13. Erilaisia aktiiviohjauksen topologioita. /15/	28
Kuva 14. HESS-mallin asettelu. /15/.....	30
Kuva 15. Toimintatilan 1 energian kulku. /15/	32
Kuva 16. Toimintatilan 2 energian kulku: a) HESS syöttää tehoa; b) HESS varastoi tehoa. /15/	33
Kuva 17. Energian kulku toimintatilassa 2 alhaisella tehotasolla. /15/.....	33
Kuva 18. Energian kulku toimintatilassa 2 alhaisella tehotasolla. /15/.....	34
Kuva 19. Energian kulku toimintatilassa 3./15/	35
Kuva 20. Energian kulku toimintatilassa 4./15/	36
Kuva 21. Ohjaustila 1 virtakaavio. /15/.....	37
Kuva 22. Ohjaustila 2 virtakaavio. /15/.....	38
Kuva 23. Ohjaustila 3 virtakaavio. /15/.....	39
Kuva 24. Hyllystöhissi ja kuormankäsittelijävaunu.....	40
Kuva 25. Kuormankäsittelijävaunu	41
Kuva 26. Superkondensaattorimoduuli /16/	44
Taulukko 1. Akun ja tuplakerrossuperkondensaattorin ominaisuuksien vertailu. /1/	18

Taulukko 2. Energianjakelu passiivisissa ja aktiivisissa hybridijärjestelmissä /1/	23
Taulukko 3. Käyttötoimintatilat. /15/	31
Taulukko 4. Kuormankäsittelijän työsyklin parametrit	42
Taulukko 5. Superkondensaattorimoduulin parametrit	43
Taulukko 6. Eliniän laskennan käyttöarvot	45
Taulukko 7. Moduulin tehokulutusvaste	45
Taulukko 8. Arvioitu elinikä.....	46

LYHENTEET

HESS = Hybrid energy storage system

SOC = State of charge

1 JOHDANTO

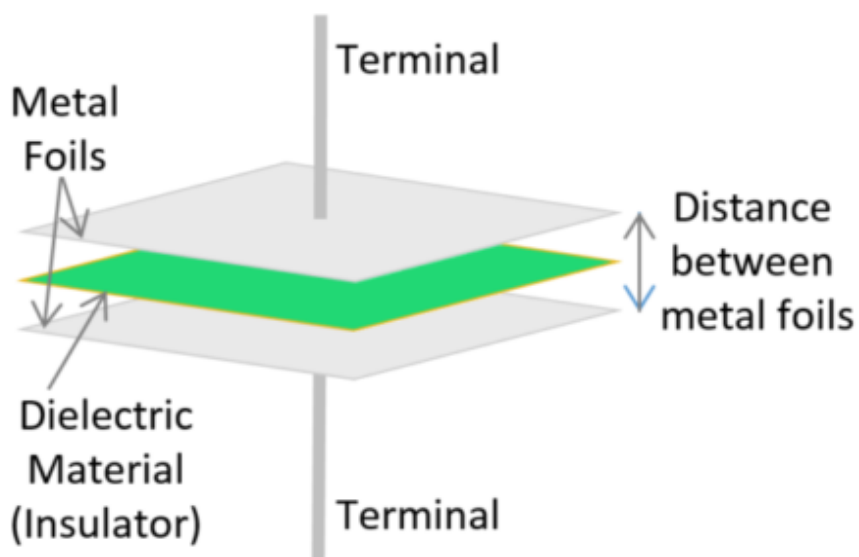
Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia superkondensaattorin käyttöä sekä soveltuvuutta energiasyöttöjärjestelmässä korkeavarastossa liikkuvalla kuormankäsittelijävaunulle logistiikka-, varastointi- sekä pakkausjärjestelmissä Pesmel Oy-yrityksessä. Tutkimuksessa tarkastellaan miten kaapelisyötöllä toteutetun sähköistystekniikan korvaaminen HESS-järjestelmällä vaikuttaisi järjestelmätehokkuuteen. Hyvä energiatiheys, optimaalinen tehoherkkyys, pitkä elinikä, luotettavuus sekä turvallisuus ovat tärkeitä kriteerejä akkua ja superkondensaattoria valittaessa HESS-järjestelmään. Uudelleenladattavat akut, kuten litiumioniakut, ovat hyvä vaihtoehto syöttöjärjestelmään korkeiden energiatiheyksien ja suurien syklikestoitusvuoksi. Superkondensaattorimoduulin ansiosta järjestelmä kykenee toimimaan kuormankäsittelijöiden vaihtelevilla kuormituksilla ja rajoittamaan akun tehovaatimuksia ylläpitämällä optimaalisen energiatasapainon järjestelmässä. Ohjausstrategian mukaisen sääntöpohjaisen ohjauksen avulla superkondensaattorin lataustilan tasapainoa voidaan säädellä optimaaliselle tasolle. Akkutekniikan nopeasta kehityksestä huolimatta, haasteina ovat kuormankäsittelijän asettamat vaatimukset, kuten pitkä akun käyttöaika, suuret lataus- ja purkaussyklit sekä kiinteisen jarruenergian tehokas varastointi hyvällä hyötysuhteella. Uudelleenladattavat akut, erityisesti litium-ioniakut, ovat erinomaisia energiavarastoja korkean energiatihedden ja syklikestoitusvuoksi.

HESS-järjestelmälle käytetään kaksisuuntaista DC/DC-muuntajaa tehon virtausuuntien hallintaan energialähteestä kuormaan kiihdytyksissä sekä regeneraatioenergian hallintaan kuormasta energialähteeseen. HESS voidaan jakaa käytettävän DC/DC-muuntimen mukaan passiiviseen tai aktiiviseen järjestelmään.

2 KONDENSAATTORI

2.1 Kondensaattorin rakenne ja ominaisuudet

Sähkökondensaattorissa on kahden johtavan levyn muodostama ”voileipä” rakenne, joka ympäröi dielektristä ainetta eli eristintä. Eristinaineena käytetään tavallisesti ilmaa, öljytyä paperia, posliinia, titanaattia tai lasia. Ulkoinen jännite-ero kohdistuu molempiin levyihin aiheuttaen latausprosessin. Latauksen aikana positiiviset varaukset kertyvät vähitellen yhdelle levylle, ja vastaavasti negatiiviset varaukset toiselle levylle. Kun ulkoinen jännite-ero poistetaan, sekä positiiviset että negatiiviset varaukset pysyvät vastaavissa elektrodeissaan. Tällä tavalla kondensaattorilla on rooli sähkövarausten erottamisessa. Kummankin elektrodin jännite-eroa kutsutaan kondensaattorin kennojännitteeksi. Jos nämä elektrodit on kytketty johtimella kuorman kanssa tai ilman, tapahtuu purkautumisprosessi, jossa positiiviset ja negatiiviset varaukset yhdistyvät vaiheittain johtimen läpi. Tällä tavoin kondensaattorilla on rooli varauksen varastoinnissa ja toimittamisessa. /1/



Kuva 1. Kondensaattorin perusrakenne /9/

2.2 Kondensaattorin kapasitanssi suhteessa jännitteeseen ja virtaan

Kondensaattorin läpi kulkevaa sähkövirtaa voidaan kuvata sen kuljettamien kondensaattorilevyihin asettuvien sähkövarausten määränä suhteessa aikaan. Kondensaattorin kyky sitoa varauksia levyjensä välille on verrannollinen suhteessa jännitteeseen, jota voidaan kuvata seuraavalla kaavalla:

$$i_{(t)} = C \frac{d_u}{d_t} \quad (1)$$

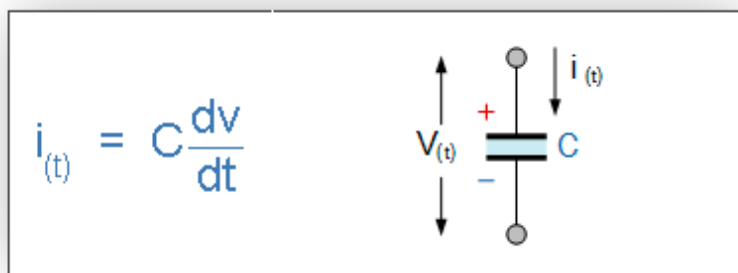
jossa $i_{(t)}$ = Sähkövirta suhteessa aikaan

d_u = Hetkellinen vaikuttava jännite

d_t = Hetkellinen aika

C = Kapasitanssi

Kun levyjen välinen jännite suurenee tai pienenee suhteessa aikaan, kondensaattorilevyjen läpi kulkeva sähkövirta varaa tai poistaa varauksia levyiltä vaikuttavajännitteen mukaisesti. Yhtälön mukaan voidaan havaita että jännitteen pysyessä vakiona virran arvo on nolla. Näin ollen kondensaattorissa ei tapahdu jännitteen muutosta eikä vaikuttavaa sähkövirtaa tai varausten liikettä. Jännitteen ja virran vaikutusta kapasitanssiin havainnollistetaan kuvassa 2. /10/



Kuva 2. Jännitteen ja virran suhde kapasitanssiin /10/

2.3 Kapasitanssi ja energian varastoituminen

Jännitettä syötettäessä kondensaattorin johdinlevyjen pinnoille jakautuvat varaukset muodostavat levyjen välille potentiaalieron. Kaavan 2 mukaisesti varaukset ja niiden välisen potentiaalieron suhdetta kuvaa kapasitanssin vakio. /1/

$$Q = CU \quad (2)$$

jossa $Q =$ Elektrodiin $-Q$ ja $+Q$ sähkövarauksien itseisarvojen summa

$C =$ Kapasitanssin suhteellisuusvakio

$U =$ Elektrodiin välinen potentiaaliero eli jännite

Kondensaattorin kapasitanssi kuvaa indusoituneiden varausten määrää levyjen välisen potentiaalieron mukaan, joissa kapasitanssi riippuu myös johdinlevyjen geometriasta. Kapasitanssia kuvaa kaavan 3 mukaisesti faradi-mittayksikkö, jossa faradi mittaa sähkövirran kuljettamien varausten määrän ampeerin sähkövirrassa sekunnin aikana suhteessa jännitteeseen. /1/

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3)$$

jossa $\epsilon_0 \epsilon_r =$ Dielektrinen vakio

$d =$ Levyjen välinen etäisyys

$A =$ Levyjen pinta-ala

Ennen kondensaattorin latausta levyjen välinen nettovaraus on nolla. Ulkoisen syötön aiheuttama potentiaalimuutos muodostaa varaukset levyihin. Syöttölähteen tekemä työ siirtää energiaa sähköpotentiaalienergiaan, joka varastoituu sähkö-

kenttään dielektrisen eristemateriaalin sisäpuolelle. Energia varastoituu kondensaattorin sähkökenttään kaavan 4 mukaisesti /1/ -

$$W = \frac{1}{2} * CU^2 \quad (4)$$

jossa $C =$ Kondensaattorin kapasitanssi

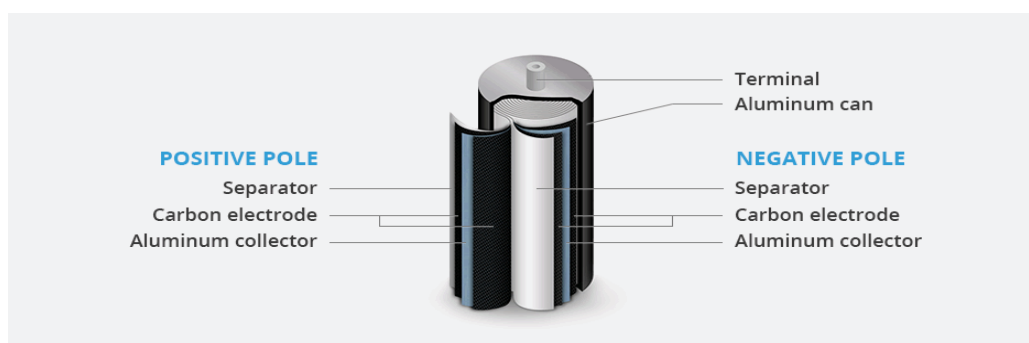
$U =$ Jännitteen potentiaaliero

3 SUPERKONDENSAATTORI

Superkondensaattori joka tunnetaan myös nimillä ultrakondensaattori tai sähkökemiallinen tuplakerroskondensaattori, on kehittynyt kondensaattorityyppi, joka voi varastoida energiaa moninkertaisesti enemmän tavallisiin kondensaattoreihin verrattuna. Superkondensaattorin elektrodien suuren pinta-alan ansiosta sillä saavutetaan suurempi energiatiheys ja tehoherkkyys verrattuna tavanomaiseen kondensaattoriteknologiaan. Superkondensaattorilla on merkittäviä ominaispiirteitä, kuten nopea latauskyky, pitkät lataus- ja purkaussyklit sekä laaja lämpötilan toiminta-alue. /1/

3.1 Superkondensaattorikennon rakenne

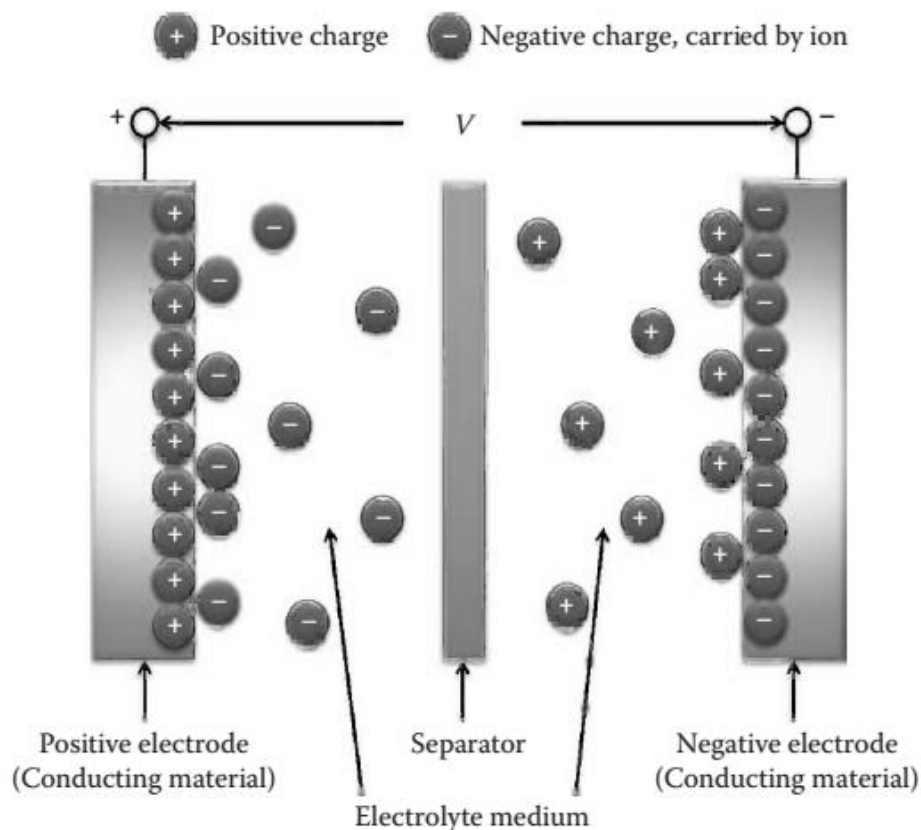
Superkondensaattorin rakenne koostuu kahdesta elektrodista, joiden välillä on sähköä johtava elektrolyytti. Elektrolyytti voi olla liuos tai kiinteä johdinaine. Liuoksen elektrolyyttien inertti huokoinen erotinlevy mahdollistaen ionivarausten kuljettajien läpi pääsyn muodostaen johtavan ionivirran. Kiinteä elektrolyytti toimii kahdella eri funktiolla. Se johtaa ioneja sekä erottaa positiivisen elektrodin negatiivisesta elektrodista. Superkondensaattoreiden elektrodeissa käytetään sähkökemiallisia materiaaleja, joista yleisimpiä ovat hiilipohjaiset nanohiukkaset sekä komposiittimateriaalit. Näissä materiaaleissa voidaan saavuttaa suuren pinta-alan ansiosta korkeat kapasitanssit. Virrankerääjässä käytetään yleisimmin metallia, jolle hiili- tai komposiittihiukkaset toimivat elektrodikerroksena. /1/



Kuva 3. Superkondensaattoripariston rakenne /2/

3.1.1 Sähköinen tuplakerros

Superkondensaattorin ydinkäsite perustuu kondensaattorin johtimen ja elektrolyytin välille muodostuvaan sähköstaattiseen tuplakerrokseen. Elektrodin ja elektrolyyttiliuoksen rajapinnalle kehittyvä positiivinen tai negatiivinen varaus tasapainottuu vastakkain varautuneiden liuosionien kerääntyessä lähelle elektrodin pinta, Coulombin voiman mukaisesti, muodostaen sähköisen tuplakerroksen. /1/



Kuva 4. Superkondensaattorin sähköstaattinen tuplakerros. /1/

3.1.2 Superkondensaattorin ja akun vertailu

Superkondensaattorit ovat ottaneet harppauksia akun rinnalla energianvarastointilaitteiden kilpailussa suuren tehoherkkyyden ja lyhyen aikavälin energiavarastoinnin ansiosta. Superkondensaattori varastoi sähköenergiaa sähkökenttään, mutta akut kemiallisen reaktion välityksellä. Tämä mahdollistaa superkondensaattoreis-

sa moninkertaisesti nopeamman purkaus- ja latausajan kuin akuissa. Vaativissa sovelluksissa superkondensaattorit tulevat tarpeeseen nopean energiavarastoinnin ominaisuuksien puolesta joita ovat:

- Korkea tehoherkkyys, minkä vuoksi ne voivat syöttää kuormaan tuhansia ampeereja alle 10 sekunnin aikaikkunassa.
- Eivät koskaan aiheuta rikkoutuessaan tulipaloa vaan kuluvat loppuun hyvin ilman paloreaktiota.
- Eivät sisällä myrkyllisiä kemikaaleja tai metalleja.
- Korkea lämpötilatoleranssi, minkä vuoksi ne kestävät hyvin eri olosuhteissa.
- Rakenteellisilta ominaisuuksiltaan superkondensaattori on kevyempi kuin akku.

Akut vastaavasti tunnetaan hitaina energialähteinä, joiden tyypillisiä ominaisuuksia ovat:

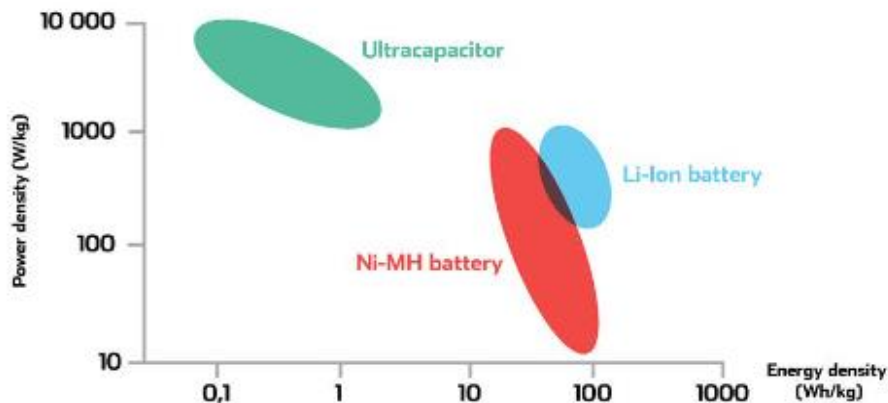
- Tulipaloriski, mikä tosin moderneissa akuissa on harvinaista.
- Sisältää myrkyllisiä ympäristölle haitallisia kemikaaleja.
- Toimivat heikosti ääriämpötila-alueilla.
- Herkkä heikkeneminen ylilatauksilla sekä 0 % lataustilassa.
- Heikkenevät suoritettaessa nopeilla latausajoilla.
- Aiheuttavat lämpöhäviöitä 70-80 % ominaishyötysuhteella.
- Latauksen ja purkauksen kesto on keskimäärin muutaman tunnin.
- Toimivat pitkään suuren energiaherkkyuden vuoksi. /3/

Kaksi reaktiota sähkökemiallisen energian muuntamiseen ja varastointiin ovat: (1) tuplakerros superkondensaattorin energian (varauksen) suoraan tallentamisen elektrodi- ja elektrolyyttiliuoksen rajapintaan, josta edelleen energian syötön nopeasti palautuvan ei-faradisen prosessin kautta kuormaan; (2) käyttämällä akkuja tai polttokennoja energian varastointiin kemiallisiin materiaaleihin, joista energia toimitetaan faradisten hapetus- ja pelkistysreaktioiden kautta. /1/

Suurin ero akun, polttokennon ja tuplakerrossuperkondensaattorin välillä on se, siirretäänkö varaus (elektroni tai ioni) elektrodi- ja elektrolyyttirajapinnan kautta. Latauksen ja purkauksen aikana tuplakerrossuperkondensaattori ei siirrä mitään latausta rajapintojen läpi. Paristoissa suurin prosessi on latauksen siirto elektrodi- ja elektrolyyttirajapinnan kautta, mikä fundamentaalisesti erottaa nämä energianvarastointilaitteet toisistaan. /1/

Tuplakerrossuperkondensaattoreilla on paljon suurempi tehotiheys kuin paristoilla tai polttokennoilla, eli kyky ladata sekä purkaa tehoa suurempia määriä massayksikkö kohti. Superkondensaattoreissa olevat varaukset varastoituvat hiilihiukkasten pinnan ja elektrolyytin väliseen rajapintaan. Hiilihiukkasten sisällä ei tapahdu varausta. Akussa varaukset kuitenkin varastoidaan pääasiassa elektrodin aktiivisen materiaalian sisällä. Akussa jokainen aktiivinen atomi elektrodin sisällä kantaa varausta. Tämän vuoksi akun energiatiheys eli kyky varastoida enemmän energiaa massayksikköä kohti on paljon suurempi kuin superkondensaattorin energiatiheys, kun niiden paristojännitteet ovat samat. /3/

Superkondensaattoreilla on kuitenkin suurempi tehotiheys kuin akuilla. Superkondensaattoreiden lataus- ja purkausprosessissa tapahtuu varauksen fyysinen erottaminen ja yhdistämisprosessi; akun lataaminen ja purkaminen saavutetaan sähkökemiallisella hapetus- ja pelkistymisprosessilla. Varauksen fyysinen erottaminen ja yhdistäminen tapahtuu teoreettiselta näkökannalta äärettömän nopeasti, jos superkondensaattorissa ei ole vastaavaa sarjaresistanssia. Tämä viittaa siihen, että tehonsyöttö superkondensaattorissa on erittäin nopea. Akussa hapettumis- ja pelkistysreaktioiden nopeudet ovat rajalliset siten, että sähkökemiallisen reaktion nopeudet rajoittavat tehonsiirtoa. Tämän vuoksi superkondensaattoreiden energian varastointi ja purkautuminen tehonsyötössä ovat paljon nopeampia kuin paristoissa, mikä viittaa superkondensaattoreiden paljon suurempiin tehoherkkyytlukemiin verrattaessa akkuihin. Kuvassa 5 havainnollistetaan superkondensaattorin ja akun tehoherkkyyttä ja energiatiheyttä. /1/



Kuva 5. Superkondensaattorin ja akun teho- ja energiaherkkyykskaavio. /3/

Superkondensaattoreiden haittapuolena ovat niiden merkittävät vuotovirrat, jotka eivät tosin vuoda superkondensaattoreita täysin loppuun. Akuilla nämä vuotovirrat ovat vastaavasti paljon pienemmät. Superkondensaattoreissa lataus- ja purkausajat ovat paljon lyhyempiä kuin akuissa. Edellä mainitun varauksen fyysiset erotus- ja yhdistämisprosessit ovat superkondensaattoreissa paljon nopeampia kuin akun sähkökemialliset hapetus- ja pelkistymisvaiheet. Superkondensaattoreissa on tämän vuoksi nopea purkaus- ja latausaika, joka kestää tyypillisesti alle minuutin. Superkondensaattoreissa elektrodin rakenne ei muutu jokaisen syklin aikana, mutta akuissa elektrodikerroksen rakenne muuttuu hieman jokaisessa syklin sivuvaikutuksen vuoksi. Tämä aiheuttaa asteittain aktiivisen elektrodimateriaalin vähenemisen, mikä johtaa nopeaan suorituskyvyn heikkenemiseen, ja siksi superkondensaattoreilla on paljon pidemmät käyttösyklit kuin akuilla. /1/ Akuilla elinkaari rajoittuu 2000-3000 lataus- ja purkaussykliin sekä joskus useampaan, riippuen käytön aiheuttamasta rasituksesta, kun taas superkondensaattoreilla vastaavasti päästään 500 000 - 1 000 000 lataus- ja purkaussyklin lukemaan. /3/

Taulukko 1. Akun ja tuplakerrossuperkondensaattorin ominaisuuksien vertailu. /1/

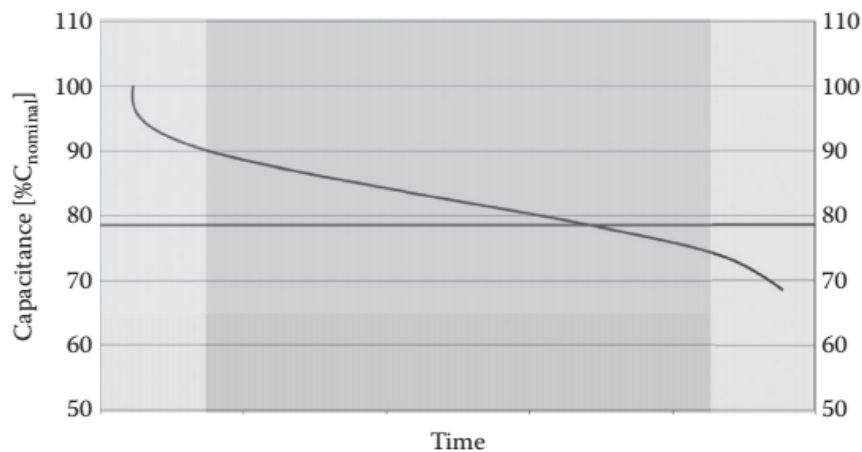
Property	Battery	Electrochemical Double-Layer Supercapacitor
Energy density (Wh.kg ⁻¹)	10 to 300 (1000 demonstrated)	1 to 10 (100 demonstrated)
Charge time	1 to 5 hr	0.3 to 30 sec
Discharge time	0.3 to 3 hr	0.3 to 30 sec
Power density (W.kg ⁻¹)	50 to 200	1000
Cycle efficiency	0.7 to 0.85	0.85 to 0.98

Superkondensaattorin sisäinen kennojännite nousee tai laskee latauksen ja purkauksen yhteydessä, kun taas akulla kennojännite pysyy vakiona em. prosessien aikana. Näin superkondensaattorien lämmönhallinta on helpompaa, ja siten superkondensaattorit ovat turvallisempia kuin akut. /3/

Näillä molemmilla energiavarastointilaitteilla on kuitenkin yhä tänä päivänä keskeinen rooli energian varastointi- ja muuntamissovelluksissa. Alhaisen energiatiheyden vuoksi superkondensaattorit eivät kykene korvaamaan akkuja; näin ollen superkondensaattoreita käytetään eri sovelluksissa akkujen yhteydessä. /1/

3.1.3 Superkondensaattorin elinikä ja lataussykli

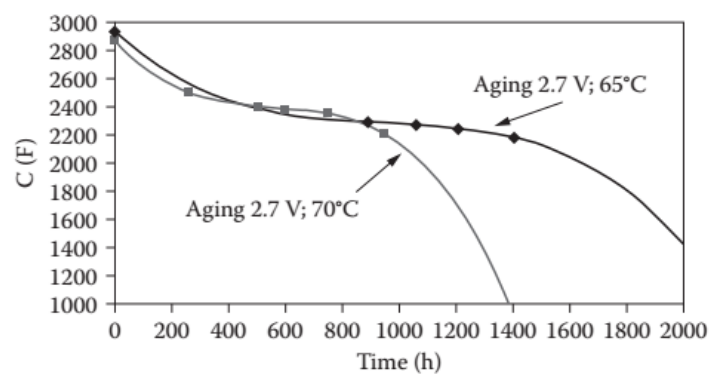
Superkondensaattorin jatkuva lataaminen ja purkaminen vakiovirralla johtaa kapasitanssin eksponentiaaliseen hajoamiseen, mikä johtaa sisäisen vastuksen kasvuun /1/. Kuvassa 6 nähdään yksityiskohtaisesti superkondensaattorin elinkaaren aikana tapahtuva kapasitanssin lasku, joka johtaa kapasitanssin heikkenemiseen. Vaakasuora viiva kuvaa suhteellista sallittua kapasitanssihäviön raja-arvoa. /1/



Kuva 6. Superkondensaattorin elinkaari. /1/

3.1.4 Lämpötilan vaikutus superkondensaattoriin

Superkondensaattorin suorituskykyyn vaikuttaa ympäristön aiheuttama lämpötila, suuritehoiset käytöt, tai käyttö korkeilla taajuuksilla jatkuvien käyttösykliä aiheuttamat sähkövirtavastukset. Lämpötilan nousun ja laskun välillä on kompromissi missä käyttölämpötilan nousu pienentää elektrolyytin resistanssia sen liikkuvuuden ja jakautumisen vuoksi kun taas käyttölämpötilan laskulla on päinvastaiset seuraukset. Korkea lämpötila aiheuttaa kuitenkin kapasitanssin ja suorituskyvyn heikkenemisen. Käyttölämpötila, jännitteet ja käytön ylläpidetty latausjännite tietyn ajan kuluessa kasvattavat sisäistä vastusta ja kapasitanssin laskua. Vain 5°C lämpötilan nousu voi riittää aiheuttamaan merkittävän käyttöiän heikentymisen. Normaalisti optimaalisen superkondensaattorin kapasitanssista häviää alle 10 % keskimääräisen eliniän (<1 000 000) sykliä jälkeen. Kuva 7 esittää vakio- lämpötilavaikutuksia ajan suhteen kapasitanssiin. /1/



Kuva 7. Superkondensaattorin heikentyminen vakiolämpötiloissa. /1/

4 SUPERKONDENSAATTORI-AKKU JÄRJESTELMÄ

Superkondensaattoreiden nopean kehityksen vuoksi hybridijärjestelmää tarkastellaan vaihtoehtona työkoneiden perinteisen sähköistyksen sijasta. Laitteiden jatkuvan työtilan aiheuttama kuormitus, akkujen pitkät toiminta-ajat sekä korkeat lataus- ja purkaussyklivaatimukset kineettisen energian varastoinniseksi sekä tehopiikkien kattamiseksi maksimaalisella hyötysuhteella, tuovat haasteita sähkölaitteille sovellettavaan hybridijärjestelmään. Toisena ongelmakohtana seuraa järjestelmän komponenttien hinnan sekä painon suhteellisuus sovellettavan kohteen mukaan. /1/

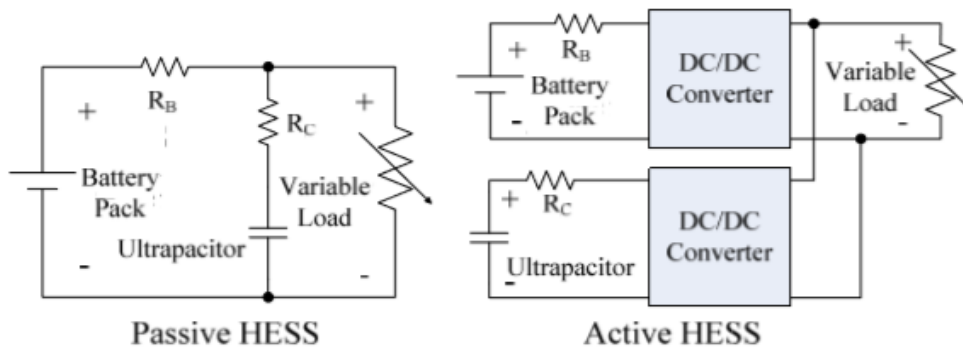
4.1 Akun ja superkondensaattorin hybridikäyttö

Superkondensaattoria hyödynnetään akkuteknologian rinnalla eli hybridikäyttönä sen käyttöä vahvistavien etujen vuoksi. Useat menetelmät mahdollistavat niiden integroinnin, mutta jokaisella mallilla on niille ominaiset parametrit järjestelmän toiminnan kannalta sekä usein ne vaativat optimointia hallittavuuden vuoksi. Akulla ja superkondensaattorilla on synergisessä hybridikäytössä toisiaan täydentäviä ominaisuuksia. Hybridi energijärjestelmän edut perustuvat ensisijaisesti sähköenergian varastoinnin parantamiseen, mutta myös energian varastointilaitteiden välisen synergian säilyttämiseen. Tavalliseen primäärienergianlähteeseen verrattuna, superkondensaattori soveltuu paremmin korkean tehopulssin kohteisiin, mutta yhteiskäyttö lisää kytkentäjärjestelmän energiatehokkuutta, järjestelmän huipputehoa ja pidentää sen käyttöikää, esimerkiksi kiihtyvyyden ja jarrutuksen tehoiikkitarpeiden käsittelyyn. Tällaista hybridijärjestelmää sovelletaan tavallisesti paristojen sarja- ja rinnankytkentänä käyttöjännitteen mukaisesti. /1/

4.2 Passiivisen ja aktiivisen ohjausjärjestelmän vertailu

Aktiiviohjatulla hybridijärjestelmällä on tehovasteen mukaan parempi suorituskyky verrattuna passiiviohjattuun hybridijärjestelmään, koska aktiiviohjaus mahdollistaa superkondensaattorin vastaavan kuorman huipputehosta, kun akku kattaa keskimääräisen kuorman osuuden sovellettaessa sähköisiin laitteisiin, joissa kuormitus vaihtelee suuresti. Passiivisella hybridijärjestelmällä on kuitenkin sille

ominaisia hyötyjä eri sähkölaitesovellutuksissa ja tiettyjä etuja aktiiviohjattuun hybridijärjestelmään verrattuna. Passiiviohjatun hybridijärjestelmän topologia on yksinkertainen ja helppo toteuttaa. Kuvassa 8 nähdään aktiivi- ja passiiviohjatun hybridikäytön topologiavertailu.



Kuva 8. Superkondensaattorin heikentyminen vakiolämpötiloissa. /1/

Yhden tai kahden suuritehoisen DC-DC-muuntimen poisjättäminen tuo merkittävästä kustannuksista sähköjärjestelmää toteuttaessa. Aktiiviohjatun hybridijärjestelmän on muutettava DC-DC-muuntimien PWM-käyttöaste vaihtelevan kuormitustarpeen mukaan laitteen ajoskenaarioiden muuttuessa, joten ohjausalgoritmin tulisi olla riittävän vakaa käsittelemään kuorman muutoksia. Passiiviohjatulla hybridijärjestelmällä ei ole tätä ongelmaa ja tästä syystä passiiviohjattua hybridijärjestelmää voidaan pitää luotettavampana kuin aktiiviohjattua hybridijärjestelmää. Passiiviohjatun hybridijärjestelmän suorituskykyä voidaan parantaa valitsemalla superkondensaattorit, joilla on suuri kapasitanssi ja pieni sisäinen vastus. Simulaatiotutkimusten mukaan passiiviohjatulla hybridijärjestelmällä on suurempi energiatehokkuus kuin aktiiviohjatulla hybridijärjestelmällä, sillä aktiiviohjatulla hybridijärjestelmällä tapahtuu energiahäviöitä DC-DC-muuntimissa, jotka aiheuttavat suurimman osan sen kokonaisenergiähäviöistä. /4/

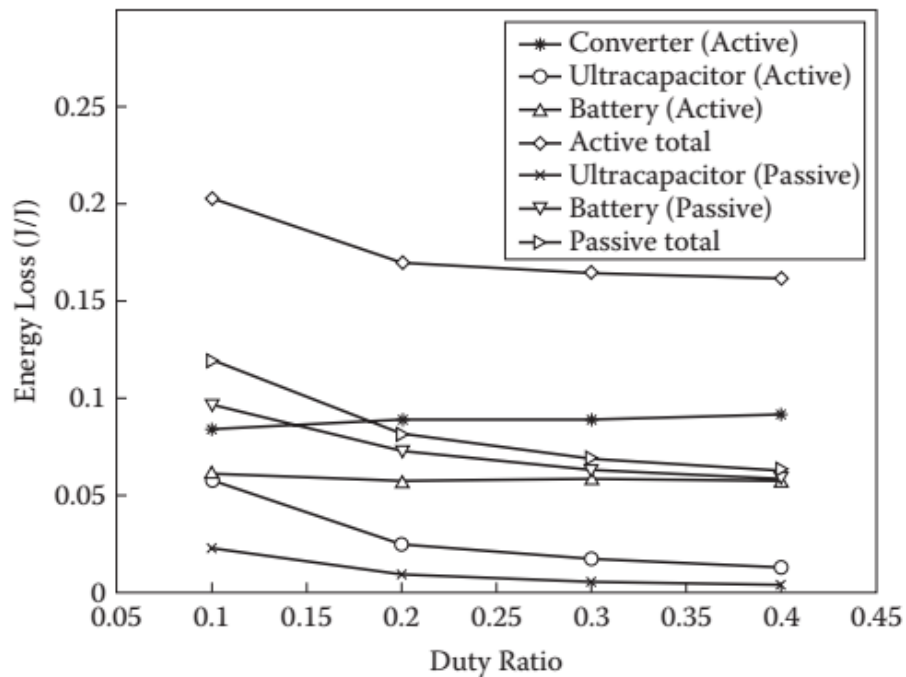
Gao, Dougal ja Liu suorittivat passiivi- ja aktiiviohjauksen purkaussyklin sekä tehokapasiteetin vertailevan tutkimuksen ajan suhteen hybridijärjestelmissä kuvan

10 topologiaa soveltaen. Tutkimuksen simulaatio suoritettiin virtuaalisen testialustan ympäristössä, jossa käytettiin Sony US18650-litiumioniakkua ja Maxwell PC100-superkondensaattorin malleja ennalta määritetyllä laitteistoprototyypillä. Simulaation tulokset taulukoitiin, jotka nähdään taulukossa 2. /1/

Taulukko 2. Energianjakelu passiivisissa ja aktiivisissa hybridijärjestelmissä /1/

	Passive Hybrid	Active Hybrid
Discharge cycle time (sec)	8969	8105
Battery delivered energy (kJ)	38.11	38.69
Heat generation in battery (kJ)	3.63	2.07
Battery final temperature (K)	311	305
Energy loss in supercapacitor (kJ)	0.62	1.97
Energy received by load (kJ)	37.49	33.87
Energy loss in converter (kJ)	n/a	2.85
Power source efficiency	89.80%	83.10%

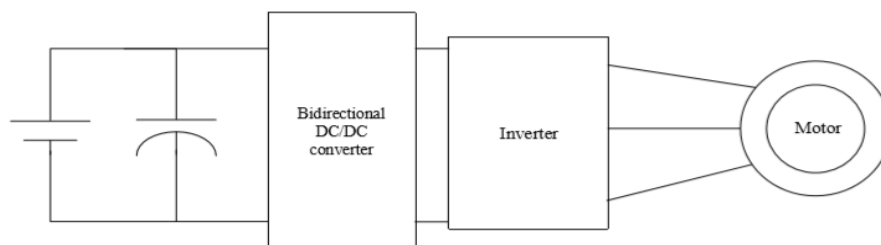
Tämä akun ja superkondensaattorin kytkentä osoitti joitain parannuksia passiivisen hybridin tehokapasiteettiin, jonka mitattiin olevan 2,3-kertainen yksittäiseen akkuun verrattuna. Nelinkertainen tehokapasiteetin lisäys oli mahdollista toteuttaa sisällyttämällä säädetty DC/DC-muunnin. Lisäksi passiiviohjaukseen verrattuna purkausaikaa pieneni noin 14,4 minuuttia, jotta akku siirtyy täydestä varauksesta purkautumiseen. Kuitenkin, aktiivisen ohjauksen käyttöönoton parannetun tehon ja akun häviöiden vähentämisen edut kuitataan kustannuksin. Lyhentynyt käyttöaika ja energiahäviöt aiheutuvat muuntimen toiminnan aiheuttamasta tehohäviöstä ja superkondensaattorin häviöt sen toiminnasta suurilla virroilla. Kuvassa 9 havaitaan energiahäviön arviointi työjakso eli purkaus sekä latausjakson funktio suhteessa koko työjakson pituuteen sekä passiivisille että aktiivisille hybridipiireille /1/.



Kuva 9. Passiivisen ja aktiivisen hybridijärjestelmän energiahäviöt suhteessa työjaksen energiaan. /1/

4.3 Superkondensaattori-akkujärjestelmän passiiviohjaus

Passiiviohjatulla HESS:llä on ainoastaan akkua soveltavaan syöttöön verrattuna lukuisia etuja, joita ovat parempi hyötysuhde, korkeampi tehopiikin vaste ja akun pidempi käyttöikä. Superkondensaattorin ja akun passiiviohjattu rinnakkaiskytkentä on esitetty kuvassa 11. /1/



Kuva 10. Passiiviohjattu akku-superkondensaattoritopologia. /14/

Superkondensaattorin ja litiumioniakun passiivinen suora kytkentä on osoittanut simulaatiotutkimusten avulla parhaan suorituskyvyn tietyissä kuormitusprofiileissa. Näistä eduista huolimatta, suoraa kytkentää rajoittavat tietyt tekijät. Kuvan 11 topologian mukaisen kytkennän akun ja superkondensaattorin välistä energianjakoa ei voida ohjata. Kuorman ja superkondensaattorin jännitteet kelluvat akun lataustilan jännitteen mukaisesti, ja siten rajoittavat superkondensaattorin tehokapasiteettia. Tämän seurauksena myös superkondensaattorimoduulia tai kennojännitettä rajoittaa vaatimus, jonka mukaan moduulijännitteen ylärajan on oltava sama kuin akun ja siten myös moduulipankin koko rajoittuu. Toiseksi, HESSin teho rajoittuu pääosin järjestelmän molempien energialaitteiden sarjaresistanssien mukaisesti. Kiinteä virransyötön jako superkondensaattorin ja akun välillä saattaa täten aiheuttaa aaltoilua tehopulssin aikana erityisesti akussa, jossa pulssin huippu kestää loppuun asti. Ilmiö koskee erityisesti litiumioniakkuja, joissa on tavallisesti sisäiset suojapiirit, jotka sammuttavat akun tällaisessa tilanteessa. Kolmantena, hybridijärjestelmän napajännite seuraa akun arvoa sen sijaan, että se olisi säädetty oikein. Tämän vuoksi akuston täyden latauksen ja purkauksen välinen jännite-ero saattaa vaikuttaa huomattavasti kuormaan syötettävään tehoon. /1,11/

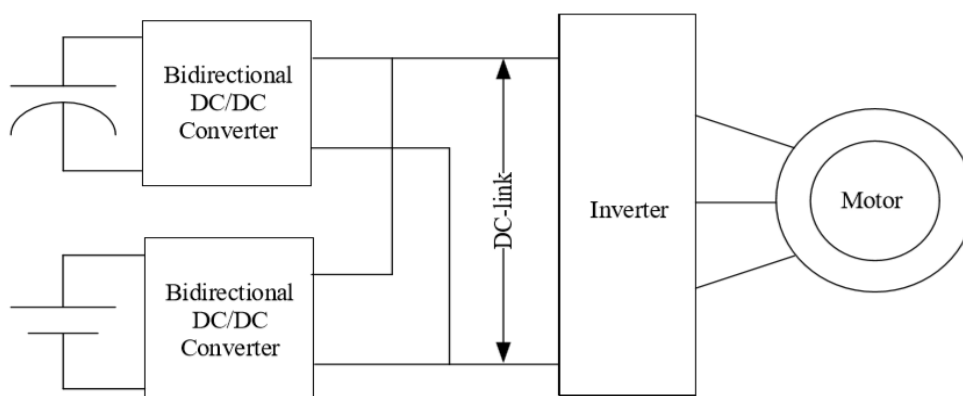
4.4 Superkondensaattori-akkujärjestelmän aktiiviohjaus

Superkondensaattorin ja akun epäsuora kytkentä DC-DC-muuntimen avulla mahdollistaa jännitteen ohjauksen suuremmaksi tai pienemmäksi. Tämä voi tarjota hybridijärjestelmälle toimintaa tukevia vapausasteita ja korjata passiivista suoraa kytkentää koskevia rajoituksia ja ongelmia. Aktiiviohjauksen hyötyjä ovat: /1/

- Aktiiviohjauksen avulla superkondensaattorin ja akun jännitteet voivat nyt poiketa toisistaan, mikä mahdollistaa erillistä joustavuutta molemmille energianvarastointilaitteille.
- Vähentynyt tehonlähteen paino huipputehon vaatimusten täyttämiseksi saavutetaan helpommin kuin passiiviohjauksella ja akun suurempi tehokapasiteetti on toteutettavissa, kun akussa kiertävä virta voi ylittää turvarajan.

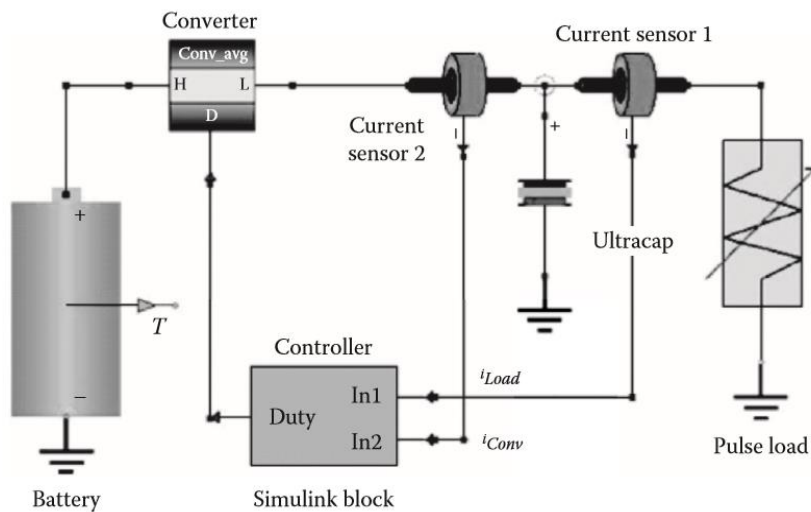
- Aktiiviohjatussa HESSissä voidaan pitää vakio napajännite ja säädetty akun lataaminen voidaan suorittaa DC-DC-muuntimella ilman erillistä laturia.
- Teholähteen ei tarvitse täyttää huipputehon vaatimuksia niin kuin passiiviohjauksella, ja akun suurempi tehokapasiteetti voidaan toteuttaa, jos akussa kiertävä virta voi ylittää turvarajan.

Topologiat vaihtelevat usein riippuen ohjausjärjestelmästä ja siihen luettujen komponenttien ja piirin rakenteen mukaisesti, mutta monien topologioiden tutkimusten tuloksena kaksisuuntainen DC/DC-muunnin on suosittu käyttömuoto HESSissä sen yksinkertaisuuden ja tehokkuuden vuoksi. DC-DC-muuntimen käyttö hybridijärjestelmässä edellyttää sen olevan kaksisuuntainen, jotta sekä purkaus- että latausjaksot voidaan hallita. Kuvassa 12 on esitetty rinnakkain kytketyn aktiiviohjatus hybridijärjestelmän rakenne. /1/



Kuva 11. Rinnakkainkytketty aktiiviohjattu HESS. /14/

Aktiiviohjauksen rakenne, säädökset ja asetukset vaihtelevat sovelluskohteen mukaan. Kuvassa 13 on esitetty aktiiviohjatus HESSin topologia, jossa nähdään tarkemmin järjestelmän ohjausrakennetta. /1/

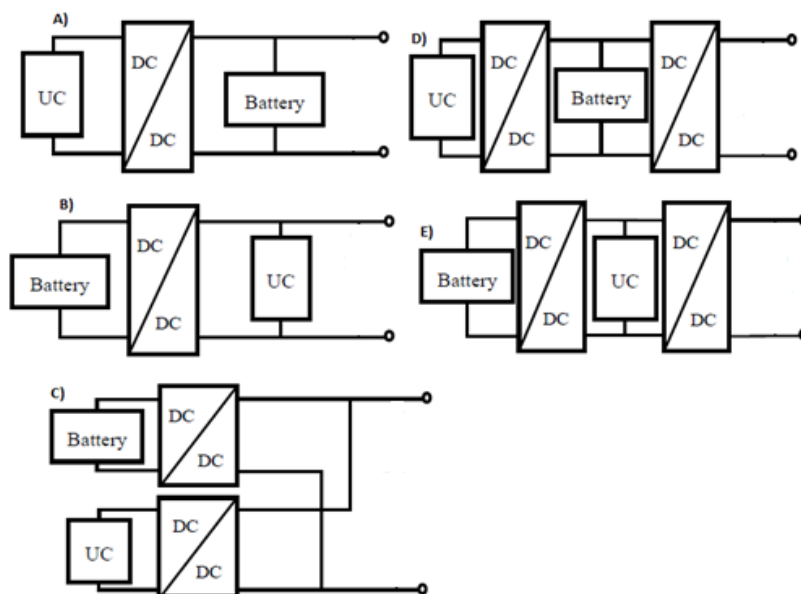


Kuva 12. Aktiiviohjattu HESS. /1/

DC-DC-muuntimen käyttöönotolla mikrokontrolleri voi toteuttaa aktiivisen ohjauksen, jossa akku purkautuu tasaisesti syöttäen kuormaa sen vaatiman keskimääräistä alhaisemman virran mukaan, riippumatta akussa tapahtuvista jännitteen vaihteluista. Tällä menetelmällä akun turvamarginaalia ei ylitetä. Superkondensaattori voi näin myös toteuttaa rinnakkaislatauksen samanaikaisesti. Suurilla kuormitusvirroilla sekä akku että superkondensaattori toimivat samanaikaisesti virran syöttämiseksi; ohjain kuitenkin määrittää akun tasaisen purkautumisen, kun superkondensaattori syöttää loppuosan tehopiikistä. /1/

4.5 Erilaisten aktiiviohjattujen topologioiden vertailu

Viime vuosien aktiiviohjattujen HESSin tutkimuksia on kohdistettu paljon kuvan 14 mukaisiin topologioihin. /15/



Kuva 13. Erilaisia aktiiviohjauksen topologioita. /15/

Kuvassa 14 a) ja d) topologioiden asettelussa superkondensaattorin ja akun välillä on kaksisuuntainen DC/DC-muunnin. Näissä topologioissa superkondensaattorin jännite ei ole sidottu akun ja DC-väylän jännitteeseen. Kohdan a) topologiassa akku on rinnankytketty suoraan DC-väylään, joten DC-väylän jännite on stabiilimpi verrattaessa b) kohdan topologiaan. Lisäksi, akkuun varastoitunut energia voidaan käyttää paremmalla hyötysuhteella, jos se ei kulkeudu DC/DC-muuntimen läpi. /15/

d) ja e) kohdan topologioissa on sisällytetty kaksisuuntainen DC/DC-muunnin tasavirtaväylän jännitteen vakauttamiseksi ja energiavarastointilaitteiden erottamiseksi väylästä. Järjestelmän kokonaishäviöt ovat kuitenkin suuremmat, koska sähköenergian on kuljettava ylimääräisen DC/DC-muuntimen kautta. /15/

b) ja e) kohdan topologioissa superkondensaattorin ja akun paikat ovat käänteiset. b) kohdassa superkondensaattoria voidaan käyttää hyödyllisemmin, mutta DC-väylän jännite vaihtelee laajalla skaalalla superkondensaattorin jännitteen mukaan.

Tavallisesti, superkondensaattorin minimi jännitteenä käytetään puolta maksimiarvosta. /15/

c) kohdan topologiassa sekä akku että kondensaattori ovat kytkettynä DC-väylään kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen kautta. Tässä topologiassa akun ja superkondensaattorin välistä tehonjakoa voidaan ohjata ja DC-väylän jännite voidaan tasa-painottaa, mutta ohjausstrategiat ovat paljon monimutkaisempia ja DC/DC-muuntimet tuovat lisäkustannuksia järjestelmään. Edellä mainituista kohdista a) kohdan topologia on käytetyin malli. Tämän topologian haittapuolena on, että DC/DC-muuntimen täytyy kestää järjestelmän korkeita tehotasoja, kun tehoa syötetään tai vastaanotetaan superkondensaattorin kautta. /15/

4.6 Ohjausperiaatteet

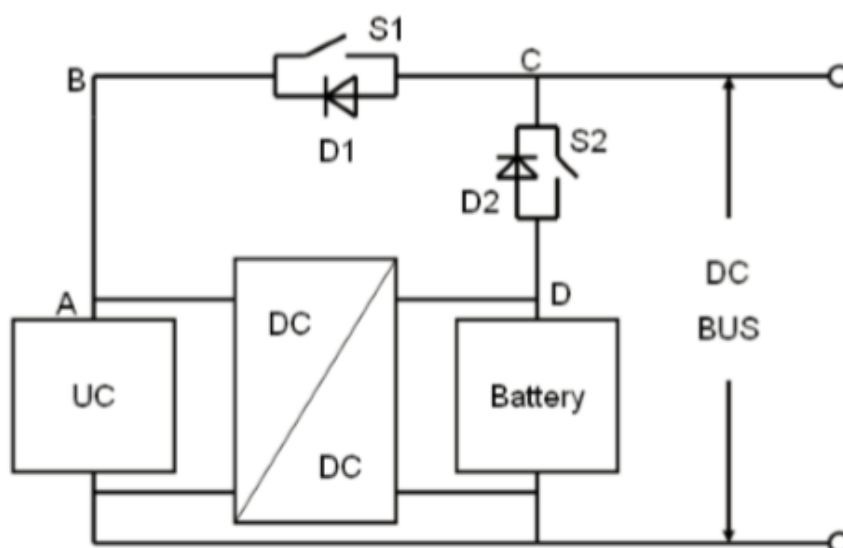
Hybridijärjestelmässä toteutettujen superkondensaattoreiden ohjausstrategioiden tavoitteena on syöttää teho superkondensaattoreilta suurilla kuormitusvaatimuksilla ja mahdollistaa pulssitehojen vastaanoton, kuten jarrutusenergian varastoiminen. Pulssinleveysmodulaation tehomuunnin, jota ohjataan pienen signaalimallinnuksen avulla, on osoitettu olevan tehokas ohjausstrategia monissa sovellutuksissa. Tässä lähestymistavassa menetellään integroitua PI-ohjainta, joka on viritetty superkondensaattorin virran siirtofunktioon järjestelmän käyttöjaksolle tai väyläjännitteelle, jotta osoitettaisiin luotettava keino sovittaa järjestelmän kuormitustehon vaatimukset. /1/

Ohjausstrategioita, joissa käytetään DC-DC-muuntimia, sovelletaan useisiin erilaisiin topologioihin, joihin liittyy tyypillisesti järjestelmävaatimuksia, kuten kustannusten ja painon sekä järjestelmän dynamiikan sovittelu sekä optimointi. Epäsuoran kytkentä- ja ohjausstrategian etuja ovat akun ja superkondensaattorin toiminta itsenäisillä jännitteillä, superkondensaattorin tehon parempi käyttö ja akun virran ohjaus, huomioiden myös muuntimen tehohäviöiden ja komponenttien määrän lisääntymisen haitat. Tavallisesti akku-superkondensaattorihybridijärjestelmää ei voida optimoida energiatehokkaaksi akun käyttöikää samanaikaisesti huomioiden; pikemminkin vain toinen näistä ominaisuuksista on asetettava ensisijaiseksi. /1/

5 SYÖTTÄVÄN ENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

5.1 HESS-mallin asetusten tarkastelu

Tutkielmassa tarkasteltiin HESS-rakennetta, jonka avulla voitiin pienentää DC/DC-muuntimen vaatimaa tehoa sekä tutkittiin kyseiseen malliin soveltaen kolmea kytkintoimintamallia. Tutkielmassa tutkittiin HESS-mallia, jossa kaksisuuntaisen DC/DC-muuntimen vaatimaa tehokapasiteettia voitiin myös vähentää. Tutkielman /15/ mukaan ehtona tässä mallissa tehokapasiteetin vähentämiselle oli akun vaatiman maksimi tehokapasiteetin nostaminen DC-väylän jännitetasolle, jotta akku voitaisiin ladata ilman DC/DC-muunninta. /12,13/



Kuva 14. HESS-mallin asettelu. /15

Tämä mallin mukaisesti superkondensaattori sekä akku on kytketty DC-väylään rinnakkaisilla diodikytkimillä. Kaksisuuntainen DC/DC-suuntaaja on sijoitettu akun ja superkondensaattorin väliin. Kahden diodin, D1 ja D2 vuoksi, superkondensaattorin jännite on suurempi tai yhtä suuri kuin akun jännite, joten DC/DC-muuntimen suurjännitepuoli on kytketty superkondensaattoriin ja pienjännitepuoli akkuun. /15/

5.2 DC-väylän jännitetasot

Komponenttien tehorajat huomioon ottaen, DC-väylän sähköteho voidaan jakaa kolmeen tasoon: matala, keskitaso ja korkea. Tehotaso on alhainen, jos DC-väylän teho on akun tehomarginaalin alueella. Tehotaso on keskitasoa, kun DC-väylän tehotaso on suurempi kuin akkupankin maksimiteho, mutta pienempi kuin akun ja DC/DC-muuntajan tehorojojen summa. Tehotaso on korkea, jos DC-väylän teho on suurempi kuin akun ja DC/DC-muuntajan tehorojojen summa. DC-väylän kolmessa tehotasossa tämä HESS-malli käyttää kolmea eri käyttötoimintatilaa. /15/

5.3 Käyttötoimintatilat

Tarkasteltavassa HESS-mallissa kytkinten S1 ja S2 asentotilat muodostavat erilaisia käyttötapoja, jotka on suunniteltu kolmelle tehotasolle. Kukin toimintatila on suunniteltu tietylle tehotasolle, mutta kutakin tilaa voidaan käyttää pienemmillä tehotasoilla. Käyttötoimintatila 1 on suunniteltu suuritehoiselle tasolle, mutta se voi sisältää keskitason ja pienen tehon taulukossa 15. luetellaan S1:n ja S2:n tilat ja kunkin toimintatilan spesifi tehotaso. /15/

Taulukko 3. Käyttötoimintatilat. /15/

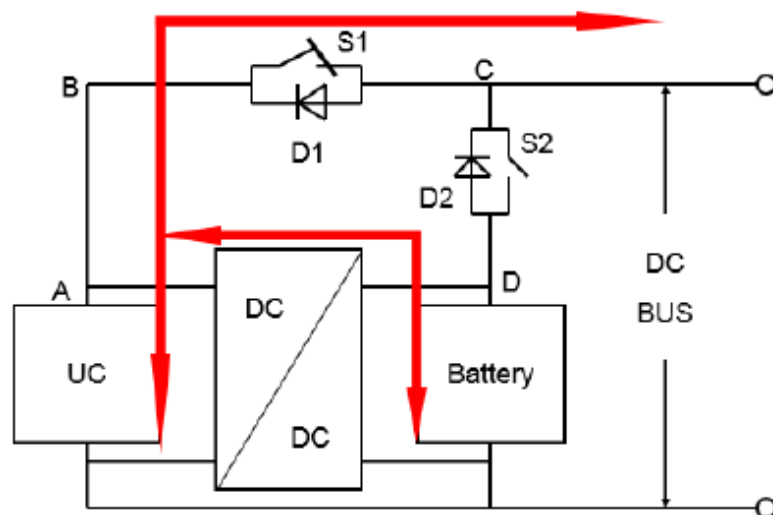
Mode	S1	S2	Power level
I	1	0	High
II	0	1	Medium
III	1	1	Low

5.3.1 Käyttötoimintatila 1

Käyttötoimintatila 1

Toimintatila 1 on suunniteltu suurille teholuokille. Tässä tilassa, kuten kuvassa 17 on esitetty, kytkin S1 on suljettu ja kytkin S2 on auki. Sähköteho energianvarastointilaitteiden ja DC-väylän välillä virtaa kytkimen S1 kautta. Jos akun SOC ja superkondensaattorin jännite ovat optimaalisilla alueilla, superkondensaattori syöttää tai varastoi kaiken sähköenergian. Jos ei, osa sähkövirrasta kulkeutuu DC/DC-muuntimen kautta akun ja DC-väylän välillä. Tässä toimintatilassa, superkondensaattoria käytetään pääenergialähteenä, ja akkua syöttöä tukevana teholähteenä. Akun tehoa voidaan ohjata rajoittavasti DC/DC-muuntajan avulla.

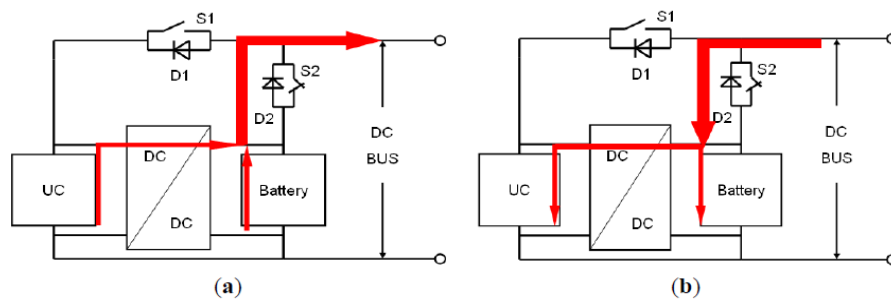
/15/



Kuva 15. Toimintatilan 1 energian kulku. /15/

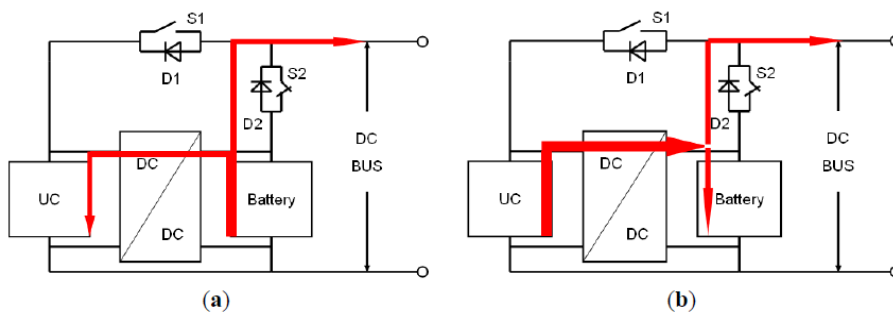
5.3.2 Käyttötoimintatila 2

Käyttötoimintatila 2 on suunniteltu keskitason teholle. Tässä toimintatilassa kytkin S1 on auki ja kytkin S2 suljettu. HESSin ja DC-väylän välillä virtaava sähkö kulkee kytkimen S2 kautta. Akku toimittaa ja varastoi virtaa asetetun rajan mukaisesti ja superkondensaattori loput tämän rajan ylittävästä osasta tehoa DC/DC-muuntajan kautta kuvan 18 mukaisesti. /15/



Kuva 16. Toimintatilan 2 energian kulku: a) HESS syöttää tehoa; b) HESS varastoi tehoa. /15/

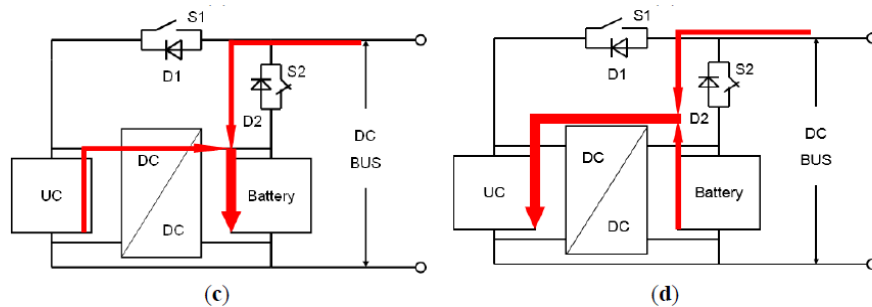
Jos akun lataustilaa tai superkondensaattorin jännitettä on säädettävä tehotason ollessa alhainen, käytetään toimintatilaa 2. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty energian kulku toimintatilassa 2 alhaisella tehotasolla. /15/



Kuva 17. Energian kulku toimintatilassa 2 alhaisella tehotasolla. /15/

Kun sähkövirta kulkee HESSistä DC-väylään ja akun lataustila on suhteessa liian korkea, on superkondensaattorin jännitettä nostettava ja sähkövirta allokoitaa

kohdan a) mukaisesti; jos superkondensaattorin jännitettä on laskettava tai akun lataustilaa on nostettava, teho jakautuu kohdan b) mukaisesti. /15/

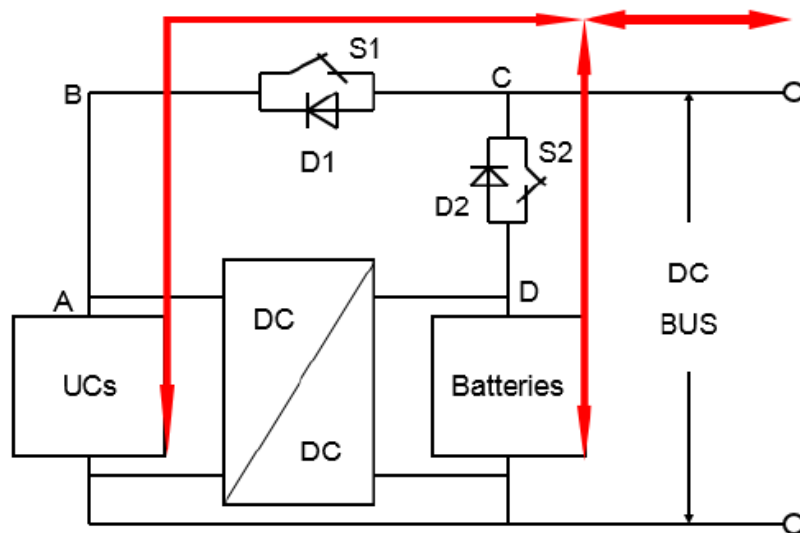


Kuva 18. Energian kulku toimintatilassa 2 alhaisella tehotasolla. /15/

Kun HESSin on varastoitava tehoa, superkondensaattorin jännitettä on laskettava tai akun lataustilaa nostettava. Tilannetta kuvaava tehon jakauma on esitetty kohdassa c). Kun akun lataustilaa täytyy vähentää tai superkondensaattorin jännitettä täytyy nostaa, teho jakautuu kohdan d) mukaisesti. /15/

5.3.3 Käyttötoimintatila 3

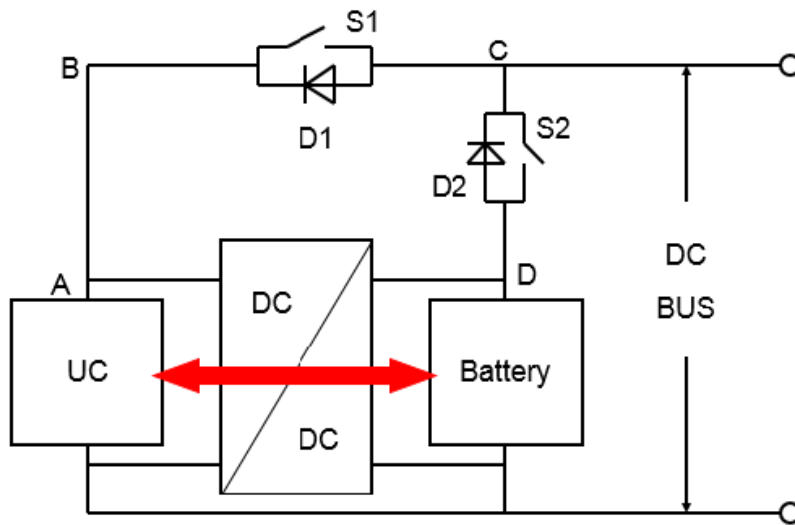
Kun DC-väylän tehotaso on pienempi kuin akun jänniteraja, voidaan käyttää toimintatilaa 3. Tässä tilassa kytkimet S1 sekä S2 ovat suljettuina, paristot ja superkondensaattori kytketään suoraan tasajänniteväylään ja järjestelmä toimii kuvan 19 topologian a) mukaisesti. HESS-laitteen tulo- ja lähtövirta jakautuu akun ja superkondensaattorin ominaisuuksien perusteella kuvan 21 mukaisesti. Superkondensaattori toimii alipäästösuodattimena jännitehäviön pienentämiseksi tässä konfiguraatiossa. /15/



Kuva 19. Energian kulku toimintatilassa 3./15/

5.3.4 Käyttötoimintatila 4

Kun DC-väylässä ei tarvita tehoa, sähköenergia siirretään akun ja superkondensaattorin välillä DC/DC-muuntimen kautta, jotta saadaan akun lataustila ja superkondensaattorin jännite haluttuihin arvoihin tilojen 1 ja 2 erikoistapauksessa. Kuvassa 22 esitetään sähkön virran kulkua akun ja superkondensaattorin välillä. /15/



Kuva 20. Energian kulku toimintatilassa 4./15/

5.4 Ohjausstrategia tarkasteltavalle HESS järjestelmälle

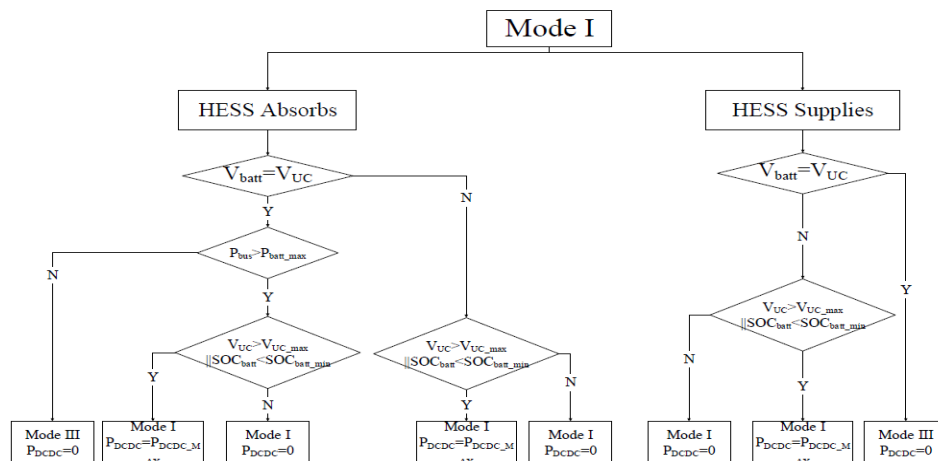
HESSin toiminta perustuu suurelta osin sen ohjausstrategiaan. Tarkasteltavalle HESSille toimintatilan vaihto toteutetaan ohjaamalla kytkimiä S1 ja S2. Tärkeä pääkohta toimintatilan vaihdossa on kytkinten sulkeminen ilman jännitteen askelmuutoksen aiheuttamista, mikä saattaa vahingoittaa sähkölaitetta. Tästä syystä kytkimet voidaan sulkea vain kun akun ja superkondensaattorin jännitteet ovat samat. /15/

Toimintatilan vaihtamisen lisäksi ohjausstrategian toinen tärkeä tehtävä on jakaa teho akun ja superkondensaattorin välillä. Ohjausstrategian tavoitteena on säätää akun teho määritellyissä rajoissa samalla sovittaen sitä DC-väylän tehotasoon. /15/

5.4.1 Ohjaustila 1

Jos edellisen vaiheen toimintatila oli tilassa 1, kytkin S1 on kiinni ja S2 auki. Kun HESSin halutaan varastoida ja jännite sekä sähköenergia akun ja superkondensaattorin välillä eroaa toisistaan, HESS pysyy toimintatilassa 1. Tässä toimintatilassa DC/DC-muunninta käytetään, kun superkondensaattorin jännite on suurempi kuin sen yläraja-arvo tai akun lataustila on vähemmän kuin sen alin raja-arvo. Jos akun ja superkondensaattorin välinen jännite on yhtä suuri, toimintatila voidaan vaihtaa kun vaadittu teho on pienempi kuin akun kapasiteetti. /15/

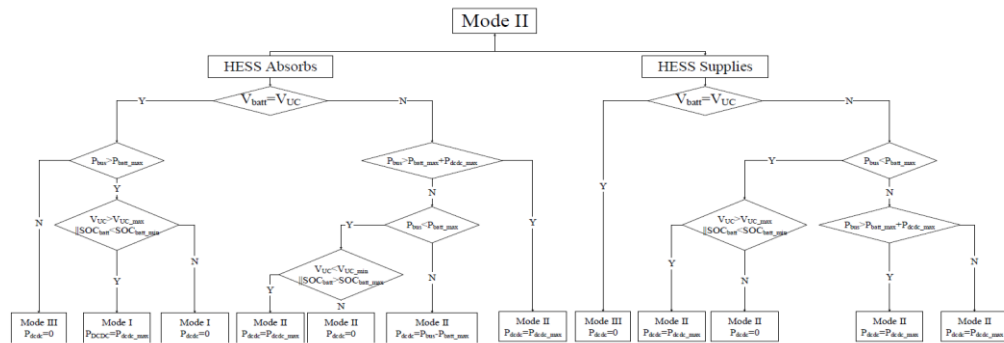
Kun HESSin on määrä syöttää ja superkondensaattorin jännite on korkeampi kuin akun, HESS pysyy tilassa 1 ja superkondensaattori syöttää sen varastoiman sähkön. Superkondensaattorin jännitteen ollessa yhtä suuri kuin akun, toimintatila vaihtuu tilasta 1 tilaan 3. Ohjaustilan 1 virtakaavio on kuvan 23 mukainen. /15/



Kuva 21. Ohjaustila 1 virtakaavio. /15/

5.4.2 Ohjaustila 2

Jos edellisen vaiheen toimintatila oli 2, akku kytkeytyy DC-väylään kytkimen S2 kautta ja superkondensaattori kytkeytyy DC-väylään kaksisuuntaisen DC/DC-muuntajan kautta. Ohjauksen virtakaavio on kuvan 24 mukainen. /15/



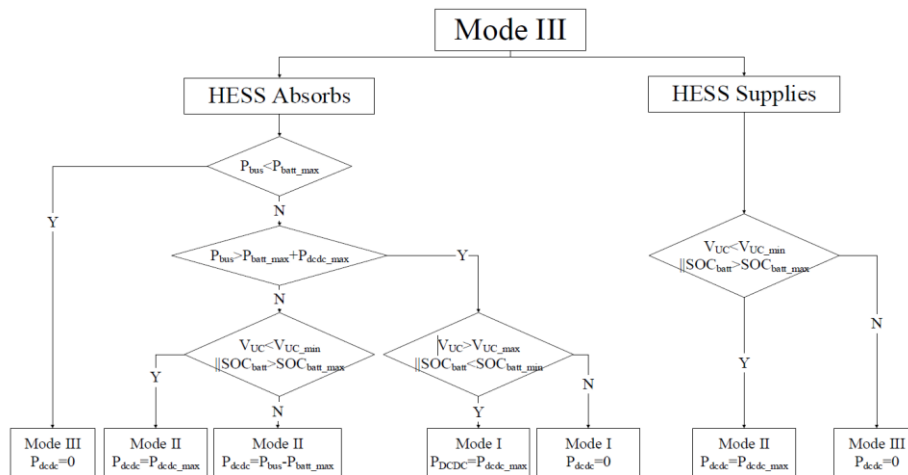
Kuva 22. Ohjaustila 2 virtakaavio. /15/

Kun HESSiä tarvitaan energian varastointiin ja akun sekä superkondensaattorin jännitteet ovat tasavertaiset, HESSin toimintatilaa voidaan vaihtaa. Syöttötehon ollessa pienempi kuin akun tehoraja, HESS siirtyy tilaan 3, jos syöttöteho on raja-arvoa korkeampi, HESS siirtyy tilaan 1. DC/DC-muuntajaa käytetään tilassa 1, kun superkondensaattorin jännite on korkeampi kuin sen yläraja, tai akun SOC on pienempi kuin sen alaraja. Kun akun ja superkondensaattorin jännitteet eivät ole yhtä suuret, HESS pysyy tilassa 2 ja DC/DC-muuntajan teho muuttuu DC-väylän jännitteen mukaan. Jos HESSin on määrä syöttää ja akun sekä superkondensaattorin jännite ovat tasavertaiset, HESS vaihtaa toimintatilaan 3, jos ei, HESS pysyy tilassa 2 ja DC/DC-muuntajan ulostuloteho määräytyy superkondensaattorin, akun ja tehotarpeen mukaan. /15/

5.4.3 Ohjaustila 3

Jos HESS on tilassa 3 sekä superkondensaattori että akku kytkeytyy DC-väylään kytkimien S1 ja S2 kautta. Kun HESSin on määrä varastoida tehoa, HESS valitsee toimintatilan DC-väylän jännitteen mukaan ja DC/DC-muuntimen ulostulojännite määräytyy superkondensaattorin ja akun senhetkisen tilan mukaan. /15/

Kun HESS on määrä syöttää ja superkondensaattorin jännite on alhaisempi kuin alaraja tai akun SOC on alle sen maksimiarvon, HESS vaihtuu toimintatilaan 2 ja DC/DC-muuntaja toimii sen maksimiteholla ja muussa tapauksessa pysyy tilassa 3. Ohjauksen virtakaavio on esitetty kuvassa 23. /15/

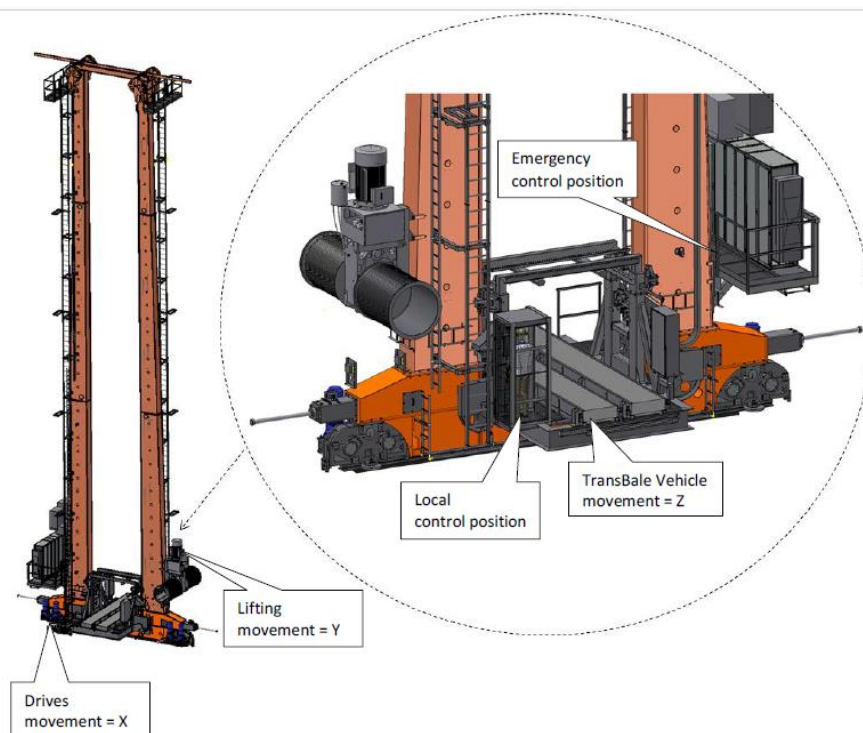


Kuva 23. Ohjaustila 3 virtakaavio. /15/

6 SUPERKONDENSAATTORIN SOVELTAMINEN KUORMANKÄSITTELIJÄN VARASTOKÄYTÖSSÄ

6.1.1 Järjestelmän esittely

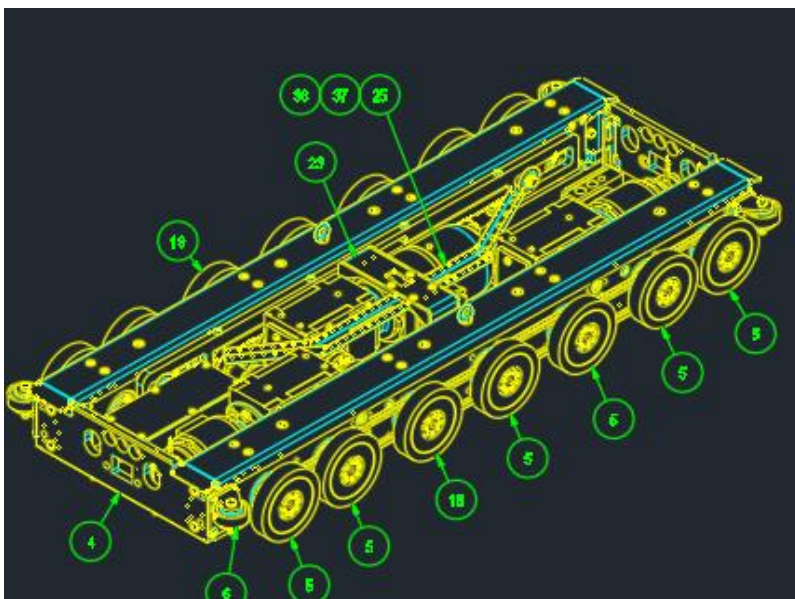
Superkondensaattoria tarkastellaan kuormankäsittelijävaunua syöttävänä energialähteenä. Kuormankäsittelijävaunu on osa varastossa liikkuvaa hyllystöhissilaitetta (Stacker crane), joka kuljettaa kuormankäsittelijävaunua korkeavaraston hyllykössä. Varastokiskoväylällä kulkevalla hyllystöhissillä on kolme mekaanista tehtävää, ajoliike (X), nostoliike (Y) ja nosturin osana olevan kuormankäsittelyajoneuvon sivuttainen ajoliike (Z). Varastoitava kuorma kuljetetaan kuormankäsittelijäajoneuvolla, jota ajetaan ylös ja alas nostoliikkeellä sekä sivuttaisella varastokanavan syöttö- ja ulosottoliikkeellä.



Kuva 24. Hyllystöhissi ja kuormankäsittelijävaunu

6.1.2 Superkondensaattorimoduulin mitoitus kuormankäsittelijävaunulle

Tarkastelussa on kuvan 23 mukainen hyllykäytävän kiskossa liikkuva kuormankäsittelijävaunu, joka on osa hyllystöhissilaitetta. Kuormankäsittelijävaunua ajetaan hyllystöhissilaitteella eri korkeuksille tavarankuljettamiseksi varastokanaviin. Kuormankäsittelijä toimii työsyklin aikana erilaisissa sähköenergiaa käyttävissä tehtävissä, jotka käyttävät energiaa vaihtelevin teholumekin.



Kuva 25. Kuormankäsittelijävaunu

Kuormankäsittelijään valittavan superkondensaattorin parametrien laskemiseksi on otettava huomioon käyttöolosuhteet, joissa järjestelmää sovelletaan. Järjestelmälle sovellettava jännitealue on 45-85 V_{DC}, jonka mukaan järjestelmää syöttävä superkondensaattori mitoitetaan. Tässä työssä syöttöjärjestelmän mitoitusta ja superkondensaattorimoduulien soveltuvuutta tarkastellaan pääosin käyttötehon ja energiakapasiteetin mukaan, mutta käyttölämpötilan sekä jännitteen mukaan skaalautuvaa käyttöikää tarkastellaan tämän ohessa. Kuormankäsittelijän kokonaisen työsyklin energiakulutusten arvot ajan suhteen on esitetty seuraavassa taulukossa 4.

Taulukko 4. Kuormankäsittelijän työsyklin parametrit

Toimintavaihe	Aika (s)	Kulutus (kW)
Ajon käynnistys	1	4
Kiihdytys ilman kuormaa	1,88	2,25
Liikkuminen ilman kuormaa	5,46	4,37
Hidastus ilman kuormaa	1,88	2,25
Noston käynnistys	1	3,6
Nosto (kiihdytys, matka, hidastus)	2,84	10,23
Käynnistys	1	4
Kiihdytys kuormalla	2	10,4
Liikkuminen kuormalla	8	16
Hidastus kuormalla	2	10,4
	27,1	
Laskettu kokonaiskulutus		67,5

Taulukon mukaisen kuormankäsittelijän suorittaman kokonaisen 27,1s kestävästä työsyklin, sekä tämän aikana vaaditun 67,5kW energiamäärän kattamiseen voidaan lyhytkestaisen syklin vuoksi toteuttaa järjestelmän mitoitus käyttäen ainoastaan superkondensaattoreita.

Järjestelmän energiakapasiteetti lasketaan yhtälön 5 mukaan superkondensaattorimoduulin maksimijännitteen ja –minimijännitteen mukaisesti, joka määritellään olevan puolet moduulin nimellisjännitteestä. Nimittäjän luku 3600 on jakokerroin muutettaessa wattisekunnit –tunneiksi.

$$E_{järjestelmä} = \frac{0,5 * C_{järjestelmä} * (U_{maksimijännite_{moduuli}}^2 - U_{minimijännite_{moduuli}}^2)}{3600} \quad (5)$$

jossa

$C_{järjestelmä}$ = Järjestelmän kapasitanssi

$U_{minimijännite_{moduuli}}$ = Superkondensaattorimoduulin minimijännite

$U_{maksimijännite_{moduuli}}$ = Superkondensaattorimoduulin maksimijännite

Kuormankäsittelijän työsyklin kuluttama tehokulutus vastaa 18,75Wh vaadittua energiakapasiteettia. Työsyklin aikana tapahtuva 2 sekunnin ja 10,4kWs tehonkulutuksen mukainen laitteen kiihdytys sekä hidastus kuormalla aiheuttaa toiminnoista keskimäärin suurimman tehopiikin, minkä mukaan määritellään superkondensaattorin tehokapasiteetti sekä purkautumisteho. Lasketun järjestelmän energiakapasiteetin ja tehokulutusten mukaisesti valittiin räätälöity Skeletontech IP00 custom welded pack-superkondensaattorimoduuli, jonka tärkeimmät parametrit on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Superkondensaattorimoduulin parametrit

Paristojen määrä sarjassa	33
Pariston tyyppi	SCA1800
Moduulin kokonaiskapasitanssi	54F
Moduulin nimellisjännite	94 V _{DC}
Käyttöjännite	45-82 V _{DC}
Käyttöenergia elinkaaren alussa	35Wh
Käyttöenergia elinkaaren lopussa	28,4Wh
Maksimi energiakapasiteetti	66,9Wh
1s DC resistanssi	10,32mΩ
Paino	12kg
Tilavuus	11L



Kuva 26. Superkondensaattorimoduuli /16/

6.1.3 Superkondensaattorimoduulin elinikä varasto-olosuhteissa

Superkondensaattorin elinikää voidaan arvioida eri käyttöolosuhteissa skaalautuvan lämpötilan ja superkondensaattoripariston käyttöjännitteen mukaisesti. Käyttölämpötilan sekä –jännitteen vaikutusta kuvataan empiirisen suhteen mukaisesti. Kaavan 7 avulla voidaan määrittää näiden kahden suuren vaikutusta:

$$n_{est} = \frac{n_R}{2^{\left(\frac{U-U_R}{0,2} + \frac{T-T_R}{10}\right)}} \quad (7)$$

jossa n_R = Nimellinen syklinen elinikä
 U_R = Moduulin nimellisjännite
 T_R = Nimellinen ympäristön lämpötila
 U = Moduulin käyttöjännite
 T = Ympäristön käyttölämpötila

Yksittäisen 2,85V_{DC} nimellisjännitteisen superkondensaattoripariston käyttöä rajoittavat kaavan mukaisesti 2,5V-3,2 V_{DC} käyttöjännite sekä 0-65°C käyttölämpötila. Oheisessa laskelmassa superkondensaattoria on sovellettu huoneenlämpötilaa 23°C. Taulukossa 6 on esitettyinä superkondensaattorin arvot, joita sovelletaan tarkasteltavalle kuormankäsittelijän käytölle:

Taulukko 6. Eliniän laskennan käyttöarvot

n_R	1000000
U	2,5 V _{DC}
U_R	2,85 V _{DC}
T	23°C
T_R	23°C

Työssä tarkasteltavan vaunun suorittama työsyklin kesto on keskimäärin 27s, joka vastaa tunnissa 133 suoritettua työsykliä. Aiemmin esille tulleen mukaisesti, laskeutu vaunun tehokulutus syklin aikana on 67,5kWs. Moduuli kykenee siis vastaamaan yhdellä täydellä latauksella tehokulutuksesta seuraavan taulukon 7 mukaisesti:

Taulukko 7. Moduulin tehokulutusvaste

	Tehokapasiteetti (kWs)
Moduulin tehokapasiteetti elinkaaren alussa	127,8
Moduulin tehokapasiteetti elinkaaren lopussa	102,2
Moduulin tehokapasiteetin keskimääräinen arvo	115

Empiirisen kaavan mukaisesti laskettu työsyklien määrä superkondensaattorimoduulin keskimääräisellä tehokapasiteetilla eliniän aikana työssä tarkasteltavan kuormankäsittelijävaunun käytössä vastaa 3 363 585 sykliä. Tästä laskettu tehokulutus vastaavalla työsyklimäärällä on 386 879 313 kW. Taulukossa 8 on esitettyä arvioitu elinikä kuormankäsittelijävaunun toiminta-ajanjaksolle esitettyä, kun n_{est} syklien tehokulutuskapasiteetti jaetaan kuormankäsittelijävaunun tekemän 133 työsyklin tehokulutuksen 8977,5kWs mukaan.

Taulukko 8. Arvioitu elinikä

Elinikä tunteina (h) vaunun käytössä	43094,3
Elinikä päivinä (d) vaunun käytössä	1795,6
Elinikä vuosina (y) vaunun käytössä	4,9

Superkondensaattorin pidempään elinikään voidaan vaikuttaa alhaisemmalla käyttölämpötilalla sekä käyttöjännitteellä, ja päinvastoin suuremmilla arvoilla syklinen elinikä lyhenee lineaarisesti. Superkondensaattorin latauksen sekä purkauksen välisellä tauolla voidaan vaikuttaa pidempään elinikään, mutta tämän vaikutus on epälineaarinen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin superkondensaattorin soveltuvuutta kuormankäsittelijävaunussa teorian ja tiivistetyn käytännön laskennan kautta. Lisäksi työssä käsiteltiin HESS-järjestelmän ominaisuuksia, järjestelmän asettelua sekä ohjausstrategiaa. Tavoitteena järjestelmäkokonaisuudessa oli vähentää kaksisuuntaisen DC/DC-muuntajan tehoa, suhteuttaen järjestelmä syötettävän DC-väylän teho- tasoon. Tarkastellussa HESSssä käytiin neljä ohjausta seuraavaa toimintatilaa, jotka säätelevät ohjausta määritetyn superkondensaattorin ja akun jännitteen mukaisesti.

Superkondensaattorin moderni teknologia vaati perehtymistä myös akkuteknologian aihepiiriin ja soveltuvuuteen syöttävässä järjestelmässä, sillä pelkkien superkondensaattorien energiatehokkuus ei yksin monessa sovelluskohteessa ole riittävä. Akun ja superkondensaattorin yhteiskäytön tuoma energiatehokkuus parantaa myös kustannustehokkuutta järjestelmissä, mutta tässä tutkielmassa kustannustehokkuutta ei tarkasteltu.

Tarkasteltavaa järjestelmää voidaan vielä tutkia monelta kannalta. Jarrutusenergian tarkalla hyödyntämisellä sekä ohjausjärjestelmien ja ohjausalgoritmien parantamisella päästään yhä tarkempaan energianohjaukseen sekä parempaan hyötysuhteeseen edistyneillä menetelmillä.

LÄHTEET

/1/ Yu, A., Chabot, V. & Zhang, J. (2013). *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications*, Boca Raton, 1st Edition, CRC Press

/2/ Skeletontech.com. (2019). Ultracapacitor. Viitattu 9.3.2019.
<https://www.skeletontech.com/ultracapacitor-technology>

/3/ Skeletontech.com. (2016). Infographic: Ultracapacitors or Batteries? Viitattu 25.4.2019.

/3/ Livreri, P., Castiglia, V., Pellitteri, F. & Miceli, R.(2018) Design of a battery/ultracapacitor energy storage system for electric vehicle applications. Palermo: University of Palermo.

/4/ Chuan, Y., Mi, C. & Zhang, M.(2012) Comparative study of a passive hybrid energy storage system using lithium ion battery and ultracapacitor. Los Angeles: The University of Michigan-Dearborn.

/8/ Grbovic, P. (2011).Ultra-capacitor based regenerative energy storage and power factor correction device for controlled electric drives. Villeneuve-d'Ascq: Ecole Centrale de Lille. Viitattu 5.3.2019

/9/ Binaryupdates.com. (2019).Basic Structure of Capacitor.Viitattu 12.4.2019.
<https://binaryupdates.com/what-is-capacitor/basic-structure-of-capacitor/>

/10/Capacitance and Charge. (2019). Current voltage relationship.Viitattu 12.4.2019, https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap_4.html

/11/ Xiang, C., Wang, Y., Hu, S. & Wang, W.(2014) A New Topology and Control Strategy for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Energy Storage System. Hangzhou: College of electrical engineering. Viitattu 16.4.2019

/13/ He, H.W., Xiong, R & Chang, Y.H.(2010). Dynamic Modeling and Simulation on a Hybrid Power System for Electric Vehicle Applications. Viitattu 10.4.2019

/14/ Ran, G.2016., Physics-Based Modeling of Direct Coupled Hybrid Energy Storage Modules in Electric Vehicles. Viitattu 16.4.2019

/15/ Changle, X., Yanzi, W., Sideng, H. & Weida, W. 2014.,A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system. Viitattu 16.4.2

/16/ Skeletontech.com. (2019). Ultracapacitor. Viitattu 16.4.2019.
<https://www.skeletontech.com/skelpack-laser-welded-ultracapacitor-packs>.