



EPORSCHÉ – JARRUTUSTEHON TALTEENOTTO SÄHKÖAJONEUVOISSA

Atte Saarni

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2011
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Saarni, Atte: ePorsche - jarrutustehon talteenotto sähköajoneuvoissa

Opinnäytetyö 38 s., liitteet 3 s.
Huhtikuu 2011

Tämän opinnäytteen tarkoitus oli tutustua sähköajoneuvojen jarrutustehontalteenottojärjestelmiin, suunnitella superkondensaattorimoduulilla toteutettava talteenottojärjestelmä ePorsche 928 sähkökonversiota varten ja tutkia sähköajoneuvossa käytettävän tehoelektroniikan sovelluksia ja mahdollisuuksia. ePorsche projekti on tehty yhteistyössä Tampereen Ammattikorkeakoulun, Tampereen Ammattiopiston ja Tampereen Sähköajoneuvokeskuksen kanssa.

Opinnäytetyössä käsitellään sähköisiä, mekaanisia ja hydraulisia regenerointijärjestelmiä, niiden hyötyjä ja haittoja, sekä tehdään teknillis-taloudellista arviointia näiden kesken. Regeneroivalla jarrutuksella voidaan huomattavasti parantaa sähköauton toimintasädettä, mutta superkondensaattorijärjestelmät ovat vielä verrattain uusia ja harvinaisia henkilöautoissa. Superkondensaattorit ovat kalliita komponentteja, mutta voivat yleistyessään tarjota huomattavia hyötyjä sähköajoneuvotekniikalle.

Tämän opinnäyte sisältää ePorscheen mitoitettun superkondensaattorimoduulin tekniset tiedot ja mitoitusperusteet, joita voidaan hyödyntää projektin toisessa vaiheessa. Toisen vaiheen pääpaino on järjestelmän päivittämisessä suorituskykyisemmäksi. Tämä opinnäytetyö ei sisällä asennusohjeita eikä ole tarkoitettu asennusoppaaksi.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electric engineering
Option of Power systems engineering
Saarni, Atte: ePorsche - Regenerative braking systems in electric vehicles

Bachelor's thesis 38 pages, appendices 3 pages
April 2011

The purpose of this bachelor's thesis was to research regenerative braking systems in electric vehicles, design a braking energy recovery system for ePorsche 928 using super capacitors and examine the possibilities and applications of power electronics used in electric cars. ePorsche project was made in co-operation with Tampere University of Applied Sciences, Tampere College and Tampere Electric Vehicle Center.

This bachelor's thesis will cover electrical, mechanical and hydraulic regenerative braking systems, their advantages and disadvantages and cost-effectiveness. Regenerative braking systems can significantly improve the mileage of electric vehicles but recovery systems utilizing super capacitors are fairly new and costly. Super capacitors are expensive components but can bring significant benefits for electric vehicle technology.

Technical specifications and designing principles of a super capacitor module are included in the thesis and can be used in the second stage of the project. The main focus of the second stage is on improving the overall system performance. Installation instructions are excluded and this thesis is not meant to be used as an installation guide.

Keywords: Regenerative braking, electric vehicles, super capacitor.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTOMENETELMÄT	7
2.1 Jarrutusenergian fysiikka	7
2.2 Energian sähköinen talteenotto	8
2.2.1 Oikosulkumoottori	9
2.2.2 Synkronikestomagneetikone	11
2.2.3 Energian talteenotto sähkömoottorilla	14
2.4 Energian talteenotto vauhtipyörällä	17
3 ENERGIAN SÄÄDETTY TALTEENOTTO	19
3.1 Taajuusmuuttaja	19
3.1.1 Taajuusmuuttajan ohjausmenetelmät	20
3.2 Tasavirtalähde	22
4 SUPERKONDENSAATTORIT ENERGIAVARASTONA	24
4.1 Toimintaperiaate ja rakenne	24
4.2 Edut akkuihin verrattuna	26
5 JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTO EPORSCHESSA	28
5.1 Moottori ja taajuusmuuttaja	28
5.2 Superkondensaattorimoduuli ja tasavirtahakkuri	30
5.3 Jarrutusenergian talteenottojärjestelmän toimintaperiaate	31
6 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33
LIITTEET	36

1 JOHDANTO

ePorche-projektin tarkoituksena on tutkia eri mahdollisuuksia ja suunnittelun periaatteita suuritehoisten autojen muuttamiseksi sähköajoneuvotekniikkaa hyödyntäviksi. Tällaisiin urheiluautokonversioihin viitataan joissain lähteissä nimityksellä eSport-segmentti. Projektissa päädyttiin nimenomaan eSport-konversioon, koska sähköajoneuvotekniikka on tällä hetkellä vielä kallista ja teho ei ole täysin suhteessa hintaan. Moottorin hinta on vain osa järjestelmän kokonaiskustannuksista. Ajoneuvoksi on valittu vuosimallin 1988 Porsche 928 S4, joka on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Porsche 928 S4. (Kuva: Antti Syvänen 2010, muokattu)

Tampereen kaupunkiseudun elinkeino- ja kehitysyhtiö Tredea Oy:n koordinoiman Electricity-hankkeen tarkoituksena on edistää yhteistyötä oppilaitosten, yritysten ja yhteisöjen kesken. Oppilaitoksista mukana ovat Tampereen ammattikorkeakoulu ja Tampereen ammattiopisto. Muunnostyö suoritetaan Tampereen sähköajoneuvokeskuksen tiloissa (TSAK!) Ruskossa.

Projektin päätavoitteena on luoda tietoa ja tukea Suomen sähköajoneuvoteollisuuden kehittymistä tuottamalla uusia ratkaisuja ja täysin vapaasti käytettävää materiaalia. Pi-

tempikantoisia mahdollisuuksia projekti tarjoaa myös eSport kisojen yleistymiselle, sähköajoneuvojen katsastustoiminnan kehitykselle ja suunnittelun standardisoinnille.

Projekti on kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa on tarkoitus saada auto katsastettua katukelpoiseksi minimibudjetilla ja sponsoreiden halukkuudesta riippuen auto esitellään 2011 sähköajoneuvomessuilla. Alkuperäisistä suoritusarvoista tingitään huomattavasti ja periaatteena on oppia ja kerätä tietoa toisen vaiheen toteutusta varten. Toisessa vaiheessa on tarkoitus päivittää moottori ja akusto ja tavoitteena on saada autosta alkuperäistä suorituskykyisempi.

2 JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTOMENETELMÄT

2.1 Jarrutusenergian fysiikka

Kiihdytettäessä auton massaan sitoutuu liike-energiaa, joka jälleen vapautuu autoa hidastettaessa. Tämä kineettinen energia kuluu mm. lämpönä mekaanisessa jarrutuksessa, auton kohtaamaan ilmanvastukseen, tienpinnan kitkavoimiin, ja polttomoottorin pyörittämisestä johtuviin kitkahäviöihin moottorijarrutettaessa. (Nice 2000).

Sen sijaan, että kaikki energia kulutettaisiin ympäristöön hidastettaessa, voidaan osa siitä ottaa talteen esimerkiksi sähköisillä, mekaanisilla tai hydraulisilla järjestelmillä.

Auton massaan sitoutunutta liike-energiaa (E_{kin}) voi arvioida kaavalla 1:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1)$$

jossa m on auton massa ja v auton nopeus.

Energia on siis suoraan verrannollinen painoon ja neliöllisesti verrannollinen nopeuteen.

Esimerkkinä auto, jonka massa on 1500 kg ja nopeus on 60 km/h.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * 1500 \text{ kg} * 16.67 \text{ m/s}^2$$

$$E_{kin} = 208,42 \text{ kJ} \approx 0,058 \text{ kWh}$$

Jos esimerkkinä auto tekee ajomatalla 10 hidastusta 60 km/h – 0 km/h, vapautuu energiaa 0,58 kWh. Tämä on pelkästään hukattu kineettinen energia, lisäksi voidaan erikseen vielä tarkastella auton kohtaamista korkeuseroista johtuvaa potentiaalienergian (E_{pot}) menetystä kaavalla 2:

$$E_{pot} = m * g * h \quad (2)$$

jossa g on gravitaatiokiihtyvyyden ja h on kappaleen korkeus valitusta nollassa.

Esimerkkinä auto ajaa ylös 20 m mäen. Autolla on näin ollen potentiaalienergiaa:

$$E_{pot} = m * g * h$$

$$E_{pot} = 1500 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 20 \text{ m}$$

$$E_{pot} = 294,3 \text{ kJ} \approx 0,082 \text{ kWh}$$

Jos esimerkki automme tekee kaksi mäkilaskua, on vapautuneen kineettisen energian ja potentiaalienergian summa 0,74 kWh. Vuonna 2011–2012 myyntiin tulevan Chevrolet Voltin akkupaketin energiasisältö on 16 kWh. Tällöin menetetyn energian summa akun energiasisällöstä olisi kyseisellä autolla:

$$\frac{0,74 \text{ kWh}}{16 \text{ kWh}} * 100\% \approx 4,6\%$$

Vaikka tämä esimerkki on karkea arvio, eikä ota huomioon esimerkiksi talteenottojärjestelmän häviöitä, voidaan silti sanoa, että riippuen ajo-olosuhteista jarrutustehon talteenotolla voidaan huomattavasti pienentää auton energiahäviöitä ja sitä kautta parantaa auton toimintasädetä.(Turpen).

2.2 Energian sähköinen talteenotto

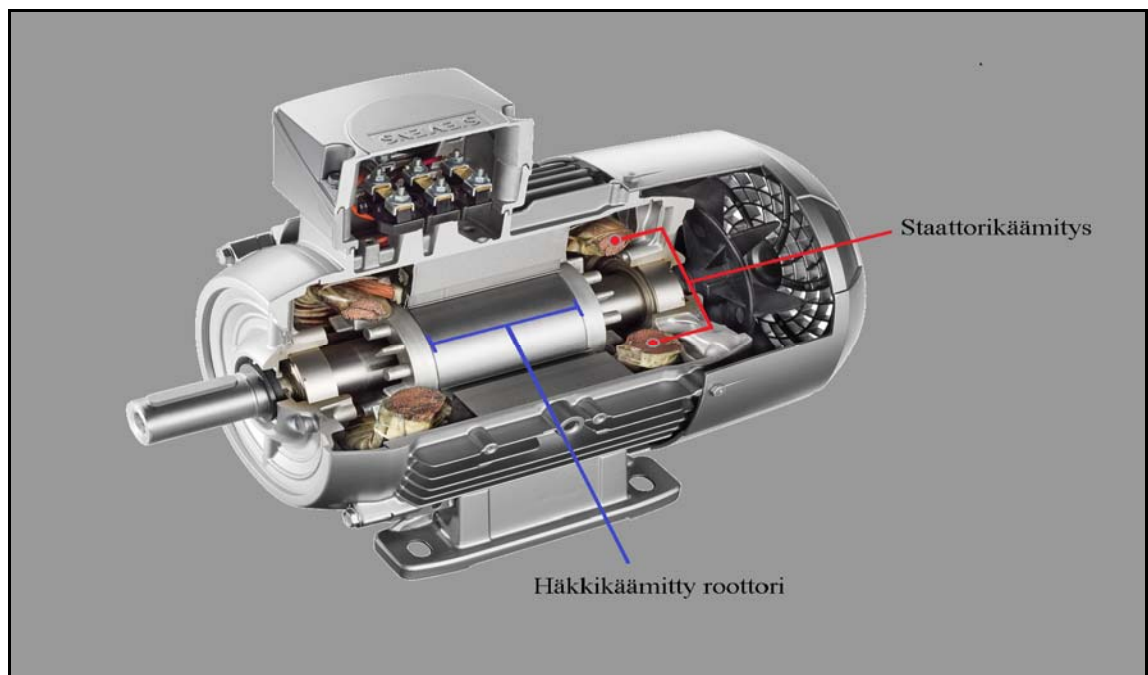
Autonvalmistajista esimerkiksi Tesla (Soldberg 2007), Toyota (Toyota) ja Chevrolet (Chevrolet Finland Oy) ovat tuoneet myyntiin mallit, joissa on mahdollisuus regeneratiiviseen jarrutukseen. Kaikissa näissä autoissa on käytetty vaihtosähköön perustuvaa moottoria ja edellä mainituista syistä johtuen on oletettavaa, että myös tulevaisuudessa myyntiin tulevissa autoissa on mahdollisuus ottaa talteen kineettinen energia autoa hidastettaessa. Sähkömoottoria käytetään generaattorina jarrutuksissa ja se saa pyörimisvoimansa auton liikevoimaan sitoutuneesta energiasta.

Alla olen esitellyt kaksi tyypillistä ajoneuvoissa esiintyvää vaihtovirtamoottoria ja näiden taajuusmuuttajaohjattu jarrutustehon talteenotto. Tasasähkömoottoria ei ole käsitelty, vaikka se on ainakin harrastelijakäytössä vielä yleinen halvan hintansa ja yksinkertaisen ohjauksensa vuoksi. Tasasähkömoottorilla on toteutettu myös maailman nopein katsastettu sähkökiihdytysauto, White Zombie (Chancey 2010).

2.2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori koostuu yksinkertaisimmillaan staattorista ja sen käämityksistä, roottorista sekä rungosta. Tässä osiossa käsitellään epätahtityyppinen oikosulkumoottori, jossa roottorin käämit ovat häkkikäämittyjä ja oikosuljettu navoistaan renkailla. Tämä on myös yleisin teollisuudessa käytetty sähkömoottorityyppi ja soveltuu säädettävyytensä vuoksi hyvin sähköajoneuvokäyttöön. Ohjattuna vaihtosähkömoottorilla on esimerkiksi helppo toteuttaa peruutus ilman kytkentämuutoksia itse moottorissa.

Staattorikäämitykset ja häkkikäämitty roottori ovat kuvassa 2. Kuvassa näkyvät vain staattorikäämitysten päädyt. Käämitykset itsessään kulkevat samansuuntaisesti roottorin häkin kanssa staattorirungossa.



Kuva 2. Siemens 1LE1, häkkikäämitty epätahtimoottori. (Kuva: Siemens, muokattu)

Moottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Staattoreihin syötetään kolmivaihevirtaa, joka synnyttää kiertävän magneettikentän eli kiertokentän staattorin ja roottorin ilmväliin. Roottorin oikosuljettuihin napoihin muodostuu kiertokentän vaikutuksesta sähkömotorinen voima. Edelleen roottorin napoihin muodostuu sähkömotorisen voiman vaikutuksesta staattoriin nähden vastakkainen magneettikenttä ja magnetisoitunut roottori lähtee seuraamaan pyörivää kiertokenttää (Korpinen 1997).

Kiertokentän pyörimisnopeus (n) riippuu verkkovirran taajuudesta sekä napapariluvusta kaavan 3 mukaisesti:

$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (3)$$

jossa f on staattoriin syötetyn virran taajuus ja p on napapariluku.

Yksi vaihekäämitys muodostaa napaparin. Euroopassa verkkotaajuus on 50 Hz. Jos napapariluku on 1, on moottorin kiertokentän pyörimisnopeus kaavan 3 mukaisesti 3000 kierrosta minuutissa.

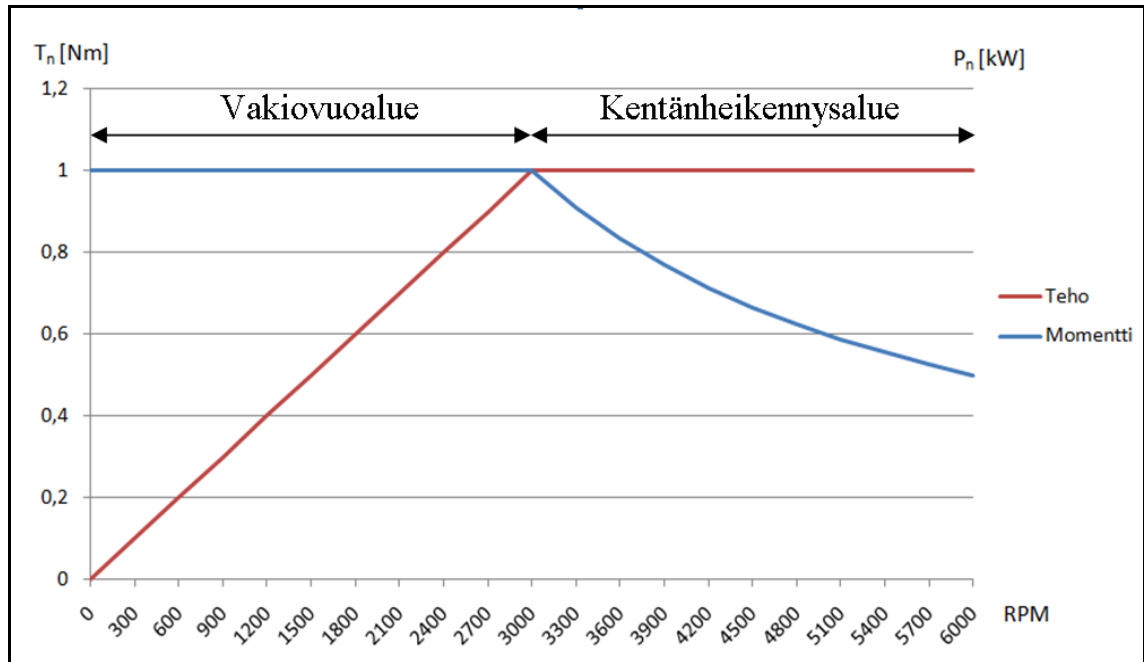
Ideaalisissa tilanteissa myös roottori pyörii 3000 kierrosta minuutissa. Käytännössä kuitenkin roottorin magnetoinnista johtuva tehohäviö aiheuttaa roottoriin jättämää, eli se pyörii hitaammin kuin staattorin kiertokenttä. Tästä myös nimitys epätahtimoottori. On huomattava, että epätahtimoottorin koko toiminta perustuu nimenomaan jättämään. Jos roottori pyörii yhtä nopeasti staattorin kiertokentän kanssa, ei roottoriin indusoidu magneettikenttää ja moottori ei tuota momenttia akselilleen.

Epätahtimoottorin momentti (T) on sidottu pyörimisnopeuteen ja tehoon kaavan 4 mukaisesti

$$T = \frac{P}{2 * \pi * \frac{n}{60}} \quad (4)$$

jossa P on moottorin tuottama mekaaninen teho ja n on kierrosta minuutissa.

Taajuusmuuttajalla moottorin tuottama momentti saadaan esimerkiksi syöttötaajuutta muuttamalla pyörimisnopeudesta riippumattomaksi vakiovoalueella. Kuviossa 1 on esitetty taajuusmuuttajaohjatun epätahtikoneen tuottama ideaalinen momentti ja teho. Epätahtimoottori tuottaa tasaisen nimellismomentin aina nimellispyörimisnopeuteensa asti, jonka jälkeen se laskee kääntäen verrannollisesti pyörimisnopeuteen. Vakiomomenttialuetta kutsutaan vakiovoalueeksi ja momentin laskevaa osiota kentänheikennysalueeksi tai vakiotehoalueeksi.

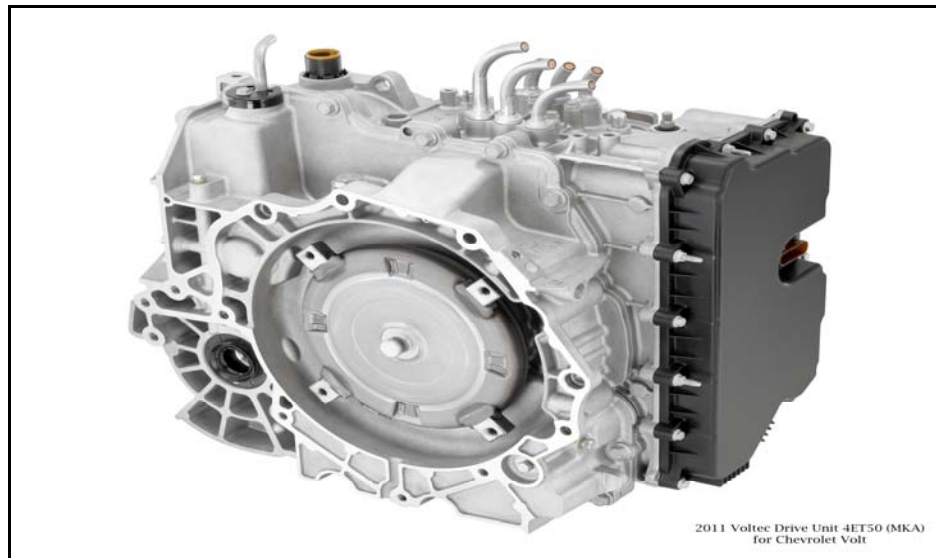


Kuvio 1. Moottorin tuottama teho ja momentti taajuusmuuttajakäytössä. Esimerkin moottorin nimellisyörimisnopeus 3000 RPM.

2.2.2 Synkronikestomagneetikone

Perinteisestä epätahtikoneesta tahtikoneen erottaa roottorin magnetointitapa. Epätahtikoneessa magnetointi tuodaan staattorilta ilmavälin läpi roottorille. Tämä on kustannustehokas tapa, mutta samalla moottorin tehokerroin huononee magnetointitehon takia. Roottorirakenne on erilainen kestmagneetikoneessa verrattuna häkkikämmittyyn epätahtikoneeseen, ja roottorivirtoja ei ole. Koska roottorissa ei kulje virtaa, ei siinä myöskään synny kuparihäviöitä. Kestomagneetikoneella onkin mahdollista saavuttaa erittäin hyvä hyötysuhde.

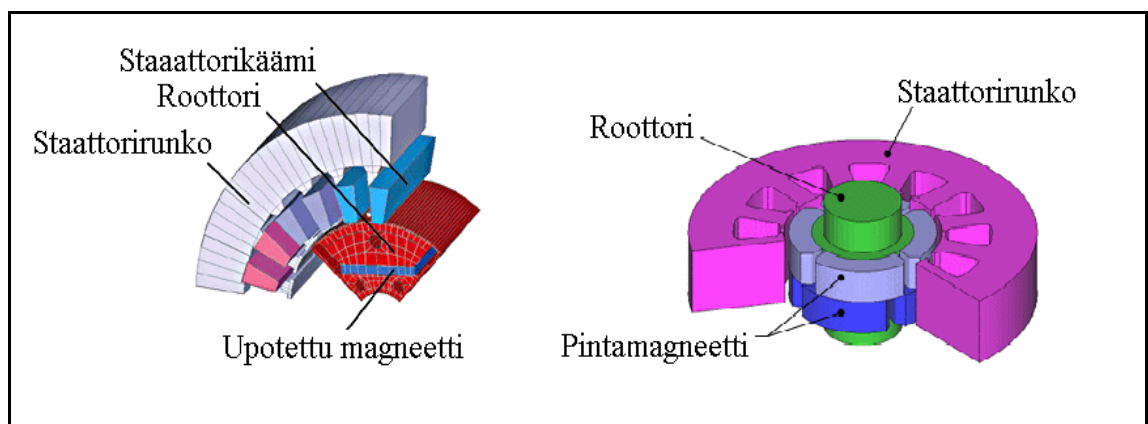
Tapoja tuottaa synkroninen eli tahtimoottori on monta ja ajoneuvokäytöissä ainakin Toyota ja Chevrolet ovat ottaneet käyttöön kestmagnetoidun version tahtikoneesta, jossa magnetointi on hoidettu käyttämällä roottorissa kestmagneetteja. Kuvassa 3 on nähtävissä Chevy Voltin koteloitu kestmagneettimoottori.



Kuva 3. 2011 Chevy Volt kestopagneettimoottori 4ET50-MKA-LUU koteloineen. /17/

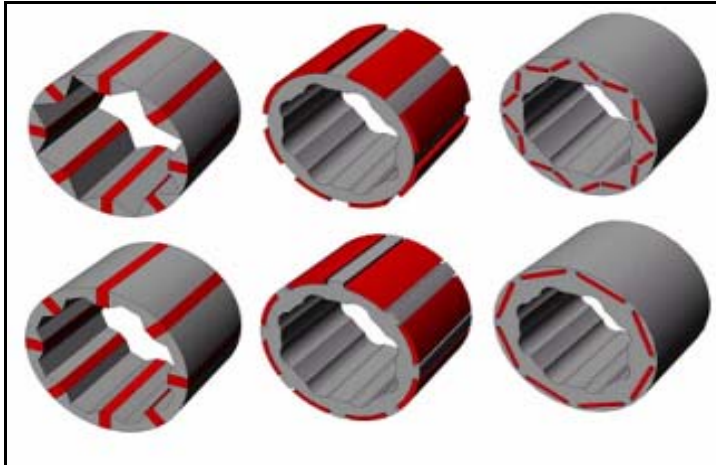
Kestomagneettimateriaaleina voidaan käyttää keraamisia ferriittejä tai muita yhdistelmämetalleja. Nykyisin yksi yleisimmistä käytetyistä materiaaleista kestopagnetoiduissa sähkömoottoreissa on neodyymi-rauta-boori yhdistelmästä sintratut kestopagneetit. Neodyymi kuuluu harvinaisiin maametalleihin ja sen hinta on kysynnän vuoksi noussut (Kangasniemi 2007).

Sijoittamalla magneetit joko roottorin pintaan tai upottamalla ne sisälle, saadaan aikaan erilaisia ominaisuuksia. Kuvassa 4 on esitetty molemmat asennustavat. IPM eli interior permanent magnet, jossa magneetit ovat upotettuina roottoriin, kestää hyvin mekaanista rasitusta korkeissa pyörimisnopeuksissa. IPM tuottaa myös korkean tehon suhteessa painoonsa. SPM, surface permanent magnet, asennustapa taas tarkoittaa roottorin pinnalle asennettuja magneetteja. SPM on yleinen asennustapa magnetoida servokoneen roottori. (Koichi, Kawagishi, Onodera 2001).



Kuva 4. Vasemmalla IPM ja oikealla SPM. /14/, /23/, muokattu.

SPM häviää IPM:lle pyörimisnopeudessa ja tehossa, vertaillessa kahta rungoltaan samankokoista moottoria. SMP on silti tehokkaampi ja sillä on parempi hyötysuhde verrattuna tilavuudeltaan vastaavan kokoiseen epätahtimoottoriin (Kang 2009). Kuvassa 5 on esitetty eri tapoja sijoittaa magneetit roottoriin, jotta saadaan aikaan haluttu magneettinen ominaisuus moottorille.



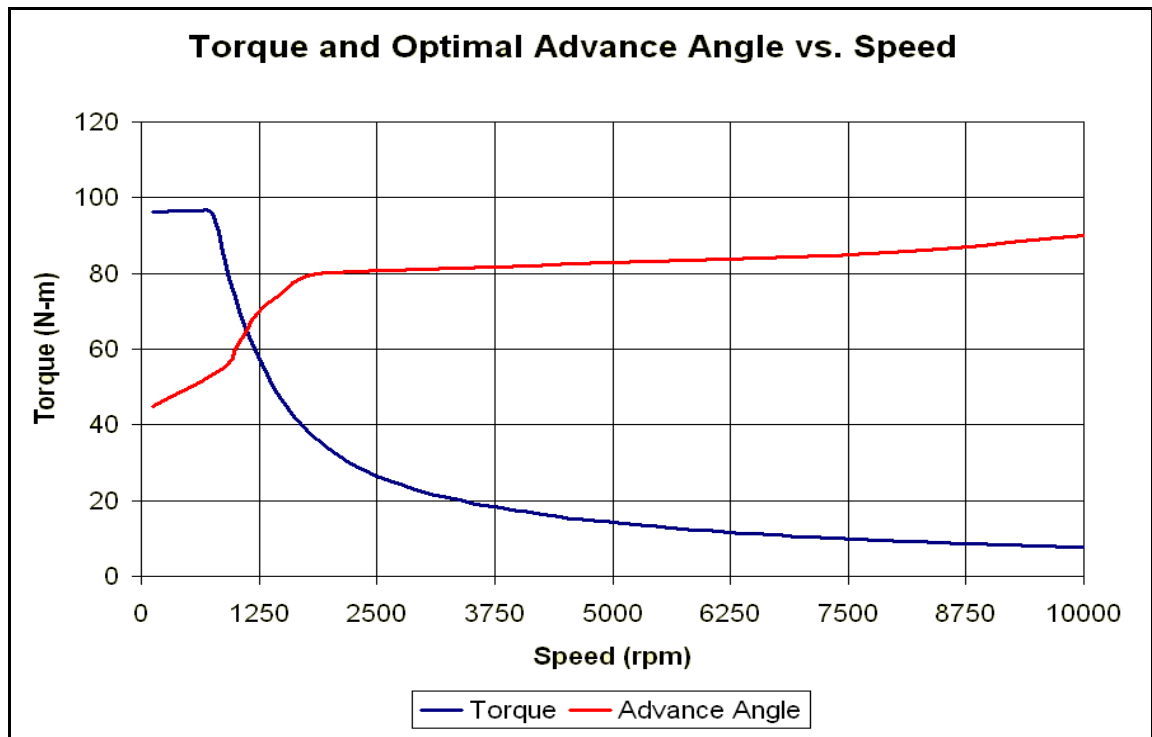
Kuva 5. Magneettien asennustapoja roottorikehälle. /26/

Ajoneuvokäytössä epätahtimoottorin kuvion 1 tyyppinen toiminta on toivottavaa, koska moottoria voidaan pyörittää isoilla kierroksilla ja rajoittavana tekijänä on vain roottoria rasittavat keskipakoisvoimat ja laakerien mekaaninen kesto. Kestomagneetikone taas tuottaa suuren, pyörimisnopeudesta riippuvan ja syötettä jännitettä vastustavan jännitteen korkeilla kierroksilla, jonka takia momentin tuotto kentänheikennysalueella on huono. (Kang 2009).

Uusilla vektoriohjatulla taajuusmuuttajilla on kuitenkin voitu saada aikaan myös hyvin kentänheikennysalueella toimivia IMP-moottoreita, muuttamalla staattorin ja roottorin pituusakselin välistä magneettikentän kulmaa, eli ohjauskulmaa (Ionel 2001). Käytännössä tämä toteutetaan ohjaamalla staattorin käämivirtojen vektorikomponentteja suhteessa roottorin asentoon. Näin on saatu pienennettyä syöttäjänniteelle vastustavaa jännitettä suurilla nopeuksilla (Infolytica).

Kuviossa 2 on esitetty erään 850 RPM, IPM-moottorin simuloitu momenttikäyrä pyörimisnopeuden funktiona. Kuviossa on myös esitetty punaisella ohjauskulman muutos kentänheikennysalueella. Kuviossa 2 voi huomata, että IPM-moottorin tuottama mo-

mentti on hyvin samanlainen verrattuna epätahtimoottorin momenttiin, joka on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 2. IPM-moottorin simulointitulokset. Momentti merkitty sinisellä ja ohjauskulma punaisella. (Kuva: Infolytica, muokattu).

On silti huomattava, että johtuen kestopäätösmoottorista, moottori tuottaa staattoriin jännitteen aina kun roottori on pyörimisliikkeessä ja tämä aiheuttaa tiettyjä ongelmia turvallisuuskulmasta. Esimerkiksi huollon aikana on huolehdittava erillisellä lukituksella roottori paikalleen sähköiskun välttämiseksi. Hinaustilanteessa moottori olisi periaatteessa saatava pois kokonaan renkaile menevältä akselilta tai on muutoin huolehdittava, että jännitteenousu ei aiheuta läpilyöntiä ja aiheuta henkilövaaraa tai tuhoa esimerkiksi taajuusmuuttajaa.

2.2.3 Energian talteenotto sähkömoottorilla

Sähköinen jarrutustehon talteenotto on yleinen ja toimivaksi todettu menetelmä teollisuudessa. Jarrutettaessa sähkömoottoria, se ohjataan taajuusmuuttajalla pyörimään vastakkaiseen suuntaan menosuuntaan nähden. Kuormalla on inertiaa ja se pyrkii edelleen pyörittämään moottoria momentilla, joka riippuu kuorman kineettisestä energiasta ja välityksistä. Toisinsanoen jarrutuksen ajan sähkömoottori on ohjattu toimimaan gene-

raattorina. Kineettinen energia muutetaan taajuusmuuttajalla tehoa vastaavaksi jännitteeksi ja virraksi, joka voidaan tallentaa energiavarastoon.

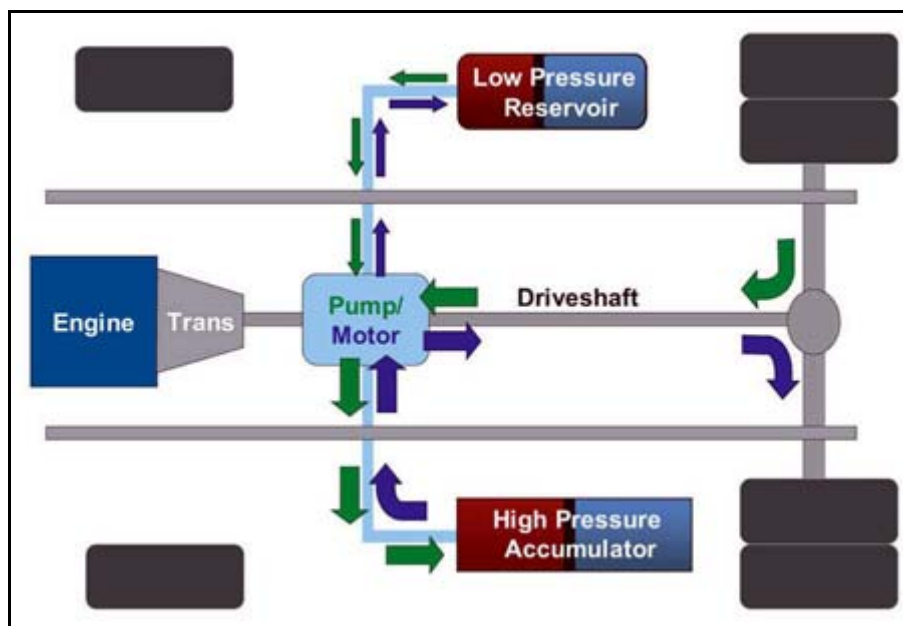
Teollisuudessa taajuusmuuttajaohjattujen moottorien jarrutus voidaan tehdä jännitevälipiiriin tai suoraan verkkoon, riippuen taajuusmuuttajan rakenteesta ja näin esimerkiksi jarruttavan moottorin tuottama energia voidaan varastoida tai syöttää takaisin verkkoon. Tapa jolla kytkentämuutos moottorista generaattoriksi tehdään, riippuu sähkömoottorin rakenteesta ja ohjaimesta.

Taajuusmuuttaja pitää säätämällä virran vakiona jarrutettaessa, jolloin säädeltäväksi suureeksi jää jännite. Jännitteen suuruus määrää jarrutusmomentin suuruuden, ja sitä kautta jarrutusajan. Tämä tarkoittaa, että sähkömoottorilla tehtävä äkkijarrutus aiheuttaa hyvin suuren jännitteen. Taajuusmuuttaja ei voi hidastaa autoa rajattomalla momentilla, vaan suurimman jarrutusmomentin ja pienimmän mahdollisen jarrutusajan määrää taajuusmuuttajan terminen virrankesto. Karkeasti yleistäen voidaan sanoa, että jos taajuusmuuttaja on mitoitettu kestämään moottorin ohjaamiseen vaadittava virta, pystytään moottoria hidastamaan moottorin maksimimomentilla. Maksimimomentti on moottorista riippuen 2 – 3,5-kertainen nimellismomenttiin nähden.

2.3 Energian hydraulinen talteenotto

Eräs mahdollisista tavoista ottaa talteen energiaa on hydrauliiikan käyttö. Esimerkkinä Fordin HPA (Hydraulic Power Assist) konsepti. Periaate on hyvin samantyyppinen kuin sähkömoottorilla tapahtuvassa tehon talteenotossa, mutta sähkömoottorin sijaan, liike-energia käytetään autoon asennetun kaksisuuntaisen pumpun pyörittämiseen. Jarrutettaessa pumppu työntää nestettä typpipainesäiliöihin, joihin syntyy paine kaasun kokoonpainuessa. Kiihdytettäessä typpikaasu laajenee ja työntää nesteen takaisin pumpulle. Nesteen virtaus pyörittää pumpppua ja pumpun liike saadaan mekaanisesti ohjattua takaisin renkaille. (Lampton 2009).

Kuvassa 6 on esitetty HPA järjestelmän periaatteellinen toimintakaavio. Välitettävän voiman suunta on pienipaineisesta säiliöstä suuripainesäiliöön (vihreät nuolet) ja jälleen renkaille (siniset nuolet). Säiliöt muistuvat rakenteeltaan enemmänkin sylintereitä, joissa mäntä erottaa hydrauliiKANesteen ja kokoonpuristuvan kaasun toisistaan. Näin voidaan estää kaasun liikkuminen itse järjestelmässä.



Kuva 6. HPA järjestelmän periaatekuva. (Kuva: HCCI Hydraulic Hybrid, 2006)

Hydraulisen järjestelmän on arvioitu ottavan takaisin jopa 80 % jarrutusenergiasta, joka tarkoittaa, että sen hyötysuhde on parempi kuin sähköisessä talteenotossa. Järjestelmä on kuitenkin painava ja sen käyttöä on kokeiltu raskaisiin ajoneuvoihin, jolloin järjes-

telmän prosentuaalinen massa koko auton massaan suhteutettuna on pienempi kuin kevyissä henkilöautoissa. (Hybric Cars 2006).

Hydraulisen talteenoton huono puoli on se, että se ei yksin pysty liikuttamaan autoa, vaan se on tarkoitettu käytettäväksi lisäjärjestelmänä, kun taas esimerkiksi epätahtimoottorilla varustetussa autossa jarrutustehon talteenotto on ominaisuutena sisäänrakennettu, eikä maksa ylimääräistä.

2.4 Energian talteenotto vauhtipyörällä

Vauhtipyörä on vanha keksintö, jolla on tarkoitus tasata momentin tuottoa esimerkiksi autossa. Vauhtipyörä saa autoissa pyörimisvoimansa moottorilta ja on enemmänkin mekaaninen laite, mutta sen käyttöä sähköisen energian tuottamiseen on tutkittu esimerkiksi rautatiekäytössä.

Pysäkkien välillä voidaan kerätä osa korkeuseroihin ja pysähtymiseen kuluva energiasta takaisin vauhtipyörään sekä se voidaan ladata asemalla, eli se ajetaan nimellisnopeuteensa. Tämän jälkeen vauhtipyörään varastoitunut kineettinen energia vapautetaan tarvittaessa, tuottamalla esimerkiksi vauhtipyörän akselille asennetulla generaattorilla energiaa sähkömoottorille tai ohjaamalla se mekaanisesti variaattorin kautta pyörille. (Parry people movers 2009)

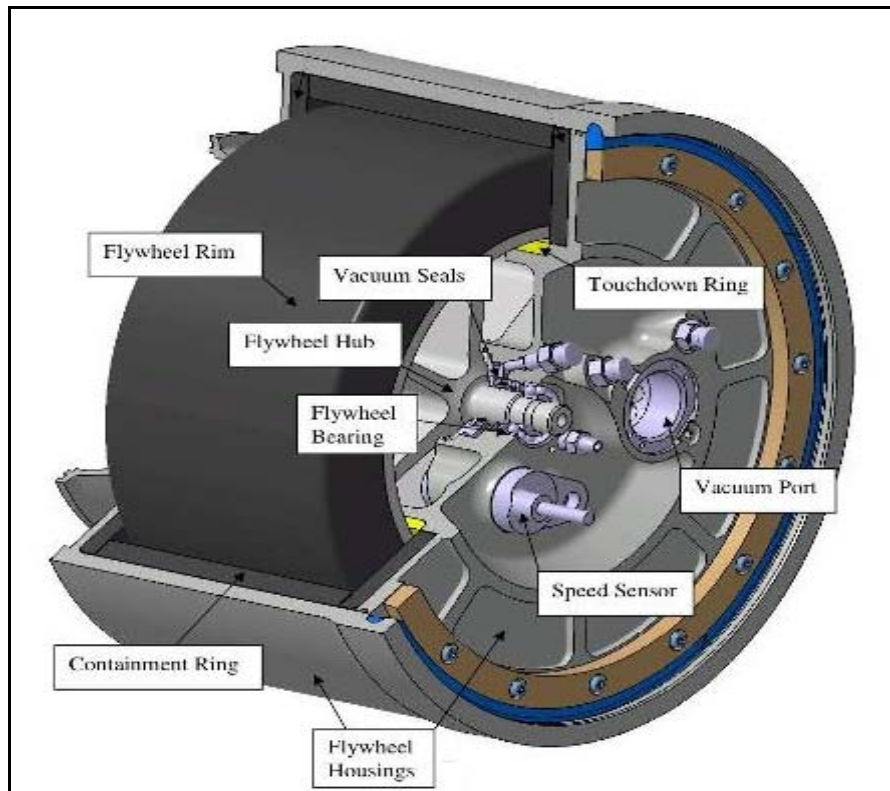
Vauhtipyörä eroaa aikaisemmin tässä työssä esitellyistä talteenottomenetelmistä, sillä se on enemmänkin energiavarasto, jossa esimerkiksi junan vaakasuuntainen kineettinen energia muutetaan pyöriväksi. Vauhtipyörään sitoutuneen rotaatioenergian (E_r) määrää voi arvioida kaavalla:

$$E_r = \frac{1}{2} * J * \omega^2 \quad (5)$$

jossa J on inertia ja ω kulmapyörimisnopeus.

Vauhtipyörän energiamäärään vaikuttaa siis sen massa, massan sijainti pyörällä ja pyörimisnopeus. On huomattava, että käytännössä kaava 5 on kineettisen energian kaavasta 1 johdettu sopivaksi pyöriville kappaleille.

Vauhtipyörän hyötysuhdetta on parannettu tuotekehityksellä mm. vakuumpakkaamalla roottori ja käyttämällä magneettisia laakereita kitkahäviöiden minimoimiseksi. Kuvassa 7 on esitetty Flybrid Systemsin vauhtipyörä, joka on tarkoitettu jopa 60 000 RPM pyörimisnopeudelle. Vauhtipyörän kokoa on voitu pienentää kaavan 7 mukaisesti ja saada silti suuri energiatiheys. Valmistaja lupaa, että vauhtipyörillä on mahdollista saada jopa 70 % jarrutusenergiasta välitettyä takaisin renkaille. (Flybrid Systems).



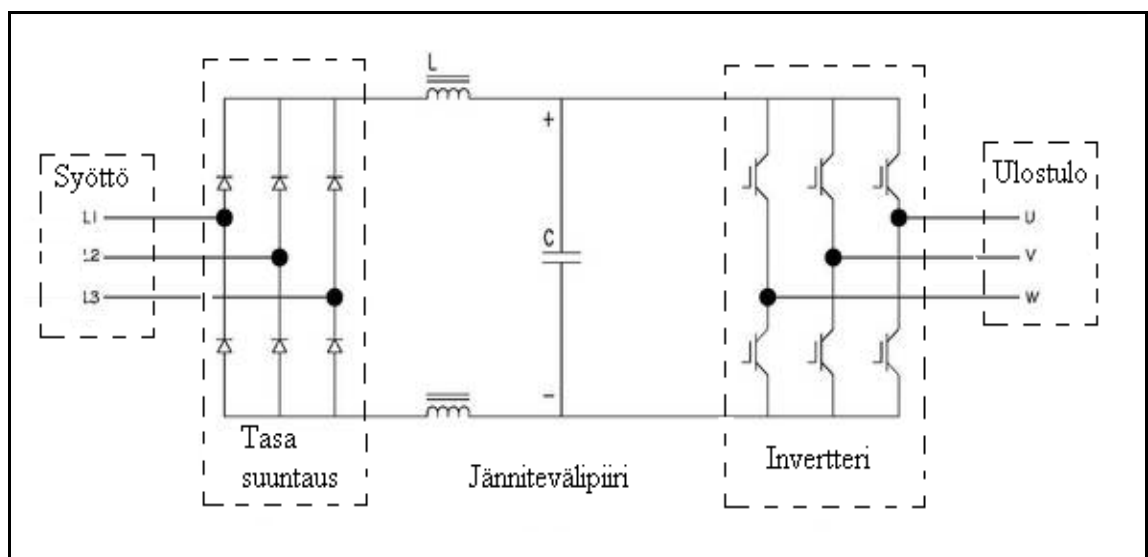
Kuva 7. Vakuumpakattu vauhtipyörä (Kuva: Flybrid Systems, muokattu).

3 ENERGIAN SÄÄDETTY TALTEENOTTO

Kineettistä energiaa ei voida sähköisessä talteenotossa suoraan välittää energiavarastolle. Osa laitteista toimii tasasähköllä ja osa vaihtosähköllä. Sallittu jännitteiden ja virtojen suuruus on riippuvainen komponenteista. Riippuen akkujen varaustilasta, moottorin lämpötilasta, taajuusmuuttajan virrankestosta ja muista tekijöistä, kaikkea energiaa ei välttämättä voida ottaa vastaan, jonka takia energian kulkua ja määrää täytyy pystyä hallitsemaan. Tätä syystä tarvitaan muuntimia ja suuntaajia, eli tehoelektroniikkaa.

3.1 Taajuusmuuttaja

Verkkoon kytkettynä taajuusmuuttaja muuntaa joko kolmivaiheisen tai yksivaiheisen sähkönsä tasasuuntaajalla tasasähköksi jännitevälipiiriin, jonka jälkeen tasajännite pilkotaan invertterin ohjatuilla kytkimillä moottorin tai muun ohjattavan laitteen kulloinkin tarvitsemaksi kolmivaihesähköksi (Pentzin 2009, 3). Ajoneuvokäytössä ulkoinen syöttö on korvattu tuomalla jännite akustolta tai muulta energiavarastolta suoraan jännitevälipiiriin. Kolmivaiheisen taajuusmuuttajan periaatteellinen piirikaavio ja toimilaitteet on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Taajuusmuuttajan piirikaavio. (Kuva: Control Engineering, muokattu.)

Teollisuudessa tehoelektroniikka on nopeasti yleistynyt ja varsinkin taajuusmuuttajan säätötavat ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä huomasti. Aikaisemmin käytöt toteutettiin pääosin tasasähkökoneilla niiden helpon säädettävyyden takia, mutta nykyään vaihtovirtasovellukset ovat mm. helpon huollettavuutensa vuoksi nousseet johtavaan asemaan (ABB Tekninen opas nro 4 2001, 11). Ajoneuvokäytöissä epätahtimoottori ja kestromagneetikone ovat aina ohjattu taajuusmuuttajalla, koska käyttäjällä täytyy ymmärrettävistä syistä olla mahdollisuus vaikuttaa auton nopeuteen. Kuvassa 9 on Vaconin NXL tuoteperheen taajuusmuuttajia.



Kuva 9. Vacon NXL tuoteperheen taajuusmuuttajia. (Kuva: Vacon)

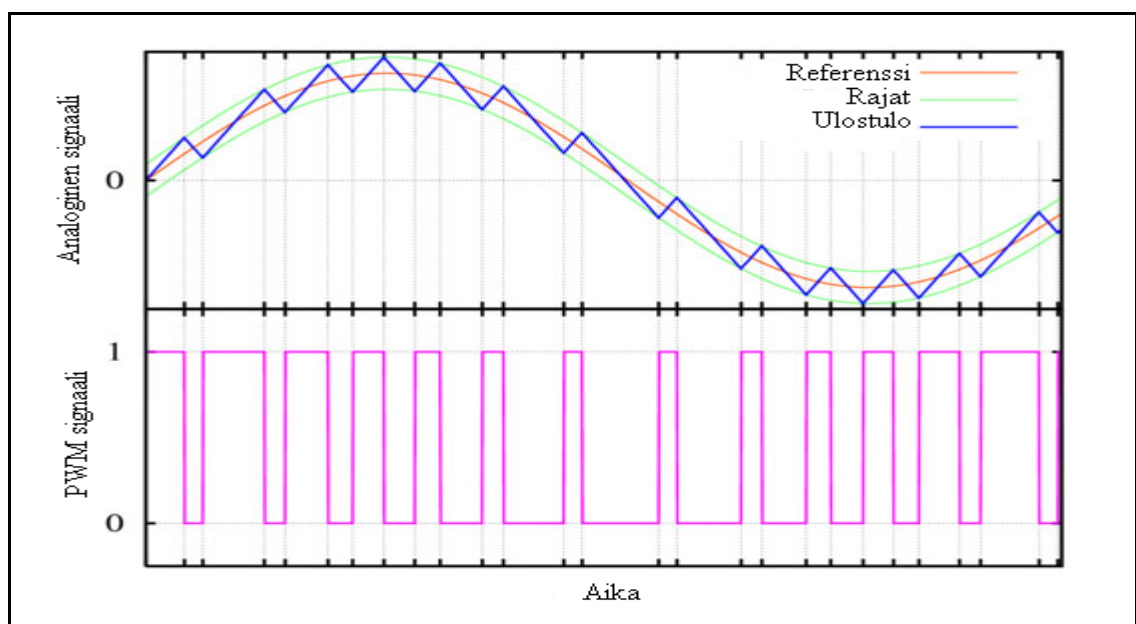
3.1.1 Taajuusmuuttajan ohjausmenetelmät

Ajoneuvokäytöissä taajuusmuuttajalla säädettäviä suureita ovat pyörimissuunta, pyörimisnopeus, tuotettu momentti ja teho. Tällä hetkellä säätötapoja on kolme: taajuussäätö, vuovektorisäätö ja suora momentin säätö. Jokainen säätötapa mahdollistaa moottorin ajamisen molempiin suuntiin, pyörimisnopeuden säädön ja jarrutustehon talteenoton. Rakenteeltaan taajuusmuuttajat voivat olla samanlaisia, ja säätötapa vaikuttaa lähinnä invertterin kytkimien ohjausalgoritmeihin.

Taajuus-säädettynä taajuusmuuttaja muuttaa jännitevälipiirin tasajännitteen kolmivaiheiseksi sähköksi, jonka jännitteiden amplitudi ja taajuus määrittävät moottorin pyörimisnopeuden ja tuotettavan momentin. Käytännössä tämä toteutetaan pulssinleveysmo-

dulaatiolla (PWM). Pulssinleveys viittaa jännitevälipiiristä invertterillä pilkottujen tasajännitekomponenttien taajuuteen ja amplitudiin, joilla saadaan tuotettua sinimäistä vaihtosähköä moottorille.

PWM- modulaation periaate näkyy kuviossa 3. Eri levyiset tasajännitekomponentit summaantuvat sinimäiseksi jännitteeksi. Modulointitaajuutta nostamalla rippelijännite pienenee, eli ulostulon käyrämuoto saadaan tarkemmaksi. Säädon yksinkertaisuuden vuoksi PWM-ohjaus on hyvä vaihtoehto sovelluksiin, joissa tarkka pyörimisnopeuden säätö ei ole välttämätön. (ABB Tekninen opas nro 1 2001, 9-11).



Kuvio 3. PWM-modulaatiosignaali ja ulostuleva sinimuotoinen signaali. (Kuvio: Acroname Inc, muokattu).

Vuovektorisäädössä vaikutetaan moottorin magneettikentän suuntaan ja voimakkuuteen, ja tätä kautta voidaan ohjata nopeutta ja momenttia tarkemmin kuin PWM-säädöllä. Tämä toteutetaan ohjaamalla jokaisen moottorin vaiheen virtojen vektorikomponentteja erikseen. Vektorisäätö vaatii takaisinkytkentänä tiedon roottorin pyörimisnopeudesta ja asennosta, jotka syötetään modulaattoriin yhdessä ohjearvojen kanssa joka taas laskee oikean PWM-pulssisuhteen. Modulointilaite hidastaa momentinsäätön vasteaikaa ja kytkentä on monimutkaisempi kuin taajuus-säädössä. (ABB Tekninen opas nro 1 2001, 10-11).

Suoran momentinsäädön, jonka ABB on tuotteistanut nimellä DTC (Direct Torque Control), toimintaperiaate on samanlainen kuin vuovektorisäädössä, mutta modulaatto-

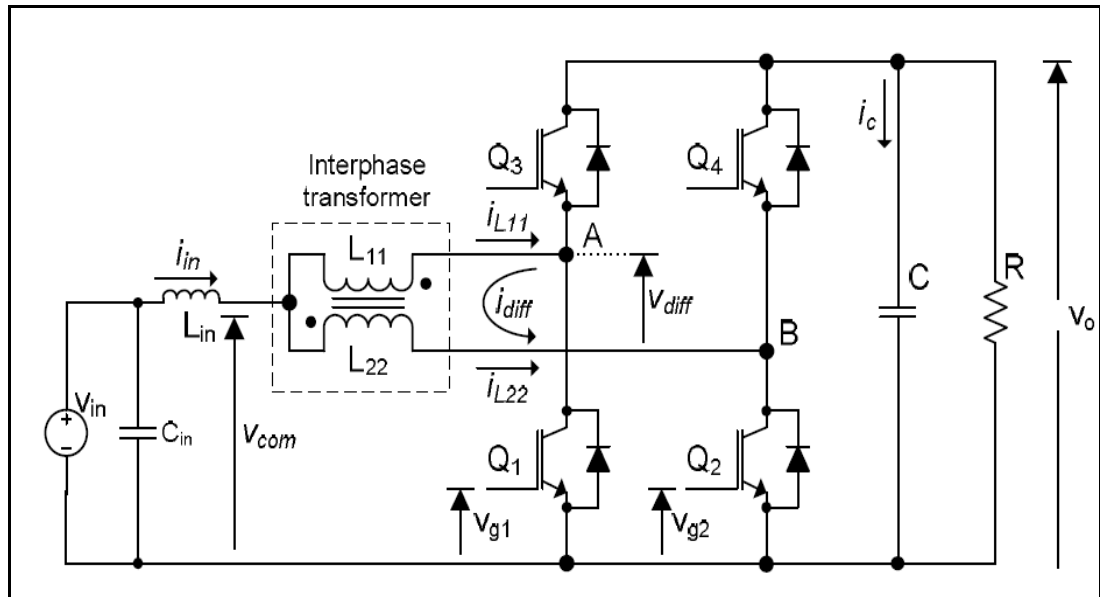
rin sijasta ohjausarvot lasketaan suoraan prosessorissa ja takaisinkytkentä ei ole välttämätön. Moottorin matemaattinen malli on tallennettu ohjainprosessorille ja näin saadaan suoraan ohjainarvot staattorivirtojen vektorikomponenteille ja edelleen vaikutetaan suoraan moottorin tuottaman momentin määrään. Säättösuureina ovat siis suoraan momentti ja magneettivuo. (ABB Tekninen opas nro 1 2001, 11–14).

3.2 Tasavirtalähde

Regeneroivassa jarrutuksessa tasavirtalähdettä voidaan käyttää energiavaraston ja moottorinohjaimen välissä, jolloin se pitää jännitteen vakiona ja tarvittaessa säättää läpi kulkevaa virtaa tai tehoa. Superkondensaattorien ja akkujen ominaisuus on, että niiden varaustason laskiessa myös niiden jännite laskee. Suuri kuormitusvirta aiheuttaa jännitteenaleneman, joka voi aiheuttaa haittoja muun tehoelektronikan toimintaan. Esimerkiksi ABB:n ACSM1-taajuusmuuttajilla sallittava syöttöjännitteen vaihteluväli on +10/-15 % nimellisjännitteestä. Kun nämä rajat ylitetään, taajuusmuuttaja kytkeytyy pois päältä, joka voi ajoneuvokäytössä aiheuttaa vakavan vaaratilanteen. (ACSM1-sarjan taajuusmuuttajat 2010, 12).

Eräs tasavirtahakkurityyppi, jossa sisääntulo- ja ulostulojännitteiden suuruutta voidaan säätää toisistaan riippumatta, on nimeltään buck-boost-hakkuri. Buck viittaa jännitettä alentavaan ja boost jännitettä nostavaan. Buck-boost tyyppisellä tasavirtahakkurilla sisääntulojännite voi olla pienempi tai suurempi kuin ulostulojännite. Näin energiavaraston, kuten akuston tai superkondensaattorien, tuottama jännite ei tarvitse olla yhtä suuri kuin moottorin nimellisjännite, vaan se voidaan muuntaa tarvittavan kokoiseksi. Tämä mahdollistaa esimerkiksi akuston optimoinnin energiasisällöltään halutunlaiseksi, eikä sitä tarvitse ylimitoittaa. (James, Forsyth, Calderon-Lopez, Pickert 2009, 1-2).

Kaksisuuntaisella buck-boost-hakkurilla tehon suunta voidaan vaihtaa, eli hakkurin ulostulojännite muuttuukin sisääntulojännitteeksi ja päinvastoin. Tämä mahdollistaa viemisen energiavarastolta moottorille ja tehon tallettamisen energiavarastoon jarrutettaessa. Kuvassa 10 on esitetty eräs tapa toteuttaa buck-boost-hakkuri. Superkondensaattorimoduuli tai akusto voidaan kytkeä sisääntulokondensaattorin C_{in} rinnalle (James, Forsyth ym. 2009, 1).



Kuva 1010. Kaksisuuntaisen tehohakkurin piirikaavio. /13/

Superkondensaattoreiden käyttö suoraan kytkettynä akuston rinnalla ei ole yhtä hyödyllistä, kuin erikseen tasavirtahakkurilla ohjattuna. Ilman ohjausta superkondensaattorit ja akusto muodostavat virtapiirin, jonka virtojen suunta ja summa riippuvat niiden potentiaalijännitteestä ja kuormavirrasta eikä kondensaattoreiden energiaa voida täysin käyttää. Akut ovat yleensä pääenergiavarasto, kun taas superkondensaattoreita täytyisi käyttää syklisesti kiihdytyksissä ja jarrutuksissa. Rinnankytkettynä kondensaattorit ottavat energiaa akustoilta ja häviöt kasvavat energian turhan edestakaisin kiertämisen takia.

Tehokkaiden, mutta samanaikaisesti kompaktien hakkuriteholähteiden kaupallinen saatavuus on huono ja hinta toistaiseksi kallis. Esimerkiksi Testa Roadsterin kehityksessä sitä harkittiin, mutta monimutkaisuuden ja hinnan takia siitä jouduttiin lopulta luopumaan (Eberhard 2006). Us Hybrid sai 2010 valmiiksi ajoneuvokäyttöön suunnitellun tehohakkurin tutkimus ja kehitysraportin, joiden tuloksena suunnitellun 8 kW prototyyppihakkurin hinta olisi $\leq 62,5$ \$/kW 10 000 kpl valmistuserille (Goodarzi 2010).

4 SUPERKONDENSAATTORIT ENERGIAVARASTONA

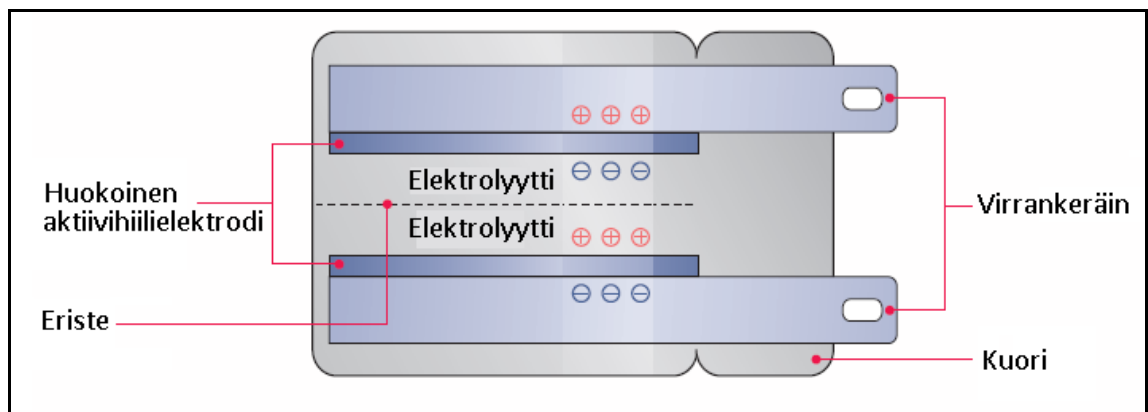
4.1 Toimintaperiaate ja rakenne

Kondensaattori on komponentti, joka varastoi sähkökenttäänsä energiaa, ja sitä käytetään mm. suodattimena, energiavarastona sekä loistehon kompensoinnissa. Kondensaattorin rakenne koostuu yksinkertaisimmillaan toisistaan erotetuista elektrodeista ja eristeestä. Eristeaine voi olla mikä tahansa dielektrinen, eli sähköä johtamaton materiaali, kuten paperi, öljy tai ilma. Kondensaattorin kapasitanssi (C) voidaan laskea yhtälöllä:

$$C = \frac{\varepsilon * A}{l} \quad (6)$$

jossa ε on eristeaineen permittiivisyys, A elektrodien pinta-ala, l on elektrodien välinen etäisyys.

Superkondensaattori eroaa normaalista kondensaattorista rakenteeltaan siinä, että toisistaan erotettujen elektrodien pinta-alaa on kasvatettu huokoisilla materiaaleilla, kuten aktiivihiilellä, ja ne ovat elektrolyytinesteessä. Varaus siirretään virrankeräimillä, esimerkiksi alumiinikalvoilla. Kuvassa 11 on esitetty superkondensaattorin periaatteellinen rakenne.

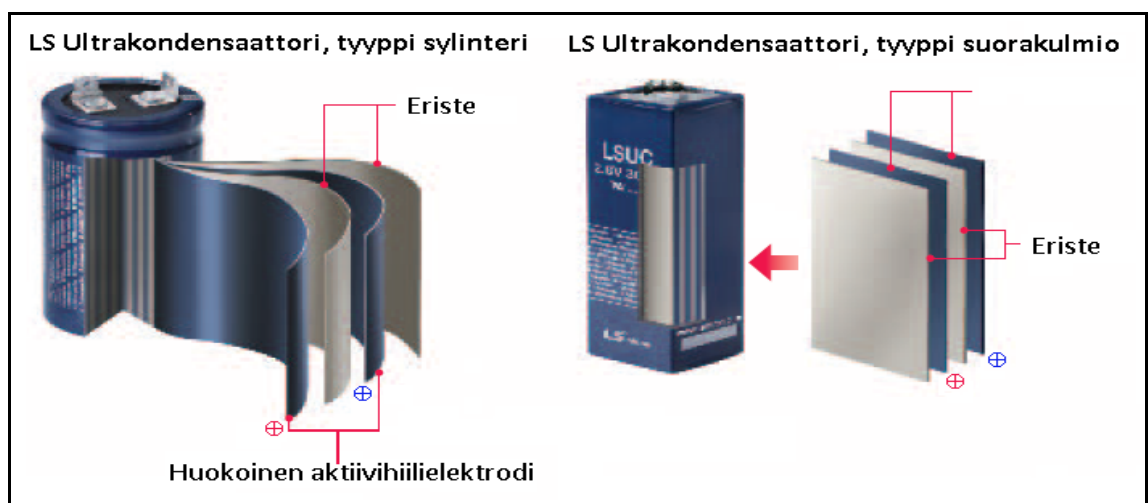


Kuva 111. Kondensaattorin rakenne. (Kuva: LS Mtron, muokattu)

Elektrolyytineste eristeen ja elektrodin välissä aiheuttaa ilmiön, joka muistuttaa kahden kondensaattorin sarjankytkentää. Tämän kaksoiskerrosrakenteen vuoksi superkonden-

saattoreihin viitataan kirjallisuudessa usein termillä EDLC, electrochemical double layer capacitor. Kondensaattorissa elektrodien etäisyys eristeestä on hyvin pieni, nanometrien luokkaa. Tämä yhdessä elektrodin suuren pinta-alan kanssa johtavat erittäin suureen kapasitanssiin kaavan 6 mukaisesti. (Simon, Burke 2008, 38)

Elektrodien rakenne kondensaattorin sisällä on yleensä joko sylinterimäinen tai suorakulmiomainen, kuten kuvassa 12 on esitetty. Kondensaattoreiden mahdollisesta ylikuumenemisesta johtuva paineenkasvu on huomioitu lisäämällä varoventtiili komponentin päähän, josta paine pääsee purkautumaan hallitusti, kuten kuvassa 13 näkyy.



Kuva 122. LS kondensaattorien rakenteen halkileikkaukset. (Kuva: LS Mtron, muokattu)



Kuva 133. LS Mtron 1000 F, 2,8 V superkondensaattori. (Kuva: Atte Saarni 2011)

Kondensaattorin käyttöjännite riippuu eristeaineen sähköisistä ominaisuuksista ja yhdessä kapasitanssin kanssa muodostavat yhtälön kondensaattorin sisältämän energian (E) määrästä kaavan 7 mukaisesti:

$$E = \frac{1}{2} * C * U^2 \quad (7)$$

jossa C on kondensaattorin kapasitanssi ja U on kondensaattorin elektronien välinen potentiaaliero volteissa.

Kondensaattorien sarjakytkenän kokonaiskapasitanssi C_{KOK} saadaan kaavan 8 mukaisesta yhtälöstä:

$$C_{KOK}^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1} \dots C_n^{-1} \quad (8)$$

Valmistajat suosittelevat, että kondensaattoria potentiaalijännitettä ei lasketa alle puoleen nimellisestä käyttöjännitteestä käyttöiän pidentämiseksi, jolloin kaavan 7 mukaisesti kondensaattorista käytettävän energian määrä on:

$$E = \frac{1}{2} * C * (U_{MAX}^2 - U_{MIN}^2) \quad (9)$$

jossa C on kondensaattorin kapasitanssi ja U_{MAX} on kondensaattorin nimellisjännite ja U_{MIN} puolet nimellisjännitteestä.

Eli täyteen ladatun kondensaattorin todellinen käytettävissä oleva energia on 75% nimellisestä energiamäärästä.

4.2 Edut akkuihin verrattuna

Superkondensaattoreiden tärkeimmät edut akkuihin verrattuna ovat suuri tehotehoisuus ja pieni sisäinen resistanssi, eli se pystyy reagoimaan suuriin kuormiin ja kuormavirtoihin paremmalla hyötysuhteella, sekä erittäin pitkä elinikä. Akkuissa sisäinen resistanssi on suurempi ja kasvaa entisestään lämpötilan mukana. Akustot soveltuvat siis huomattavasti paremmin vastaamaan suuriin virtoihin, koska tehohäviöt kasvavat. Superkondensaattorien sisä-

resistanssi on yleensä milliohmi luokkaa, esimerkiksi kuvan 13 kondensaattorin sisäresistanssi on 0,58 mΩ (LS Ultracapacitor tuotekatalogi).

Superkondensaattorin toiminta perustuu enemmänkin fysiikan ilmiön hyödyntämiseen, toisin kuin akkujen kemiallinen toiminta. Tämä yhdessä pienen sisäisen resistanssin kanssa mahdollistaa akun lataamisen tai purkamisen sekunneissa, ja rajoittavaksi tekijäksi jää ennemminkin syöttävä laite kuin itse kondensaattori. Tämä on huomattava etu, koska nopeassa jarrutustilanteessa virrat saattavat kasvaa erittäin suuriksi.

Koska superkondensaattorin toiminta ei perustu kemiaan, on siinä vähemmän epävarmuustekijöitä, kuten elektrolyytin höyrystyminen ajan myötä ja sisäresistanssin lämpötilaherkkyys. Tämä mahdollistaa ehkä tärkeimmän edun, mikä superkondensaattoreilla akkuihin verrattuna on: erittäin pitkä elinikä. Kuvan 13 kondensaattorin kapasitanssi on miljoonan syklin jälkeen 25 °C lämpötilassa pienentynyt 30 % nimelliskapasitanssista ja luvattu elinikä on 10 vuotta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kondensaattorimoduuli kestää auton eliniän verran, toisin kuin akut, jotka kemiasta riippuen joudutaan vaihtamaan auton elinkaaren aikana ainakin kerran.

5 JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTO EPORSCHESSA

5.1 Moottori ja taajuusmuuttaja

Tämän opinnäytetyön kirjoitushetkellä moottoria ei ole vielä päätetty, mutta oletettavasti projektin ensimmäiseen versioon asennetaan teholtaan 30 kW kolmivaihemoottori. Tämä vastaa teholtaan normaalia henkilöautoa ja esimerkiksi Tampereen Sähköajoneuvokeskuksen eCorolla-konversiossa on päädytty nimellisteholtaan 15 kW sähkömoottoriin. On huomattava, että polttomoottoriautoissa ilmoitetut tehoarvot ovat aina huippuarvoja, kun taas sähkömoottoreille valmistajat ilmoittavat nimellistehon. Huipputehoa eCorollan sähkömoottori tuottaa 47 kW. Lisäksi sähkömoottori tuottaa kuvion 1 mukaisen tasaisen momentin nimellispyörimisnopeuteensa asti, kun taas polttomoottoriautoissa tuotettu momentti vaihtelee huomattavasti kierrosalueella.

Vahvin ehdokas taajuusmuuttajaksi on tällä hetkellä ABB ACSM1, runkokooltaan luokan D ohjain. Kuvassa 14 ABB ACSM1 tuoteperhe. D-luokan ohjain sopii moottoreille, joiden nimellistehot ovat välillä 30 – 45 kW. Ohjain on ilmajäähdytteinen ja siinä on vakiona jarrukatkoja, jolla voidaan säätää takaisin otettavan jarrutustehon määrää.



Kuva 144. ABB ACSM1 tuoteperhe. (Kuva: ABB)

Kyseinen malli on rakenteeltaan modulaarinen, jossa tasasuuntaus- ja invertteriyksikkö ovat toisistaan eristettyjä. Koska sähköauton syöttö tulee akustolta tasasähköllä, voidaan turha tasasuuntauskomponentti jättää kokonaan pois. Lisäksi kyseinen ohjain soveltuu oikosulku- ja kestopagneettimoottoreiden ohjaukseen, jolloin toisen vaiheen moottorien valinta ei ole rajoittunut vain epätahtimoottoreihin.

Ohjausmenetelmiä on kaksi: nopeus- ja momenttiohjaus. Polttomoottoriautoissa polttoaineensyöttöjärjestelmä muistuttaa hyvin paljon taajuusmuuttajan momenttiohjausta. Tämän voi huomata esimerkiksi ajaessa mäkeä ylös, jolloin nopeus hidastuu jos kaasupoljin pidetään samassa asennossa. Nopeussäädettynä ohjain nostaisi automaattisesti tehoa, jotta vakionopeus saataisiin ylläpidettyä. Tämän takia taajuusmuuttajan ohjaustavaksi tullaan valitsemaan DTC.

Jarrutustehon kannalta taajuusmuuttajan ohjaukseen ei tarvitse puuttua. Taajuusmuuttajan säätää automaattisesti jarrutustehon määrän käyttäjän antaman ulkoisen signaalin mukaan. Ulkoinen signaali voi olla kaasupoljin, jarrupoljin tai erillinen jarrutustehonsäädin, esimerkiksi kahva. Konversion ajonaikaisen käyttäytymisen halutaan muistuttavan mahdollisimman paljon polttomoottoriautoa käyttöönoton helpottamiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että taajuusmuuttaja ohjelmoitaisiin jarruttamaan tietyllä vakio-momentilla, kun kaasupoljin vapautetaan ja tällä simuloitaisiin moottorijarrutusta. Jarrupolkimella taas jarrutusmomenttia voidaan lisätä tiettyyn rajaan asti, jonka jälkeen alkaa mekaaninen jarrutus.

Autoon olisi hyvä lisätä varoitusjärjestelmä, joka ilmoittaa äänellä ja visuaalisesti, kun akusto ja superkondensaattorimoduuli ovat täynnä eikä jarrutusta voida suorittaa sähköisesti. Tällainen tilanne voi ilmetä, kun akusto ja superkondensaattorit ovat ladattu täyteen ja auton käyttäjä asuu korkean mäen päällä, jolloin heti ajon alussa talteenotettavan energian määrä on hyvin suuri. Järjestelmään voi mahdollisesti lisätä myös erillisen jarruvastuksen, jolloin ylimääräinen jarrutusteho vapautuu vastuksen tuottamana lämpönä ympäristöön. Tällainen vastus tosin vaatii paljon tilaa ja mahdollisesti ylimääräisen jäähdytysjärjestelmän. Projektissa on myös pohdittu ratkaisua, jossa jarrutusvastus tuottaisi lämpöenergiaa auton sisälämmitykseen.

5.2 Superkondensaattorimoduuli ja tasavirtahakkuri

Korkean hintansa takia superkondensaattorimoduuli on suunniteltu hankittavaksi vasta projektin toisessa vaiheessa, suorituskyvyn nostamiseksi. Superkondensaattorimoduulin suunnittelun tärkeimmät lähtötiedot ovat taajuusmuuttajan tarvitsema jännite, moottorin teho ja vaadittava energiamäärä. Projektin alussa lähdettiin superkondensaattorimoduulia mitoittamaan suoraankytkettäväksi, eli tasavirtahakkuria ei käytettäisi ollenkaan. Tästä ideasta kuitenkin luovuttiin sen aiheuttamien ongelmien vuoksi. Taajuusmuuttajan jännite on tarkoitus asettaa 335 volttiin, jolloin suoraankytkettynä 2,8 V superkondensaattoreita tarvitaan 120 kappaletta.

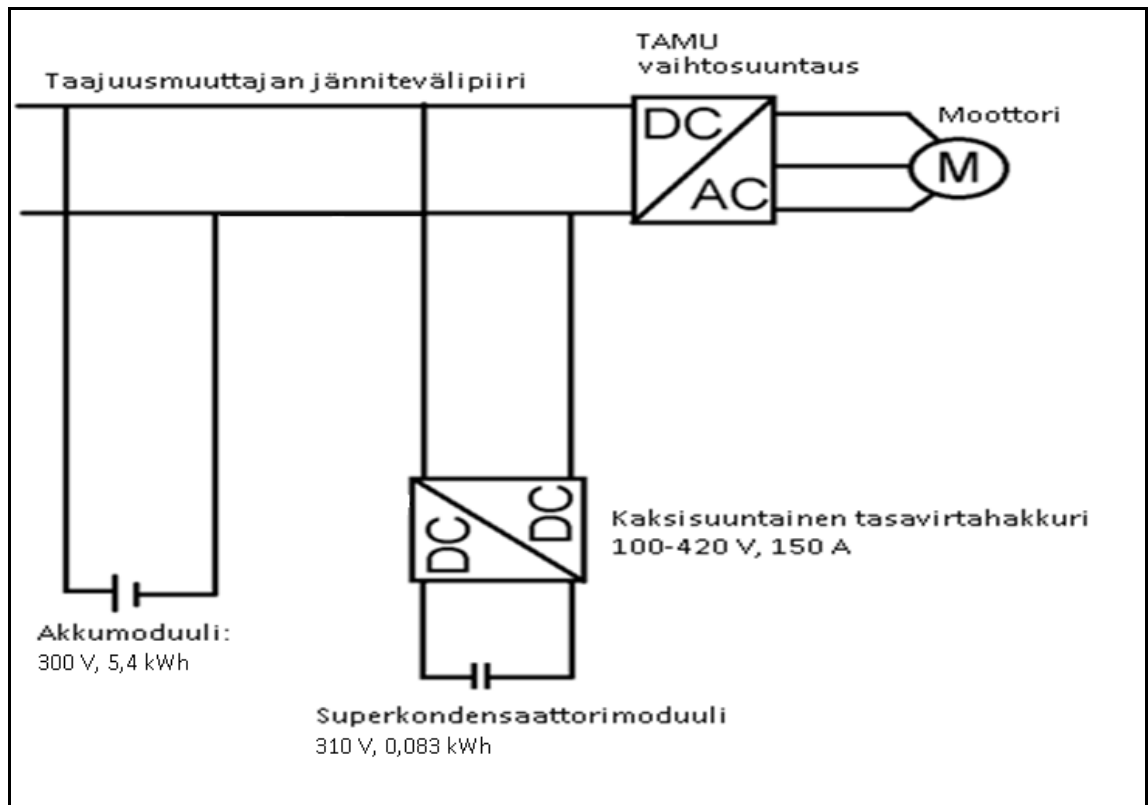
Seuraavaksi suunnittelussa keskityttiin määrittelemään energiasisältö. Superkondensaattoreita on hyödyllistä käyttää kiihdytyksissä ja jarrutuksissa. Suurimmaksi kiihdytysajaksi määriteltiin 10 sekuntia, jolloin 30 kW moottorin pyörittämiseen vaadittava energiamäärä on 300 kJ, eli 0,083 kWh. Kääntäen, superkondensaattorimoduuli voi tyhjänä ottaa vastaan 0,083 kWh jarrutustehon. Tällaisen energiasisällön aikaansaamiseksi tarvitaan kaavaa 8 käyttäen kondensaattoreita, joiden kapasitanssi on noin 1000 faradia. Näin sarjakytkettyjen kondensaattorien kokonaiskapasitanssi on 8,33 faradia. Liitteessä 1 on esitetty Flinkenberg Oy:ltä tilattu ja LS Mtronin suunnittelema ratkaisu superkondensaattorimoduulin ja sen mekaanisen rakenteen toteutuksesta. Moduulirakenne mahdollistaa helpon ja nopean asennuksen.

Jännitteenaleneman estämiseksi superkondensaattorimoduulin ja taajuusmuuttajan väliin tarvitaan tasavirtahakkuri. Tasavirtahakkurin mitoitus tehdään suoraan siirrettävän tehon ja vaadittavan toisiojännitteen perusteella. ePorsche-projektissa tasavirtahakkurin täytyy pystyä siirtämään vähintään 30 kW jatkuva teho ja ylläpitämään 335 voltin jännite. Lisäksi hakkurin täytyy olla kaksisuuntainen, eli se pystyy sekä vastaanottamaan että lähettämään tehoa.

Paras kokoonpano järjestelmän kannalta on, että akusto ja superkondensaattorimoduuli ovat kytketty erillisillä hakkureilla taajuusmuuttajaan, jolloin jarrutus ja kiihdytystilanteissa kondensaattorihakkuri siirtäisi tehoa moottorille ja akustohakkuri ei päästäisi tehoa akuille jarrutettaessa. Hakkurit voisivat myös kommunikoida keskenään CAN-väylän kautta ja antaa esimerkiksi varaustilan tiedot reaaliajassa. Näin voitaisiin tasapainottaa kuormitusvirta optimaalisella tavalla akuston ja kondensaattorien kesken.

5.3 Jarrutusenergian talteenottojärjestelmän toimintaperiaate

Jarrutettaessa moottori toimii generaattorina ja tuottaa tehoa takaisin energiavarastoille. Tehon määrä riippuu auton nopeudesta ja massasta ja korkeusasemasta kappaleen 2.1 mukaisesti. Talteenotettavan tehon määrä riippuu taajuusmuuttajan virrankestosta, moottorin nimellistehosta sekä kaikkien komponenttien hyötysuhteiden tulosta. Taajuusmuuttajan invertteri muuttaa generaattorin tuottaman kolmivaihejännitteen akustolle ja superkondensaattoreille sopivaksi tasajännitteeksi taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin. Kuvassa 16 on esitetty alustava piirikaavio ePorschen sähköisestä voimansiirtojärjestelmästä.



Kuva 15. ePorschen sähköisen voimansiirtojärjestelmän yksinkertaistettu piirikaavio.

Ensimmäisen vaiheen komponentteja kuvassa 16 ovat akkumoduuli, taajuusmuuttaja sekä moottori. Tarkoituksena on jättää tilavaraus superkondensaattorimoduulille ja tasavirtahakkurille, sekä mahdollisesti tehdä liitäntäpaikka valmiiksi taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin. Lopullinen liittäminen ja tasavirtahakkurin mahdollinen erillinen ohjaus riippuvat hankituista komponenteista.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä keskityttiin sähköajoneuvojen jarrutustehon talteenottojärjestelmiin, talteenottojärjestelmän kannalta oleellisiin komponentteihin sekä käsiteltiin superkondensaattorimoduulin suunnittelun periaatteita. Koska opinnäytetyö käsittelee lähinnä tulevaisuudessa ePorscheen tehtäviä muutoksia, jäi työ teoriapainotteiseksi ja esimerkiksi taajuusmuuttajan ohjelmointia ei päästy tekemään. Mitoitustietojen puuttumisen vuoksi työ oli erittäin haastava, mutta lopputuloksena saatiin aikaan toteuttamiskelpoinen ratkaisu, jota voi helposti muokata jos komponentit muuttuvat.

Jarrutustehon talteenottojärjestelmät lisäävät auton toimintasädetä ja ovat todennäköisesti myös tulevaisuudessa jatkuvan kehityksen alla. Superkondensaattorit ovat komponentteina vielä hyvin kalliita, mutta kilpailu ja tuotantomenetelmien kehittyminen oletettavasti laskevat niiden hintaa huomattavasti. Niiden suurin etu akkuihin verrattuna on suuri huippu-teho ja suurin heikkous energiatiheys. Tuotekehityksen kautta energiatiheys on kuitenkin koko ajan kasvanut ja kehitteillä on myös akkujen ja kondensaattorien hybridejä. ePorsche-projektissa superkondensaattorien energiatiheys on toissijainen, jos autoa päätetään tulevaisuudessa käyttää esimerkiksi kiihdytyskilpailuissa.

Projektin seuraavassa vaiheessa, kunhan kaikki tarvittavat komponentit ovat hankittu, voitaisiin määritellä tarkemmin superkondensaattorimoduulin käyttötarkoitus sekä vaadittavat tekniset suoritusarvot. Tämän jälkeen voitaisiin mitoittaa tasavirtahakkuri sekä jarrutustehon ohjausjärjestelmä.

Koin opinnäytetyön tekemisen hyvin opettavaiseksi ja toivon sen olevan hyödyllinen projektin jatkon kannalta. Vaikka oma aiheeni oli rajoittunut lähinnä jarrutustehon talteenottoon, sain silti käyttää useita koulussa oppimiani teorianietoalueita aina sähkö-moottoreista fysiikkaan saakka. Uskon, että tästä työstä on apua minulle myös työurallani.

LÄHTEET

1. ABB Automation Group Ltd. 2001. Tekninen opas nro 4 - Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/\\$File/Tekninen_opas_nro4.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/$File/Tekninen_opas_nro4.pdf)
2. ABB Automation Group Ltd. 2001. Tekninen opas nro 1 - Suora momentinsäätö. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/\\$File/Tekninenopasnro1.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/$File/Tekninenopasnro1.pdf)
3. ABB. 2010. ACSM1-sarjan taajuusmuuttajat. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/6f55f54ae9b66610c12576f8002757fe/\\$file/acsm1catalogreve_fi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/6f55f54ae9b66610c12576f8002757fe/$file/acsm1catalogreve_fi.pdf)
4. Chancey, M. 2010. 1972 Datsun 1200 White Zombie. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.evalbum.com/035.html>
5. Chevrolet Finland Oy. Chevrolet Volt – laajennetun toimintasäteen sähköauto. [www-sivu] [viitattu 1/2011] http://www.chevrolet.fi/koe-chevrolet/tulevaisuuden-autot/volt-tuotantomalli.html#_SP4
6. Eberhard, M. 2006. Balance. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.teslamotors.com/blog/balance>
7. Flybrid Systems. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.flybridsystems.com/Technology.html>
8. Goodarzi, A. 2010. Bi-directional dc-dc converter, including vehicle system study to determine optimum battery and DC link voltages. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2010/power_electronics/ape021_goodarzi_2010_p.pdf
9. HCCI Hydraulic Hybrid. 2006. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://jcwinnie.biz/wordpress/?p=1713>
10. HybridCars. 2006. Hydraulic Hybrids. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.hybridcars.com/related-technologies/hydraulic-hybrids.html>
11. Infolytica. 2010. Using MotorSolve to investigate the complex characteristics of a Hybrid electric vehicle motor. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0146/>
12. Ionel, D. 2008. Brushless Interior Permanent Magnet (IPM) Motors –A New Solution for High Performance Appliances [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] <http://www.aosmith.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=474>
13. James, P. Forsyth, A. Calderon-Lopez, G. Pickert, V. 2009. DC-DC converter for hybrid and all electric vehicles. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] http://hiltechdevelopments.com/uploads/news/id42/EVS24_DC-DC_CONVERTER.pdf

14. JSOL Corporation. 2011. Cogging Torque Analysis of an SPM Motor with a step skewed Magnet. [www-sivu] [viitattu 2/2011] http://www.jmag-international.com/catalog/15_PMStepperMotorSkew_CoggingTorque.html
15. Kang, J. 2009. General purpose permanent magnet motor drive without speed and position sensor. [PDF-tiedosto] [viitattu 2/2011] [http://www.yaskawa.com/site/dmdrive.nsf/link2/NKOE-7U9HJG/\\$file/WP.AFD.05.pdf](http://www.yaskawa.com/site/dmdrive.nsf/link2/NKOE-7U9HJG/$file/WP.AFD.05.pdf)
16. Kangasniemi, T. Tekniikka ja talous. 2009. Hybridiautot uhkaavat aiheuttaa pulan harvinaisista maametalleista. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/article324272.ece>
17. Knudsen Chevrolet. 2010. 4ET50 – Chevy Volt Electric Drive Unit (MKA) Eamined. [www-sivu] [viitattu 2/2011] <http://knudsenchevyblog.com/4et50-chevy-volt-electric-drive-unit-mka-examined/>
18. Koichi, S, Kawagishi, K, Onodera, S. 2001. Development of high-speed AC servo motor. [www-sivu] [viitattu 2/2011] http://db.sanyodenki.co.jp/techrepo_e/11e/h/index.htm
19. Korpinen, L. 1997. Sähkökoneet osa 1. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf
20. Lampton, C. 2009. How regenerative braking works. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/regenerative-braking4.htm>
21. LS Mtron. LS Ultracapacitor tuotekatalogi. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] www.ultracapacitor.co.kr/support/php/download.php?src=../../upload/files/&file=LSM_UC_E_text.pdf
22. Nice, K. 2000. How force, power, torque and energy work. [www-sivu] [viitattu 3/2011] http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/towing/towing-capacity/information/ftp_e9.htm
23. Shin-Etsu. 2000. Magnetic Circuit Analysis / IPM Motor. [www-sivu] [viitattu 2/2011] <http://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/circuit/ipm.html#d01>
24. Parry people movers. 2009. PPM technology. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.parrypeplemovers.com/technology.htm>
25. Pentzin, E. 2006. Taajuusmuuttajien suorituskyvyn automaattinen testausympäristö. [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/4307/stadia-1176453492-4.pdf?sequence=1>
26. RWTH Aachen University. Study of PMSM for HEV [www-sivu] [viitattu 2/2011] <http://www.iem.rwth-aachen.de/index.pl/masterarbeiten?wid=1648&func=viewSubmission&sid=1206>
27. Simon, P. Burke, A. 2008 Nanostructured Carbons: Double-Layer Capacitance and More [PDF-tiedosto] [viitattu 3/2011] http://www.electrochem.org/dl/interface/spr/spr08/spr08_p38-43.pdf

28. Soldberg, G. The magic of tesla roadster regenerative braking. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.teslamotors.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking>
29. Toyota. Toyota Prius. [www-sivu] [viitattu 1/2011] <http://www.nollapaastot.fi/#/more/20>
30. Turpen, A. How Regenerative Braking Works. [www-sivu] [viitattu 3/2011] <http://www.futurecars.com/technology/how-regenerative-braking-works>

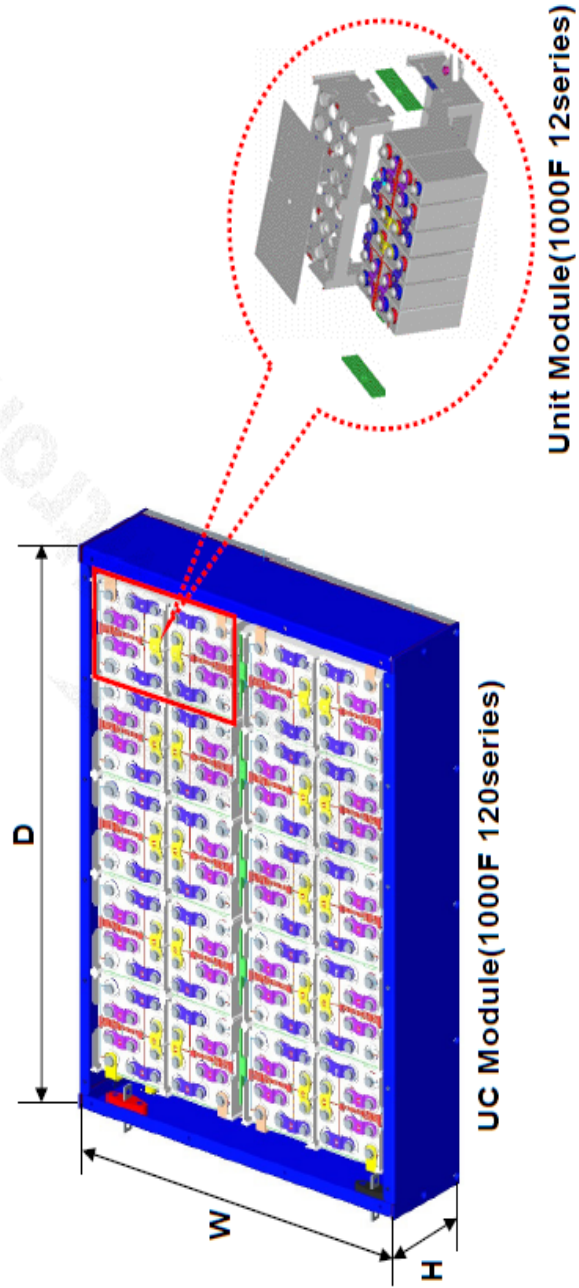
I. Introduction

Ultracapacitor Module

LS 336V / 8.33F Ultracapacitor (UC) Module is user-oriented package for turn-key operation. All the components shall be integrated into one package and the customer can install the module by only connecting the main terminals.

Suggested dimensions and structures are revisable according to the user's spec.

Internal Cell Array



II. Specification

Ultracapacitor Module

Item	Value	Comments
Rated Capacitance, C_R	F	1000F 120S
Operation Voltage	V	User's spec
Min. Voltage	V	User's spec
ESR, DC	m Ω	76.6(max.)
Available Energy, E_{max}	kJ	300
Operating Temp	$^{\circ}$ C	-40 ~ 65
Ambient Humidity	%	0 ~ 95
Weight	kg	60~70(approx.)
Volume	l	54.4
Dimension-W	mm	540
Dimension-D	mm	720
Dimension-H	mm	140

- Excluding output terminals & mountings.
- Plz. refer the pictures of introduction page

II. Specification

Ultracapacitor

LS 1000F ultracapacitors have been widely used in renewable energy applications. The unit cell has world best working voltage of 2.8V and long (over 10years) cycle life.

Item	Value	Standard
<i>Rated Capacitance, C_R</i>	1000	
<i>Rated Voltage, V_R</i>	2.8	
<i>Internal Resistance, (R_{AC})</i>	0.55	@100Hz
<i>Internal Resistance, (R_{DC})</i>	0.58	
<i>Rated Maximum Current</i>	886	1s discharging to $\frac{1}{2} V_R$
<i>Leakage Current</i>	< 2	72hrs, 25°C
<i>Maximum Energy, E_{max}</i>	1.089	
<i>Energy Density, E_M</i>	4.44	
<i>Energy Density, E_V</i>	6.50	
<i>Weight</i>	0.245	
<i>Volume</i>	0.168	
<i>Dimension- W</i>	54	
<i>Dimension- D</i>	32	
<i>Dimension- H</i>	97	