

AALTO-YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

Elisa Vanhatalo

JARRUTUSENERGIAN HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA HELSINGIN
METROLIIKENTEESSÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.04.2012.

Työn valvoja ja ohjaaja:

Prof. Jorma Kyyrä



AALTO-YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Elisa Vanhatalo	
Työn nimi:	Jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksia Helsingin metroliikenteessä	
Päivämäärä: 23.4.2012	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7 + 63
Tiedekunta:	Sähkötekniikan korkeakoulu	
Professori:	S-81 Tehoelektroniikka ja sähkökäytöt	
Työn valvoja ja ohjaaja: Professori Jorma Kyyrä		
<p>Metroliikennöinnissä jarrutuksessa syntyy suuria tehoja ja tehohuippujen varastointi sekä uudelleenkäyttö on haasteellista. Tämän diplomityön tavoite on tutkia erilaisia mahdollisuuksia hyödyntää jarrutusenergiaa Helsingin metroliikenteessä. Tutkimus on erityisen ajankohtainen nyt, kun Espoon Länsimetro on rakenteilla.</p> <p>Tässä diplomityössä tutkitaan käytännön jarruvirtamittauksilla sekä lämmityksen säätöpellin asentoa mittaamalla, kuinka paljon jarrutusenergiaa olisi mahdollista käyttää takaisinsyöttöön, ja kuinka paljon siitä tällä hetkellä käytetään matkustamon lämmitykseen. Käytettävissä oleva jarrutusenergia voidaan hyödyntää toisten junien kiihdyttämiseen uusimman energian varastointitekniikan avulla. Tässä työssä tarkastellaan superkondensaattoreita ja vauhtipyörää energiavarastoina. Tarkoitus on tutkia miten jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti.</p> <p>Jarruvirtamittauksilla tutkittiin kuinka paljon jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää, ja lämmityksen säätöpellin asentomittauksella tutkittiin kuinka paljon jarruvastuksissa syntyvää lämpöä hyödynnetään matkustamon lämmittämiseen. Jarrutusenergian osalta tulokseksi saatiin 39 %.</p>		
Avainsanat:	Jarrutusenergia, metrojuna, energiavarasto, superkondensaattori, vauhtipyörä	

AALTO UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author:	Elisa Vanhatalo	
Name of the thesis:	The possibilities to reuse regenerative braking in the Helsinki Metro System	
Date: 23.4.2012	Language: Finnish	Number of pages: 7 + 63
Faculty:	School of Electrical Engineering	
Professorship:	S-81 Power Electronics and Electric Drives	
Supervisor and instructor:	Professor Jorma Kyyrä	
<p>In metro traffic and especially during the braking of the trains large amounts of peak power is generated and needs to be stored for re-usage which can be challenging. The intention of this master's thesis is to research the different possibilities to reuse regenerative braking power in the Helsinki Metro System. This study has a present-day need as the Helsinki Metro is expanding to Espoo and Länsi-metro is currently being built.</p> <p>In this master's thesis the study was conducted by measuring the braking currents and how much of the heat generated by the brake resistors is used warming up the passenger cabin. The result gives an overview of how much braking energy can be used again. Supercapacitors and flywheels are studied in this thesis as a means to store energy before it is used again for the acceleration of another train. The main goal was to investigate which would be the most efficient and also most economical way to reuse regenerative braking power.</p> <p>The amount of extra and therefor reusable braking energy that was generated was calculated from the braking current measurements. The result was 39 %.</p>		
Keywords:	Regenerative braking, metro train, energy storage, supercapacitor, flywheel	

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin liikennelaitokselle (HKL) Metroliikenteen ratasähköpuolelle. Haluan kiittää sähkötiimin päällikköä Juha Jussilaa mielenkiintoisen ja ajankohtaisen aiheen antamisesta sekä kaikesta avusta ja materiaalista, jota häneltä sain.

Työn valvojaa professori Jorma Kyyrää haluan kiittää innostuneisuudesta aihettani kohtaan sekä asiantuntevista kommentteista niin kieliopin kuin asiasisällön osalta. Työn ohjaajaa kalustopäällikkö Tom Anderssonia haluan kiittää hänen hyvistä neuvoistaan ja visioistaan sekä hänen kiinnostuksesta työtäni kohtaan.

Erityiskiitokset haluan osoittaa Jaakko Heikkilälle kaikesta häneltä saadusta tuesta. Kiitän ratasähkömiehiä mukavasta kirjoitusympäristöstä ja erityisesti Kari Ruotsalaista kaikista hyvistä neuvoista niin töissä kuin sen ulkopuolellakin. Kiitos kuuluu myös koko metrovarikon ystävälliselle ja avuliaalle henkilökunnalle ja loistavalle ilmapiirille.

Lopuksi haluan esittää kiitoksen perheelleni kaikesta heiltä saamastani tuesta, kannustuksesta sekä hyvistä neuvoista koko opiskelu-urani aikana. Lämmin kiitos Tuomakselle henkisestä tuesta ja kärsivällisyydestä opintojani kohtaan.

Diplomityöni on omistettu Jorma Luomin muistolle.

Helsingissä 23.04.2012

Elisa Vanhatalo

Sisältö

Tiivistelmä	I
Abstract	II
Esipuhe	III
Sisällysluettelo	IV
Symboli- ja lyhenneluettelo	V
Termit	VI
1 Johdanto	1
2 Helsingin metro	4
2.1 Historia.....	5
2.2 Metrojunakalusto.....	6
2.3 Sähkönsyöttöjärjestelmä.....	11
2.4 Helsingin metroliiikenteen tulevaisuuden näkymät	16
3 Energiavarastot	19
3.1 Superkondensaattori.....	19
3.2 Vauhtipyöräsovellus.....	26
3.3 Superkondensaattori vs. vauhtipyörä.....	31
4 Jarruvirtamittaukset	34
4.1 Jarruvirtamittaukset.....	34
4.2 Mittaustulosten tarkastelu	38
5 Jarrutusenergian hyödyntäminen Helsingin metroliiikenteessä	44
5.1 Metrojärjestelmän nykyinen valmius takaisinsyöttöön	45
5.2 Jarrutusenergian talteenottovaihtoehdot.....	45
5.3 Takaisinsyötön vaikutukset laitteistoon rataverkossa ja junissa.....	47
5.4 Taloudellinen kannattavuus	50
6 Yhteenveto	53
Viitteet	57
Liite A: M100-sarjan metrojunien tekniset tiedot	61
Liite B: M200-sarjan metrojunien tekniset tiedot	62
Liite C: Superkonkan datalehti	63
Liite D: Virtapihdin datalehti	65
Liite E: Virtapihdin datalehti	66

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Symbolit

C	Kapasitanssi
C_0	Kapasitanssi jännitteen arvolla nolla voltia
E	Energia
E_d	Energiatiheys
f	Taajuus
J	Hitausmomentti
k	Muotokerroin
L	Induktanssi
m	Massa
Q	Varaus
Q_0	Varaus ajanhetkellä nolla
R_p	Vuotovirtavastus
R_s	Sarjavastus
r	Säde
t_A	Kiihdytysaika
t_b	Jarrutusaika
t_F	Ajoaika maksiminopeudella
t_H	Pysähdysaika
U	Jännite
U_{vp}	Välipiirin jännite
U_0	Jännite ajanhetkellä nolla
Z	Impedanssi
α	Jänniteriippuvuus
ρ	Tiheys
σ	Suurin jännitys
ω	Kulmanopeus

Lyhenteet

EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic compatibility)
HELEN	Helsingin Energia
HKL	Helsingin kaupungin liikennelaitos
IGBT	Tehopuolijohde (Insulated gate bipolar transistor)
vpkm	Vaunuparikilometri
UPS	Keskeytymätön teholähde (Uninterruptible power supply)

Termit

Vaunu Yksi vaunu



Vaunupari Kaksi toisiinsa kiinteästi liitettyä vaunua, joissa molemmissa ohjaamo



Yksikkö Yhdestä tai useammasta vaunusta koostuva, pienin mahdollinen, liikenteessä itsenäiseen toimintaan kykenevä kokonaisuus



Juna Yhdestä tai useammasta yksiköstä koostuva kokonaisuus



1 Johdanto

Nyky-yhteiskunnan jatkuvasti kasvava energian tarve aiheuttaa tämän päivän tekniikalla suurta räsitusta ympäristölle. Tämä luo tarpeen kehittää ympäristöystävällisempää ja energiatehokkaampaa tekniikkaa. Esimerkiksi liikenteen suurin ympäristövaikutus on ajoneuvojen päästöt ilmakehään, joten tarvitaan ratkaisuja näiden päästöjen alentamiselle. Kun energia on kertaalleen muutettu ajoneuvossa liikeenergiaksi, sen edes osittainen takaisin saaminen tai lyhytaikainen varastointi on ajankohtainen tutkimusaihe.

Energian varastointitekniikan kehitystä on vauhdittanut sähkö- ja hybridiajoneuvojen kehitys sekä ympäristönsuojelulliset näkökulmat. Useat energianvarastointiin liittyvät teknologiat perustuvat vanhaan tekniikkaan, mutta energianvarastointitekniikkaa on selvästi vauhdittanut esimerkiksi materiaalitekniikan kehitys ja etenkin mikro- ja nanotekniikan tutkimuksen löytämät uudet mahdollisuudet parantavat erityisesti kondensaattoritekniikkaa. Metroliikennöinnissä jarrutuksessa syntyy suuria tehoja ja tehohuippujen varastointi sekä uudelleenkäyttö on haasteellista. Superkondensaattorit ovat viime vuosina kehittyneet huimaa vauhtia. Niiden hinta on pudonnut samalla kun energian varastointikapasiteetti on kasvanut, ja ne tarjoavat nykyään selvästi perinteisiä akkuja paremman hyötysuhteen ja tehosiheyden. Toinen hyvä energianvarastointitekniologia on perinteinen vauhti-pyörä, joka on täysin kilpailukykyinen superkondensaattoreiden kanssa.

Tämän diplomityön tutkimuskohteena on Helsingin metroliikenne ja mahdollisuudet hyödyntää metrojunien jarrutusenergiaa. Helsingin metrolla on aiemminkin tutkittu jarrutusenergian hyödyntämistä, mutta silloin esteeksi muodostui kannattamattomuus; tekniikka ei ollut tarpeeksi kehittynyttä, joten silloin käytössä olleen tekniikan päivittäminen olisi tullut niin kalliiksi, ettei säästöjä olisi syntynyt. Nyt tilanne tältä osin on suotuisampi. Raitiovaunupuolella hyödynnetään jo jarrutusenergiaa. Uudessa matalalattiaraitiovaunusarjassa jarrutusenergiaa käytetään vaunun omaan sähköjärjestelmään, esimerkiksi lämmitykseen, ja lisäksi energiaa

voidaan syöttää ajojohdinverkon kautta toisille samalla syöttöalueella oleville raitiovaunuille käytettäväksi.

Tällä hetkellä Helsingin molemmissa metrojunasarjoissa on teoriassa mahdollista syöttää jarrutusenergiaa takaisin virtakiskoon toisten junien käyttöön, mutta käytännössä takaisinsyöttö on estetty verkkodiodeilla. Tämä johtuu pääasiallisesti siitä, että takaisinsyötetty virta ei olisi tarpeeksi hyvälaatuista, jotta vanhempi M100-junasarja pystyisi sitä hyödyntämään. Metrojunissa on päädytty jarrutusenergian talteenottotekniikkaan, jossa moottorijarrutuksessa syntyvä sähkövirta syötetään jarruvastuksiin, ja puhalletaan sieltä tarpeen mukaan lämpönä vaunun matkustamoon. Lämmitysilmä ohjataan ulos termostaatin ohjaaman säätöpellin kautta, kun vaunujen lämmitystä ei tarvita. Jarrutusenergian takaisinsyötön mahdollistamiseksi metroverkon sähkönsyöttöön pitäisi tehdä muutoksia tai jarrutuksessa syntyvä sähköenergia pitäisi varastoida ja hyödyntää toisen junan kiihdytyksessä.

Tämän diplomityön tavoite on tutkia erilaisia mahdollisuuksia hyödyntää jarrutusenergiaa Helsingin metrojunissa. Tutkimus on erityisen ajankohtainen nyt, kun Espoon Länsimetro on rakenteilla. Nyt sekä hankitaan uutta junakalustoa, että rakennetaan sähkönsyöttöjärjestelmää, joissa voidaan hyödyntää paras ratkaisu jarrutusenergian talteenotossa. Superkondensaattoritekniikan kehittyminen tarjoaa uudenlaisia mahdollisuuksia säästää jarrutusenergiaa hyödyntämällä. Lisäksi yhtenä ratkaisuna tarkastellaan vauhtipyörän soveltuvuutta Helsingin metron olosuhteisiin.

Tässä diplomityössä tutkitaan käytännön jarruvirtamittauksilla sekä lämmityksen säätöpellin asentoa mittaamalla, kuinka paljon jarrutusenergiaa olisi mahdollista käyttää takaisinsyöttöön, ja kuinka paljon siitä tällä hetkellä käytetään matkustamon lämmitykseen. Käytettävissä oleva jarrutusenergia voidaan hyödyntää toisten junien kiihdyttämiseen uusimman energian varastointitekniikan avulla. Tarkoitus on tutkia miten jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti.

Diplomityö alkaa kirjallisuuskatsauksella. Luvussa kaksi esitellään Helsingin metrolinjalaitos; käytössä oleva junakalusto ja sähkönsyöttöjärjestelmä sekä lyhyt katsaus Helsingin metron tulevaisuudennäkymiin. Luvussa kolme esitellään eri tapoja varastoida energiaa, joista tarkastellaan erityisesti superkondensaattoreita ja vauhtipyörää. Luvussa neljä on kuvailtu jarruvirta- ja säätöpeltimittauksia; niiden mittausjärjestelyt sekä mittaustuloksia on analysoitu. Luvussa viisi tarkastellaan jarrutusenergian hyödyntämistä energiavarastojen avulla, tarvittavia laitteistomuutoksia rataverkkoon ja juniin sekä tarkastellaan takaisinsyöttöä taloudellisesta näkökulmasta. Lopuksi on vielä yhteenveto tutkimustuloksista.

2 Helsingin metro

Helsingin metro on maailman pohjoisin ja vielä muutaman vuoden ajan ainoa metrolinja, kunnes Espooseen valmistuu Helsingin metron jatkeeksi Länsimetro. Tämänhetkinen järjestelmä koostuu 17 asemasta kahdessa haarassa, ja radan pituus on yhteensä 21,1 km. Metron vuoroväli on 4–10 minuuttia nykyisellä liikennöintitavalla ja käytettävissä olevalla tekniikalla. Metroradan raideleveys on sama kuin valtion rautatieverkolla eli 1524 millimetriä. Helsingin metrossa virransyöttöjärjestelmänä toimii radan sivussa kulkeva virtakisko, josta saadaan 750 voltin tasajännite. (Laaksonen 2010.)



Kuva 2.1 Helsingin metrolinja. Punaisella katkoviivalla on merkitty tunneliosuudet (Laaksonen 2010).

Metrolienteestä vastaa Helsingin kaupungin liikennelaitos (HKL). Metro palvelee erityisesti Helsingin itäisiä kaupunginosia, mutta helpottaa myös kantakaupungissa liikkumista. Nykyinen metrolinja on esitetty kuvassa 2.1.

Helsingin metroa liikennöidään M100- ja M200-sarjan junilla, joita on yhteensä 54 kappaletta. Eri sarjojen junien tekniset ominaisuudet eroavat toisistaan, sillä junilla on eri valmistajat ja ikäeroa noin 20 vuotta. Kolmea vanhinta junayksikköä kut-

sutaan nokkajuniksi, jotka ovat M100-sarjan ensimmäiset junat. Muusta M100-sarjan kalustosta käytetään nimitystä sarjajuna. (Pakkala 2002.) Helsingin metro on erittäin suosittu joukkoliikenneväline: vuonna 2010 metromatkoja tehtiin 57,1 miljoonaa, ja asiakkaat ovat antaneet metrolle matkustajatytytyväisyyskyselyissä hyvän arvosanan useana vuonna (HKL toimintakertomus 2010).

Metrolla ajetaan kaupunkialueella maan päällä, tunneleissa sekä silloilla. Monista muista metroverkostoista poiketen Helsingissä yli puolet linjaradasta kulkee maan päällä eli kokonaisuudessaan 14,6 kilometriä. Metrorata on kaikkialla eristetty muusta ympäristöstä mahdollisimman tehokkaasti jo virtakiskon aiheuttaman sähköiskuvaaran vuoksi, eikä radalla ole muuta liikennettä linjaliikenteen ja kunnossapidon lisäksi. Molempien metrojunasarjojen rakenteellinen huippunopeus on 100 km/h, mutta suurin mahdollinen liikennöinti nopeus on 80 km/h. Kaarteissa, asemilla ja muilla vaativilla rataosuuksilla on tilannekohtaiset nopeusrajoitukset sekä niiden noudattamista valvovat pakkopysäytysjärjestelmät. (Tolmunen 2007.)

2.1 Historia

Helsingin metrojärjestelmän suunnittelun lasketaan alkaneen vuonna 1955, mutta varsinainen päätös rakentamisesta tehtiin toukokuussa vuonna 1969. Kaksi vuotta myöhemmin valmistui koerata Vartiokylästä Siilitielle, ja saman vuoden aikana aloitettiin tunnelien louhintatyöt Helsingin keskustassa. Matkustajaliikenne alkoi vuonna 1982, aluksi Hakaniemen ja Itäkeskuksen välillä, mutta vielä saman vuoden aikana avattiin Rautatientorin metroasema. Seuraavien neljän vuoden aikana aukesivat Kampin, Sörnäisten, Myllypuron ja Kontulan asemat. Mellunmäkeen metroverkko ulottui 1989. Ruoholahden asema avattiin vuonna 1993. Samassa yhteydessä keskusteltiin metroverkon jatkamisesta Espooseen, mutta hanke ei edennyt keskusteluja pidemmälle. Kaksi vuotta myöhemmin avattiin Kaisaniemen asema. Vuonna 1998 avattiin Mellunmäen haaran rinnalle paljon toivottu Vuosaaren haara, johon kuuluvat Puotilan, Rastilan ja Vuosaaren asemat. Uusin asema on Kalasatama, joka otettiin käyttöön vuonna 2007. (Louhivuori 2007.)

2.2 Metrojunakalusto

M100-sarjan junia on 42 vaunuparia. M100-sarjan tekniikassa merkittävä uudistus oli ajomoottorikäyttöjen muuttaminen vaihtovirtakäyttöiksi. Tekniikka perustui taajuusmuuttajakäyttöihin, joiden käyttöä puolsi, että ne olisivat moderneja vielä 20–30 vuoden päästä. Vuodesta 2004 alkaen M100-sarjaa on peruskorjattu käyttöiän pidentämiseksi. Peruskorjaus saatiin päätökseen vuonna 2009. (Antell 2010.) M100-sarjan vaunuparin tarkemmat tekniset tiedot on esitetty liitteessä A.

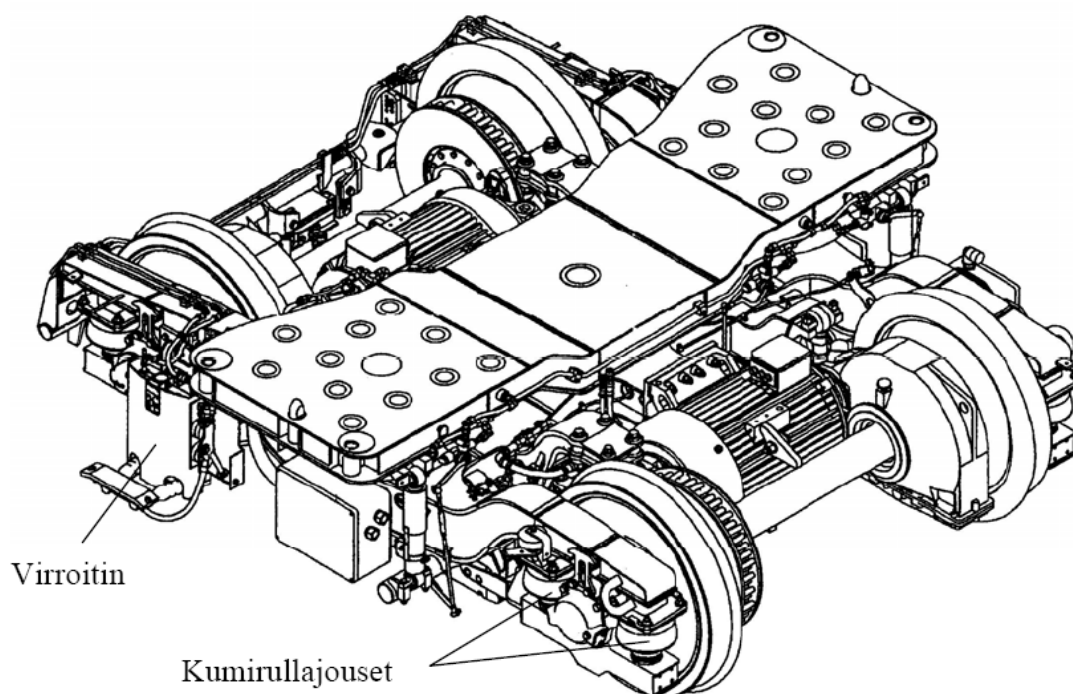
Metron laajentuessa uudella haaralla Vuosaaren M100-sarjan junakalusto ei enää riittänyt vastaamaan vuorovälin ja matkustajamäärien asettamia vaatimuksia. Vuonna 1995 päätettiin hankkia 12 uutta vaunuparia, jotka nykyään tunnetaan M200-sarjana. Vanhan vaunusarjan toimivuuden perusteella haluttiin päämitoitetaan ja suoritusarvoiltaan samankaltainen vaunusarja. Merkittäviä uudistuksia olivat korin kevytmetallirakenne, kehittyneempi IGBT-oikosulkumoottorikäyttö sekä vikadiagnostiikan mahdollistava väylätekniikka. M200-sarjan vaunuihin on katolle rakennettu varaus yläpuoliselle virranottimelle, mikä mahdollistaa tarvittaessa metron laajennusten toteuttamisen ilmajohtovirroituksella. (Andersson 2010.) M200-sarjan vaunuparin tarkemmat tekniset tiedot on esitetty liitteessä B.

M200-junasarjan päätytelin rakenne on esitetty kuvassa 2.2. Ajoneuvon telin peruskomponentit ovat kehys, vähintään yksi pyöräkerta sekä jousituskomponentit. Metroissa telit ovat kaksiakseliset ja niihin on sijoitettu kaksi vetävää pyöräkertaa kuhunkin, toisin sanoen kaikki akselit on moottoroitu. Yhdessä M100-sarjan vaunuparissa on siten yhteensä kahdeksan 125 kW tehoista moottoria, jotka tuottavat vaunuparia kohden yhden megawatin vetotehon. Täysimittaisen kolmivaunuparisen metrojunan moottoriteho on kolme megawattia. Helsingin metrossa sähkö syötetään radan sivussa sijaitsevaa virtakiskoa pitkin. Metrojuna ottaa virran virtakiskon alapuolelta virroittimilla, jotka sijaitsevat päätyteleissä molemmin puolin juna. (Antell 2010.) Virroittimet on esitetty kuvassa 2.2.

Teliajoneuvoilla on hyvät kaarreajo-ominaisuudet, ja pieni kiskoiltaaputoamisen riski verrattuna jäykkärakenteisiin ajoneuvoihin, joissa akseli on kiinnitetty jäy-

kästi suoraan koriin. Teliajoneuvoissa jousitustasoja on kaksi, ensiö- ja toisiojousitus, minkä ansiosta korin värähtelyt sekä pyörä-kiskovoimat jäävät alhaisiksi. Metron akselit on laakeroitu molemmista päistään kaksirivisillä kartiorullalaaakereilla. Ensiöjousitus on toteutettu kumijousin. Toisiojousituksena toimivat kaksi ilmajousta, jotka yhdessä sekä vaaka- ja pystyiskunvaimentimien kanssa vaikuttavat telin ja korin välisiin liike- ja jousto-ominaisuuksiin. (Metrojunasarja M200 Huolto- ja korjausohjeet 2002.)

Jarrujärjestelmiä metrojunassa on kolme: sähköjarru, paineilmajarru ja kiskojarru. Sähköjarrua käytetään hidastamiseen, ja jarrutuksessa syntyvä energia ohjataan jarruvastuksiin, joiden tuottama lämpö käytetään kylmänä vuodenaikana matkustamon lämmittämiseen. Paineilmajarrua käytetään junan pysäyttämiseen pienestä nopeudesta, ja se toimii samalla sähköjarrun varajärjestelmänä. Telin pyörien välissä sijaitsevat magneettitoimiset kiskojarrut on tarkoitettu jarruttamiseen liukkaalla kelillä ja hätäjarrutuksissa. (Metrojunasarja M200 Huolto- ja korjausohjeet 2002.)



Kuva 2.2 M200-junasarjan päätytelin rakenne. Telin molemmilla puolilla on virroitin. Akseleiden päädyissä olevat kumirullajouset toimivat ensiöjousituksena (Bombardier 2002).

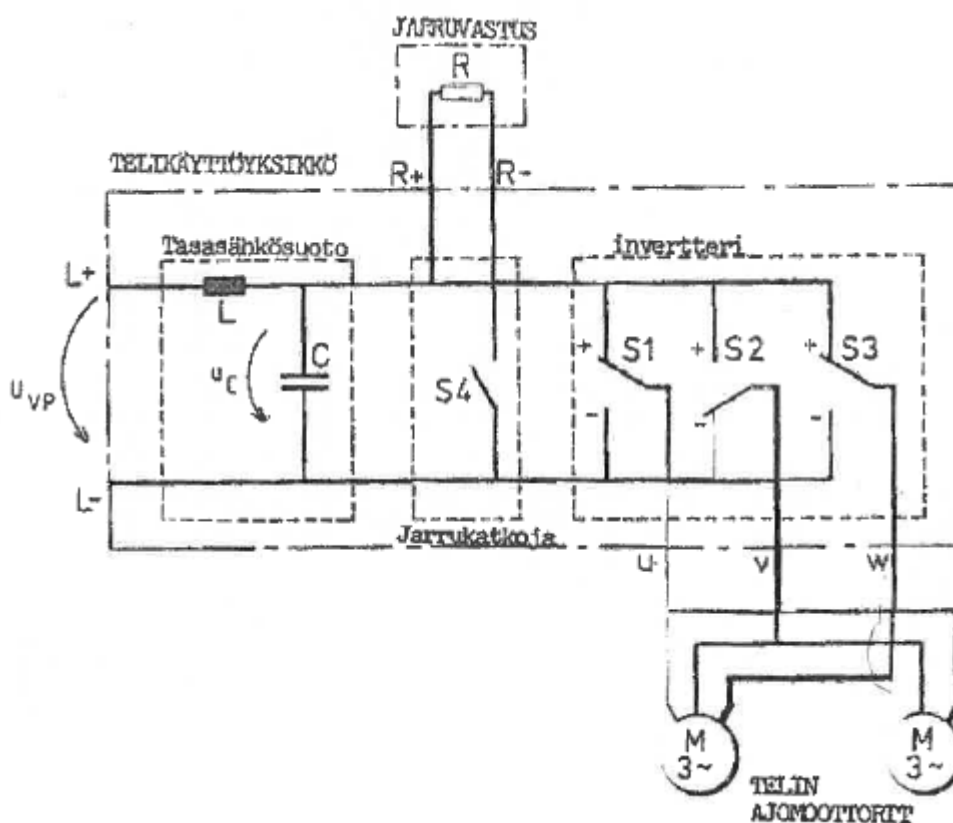
Ajomoottoriipiirit

Vaunuparissa on neljä telikohtaista ajomoottoriipiiriä, joissa on kaksi rinnankytkettyä oikosulkumoottoria, jarruvastus sekä näitä ohjaava telikäyttöyksikkö, jonka rakenne ja toiminta esitellään seuraavassa kappaleessa. Ajomoottoriipiirit saavat ohjaustietonsa eli ajosuuntaohjeen ja veto- tai jarruvoimaohjeet vaunuparin säätö- ja ohjauspiirien kautta. Ohjeet muokataan sopivaan muotoon, huomioidaan erilaiset ajoon vaikuttavat asiat kuten luisto ja ympäriilyöntitilanteet, virtakiskon jännitteen vaihtelut ja katkokset sekä vaunun paino. Muokatuista veto- tai jarruvoimaohjearvoista ja mitatuista ajomoottoreiden oloarvoista eli moottorivirrasta ja pyörimisnopeudesta muodostetaan jokaiselle ajomoottoriipiirille pyörimisnopeusohje. Tämän ohjeen sekä ajosuuntaohjeen mukaisesti telikäyttöyksikössä 750 voltin tasajännite katkotaan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi, pulssimaiseksi kolmivaihejännitteeksi ajomoottoreille. (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983.)

Junaa kiihdytettäessä moottorien jännitettä nostetaan taajuuteen verrannollisena. Kun täysi jännite on saavutettu, nostetaan taajuutta edelleen, kunnes juna on saavuttanut täyden nopeuden. Jarrutettaessa taajuutta lasketaan, jolloin ajomoottorit siirtyvät generaattoreiksi ja syöttävät jarruenergiaa telikäyttöyksikön ohjaamana jarruvastukseen. Taajuuden nosto- tai laskunopeus määrää ajomoottoreiden veto- tai jarruvoiman. Jarrutettaessa vaunuparin sisäinen jännite eli välipiirin jännite U_{vp} nostetaan noin 930 volttiin eli suuremmaksi kuin virtakiskon jännite. Tällöin jarrutusenergiaa hyödynnetään jarrutustilanteessa apukäytöissä, joita ovat vaihtosuuntaaja ja lämmitysvastukset. Virtakiskon jännitteen hävitessä ohjataan ajomoottorit nopeasti generaattoreiksi, jolloin sisäinen jännite säilyy ja apukäytöt voivat toimia, kunnes junan nopeus alenee liian pieneksi tai jännite palaa. (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983.)

Telikäyttöyksikkö

Telikäyttöyksikkö koostuu tasasähkösuodattimesta, kolmivaiheisesta vaihtosuuntaajasta ja jarrukatkojasta. Yksikkö on varustettu puhaltimella. Periaatekaavio telikäyttöyksiköstä on esitetty kuvassa 2.3.



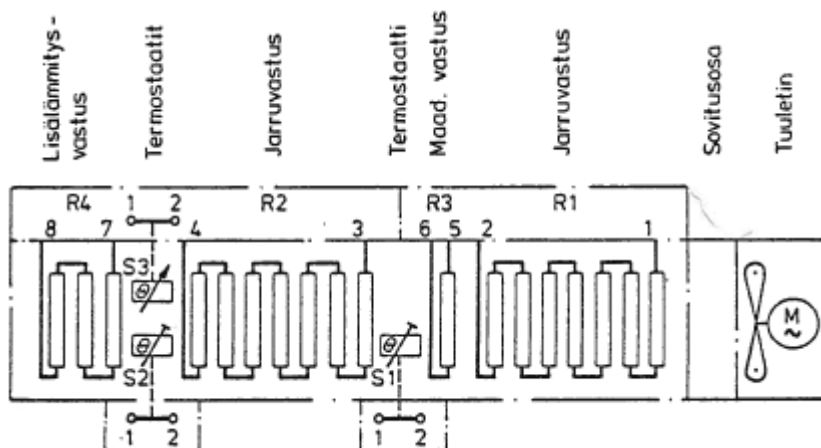
Kuva 2.3 Periaatekuva telikäyttöyksiköstä (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983).

Telikäyttöyksikön vaihtosuuntaaja sisältää kolme vaihekohtaista tehoastetta eli tehoduulia. Tehoduulin tyristoreita ohjaamalla kytketään moottorin vaihe vuorotellen tasajännitteen plus- tai miinuspotentiaaliin. Pienillä taajuuksilla moottorin vaihejännite muodostuu useammista jännitepulsseista puolijaksoa kohti. Eri vaiheiden tehoduuleita ohjataan 120 asteen vaihesiirrolla toisiinsa nähden, jolloin ajomoottorit saavat symmetrisen kolmivaihejännitteen. (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983.)

Jarrukatkoja on pakkokommutoitu tyristorikytkin, jota ohjataan suoraan tasajännitteen mukaan siten, että tasajännite pysyy jarrutuksessa halutussa 950 voltin arvossa. Suoran jänniteohjauksen takia jarrukatkoja avautuu myös virtakiskon ylijännitetaapauksissa ja johtaa ylijännite-energian jarruvastukseen. Telikäyttöyksikön tehomodulit on suojattu sulakkeilla. Yksikössä valvotaan ylivirtaa vaihekohtaisesti, pääkondensaattorin ali- ja ylijännitettä, yllilämpöä sekä jarrukatkojan johtamisaikaa. (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983.)

Jarruvastusyksikkö

Jarruvastusyksikkö on vaunukohtainen ja sisältää vaunun molempien ajomoottori-ripiirien jarruvastuksen sekä vaunun maadoitusvastuksen. Lisäksi vaunuissa on samaan koteloon sijoitettu lisälämmitysvastus. (Andersson 2010.) Jarruvastusyksikön kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Jarruvastusyksikön kytkentäkaavio (Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet 1983).

Jarruvastusyksikkö on varustettu kaksinopeuksisella puhaltimella. Jarruenergiaa käytetään hyväksi vaunun lämmityksessä. Säätopellin asentoa muuttamalla jarrutuksessa syntyneestä lämmöstä ohjataan tarvittava määrä matkustamoon ja ylimääräinen lämpö ohjataan ulos. Ylikuumentumisen varalta yksikkö on suojattu kahdella lasihelmytyypisellä ja yhdellä aseteltavalla lämpösuojualla. (Andersson 2010.)

2.3 Sähkönsyöttöjärjestelmä

Metrojunien sähkönsyöttö toimii 750 voltin tasajännitteellä, joka otetaan radan sivussa kulkevan virtakiskon kautta. Pääperiaatteena virtakiskojen sijoituksessa on, että vaunuparin kahdesta virroittimesta toisen on aina oltava kosketuksessa virtakiskoon, jotta juna saa käyttöönsä tarvittavan sähköenergian. (Ratasähköistys 2009.) Metron sähköverkkojen kokonaisenergiankulutus on noin 63 GWh vuodessa, josta metrojunaliikenteen kulutus on noin 42 GWh vuodessa (HKL vuosikertomus 2010).

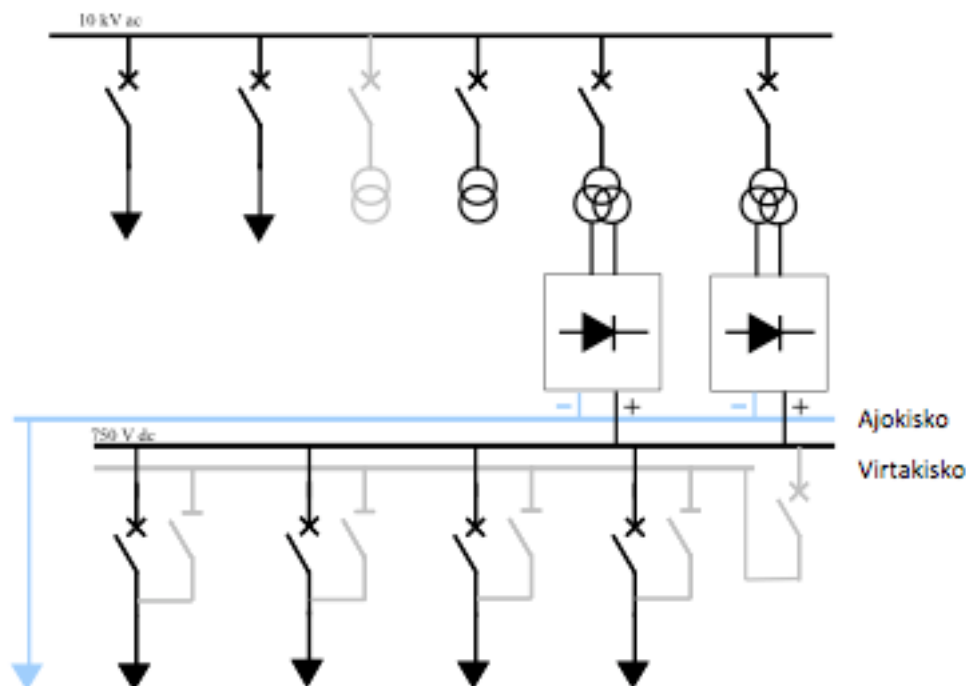
Keskijänniteverkko

Metron sähkönsyöttö saadaan Helsingin alueella Helsingin Energia Oy:n sähköasemilta 10 kV ja 20 kV jännitteellä. Länsimetron Espoon puoleisella osuudella sähkönsyöttö tullaan saamaan Fortum Distribution Oy:n sähköasemilta 20 kV jännitteellä. Syöttöjärjestelmä on rengasverkko, jota suojausteknisistä syistä pidetään aina jollakin metron syöttöasemalla auki. Vain huollon ja korjauksen vaatimien kytkentämuutosten ajan syöttörengas on kiinni, jotta vältytään jännitekatkoilta metroasemilla. Metron syöttökaapeleihin ei ole kytketty muita kuluttajia ja syötöt ovat eri ryhmissä Helsingin energian sähköasemalla. Keskijänniteverkko on suunniteltu sellaiseksi, että yhden syöttökaapelin vikaantuminen ei aiheuta pitkäaikaista katkosta tai häiriötä metron toiminnassa. (Jussila 2010.)

Syöttöasemat

Syöttöasemilla muunnetaan 10 kV tai 20 kV suurjännitteinen vaihtosähkö pienjännitteiseksi 750 voltin tasasähköksi metrojunille. Jokaisella syöttöasemalla on kaksi rinnakkain toimivaa tasasuunninyksikköä. Virtakiskolaitoksen muodostavat rataerotinkojeistot ja virtakiskot. Tasasähkön jakelua varten virtakiskolaitokseen syöttöasemilla on tasasähkökojeistot, joissa syöttölaitteina ovat tasavirtapikakatkaisijat. Syötöt virtakiskoihin kytketään rataerotinkojeistojen kautta. Sähkönsyötössä on vakiintunut järjestelmä, jossa kokoojakiskosta syötetään neljällä pikakatkaisi-

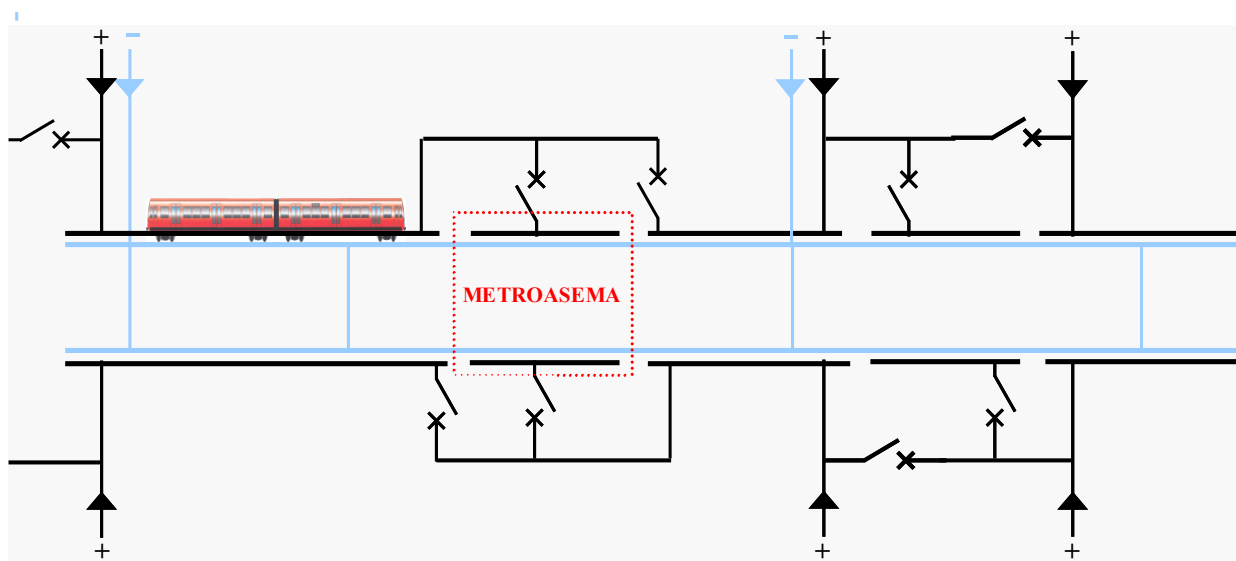
jalla molempien raiteiden virtakiskoja. Lisäksi kojeisto on varustettu apukiskolla, jota syöttää yksi katkaisija. Tarvittaessa yhden virtakiskojakson syöttö kerrallaan voidaan siirtää apukiskolle kauko-ohjattavilla erottimilla. Tasasähkön miinusnapa on kytketty ajokiskoihin ja plusnapa virtakiskoihin. (Ruotsalainen 2010.) Kuvassa 2.5 on esitetty syöttöaseman yleiskaavio.



Kuva 2.5 Syöttöaseman yleiskaavio (Ratasähköistys 2009).

Syöttöasemia on rakennettu nykyiselle metrolinjalle noin 2–2,6 kilometrin välein. Virtakiskomateriaalina on käytetty terästä. Käyttämällä paremman johtokyvyn omaavaa alumiinivirtakiskoja on mahdollista pidentää syöttöasemaväliä. Syöttöasemien välillä jännite virtakiskoissa ei junan kiihdytyksessä laske liiaksi vaan pysyy vaunukaluston tekniikalle hyväksyttävissä rajoissa. Syöttöasemien on taattava riittävä käyttövarmuus sähkönsyöttöjärjestelmälle. Liikenne on voitava hoitaa ilman häiriöitä, vaikka yksi syöttöasema olisi pois käytöstä. Lisäksi liikennettä tulee voida jatkaa normaalisti tai rajoitetuilla vetotehoilla, jos yksi syöttöasema on pois käytöstä. Syöttöasemat sijoittuvat metroradan välittömään läheisyyteen joko metroaseman teknisiin tiloihin tai erillsrakennuksiin. Metroasemien kohdalla olevat virtakiskot saadaan tarvittaessa jännitteettömiksi kauko-ohjatuilla kuormanerotimilla. Kummankin raiteen virtakiskoihin on erilliset syötöt, jolloin toisen raiteen

virtakiskot voidaan kytkeä jännitteettömiksi esimerkiksi huoltotöitä varten, ja toista raidetta voidaan liikennöidä. (Jussila 2010.)



Kuva 2.6 Ratasähkönsyötön periaatekuva (Ratasähköistys 2009).

Sähkönsyöttöjärjestelmän laitteet

Virtakiskolaitoksen muodostavat rataerotinkojeistot, virtakiskot ja niihin liittyvät kaapelit ja kiskostot. Syöttökaapelit virtakiskoille asennetaan omille johtoteilleen radan vieressä. Hajavirtojen estämiseksi ajokiskot eristetään ratapölkkyistä ja muista kiskojen lähellä olevista maadoituksiin yhteydessä olevista rakenteista kuten siltojen liikuntalaitteista ja vaihdelämmitysmuuntajien koteloista. Ratakiskojen yhdistys tasasuuntaajaan tehdään syöttöaseman kohdalla molempiin raiteisiin. (Virtakiskojärjestelmä 1978.)

Metron tasasuunninmuuntajien tehomitoitus on sama kaikilla syöttöasemilla. Tasasuunninmuuntaja ja tasasuuntaaja muodostavat yhdessä tasasuunninyksikön, joita on kaksi kappaletta kaikilla muilla syöttöasemilla paitsi Ruoholahdessa ja metrovarikolla, joissa on vain yksi tasasuunninyksikkö. Metrokäytön kuormitusvaatimukset ovat raskaan liikennevälinekäytön standardin mukaiset. Tasasuuntaajat ja muuntajat suojataan syöttöasemilla 10 kV katkaisijoilla, ja niihin kytketyillä laukaisun antavilla suojalaitteilla. (Jussila 2010.)

Tasavirtapikakatkaisijalla rajoitetaan oikosulkuvirtaa. Sen toiminta on erittäin nopeaa: avautumisaika on vain noin kolme millisekuntia. Pääkoskettimien avautuessa syntyy niiden väliin valokaari, joka magneettikentän voimasta suuntautuu valokaarikammioon ja sammuu siellä. Nopeasta toiminta-ajasta johtuen oikosulkuvirta ei ehdi nousta laskennalliseen arvoonsa vaan katkeaa jo ennen sitä. Tasavirtapikakatkaisijoiden ohjaustoiminnot on kehitetty erityisesti ratasähkönsyöttöön soveltuviksi. Tavanomaiset sähköjakelun katkaisijat ovat yleensä laukeamistoiminnan jälkeen uudelleen ohjattava kiinni, mutta liikennekäytössä usein toistuvien laukeamisien takia tasavirtapikakatkaisijat on varustettu automaattisella virtakiskojakson koestus- ja kiinniohjaustoiminnolla. (Ruotsalainen 2010.)

Rataerotinkojeistoilla voidaan haluttu virtakiskojakso tehdä jännitteettömäksi. Kojeistoille tuodaan apusähkösyötöt aseman varmennetusta pienjänniteverkosta. Huollon ja kunnossapidon sekä käytön vaatimien kytkentätarpeiden takia kaikilla syöttöasemilla ja metroasemilla on keskitetyt rataerotinkojeistot, joiden kautta plus 750 V kytketään virtakiskoihin. Rataerotinkojeistoa syöttävät nopeatoimiset ja oikosulkuvirtoja rajoittavat tasavirtapikakatkaisijat. (Ruotsalainen 2010.)

Metron ratasähkönsyötön suojausperiaatteet

Virtakisko ja sen syöttökaapelit sekä junien virransyöttölaitteet, joita ovat virroittimet ja syöttökaapelit, suojataan sähkönsyöttöasemilla sijaitsevilla pikakatkaisijoilla ja niihin kytketyillä laukaisun antavilla suojareleillä. Metron virtakiskosyötöissä ei ole käytössä suojausta termistä ylikuormittumista vastaan. Syöttökaapelit ovat tämän takia sijoitettu omille johtoteilleen palonkestävästi. Lisäksi syöttöasemat sijaitsevat radan vieressä, jolloin virtakiskojen syötöt ovat lyhyet ja ne sijaitsevat betonirakenteisissa kaapelitunneleissa tai rata-alueella. Kaapeleiden poikkipinnat ja rinnakkaisten johtojen määrät on valittu sellaisiksi, ettei ylikuormitusta pääse tapahtumaan. (Ruotsalainen 2010.)

Virtakiskosyöttöjen oikosulkusuojaus toimii hetkellisen kuormitusvirran ylittäessä asetteluarvon esim. vaunun virroittimen oikosulussa, virtakiskon tai sen eristimien

oikosulussa, kaapelivioissa sekä myös tilanteessa, jossa useiden metrojunien aikaansaamat hetkelliset kuormitusvirrat ylittävät asetteluarvon. Jos tämä suojalaite ei vikatilanteessa toimisikaan, seuraa siitä tasasuunnanmuuntajan ylivirtareleen havahtuminen ja 10 kV katkaisijan laukeaminen, jolloin häiriö laajenee myös muille syöttöasemalta syötetyille virtakiskojaksoille. (Ruotsalainen 2010.)

Kuormitusvirtaan verrannolliseen toisiovirtapiiriin kytketty suojarеле, joka tunnistaa johtojaksolla tapahtuvat äkilliset virran muutokset di/dt on virran nousunopeusrele. Releen asetteluarvo on valittu sellaiseksi, ettei se havahdu metrojunien sähkökäytön normaaleihin kuormitusmuutoksiin. Suojareleen avulla voidaan antaa katkaisijalle laukaisu myös sellaisissa epätäydellisissä oikosuluissa tai kaukaisissa oikosuluissa, joissa vikavirran suuruus ei riitä havahduttamaan katkaisijan momenttilaukaisijaa. (Ratasähköistys 2010.)

Sähkösyöttöjärjestelmän aiheuttamat häiriöt

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic compatibility, EMC) tarkoittaa elektronisen laitteen tai järjestelmän kykyä toimia luotettavasti luonnollisessa toimintaympäristössään. Laite ei saa tuottaa kohtuuttomasti sähkömagneettisia häiriöitä ympäristöönsä. Tämä koskee myös laitteen eri osien välisiä vuorovaikutuksia. Sähkömagneettiset häiriöt ovat ei-toivottua sähkömagneettista vuorovaikutusta laitteen sisällä tai laitteiden välillä. (Ratasähköistys 2009.)

Huomionarvoisia magneettikenttähäiriöitä ympäristöön muodostaa metrojunien virransyöttöjärjestelmä. Metron virtakiskoissa ja ajokiskoissa kulkeva virta aiheuttaa hitaasti muuttuvan magneettikentän kiihdytyksen ja jarrutuksen aikana ja nopeasti muuttuvan magneettikentän oikosulkuilanteessa. Magneettikentän voimakkuus pienenee suhteessa etäisyyden neliöön, joten ensisijainen suojautumiskeino häiriöiltä on herkkien laitteiden sijoittaminen etäälle metroradan virtakiskoista tai niiden syöttökaapeleista. Asentamalla virtakiskokaapelit mahdollisimman lähelle paluuvirtaa johtavia ajokiskoja voidaan magneettikenttiä pienentää. (Jussila 2010.)

2.4 Helsingin metrolinjan tulevaisuuden näkymät

Helsingin metrolinja on vielä toistaiseksi suhteellisen lyhyt, mutta metron laajentuminen on jo alkanut, ja liikennöinnin Espoon suuntaan on arviolta määrä alkaa syksyllä 2015. Länsimetron myötä metrovarikkoa laajennetaan ja uutta junakalustoa hankitaan. Lisäksi metron automatisointi tuo muutoksia niin kalustoon kuin liikenteenohjaukseenkin. Tiedossa on suuria ja pitkäaikaisia projekteja, joiden tavoitteena on parantaa metron käytettävyyttä ja palvelutasoa.

Länsimetro

Metrotunneleiden louhintatyöt Länsimetroa varten alkoivat marraskuussa 2009, ja uusi M300-sarjan kalusto on suunnitteluvaiheessa: uuden kaluston ominaisuuksia määritetään, ja useiden valmistajien kanssa on keskusteltu tarpeista.



Kuva 2.7 Länsimetron linjaussuunnitelma (Länsimetro 2010).

Länsimetro lisää linjan pituutta noin 13,4 kilometrillä Ruoholahdesta Matinkylään. Länsimetron linjaus on esitetty kuvassa 2.7 Tulevaisuuden suunnitelmissa on esitetty, että metrolinjaa voitaisiin laajentaa lännessä edelleen Matinkylästä Kivenlahteen saakka, ja lisäksi idässä Sipoon suuntaan.

M300-kaluston hankinta

Uuden kaluston vaikutukset pyöriin liittyvät ainakin kaluston akselikuormiin ja jarruominaisuuksiin. Myös telityyppi ja jousituksen jäykkyys vaikuttavat. Uuden kaluston ominaisuuksista käydään vielä keskustelua, eikä näitä asioita ole toistaiseksi päätetty. Myös uuden junayksikön vaunumäärää on pohdittava. Nykyisen kahden vaunun yksikön tilalle harkitaan nelivaunuista yksikköä. Junayksikön koko vaikuttaa osaltaan telityyppien valintaan. Toisaalta moottorittomien juoksuosien käyttöä harkitaan vetoteliin lisäksi vaunujen lukumäärästä riippumatta, sillä niillä voitaisiin mahdollisesti säästää junan kokonaispainossa.

Automaattimetro

Helsingin kaupunginvaltuusto päätti nykyisestä automaattimetroprojektista toukokuussa 2006. Automaatiojärjestelmien toimittajaksi valittiin tarjouskilpailun voittajana Siemens vuonna 2008. Metron automatisointi alkaa uusien asetinlaitteiden ja käytönohjausjärjestelmän asentamisella.

Automaattimetroilla voidaan liikennöidä nykyistä tiheämmillä vuoroväleillä ilman kuljettajaa. Uusi vuoroväli tulee olemaan noin 2,5 minuuttia. Automatisointi poistaa kuljettajakohtaiset erot ja inhimilliset virheet. Lisäksi automatisoinnin yhteydessä hankitaan laituriovet, jotka estävät ihmisten hyppäämisen tai putoamisen junan eteen, mikä puolestaan aiheuttaa hätäjarrutuksia. Maailmalla ajaa jo monta metrojunaa ilman kuljettajaa, ja tulevaisuudessa myös Helsingin metro kulkee automaattisesti. Hanke on valmisteilla ja automaattijunat ovat liikenteessä suunnitelmien mukaan vuonna 2014. Järjestelmä, jolla metroa nykyisin valvotaan ja ohjataan, on palvellut metrolikenteen alusta alkaen eli lähes 30 vuotta, ja järjestelmä joudutaan joka tapauksessa päivittämään lähivuosina.

Matkustajille järjestelmän uusimisen suurin hyöty on se, että metroa voitaisiin liikennöidä nykyistäkin tiheämmillä vuoroväleillä, jopa kahden minuutin välein. Automaattimetron myötä junien pituus lyhenee kahteen vaunupariin, jolloin Länsi-

metron metroasemat voivat olla Helsingin asemalaitureita lyhyempiä ja siten edullisempia rakentaa.

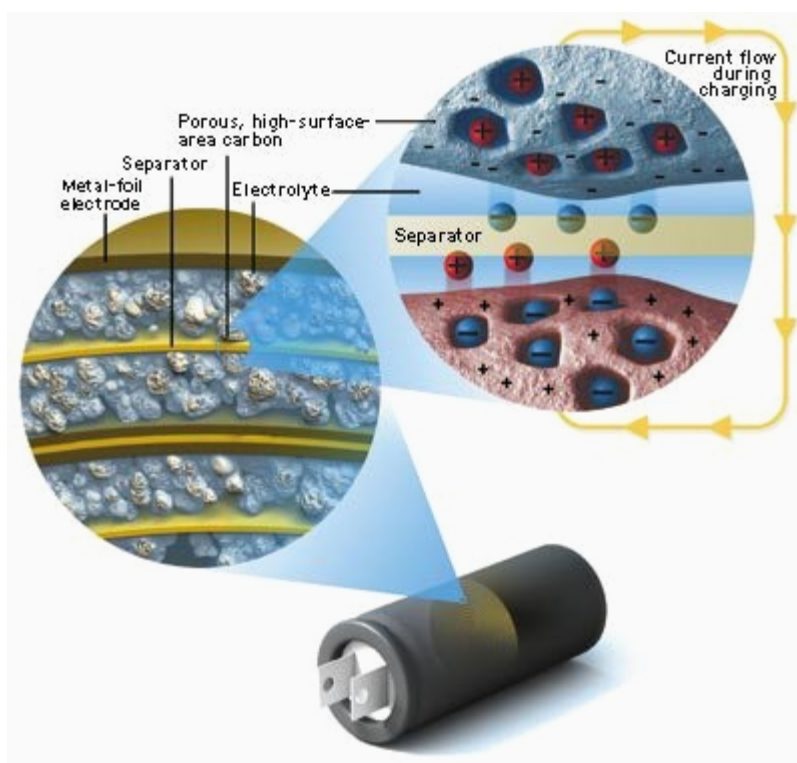
Maailman vanhimmat käytössä olevat automaattimetrot ovat reilun kahdenkymmenen vuoden ikäisiä. Junia on liikenteessä muun muassa Pariisissa ja Kööpenhaminassa. Kokemukset ovat olleet hyvin positiivisia. Automaattimetrot ovat osoittautuneet luotettaviksi ja turvallisiksi eikä automatisoiduilla linjoilla ole havaittu matkustajakatoa. Juna ilman kuljettajaa ei ole täysin uusi idea Helsingissäkään. Alun perin metroa kaavailtiin automaattiseksi jo 1970-luvulla, mutta tuolloin hankkeesta luovuttiin. Tulevalla uudella kulunvalvontajärjestelmällä on edessään huolellinen ja pitkä testausvaihe, joten ensimmäinen automaattijuna voisi ottaa matkustajat kyytiin ehkä vuonna 2014. Metron automatisointiin varauduttiin alustavasti jo M100-sarjasta lähtien; vaunuihin jätettiin tilaa automaattilaitteille ja kaapeloinneille. Uusi M300-junasarja tilataan automaattiajoon soveltuvana.

3 Energiavarastot

Tässä luvussa tarkastellaan lähemmin energiavarastotekniikkaa; niiden toimintaa, ominaisuuksia ja sovelluskohteita. Ensin esitellään superkondensaattoreiden toimintaa ja soveltuvuutta energian varastointiin ja sitten vauhtipyörää.

3.1 Superkondensaattori

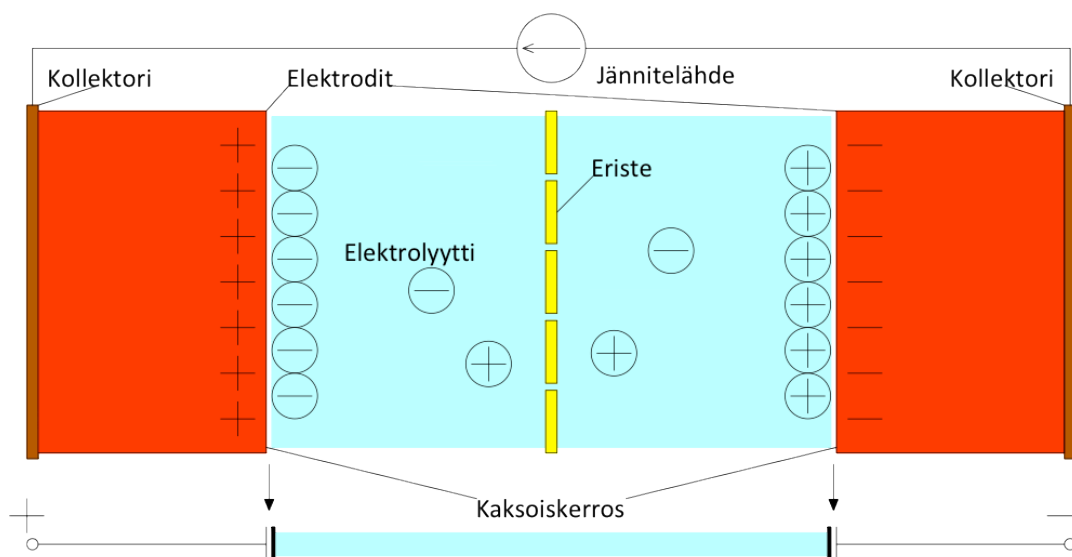
Superkondensaattori on melko uusi komponentti tehoelektronikan alalla. Se on kondensaattori, joka pystyy varastoimaan suuria energiamääriä eli sillä on suuri energiatiheys ja kapasitanssi verrattuna perinteiseen kondensaattoriin. Toiminnaltaan superkondensaattori sijoittuu akkujen ja tavallisten kondensaattoreiden väliin. Eräs tärkeä ominaisuus on superkondensaattorin kapasitanssin riippuvuus taajuudesta.



Kuva 3.1 Superkondensaattorin rakenteen poikkileikkauskuva (ultracapacitors.org).

Rakenne ja toiminta

Superkondensaattori tunnetaan myös nimillä ultrakondensaattori, kaksoiskerroskondensaattori ja sähkökemiallinen kondensaattori. Superkondensaattorissa on kaksi elektrodia, jotka rakentuvat kahdesta osasta: metalli- ja aktiivihiiliosasta. Metalliosa toimii johteena ja aktiivihiiliosa on huokoinen ja sen pinta-ala voi olla erittäin suuri, jopa $3000 \text{ m}^2/\text{g}$. Elektrodien välinen etäisyys puolestaan määräytyy ohuesta elektrodien ja elektrolyytin välisestä eristekerroksesta, joka on erittäin ohut, noin $0,2\text{--}1,5 \text{ nm}$. Näillä ominaisuuksilla saavutetaan superkondensaattorin suuri kapasitanssi, sillä kondensaattorin kapasitanssi on suoraan verrannollinen elektrodien pinta-alaan ja kääntäen verrannollinen niiden väliseen etäisyyteen. Superkondensaattorin rakenteen poikkileikkauskuva on esitetty kuvassa 3.2. Elektrodit erotetaan toisistaan puoliläpäisevällä eristeellä ja niiden välissä on tyyppillisesti nestemäistä elektrolyyttiä. Elektrodin ja elektrolyytin rajapintaan muodostuu hyvin ohut sähkökemiallinen kaksoiskerros. Molempien elektrodien pinnalla on samansuuruinen kapasitanssi ja komponentin kokonaiskapasitanssi on puolet tästä. Kaksoiskerroksen jännitekestoisuus on hieman yli yhden voltin suuruusluokkaa, joten superkondensaattoreiden nimellisjännitteet vaihtelevat $2,3\text{--}2,7$ voltin välillä. (Ultracapacitors 2005.)



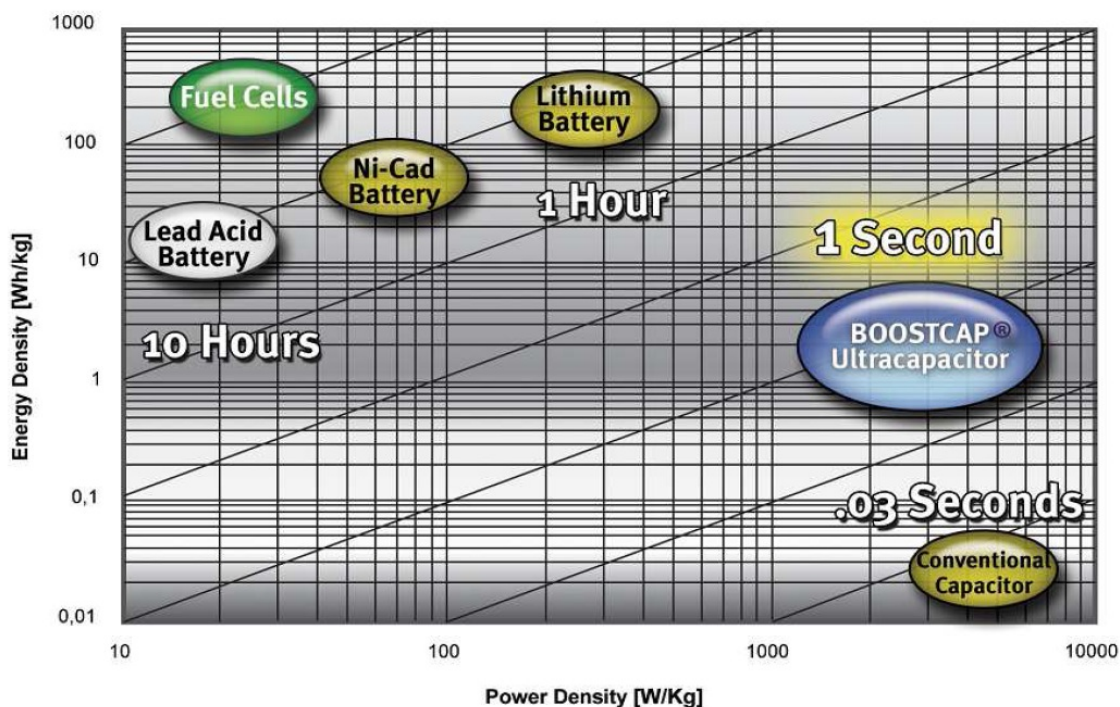
Kuva 3.2 Superkondensaattorin kondensaattorikennon periaate ja potentiaalimuutokset elektrodin ja elektrolyytin rajapinnassa (Vainonen 2005).

Superkondensaattorin tehokkuus, pitkä elinikä ja latausjaksojen suuri määrä johtuvat akusta poikkeavasta energian tallennusmenetelmästä. Toimintaperiaate ei perustu akkujen tavoin kemiallisiin reaktioihin, vaan elektrodien latauksen ja elektrolyytin ionien väliseen fysikaaliseen vuorovaikutukseen eli toisin sanoen energian varastointiin sähkökenttään. Lataus- ja purkausprosessit ovat täysin fysikaalisia ja palautuvia, joten superkondensaattori pystyy vapauttamaan energiaa paljon nopeammin ja tehokkaammin kuin hitaaseen kemialliseen reaktioon perustuva akku. Se myös kestää satoja tuhansia latausjaksoja ilman, että suorituskyky heikkenee. (Snellman 2005.)

Elinikä ja suorituskyky

Superkondensaattorin eliniän määrittäminen vaihtelee valmistajasta riippuen. Usein superkondensaattorin todetaan tulleen elinkaarensa loppuun kun kapasitanssissa on 20–30 % lasku tai kun sisäinen resistanssi on kaksinkertaistunut. Lataussyklien lukumäärä on eräs tapa ilmoittaa eliniän pituus. Suurille superkondensaattoreille voidaan luvata jopa miljoona lataussykliä kun jännite vaihtelee nimellisjännitteen ja sen puolikkaan välillä. Superkondensaattorin elinikään vaikuttaa lataussyklien lisäksi merkittävästi lämpötila ja jännitetaso. Peruseriaatteena on, että 10 celsiusasteen nousu ympäristön lämpötilassa puolittaa eliniän. Superkondensaattorille voidaan normaalissa huoneenlämpötilassa luvata eliniäksi noin 10 vuotta nimellisjännitteeseen ladattuna. Elinikä puolestaan pidentyy jos kennokohtaisessa jännitteessä tapahtuu 0,1 voltin lasku. Lataus- ja purkuvirran suuruus vaikuttaa sykliseen elinikään resistiivisten häviöiden aiheuttaman lämpenemän kautta. (Umemura, Mizutani, Okamoto, Nakajima & Tanaka 2003.)

Superkondensaattoreiden sisäiset resistanssit ovat huomattavasti pienempiä verrattuna akkujen resistanssiin ja sen vuoksi superkondensaattoreilla voidaan saavuttaa suurempi tehotiheys ja hyötysuhde. Energiatiheys puolestaan jää matalammaksi. Kuvassa 3.3 on verrattu toisiinsa erilaisten energiaa varastoivien komponenttien energia- ja tehotiheyksiä. (Alanen, Koljonen, Hukari ja Saari 2003.)



Kuva 3.3 Energiaa varastoivien komponenttien energia- ja tehotiheyksiä (Maxwell 2009).

Superkondensaattorien etu tavallisiin akkuihin verrattuna on niiden luotettavuus, pidempi käyttöaika sekä nopea lataus- ja purkausaika. Superkondensaattorien lataus- ja purkaushyötysuhde on erittäin korkea, mutta toisaalta niiden itsepurkautuvuus on korkeampi kuin tavallisten akkujen. Ne ovat huoltovapaita ja ympäristöystävällisiä ja niillä on varsin laaja toiminta-alue: $-40\text{ °C} - +70\text{ °C}$. Superkondensaattori sopii monenlaiseen käyttöön kuten vara- tai apuvoimanlähteeksi, huipputehon tasaukseen sekä energiavarastoksi erilaisiin sovelluksiin ja käyttöympäristöihin (Flinkenberg 2010).

Taulukko 3.1 Superkondensaattorin ominaisuuksien vertailu tavallisiin kondensaattoreihin sekä akkuihin (Alanen ym 2003).

	Kondensaattori	Superkondensaattori	Akku
Purkausaika	10^{-6} – 10^{-3} s	1–30 s	0,3–3 h
Latausaika	10^{-6} – 10^{-3} s	1–30 s	1–5 h
Lataus/purkaus-hyötysuhde	1,0	0,90–0,95	0,7–0,85
Energiatiheys Wh/kg	< 0,1	1–11	20–100
Tehotiheys W/kg	> 10 000	1000–10 000	50–200
Käyttölämpötila	–40°C–70°C	–40°C–70°C	–20°C–60°C
Toimintajaksojen lukumäärä	Erittäin suuri	> 500 000	500–2000

Sijaiskytkentä ja tasavirtayhtälöt

Superkondensaattorin sijaiskytkentä on vastaavanlainen kuin tavallisella kondensaattorilla. Kuvassa 8 on ensimmäisen asteen sijaiskytkentä, jossa C on ideaalinen kapasitanssi, L on induktanssi, R_p on vuotovirtaa mallintava vastus ja R_s on sarjaviestus.

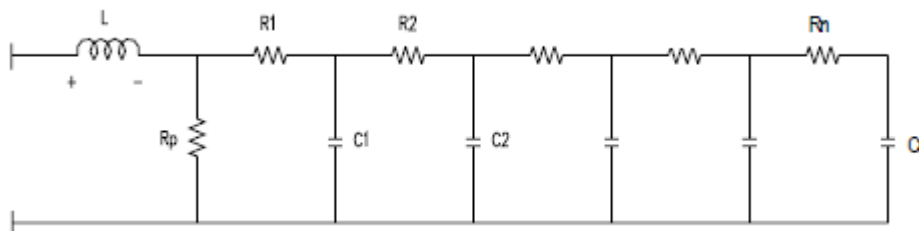


Kuva 3.4 Superkondensaattorin ensimmäisen asteen sijaiskytkentä (NessCap 2008).

Suuritehoisissa sovelluksissa R_p voidaan usein jättää huomiotta, jolloin impedanssiksi Z taajuudella f saadaan

$$Z = R_s + j(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}) \quad (1)$$

Todellisessa komponentissa elektrodit muodostuvat huokoisesta materiaalista, minkä vuoksi vastus ja kapasitanssi ovat jakautuneet koko elektrodin tilavuuteen. Todenmukaisempi malli superkondensaattorille saadaan kuvan 9 tikapuukytkenällä.



Kuva 3.5 Superkondensaattorin tikapuumalli (NessCap 2008).

Kondensaattorin tasavirtayhtälöitä voidaan soveltaa energiavaraston mitoituksessa

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

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (3)$$

$$U_0 - U = IR_s + \frac{Q_0 - Q}{C} \quad (4)$$

missä Q on kondensaattorin varaus, E on energia, U on jännite ja U_0 ja Q_0 ovat jännite ja energia ajanhetkellä $t = 0$. Superkondensaattorin kapasitanssi C muuttuu kondensaattorin jännitteen funktiona kaavan

$$C = C_0 + \alpha U \quad (5)$$

mukaan, jossa C_0 on kapasitanssi jännitteellä 0 V ja α on kapasitanssin jänniteriippuvuus.

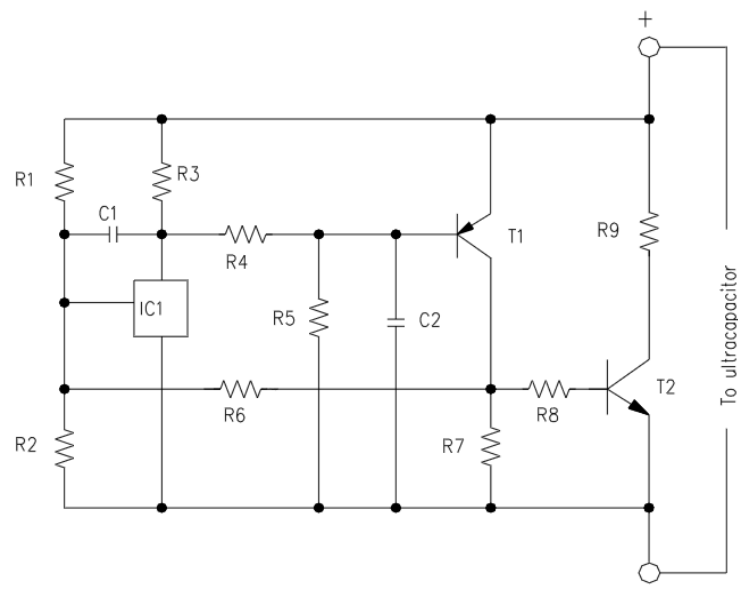
Sarjaankytkentä ja jännitteentasausmenetelmät

Superkondensaattoreita voidaan kytkeä yhteen, joko rinnan tai sarjaan, suuremman energiasisällön tai lähtöjännitteen aikaansaamiseksi. Sarjaankytkennässä kennojen napajännitteisiin saattaa aiheutua eroja erisuuruisten vuotovirtojen, hä-

viöiden ja kapasitanssin vuoksi. Kennon jännite voi nousta suureksi jos ladattavat kondensaattorit ovat epätasaisesti varautuneita. Tämä voidaan välttää jännitteentasauspiirien avulla. (NessCap 2008.)

Passiivisessa jännitteentasauksessa kondensaattoreiden rinnalle kytketään tasausvastukset. Vastukset mitoitetaan siten, että kennojen sisäisten vuotovirtojen eroilla ei ole merkitystä vastusten virtaan verrattuna. Vastusten on kuitenkin pysyttävä riittävästi rajoittamaan vuotovirran suuruutta. Passiivinen jännitteentasaus on edullista ja luotettavaa. Haittapuolina on hitaus ja suuri vuotovirta. Menetelmä sopii parhaiten hitaille lataus- ja purkusykleille ja sovelluksiin, joissa energiaa ei tarvitse varastoida pitkiä aikoja. (NessCap 2008.)

Aktiivista jännitteentasausta kannattaa käyttää, kun tarvitaan nopeaa jännitteentasausta tai pientä vuotovirtaa. Aktiivinen tasauspiiri voidaan toteuttaa jänniteleikkurilla, joka kytketään kondensaattorin napoihin. Jänniteleikkuri kytkee vastuksen kondensaattorin yli, kun valittu jännitetaso saavutetaan. Kuvassa 3.6 on eräs toteutustapa jänniteleikkurille.



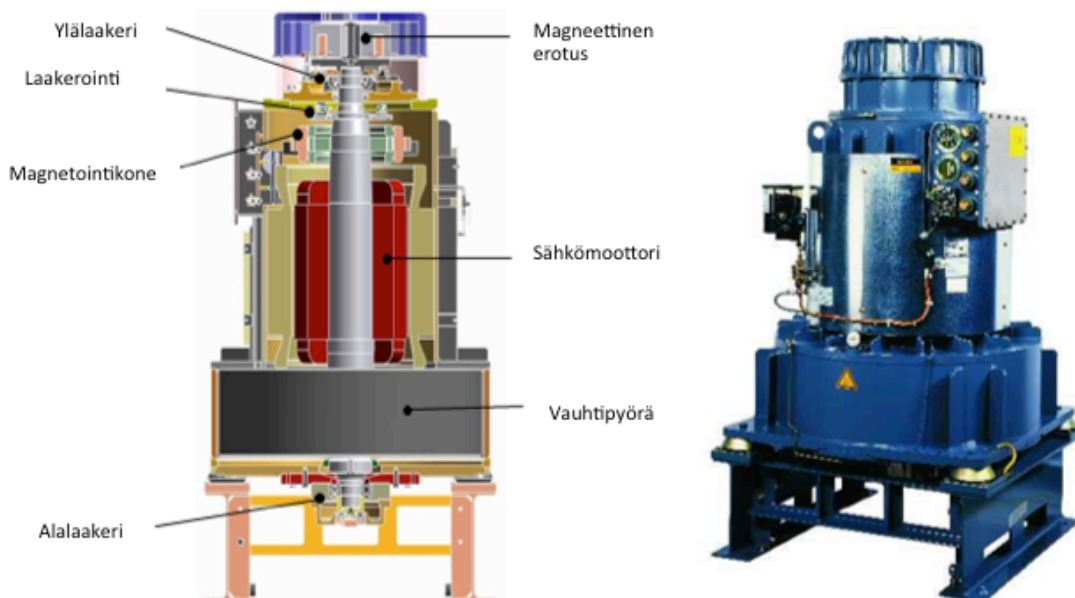
Kuva 3.6 Superkondensaattorin maksimijännitettä rajoittava aktiivinen tasauspiiri (NessCap 2008).

3.2 Vauhtipyöräsovellus

Vauhtipyörä on yksi vanhimmista ja eniten sovelletuista energian varastointiteknologioista. Vauhtipyöräjärjestelmän energia varastoituu liike-energiaksi mekaanisesti pyörivään massaan, ja energiaa voidaan edelleen hyödyntää esimerkiksi sähkömoottorin avulla. Vauhtipyöräratkaisulla voidaan monissa sovelluksissa korvata perinteiset akut, ja energian varastointimuotona vauhtipyörä on energiatehokas ja vähäpäästöinen.

Rakenne ja toimintaperiaate

Vauhtipyöräjärjestelmä koostuu roottorista eli vauhtipyörästä, sähkömoottorista, laakeroinnista ja koteloinnista. Rakenteen toteutustapoja on käytännössä kaksi. Ensimmäisessä vaihtoehdossa vauhtipyörä ja sähkömoottori ovat erillisiä komponentteja, jotka on liitetty samalle akselille. Kyseinen rakenne on esitetty kuvassa 3.7. Toisessa rakennevaihtoehdossa vauhtipyörä toimii samalla sähkömoottorin roottorina, ja sähkömoottori on integroitu vauhtipyörään. (Vaajoensuu 1994).



Kuva 3.7 Vauhtipyöräjärjestelmän rakenne ja poikkileikkauskuvat (Hochbahn 2010).

Energian varastoituminen vauhtipyörään riippuu roottorin massasta ja pyörimisnopeuden neliöstä. Käytettävissä oleva teho puolestaan riippuu moottori-generaattorin tehosta. Vauhtipyörään varastoituva kineettinen energia noudattaa seuraavaa kaavaa:




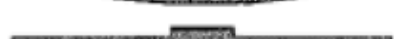





$$E = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (6)$$

jossa J on hitausmomentti, ω on kulmanopeus ja

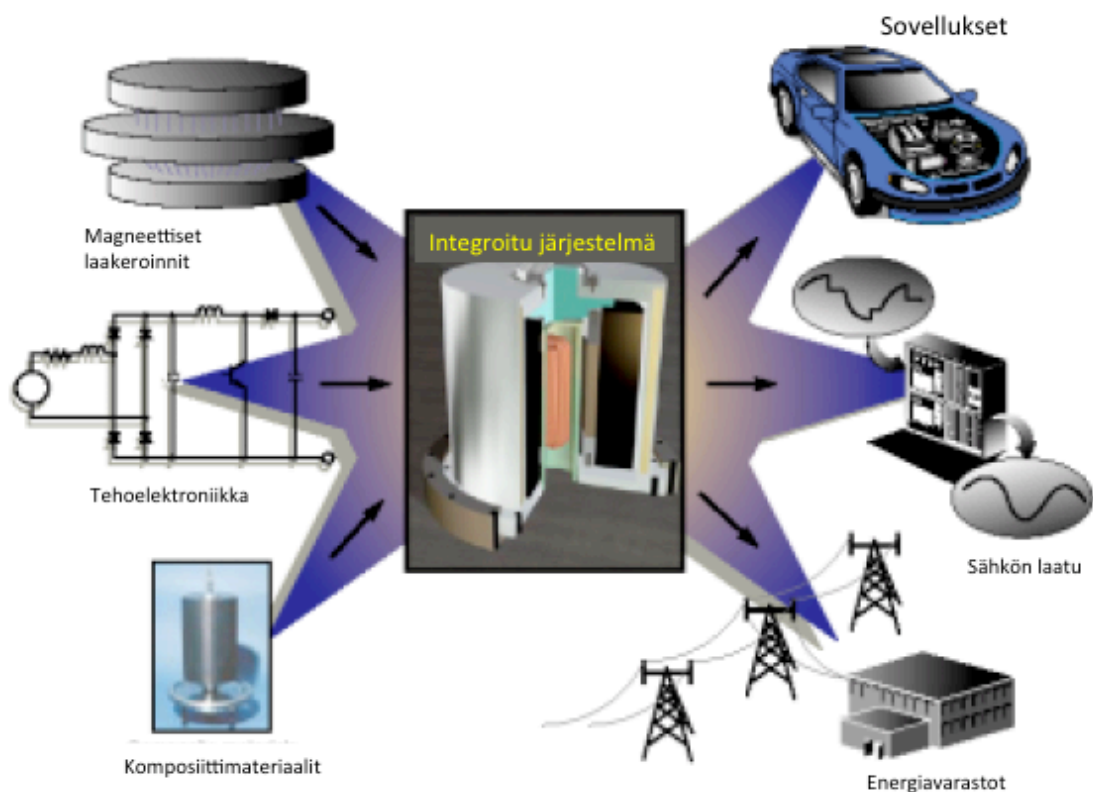
$$J = kmr^2, \quad (7)$$

jossa m on massa, r on säde ja k on vauhtipyörän muodosta riippuva kerroin. Eri-laisten vauhtipyörien muotokertoimia on esitetty taulukossa 3.2. Kaavasta (6) nähdään, että vauhtipyörän energianvarastointikyky on suoraan verrannollinen massahitausmomenttiin ja eksponentiaalisesti verrannollinen kulmanopeuteen, joten jos halutaan maksimoida vauhtipyörän energiamäärä, on kannattavampaa pyrkiä suureen pyörimisnopeuteen kuin suureen massaan. (Vaajoensuu 1994).

Taulukko 3.2. Vauhtipyörän muodosta riippuvia kertoimia (Horner ja Proud 1998).

Vauhtipyörän muoto		Kerroin k
Kiekkomainen		1,0
Muotoiltu kiekkomainen		0,931
Muotoiltu kiekkomainen		0,806
Litteä kiekko		0,606
Ohut vanne		0,500
Muotoiltu sauva		0,500
Vanne ja verkko		0,400
Sauva		0,333
Ohut rei'itetty levy		0,305

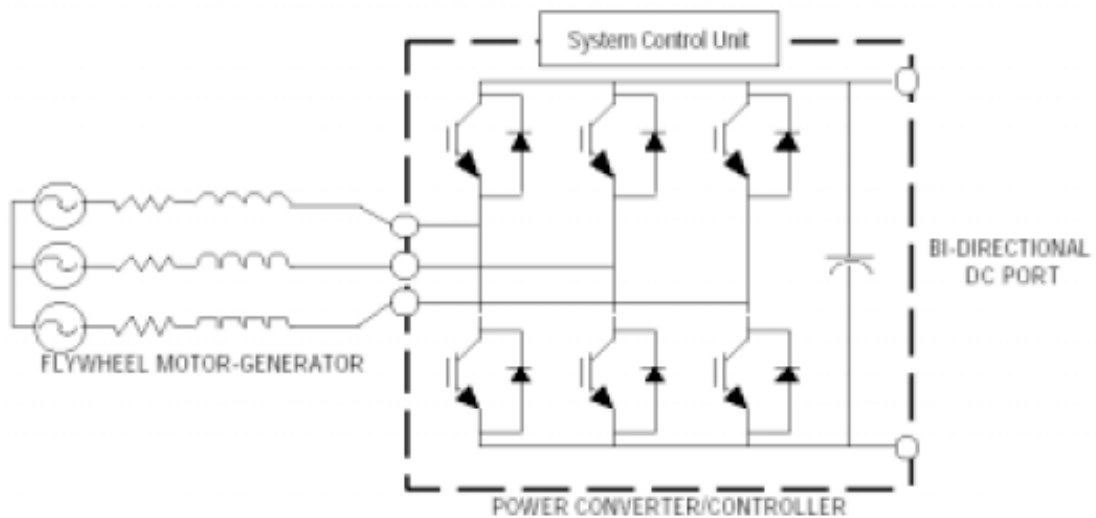
Perinteisessä mallissa vauhtipyörä on yksinkertainen teräskiekko, joka on kytketty olemassa olevan koneen akselille. Tämä on edullinen ratkaisu, ja se soveltuu hyvin pieninopeuksiseen sovellukseen. Modernia vauhtipyörätekniikkaa edustavat kevyet ja suurinopeuksiset vauhtipyörät, joiden kehityksen ovat mahdollistaneet kehittyneet ratkaisut niin materiaali- kuin laakeritekniikassakin että tehoelektronikassa. Uusimmat suurnopeusvauhtipyörät toimivat nopeusalueella 10 000 – 100 000 rpm ja ne valmistetaan komposiittimateriaaleista tai niiden yhdistelmistä kuten grafiitista ja lasikuidusta. Komposiittimateriaalien etuna on keveys ja ne kykenevät varastoimaan kineettistä energiaa paremmin kuin perinteiset teräksestä valmistetut vauhtipyörät. Muodon ja materiaalin lisäksi myös laakerointi vaikuttaa vauhtipyörän toimintaan ja hyötysuhteeseen, jota voidaan edelleen parantaa käyttämällä magneettista tai suprajohettavaa laakerointia. Kuvassa 3.8 on esitetty esimerkki vauhtipyöräjärjestelmän mahdollisuuksista komponentti- ja sovellusnäkökulmasta. (Alanen ym. 2003).



Kuva 3.8 Vauhtipyöräjärjestelmän komponenttien ja sovellusten kokonaisuus (Post 1996).

Moderni sähkömekaaninen vauhtipyörätekniikkaan perustuva energiavarasto on yhdeksi kokonaisuudeksi integroitu moottori-generaattori. Suurta nopeutta vaati-

viin järjestelmiin parhaita moottorityyppejä ovat oikosulku-, reluktanssi- sekä kes-
tomagneettimoottorit. Kun vauhtipyörää ladataan sähkömoottori toimii moottori-
na, ja vastaavasti kun energiavarastoa puretaan, niin se toimii generaattorina. Ku-
vassa 3.9 on esitetty yksi ratkaisu vauhtipyörän ja sähkömoottorin liitännäselektro-
niikasta. (Boewler 1997.)



**Kuva 3.9 Esimerkki vauhtipyörän ja sähkömoottorin liitännäselektro-
niikasta (Boewler 1997).**

Vauhtipyörän nopeus hidastuu, kun energiaa puretaan ja latauksen aikana nopeus
jälleen kiihtyy. Pyörimisnopeuden säätämiseksi vauhtipyöräjärjestelmässä tarvi-
taan taajuusmuuttajaa. Pyörimisnopeuden ylärajan asettaa inertiakuormien aihe-
uttama jännitys, joka vauhtipyörän materiaalin tulee kestää. Mikäli energian va-
rauskykyä haluttaisiin kasvattaa lisäämällä massahitausmomenttia, pitäisi vauhti-
pyörän mittoja tai massaa kasvattaa mutta näistä kumpikaan ei yleensä ole kannat-
tava vaihtoehto kulkuneuvoissa. (Horner & Proud 1998.)

Elinikä ja suorituskyky

Vauhtipyörän erinomaisen tehonkäsittelyominaisuuden avulla voidaan käsitellä
suuria tehoja verrattuna järjestelmän kokoon ja painoon. Vauhtipyöräjärjestelmät
kestävät lukuisia lataus- ja purkukertoja eikä niiden energianvarauskyky heikkene
varaus- ja purkukertojen myötä. Niiden etuna on myös mahdollisuus purkaa ener-
giavarasto aivan tyhjäksi. Vauhtipyöräjärjestelmän käyttöikä voi olla jopa 20 vuot-
ta. Energiavarastona vauhtipyörät ovat ympäristöystävällisiä, sillä energian varaus

tapahtuu mekaanisesti, eivätkä ne sisällä ympäristölle vaarallisia aineita. Vauhtipyörään voidaan varastoida lyhytaikaisesti suuria energiamääriä, joten se soveltuu erityisen hyvin kulkuneuvojen jarrutuksissa regeneroituvan energian tehokkaaseen talteenottoon. (Farret & Godoy 2006.)

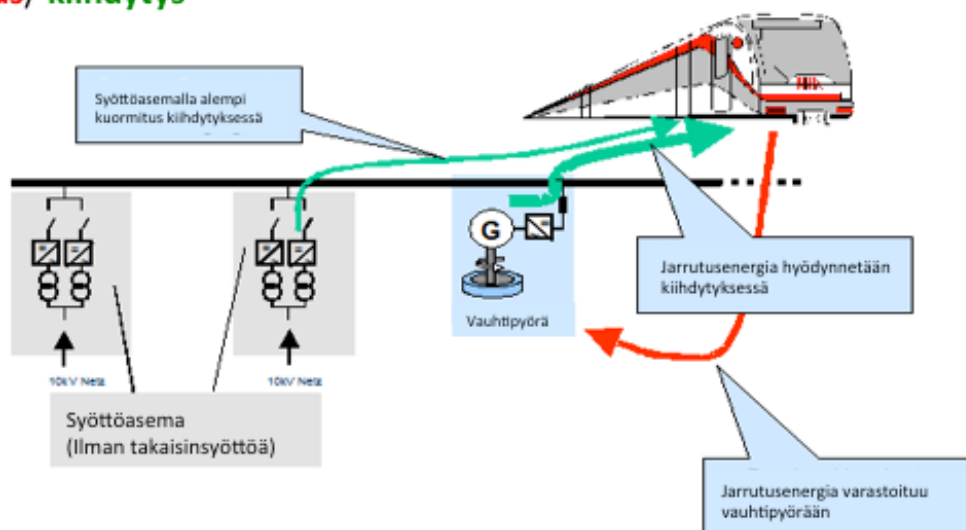
Taulukko 3.2. Vauhtipyörän toiminta-arvoja junasovelluksessa.

	Huipputeho	Varastoituu energia MJ (kWh)	Purkaus-aika	Max. pyörimisnopeus (rpm)	Kehänopeus (m/s)	Roottorimateriaali	Roottorimassa (kg)
Juna	2 MW	470 (130)	4 min	15 000	950	Komposiitti	2500

Vauhtipyörät luovuttavat energiaa silloin, kun sovellus tarvitsee huipputehoja, ja varastoivat regeneroitunutta energiaa sovelluksesta, kun se on mahdollista. Kuvassa 3.10 on kuvattu vauhtipyöräjärjestelmän toimintaa metrojunakäytössä. Esimerkiksi Saksassa Hampurin metrojunissa jarrutusenergiaa hyödynnetään vauhtipyörän avulla. (Hochbahn 2010.)

Vauhtipyöräjärjestelmässä pidempiaikainen energianvaraus ei ole tehokasta, sillä häviöiden myötä vauhtipyörän pyörimisnopeus hidastuu pienentäen vauhtipyörän varausta ajan myötä. Vauhtipyöräjärjestelmät sopivat parhaiten sovelluksiin, joissa energian varaus ja purku tapahtuu usein ja tarvitaan huipputehojen varastointia ja purkua. Taulukossa 3.2 on tarkasteltu junassa olevaa vauhtipyöräjärjestelmää.

Jarrutus/ kiihdytys



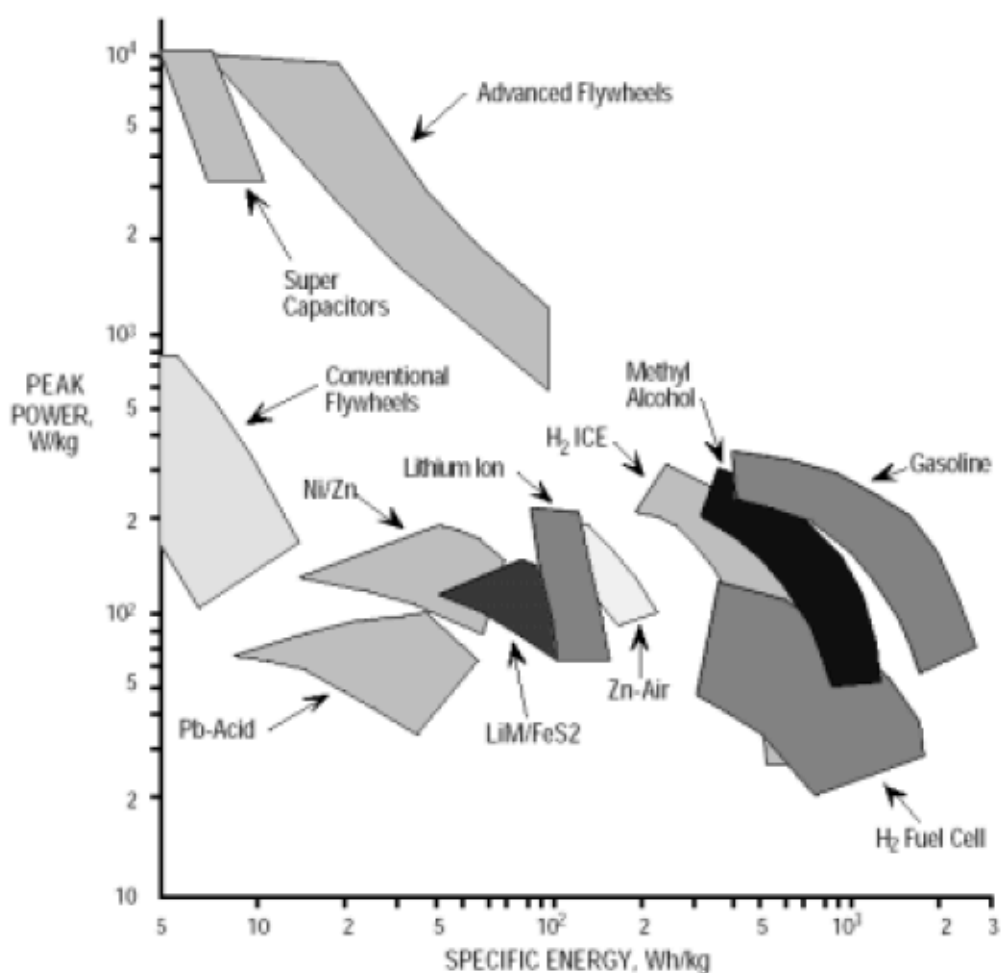
Kuva 3.10 Vauhtipyöräsovellus metrokäytössä (Hochbahn 2010).

3.3 Superkondensaattori vs. vauhtipyörä

Tässä luvussa vertaillaan lyhyesti superkondensaattoreita ja vauhtipyörää energiavarastoina sekä niiden erilaisia ominaisuuksia käytössä. Seuraavassa luvussa puolestaan tarkastellaan lähemmin niiden soveltuvuutta Helsingin metrojärjestelmään.

Ominaisteho ja energia-arvo

Vauhtipyörään perustuvan energiavaraston ominaisteho- ja energia-arvot riippuvat käytetystä tekniikasta. Perinteisten vauhtipyörien arvot ovat samaa luokkaa perinteisten akkujen eli esimerkiksi lyijyakkujen kanssa.

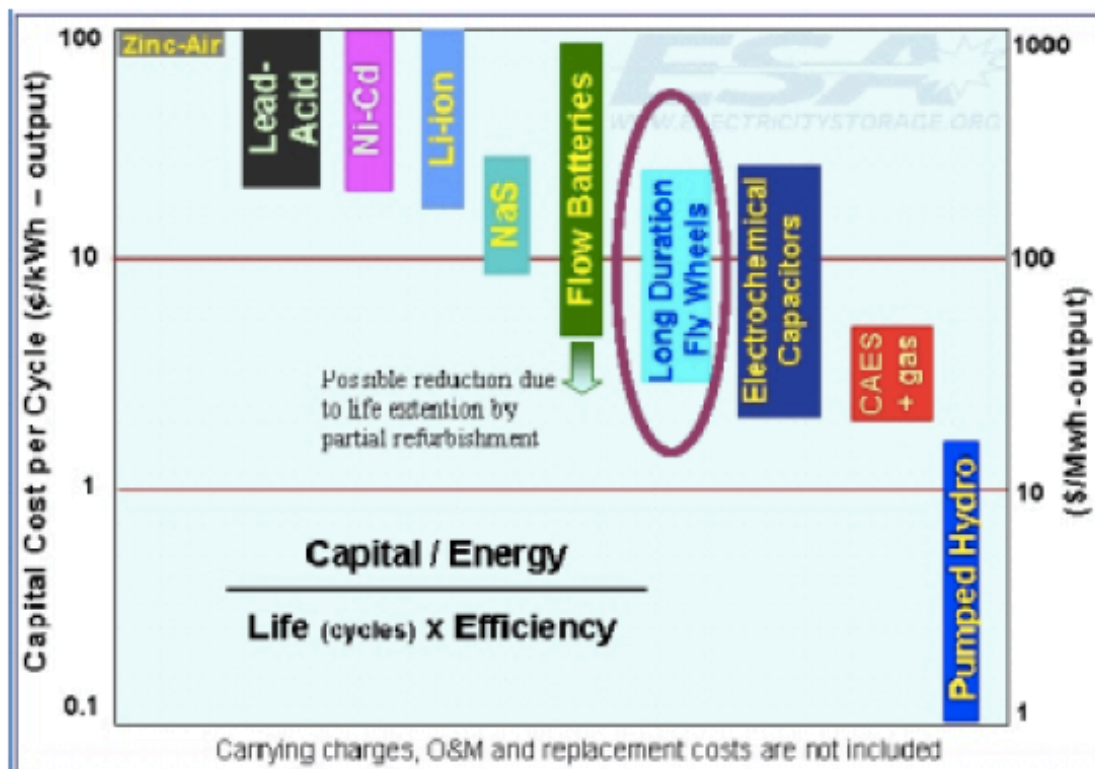


Kuva 3.11 Vauhtipyörän ominaistehon ja -energian vertailu muihin energianvarastointiratkaisuihin (Boewler 1997).

Kehittyneiden eli uuden sukupolven vauhtipyörien ominaistehoarvot ovat samaa luokkaa superkondensaattoreiden kanssa ja myös ominaisenergiat ovat samalla tasolla kehittyneiden akkujen kanssa. Kuvassa 3.11 on vertailtu eri tekniikoiden ominaisarvoja.

Kustannukset

Eri energianvarastointitekniikoiden kustannuksia on vertailtu kuvassa 3.12. Vauhtipyöräjärjestelmän kustannukset riippuvat käytetystä tekniikasta ja asetetuista toiminnallisista ominaisuuksista. Sama pätee myös superkondensaattoreihin, mutta niiden hinta on vielä toistaiseksi korkeampi kuin vauhtipyörien tai perinteisten akkujen. Vauhtipyörän hankintakustannukset ovat 2–5-kertaiset verrattuna vastaavaan akkujärjestelmään. Tulevaisuuden tavoitteisiin superkondensaattorien hinnan alentamisen osalta kuuluu elektrodimateriaalien ja niiden valmistusprosessien kehitys sekä superkondensaattoreiden häviöiden pienentäminen mm. sisäistä resistanssia pienentämällä. Nanotekniikan kehittymisen uskotaan tuovan tähän uusia mahdollisuuksia. (Railway energy 2003.)



Kuva 3.12 Eri energianvarastointitekniikoiden kustannuksia per lataus-purkujakso (Beacon 2002).

Häviöt ja itsepurkautuvuusominaisuudet

Vauhtipyörien häviöt ovat huomattavasti suuremmat kuin superkondensaattoreilla tai perinteisillä akuilla kuten huomataan taulukosta 3.3, jossa on vertailtu eri energianvarastointitekniikoiden häviöitä sekä itsepurkautuvuusajoja.

Taulukko 3.3. Eri energianvarastointitekniikoiden häviöitä ja itsepurkautuvuusajoja (Darrelmann 2002).

Tyyppi	Häviöt/ W	Itsepurkautuvuus
Vauhtipyörä (hidas)	2,2 W	30 min
Vauhtipyörä (nopea)	1,2 W	50 min
Superkondensaattori	0,026 W	1,6 vrk
Lyijyakku	0,023 W	1–2 %/ kk

Vauhtipyörän etuihin kuuluu pitkä elinikä, joka on noin 10–100 kertaa akkujen elinikä ja lisäksi ne ovat lähes huoltovapaita ja niillä on laaja toiminta-alue $-40 - +60$ C. Vauhtipyörät kestävät myös lukuisia purkaus- ja latausjaksoja. Haittapuolena vauhtipyöräjärjestelmillä on vikaantumisesta aiheutuvat vaaratilanteet kuten koko energiavaraston purkautuminen sekunnin murto-osassa tai kiekon sinkoaminen pois kotelostaan. Tämän vuoksi on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota turvajärjestelyihin. Usein teollisuuslaitosten tai kiinteistöjen yhteydessä vauhtipyöräjärjestelmät on turvallisuussyistä sijoitettu maanalaisiin tiloihin. Tulevaisuuden haasteita sekä vauhtipyörien että superkondensaattoreiden osalta on kehittää tekniikkaa, joka pienentää kustannuksia, ja kasvattaa ominaisenergia-arvoja. (Hebner ym. 2002.)

4 Jarruvirtamittaukset

Tässä kappaleessa esitellään jarrutusenergian käyttömahdollisuuksien kartoittamiseen tarvittavia mittauksia. Mittauksien kohteena oli jarrutusvirta metrojunan normaalin liikennöinnin aikana, säätöpellin asento sekä ulkoilman lämpötila. Ensin kuvaillaan mittausjärjestelyt ja sitten tarkastellaan mittaustuloksia.

4.1 Jarruvirtamittaukset

Jarruvirtamittaukset suoritettiin yhteistyössä Helsingin Energian sähkölaboratorion kanssa. Mittaukset tehtiin 21.1.2009 kello 13.58–19.00 välisenä aikana. Mittausaikavälille ajoitettiin osumaan illan ruuhka-aika, joka sijoittuu kello 15.00 ja kello 18.00 väliin. Mittaukset kestivät viiden ajokierroksen ajan, ja mittaus aloitettiin Vuosaaresta. Mittaajat matkustivat mittalaitteiden kanssa väliohjaamossa.

Mittauksia edeltävänä päivänä tehtiin tarvittavat mittalaitteiden asennukset telikäyttöyksiköön D5, joka on esitetty kuvassa 4.1.



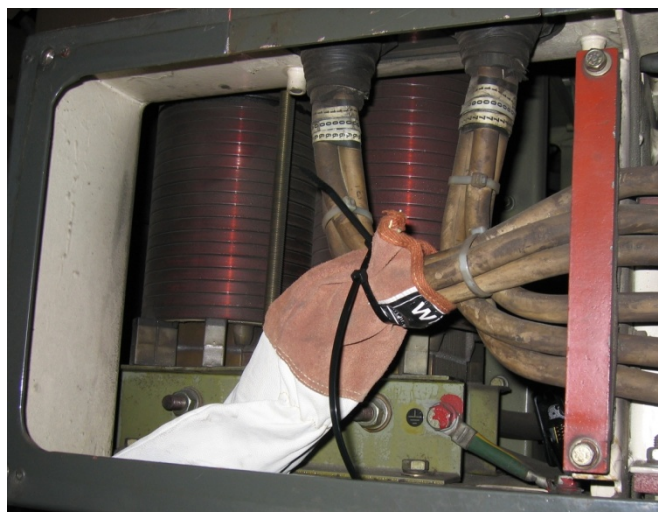
Kuva 4.1 Junan telikäyttöyksikössä D5 sijaitsevat jarruvastukset ja lisälämpövastus.

Virta mitattiin jarruvastukselle menevästä kaapelista AC/DC- virtapihdillä. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa X. Mittaukset ajokierroksilla 1–4 tehtiin virtapihdillä Chauvin Arnoux 0–600 A. Viidennellä ja viimeisellä ajokierroksella käytettiin virtapihtiä Fluke 0–1000 A. Virtapihtien tekniset tiedot löytyvät liitteistä C ja D.



Kuva 4.2 Virtapihti paikallaan jarruvastuskaapelin ympärillä.

Mittaustietoja tallennettiin dataloggerilla, jota suojaamaan viritettiin erityinen suojaussi, joka on tarkemmin esitetty kuvassa 4.3. Mittaussignaali tuotiin Fluken Scopemeter 123 -mittalaitteelle häiriösuojatulla kaapelilla junan keskimmäisen vaunuparin ohjaamoon. Mitattavana oli M100-sarjan metrovaunu numero 157.



Kuva 4.3 Dataloggeri suojattiin lialta ja pölyltä hupulla.

Säätöpellin asentomittaus

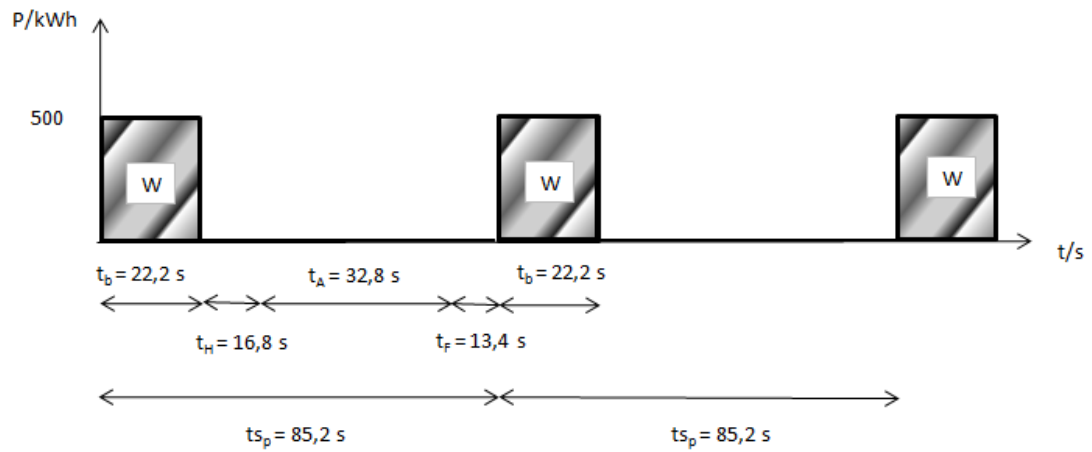
Säätöpellin asentomittauksessa tarkkailtiin lisälämpövastuksen toimintaa. Jännitteen arvo kaksi volttia tarkoittaa jarruenergian ulospuhallusta ja kymmenen voltin arvo puolestaan vastaa kaiken jarruenergian puhaltamista matkustamon lämmitykseen. Mittausarvot tallennettiin dataloggerille, josta ne myöhemmin luettiin. Mittaus suoritettiin A-vaunun matkustamossa sijaitsevan kytkentärasian riviliittimeltä vastuksen yli mittaamalla.

Ulkolämpötilan mittaus

Ulkolämpötila mitattiin erityisellä lämpönapilla, joka sijoitettiin vaunun ohjaamon sivupeilin päälle. Vastaavanlaisia lämpönappeja käytetään kylmäkuljetusten lämpötilojen seurantaan. Tunneliosuuden keskilämpötila ympäri vuoden on melko vakio eli noin 10 astetta (HKL 1994). Keskusliikennevalvomossa tutkitaan tunnelin lämpötila-arvoja säännöllisesti.

Kolmiportainen jarrutus

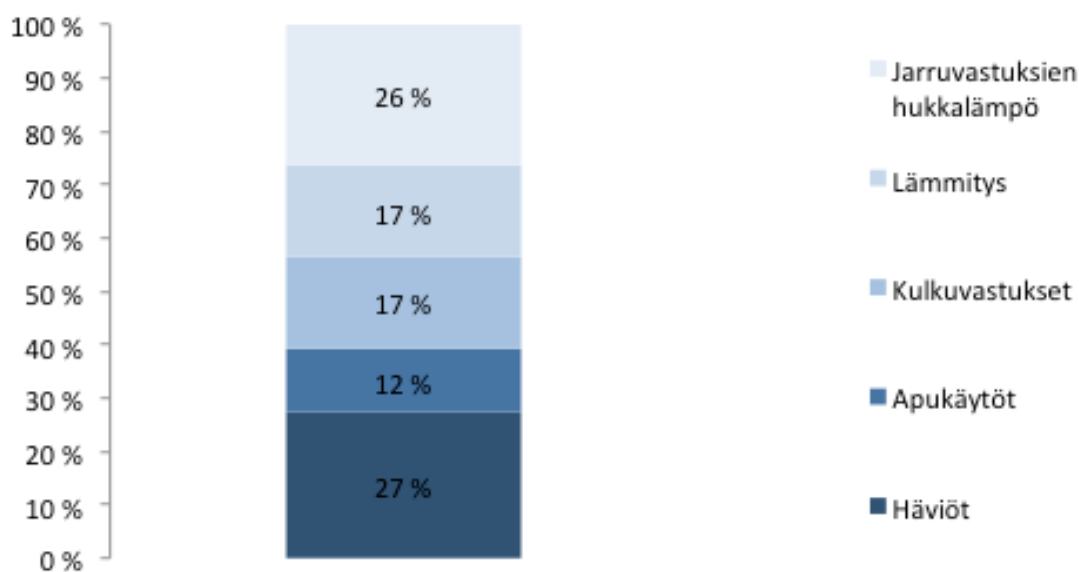
Mittausten yhteydessä tarkasteltiin myös kuljettajien ajotapoja samalla kun virtalukemia seurattiin ja jos saatiin poikkeavia lukemia, laitettiin muistiin erityishuomioina esimerkiksi kuljettajan poikkeava jarrutustapa. Kuvassa 4.4 on esitetty kolmiportainen normaalijarrutus ajodiagrammina. Kuljettaja kiihdyttää asemalta lähtiessään täyteen linjanopeuteen eli 80 km/h, jonka jälkeen rullataan mahdollisuuksien mukaan riippuen asemavälin pituudesta. Ennen asemaa kuljettaja aloittaa portaittaisen jarrutuksen. Kuvassa olevat merkinnät ovat t_b eli jarrutusaika, t_H eli pysähdysaika, t_A eli kiihdytysaika ja t_F eli ajoaika maksiminopeudella.



Kuva 4.4 Kolmiportaisen normaalijarrituksen ajodiagrammi (Bocharnikov, Tobias, Roberts, Hillmansen & Goodman 2007)

4.2 Mittaustulosten tarkastelu

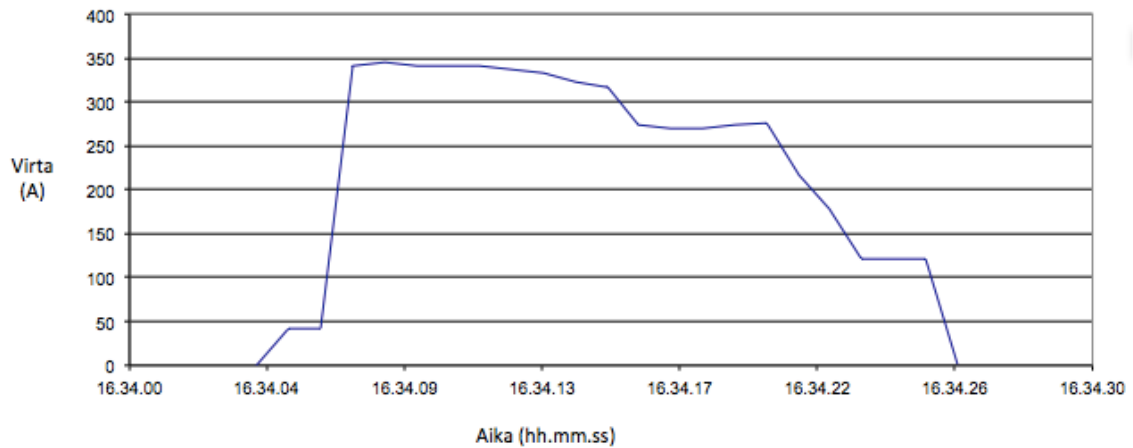
Edellisessä luvussa tarkasteltiin mittausjärjestelyitä ja seuraavaksi tutustutaan lähemmin mittauksissa saatuihin tuloksiin sekä mitä niistä voidaan päätellä. Tällä hetkellä metrojunassa aiheutuu kuvan 4.5 mukaisia häviöitä. Energian kulutukseen vaikuttaa junan paino, huippunopeus, keskinopeus ja keskimääräinen asemaväli. Seuraavaksi tarkastellaan kuinka saatujen mittaustulosten perusteella voitaisiin paremmin hyödyntää syöttöverkon energiaa ja analysoinnissa keskitytään erityisesti jarruvastusten hukkalämpöön sekä lämmitykseen.



Kuva 4.5 Metrojunan energiankulutus. 100 % syöttöverkon energiasta jakaantuu kuvan mukaisesti (Kuljettajan ohjekirja 2003).

Jarrutusenergia

Jarruvirtamittausten perusteella saatiin kattava otos jarrutusvirroista linjaradalla. Kuvassa 4.6 on esitetty mittaustuloksista yhden satunnaisesti poimitun jarrutuksen virta-arvot. Yleisesti ottaen jarrutusten virta-arvot olivat melko samankaltaisia mutta pientä vaihtelua niihin toi kuljettajien eri ajotyylit. Helsingin metrorata on melko tasainen, joten sen vaikutukset toistuivat hyvin samankaltaisesti samoissa kohdissa.



Kuva 4.6 Yhden satunnaisen jarrutuksen virta-arvot.

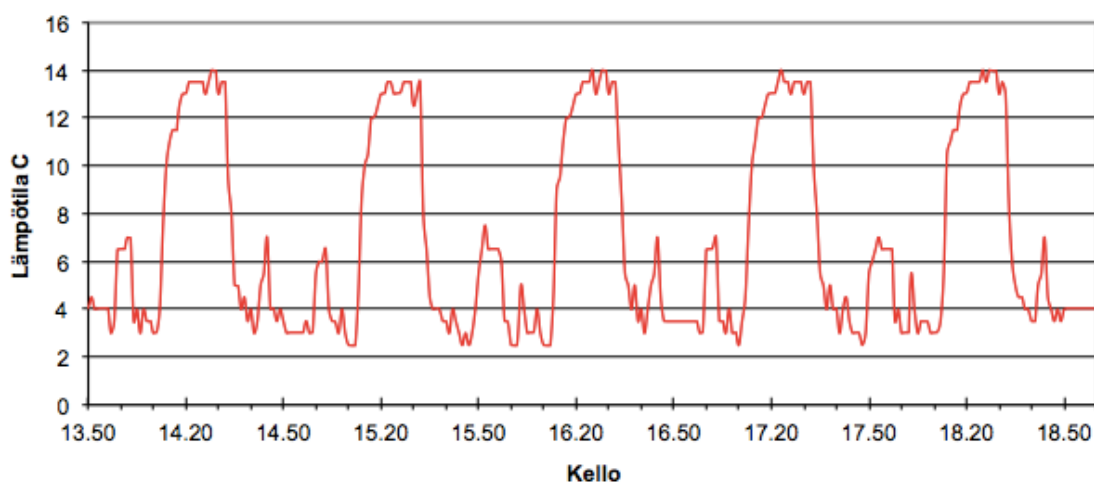
Vaunuparin jarrutusenergia voitiin määrittää keskimääräisenä arvona mittaustulosten perusteella ja tulokseksi saatiin 2,3 kWh per jarrutus. Vaunupari sisältää neljä telikäyttöyksikköä. Vaunuparin energiankulutus on 5,1 kWh/ vpkm (vaunuparikilometri) ja ilman lämmitystä tästä on syötettävissä takaisin jarruvastusten osuus eli edellä mainittu 2,3 kWh eli saadaan 45 %. Kun otetaan huomioon vastaanottokyky sekä noin viiden prosentin suuruiset siirtohäviöt saadaan 39 %. Tämä vaikuttaa melko suurelta luvulta mutta jos verrataan muualla maailmalla saattuihin tuloksiin, joita on esitetty taulukossa 5.1, niin se on varsin hyvä tulos. Jarrutusenergian tehokkaaseen hyödyntämiseen vaikuttaa asemavälien pituudet, junien maksiminopeus, syöttöverkon vastaanottokyky sekä onko metrojärjestelmä suunniteltu ja mitoitettu erityisesti energian takaisinsyöttöä silmälläpitäen. Esimerkiksi näistä eroista johtuvat taulukon 4.1 erilaiset hyötysuhdeluvut. Tähän tietysti vaikuttaa siirtohäviöt ja erityisesti kuinka nopeasti kiihdyttävä juna voi hyödyntää jarruttavan junan energian. Paras hyötysuhde on mahdollista saavuttaa jos siirtoamatkat ovat mahdollisimman lyhyet eli energiavarasto sijaitsee asemalaiturilla ja junat on ajoitettu aikataulun avulla osumaan optimaalisesti asemalle ja kiihdytys ja jarrutus on synkronoitu juuri sopivasti. Lisäksi automaattimetroa varten hankittava uusi junakalusto voidaan suunnitella alusta asti optimaaliseksi takaisinsyötölle, jolloin voidaan laitemuutokset ottaa huomioon jo suunnittelussa ja valmistuksessa, ja kustannukset ovat pienemmät kuin jos muutetaan vanhaa kalustoa. Usein hyviä tuloksia energiansäästöissä saadaan kun takaisinsyöttävän kaluston määrä on pieni ja tämän voisi toteuttaa automaattimetron myötä.

Taulukko 4.1. Nettoenergian kulutus vaunukilometriä kohden suhteessa takaisinsyötettyyn energiaan eri metrojärjestelmissä. Junakokoonpanon merkintä, esimerkiksi 4M1T, kuvaa neljää moottorivaunua ja yhtä moottoritonta liitevaunua. (Barrade & Rufer 2004)

Kaupunki	Juna kokoonpano	Paino (taara) (t)	Nettoenergia (kWh/vkm)	Takaisinsyötetty energia
Yurachuko	4M1T	156	1,2	39%
Nagoya	4M	152	1,8	32%
Pariisi	3M2T	121	2,0	30–40%
Chiyoda	6M4T	300	1,7	37%
Osaka	6M2T	272	2,0	26%
Tukholma	2M	50	1,6	20%
Sao Paolo	6M	198	3,2	18%
Lyon	2M1T	78	3,4	17%

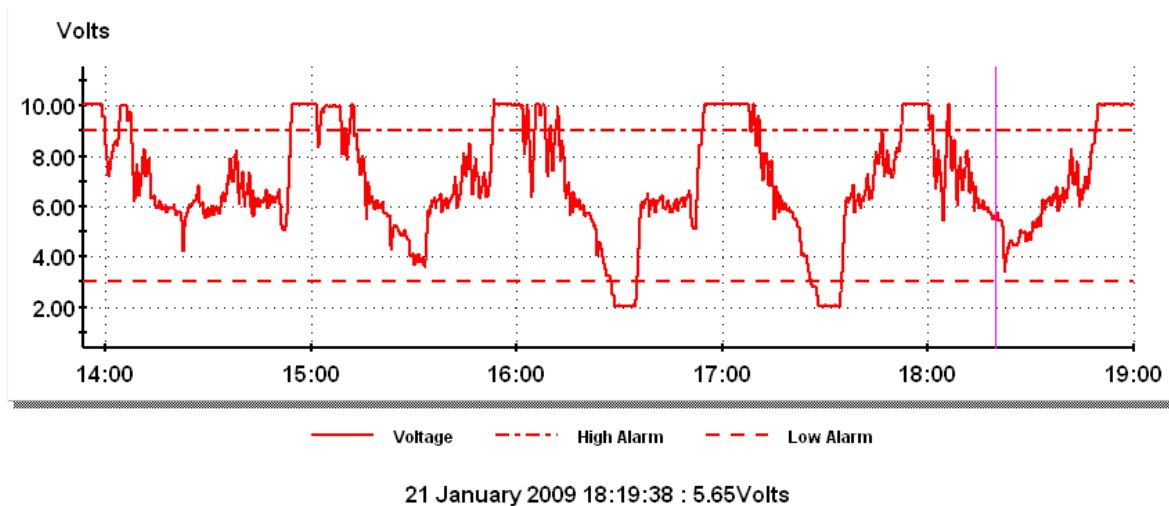
Lämmitysenergian tarve

Mittauksen aikainen ulkolämpötila mitattiin lämpönapilla, joka oli vaunun ohjaamon sivupeilin päällä. Kuvassa 4.7 on ulkolämpötilakäyrä mittauksen ajalta. Keskiarvo ulkolämpötilamittaukselle oli 6,9 °C. Tunneliosuudet voidaan nähdä kuvasta suurimpina piikkeinä. Tunnelin keskilämpötila ympäri vuoden on noin 10 °C. Mittauspäivänä lämpötila oli -15 °C, mikä simuloi hyvin vuoden kylmimpiä päiviä, jolloin lämmityksen tarve on suurin.



Kuva 4.7 Ulkolämpötilamittauksen lämpötilakäyrä 21.1.2009.

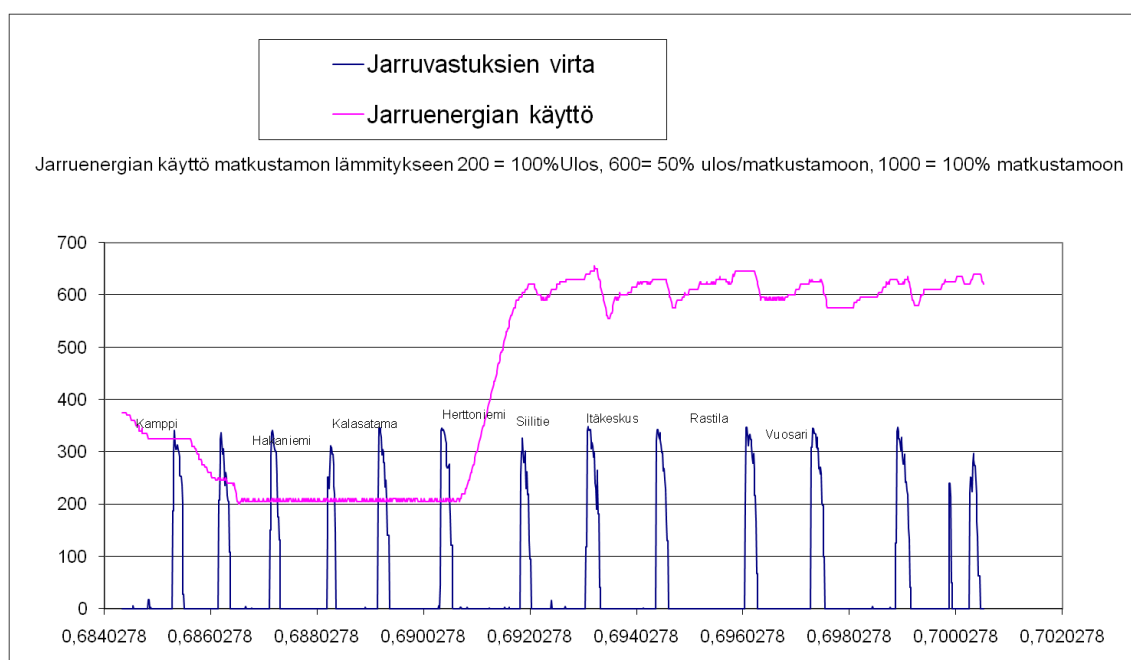
Matkustamolämmityksen säätöpellin asentomittauksen tulokset on esitetty kuvassa 4.8. Kuvassa kaksi voltia kuvaa jarruvastuksilta tulevan lämmön täyttä ulospuhallusta ja vastaavasti 10 voltia kaiken lämmön puhaltamista matkustamoon lämmitystarpeeseen. Täysi ulospuhallus on ollut tunnelissa Ruoholahden ja Kaisaniemen välillä ja vastaavasti täysi sisäänpuhallus on ollut linjan toisessa päässä ulko-osuudella Vuosaarella tai Mellunmäessä riippuen ajovuorosta. Mittaustuloksista nähdään, että säätöpellin asento on ollut keskimäärin hieman yli puolet sisään puhalluksessa, kun keskiarvo on 7,19 voltia. Kuvaajasta voidaan nähdä, että lämmityksen tarve korreloi melko hyvin sen tosiasian kanssa, että yli puolet Helsingin metroradasta kulkee ulkona, ja yhdeksän asemaa ovat ulkoasemia. Lämmitystarpeesta saisi kattavampia tuloksia jos säätöpellin asentomittaukset toistettaisiin jokaisena vuodenaikana, jolloin lämpötilavaihtelut voitaisiin paremmin ottaa huomioon, mutta tämäkin tutkimus oli hyvin suuntaa-antava.



Kuva 4.8 Matkustamolämmityksen säätöpellin asento.

Matkustamolämmityksen toimintaperiaate on seuraavanlainen; talvisin osa vastuksissa syntyvästä lämmöstä hyödynnetään vaunujen lämmityksessä, mikäli vaunun lämpötila pyrkii laskemaan alle 18 °C, ja ylimääräinen lämpö puhalletaan ulos. Siirtohäviöiden minimoimiseksi kannattaa käyttää matkustamon lämmittämiseen kaikki siihen tarvittava energia, mutta seuraavasta tarkastelusta huomataan, että talvellakin energiaa jää muualle hyödynnettäväksi.

Kuvassa 4.9 on yhdistetty jarruvirta- ja säätöpeltimittausten keskimääräiset arvot ja kuvaajasta nähdään, että jarrutusvirrat ovat hyvin samankaltaisia, joten jarrutusvirtaa on tasaisesti hyödynnettävissä, siltä osin kun sitä jää yli lämmitystarpeesta. Tunneliosuudella keskimäärin kaikki jarruvastuksissa syntyvä lämpö puhalletaan ulos, sillä vaikka ulkona on kylmä, niin tunneleissa on niin lämmintä ettei ylimääräistä lämmitystä tarvita. Toisaalta linjaradan tunneliosuus on verrattain lyhyt, mutta kuvaajasta nähdään myös, että ulko-osuudellakaan ei puhalleta kuin noin puolet jarruvastuslämmöstä matkustamoon. Jarrutusenergiaa siis riittäisi talvella muuhun hyödyntämiseen ja lämpimänä vuodenaikana olisi mahdollista hyödyntää kaikki jarrutuksessa syntyvä energia. Jarrutusenergian hyötykäytön voi toteuttaa esimerkiksi vaihtosuuntaajilla tai energiavarastoilla, joita on käsitelty enemmän aiemmin luvussa 5.2. Lisäksi jarrutusenergian hyödyntämistä tarkastellaan enemmän luvussa 5.4.



Kuva 4.9 Keskimääräisten jarrutusvirtojen ja keskimääräisen jarrutusenergian käytön vertailu.

Mittaustuloksista voidaan huomata, että jarrutusenergian tarve lämmitykseen ei ole kovin suuri, joten voitaisiin harkita sellaista vaihtoehtoa, että kaikki jarrutusenergia hyödynnettäisiin toisille junille ja matkustamon lämmitys toteutettaisiin lisälämmitysvastuksen avulla. Tällä hetkellä lisälämmitysvastus kytkeytyy

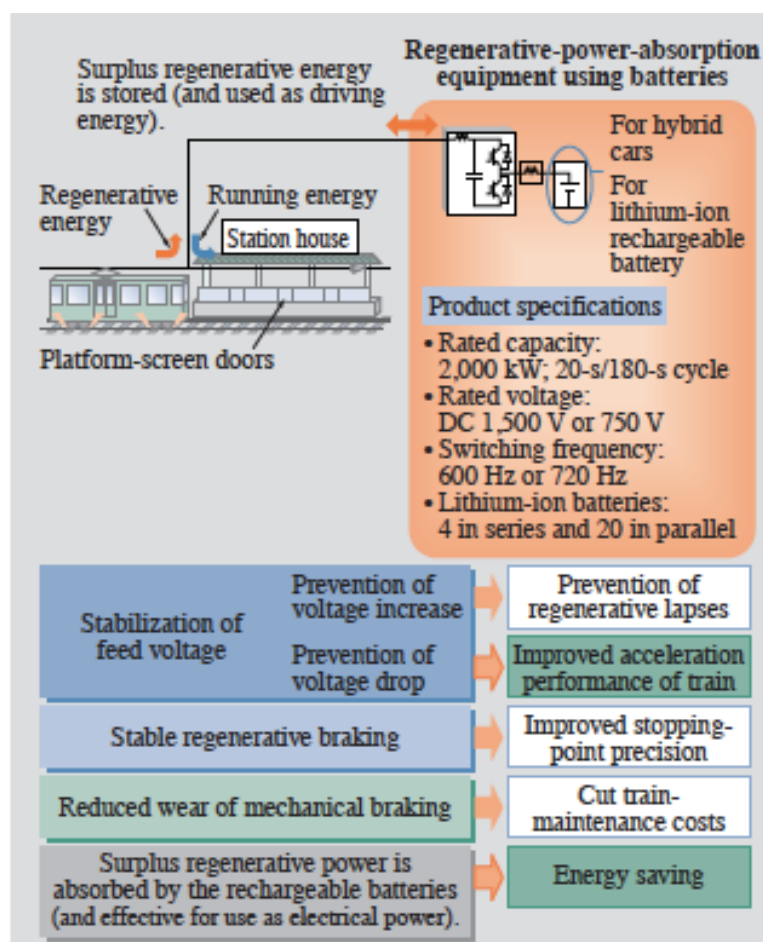
päälle mikäli jarruvastuksissa syntyvä lämpö ei riitä matkustamolämpötilan pitämisessä 18 °C:ssa. Edellä esitetyistä mittaustuloksista voidaan päätellä, että lisälämmitys vastus ei kytkeydy päälle kovin usein. Lisälämpövastukset eivät nykyisellään riitä matkustamon täyteen lämmittämiseen vaan niillä voidaan ylläpitää seisovan junan matkustamon lämpötila ja mikäli haluttaisiin lämmittää pelkästään lisälämpövastusten avulla niiden tehoa pitäisi lisätä nykyisen 18 °C saavuttamiseksi. Tehon lisäys tarkoittaisi kustannusten lisäystä ja suuremmat lämmitys vastukset vievät enemmän tilaa. Yksi vaihtoehto on myös antaa vaunujen olla kylmempiä, sillä todella kylmiä jaksoja on talvella vähän ja lisäksi matkustajat ovat silloin aina lämpimästi pukeutuneita.

Aikataulun vaikutukset

Jarruvirtamittauksissa huomattiin, että metrokuljettajilla oli hyvin erilaisia tyylejä ajaa, esimerkiksi toiset aloittivat jarrutuksen hyvissä ajoin ja tulivat pehmeästi asemalle, kun taas toiset kiihdyttivät hyvin nopeasti, ja vastaavasti jarruttivat aivan viime tipassa asemalle saavuttaessa. Sekä ajotyyllillä että aikataululla tai tarkemmin vuorovälillä sekä junien asemalle samanaikaisesti saapumisella on merkitystä jarrutusenergian tehokkaassa talteenotossa. Jos jarrutusenergian talteenotossa käytetään energiavarastoja on tärkeää, että junat osuvat asemalle samaan aikaan, jolloin jarruttavan junan energia on hyödynnettävissä toisen junan kiihdytykseen. Nykyisellä aikataululla junaväli on noin viisi minuuttia, jolloin ei ole kovin todennäköistä, että jarruttavan junan läheisyydessä olisi kiihdyttävää junaa vastaanottamassa jarrutusenergiaa. Automaattiajolla tämä puolestaan on helpompi toteuttaa. Automaattimetrolla voidaan liikennöidä nykyistä tiheämmillä vuoroväleillä ilman kuljettajaa. Uuden vuorovälin on suunniteltu olevan noin 2,5 minuuttia. Tällöin myös tarvitaan enemmän kalustoa, jolloin jarrutusenergiaa on hyödyntämässä enemmän junia. Automatisointi poistaa kuljettajakohtaiset erot ajotavoissa, inhimilliset virheet, ja lisäksi automaattijuna voidaan optimoida ajamaan jarrutusenergian hyödyntämisen kannalta optimaalisimmalla tavalla. Kuljettajien ajotapoja saattaisi olla järkevää tutkia enemmän, jotta voitaisiin optimoida mikä on jarrutusenergian tehokkaan hyödyntämisen kannalta paras ajotyyli.

5 Jarrutusenergian hyödyntäminen Helsingin metrolin- kenteessä

Tässä luvussa kuvaillaan Helsingin metrolin-
kenteen nykyinen valmius ottaa jarru-
tusenergian takaisinsyöttö käyttöön niin junien kuin sähkösyöttöjärjestelmän
osalta sekä tutkitaan taloudelliseen kannattavuuteen liittyviä tekijöitä. Tällä het-
kellä Helsingin metrojunissa jarrutusenergian takaisinsyöttö on estetty diodein, ja
jarrutusenergia hyödynnetään osittain käyttämällä jarruvastuksissa syntyvää läm-
pöä matkustamon lämmittämiseen. Maailmalla useissa metrojärjestelmissä hyö-
dynnetään jarrutusenergiaa; ensisijaisesti pyritään tyydyttämään toisten junien
energian tarve, ja ylijäävä energia voidaan hyödyntää esimerkiksi asemien energi-
antarpeeseen tai syöttää takaisin syöttöverkkoon. Kuvassa 5.1 on esitetty kokonai-
suus, jossa akuista koostuva energiavarasto on sijoitettu juna-asemalle.



Kuva 5.1 Energiavarastointikokonaisuus, joka on toteutettu akuilla (Wajima & Nakamura 2008).

5.1 Metrojärjestelmän nykyinen valmius takaisinsyöttöön

Metrojunat, tasasähköverkko ja syöttöasemat eivät nykyisellään suoraan ole soveltuvia jarrutusenergian hyötykäyttöön. Junien osalta M200-sarjan junissa on mahdollisuus syöttää moottorijarrutuksessa syntyvää sähköenergiaa takaisin sähköverkkoon. M100-sarjan junissa on teoriassa mahdollista syöttää energiaa takaisin virtakiskoon jarrutuksessa, mutta riittämättömän suodatuksen vuoksi takaisinsyötetystä energiasta on enemmän haittaa kuin hyötyä. Molemmissa junasarjoissa takaisinsyöttö on estetty diodein.

Jarrutusenergiaa ei voida nykyisin tehokkaasti hyödyntää, koska sähkönsyöttöasemien pitkien välimatkojen vuoksi tapahtuvia häviöitä joudutaan kompensoimaan nimellisjännitettä korkeammalla lepojännitteellä, mutta vielä suurempi vaikutus on sillä, että nykyiset vuorovälit ovat niin pitkiä, ettei luotettavasti voida syöttää jarruttavan junan energiaa asemalta kiihdyttävään junaan. Tällä hetkellä jarrutuksessa syntyvä energia syötetään molemmissa junasarjoissa vaunujen jarruvastuksiin, ja talvisin osa vastuksissa syntyvästä lämmöstä hyödynnetään vaunujen lämmityksessä, mikäli vaunun lämpötila pyrkii laskemaan alle 18 °C, ja ylimääräinen lämpö puhalletaan ulos. Jatkossa ulospuhalluksen sijaan ylimääräistä jarrutusenergiaa voitaisiin hyödyntää metroasemilla esimerkiksi valaistus- ja lämmitystarpeisiin etenkin jos energiavarasto sijaitisi asemalaiturilla.

5.2 Jarrutusenergian talteenottovaihtoehdot

Seuraavaksi esitellään mahdollisia vaihtoehtoja jarrutusenergian varastointiin. Tarkasteltavina energiavarastomuotoina ovat superkondensaattorit ja vauhtipyörät sekä niiden mahdolliset sijoituspaikat metrojärjestelmässä.

Energiavarasto syöttöasemilla tai laiturialueella

Energiavarasto voidaan sijoittaa syöttöasemien yhteyteen, mutta silloin haitaksi muodostuvat siirtohäviöt, sillä suurin osa syöttöasemista ei sijaitse metroasemalla vaan sen läheisyydessä. Aiemmin esteenä on ollut teknisten tilojen puute mutta nyt metroasemien laiturialueille jää Länsimetron myötä ylimääräistä tilaa, sillä nykyisten suunnitelmien mukaan liikennöinti suoritetaan jatkossa kahdella vaunuparilla. Helsingin puolella asemat ovat kolmen vaunuparin eli noin 130 metrin mittaisia. Länsimetron puolelle on tulossa vain kahden vaunuparin eli noin 90 metrin pituiset laiturit, jolloin Helsingissä laiturialueelle jää tyhjää tilaa, mihin voidaan sijoittaa tekniset tilat energiavarastolle. Länsimetron puolelle voidaan jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa varata tilat tarvittaville laitteille. Syöttöaseman yhteyteen tai laiturialueelle sijoitettava energiavarasto voidaan toteuttaa joko superkondensaattoreilla tai vauhtipyörän avulla.

Superkondensaattorit energiavarastona

Energiavarasto voidaan toteuttaa superkondensaattoreilla. Helsingin metron muutamilla syöttöasemilla on tilaa kondensaattoripatterille, mutta ei kaikilla. Yhden vaunun energia 11 MWs syntyy 22,2 s jarrutuksen aikana eli tehoksi saadaan 495495 W. Järjestelmä täytyy mitoittaa 950 voltin maksimijännitteen mukaan eli voidaan laittaa sarjaan kahdeksan kappaletta 125 voltin superkondensaattoreita, joiden jännitekestoisuus on 1000 volttiin saakka. Näitä paketteja laitetaan rinnan viisi kappaletta niin saadaan ulos (ja sisään) tarvittava teho 495495 W. Superkondensaattoripatterin koko on 40 kappaletta. Moduulien lukumäärää voidaan vähentää jos maksimijännitettä rajoitetaan esimerkiksi 875 volttiin, jolloin superkondensaattoreita tarvitaan seitsemän sarjaan ja viisi rinnan eli yhteensä 35 kappaletta. Ensin mainitulla suuremmalla määrällä saavutetaan pidempi elinikä ja lisäksi voidaan varastoida suurempi energiamäärä. Superkondensaattorin datalehti on liitteenä C.

Vauhtipyörä energiavarastona

Hampurin metro Saksassa hyödyntää vauhtipyöriä jarrutusenergian uudelleen käytössä. Toimintaan on oltu tyytyväisiä ja vauhtipyörien lukumäärää aiotaan kasvattaa lähivuosina. Taulukoon 5.1 on kerätty Hampurin metron vauhtipyöräjärjestelmän tärkeimmät suoritusarvot. Vastaavanlainen järjestelmä voitaisiin ottaa käyttöön myös Helsingin metrossa.

Taulukko 5.1 Vauhtipyörän strategiset mitat (Hochbahn 2010).

Nimellisjännite	750 V
Virta	1500 V
Teho	1000 kW
Pyörimisnopeus	3450 min ⁻¹ – 1800 min ⁻¹
Energian varastointikyky	5,0 kWh
Vauhtipyörän massa	1800 kg

Energiavarasto metrojunassa

Usein energiavarasto sijoitetaan metrojunaan esimerkiksi ajoneuvon katolle. Helsingin metrossa tämä vaihtoehto ei ole mahdollinen, sillä junien akselipainoja ei voida lisätä, koska metroradalla olevat sillat on mitoitettu liian alhaisille akselipainoille. Aikoinaan siltoja suunniteltaessa ajateltiin, että kalusto vain kevenee tulevaisuudessa, mutta on käynyt juuri päinvastainen.

5.3 Takaisinsyötön vaikutukset laitteistoon rataverkossa ja junissa

Mikäli jarrutusenergiaa halutaan hyödyntää täytyy junakalustoon ja sähkönsyöttöjärjestelmään tehdä muutoksia, ja näistä muutostarpeista kerrotaan tarkemmin tässä luvussa. Jarrutusenergian hyödyntämistä suunniteltaessa on tärkeää tuntea rataverkon jarrutusvirran vastaanottokyky, joka riippuu kahdesta tekijästä. Ensinnä kuinka paljon verkosta löytyy käyttökohteita jarrutusvirralle eli lähinnä aika-
taulun vaikutus, mikäli syöttöasemalla ei ole energianvarastointiin kykeneviä lait-

teita. Toinen seikka on jarrutusvirran siirto käyttökohteelle ilman että rataverkkoon aiheutuu ylijännitteitä. Rataverkon resistanssi vaikeuttaa siirtoa nostamalla jännitetason jarruttavassa junassa liian korkeaksi. Lisäksi myös syöttöasemien tyhjäkäyntijännitetaso vaikuttaa jarrutusenergian vastaanottokykyyn.

Periaatteessa jarrutusenergian hyödyntämisen mahdollistamiseksi ainut käytännön muutos on diodin poisto junista, joka on yksinkertainen toimenpide. Uudet metrojunat voidaan tilata ilman diodia, joten saavutetaan hieman kustannussäästöä. Diodin poistamisella on kuitenkin vaikutuksia niin junakalustoon kuin rataverkkoonkin. Näitä sivuvaikutuksia käsitellään seuraavaksi hieman enemmän.

Vaikutuksia junakalustoon

Diodin poistaminen aiheuttaa viritystarpeita telikäytön säädön sekä jarrukatkojen toiminnan osalta. Ilman diodia telikäytön säätö värähtelee ja aiheuttaa ylivirtalaukeamisia telikäyttöön. Säätö vaatii uudelleenvirityksen mutta mahdollisesti myös muutoksia ohjauselektroniikkaan. Erityisiä ongelmia muodostuu erotusjaksojen ylittämisestä, jolloin aiheutuu transienteja. Jarrukatkojat saattavat vaativat myös virittelyä toimiakseen ilman diodia mikäli maksimijännitettä joudutaan laskemaan paremman hyödyn saamiseksi jarrutusenergian uudelleenkäytössä. Lisäksi jarrukatkojen toimintaa saatetaan mahdollisesti joutua optimoimaan riippuen siitä mihin ratkaisuun jarrutusenergian hyödyntämisessä päädytään. Tästä kerrotaan lisää myöhemmin luvussa, jossa tarkastellaan tarvittavia laitteistomuutoksia.

Virroittimen diodin puuttuessa virta pääsee esteettömästi kulkemaan vaunuparin toisesta virroittimesta sisään ja toisesta ulos. Tällainen tilanne on mahdollinen radalla erotusjaksokohdissa, kun yksi virroitin on toisella puolella erotusjaksoa ja toinen toisella. Tällaisessa tilanteessa on hyvin todennäköistä, että virroitin aiheuttaa katkaisijan laukeamisen ylivirran takia. Suojausteknisistä syistä ylivirtarajaa ei voida nostaa. Lisäksi syöttöaseman suojauksen takia on arveluttavaa, mikäli vaunupari voi yhdistää kaksi syöttöjaksoa toisiinsa. Yksi ratkaisu tähän on estää virran kulku vaunuparin sisällä, mutta tämä johtaa ajomukavuuden huonontumiseen, sillä ylitettäessä erotusjakso ajomoottorikäyttö siirtyy vedosta lievään jarrutuk-

seen ylläpitääkseen välipiirijännitteen, ja tämä tuntuu matkustamossa nykäisyinä. Tätä haittaa voidaan ehkäistä ylittämällä erotusjakso rullaamalla, joka auttaa myös valokaareen, joka syntyy virroittimen irrotessa virtakiskosta. Rullaukselle siirtyminen on mahdollista automatisoida pienen rajakytkimen avulla virroittimessa. Tilannetta helpottaa myös erotusjaksojen sijainti, sillä ne ovat ennen asemaa, jolloin niiden yli ajetaan joka tapauksessa jarruttaen.

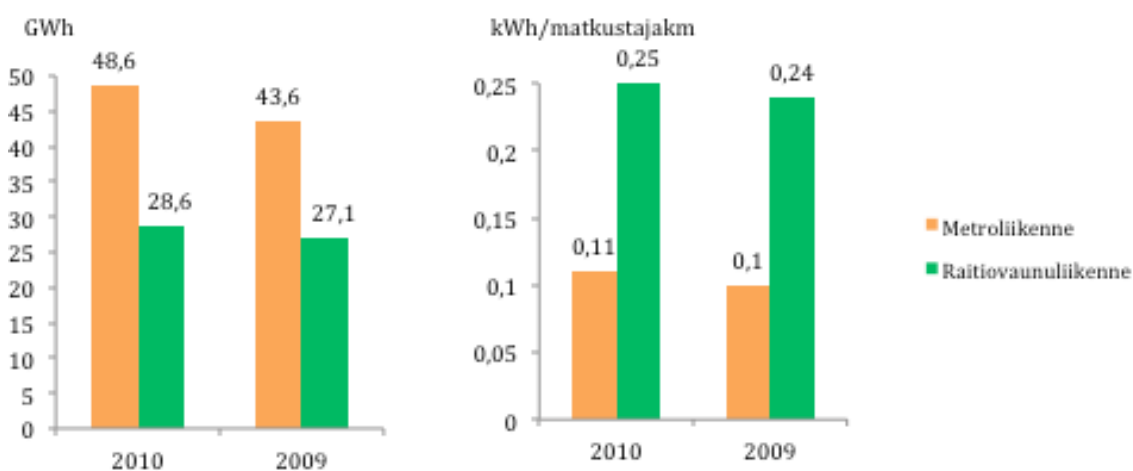
Vaikutuksia rataverkkoon

Olellainen tekijä takaisinsyötön mahdollistamisessa on rataverkon jännitetason valinta. Nykyisessä sähkönsyöttöjärjestelmässä tasasähköverkossa on suurin sallittu jännite 900 voltia. Metrojunien vaunujen välipiirijännite puolestaan nousee jarrutettaessa 930 volttiin tai hetkellisesti jopa korkeammaksi. Näin ollen maksimijännitettä tulisi nostaa 930 volttiin, jotta jarrutusenergiaa voitaisiin hyödyntää. Jännitteen nosto kuitenkin saattaa aiheuttaa ongelmia rataverkon syöttölaitteiden jännitekestoisuuden takia. Erityisesti kuormanerotitimet aiheuttavat ylilyöntejä herkästi jo nykyisellä jännitetasolla. Korkeampi jännitetaso saattaisi kuitenkin olla hyväksyttävissä, sillä syöttöasemien tyhjäkäyntijännite ei ole tasaista vaan siinä on tasasuuntauksen aiheuttamaa aaltoisuutta ja junien virroittinjännite puolestaan on hyvin suodatettua, joten se voitaisiin nostaa syöttöasemien jännitehuippujen tasolle. Mikäli jännitettä ei nosteta 900 voltista virran siirto vaikeutuu. Virran siirtymistä voidaan parantaa hieman alentamalla syöttöasemien tyhjäkäyntijännitettä. Käytännössä tyhjäkäyntijännitteen alentaminen nykyisestä 860 voltista ei ole mahdollista, sillä useilla syöttöasemilla on jo nyt käytössä muuntajien alin jänniteporras johtuen Helenin (Helsingin Energian) verkon jännitteen korkeasta tasosta. Yksi vaihtoehto jännitetasojen muuttamiselle on pienentää rataverkon resistansseja. Asemilla, joilla ei ole syöttöasemaa, voisi virtakiskoissa olla yhdistys. Tämän toteuttamiseksi pitäisi suojaukseen tehdä muutoksia, sillä yhdistys tarvitsisi katkaisijan releistyksineen.

5.4 Taloudellinen kannattavuus

Luvussa 4.2 laskettiin, että jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää 16 % verkosta otetusta energiasta ja yhden vaunuparin energiankulutus on 5,1 kWh/ vpk. Näin ollen jos maksimi linjajännite on 900 voltia, ja jos lämmitystä ei huomioida, saadaan 0,8 kWh/ vpk. Jarruvastusenergiaksi saatiin jo aikaisemmin mittaustulosten perusteella 2,3 kWh/ vpk. Jos nyt otetaan huomioon myös lämmitystarve, joka on noin 0,68 kWh/ vpk, saadaan keskimääräiseksi verkkoon syötetyksi energiaksi noin 0,75 kWh/ vpk. Yhdellä vaunuparilla ajetaan vuodessa noin 150 000 kilometriä, ja kun käytetään energian hintana 5 c/ kWh, saadaan energiansäästöksi vuodessa yhdelle vaunuparille noin 5600 euroa. Vaunupareja on yhteensä 54, joten kaikkiaan vuotuiset säästöt olisivat 302 000 euroa mutta kun pitää vielä ottaa huomioon investointikustannukset niin säästöä ei synny merkittävästi.

Taloudellisesti kiinnostavaa on energiankulutuksessa tapahtuvat muutokset. Kuvassa 5.2 on kuvattu metrolinjojen ja vertailun vuoksi myös raitiovaunuliikenteen sähkönkulutus. Vasemmalla on kuvattu kokonaiskulutus 2009–2010 väliseltä ajalta ja oikealla puolella saman ajanjakson kulutus matkustajakilometriä kohden. Kuvasta voidaan nähdä, että metrolinjojen vuotuisessa kokonaiskulutuksessa ei ole suuria eroja.



Kuva 5.2 Liikennöinnin sähkönkulutus vuosina 2009-2010. Lukuihin sisältyy vaihdelämmitys (HKL Toimintakertomus 2010).

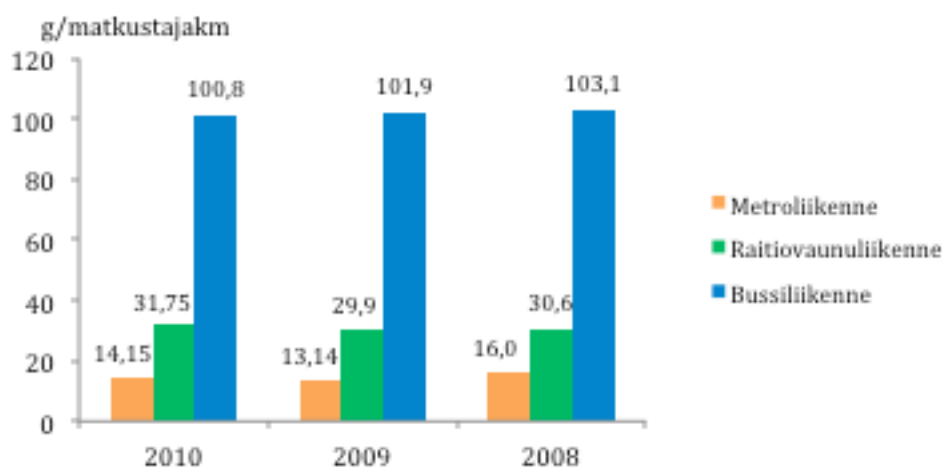
Mikäli päädytään energiavarastoon laiturialueella, tulee tarkastella myös energiavarastojen aiheuttamia kustannuksia. Taulukossa 5.2 on vertailtu vauhtipyörän ja superkondensaattoreiden kustannuksia. Vauhtipyörässä on suuri alkuinvestointi mutta sen jälkeen käyttökustannuksia ei juuri ole. Superkondensaattoreiden kohdalla alkuinvestointi on pienempi ja niidenkään kohdalla ei juuri ylläpitokustannuksia ole. Myöskään rakennuskustannuksia laiteloista ei tule mikäli energiavarastot sijoitetaan laiturialueelle, joka jää yli kun siirrytään liikennöimään automaattimetrolla, jolla on suunniteltu liikennöitävän kahden vaunuparin mittaisilla junakokoonpanoilla. Jos energiavarastot sijaitisivat laitureilla voitaisiin jarrutusenergiaa hyödyntää myös esimerkiksi metroaseman valaistus- ja lämmitystarpeisiin.

Taulukko 5.2. Energiavarastotekniikoiden taloudellinen tarkastelu (Railway energy 2003).

	Vauhtipyörä	Superkondensaattori
Juna – kiinteät kustannukset	Korkeat	Korkeat
Juna – käyttökustannukset	Vähenevät merkittävästi	Vähenevät merkittävästi
Infra – kiinteät kustannukset	Ei ole	Ei sovellettavissa
Infra – käyttökustannukset	Ei muutu	Ei sovellettavissa
Mittakaavaedut	Alhaiset	Korkeat
Kuoletusaika	> 5 vuotta	Ei sovellettavissa

Kuvassa 5.3 on esitetty liikennöinnistä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Vertailun vuoksi mukaan on otettu myös bussiliikenteen aiheuttamat päästöt, jotka on mitattu VTT:llä eri bussityypeille. Metro- ja raitioliikenteelle on käytetty vuoden 2010 Helsingin Energian myymän sähkön hiilidioksidiarvoa 126 g/kWh (HKL Toimintakertomus 2010).

Metroliikenne on jo nyt vihreä liikennöintimuoto ja jarrutusenergian hyödyntäminen vain parantaisi tätä imagoa ja lisäksi toisi säästöjä. Lisäksi Helsingin metroa voitaisi jatkossa markkinoida turisteille pohjoisella sijainnilla ja energiaystävällisyydellä.



Kuva 5.3 Liikennöinnin hiilidioksidipäästöt 2008-2010 (HKL Toimintakertomus 2010).

6 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutkittiin, kuinka paljon jarrutusenergiaa menee hukkaan jarruvastuksiin, ja kuinka paljon sitä voidaan hyödyntää matkustamon lämmityksessä. Ylimääräinen jarrutusenergia on tarkoitus hyödyntää syöttämällä se takaisin virtakiskoon muiden junien hyödynnettäväksi. Lisäksi tarkasteltiin superkondensaattoreiden ja vauhtipyörän soveltuvuutta energian varastointimuotoina. Jarrutusenergian takaisinsyöttömahdollisuuksia on aikaisemminkin tutkittu Helsingin metrolla, mutta teknisiin ongelmiin ei ole löytynyt kustannustehokasta ratkaisua. Nykyisen tekniikan tason parantaminen ja kaikkien ongelmakohtien ratkaiseminen ei välttämättä ole kustannusten kannalta järkevää mutta jos tyydytään ratkaisuihin, joissa sallitaan joitakin vapauksia, kuitenkin turvallisuudesta tai luotettavuudesta tinkimättä, saattaa se osoittautua kannattavaksi.

Länsimetron tulon myötä tekniikkaa päivitetään myös Helsingin metron puolella ja takaisinsyötön estäviä tai hankaloittavia ongelmakohtia voidaan poistaa ja Länsimetron sähkönsyöttöjärjestelmä sekä junakalusto voidaan suunnitella alusta asti ja uusinta tekniikka hyödyntäen käyttämään jarrutusenergiaa uudelleen, ja siten jo suunnitteluvaiheessa voidaan metrovaunut varustaa kehittyneemmillä sähkökäyttöillä, jotka mahdollistavat verkkoonjarrutuksen, ja syöttöverkon vastaanottokyky voidaan optimoida. Maailmalla metrojärjestelmissä on huomattu, että usein hyviä tuloksia energiansäästössä saadaan, kun takaisinsyöttävän kaluston määrä on pieni, ja tämän voisi toteuttaa Helsingin metrossa automaattimetron myötä suunnitteleamalla vain uusi kalusto takaisinsyöttöön kykeneväksi, ja vanhalla kalustolla ajettaisiin niin kuin nykyäänkin sen elinkaaren loppuun, jota on jäljellä vielä ainakin 15 vuotta.

Tällä hetkellä Helsingin metrossa jarrutuksessa syntyvä energia syötetään molemmissa junasarjoissa vaunujen jarruvastuksiin, ja talvisin osa siitä hyödynnetään vaunujen lämmityksessä, mikäli vaunun lämpötila pyrkii laskemaan alle 18 °C, muussa tapauksessa lämpö puhalletaan ulos. Jarruvirtamittauksilla tutkittiin kuinka paljon jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää, ja lämmityksen säätöpellin asento-

mittauksella tutkittiin kuinka paljon jarruvastuksissa syntyvää lämpöä hyödynnetään matkustamon lämmittämiseen. Jarrutusenergian osalta tulokseksi saatiin jopa 45 %, mutta kun otetaan huomioon syöttöverkon vastaanottokyky sekä siirtohäviöt, saadaan tulokseksi 39 %. Tämä vaikuttaa melko suurelta luvulta, mutta jos verrataan muualla maailmalla saatuihin tuloksiin, niin se on samaa luokkaa niiden kanssa. Jarrutusenergian tehokkaaseen hyödyntämiseen vaikuttaa asemavälien pituudet, junien maksiminopeus, syöttöverkon vastaanottokyky sekä onko metrojärjestelmä suunniteltu ja mitoitettu erityisesti energian takaisinsyöttöä silmälläpitäen. Lisäksi siihen vaikuttaa siirtohäviöt ja erityisesti kuinka nopeasti kiihdyttävä juna voi hyödyntää jarruttavan junan energian. Paras hyötysuhde on mahdollista saavuttaa jos siirtomatkat ovat mahdollisimman lyhyet eli energiavarasto sijaitsee asemalaiturilla, ja junat on ajoitettu aikataulun avulla osumaan optimaalisesti asemalle ja kiihdytys, ja jarrutus on synkronoitu juuri sopivasti. Kannattavuuslaskelmien perusteella Helsingin metrojärjestelmässä jarrutusenergian takaisinsyötön avulla voitaisiin vuosittain säästää 302 000 euroa.

Jarrutusenergian tehokkaassa talteenotossa sekä ajotyylillä että aikataululla tai tarkemmin vuorovälillä sekä junien asemalle samanaikaisesti saapumisella on merkitystä. Jos jarrutusenergian talteenotossa käytetään energiavarastoja on tärkeää, että junat osuvat asemalle samaan aikaan, jolloin jarruttavan junan energia on hyödynnettävissä toisen junan kiihdytykseen. Nykyisellä aikataululla junaväli on noin viisi minuuttia, jolloin ei ole kovin todennäköistä, että jarruttavan junan läheisyydessä olisi kiihdyttävää junaa vastaanottamassa jarrutusenergiaa mutta automaattimetrolla tämä on helppo toteuttaa. Sillä voidaan liikennöidä nykyistä tiheämmillä vuoroväleillä ja uuden vuorovälin on suunniteltu olevan noin 2,5 minuuttia. Automatisointi poistaa kuljettajakohtaiset erot ajotavoissa, inhimilliset virheet, ja lisäksi automaattijuna voidaan optimoida ajamaan jarrutusenergian hyödyntämisen kannalta optimaalisimmalla tavalla. Automaattimetroa varten hankittava uusi junakalusto voidaan suunnitella alusta asti optimaaliseksi takaisinsyötölle, jolloin voidaan laitemuutokset ottaa huomioon jo suunnittelussa ja valmistuksessa, jolloin kustannukset ovat pienemmät kuin jos muutetaan vanhaa kalustoa. Edelleen sähköverkon vastaanottokykyä voidaan parantaa aikataulu-

suunnittelulla ja alentamalla syöttöasemien tyhjäkäyntijännitetasoja. Vastaanotto-
kyky saadaan paremmaksi myös sallimalla korkeampi jännite syöttöverkossa.

Jarrutusenergian hyödyntämisessä energiavarastoja käytetään jarrutusenergian
varastointiin. Tässä diplomityössä tarkasteltavina energiavarastomuotoina olivat
superkondensaattorit ja vauhtipyörät, jotka todettiin täysin kilpailukykyiseksi
keskenään sekä suoritusarvoilla että kustannuksilla mitattuna. Lisäksi tarkasteltiin
energiavarastojen mahdollisia sijoituspaikkoja metrojärjestelmässä. Usein ener-
giavarasto sijoitetaan metrojunaan esimerkiksi katolle. Helsingin metrossa tämä
vaihtoehto ei ole mahdollinen, sillä junien akselipainoja ei voida lisätä, koska met-
roradalla olevat sillat on mitoitettu nykyisille akselipainoille eikä junien painoa voi
lisätä. Energiavarasto voidaan myös sijoittaa syöttöasemien yhteyteen, mutta sil-
loin haitaksi muodostuvat siirtohäviöt, sillä Helsingissä suurin osa syöttöasemista
ei sijaitse metroasemalla vaan sen läheisyydessä. Aiemmin esteenä on ollut teknis-
ten tilojen puute mutta nyt metroasemien laiturialueille jää Länsimetron myötä
ylimääräistä tilaa, sillä nykyisten suunnitelmien mukaan liikennöinti suoritetaan
jatkossa kahdella vaunuparilla. Helsingin puolella asemat ovat kolmen vaunuparin
eli noin 130 metrin mittaisia. Länsimetron puolelle on tulossa vain kahden vaunu-
parin eli noin 90 metrin pituiset laiturit, jolloin Helsingissä laiturialueelle jää tyh-
jää tilaa, mihin voidaan sijoittaa tekniset tilat energiavarastolle. Länsimetron puo-
lelle voidaan jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa varata tilat tarvittaville laitteille.

Energian varastointitekniikan kehitystä on vauhdittanut sähkö- ja hybridiajoneu-
vojen kehitys sekä ympäristönsuojelulliset näkökulmat. Useat energianvarastoin-
tiin liittyvät teknologiat perustuvat vanhaan tekniikkaan, mutta energianvarastoin-
titekniikkaa on selvästi vauhdittanut esimerkiksi materiaalitekniikan kehitys ja
etenkin mikro- ja nanotekniikan tutkimuksen löytämät uudet mahdollisuudet pa-
rantavat erityisesti kondensaattoritekniikkaa. Superkondensaattoreiden perus-
tekniikka on tunnettu jo pitkään mutta sähköajoneuvojen kehityksen myötä se on
jälleen ajankohtaista etenkin suurta tehoa ja nopeaa varautumista vaativissa ener-
gian varastointikohteissa. Superkondensaattoreiden kehitystyö on edelleen me-
neillään vaikka useita kaupallisia kohteita onkin jo markkinoilla. Superkondensaat-
toreiden hinta on vielä korkea ja suorituskyvyssä on parantamisen varaa, mutta

markkinoilla ei vielä ole ylivoimaisia kilpailijoita vauhdittamassa kehitystä. Nanotekniikan tuomat lisämahdollisuudet esimerkiksi laajennukset käyttömahdollisuuksiin ja grafeenin tuomat edut vaikuttavat lupaavilta mutta tutkimustyö on vielä kesken. Tulevaisuudessa voidaan kuitenkin odottaa superkondensaattoreita, joiden elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit perustuvat nanotekniikkaan, ja joilla on nykyistä suurempi teho- ja energiatiheys, mahdollistaen suuremman energianvarastointikapasiteetin lyhyemmällä vasteajalla, ja siten entistäkin laajemmat sovelluskohteet. Lisäksi on mahdollista kehittää superkondensaattorien käytännön sovelluksissa tarvittavien tehoelektronikkaratkaisujen periaatteita.

Jarrutusenergian tutkimisen myötä tuli seuraavanlaisia jatkotutkimussuosituksia. Jarruvirtamittaukset kannattaisi toistaa jokaisena vuodenaikana, jolloin mahdolliset säänvaihtelut voitaisiin paremmin ottaa huomioon. Lisäksi mikäli vanhoja junia halutaan muuttaa jarrutusenergiaa takaisinsyöttäviksi niin niillä kannattaisi suorittaa koeajoja vaunun takaisinsyötön estävä diodi oikosuljettuna, jotta diodin poistamisen mahdollisia sivuvaikutuksia voitaisiin tutkia paremmin ja varautua tarpeellisilla laitteistomuutoksilla. Kuljettajien ajotapoja saattaisi myös olla järkevää tutkia enemmän, jotta voitaisiin optimoida mikä on jarrutusenergian tehokkaan hyödyntämisen kannalta paras ajotyyl.

Viitteet

- Alanen, Raili, Koljonen, Tiina, Hukari, Sirpa ja Saari, Pekka. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT tiedotteita 2199. Verkkojulkaisu, Espoo.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>. Viitattu 11.12.2010.
- Alku, Antero. 2007. Mennäänkö metrolla? – Joukkoliikenteen uusi aika. Anria Kustannus Oy. 140 s.
- Andersson, Tom 2010. Kalustopäällikkö, HKL. Keskustelu Helsingissä 12.11.2010.
- Antell, Roger 2010. Korjaamopäällikkö, HKL. Keskustelu Helsingissä 27.10.2010.
- Barrade, P., Rufer, A. 2004. The use of supercapacitors for energy storage in traction systems. EEE-VPP 04. Vehicular Power and Propulsion Symposium, Paris, France, 6-8 October 2004.
- Beretta, Joseph. 2009. Automotive Electricity – Electric Drives. Iste, London. 316 s.
- Beacon Power Corporation. 2002. Flywheel Advantages. <http://www.beaconpower.com/products/presentations-reports.asp>. Viitattu 16.12.2011.
- Bocharnikov Y. V., Tobias A. M., Roberts C., Hillmansen S., Goodman C. J. 2007. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. IET Proceedings. Part B. Electric Power Applications, 1-5. s. 675-682, September 2007.
- Boewler, Michael E. 1997. Flywheel energy systems: Current status and future prospects. Magnetic Material Producers Association Joint Users Conference, September 22-23, 1997. s. 1-9.
- Bolund Björn, Bernhoff Hans & Leijon Mats. 2007. Flywheel energy and power storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 11:2. S. 235-258.
<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/refs/storage/Flywheel.pdf>
Viitattu 14.4.2010.
- Bombardier Transportation Deutsche Waggonbau GmbH & Traxis. 2002. Metrojunasarja M200 Huolto- ja korjausohjeet. Versio 01. s. 332.
- Cárdenas, Roberto, Pefia, Rúben, Asher, Greg, Cilia, Joe. 2002. Sensorless Control of Induction Machines for Wind Energy Applications. Power Electronics Specialists Conference. Pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 1, 2002 vol 1. s. 265-270.

Darrelmann, Hilmar. 2002. Comparison of Alternative Short Time Storage Systems. Piller GmbH, D-37520 Osterode, Germany.

Espoon kaupunki & Helsingin kaupunki & Liikenne- ja viestintäministeriö. Länsimetro. <http://www.lansimetro.fi>. Viitattu 13.5.2011.

Farret, Felix & Godoy, Simões, M. 2006. Integration of Alternative Sources of Energy. John Wiley & Sons, New Jersey. 446 s.

Flinkenberg 2010. <http://www.flinkenberg.fi/electronics/lsmtron.html>. Viitattu 1.11.2009.

Hebner, R., Beno, J., Walls, A. 2002. Flywheel batteries come around again. IEEE Spectrum, Volume 39, Issue 4, April 2002. s. 46-51.

Helsingin kaupungin liikennelaitos - Metron historiaa. 2010. <http://www.hkl.fi>. Viitattu 1.11.2010.

Helsingin kaupungin liikennelaitos – Toimintakertomus. 2010. Newprint oy 2010. http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/6b2e8c804ff2453b86eb96a4cf6ee88a/HKL_Toimintakertomus_2009_FI_v4.pdf?MOD=AJPERES. Viitattu 15.11.2010.

Helsingin kaupungin liikennelaitos. 1994. Kiinteistöpalvelu. Sörnäisten, Hakaniemen ja Rautatien metroasemien laiturihallien lämpötilaotoksia. HKL sisäinen dokumentti.

Hochbahn 2010. Esittelymateriaalia HKL:n tutustumismatkalta Hampurin metron. HKL sisäinen dokumentti.

Horner, Roger E., Proud, Neil J. 1998. The Key Factors in design and construction of advanced Flywheel Energy Storage Systems and their applications to improve telecommunication power back-up. IEEE. s. 668-675.

Jussila, Juha. 2010. Sähköjärjestelmäpäällikkö, HKL. Keskustelu Helsingissä 26.10.2010

Kuljettajan opas - Metrojuna, sarja 100. 1985. Helsingin kaupungin liikennelaitos, Valmet, Strömberg, Helsinki.

Kuljettajan ohjekirja - Metrojuna, sarja 200. 2003. Helsingin kaupungin liikennelaitos, Traxis, Bombardier, Helsinki.

- Laaksonen, Markku. 2010. Pieni metrokirja. Kariston Kirjapaino Oy, Hämeenlinna.
- Louhivuori, Leena. 2007. Metro 25 vuotta 2007 – Juhlat. WS Bookwell Oy, Porvoo. 95 s.
- Maxwell 2009. Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors– Doc. No. 1014627.1 © 2009 Maxwell Technologies®, Inc.
- NessCap Ultracapacitor Technical Guide. 2008. http://nesscap.com/data_nesscap/NESSCAP%20Tech%20Guide_2008.pdf. Viitattu 19.12.2010.
- Pakkala, Risto J. 2002. Helsingin uusi metrovaunusarja ja sen hankintavaiheet. Raitio. Vol 25:2. S. 42–47.
- Piller. 2010. http://www.piller.com/site/energystore.asp?nav_id=117. Viitattu 19.12.2010.
- Post, Richard F. 1996. The new look at an old idea. Electromechanical battery. Science and Technology Review, April 1996. s. 22-25.
- Railway energy 2003. http://www.railway-energy.org/tfee/index.php?ID=220&TECHNOLOGYID=51&SEL=210&SEKTION=Sec1_opened#a_General%20information. Viitattu 16.12.2011.
- Ruotsalainen, Kari. 2010. Ratasähkömies, HKL. Keskustelu Helsingissä 29.9.2010.
- Snellman, H. 2005. Superkondensaattori iskee moneen sovellukseen. Prosessori, vol 12, joulukuu 2005. s. 34-37.
- Tolmunen, Tapio. 2007. Tunnelijunasta suosikiksi – Helsingin metro 25 vuotta. WS Bookwell Oy, Porvoo. 99 s.
- Umemura, T., Mizutani, Y., Okamoto, T., Nakajima, K., Tanaka, K. 2003. Life Expectancy and Degredation Behavior of Electric Double Layer Capacitor Part I. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Vol 3, 2003. s. 944-948.
- Ultracapasitors 2011. www.ultracapasitors.org. Viitattu 16.12.2011.
- Vaajoensuu, Timo. 1994. Esiselvitys suurnopeusvauhtipyörän käytöstä energiavarastointiin sähköautossa. Teknillinen korkeakoulu, Autotekniikan laboratorio, Espoo.

Vainonen, Pekka. 2005. Superkondensaattorit nosturin energiavarastona. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Espoo.

Valmet. Metrojuna 107–184 Huolto-ohjeet V2. HKL sisäinen dokumentti.

Virtakiskolaitos. 19xx. HKL sisäinen dokumentti.

Wajima, Takenori, Nakamura, Yasushi. 2008. Environmentally Friendly Solutions for Railway Systems. http://www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2008/09/19/r2008_05_105.pdf Viitattu 16.12.2011.

Zorpette, Glenn. 2005. Super Charged. IEEE Spectrum, tammikuu 2005, s. 32-37.

Tekniset tiedot (M100)

Vaunupareja		42
Matkustajapaikkoja		
Nimellinen (4 henkilöä/seisomapaikkam ²)		400
Käytännössä (3 henkilöä/seisomapaikkam ²)		287
Istumapaikkoja		130
Pituus		44,2 m
Leveys		3,2 m
Korkeus		3,7 m
Omapaino (vaunupari)		60,8 t
Kori	Itsekantava, alumiinia	
Jousitus		
Ensiöjousitus		Kumijouset
Toisiojousitus		Ilmajouset
Jarrujärjestelmät		
Käyttöjarru	Sähködynaaminen jarru ja pneumaattinen levyjarru	
Lisäjarru	Magneettinen kiskojarru	
Ovet		Sähkötoimiset
Huippunopeus matkustajaliikenteessä		80 km/h
Hetkellinen rakenteellinen huippunopeus		100 km/h
Käyttöjännite		750 V DC
Ajomoottorit	Tyristoriohjatut kolmivaiheasynkronimoottorit	

Tekniset tiedot (M200)

Vaunupareja		12
Matkustajapaikkoja		
Nimellinen (4 henkilöä/seisomapaikkam ²)		361
Käytännössä (3 henkilöä/seisomapaikkam ²)		287
Istumapaikkoja		124
Pituus		44,3 m
Leveys		3,2 m
Korkeus		3,7 m
Omapaino (vaunupari)		64,8 t
Kori	Itsekantava, alumiinia	
Jousitus		
Ensiöjousitus		Kumijouset
Toisiojousitus		Ilmajouset
Jarrujärjestelmät		
Käyttöjarru	Sähködynaaminen jarru ja pneumaattinen levyjarru	
Lisäjarru	Magneettinen kiskojaru	
Ovet		Sähkötoimiset
Huippunopeus matkustajaliikenteessä		80 km/h
Hetkellinen rakenteellinen huippunopeus		100 km/h
Käyttöjännite		750 V DC
Ajomoottorit	IGBT-ohjatut kolmivaiheasynkronimoottorit	

p	Series: HTM Power 125 Volt Module	<ul style="list-style-type: none"> » Ultra Low Internal Resistance » Highest Power Performance Available » Lowest Time Constant
----------	--	--

› **Features:**

- » 125V Operating Voltage
- » Monitoring provisions for temperature and voltage
- » Over 1M duty cycles
- » Sealed from exposure to the elements by being compliant with the IP 65 requirements as detailed in the IEC standards
- » Proprietary material science and packaging technology

› **Applications:**

- » Heavy Duty Transportation
- » Utility Vehicle
- » Hoisting Equipment

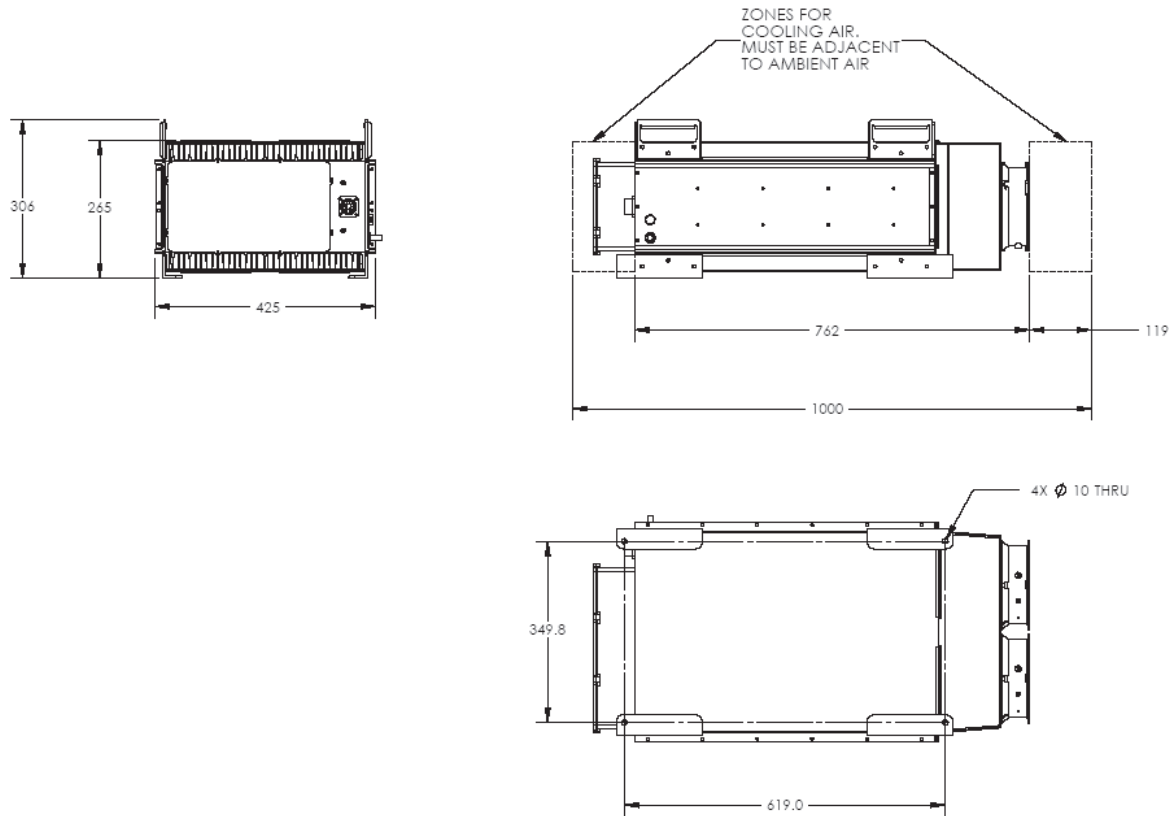


Item	Performance	
Nominal Operating voltage [Vdc]	125V	
Maximum Operating Voltage [Vdc]	130V	
Surge voltage [Vdc]	135V	
Nominal Capacitance [F]	63F	
Tolerance Capacitance [%]	+20% / -0%	
DC Series resistance [mΩ]	18.0	Max, Room temperature
100 Hz Series resistance [mΩ]	14.0	Max, Room temperature
Energy Available (Wh)	101.7	Energy Available equals 1/2C (Vnom ² – 1/2Vnom ²) /3600
Self discharge [%of initial V]	50%	30 days RT 100V; 12 hours charge and hold
Maximum Continuous Current [A] With Fan Cooling	150A	Assuming 15 degree temperature rise above ambient temperature
Maximum Continuous Current [A] With Passive Cooling	55A	Assuming 15 degree temperature rise above ambient temperature
Thermal Resistance [Fan]	0.032 °C/W	With both fans operating at full speed, module horizontally mounted
Max current [A]	750A	1 second, 10% duty cycle
Lifetime 125V, RT [hours]	100,000	End of life characterized as -20% C from nominal C, or increase of 100% in ESR
Cycles 125 to 62.5 Vdc, RT [cycles]	1,000,000	End of life characterized as -20% C from nominal C, or increase of 100% in ESR
Isolation Voltage [Vdc]	4000VAC	50Hz, 1 min. Maximum string operating voltage 1500V DC
Item	Environment	
Min operating T [°C]	-40	
Maximum Operating T [°C]	+65	
Max ambient operating T [°C]	+50	
Min storage temperature [°C]	-40	
Max storage temperature [°C]	+70	
Humidity Resistance	IP65	
Shock and Vibration Resistance	Vibration: SAE J1455, SAE J2380, EN 61373 Shock: SAE J2464	

Part Number	Fan Voltage (V)	Mass (kg)	Size (mm)		
			Measurements do not include shroud		
			L (+/- 0.5)	W (+/- 0.5)	H (+/- 0.5)
BMOD0063 P125 B11	12	59.5	762	425	265
BMOD0063 P125 B21	24	59.5	762	425	265
Included in BMOD0063 P125			2 Power connectors: - Mounting adapters with isolation and mating lug connectors - Optional adapters for normal / perpendicular mounting of power cables 1 Monitoring connector, type GES GB / KS 507 MC and mating connector		

MC BMOD Power Series 125v BOOSTCAP® Ultracapacitor Modules

› **Dimensions:**



Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

› **Markings: Modules are marked with the following information**

Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial #

› **Additional Technical Information:**

Capacitance and ESR, DC measured per document 1007239

I_c = Leakage current after 72 hours, 25°C I_{sc} = short circuit current (maximum peak current)

R_{th} = Thermal resistance

$$E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3600 \times mass}$$

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R(1kHz) \times mass}$$

$$P_d = \frac{0.12V^2}{R(DC) \times mass}$$

Patent Pending

Worldwide Headquarters

MAXWELL TECHNOLOGIES
9244 Balboa Avenue • San Diego, 92123 CA, USA
PHONE: +(1) 858 503 3300
FAX: +(1) 858 503 3301
EMAIL: info@maxwell.com

European Office

MAXWELL TECHNOLOGIES SA
CH-1728 Rossens • Switzerland
PHONE: +41 (0) 26 411 85 00
FAX: +41 (0) 26 411 85 05
EMAIL: info@maxwell.com



CHAUVIN ARNOUX
DC/AC virtapihti
PAC 11

- Phase error (45...65 Hz)

Primary current	10...100 A	10...400 A
Phase shift	≤ 2°	≤ 1.5°

Graph of typical phase shift as a function of a 50 Hz AC primary current: see appendix, page 61.

- Rise time from 10 to 90% Vs: ≤ 70 μs
- Fall time from 90 to 10% Vs: ≤ 70 μs
- Output noise:
 - from DC...1 kHz ≤ 1 mV or 1 A peak-peak
 - from DC...5 kHz ≤ 1.5 mV or 1.5 A peak-peak
 - from 1 kHz...5kHz ≤ 500 μV rms or 0.5 A rms

Distortion parameters

- Maximum distortion of the frequency on the measurement (to be added to the error in the reference range):
 - from 65 to 440 Hz -1%
 - from 440 to 2000 Hz -3.5%
 - from 2 to 10 kHz -3 dB
- See graph of response as a function of the frequency, in appendix, page 62.
- Battery voltage: ≤ 0.1% /V
- Temperature: ≤ 300 ppm /°C or 0.3% /10°C
- Humidity 10...85% RH at ambient temperature: ≤ 0.5%
- Position of a conductor of Ø 20 mm:
 - from DC...440 Hz < 0.5%
 - from 440 Hz...1 kHz < 1%
 - from 1kHz...2 kHz < 3%
 - from 2 kHz...5 kHz < 10%
- Adjacent conductor carrying an AC current 50 Hz, at 23 mm from the clamp: < 10 mA/A
- Distortion of an external field of 400 A/m (50 Hz) on centred cable: < 1.3 A
- Common mode rejection: > 65 dB A/V
- Residual magnetism: < 10 mA/A

4.4/ MECHANICAL SPECIFICATIONS

- Watertightness: IP 30 in accordance with IEC 529
- Clamping diameter: 1 cable Ø 30 mm (or 2 cables Ø 24 mm) a busbar of cross section 50 x 10 mm
- Outside dimensions of clamp: 224 x 97 x 44 mm
- Fitted lead: 1.5 m
- Weight: 440 g approx
- Drop height: to IEC 68-2-32
- Protection from shocks: 100 g in accordance with IEC 68-2-27
- Vibrations: to IEC 68-2-6

4.5/ ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Power supply: 9 V battery (type 6LR61, 6LF22 or NEDA 1604)
 Battery life: approx 50h with an alkaline battery

Operating limits

On DC current: 3000 A permanent
 On AC: 1000 A permanent up to 1 kHz
 The maximum permitted current (AC) on over load from 1 kHz is defined by the curve shown in the appendix (page 66) and in accordance with the following formula:

$$I_p \text{ max} = \frac{1000}{F} \text{ (kHz)}$$

Electric shocks

Instrument with dual insulation or strengthened insulation in accordance with IEC 1010-2-032. Between the primary, the secondary and the hand-held part located below the guard, dielectric test voltage: 7850 V DC
 Maximum common mode voltage between the conductor on which the measurement is made and the earth, or the output and the earth:
 - 600 V for installations of category III and degree of pollution 2
 Installation category and degree of pollution in accordance with IEC 664 and 664A

4.6/ ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

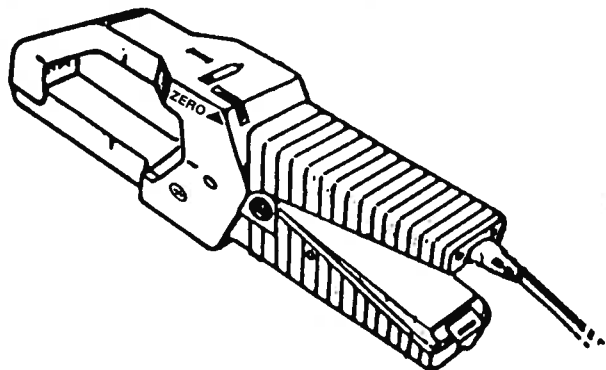
Susceptibility in accordance with EN 50082-2 (most severe case) and EN 50082-1:

- Electrostatic discharge in accordance with IEC 1000-4-2 (1995):
 - test voltages: 4 kV level 2 on contact, aptitude criteria B
 - 8 kV level 3 in the air, aptitude criteria B
- Radiated fields in accordance with IEC 1000-4-3 (1995):
 - with max interference of 5% of the measurement extent: 10 V/m level 3, aptitude criteria A
- Rapid transients in accordance with IEC 1000-4-4 (1995):
 - test voltage: 1 kV level 2, aptitude criteria B
- Magnetic fields at the frequency of the network to IEC 1000-4-8 (1995):
 - with a max distortion of 0.5 A: 30 A/m 50 Hz level 4, aptitude criteria A

Emissions in accordance with EN 50081-1:

- Conducted and radiated emission through the case to EN 55022 (1994): class B

M. Häspärit 1-4



Instruction Sheet

80i-1010

DC/AC Current Probe

INTRODUCTION

The Fluke 80i-1010 DC/AC Current Probe is a battery-powered clamp-on current probe that is used with a voltmeter or digital multimeter to measure dc currents up to 1000 amps or ac currents up to 700 amps. Each jaw of the probe contains half of a magnetic core. The jaws clamp around a conductor allowing current measurements without breaking the circuit. Dual Hall sensors mounted in gaps of the core sense the magnetic field produced by the current being measured. An amplifier circuit generates an output signal of 1 mV per amp. A convenient thumbwheel ZERO control provides a method to offset core magnetization, thereby improving accuracy of dc current measurements down to 1 amp.

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL:

Current Range: 1 to 1000A dc
1 to 700A ac

Frequency Range: dc to 440 Hz

Output Signal: 1 mV per amp dc or ac

Accuracy* (uncertainty): $\pm\%$ of reading, 1 year

dc	1 to 100A:	2% +1A
	100 to 700A:	3%
	700 to 1000A:	5%
ac (48 to 62 Hz)		
	1 to 100A:	2% +1A
	100 to 700A:	3%
ac (62 to 440 Hz)		
	1 to 100A:	3% +1A
	100 to 700A:	5%

* 18 to 28°C (64 to 82°F), conductor centered, ZERO adjustment prior to measurement (dc only).

Frequency Response: -3 dB at 6 kHz typical

Working Voltage: 660V rms maximum at input

Minimum Conductor Sizes: 1 ea 750 MCM (30 mm (1.18") diameter) or 2 ea 500 MCM (25 mm (0.98") diameter) or 2.5" x 0.2" Bus Bar (63 mm x 5 mm)

Load Impedance: >1 M Ω , 100 pF (The probe's output circuit can drive impedances as low as 1 k Ω (chart recorders etc.). However, the battery test indication will be incorrect (low) if the meter input impedance is less than 1 M Ω .)

GENERAL

Temperature Coefficient: ± 0.06 X specification per °C (0 to 18°C, 28 to 50°C)

Operating Temperature: 0 to 50°C (32 to 122°F)

Storage Temperature: -40 to 60°C (-40 to 140°F)

Relative Humidity: 0 to 90% (0 to 35°C)
0 to 70% (35 to 50°C)

Batteries:

QUANTITY/TYPE: two 1.5V AAA

LIFE: 200 hours continuous use typical

LOW INDICATION: Output voltage is between 0.0 and -99.9 mV with power switch off (load impedance >1 M Ω).

Safety: Protection Class II as defined in IEC 348 and ANSI C39.5

VOLTMETER COMPATIBILITY

The 80i-1010 is compatible with any voltmeter, multimeter, or other voltage-measuring instrument that has the following features:

- Input jacks that accept Fluke safety-designed shrouded banana plugs.
- Range and resolution capable of displaying 1 mV of output per amp of measured current.
- Voltmeter accuracy (uncertainty) of 0.3% or better to take full advantage of the accuracy of the probe.
- Input impedance of 1 M Ω , 100 pF or greater. (See the Load Impedance specifications for operation with lower impedance instruments.)

When the probe is making a measurement, the current-carrying conductor is not broken and remains electrically isolated from the probe's output. As a result, the probe's output common may be either floated (isolated) or grounded.

BATTERY INSTALLATION

The 80i-1010 requires two 1.5V, AAA size batteries for operation. Install the batteries as follows:

1. Use your thumbnail to raise the latch and open the battery compartment (see Figure 1).
2. Observe the polarity markings on the inside of the battery door. Note that the polarity for each battery is the reverse of the other.
3. Install the batteries so that the polarity markings on the batteries match the markings on the battery door.
4. Snap the battery door shut.

NOTE

If both batteries are not installed with the correct polarity, the battery test may indicate that the batteries are good, but the probe will not operate.

BATTERY TEST

Use the following procedure to test the batteries:

1. Connect the probe output leads to the voltmeter inputs: black to COMMON or LOW, and red to VOLTS. (See Figure 1.)
2. Set the voltmeter function to dc millivolts (dc mV $\overline{---}$), and turn the voltmeter power on. Select a range capable of displaying 170 mV dc.
3. Verify that the power switch on the probe is in the OFF position.