
**TUTKIMUS LAVANKÄÄRINTÄKONEEN OIKOSULKU-
MOOTTORIEN JARRUTUSENERGIAN VARASTOIMI-
SEKSI JA UUELLEEN KÄYTETTÄVÄKSI**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Valkeakoski, 18.11.2009

Jari Nurminen

Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Valkeakoski

Työn nimi Tutkimus lavankäärintäkoneen oikosulkumoottorien jarrutusenergian varastoimiseksi ja uudelleen käytettäväksi

Tekijä Jari Ilmari Nurminen

Ohjaava opettaja Rauno Niittymäki

Hyväksytty _____ . _____ . 20 _____

Hyväksyjä

Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Valkeakoski

Tekijä	Jari Nurminen	Vuosi 2009
Työn nimi	Tutkimus lavankäärintäkoneen oikosulkumoottorien jarrutusenergian varastoimiseksi ja uudelleen käytettäväksi	

TIIVISTELMÄ

Työn tavoitteena oli tutkia MSc Electronics Oy:n valmistaman liitäntäkonvertterin soveltuvuutta lavankäärintäkoneen isojen oikosulkumoottoreiden jarrutusenergian varastoimiseksi ja käytettäväksi uudelleen oikosulkumoottorin kiihdytysvaiheessa. Lisäksi tarkoitus oli kartoittaa mahdolliset jatkokehityshankkeet perustuen saavutettuihin säästöihin energian kulutuksessa verrattuna arvioituun energian hinnan nousuun lähitulevaisuudessa.

Tutkimus rajattiin koskemaan vain käärintäkoneen isoimpia moottoreita, joilla myös tehonkulutus on suurin. Mitattaviksi kohteiksi valittiin koneen nosto-/laskutoiminto ja kehän pyöritystoiminto. Muiden pienempien moottoreiden osalta ei vastaava tutkimus ole mielekästä vähäisen tehontarpeen vuoksi.

Tutkittavan energiansäästöjärjestelmän perusajatuksena ovat kustannussäästöt sähköenergian kulutuksessa ottamalla peruskuormitus suoraan tehtaasta omaan sähköverkosta. Lyhytaikaisessa kiihdytys- tai kuormitustilanteessa tarvittava lisäenergia otetaan superkondensaattorien muodostamasta energiavarastosta. Tällöin oikosulkumoottorin jarrutustilanteessa syntyvä sähköenergia ladataan jälleen energiavarastoon myöhemmin käytettäväksi eikä jarrutuksessa syntyvää tehoa hukata lämmöksi jarruvastuksessa.

Tutkimus tehtiin mittaamalla integroivalla tehomittarilla ja oskilloskoopilla jarruvastuksille meneviä tehoja. Tulosten perusteella tehtiin johtopäätös, että lavankäärintäkoneita ei ole taloudellisesti järkevää varustaa energiavarastolla pienen tehonkulutuksen vuoksi.

Avainsanat Lavankäärintäkone, liitäntäkonvertteri, superkondensaattori, taajuusmuuttaja.

Sivut 57 s. + liitteet 7 s.

Automation technology's training program
Valkeakoski

Author	Jari Nurminen	Year 2009
Subject of Bachelor's thesis	Research of storage and reuse of squirrel cage motors braking energy in pallet wrapping machine.	

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to research possibilities to use energy saving converters made by MSc Electronics Oy to store big squirrel cage motor's braking energy and reuse it with for the acceleration of a pallet wrapping machine's motor. In addition, the purpose was also to further define the research possibilities based on the savings in energy consumption compared of the estimated rise in energy prices in the near future.

The research was limited to concern only the biggest motors because of their bigger energy consumption. The measured subjects were the chosen machines rise and fall functions and frame rotation during the wrapping function. With the other smaller motors, it was not reasonable to carry out the same research because of the smaller power consumption.

The basis of the energy saving system is cost savings in electrical energy consumption by taking the basic load from the factories own grid. In short time acceleration or loading situation, the required energy was taken from energy storage made using ultra capacitors. In this case, the motor braking energy is loaded to the energy storage for further use and there is no need to waste that energy in the braking resistor.

Research was carried out using an integrative power meter and a digital oscilloscope to measure the brake resistor's power consumption. The result was that there is no economic sense to provide pallet wrapping machine with energy storage because of the minimal braking power consumption.

Keywords Pallet wrapping machine, energy storage converter, ultra capacitor, frequency converter

Pages 57 p. + appendices 7 p.

Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Valkeakoski

ALKUSANAT

Haluan esittää kiitokseni Oy M.Haloila Ab:n Janne Hurmeelle ja Janne Koskelalle, joilta sain mahdollisuuden tämän lopputyön tekemiseen sekä asiantuntija-apua ja lavankäärintäkonetta koskevaa teknistä materiaalia.

Kiitän myös työni ohjaajia koulun puolesta sekä MSc Electronics Oy:n puolesta.

Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni, joka on jaksanut kannustaa minua tämän lopputyön tekemisessä sekä koko opiskeluni loppuun suorittamisessa.

Nokiolla 25. elokuuta 2009

Jari Nurminen

Tässä raportissa esiintyviä käsitteitä ja lyhenteitä :

Liitäntäkonvertteri : Laite, joka liittää energiavaraston kuormaan.
Energy storage converter (ESC)

DC-välipiiri : Taajuusmuuttajan/konvertterin tasasuunnattu DC-piiri.
DC link

Oikosulkumoottori : Vaihtovirtasähkömoottori. Ohjaus suoraan tai taajuusmuuttajalla.
Squirrel cage motor

Taajuusmuuttaja : Sähkölaite, joka kytketään kahden erillisen sähköverkon välille.
Frequency converter

Hammasvaihdemoottori : Oikosulkumoottori, jossa on suuri toisiovääntömomentti.
Helical gear motor

Tappivaihdemoottori : Oikosulkumoottori, jossa on suuri toisiovääntömomentti.
Parallel shaft helical gear motor

Superkondensaattori : Suuren energiatiheyden omaava kondensaattorityyppi.
Ultra capacitor

Varauskyky: Kondensaattorin kapasitanssi (faradia).
Storage capacity

Litium-ioniakku : Painoonsa nähden suurikapasiteettinen akkutyyppi.
Lithium ion battery

Polttokenno : Akun korvaava sähkökemiallinen generaattori.
Fuel cell

Energiatiheys : Tiettyyn systeemiin tai tilavuuteen varastoituneen energian suuruus tilavuusyksikköä tai massayksikköä kohden.
Energy density

Hybridikäyttö : Liikkuvan kaluston polttomoottorin tai polttokennon rinnalla sähkömoottoreiden käyttöjä syöttävä järjestelmä.
Hybrid drive

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
1.1	Työn tavoitteet ja rajaus	1
1.2	ITW-konserni.....	1
1.3	ITW Mima Systems -konserni	1
1.4	Oy M. Haloila AB	3
1.4.1	Haloila Oy:n tuotevalikoimaa.....	3
1.5	MSc Electronics Oy	5
1.5.1	MSc Electronics Oy:n liiketoiminta-alueet ja tuotevalikoima	6
2	HYBRIDITEKNIKASSA KÄYTETTÄVIÄ KOMPONENTTEJA	7
2.1	AC/AC –muuttaja eli taajuusmuuttaja	7
2.2	DC/DC –muuttaja.....	9
2.3	DC/AC–muuttaja eli vaihtosuuntaaja.....	11
2.4	AC/DC –muuttaja eli tasasuuntaaja	12
2.5	Oikosulkumoottori	13
2.6	Kestomagneettitahtikone.....	14
2.7	Servomoottori.....	15
2.8	Litium-ioni–akku eli Li-ion-akku.....	15
2.9	Nikkeli-metallihybridiakku eli NiMH-akku.....	16
2.10	Superkondensaattorit.....	16
2.11	Polttokenno tai polttoainekenno.....	18
3	MUITA KÄYTÖSSÄ OLEVIA HYBRIDITEKNIIKAN SOVELLUKSIA.....	20
3.1	Pienen mittakaavan verkkoliitäntäkonvertterit.....	21
3.2	Verkkoliitäntäkonvertterit suuren mittakaavan tuulimyllysovelluksissa	22
3.3	Kiskokalustosovellukset.....	23
3.4	Muut varmistetut AC-moottorikäytöt	24
3.5	Muita hybridikäyttösovelluksia.....	25
4	LAVANKÄÄRINTÄKONE OCTOPUS TWIN	28
4.1	Nosto- ja lasku-toiminto.....	28
4.2	Kehän pyöritystoiminto.....	29
4.3	Jarruvastukset ja ohjaustoiminnot	30
5	LIITÄNTÄKONVERTTERI MSC ESC.....	31
5.1	Ohjausosa	33
5.2	Teho-osa	33
6	TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN JA MITTAUSTULOKSET	35
6.1	Jarrukatkojat ja –vastukset	36
6.2	Pyöritysmoottorin mittaukset	38
6.3	Nosto/lasku-moottorin mittaukset.....	40
7	MITTAUSTULOSTEN ANALYYSI	42
7.1	Energiavaraston mitoitus superkondensaattoreilla.....	43

8	KEHITYSTARPEET JA KEHITYSMAHDOLLISUUDET	44
9	LOPPUPÄÄTELMÄT	45
10	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48
LIITE 1	Lavankäärintäkoneen tekninen esite	
LIITE 2	Datasheet Maxwell HC power series ultra capacitors	

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän työn tarkoituksena on tutkia ITW-konserniin kuuluvan Oy M. Haloila Oy:n valmistaman Octopus Twin lavankäärintäkoneen oikosulkumoottoreiden jarrutusenergian varastointia superkondensaattoreihin erillisen liitäntäkonvertterin avulla siten, että sama energia voitaisiin käyttää uudelleen moottorin kiihdytysvaiheessa.

Työ rajataan koskemaan lavankäärintäkoneen isoimpia moottoreita, joiden jarrutusenergiat ovat suurimmat ja näin ollen myös mahdolliset säästöt energiankulutuksessa saataisiin optimoitu. Tutkimus on osa MSc Electronics Oy:n valmistamien liitäntäkonverttereiden mahdollista kaupallista hyödyntämistä kyseisessä kohteessa.

1.2 ITW-konserni

ITW eli Illinois Tool Works on vuonna 1912 perustettu monikansallinen yhtiö, jonka pääkonttori sijaitsee Chicagossa, Illinoisissa, Yhdysvalloissa. Yhtiöllä on useita eri toimialoja, joista pakkauskoneet ja niiden oheistuotteet ovat vain pieni osa-alue. Yhtiö työllistää lähes 60 000 ihmistä ja sillä on 600 toimipistettä 44 maassa ympäri maailman.

Yhtiön liikevaihto vuonna 2007 oli 1,6 miljardia dollaria ja yhtiön innovatiivisuudesta kertoo 2900 patenttia pelkästään Yhdysvalloissa ja yhtiö kuuluu 100 suurimman patentinhaltijan joukkoon.

ITW toimii muun muassa seuraavilla aloilla:

- teollisuuspakkaukset
- tehon syöttö ja elektroniikka
- liikkuvan kaluston komponentit
- rakennusteollisuuden tuotteet
- elintarviketeollisuus
- sisustusmateriaalit
- polymeerit, liimat, voiteluaineet yms
- useita muita pienempiä liiketoiminta-alueita (ITW Mima, 2009).

1.3 ITW Mima Systems -konserni

ITW Mima Packaging Systems on ITW-konsernin eurooppalainen organisaatio. Pakkauskoneiden valmistus sijaitsee Suomessa (Haloila Oy, esitellään myöhemmin) ja Bulgariassa (ITW Mima Systems).

Tutkimus lavankäärintäkoneen oikosulkumoottoreiden jarrutusenergian varastoimiseksi ja uudelleen käytettäväksi

Kalvot valmistetaan Belgiassa (Mima Films, Virton) sekä Irlannissa (Waterford). Kuvissa 1 - 3 esitellään yhtiöiden toimipisteet. Huoltopisteet ovat Suomessa, Ranskassa, Saksassa, Espanjassa ja Englannissa. Asiakastuki ja myyntikonttori sijaitsevat Luxemburgissa.



KUVA 1. *ITW Mima Service Ranskassa (ITW Mima, 2009).*



KUVA 2. *Mima Films Factory, Virton, Belgia (ITW Mima, 2009).*

1.4 Oy M. Haloila AB

Haloila kuuluu kansainväliseen Illinois Tool Works Inc. (ITW) -konserniin. Vuonna 1972 perustettu Oy M. Haloila Ab tarjoaa kokonaisratkaisuja lavakuormien käärintään eri teollisuusaloille. Haloilan kehittämä Octopus-käärintäkone on maailman markkinajohtaja. Haloila aloitti vuonna 1976 lavankäärintäkoneiden valmistuksen ja viennin. Lisäksi Haloila on toimittanut satoja muita erilaisia käärintälaitteistoja ja kokonaiskäärintälinjoja.

Ensimmäiset Octopus-käärintäkoneet valmistettiin vuonna 1983 ja sen jälkeen maskulainen Haloila juhli 3000. käärintäkoneen valmistumista tammikuussa 2008. Yhtiön Octopus -sarjan käärintäkoneiden suurimmat asiakkaat tulevat elintarvike- ja juomateollisuudesta, paperiteollisuudesta ja rakennusmateriaaliteollisuudesta. Octopus Twin -käärintäkone on yhtiön tunnetuin ja tehokkain tuotemerkki, jonka modulaarinen rakenne mahdollistaa erilaisten käyttöyhdistelmien suunnittelun aina kulloisenkin tarpeen mukaan.

Käärintäkoneet ovat puoli- ja täysautomaattisia ja Haloila on kehittänyt ensimmäisen kehärakennetta hyödyntävän käärintäkoneen maailmassa (Haloila, 2009).



KUVA 3. Oy M. Haloila Ab:n toimipiste Maskussa (Haloila, 2009).

1.4.1 Haloila Oy:n tuotevalikoimaa

Seuraavassa esitellään pääpiirteittäin Haloilan valmistamia lavankäärintäkoneita. Koneet jakautuvat puoliautomaattisiin ja täysautomaattisiin laitteisiin. Kuvassa 4 on puoliautomaattikoneita.



Ecomat



Cobra III



Octopus Compact



Octopus Compact roll in roll out

KUVA 4. Puoliautomaattisia lavankäärintäkoneita (Haloila, 2009).

Ecomat on pyöriväpöytäinen käärintäkone ja Cobra puolestaan kampikäärintäkone, jossa käärittävä lava pysyy paikoillaan käärimisen aikana. Octopus-koneet ovat kehärakenteeseen perustuvia koneita, joissa kiristekalvo pyörii lavan ympärillä lavan pysyessä paikoillaan.

Kuvassa 5 on täysautomaattisia käärintäkoneita. Octopus Compact ja Octopus Junior kykevät käärimään 30 - 60 lavaa tunnissa ja B- sekä S-luokan koneet yli 60 lavaa tunnissa, joista Octopus SFTS Twin -malli on kaikkein nopein pystyen käärimään jopa 150 lavaa tunnissa. Tässä työssä keskitytään myöhemmin käsittelemään Octopus Twin -tyypin konetta, jonka yleisiä teknisiä ominaisuuksia esitellään liitteessä 1.



Octopus Compact (Ei vakiona)



Octopus Junior



Octopus B -range



Octopus S -range

KUVA 5. Täysautomaattisia lavankäärintäkoneita (Haloila, 2009).

1.5 MSc Electronics Oy

Tampereen Jankassa sijaitseva MSc Electronics Oy on perustettu vuonna 1984. Yhtiö suunnittelee, valmistaa ja markkinoi erilaisia pääasiassa teollisuudelle tarkoitettuja 1 kW – 500 kW:n tehoelektronikan tuotteita. Huolto sijaitsee samassa toimipisteessä. Kuvassa 6 on yhtiön toimitila Tampereella.

Yhtiön toiminnan pääalueina ovat teollisuuden standarditeholähteet, räätälöity ja asiakaskohtaisesti mitoitettu tehoelektronikka, erikoistehoelektronikka voimalaitoksiin ja hajautetun voimantuotannon tarpeisiin sekä teholähteet ja konvertterit kiskokalustokäyttöön. Yhtiö on toimittanut yli 5000 konvertteria edellä mainittuihin kohteisiin.

Lisäksi yhtiö on keskittynyt erilaisten energiaa säästävien sovellusten suunnitteluun, jossa tavoitteena on kerätä talteen prosessissa syntynyt hukateho ja käyttää se uudelleen prosessin ylösajon yhteydessä.

Tärkeimmistä asiakkaista mainittakoon ainakin ABB, Fortum, Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Kemira, Kone, Metso, Talgo Transtech, Vacon ja Valtion Rautatiet. Yhtiöllä on henkilökuntaa n. 20 henkeä ja yhtiön liikevaihto vuonna 2008 oli 1,6 miljoonaa euroa. Yhä kasvava kysyntä energian uudelleen käytön sovelluksiin näkyy myös tulosenusteesta, joka on ennustaa voimakasta kasvua tulevaisuudessa.



KUVA 6. MSc Electronics Oy:n toimitila Tampereen Jankassa.

1.5.1 MSc Electronics Oy:n liiketoiminta-alueet ja tuotevalikoima

MSc:n liiketoiminta-alue jakautuu pääasiassa neljään eri osa-alueeseen:

- hybridikäytöt
- uusiutuva energia
- keskeytymätön tehonsyöttö
- kiskokalusto (junat, raitiovaunut).

MSc:n tuotevalikoima sisältää mm. seuraavia tuotteita:

Teollisuudelle

- akustovarmistetut AC –moottorikäytöt
- akustovaraajat, tasavirtalähteet ja tasasuuntaajat
- ultraäänigeneraattorit ja suurtaajuusteholähteet
- induktioteholähteet
- DC/AC, DC/DC, AC/DC ja staattiset AC/AC–konvertterit.

Voimalaitoksille

- magnetointilaitteet ja taajuuden mittauslaitteet
- varavoimajärjestelmät
- konvertterit hajautettuun voimantuotantoon.

Kiskokalustoon

- keinoverkot
- tasavirtalähteet ja akustovaraajat
- AC/DC- ja DC/DC–konvertterit.

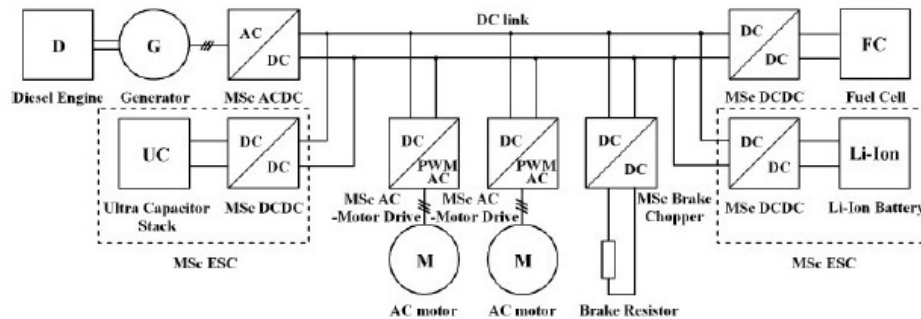
Erikoiskohteet

- virtalähteet ja konvertterit sotilas- ja sukellusvenekäyttöön
- asiakaskohtaisesti räätälöidyt konvertterit.

2 HYBRIDITEKNIKASSA KÄYTETTÄVIÄ KOMPONENTTEJA

Seuraavassa käsitellään energian talteenotossa ja uudelleenkäytössä yleisimmin käytettäviä komponentteja ja niiden ominaisuuksia. Komponentteja käytetään kaikilla hybriditekniikan osa-alueilla riippumatta lopullisesta sovelluksesta, sillä komponenttien tekniset perusteet ovat silti samat. Rakenteet tosin vaihtelevat sovelluskohtaisesti riippuen siitä, onko kyseessä liikkuva kalusto, huonot fysikaaliset olosuhteet vai perinteinen teollisuusympäristö. Kuvassa 7 on periaatteellinen lohkokaavio hybridikäyttöisestä ajoneuvosta, jossa on mukana kaikki kyseisessä tekniikassa tarvittavat komponentit.

Kuvassa olevan dieselgeneraattorin sijalla voi olla mikä tahansa ulkoinen tehonsyöttölähde. Tällaisia voivat olla esim. 1- tai 3-vaiheinen sähköverkko, tuulimyllygeneraattori ja aaltovoimageneraattori. Samoin Li-ion-akku voidaan korvata sovelluksesta riippuen NiMH-akulla tai perinteisellä lyijyakulla.



KUVA 7. Lohkokaavio hybridikäyttöisestä ajoneuvosta (MSc Electronics, 2009).

2.1 AC/AC –muuttaja eli taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja eli invertteri on yleisin sähkötekniikassa käytettävä laite, jolla oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää portaattomasti. Käytännössä taajuusmuuttaja kytketään kahden sähköverkon väliin ts. valtakunnan verkon ja moottorikäyttöjen väliin.

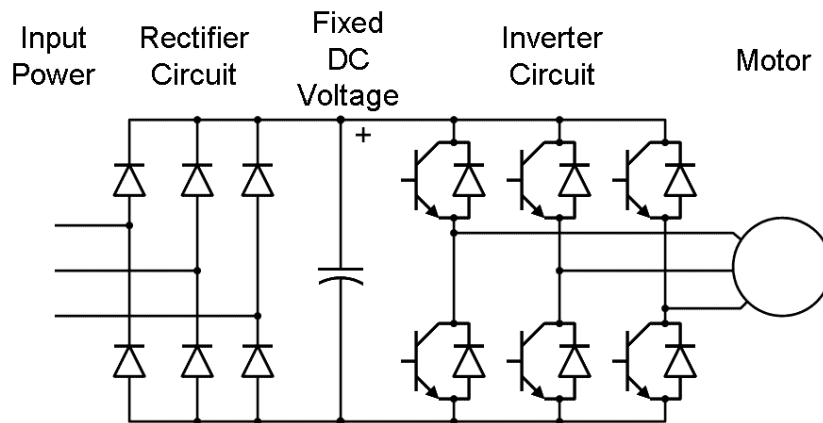
Taajuusmuuttajia voidaan käyttää monissa teollisuuden sovelluksissa, joissa on käytössä vaihtosähkömoottoreita. Tyypillisimpiä sovelluksia ovat pumppu- ja puhallinkäytöt, hissit, kuljettimet, paperikoneiden voimansiirrot sekä yleisesti kaikki vaihtosähköpohjaiseen voimansiirtoon pe-

rustuvat laitteistot kuten esimerkiksi laivojen potkurikäytöt, sähköautot ja hybridautot sekä tuulivoimalat.

Taajuusmuuttaja ottaa syöttönsä 3-vaiheverkosta (myös 1-vaiheisia versioita on markkinoilla), minkä jälkeen jännite suodatetaan erillisessä kuristinasteessa. Tämän jälkeen vaihtojännite tasasuunnataan (rectifier circuit) ja viedään DC-välipiiriin (fixed DC voltage), missä jännitteen ripple-osuus suodatetaan isoilla elektrolyyttikondensaattoreilla.

Suodatettu jännite viedään vaihtosuuntauspiiriin (inverter circuit), joka on toteutettu 6-pulssi IGBT -transistorisillalla. Kuvassa 8 on taajuusmuuttajan periaatteellinen lohkokaavio. Kuvassa 10 on Vacon Oyj.:n valmistamia vakiotaajuusmuuttajia.

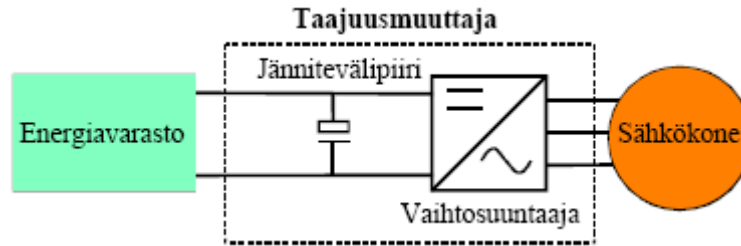
Taajuusmuuttajan ohjauselektronikka ohjaa transistorien hiloja siten, että ulostuloon saadaan taajuudeltaan vaihtelevaa kanttiaaltoa, jonka amplitudi vastaa tasasuunnatun vaihtosähkön amplitudia n. 1,35-kertaisena. Tällaista säätöä kutsutaan nimellä PWM-säätö (pulse width modulation) eli pulssinleveysmodulaatio. Kuormana oleva oikosulkumoottori ”lukee” jännitteen taajuuden ja amplitudin ja asettaa pyörimisnopeutensa sen mukaiseksi.



KUVA 8. Taajuusmuuttajan periaatteellinen lohkokaavio (Vacon, 2009).

Energian talteenottojärjestelmissä taajuusmuuttajaa käytetään muuttamaan energiavarastosta sähkökoneelle tuleva tasajännite vaihtojännitteeksi ja sähkökoneelta tuleva vaihtojännite tasajännitteeksi, kuten kuvasta 9 ilmenee.

Erona perinteisiin taajuusmuuttajiin on, että nyt ei tarvita erillistä tasasuuntaajaosaa, vaan energiavarasto voidaan kytkeä joko suoraan tai DC/DC-hakkurin kautta DC-välipiiriin. Tällaista muuttajaa kutsutaan DC/AC-muuttajaksi.



KUVA 9. Taajuusmuuttajan energiaavastosovellus.



KUVA 10. Vacon Oyj:n valmistamia NX-sarjan taajuusmuuttajia (Vacon, 2009).

2.2 DC/DC –muuttaja

DC/DC–muuttaja toimii sähkömoottoreiden käyttöä syöttävänä hybridi-käyttönä järjestelmän DC-kiskoston ja energiaavaston välillä. Energiaavastona toimivaan superkondensaattoriparistoon tai akustoon voidaan varata nopeutta hidastettaessa syntyvää jarrutusenergiaa ja jälleen hyödyntää se kiihdytystilanteessa.

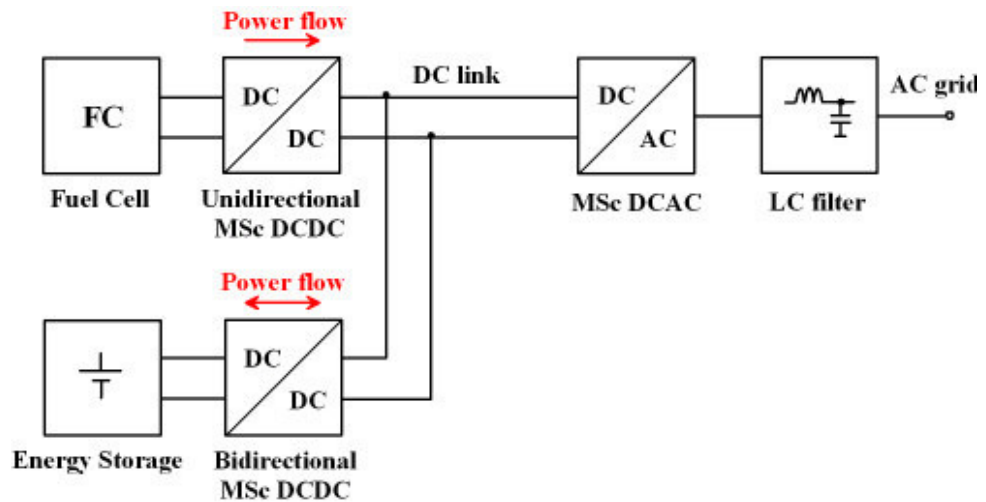
Muuttaja toimii joko nostavana (step up) tai laskevana (step down) hakkuritoimisena jännitesäätäjänä riippuen DC-kiskoston ja käytettävien energiaavastojen nimellisjännitteistä. Lisäksi muuttaja voi toimia joko yksisuuntaisesti (unidirectional) tai kaksisuuntaisesti (bidirectional).

Yksisuuntainen toiminto tulee kyseeseen esim. kuvan 7 polttokennosovelluksessa, jolloin energiaa siirretään vain polttokennosta DC-kiskostoon, mutta ei toiseen suuntaan. Tällöin polttokennosta saatava jännite nostetaan DC-linkkiin sopivaksi muuttajan avulla.

Kaksisuuntaista toimintoa käytetään, kun halutaan purkaa ja ladata järjestelmässä olevia energiaavastoja, kuten superkondensaattorit ja akusto. Myös tässä tapauksessa muuttaja sovittaa energiaavastojen nimellisjännitteet DC-kiskostoon sopivaksi. Kuvassa 11 on esitetty periaatekaavion

avulla energian virtaussuunnat käytettäessä yksisuuntaista ja kaksisuuntaista muuttajaa.

Kuvassa 7 oleva jarrukatkoja (brake chopper) on DC/DC-muuttaja, jonka tehtävä on syöttää tarpeen mukaan jarrutusenergiaa jarruvastukselle silloin, kun energiavarastot ovat täyteen ladattuja. Jarruvastukset ovat useimmiten perinteisiä 100 W – 100 kW tehovastuksia, joissa ylimääräinen energia muutetaan lämmöksi ja poistetaan järjestelmästä luonnollisen konvektion kautta. Kuvassa 12 on joitakin MSc Electronics Oy:n valmistamia DC/DC-muuttajia.



KUVA 11. Lohkokaavio yksi- ja kaksisuuntaisesta DC/DC-muuttajasta (MSc Electronics, 2009).

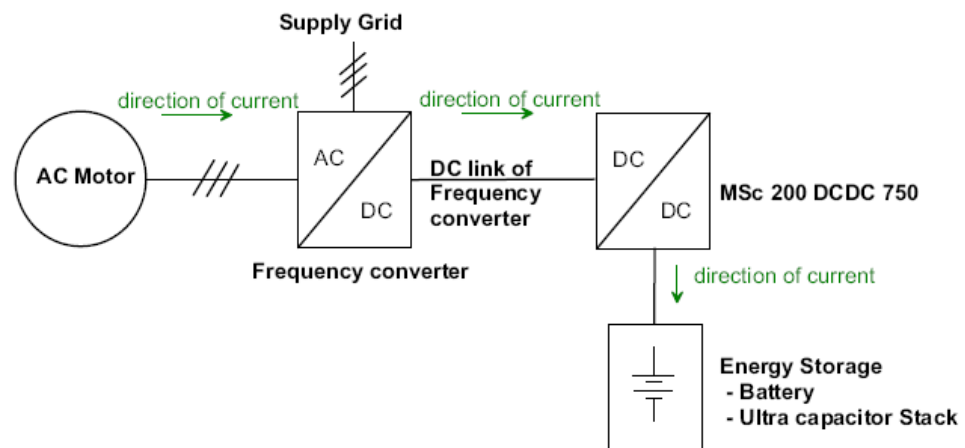


KUVA 12. MSc Electronics Oy:n valmistamia DC/DC -muuttajia (MSc Electronics, 2009).

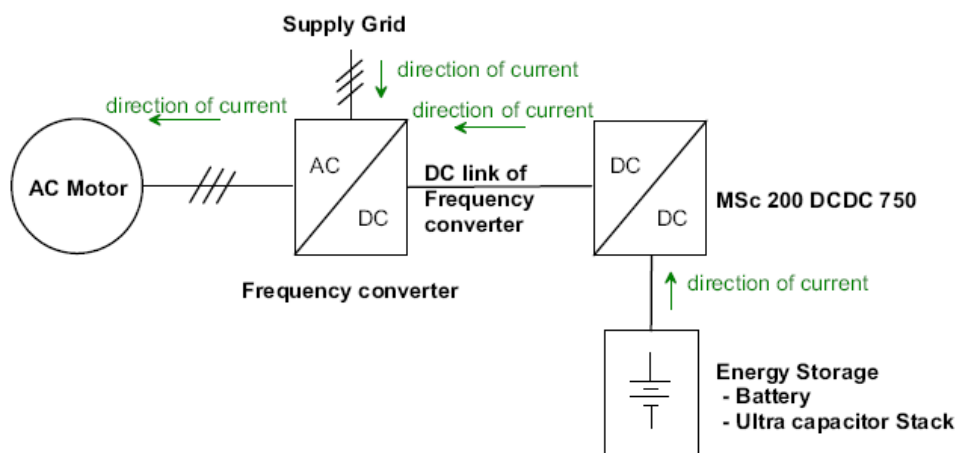
2.3 DC/AC-muuttaja eli vaihtosuuntaaja

DC/AC-muuttaja on perinteinen taajuusmuuttaja, jossa ei ole tasasuuntausyksikköä, koska DC-kiskosto on kytketty suoraan DC/AC-muuttajan DC-välipiiriin. Tässäkin sovelluksessa moottorin jarrutusenergia voidaan syöttää DC-välipiiristä DC/DC-muuttajan välityksellä energiavarastoon, kuten kuvasta 13 nähdään.

Muutoin toimintaperiaate on kuten tavallisella taajuusmuuttajalla. Kuvassa 14 on periaatteellinen lohkokaavio DC/AC-muuttajan käytöstä silloin, kun perusenergia otetaan sähköverkosta ja kuormituspiikkejä tasoitetaan DC/DC-muuttajan kautta.



KUVA 13. AC/DC-muuttaja AC-moottorin jarrutuksessa (MSc Electronics, 2009).



KUVA 14. DC/AC-muuttaja tehopiikien tasaajana (MSc Electronics, 2009).

Kuvassa 15 on eräs vakiotajuusmuuttajalla toteutettu DC/AC-muuttaja.



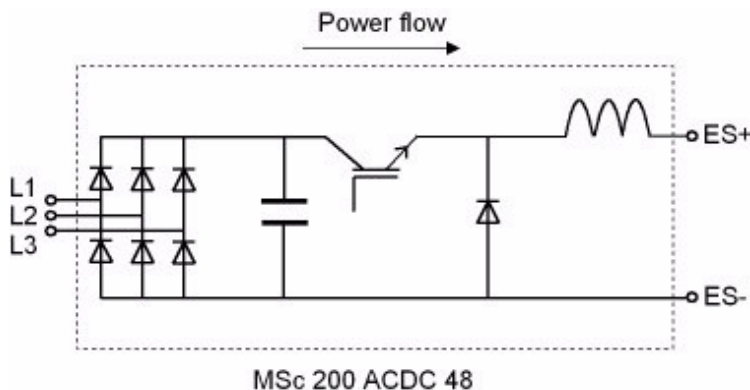
KUVA 15. Vacon taajuusmuuttajaan perustuva DC/AC –muuttaja (Vacon, 2009).

2.4 AC/DC –muuttaja eli tasasuuntaaja

AC/DC–muuttajan toiminta on käänteinen luvun 2.3. DC/AC–muuttajalle. Käytännössä kyseessä on tasasuuntaaja, millä esim. generaattorin tai vaihtosähköverkon jännite tasasuunnataan järjestelmän DC-linkkiin sopivaksi. Toiminta voi tässäkin tapauksessa olla hakkuriperiaatteen nojautuva nostava tai laskeva tasasuuntaus riippuen tarvittavasta tasajännitteestä.

Kuvan 7 tapauksessa muuttaja toimii perinteisenä yksisuuntaisena tasasuuntaajana joka syöttää tarvittavan tasajännitteen DC-kiskostoon. Energiavarastojärjestelmissä voidaan AC/DC–muuttajia kytkeä useita rinnan tukemaan DC-linkin jännitettä erittäin suurien kuormituspiikkien kompensoimiseksi silloin, kun on vaarana, että energiavaraston oma kapasiteetti ei riitä.

Energiansäästösovelluksessa laite sisältää kaksi eri konvertertia, tavallisen 6-pulssitasasuuntaajan ja laitteen rakenteeseen integroidun aktiivisen pienitehoisemman tasasuuntaajan. Tämä ns. booster-hakkuri syöttää tarvittaessa lisätehoa kuormaan, mikäli perinteisen tasasuuntaajayksikön teho ei riitä. Kuvassa 16 on booster-hakkurin periaatekuva ja kuvassa 17 eräs MSc Electronics Oy:n valmistama nostava tasasuuntaajayksikkö.



KUVA 16. Aktiivisen tasasuuntaajan periaatekuva (MSc Electronics, 2009).



KUVA 17. Nostava tasasuuntaaja (MSc Electronics, 2009).

2.5 Oikosulkumoottori

Vaihtovirtasähkömoottoreista oikosulkumoottori on saanut suuren suosion sen halpuuden, toimintavarmuuden, helppokäyttöisyyden ja vähäisen huollon tarpeen vuoksi. Oikosulkumoottoreita voidaan ohjata taajuusmuuttajalla, joka muuttaa vaihtojännitteen amplitudia ja taajuutta halutuksi. Ohjaamalla taajuusmuuttajan toimintaa voidaan moottorilla tuottaa vakiovääntömomentti kierrosnopeudesta riippumatta.

Oikosulkumoottori on kiertokenttävaihtosähkömoottori. Oikosulkumoottorissa roottorin magnetoitivirta syntyy induktioperiaatteella, minkä vuoksi sitä kutsutaan myös induktiomootoriksi. Vaihtosähköllä syötetty staattorikäänitys luo koneen ilmaväliin pyörivän magneettivuon, joka leikkaa roottorin oikosuljetun häkkikäänityksen sauvoja. Tämän seurauksena roottorisauvoihin indusoituu virtaa joka magnetoi roottorin. Magnetoitunut roottori pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettivuota, ja tämä aikaansaa roottorin vääntömomentin.

Nimitys oikosulkumoottori tulee siitä, että roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään. Koska roottorin magnetoitivirta otetaan pyörimisliikkeestä, niin tämä pieni energiahäviö aiheuttaa jättämää vaihtovirran synnyttämään magneettikentän pyörimisnopeuteen. Tämän vuoksi oikosulkumoottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi verrattuna muihin vaihtovirtamoottoreihin. Kuvassa 18 on eräs jalallinen oikosulkumoottorimalli.

Energiansäästöjärjestelmissä oikosulkumoottori voi toimia myös generaattorina. Jarrutettaessa moottoria taajuusmuuttajan jarrukatkojalla moottori syöttää energiaa takaisin taajuusmuuttajalle toimien generaattorina, koska moottorin roottori pyörii suuremmalla nopeudella, kuin staattorin pyörivä magneettikenttä tuottaen sähkötehoa. Tällöin ylimääräinen energia sitoutuu taajuusmuuttajan välipiiriin, josta se voidaan siirtää DC/DC-konvertterin avulla energiavarastoon, kuten akku tai superkondensaattori, tai tarvittaessa hukata lämpönä jarruvastuksessa.



KUVA 18. Perinteinen 3-vaiheinen oikosulkumoottori (MSc Electronics Oy, 2009).

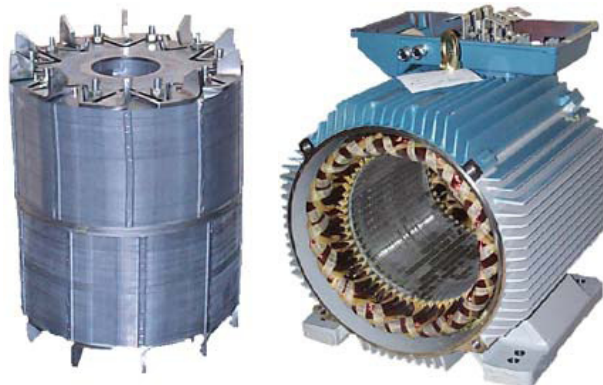
2.6 Kestomagneettitahtikone

Energian talteenottojärjestelmän sähkökoneeksi soveltuu hyvin kestopagneettitahtikone sen useiden hyvien ominaisuuksien vuoksi. Kestomagneettitahtikoneella on hyvä hyötysuhde, suuri vääntömomentti ja tehottiheys.

Hyvän hyötysuhteen ansiosta kestopagneettitahtikoneessa tapahtuvat häviöt ovat suhteellisen pienet verrattuna muihin konetyyppeihin. Lisäksi suuren vääntömomentin ja suuren tehottiheyden ansiosta sähkökoneesta saadaan kooltaan pienempi kuin muita konetyyppejä käytettäessä.

Tahtikone on kiertokenttäkone, jossa roottori eli napapyörä pyörii paikallaan pysyvän staattorin monivaihekäämitykseen syötetyn vaihtovirran luoman pyörivän magneettikentän kanssa samassa tahdissa, koneen ollessa pysyvyystilassa. Tahtikoneen staattorissa on useimmiten kolmivaiheinen käämitys ja kestopagneettitahtikoneen tapauksessa koneen roottorin käämitys on korvattu kestopagneeteilla.

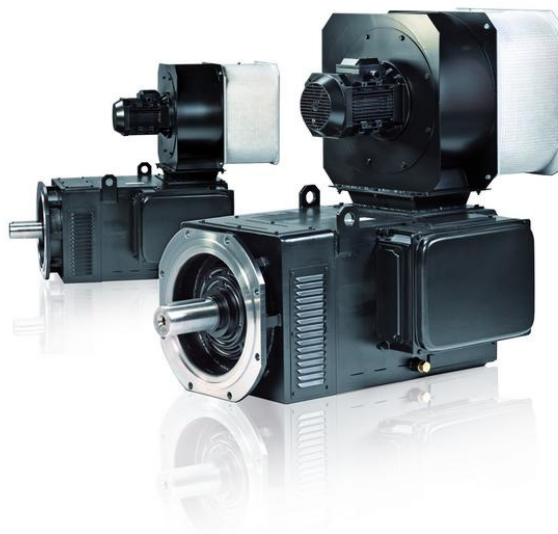
Kestomagneettitahtikoneen toiminta perustuu ilmvälivuon ja staattorivirran vuorovaikutukseen. Kuvassa 19 on esitetty moottorin rakennetta.



KUVA 19. Kestomagneettitahtimoottorin roottorin ja staattorin rakenne (Ari Leppä, 2003)

2.7 Servomoottori

Tiettyjen sovellusten energian talteenottojärjestelmän sähkökoneeksi soveltuu myös servokäyttöominaisuuksilla varustettu sähkökone. Servokäytöllä tarkoitetaan asento- ja nopeustakaisinkytkettyä ja -säädettyä sähkömoottorikäyttöä, jolla on suuri toimintatarkkuus. Servomoottorille on ominaista pieni hitausmomentti sekä suuri vääntömomentti. Lisäksi servomoottoreilla tulee olla hyvä dynamiikka eli moottorin on kyettävä nopeisiin kiihdytyksiin ja jarrutuksiin. Täten servomoottoreiden induktanssit ja hitausmomentti ovat suhteellisen pienet, jotta moottori kykenee reagoimaan nopeasti kuormituksen muutoksiin (Paula Immonen, 2008). Kuvassa 20 on joitakin ABB:n valmistamia servomoottoreita.



KUVA 20. ABB:n valmistamia AC –servomoottoreita (ABB, 2008).

2.8 Litium-ioni-akku eli Li-ion-akku

Litium-ioni-akku on tällä hetkellä paras ja käytetyin akkutyyppejä lähes kaikissa akkukäyttöisissä laitteissa koskien myös hybriditekniikkaa.

Akkujen etuina ovat korkea energistiheys eikä niissä esiinny NiMH-akuille tyypillistä muisti-ilmiötä, joka johtuu akun epätäydellisestä latauksesta. Näin ollen akun ominaisuudet energian talteenottojärjestelmän energiavarastoiksi ovat parhaimmat verrattuna muihin akkutyyppeihin. Akun valmistuksessa on käytetty raskasmetalleja ja se on näin ollen ongelmajätettä.

Akku voidaan ladata ja purkaa 300 - 500 kertaa ilman, että sen kapasiteetti ja varauskyky kärsivät. Lisäksi akun etuna on, että sitä voidaan ladata jopa kolminkertaisella nimellisteholla, jolloin latausajat jäävät lyhyiksi. Tällä on suuri merkitys varsinkin hybridiajoneuvotekniikassa. Li-ion -akkuteknologian heikkoutena on vielä kohtalaisen kallis hinta ja ylläpidon seurauksena epästabilius. Taulukossa 1 on esitetty eri energiavarastojen ominaisuuksia.

TAULUKKO 1. Eri energiavarojen ominaisuuksia (Wikipedia, 2009).

Energiavaro	Energiatiheys [Wh/kg]	Energiatiheys [Wh/l]	Tehotiheys [W/kg]	Hyötysuhde [%]
Lyijyakku	28	86	75	80
NiMH-akku	55	170	140	78
Li-ion akku	95	200	1000	98
Superkondensaattori	2,3	2,9	2900	90 – 98

2.9 Nikkeli-metallihybridiaakku eli NiMH-akku

Vaikka NiMH-akut ovat edelleen käytössä mm. hybriditeknikassa, on Li-ion-akkuteknologia yleistymässä hyvää vauhtia. Akkujen etuina ovat pikalataus- ja syväpurkumahdollisuus sekä suuri energiatiheys, kuten taulukosta 1 ilmenee.

Ongelmana ovat suuri itsepurkaus ja ns. muisti-ilmiö, joka rajoittaa akun kapasiteettia käytössä, missä akkua ei ladata ja pureta akun kannalta optimaalisesti.

2.10 Superkondensaattorit

Li-ion -akkujen lisäksi superkondensaattorit ovat toinen potentiaalinen energiavaroavaihtoehto energian talteenottojärjestelmään. Koska superkondensaattorit ovat koko energiavaroavaihtoehtoteknologian keskeisin osa, käsitellään niitä tässä luvussa hieman laajemmin.

Superkondensaattori on kondensaattori, mutta sen toiminta muistuttaa akun toimintaa, vaikka sähkökemiallista reaktiota ei tapahdukaan.

Superkondensaattoreille on taulukon 1 mukaisesti ominaista suuri tehotiheys, hyvä hyötysuhde, soveltuvuus eri lämpötiloihin, huoltovapaus sekä nopea lataus- ja purkausaika, sillä superkondensaattori voidaan varata sekunneissa. Superkondensaattoreilla on siis useita etuja akkuihin verrattuna. Lisäksi superkondensaattoreiden elinikä on huomattavasti akkuja pidempi.

Superkondensaattori kestää miljoonia lataus-purkaussyklejä, sillä elektrodeilla ei tapahdu kemiallista reaktiota. Lataus-purkausjaksojen lukumäärät eivät olekaan merkittävässä osassa superkondensaattorin ikääntymisprosessissa vaan suurempi merkitys on lämpötilalla ja kondensaattorilevyjen välisellä jännitteellä. Mitä korkeampi lämpötila ja levyjen välinen jännite on, sitä nopeammin superkondensaattori ikääntyy.

Superkondensaattoreiden huonoina puolina voidaan pitää pientä energiatiheyttä ja nopeaa itsepurkausta. Lisäksi superkondensaattorin jännite laskee kondensaattorin luonteen mukaisesti nopeasti purkaustilanteissa. Superkondensaattorista saatava energia ΔE riippuu kondensaattorin kapasitans-

sista C sekä kondensaattorin jännitteen muutoksesta ΔU kaavan 1. mukaisesti.

$$\Delta E = \frac{1}{2}C(\Delta U)^2 \quad (1)$$

Jos superkondensaattorin jännitevälistä voidaan esim. käyttää puolet, saadaan energiaksi 75 % nimellisestä energiasta. Superkondensaattorit sopivat hyvin sovelluksiin, joissa tarvitaan nopeita tehopiikkejä ja joissa syklit ovat lyhyitä.

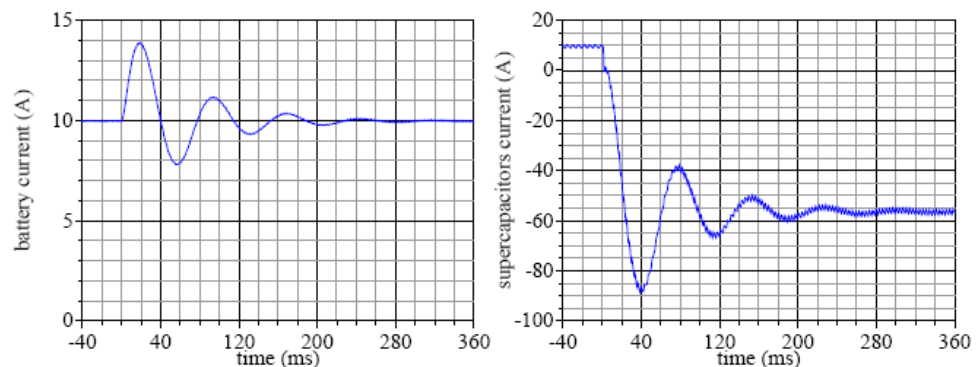
Käytännön esimerkissä on suositeltavaa, että purkaus olisi 50 %:n jännitteenlasku verrattuna nimellisjännitteeseen. Näin ollen kondensaattorin käytettävissä oleva energia W jännitteellä U saadaan kaavasta 2.

$$W = \frac{1}{2}C(U^2 - (U/2)^2) = \frac{3}{8}CU^2 \quad (2)$$

Tarvittava superkondensaattorin kapasitanssi voidaan laskea kaavasta 3.

$$C = 8W / 3U^2 \quad (3)$$

Superkondensaattorit sopivat hyvin esimerkiksi liikkuvien työkonoiden huippukuorman energianlähteeksi, polttokennotekniikkaan sekä jarrutusenergian talteenottoon, mutta pienen energiatiheuden ja epätavallisen suuren sisäisen resistanssin takia ne eivät kuitenkaan yksin sovellu kaikkiin energian talteenottojärjestelmäsovelluksiin. Kuvassa 21 vasemmanpuoleinen käyrä esittää tavallisen lyijyakun purkauskäyrän ja toipumisajan askelmaisella kuormalla. Oikealla puolestaan on superkondensaattorin vastaava käyrä, josta ilmenee kondensaattorin ylivoimainen kyky tuottaa erittäin suuria hetkellisiä tehoja.



KUVA 21. Akun ja superkondensaattorin purkauskäyrät ja toipuminen(Maxwell, 2009).

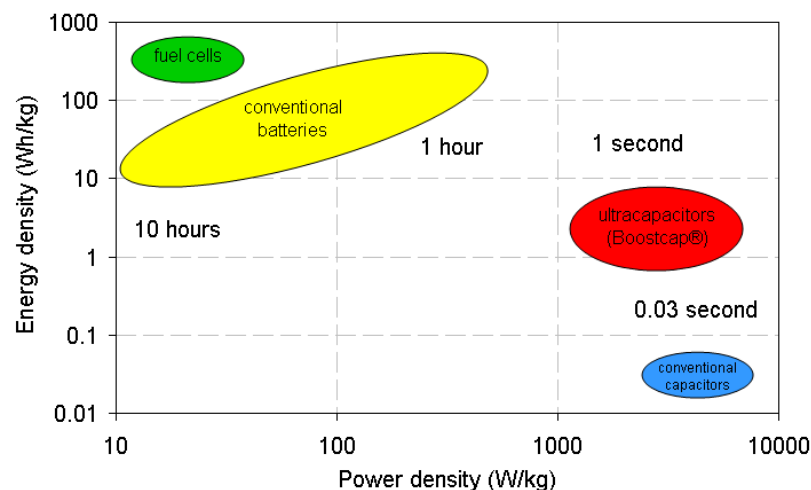
Kuvassa 22 on tyypillinen hybriditeknikassa käytettävä 165 F superkondensaattoriyksikkö, jonka nimellisjännite on 48 V ja joka pystyy tuottamaan 150 A jatkuvan virran sekä peräti 4000 A:n virran 1 sekunnin aikana tehosiheyden ollessa 3,81 Wh/kg.



KUVA 22. Maxwellin 48 voltin superkondensaattoriyksikkö (Maxwell, 2009).

Taulukossa 2 on esitetty energiatiheyden suhde tehosiheyteen käytettäessä polttokennoa, perinteistä paristoa, superkondensaattoria tai perinteistä kondensaattoria.

TAULUKKO 2. Energiavarojen vertailua (Maxwell, 2009).



2.11 Polttokenno tai polttoainekkenno

Polttokenno tuottaa sähköä polttoaineesta käyttämällä ilmassa olevaa happea hyväkseen. Kennossa ei varsinaisesti "pala" mitään, vaan sähköä syntyy kennossa tapahtuvien hapetus- tai pelkistysreaktioiden seurauksena. Polttokennon etuna on äänetön toiminta ja saasteettomuus, reaktiotuotteena syntyy vain puhdasta vesihöyryä, sähkövirtaa ja lämpöä.

Polttokennoissa on normaalisti sisäinen metallihybridi vetyvarasto, johon voidaan varastoida vetyä turvallisesti ilman ylipainetta. Sisäisen vetyvaraston johdosta polttokennoa kutsutaan myös polttokennoakuksi, koska kennoa on yhtä helppoa käyttää kuin vaikkapa lyijyakkua. Yksittäisestä polttokennosta saatava jännite on rajallinen, tavallisesti alle yksi voltti.

Jotta jännitteestä saataisiin käyttökelpoinen, kytketään useita yksikkökenoja sähköisesti sarjaan.

Vety palaa hapen kanssa muodostaen palamistuotteena ainoastaan puhdasta vettä. Lisäksi vedyn energiasisältö kilogrammaa kohti (n. 120 MJ) on noin kolme kertaa suurempi kuin bensiinillä (n. 43 MJ/kg). Tämän takia vety sopii hyvin polttoaineeksi. Kaasumaisen olomuodon takia energiasisältö litraa kohti jää kuitenkin pieneksi.

Jotta vetyä voisi käyttää, se pitää valmistaa. Yleisimmät menetelmät vedyn valmistamisessa ovat hiilivetyjen, esimerkiksi maakaasun, hajottaminen eli reformointi, biomassan kaasuttaminen ja veden hajottaminen vedyksi ja hapeksi sähkön avulla, eli elektrolyysi. Puhtainta vetyä saadaan elektrolyysin avulla, mutta menetelmä on kallis, koska se kuluttaa runsaasti sähköä. Toinen ongelma on vedyn varastointi ja kuljetus. Vety pitäisi paineistaa nestemäiseksi joka myös kuluttaa paljon energiaa. Samoin mahdollinen jakeluverkosto tulisi samasta syystä hyvin kalliiksi.

Polttokennoakkua ei varata sähköisesti. Se tarvitsee sähköä tuottaakseen vain polttoainetta, aivan kuten auton moottori. Erona on, että polttokenno on täysin äänetön ja saasteeton ja polttoaine on pakattu valmiiksi turvallisiin, matalapaineisiin säiliöihin. Polttokennolla ja erillisellä polttoainesäiliöllä saavutetaan huomattavasti parempi energiatiheys kuin mitä perinteisellä akkutekniikalla voidaan saavuttaa, kuten taulukosta 4 ilmenee.

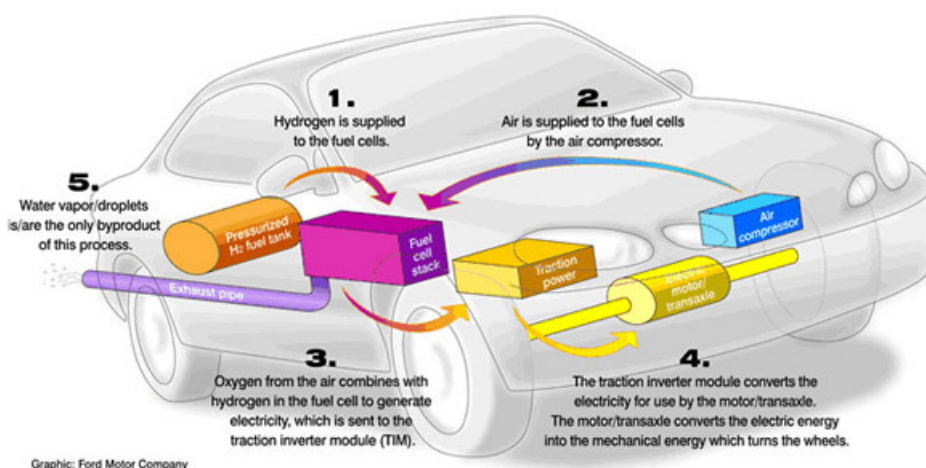
Tämän hetkisen tutkimuksen pääpaino on kiinteissä polttokennosovelluksissa hajautettuun energiantuotantoon, polttokennoissa työkonoiden voimanlähteinä sekä kannettavissa polttokennosovelluksissa. Näiden lisäksi polttokennoja on hyödynnetty jo vuosikymmeniä avaruus- ja sotilassovelluksissa. Hajautettuun energiantuotantoon tarkoitettujen polttokennolaitteiden tehot ulottuvat muutamista kilowateista aina megawattiluokkaan saakka (TKK, 2002).

Voimakkaimmin polttokennoihin panostaa tällä hetkellä autoteollisuus. Esim. General Motors ja Toyota ovat investoineet voimakkaasti polttokennoteknologiaan kehittääkseen energiataloudellisempia ja ympäristöystävällisempiä ajoneuvoja, jonka kaaviokuva on kuvassa 24. Polttokennoista ennustetaan akkujen korvaajaa erilaisiin pienlaitteisiin ja kannettavaan elektroniikkaan, kuten radioihin, kannettaviin tietokoneisiin ja jopa matkapuhelimiin. Etenkin matkaviestimissä siirrettävien datamäärien kasvu edellyttää virtalähteeltä entistä suurempaa kapasiteettia, eikä perinteisen akkuteknologian saralla ole odotettavissa suuria läpimurtoja. Kuvassa 23 on Hydrocell Oy:n valmistama 12 V:n polttokenno.



KUVA 23. Hydrocell Oy:n valmistama 12voltin polttokenno (Hydrocell, 2007).

Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicle



KUVA 24. Kaasumaista vetyä polttoaineenaan käyttävän polttokennoauton kaaviokuva (TKK, 2002)

3 MUITA KÄYTÖSSÄ OLEVIA HYBRIDITEKNIIKAN SOVELLUKSIA

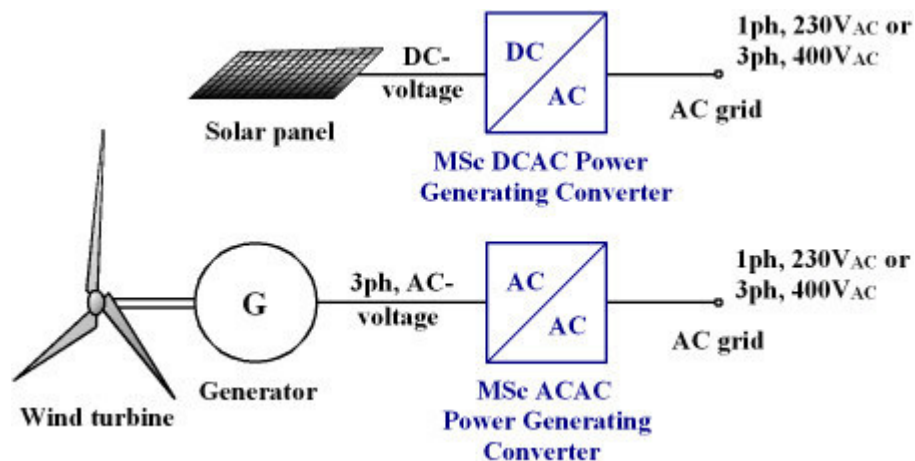
Seuraavassa esitellään lyhyesti tällä hetkellä käytössä olevia kaupallisia sovelluksia, joissa hyödynnetään hybriditekniikkaa sekä erilaisia energia-varastoja. Esimerkkijärjestelmät ovat pääosin MSc Electronics Oy:n valmistamia laitteistoja ja näin ollen tekninen tuki ja dokumentaatio on ollut helposti saatavilla kattaen kuitenkin lähes koko olemassa olevan sovelluskirjon.

3.1 Pienen mittakaavan verkkoliitäntäkonvertterit

Uusiutuvat energiamuodot (renewable energy) ovat nopeasti kasvavat markkinat globaalilla tasolla ja näin ollen maailmasta löytyy jo useita verkkoliitäntäkonverttereiden, joiden tehoalueet ovat 2 - 20 kW, valmistajia. Vaikka samaa tekniikkaa käytetään jo nyt polttokenno- ja aaltovoimatekniikassa, ovat pientuulimyllyihin ja aurinkopaneeliin soveltuvat verkkoliitäntäkonvertterit kuitenkin kustannustehokkaimpia verrattuna esim. aaltovoimatekniikkaan.

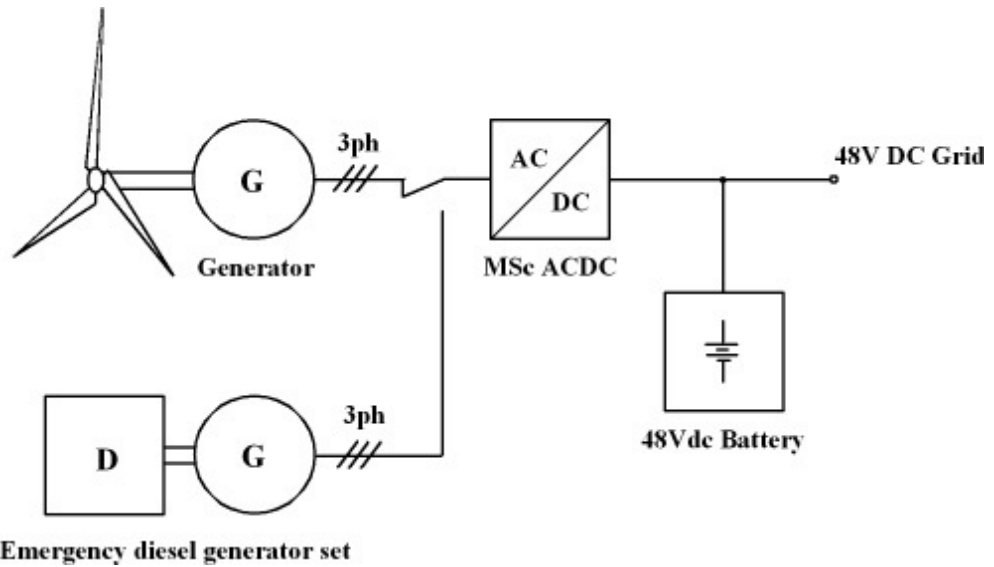
Kuvassa 25 aurinkopaneelin tuottama energia johdetaan nostavaan DC/AC-konvertteriin, joka muuttaa aurinkopaneelin tuottaman tasasähkön vaihtosähkötoimisille laitteille sopivaksi.

Toinen tapa on käyttää kestmagneettigeneraattorilla varustettua tuulimyllyä, joka tuottaa tuulen voimakkuudesta riippuen 3-vaiheisen maksimissaan 750 V_{AC}:n ulostulojännitteen, joka AC/AC-konvertterin avulla muutetaan jälleen vaihtosähkötoimisille laitteille sopivaksi.



KUVA 25. Periaatekuva aurinko- ja tuulivoimalla toimivasta järjestelmästä (MSc Electronics, 2009).

Toinen esimerkkisovellus on kuvassa 26 Soneran lähetasemien käyttölaitteistojen jännitesyötön varmistus, jossa tuulimyllyn tai dieselgeneraattorin tuottama 3-vaihesähkö muutetaan AC/DC-konvertterilla 48 V:n tasasähköksi, jolla ladataan tukiakkua ja samalla syötetään käyttö sähköt järjestelmään.



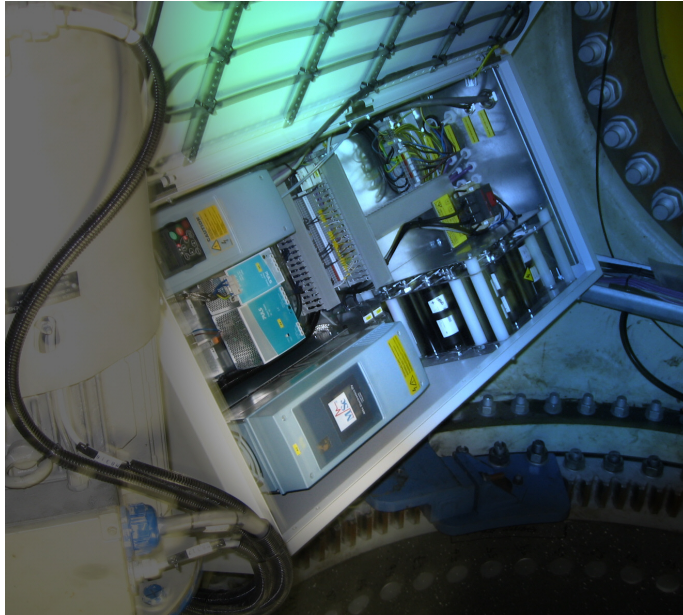
KUVA 26. Akustovarmistettu 48voltin tasasähköverkko (MSc Electronics, 2009).

3.2 Verkkoliitäntäkonverterit suuren mittakaavan tuulimyllysovelluksissa

Eräs sovellus suuren mittakaavan tuulimyllysovelluksista on tuulimyllyn lapakulman säätö, jolla varmistetaan tehonsaanti lapakulmaa ohjaaville AC-moottoreille, mikäli pääverkko jostain syystä häviää.

Tässä sovelluksessa normaali 3-vaiheverkolla ohjataan AC-moottoreita taajuusmuuttajan välityksellä ja samaan aikaan laturi saa syötön em. verkosta ladataen energiavarastona toimivaa akustoa tai superkondensaattoriyksikköä. Kuvassa 27 on lapakulman säätöjärjestelmä sähkökaapissa, joka on asennettu suoraan tuulimyllyn roottorin navan sisäpuolelle.

Verkon hävitessä laturi putoaa pois järjestelmästä ja teho otetaan superkondensaattoreista tai akustosta ja johdetaan nostavan DC/DC-konverterin eli boosterin välityksellä taajuusmuuttajan DC-välipiiriin, joka puolestaan muuttaa DC-jännitteen moottoreille sopivaksi AC-jännitteeksi.

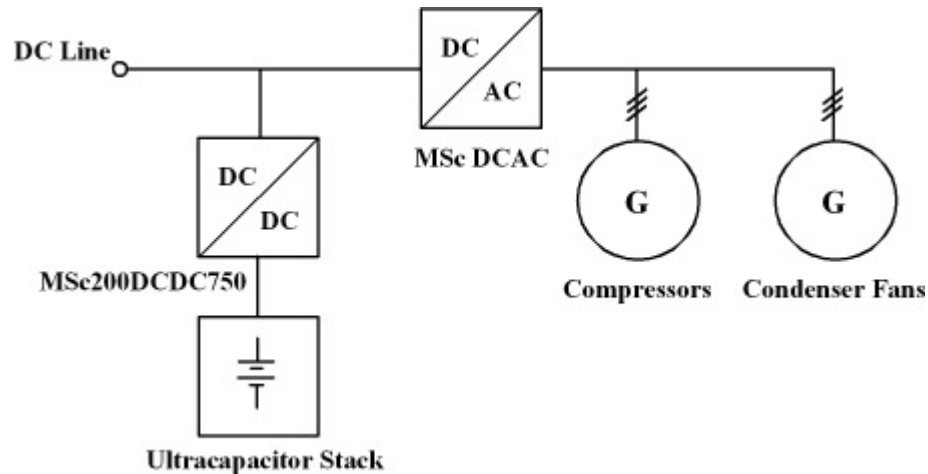


KUVA 27. Varmistettu lapakulman säätö tuulimyllyn roottorin navassa (MSc Electronics, 2009).

3.3 Kiskokalustosovellukset

Kiskokalustoteknologiassa ovat erilaiset energiansäästösovellukset valtaamassa alaa. Junissa, raitiovaunuissa ja metroissa on käytössä useita akustovarmistettuja järjestelmiä, joilla taataan keskeytymätön tehonsyöttö esim. ilmastoinnille, sisäiseen AC-verkkoon, akustovaraajille ja muille elintärkeille järjestelmille, joiden ”kaatuminen” saattaisi aiheuttaa turvallisuusriskin tai ainakin epämukavuutta matkustajille, mikäli esim. sisäinen 230 VAC:n verkko katoaa kesken tietokonetyöskentelyyn.

Kuvassa 28 on kaaviokuva Helsingin Kaupungin Liikennelaitoksen raitiovaunuissa käyttämästä ilmastoinnin varavoimajärjestelmästä, jossa varmistetaan keskeytymätön tehonsyöttö ilmastointikompressoreille silloin, kun raitiovaunu vaihtaa ajaessaan virtapiiristä (DC line) toiseen, jolloin teho katkos saattaa olla 1 - 2 sekuntia vauhdista riippuen. Tällöin teho otetaan superkondensaattoreista DC/AC-liitäntäkonvertterin kautta. Järjestelmässä oleva DC/DC-konvertteri on kaksisuuntainen mahdollistaen superkondensaattorien lataus- ja purkaussykliä. Ilman em. järjestelmää kompressorit kuormittuisivat jatkuvien päälle/pois -sykliä vuoksi ja tulisi mitoittaa paljon todellista tarvetta suuremmiksi, joka puolestaan lisää valmistuskustannuksia ja energiankulutusta.



KUVA 28. Periaatekuva raitiovaunun ilmastoinnin varajärjestelmästä (MSc Electronics, 2009).

3.4 Muut varmistetut AC-moottorikäytöt

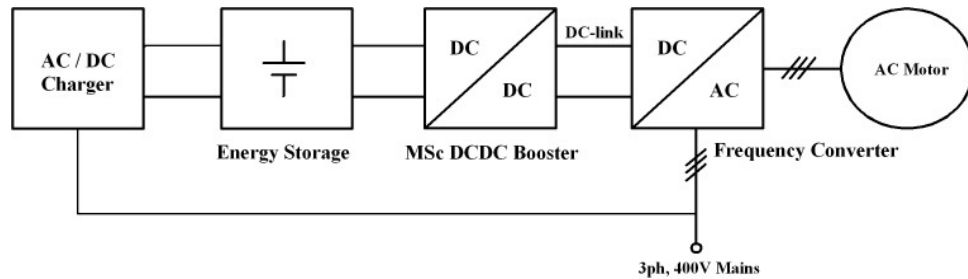
Varmistetut AC-moottorikäytöt ovat käytännössä UPS-laitteita, joilla pyritään varmistamaan jatkuva tehonsyöttö kriittisille AC-moottoreille, jotka eivät saa pysähtyä mahdollisen lyhyen verkkokatkoksen aikana.

Tällaisia käyttäjiä ovat tavallisesti teollisuuslaitosten toiminnan kannalta tärkeät moottorikäytöt, sekoittimet ja pumput kemianteollisuudessa, kuljettimet ja hissit sekä muut nostimet, voitelu- ja hydraulikkapumput, jätevesipumput, jäähdytysjärjestelmät ja -puhaltimet, voimalaitosten patoluukkujen avausjärjestelmät sekä savukaasujen puhdistusjärjestelmät. Myös edellä mainitut tuulimyllysovellukset ovat osa kyseistä teknologiaa.

Normaalitilanteessa sähköverkon ollessa kunnossa, taajuusmuuttajat tavallisesti ohjaavat prosessien vaihtovirtamoottoreita. Sähkökatkoksen tullessa otetaan tarvittava teho energiavarastosta, joka on tavallisimmin akusto, jollainen on nykyään varavoimalähteenä lähes jokaisessa teollisuuslaitoksessa normaalin varavoimageneraattorin rinnalla. Varavoimageneraattorin käynnistyminen kestää yleensä liian kauan kriittisten toimintojen kannalta, joten tarvitaan nopeaa back up -järjestelmää.

Tässä sovelluksessa sähköverkon käyttämä akustovaraaja säilyttää akuston nimellistehon sopivalla tasolla. Käytetyimmät akustojännitteet ovat 24 VDC, 48 VDC, 110 VDC ja 220 VDC.

Katkoksen tullessa nostava DC/DC-konvertteri muuttaa akuston jännitteen n. 550 VDC:iin, joka viedään taajuusmuuttajan DC-välipiiriin ja sitä kautta muutetaan moottoreille sopivaksi AC-jännitteeksi. Konvertteri tutkii koko ajan sähköverkon tilaa ja reagoi katkokseen sekunnin murto-osassa. Kuvassa 29 on periaatekaavio kyseisestä käytöstä.



KUVA 29. Periaatekuva varmistetusta AC-moottorikäytöstä (MSc Electronics, 2009).

Eräs sovellus vastaavasta tekniikasta on suora akkukäyttö, jossa nostava DC/DC-konvertteri ohjaa perinteistä taajuusmuuttajaa. Tällaisia järjestelmiä käytetään esim. haarukkatrukeissa, automaattisesti ohjautuvissa ajoneuvoissa, golf-kärryissä jne. eli kaikenlaisissa hybridi- tai sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa ja aluksissa.

Periaate on sama kuin kuvassa 29, paitsi järjestelmässä ei ole 400 V:n verkkoa eikä näin ollen myös akustovaraajaa. Kuvassa 30 on tyypillinen 2,2 kW:n varmistettu moottorikäyttö, jossa vasemmalla nostava DC/DC-konvertteri ja oikealla perinteinen taajuusmuuttaja.



KUVA 30. 2,2 kW UMD -laitteisto, uninterruptible motor drive (MSc Electronics, 2009).

3.5 Muita hybridikäyttösovelluksia

Tässä luvussa esitellään lyhyesti joitakin käytössä olevia hybridijärjestelmiä ja niiden sovelluksia. Hybridikäytöt ovat lisääntyneet huomattavasti viime vuosina johtuen maailmanlaajuisista sopimuksista ilmastomuutoksen hillitsemiseksi ja tämän myötä esim. hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Lisäksi kohoavat polttoainekustannukset tulevat lisäämään etenkin ajoneuvoteollisuuden investointitarpeita hybriditeknikan tutkimiseen ja käyttöönottoon.

Helsingin Kaupungin Liikennelaitos ja Volvo ovat toteuttaneet yhteistyössä kuvan 31 mukaisen hybridibussipilotin vuoden 2009 alussa. Tämän jälkeen hybridibusseja pitäisi näkyä liikenteessä vuosien 2011 - 2012 vaihteessa.



KUVA 31. *HKL:n ja Volvon yhteinen hybridibussipilotti (Volvo, 2008).*

Nosturi- ja trukki valmistaja Kalmar on ottanut hybriditekniikan käyttöönsä satamissa sijaitsevien kuvan 32 mukaisten lukkinostureiden laskuenergian hyödyntämisessä. Nosturin laskiessa taakkaa, tulee moottoreita jarruttaa, jolloin syntyvä hukkaenergia varastoidaan isoihin superkondensaattoriyksiköihin ja otetaan uudelleen käyttöön taakkaa nostettaessa. Sama periaate pätee myös trukkien kohdalla.



KUVA 32. *Konttien käsittelyyn tarkoitettu lukkinosturi (Kalmar, 2008).*

Myös veneissä on hybriditekniikka otettu käyttöön mm. Amsterdamissa, jossa liikennöi kuvan 33 mukainen hybridialus. Alus käyttää aurinkoenergiaa lataamaan ajoakkuja, jotka puolestaan antavat käyttövoiman veneen potkureille.



KUVA 33. *Hybridivene (MSc Electronics, 2009).*

Henkilöautoissa hybriditekniikka on jo nyt kaupallisesti hyödynnettävissä ja kaikilla suurimmilla henkilöautovalmistajilla on saatavilla kohtuuhintaisia hybridiajoneuvoja. Suomessa tunnetuin lienee maailman eniten myyty hybridiauto Toyota Prius, jonka tuotekehittelyssä on ollut mukana johtava sähköautojen tuotekehittelijä Oy Finnish Electric Vehicle Technologies, LTD eli FEVT.

On olemassa itse asiassa useita yhdistelmiä, joita voidaan kutsua hybridi autoiksi. Yhdistelmä voi esim. olla dieselsähkö-, biopolttoainesähkö-, luonnonkaasusähkö- tai vetysähköteknologiat. Yleisin kuitenkin ylivoimaisesti ainakin vielä tässä vaiheessa on bensasähköteknologia, missä osan työstä hoitaa bensamoottori, osan sähkömoottori, jolloin bensamoottori ei ole toiminnassa ollenkaan kaupunkinopeuksilla. Auton jarrutusenergia varastoidaan superkondensaattoriyksikköön, mikä ohjaa auton sähkömoottoreita kaupunkiajossa. Kun auto kiihdyttää moottoritienopeuksiin, bensamoottori tuo tarvittavan työntövoiman näissä nopeuksissa. Kuvassa 34 on kuvattu Priuksen takaosassa sijaitseva DC/DC-konverterteri sekä superkondensaattoriyksikkö.



KUVA 34. *Energiavarasto ja ohjausyksiköt Toyota Prius –henkilöautossa (FEVT, 2008).*

Tulevaisuudessa hybriditekniikkaa voidaan hyödyntää lähes kaikissa sovelluksissa, joissa on mahdollista varata sähköä energiavarastoon ja ottaa

se käyttöön joko lyhytaikaisissa kuormituspiikeissä tai pitkäaikaisissa vähän energiaa tarvitsevilla laitteilla ja järjestelmissä.

4 LAVANKÄÄRINTÄKONE OCTOPUS TWIN

Kuten aikaisemmin mainittiin, Octopus Twin -käärintäkone kykenee käärimään 40 - 180 lavaa tunnissa käyttämällä erityistä kehänpyöritystekniikkaa. Käärintänopeus riippuu lavan korkeudesta, koneen mallista, käärintäohjelmasta ja kuljettimen nopeudesta. Kuvassa 35 on koneen perusrakenne ilman ohjauskaappia.



KUVA 35. Octopus Twin perusrakenne (ITW Mima, 2009).

Koneen laskennallinen liitäntäteho on n.14 kW ja koneen keskimääräinen verkosta ottama teho käärimisen aikana on n. 4000 W. Koneen tyhjäkäyntitehoksi ilmoitetaan 330 W.

Jatkossa jäljempänä mainittuihin komponentteihin viitataan vain positio-tunnuksen (esim. 36U1) avulla.

4.1 Nosto- ja lasku-toiminto

Kehän nosto/lasku-toimintoa ohjaa 400 V/5,5 kW/13 A:n taajuusmuuttaja Control Techniques SK2401 (positio 32U2) ja 5,5 kW:n tappivaihejarrumoottori Sew-Eurodrive FA77/GDV132S4BMG (positio 32M2). Moottorin jarrutusenergia ohjataan 75 R/1130 W:n jarruvastukseen, joka sijaitsee ohjauskaapin päällä. Moottorin tyyppikilven tiedot nähdään taulukossa 3.

TAULUKKO 3. 32M2 tyyppikilven tiedot.

5,5 kW	$\cos \phi = 0,85$	
50 Hz	220-240D/380-415Y	11,4 A/10,4 A
60 Hz	220-266D/415-460Y	19,8 A/17,9 A
Brake 400 VAC	Nm 75	Me640/530 Nm

4.2 Kehän pyöritystoiminto

Kuvassa 36 nähdään käärintäkehän nosto/lasku-moottori vaihteistoineen koneen rungon yläkulmassa.



KUVA 36. *Nosto/lasku-moottori 32M2 vaihteistoineen koneen rungon yläkulmassa.*

Kuvassa 37 käärintäkehä on laskeutuneena käärittävän lavan ympärille ja on valmiina käärintätoimintoon.



KUVA 37. *Kehä laskeutuneena.*

Kuvassa 38 ovat ohjauskaapissa sijaitsevat kehän pyöritysmoottorin taajuusmuuttaja 32U1 vasemmalla sekä nosto- ja lasku-moottorin taajuusmuuttaja 32U2 oikealla. Taajuusmuuttajat ovat ilman suojakoppaa mittausteknisistä syistä.



KUVA 38. Taajuusmuuttajat 32U1 ja 32U2.

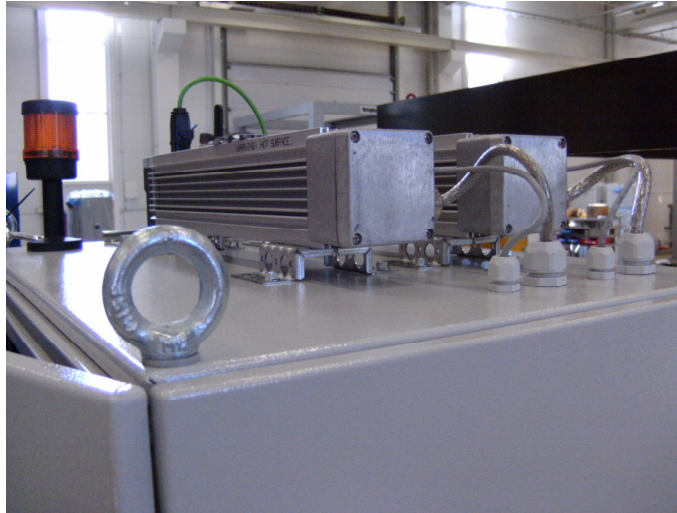
Kehän pyöritystä ohjaa 400 V/4 kW/9 A:n taajuusmuuttaja Control Techniques SKC3400400 (positio 32U1) ja 3 kW:n hammasvaihejarrumoottori Sew-Eurodrive RXF67DV100LA/BMG (positio 32M1). Moottorin jarrutusenergia ohjataan 75 R/1130 W:n jarruvastukseen, joka sijaitsee ohjauskaapin päällä. Moottorin tyyppikilven tiedot ovat taulukossa 4.

TAULUKKO 4. 32M1 tyyppikilven tiedot.

3 kW	$\cos \phi = 0,83$	
50 Hz	220-240D/380-415Y	11,3 A/6,5 A
60 Hz	240-266D/415-460Y	10,2 A/5,9 A
Brake 400 VAC	Nm 40	Me42/34 Nm

4.3 Jarruvastukset ja ohjaustoiminnot

Kuvassa 39 ovat ohjauskaapin päällä sijaitsevat jarruvastukset nosto- ja lasku-toiminnon ja kehän pyörityksen moottoreiden jarrutusenergian muuttamiseksi lämmöksi.



KUVA 39. Jarruvastukset 75 R/1130 W.

Kuvassa 40 on ohjauskaapin ovesta sijaitseva ohjauspaneeli, merkkilamput sekä ohjauskytkimet. Konetta voidaan ohjata sekä manuaali- että automaattimoodissa.



KUVA 40. Ohjauspaneeli, merkkilamput ja käyttökytkimet.

5 LIITÄNTÄKONVERTTERI MSC ESC

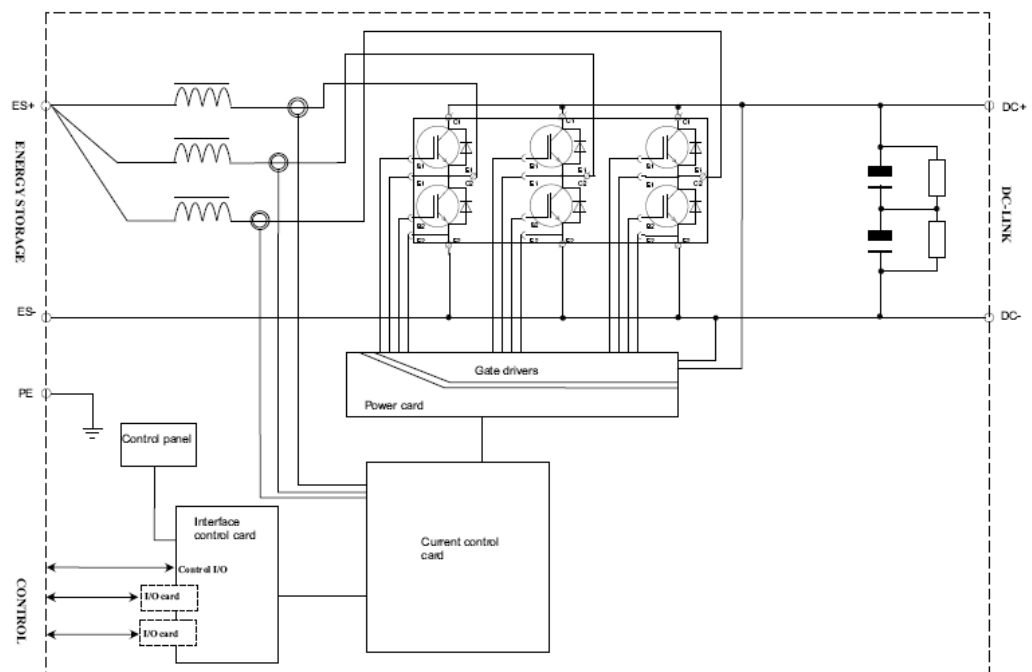
Tässä energiansäästösovelluksessa 2-suuntaisen (bidirectional) liitäntäkonvertterin tehtävänä on siirtää moottoreiden jarrutusenergia taajuus-

muuttajien välipiiristä superkondensaattorien muodostamaan energiavarastoon. Kuvassa 41 on kuva liitäntäkonverterin tulevasta mekaniikasta ilman energiavarastoa.



KUVA 41. Liitäntäkonverteri (MSc Electronics, 2009).

Kuva 42 esittää liitäntäkonverterin toimintaa lohkokaaviotasolla. Konverteri jakautuu kahteen toiminnallisesti selkeään osioon eli ohjausosaan ja teho-osaan.



KUVA 42. Liitäntäkonverterin toiminnallinen lohkokaavio (MSc Electronics, 2009).

5.1 Ohjausosa

Ohjausosa koostuu interface-yksiköstä, virtasäätöyksiköstä ja tehonsyöttöyksiköstä. Interface-yksikkö jakautuu interface-korttiin (I/O-kortti) ja optionaaliseen ohjauspaneeliin. Ohjauspaneelin avulla voidaan syöttää konvertterin toiminnan kannalta oleellisia parametreja interface-kortin kautta sekä indikoida järjestelmän sen hetkistä tilaa.

Interface-kortti lukee energiavaraston tilaa ja antaa virransäätöyksikölle toiminnan kannalta tarpeellisia tietoja ja käskyjä. Tällaisia tietoja ovat esim. energiavaraston lataus/purkaus-toiminto, virran asetusarvot, vikatie-dot sekä järjestelmän virta/jännitetiedot.

Virransäätöyksikkö (current control) keskustelelee interface-yksikön kanssa saaden lisäksi sisäänsä tiedon teho-osan virran oloarvosta. Näiden tietojen perusteella virransäätöyksikkö ohjaa tehonsyöttöyksikössä sijaitsevia IGBT-transistorien hilaohjaimia (gate drivers).

Tehonsyöttöyksikkö syöttää koko järjestelmän piirikorttien tarvitsemat apujännitteet ja ohjaa teho-osan transistoreita kulloisenkin tehontarpeen mukaisesti pulssinleveysmodulaation avulla. Tehonsyöttöyksikkö ohjaa teho-osan jäähdytyspuhaltimen toimintaa teho-osan IGBT-transistorien lämpenemän funktiona. Tehonsyöttöyksikössä on galvaaninen erotus ohjausosan ja teho-osan välillä, mikä käytännössä on toteutettu hilaohjaimia edeltävien optoerottimien avulla.

5.2 Teho-osa

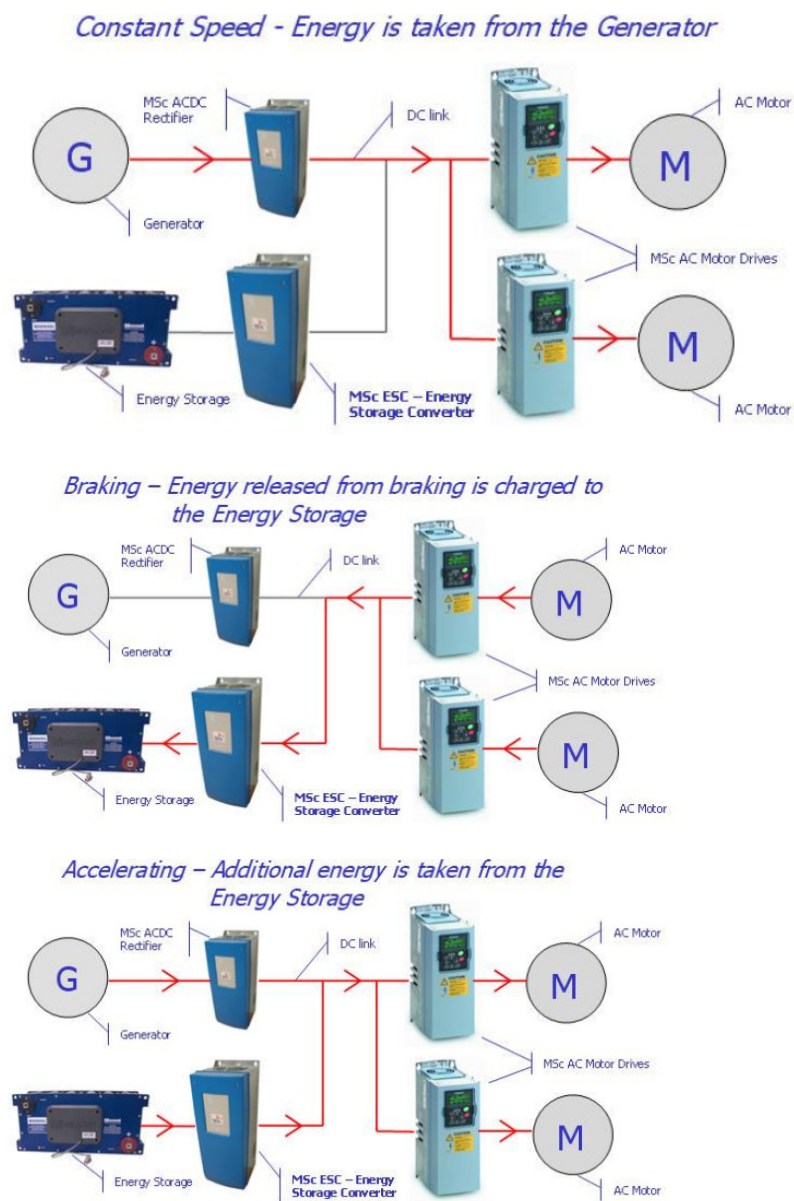
Teho-osa koostuu kolmesta virran aaltoisuutta vaimentavasta suurtaajuuskuristimesta, kolmesta päävirtalinjassa sijaitsevasta hall-tekniikkaan perustuvasta virta-anturista, 6-pulssi IGBT-transistorisillasta, kahdesta välipiiriin aaltoisuutta vähentävästä elektrolyyttikondensaattorista ja niiden purkaus-jännitteentasausvastuksesta.

Kuvan 43 ylemmästä kaaviosta (constant speed) nähdään, että ajettaessa moottoreita vakionopeudella konvertteri ei välitä energiaa suuntaan tai toiseen. Tällöin eivät hilaohjaimet anna ohjausta IGBT-transistoreille eikä näin ollen virtaa kulje.

Kuvan 43 keskimmäisen kaavion mukaan jarrutusilanteessa (braking) taajuusmuuttajien välipiiriin varastoituva energia johdetaan liitäntäkonvertterin kautta superkondensaattorien muodostamaan energiavarastoon. Tällöin verkkoon (generator) ei siirry tehoa. Nyt järjestelmä on havainnut kohonneen jännitteen välipiirissä ja hilaohjaimet ohjaavat ylähaaran transistoreita auki ja alahaaran transistoreita kiinni, jolloin transistoriparien keskikipisteestä saatavat pulssinleveysmoduloidut 3-vaihesignaalit summataan kuristimien jälkeen ja näin saadaan pienen jäännösalltoisuuden omaava tasa-

jännite syötettyä energiavarastoon. Käytännössä konvertterissa on napojen ES+ ja ES- välissä isokapasitanssinen elektrolyyttikondensaattori energiavaraston rinnalla pienentämässä latausjännitteen jännösaaltoisuutta

Kuvan 43 alempi kaavio näyttää energian kulkusuunnan energiavaraston purkaustilanteessa kiihdytettäessä (accelerating) moottoreita, jolloin hetkellinen tehopiikki otetaan verkon lisäksi energiavarastosta. Nyt järjestelmä on havainnut jännitteen pudotuksen välipiirissä. Tällöin virransäätöyksikkö ohjaa transistorisillan alahaaran transistorit auki ja ylähaaran transistorit kiinni siksi aikaa, kunnes haluttu tehotaso saavutetaan. Tämän jälkeen teho johdetaan transistorisillan ylähaaran nolladiodien kautta DC-välipiiriin ja sitä kautta moottoreille.



KUVA 43. Energian kulku erilaisissa kuormitusolosuhteissa (MSc Electronics, 2009).

6 TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN JA MITTAUSTULOKSET

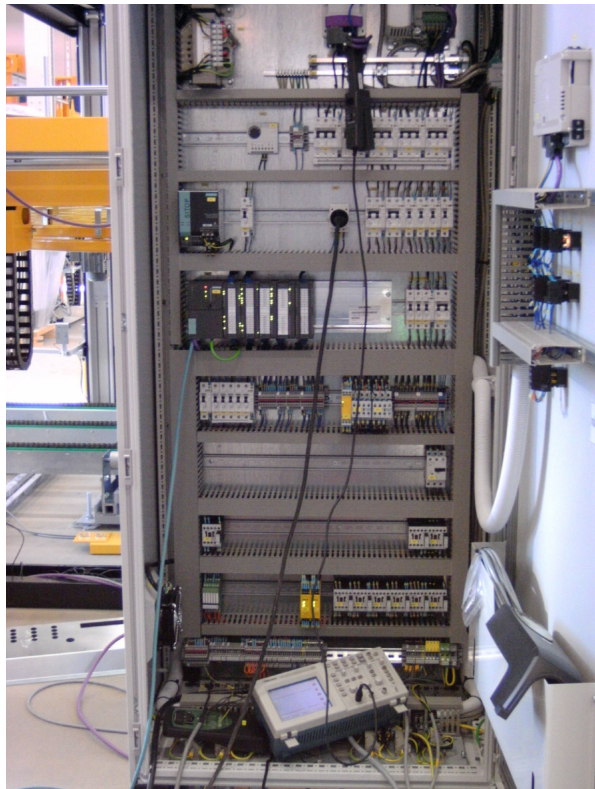
Octopus Twin -lavankäärintäkoneesta päätettiin mitata tehonkulutus vain tehokkaimpien taajuusmuuttajaohjattujen moottoreiden osalta. Näitä olivat kehän pyöritysmoottori sekä nosto- ja laskumoottori. Muut pienemmät moottorit olivat tehoiltaan pieniä ja siten merkityksettömiä energiansäästöjärjestelmän kannalta.

Tutkimuksen lähtökohtana oli selvittää energiansäästöjärjestelmän soveltuvuus kyseiseen lavankäärintäkoneeseen mittaamalla aina kyseisen taajuusmuuttajan lähtöjen ja tulojen virrat toimintasyklin aikana käyttämällä oskilloskooppia ja tehomittaria. Lisäksi mitattiin kyseisen taajuusmuuttajan virrat erikseen kiihdytys- ja jarrutusvaiheessa. Lopuksi mitattiin jarruvastusten tehot jarrutusvaiheessa.

Mittauksissa käytetyt mittalaitteet olivat

- Tektronix TDS2012 2-kanavainen oskilloskooppi, 100 MHz
- Fluke 80i-110S AC/DC-virtakahva, skaalaus 10 mV/A
- Hioki 3169-21 kolmivaihetehomittari
- Hioki 9661 virtapihdit, skaalaus 1 mV/A, 500/600 VAC.

Kuvassa 44 on esitetty mittausjärjestely oskilloskoopilla ja virtakahvalla. Virtakahva on kytketty kehän pyöritysmoottorin taajuusmuuttajan lähtöön.



KUVA 44. Mittaus oskilloskoopilla ja virtakahvalla.

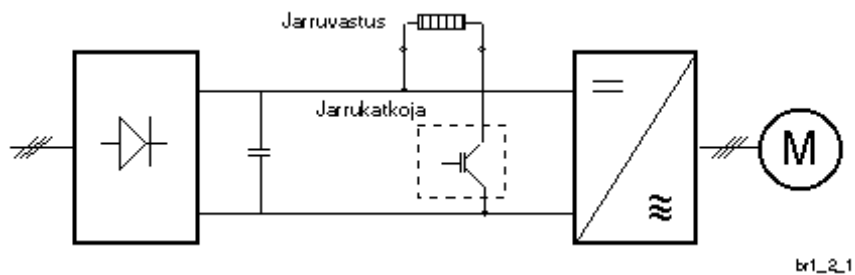
Kuvassa 45 on esitetty mittausjärjestely 3-vaihetehomittarilla ja kolmella virtapihdillä.



KUVA 45. Mittaus 3-vaihetehomittarilla.

6.1 Jarrukatkojat ja –vastukset

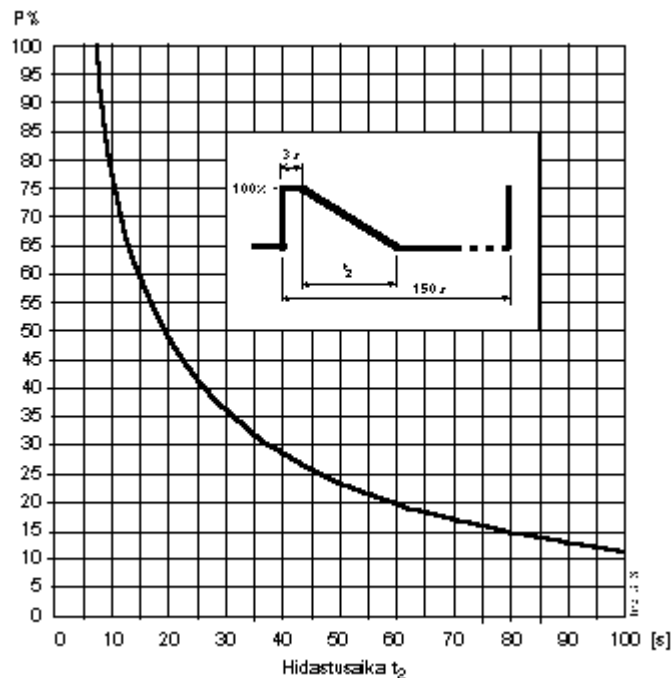
Tässä luvussa käsitellään jarrukatkojan ja jarruvastuksen teoriaa mittaustulosten ymmärtämisen kannalta vain suppeasti. Kuvassa 46 on esitetty jarrukatkojan ja jarruvastuksen periaatteellinen kytkentä taajuusmuuttajan kanssa. jarruvastus voi olla ulkopuolinen yksikkö tai se voidaan integroida taajuusmuuttajan sisään, mikäli jarrutustehot ovat riittävän pieniä.



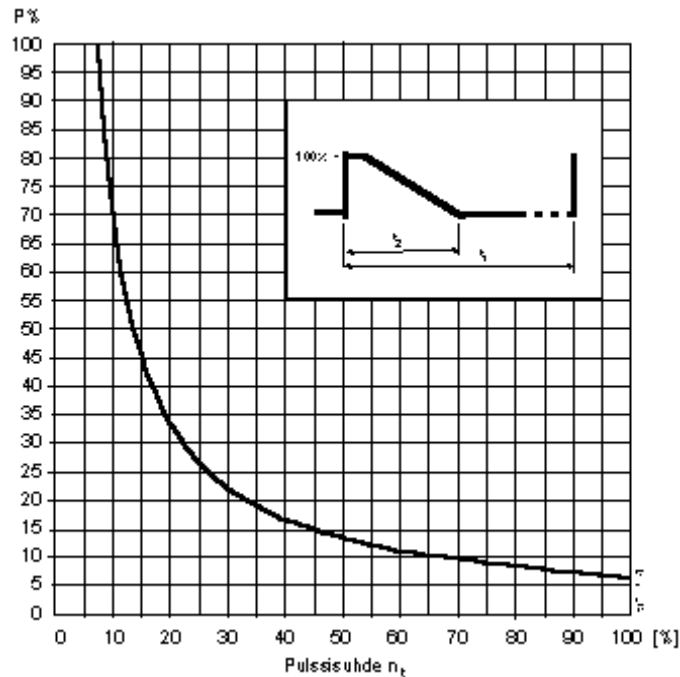
KUVA 46. Jarrukatkoja ja jarruvastus (Vacon, 2006).

Jarrukatkojan toimintaperiaate perustuu DC-välipiirin jännitteen nousuun jarrutustilanteessa. Taajuusmuuttajan ohjausyksikkö havaitsee välipiirin jännitteenousun jarrutustilanteessa ja kytkee jarrukatkojan transistorille välipiirin jännitteenousua vastaavan PWM-signaalin, jonka taajuus on verrannollinen välipiirin jännitteeseen eli mitä korkeampi jännite sitä suurempi pulssisuhde transistorin ohjauksella.

Jarruvastuksen valinnassa tulee huomioida käytön vastukselle asettamat vaatimukset. Valintaan vaikuttavat osaltaan siihen jarrutusjaksojen aikana johdettu maksimiteho sekä keskimääräinen teho. Maksimiteho määrää tarvittavan kaapeloinnin ja rakenteen, keskimääräinen teho määrää jäähdytystarpeen. Lisäksi tulee huomioida jarrukatkojan kytkinkomponentin virran- ja tehonkesto. Kuvassa 47 on esitetty graafisesti jarrutusajan suhde keskimääräiseen jarrutustehoon sekä kuvassa 48 on graafinen esitys pulssisuhteen suhteesta keskimääräiseen jarrutustehoon.



KUVA 47. Jarrutusajan suhde keskimääräiseen jarrutustehoon (Vacon, 2006).



KUVA 48. Jarrutusajan suhde keskimääräiseen jarrutustehoon (Vacon, 2006).

6.2 Pyöritysmoottorin mittaukset

Aluksi tarkistettiin taajuusmuuttajan parametrilistasta moottorin kiihdytys- ja hidastusajat. Kiihdytysaika oli 2,3 s ja hidastusaika 2,2 s. Konetta ajettiin käsikäytöllä ja mitattiin pyöritysmoottorin jarruvastukselle menevät keskiarvotehot taulukon 5 mukaisesti:

TAULUKKO 5. Pyöritysmoottorin jarruvastuksen keskiarvoteho.

$U_1 = 20,3 \text{ V}$	$I_1 = 0,22 \text{ A}$
$P = 0,08 \text{ kW}$	
$f = 1,2 \text{ kHz}$	$E = 0,0005 \text{ kWh} = 1800 \text{ Ws}$

Taulukossa 6 ovat käsikäytöllä mitatut pyöritysmoottorin jarruvastukselle menevät maksimitehot:

TAULUKKO 6. Pyöritysmoottorin jarruvastuksen maksimiteho.

$U_1 = 591 \text{ V}$	$I_1 = 7,3 \text{ A}$
$P = 4,3 \text{ kW}$	
$f = 411 \text{ Hz}$	$E = 0,0005 \text{ kWh} = 1800 \text{ Ws}$

Näin ollen jarruvastukseen menevä keskimääräinen teho hidastusrampin aikana on kaavan 4 mukaisesti

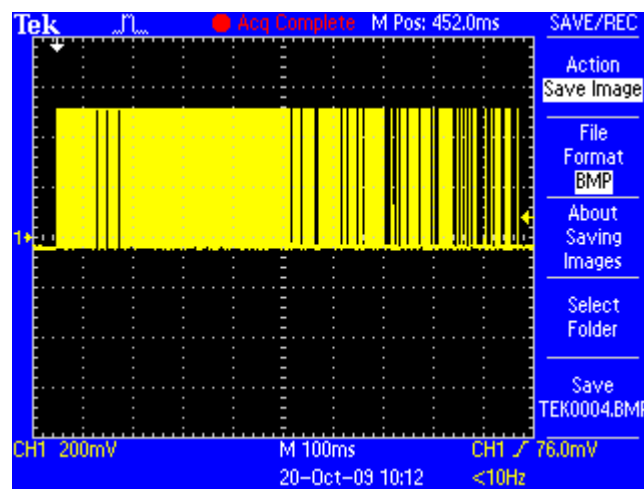
$$P_{\text{AVE}} = E / t = 1800\text{Ws} / 2,2\text{s} = 818\text{W}, \text{ missä} \quad (4)$$

$E = \text{energia [Ws]} = [\text{J}]$

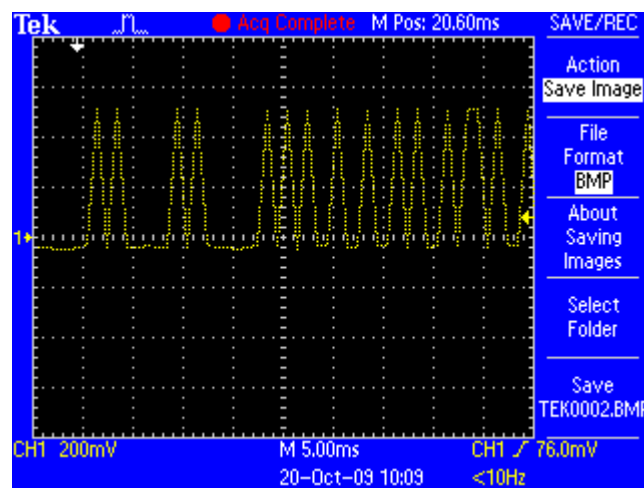
$P_{\text{AVE}} = \text{keskimääräinen teho [W]}$

$t = \text{hidastusaika [s]}$

Kuvassa 49 on vertailumittaus pyöritysmoottorin jarruvastukselta oskillooskoopilla, jolloin saatiin jarruvastuksen toiminta-ajaksi n. 0,9 s ja amplitudiksi n.52 A. Kyseessä on kuitenkin pulssinleveysmoduloitu (PWM) signaali, joten tehollisarvon laskeminen kuvan perusteella ei ole mahdollista. Kuvassa 50 on pyöritysmoottorin jarrutuksen alun pulssikuvio selventämässä em. asiaa.



KUVA 49. Pyöritysmoottorin jarrutusaika.



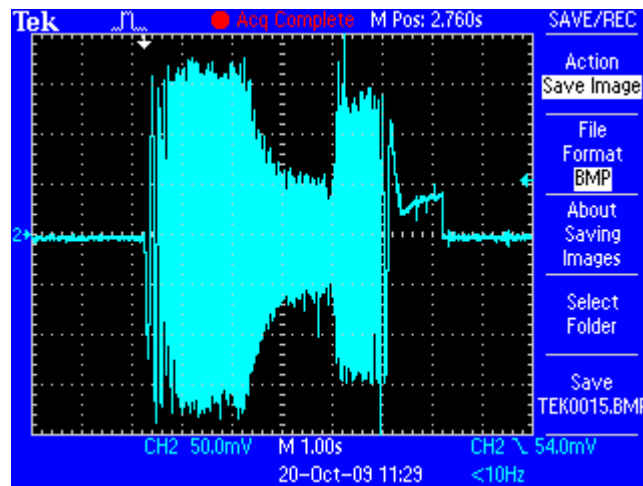
KUVA 50. Pyöritysmoottorin jarrutuksen alun pulssikuvio.

Lisäksi mitattiin Hiokilla 3-vaiheisesti pyöritysmoottorin taajuusmuuttajan keskimääräiset lähtötehot taulukon 7 mukaisesti.

TAULUKKO 7. Pyöritysmoottorin taajuusmuuttajan lähdön keskimääräiset tehot.

U1 = 317 V	I1 = 6,2 A	P1 = 0,7 kW
U2 = 317 V	I2 = 6,2 A	P2 = 0,7 kW
U3 = 317 V	I3 = 6,2 A	P3 = 0,7 kW
Uave = 317 V	Iave = 6,2 A	Ptot = 2,1 kW
		E = 0,0053 kWh = 19080 Ws

Kuvassa 51 on havainnollistamisen vuoksi koko pyöritysmoottorin sykli, kun moottoria ajettiin käsikäytöllä 6 s. Mittaus tehtiin taajuusmuuttajan lähtövaiheesta U.



KUVA 51. Pyöritysmoottorin koko sykli 6 s:n aikana.

6.3 Nosto/lasku-moottorin mittaukset

Kehän nosto/lasku-toiminnossa ainoastaan laskussa meni tehoa jarruvastukselle. Taajuusmuuttajan nopeutta nostotoiminnossa säätö paikan tunnistaava absoluuttianturi ja jarruna toimi kehän oma massa.

Aluksi tarkistettiin taajuusmuuttajan parametrilistasta moottorin kiihdytys- ja hidastusajat. Kiihdytysaika oli 1,6 s ja hidastusaika 0,5 s. Koneita ajettiin käsikäytöllä ja mitattiin nosto/lasku-moottorin jarruvastukselle menevät keskiarvotehot laskutoiminnossa taulukon 8 mukaisesti

TAULUKKO 8. Laskumoottorin jarruvastuksen keskiarvoteho.

U1 = 95 V	I1 = 1,5 A
P = 0,4 kW	
f = 84 Hz	E = 0,0011 kWh = 3960 Ws

Taulukossa 9 ovat käsikäytöllä mitatut laskumoottorin jarruvastukselle menevät maksimitehot.

TAULUKKO 9. Laskumoottorin jarruvastuksen maksimiteho.

U _I = 319 V	I _I = 5,8 A
P = 1,8 kW	
f = 926 Hz	E = 0,0011 kWh = 3960 Ws

Näin ollen keskimääräinen teho hidastusrampin aikana saadaan kaavalla 5.

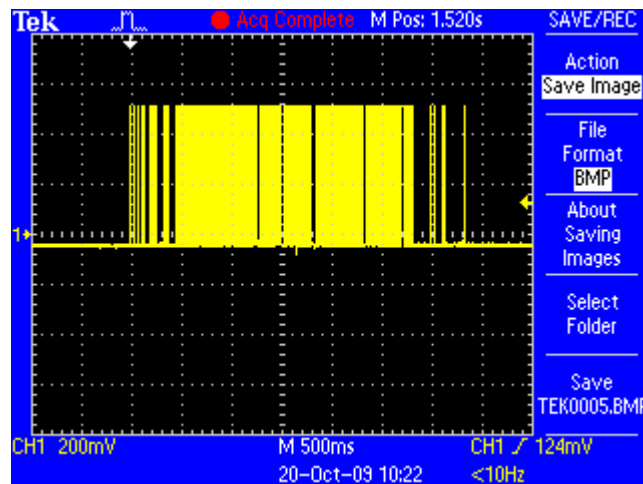
$$P_{AVE} = E / t = 3960Ws / 0,5s = 7920W, \text{ missä} \quad (5)$$

E = energia [Ws] = [J]

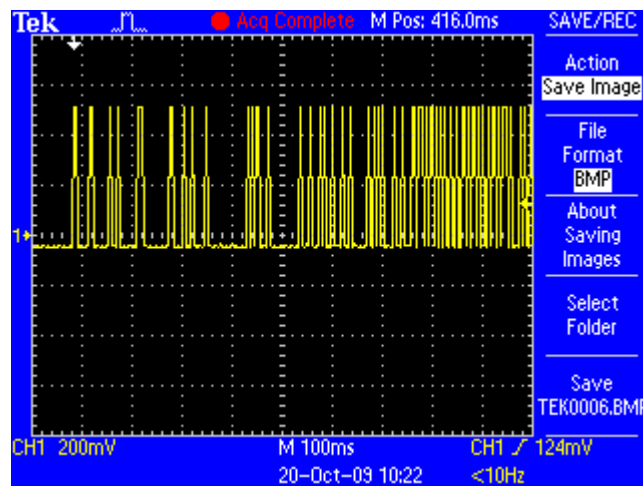
P_{AVE} = keskimääräinen teho [W]

t = hidastusaika [s]

Kuvassa 52 on vertailumittaus oskilloskoopilla, jolloin saatiin jarruvastuksen toiminta-ajaksi n. 3,4 s ja amplitudiksi n. 52 A. Kyseessä on kuitenkin pulssinleveysmoduloitu (PWM) signaali, joten tehollisarvon laskeminen kuvan perusteella ei ole mahdollista. Kuvassa 53 on laskumoottorin jarrutuksen alun pulssikuvio selventämässä em. asiaa.



KUVA 52. Laskumoottorin jarrutusaika.



KUVA 53. Laskumoottorin jarrutuksen alun pulssikuvio.

Lisäksi mitattiin Hiokilla 3-vaiheisesti laskumoottorin taajuusmuuttajan keskimääräiset lähtötehot taulukon 10 mukaisesti.

TAULUKKO 10. Laskumoottorin taajuusmuuttajan lähdön keskimääräiset tehot.

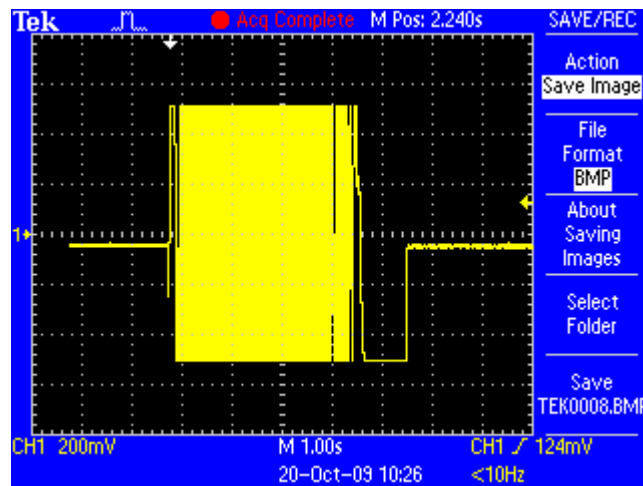
U1 = 136 V	I1 = 3,8 A	P1 = -0,33 kW
U2 = 136 V	I2 = 3,9 A	P2 = -0,33 kW
U3 = 136 V	I3 = 3,8 A	P3 = -0,34 kW
Uave = 136 V	Iave = 3,8 A	Ptot = -1 kW
		E = 0,0001 kWh = 360 Ws

Kuten taulukosta 10 nähdään, moottori tuottaa keskimäärin 1 kW:n tehon laskutoiminnossa. Tämän vuoksi on taulukossa 11 esitetty moottorin ottamat maksimitehot laskutoiminnon aikana.

TAULUKKO 11. Laskumoottorin taajuusmuuttajan lähdön maksimitehot.

U1 = 440 V	I1 = 29 A	P1 = 1,44 kW
U2 = 420 V	I2 = 21,5 A	P2 = 1 kW
U3 = 435 V	I3 = 29 A	P3 = 1,3 kW
Uave = 420 V	Iave = 20,5 A	Ptot = 2,6 kW
		E = 0,0001 kWh = 360 Ws

Kuvassa 54 on havainnollistamisen vuoksi koko laskumoottorin sykli, kun moottoria ajettiin käsikäytöllä koko laskutoiminnon vaatima matka. Mittaus tehtiin taajuusmuuttajan lähtövaiheesta W.



KUVA 54. Laskumoottorin koko sykli.

7 MITTAUSTULOSTEN ANALYYSI

Mittaustuloksia analysoitaessa päätettiin ottaa oletuskonvertteriksi MSc Electronics Oy:n valmistama eli kaupallinen ESC-konvertteri, jonka hyötysuhde lataus- ja purkutoiminnon aikana on n.0,95 molempiin suuntiin.

DC-linkin nimellisjännitteeksi valittiin nimellinen kokoaaltoasasuunnattu AC-jännite, jonka arvo saadaan kaavasta 6.

$$U_{dc} = 400VAC \times 1,35 = 540VDC \quad (6)$$

Konvertteri aloittaa lataustoiminnon, kun välipiirin jännite jarrutusilanteessa ylittää 545 VDC ja purkaustoiminnon, kun välipiirin jännite alittaa 535 VDC moottorikäyttöjen kuormittaessa välipiiriä.

7.1 Energiavaraston mitoitus superkondensaattoreilla

Käytetyn konvertterin optimaaliseksi muuntosuhteeksi on testeissä havaittu 1:12, jolloin nimellinen hyötysuhde on vielä saavutettavissa (H.Yli-Rämi, henkilökohtainen tiedonanto 2009). Käyttämällä suurta muuntosuhdetta energiavaraston superkondensaattoreiden määrä saadaan minimoitua ja siten kustannuksia laskettua. Näin ollen superkondensaattoreilla toteutetun energiavaraston minimijännitteeksi purkauksen jälkeen saadaan kaavalla 7

$$U_{min} = 540VDC / 12 = 45VDC (U_{MIN}) \quad (7)$$

Energiavaraston mitoitus tulee olla sellainen, että se pystyy lataamaan ja purkamaan käärintäsyklissä suurimman eli laskutoiminnosta saatavan jarrutusenergian kokonaisuudessaan. Näin ollen suurin kondensaattoreihin ladattavissa oleva jarrutusenergia huomioon ottaen konvertterin hyötysuhde saadaan kaavasta 8.

$$E = 3960J \times 0,95 = 3762J \quad (8)$$

ja tästä energiasta jälleen purettavissa oleva energia huomioon ottaen konvertterin hyötysuhde kaavan 9 mukaan on

$$E = 3762J \times 0,95 = 3574J \quad (9)$$

Energiavaraston jännitteen muutokseksi lataus/purkaus –syklin aikana saatiin käytettäessä Maxwellin superkondensaattoria 150 F/2,7 VDC, jolloin $\Delta U = 14$ VDC eli $U_{MAX} = 59$ VDC. Tällöin kondensaattoreiden lukumääräksi saatiin 59 V / $2,7$ V = 21,85 eli 22kpl. Näin ollen uudelleenkäytettäväksi energiaksi saadaan kaavalla 10

$$E = 0,5 \times C \times \Delta U^2, \text{ missä} \quad (10)$$

C = superkondensaattorin kapasitanssin suhde lukumäärään
 ΔU = energiavaraston jänniteväli $[(U_{\text{MAX}})^2 - (U_{\text{MIN}})^2]$

Tällöin voidaan laskea kaavaa 10 soveltaen:

$$E = 0,5 \times (150F / 22\text{kpl}) \times (59\text{VDC})^2 - (45\text{VDC})^2 = 4964\text{J} \quad (11)$$

Liitteessä 2 on valitun superkondensaattorin tekniset tiedot. Kuten huomataan, on energiavaraston laskennassa huomioitava 10 vuoden elinaikana tapahtuva mahdollinen 30 %:n kapasitanssin lasku sekä sisäisen resistanssin osuus (ESR = 14 mΩ). Näin ollen tulee energiavarasto ylimitoittaa vastaamaan em. arvoja kaavan 11 mukaisesti. Muita mitoituksiin liittyviä spesifikaatioita ovat energiatiheys, lataus/purkaus-syklien lukumäärä ja maksimi huippuvirta.

Koska yhden kondensaattorin massa on 35 g ja energiavarastossa on 22 kpl kondensaattoreita, tulee kokonaisuusmassaksi 0,035 kg x 22 = 0,77 kg. Kun ilmoitettu energiatiheys on 4,3 Wh/kg, saadaan koko energiavaraston energiatheydeksi 4,3 Wh/kg x 0,77 kg = 3,3 Wh. Koska maksimaalinen energian tarve on 1,1 Wh, on mitoitus tältä osin riittävä (Maxwell, 2009).

Valmistaja lupaa kondensaattoreille 500 000 lataus/purkaus-sykliä, jonka merkitys taas riippuu käärintäkoneen käyttöasteesta. Käyttöaste puolestaan on riippuvainen käärintävien lavojen tyypistä, määrästä sekä käärintävistä tuotteista. Käyttöaste on myös yritysکوhtainen eikä sille siis voida antaa mitään yleistä arvoa. Energian säästöt voidaan laskea lähinnä arvion perusteella sekä ottamalla huomioon mahdollinen maksimaalinen käyttöaste.

Koska kondensaattorit on kytketty sarjaan, menee kaikkien kondensaattoreiden läpi sama virta. Data-lehdessä ilmoitettu huippuvirran kesto 65,3 A riittää kattamaan suurimman mitatun virran 29 A helposti.

8 KEHITYSTARPEET JA KEHITYSMAHDOLLISUUDET

Energian hinnan ollessa vielä tällä hetkellä kohtuullisen alhainen, tulee mahdollisen ulkopuolisen energiavaraston ja siihen liittyvän liitäntäkonevertterin olla valmistuskustannuksiltaan ja sitä kautta myyntihinnaltaan huomattavasti nykyistä halvempi, jotta mahdollinen energian säästö riittää kattamaan energiansäästöjärjestelmän hankinta- ja ylläpitokulut. Tämä yksin ei vielä riitä, vaan kulujen kattamisen lisäksi pitäisi saada selvää säästöä energiakustannuksista.

Jarrutusenergian talteenotossa saatavat säästöt ovat niin pienet, että nykYTEKNIKALLA rakennettujen energiaa vähän käyttävien lavankäärintäkoneiden varustaminen em. energiansäästöjärjestelmällä ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Mikäli tulevaisuudessa on tarvetta kehittää tehokkaampia lavankäärintäkoneita ja samaan aikaan saada energiansäästöjärjestelmän valmistustyön ja raaka-aineiden hinnat selvästi edullisemmiksi, on yhdessä energian hinnannousun yhteydessä ainakin teoriassa mahdollista hyödyntää prosessissa syntyviä hukkathejoja.

Kustannusten leikkaaminen vaatisi käytännössä energiansäästöjärjestelmien massatuotannon aloittamisen halvan työvoiman maissa. Tämä taas ei ole järkevää johtuen lavankäärintäkoneiden suhteellisen pienestä volyyministä maailmanlaajuisesti mitattuna.

9 LOPPUPÄÄTELMÄT

Mittausten perusteella on mahdollista laskea ainakin teoriassa saatavilla olevat hyödyt jarrutusenergian talteen ottamisessa ja uudelleen käyttämisessä. Tarkastelun kohteena ollut Octopus Twin 200 -käärintäkone kykenee teoriassa käsittelemään 200 lavaa tunnissa, mutta todellinen käyttöaste on edellä todetun mukaisesti täysin riippuvainen käyttökohteesta. Kuitenkin voidaan arvioida, että keskimääräinen käärintätarve voisi olla esim. 50 lavaa tunnissa, jolla esimerkkilaskelma voidaan toteuttaa.

Koneen käärintäsykli alkaa siitä, kun käärintäkehä laskeutuu alas käärittävän lavan ympärille. Tällöin on mahdollista ladata energiavarastoon kaavan 8 mukaisesti 3762 J ja ottaa käyttöön kaavan 9 mukaisesti 3574 J. Seuraava vaihe käärintäsyklissä on kehän pyörytys, jolloin muovikelmu käärittään lavan ympärille. Tämä toiminto ottaa 6 s:n aikana energiaa 19080 J, joten käytettävissä oleva energiavaraston energia riittää n. 19 %:iin pyörytysajasta, jonka jälkeen energiavaraston nimellisjännite on pudonnut minimiarvoonsa 45 VDC:iin. Tässä ei ole otettu huomioon taa-juusmuuttajan kytkimien jännitehäviöitä.

$$\eta = 3574\text{J} / 19080\text{J} = 0,19 \quad (12)$$

Tämä on paras prosentti, joka voidaan saada käyttämällä energiavarastoa muiden toimintojen tukena. Muiden toimintojen osalta saatavat hyötysuhteet ovat merkityksettömiä

Energiatalouden kannalta välittömät kustannukset voidaan laskea esimerkiksi energian hinnan ja arvioidun päivittäisen jarrutusajan ja -tehon perusteella. Energian hinta vaihtelee maittain, mutta laskelmissa voidaan

käyttää arvioitua 0,05 euron hintaa kilowattitunnilta. Energian vuosikustannukset voidaan laskea kaavalla:

Kustannukset = jarrutusaika (h/päivä) * keskimääräinen jarrutusteho (kW) * energian hinta (euroa/kWh) * 365 (ABB, 2009).

Mikäli oletetaan käärintäkoneen kapasiteetiksi 50 lavaa tunnissa ja työpäivän pituudeksi 8 tuntia, voidaan keskimääräinen jarrutusaika laskea taa-juusmuuttajilta saatujen hidastusaikaparametrien avulla seuraavasti:

- 50 lavaa tunnissa = 400 lavaa päivässä
- yhteenlasketut jarrutusajat ovat 2,2 s + 0,5 s = 2,7 s / lava
- jarrutusajat päivässä ovat 2,7 s x 400 = 0,3 tuntia
- keskimääräinen jarrutusteho on 7,92 kW + 0,818 W = 8,738 kW
- energian hinta 0,05 €/kWh.

Näin ollen jarrutusenergian kustannukseksi kaavan 13 mukaan saadaan vuositasolla:

$$D = 0,3 \text{ h} \times 8,738 \text{ kW} \times 0,05 \text{ €} \times 365 = \text{n. } 48 \text{ €/vuosi.} \quad (13)$$

Energiavaraston ja liitäntäkonvertterin hankintahinta on tämänhetkisen kustannustason mukaan n. 3000 €/järjestelmä, joten investoinnin takaisinmaksuaika ilman energian hinnankorotuksia olisi n. 62,5 vuotta olettaen, että järjestelmän käyttöikä olisi rajaton. Tässä on laskettu liitäntäkonvertterin osuudeksi 2000 € ja energiavaraston osuudeksi 1000 €.

Mikäli lavoja kääritään vastaavasti 150 kpl päivässä (maksiminopeus käytännössä) ja kolmessa vuorossa ympäri vuoden, tulee jarrutusenergian kustannukseksi vuositasolla kaavan 14 mukaisesti

- 150 lavaa tunnissa = 3600 lavaa päivässä
- yhteenlasketut jarrutusajat ovat 2,2 s + 0,5 s = 2,7 s / lava
- jarrutusajat päivässä ovat 2,7 s x 3600 = 2,7 tuntia
- keskimääräinen jarrutusteho on 7,92 kW + 0,818 W = 8,738 kW
- energian hinta 0,05 €/kWh.

$$D = 2,7 \text{ h} \times 8,738 \text{ kW} \times 0,05 \text{ €} \times 365 = \text{n. } 431 \text{ €/vuosi.} \quad (14)$$

Nyt investoinnin takaisinmaksuaika olisi n. 7 vuotta. Tällainen tilanne tuskin on mahdollista ainakaan pitkällä aikajänteellä. Lisäksi tulee ottaa huomioon tuotantoseisokit, lomat ja huollot, jotka vievät osan käärintäkapasiteetista.

Superkondensaattoreiden eliniäksi valmistaja ilmoittaa 10 vuotta tai 500 000 syväpurkaussykliä. Kaikkein kovimmassa käytössä kaavan 14 tapauksessa syväpurkaussyklejä tulisi vuodessa n. 1,3 miljoonaa. Kuitenkin esi-

merkkilaskelmassa superkondensaattoreiden kuormitus on n.30 % maksimikuormituksesta, joten energiavarasto tulisi ainakin teoriassa uusia vuoden välein. Superkondensaattoreiden eliniästä vajaakuormituksella ei ollut saatavissa absoluuttista mittaustietoa, joten elinikäarvio perustuu arvioon. Tällöinkin järjestelmän kokonaiskustannus vuodessa olisi n. 4200 € vaihtotyö mukaan lukien. Takaisinmaksuajaksi saadaan vieläkin 9,5 - 10 vuotta.

Näiden laskelmien ja luvussa 8 todettujen seikkojen perusteella voidaan todeta, että minkään Haloila Oy:n tuotannossa olevan lavankäärintäkoneen hukkaenergiat olisivat niin merkittäviä, että niitä olisi taloudellisesti järkevää ottaa talteen ja hyödyntää muissa toiminnoissa.

10 YHTEENVETO

Tämä energiansäästötutkimus tehtiin Haloila Oy:n toimeksiannosta sen jälkeen kun MSc Electronics Oy:n ja Haloila Oy:n edustajien keskinäisessä kanssakäymisessä tuli ilmi, että MSc Electronics Oy on erikoistunut kyseiseen energiansäästötექnikkaan. Lisäksi tuli esille, että kyseisen tutkimuksen voisi tehdä MSc:n palveluksessa oleva suunnittelijan vakanssilla oleva insinööriopiskelija osana lopputyötään.

Tarvittavat mittaukset tehtiin kolmena eri päivänä Haloilan Maskun toimipisteessä käyttäen valmistuksessa olevia lavankäärintäkoneita. Mittaukset kohdistettiin vain isotehoisimpiin toimintoihin, kuten kehän nosto, kehän lasku ja kehän pyörytys. Tärkeimmät mittaushetket olivat kehän pyörytyksessä ja kehän laskussa tapahtuvat jarrutusenergian häviöt hukkalämmöksi.

Kuten luvusta 9 ilmenee, mittaustulosten perusteella ei ole energiataloudellisesti järkevää hyödyntää jarrutusenergiaa lavankäärintäkoneen muissa toiminnoissa. Ennen mittausten suoritusta käydyissä keskusteluissa arvioitiin mahdollinen energian säästö ja siitä saatava taloudellinen hyöty melko pieneksi. Kuitenkin katsottiin tarpeelliseksi todistaa asia myös ns. vihreitä arvoja arvostavia asiakkaita ajatellen.

Nykyinen energiansäästöpolitiikka ja yhä kohoava energian hinta aiheuttavat sen, että tarpeita vastaaviin tutkimuksiin tulee tulevaisuudessa monilta muiltakin sähkötekniikan osa-alueilta.

LÄHTEET

ABB. 2009. Tekninen tuki. Viitattu 3.11.2009.

<http://library.abb.com/global>

Finnish Electric Vehicle Technologies Ltd. 2009. Hybridiautot. Luettu 7.10.2009.

<http://www.fevt.fi/>

Hydrocell Oy. 2009. Polttokennot. Viitattu 1.10.2009.

<http://www.hydrocell.fi/fi/polttokennot/>

Hybrid cars guide. 2009. Hybridiautot. Luettu 5.10.2009.

<http://www.hybrid-cars-guide.com/hybridi-autot.html>

Immonen Paula. Diplomityö 2008. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Työn nimi: Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi. Luettu 3.10.2009.

ITW Miman kotisivut. 2009. Viitattu 20.9.2009.

<http://www.itwmima.eu/itw.htm>

Kalmar Industries. 2009. Automatic stacking cranes. Viitattu 6.10.2009.

<http://www.kalmarind.com/show.php?id=1020894>

Leppä Ari. Diplomityö 2003. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kestomagneettitahtikonekäytön soveltaminen paperiteollisuuden linjakäytöissä. Viitattu 15.9.2009.

http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricaldrives/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Ari_Leppa.pdf

Maxwell Technologies. 2009. Ultracapacitors. Viitattu 16.10.2009.

<http://www.maxwell.com>

M.Haloila Oy:n kotisivut. 2009. Kokonaispalvelu. Viitattu 5.9.2009.

<http://www.haloila.com/index.php?page=haloila>

Mikkola Mikko. 2002. Helsinki University of Advanced Energy Systems. Vetytulevaisuus. Viitattu 4.10.2009.

http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/fuelcell/vetytulevaisuus/p_erusteet.html

MSc Electronics Oy:n kotisivut. 2009. Viitattu 30.9.2009.
<http://www.mscelectronics.fi/sivut/>

MSc Electronics Oy:n esitteet. 2009. Viitattu 15.10.2009.
<http://www.msc.eu>

Vacon Oyj. 2009. Tuotteet. Taajuusmuuttajat. Viitattu 30.9.2009.
www.vacon.fi

Volvo. Volvo buses image gallery. 2009. Viitattu 30.9.2009.
http://icp.llr.se/CumulusE_Z/VBC_ImageGallery/