

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Kaarlo Määttä

## **SÄHKÖKÄYTTÖINEN MOOTTORIKELKKA**

Työn tarkastajat:

Professori Juha Pyrhönen

Professori Pertti Silventoinen

Työn ohjaaja:

Professori Juha Pyrhönen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Kaarlo Määttä

### **Sähkökäyttöinen moottorikelkka**

Diplomityö

2010

35 sivua, 8 kuvaa, 1 taulukko ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen  
Professori Pertti Silventoinen

Hakusanat: Sähkökäyttöinen moottorikelkka, sähkömoottori, akku

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan yksikössä. Työssä tarkastellaan mahdollisuuksia toteuttaa sähkökäyttöinen moottorikelkka. Työn alussa selvitetään, millaiset ovat moottorikelkan käytön aiheuttamat kuormat ja pyörimisnopeusalueet sekä miten polttomoottorit niistä selviävät. Seuraavaksi tarkastellaan eri sähkömoottorityyppien ja akkuvaihtoehtojen soveltuvuutta vastaavaan tehtävään. Työn tuloksena valitaan sähkökäyttöiseen moottorikelkkaan soveltuva sähkömoottori- ja akkutyyppi.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Department of Electrical Engineering

Kaarlo Määttä

### **Electric snowmobile**

Master's thesis

2010

35 pages, 8 figures and 1 table and 1 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen  
Professor Pertti Silventoinen

Keywords: electric snowmobile, electric motor, battery

The thesis was done in Lappeenranta University of Technology in the department of electrical engineering. The thesis examines the possibility of producing an electric snowmobile. In the beginning the load cycles of the snowmobile are studied and how an internal combustion engine works in a snowmobile drive. Next the applicability of different electric motor and battery types in snowmobile drives are studied. As a result of the work suitable electric motor and battery types are suggested.

## ALKUSANAT

Tämä Diplomityö on tehty viime tipassa vanhan tutkintosäännön mukaisesti Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa sähkötekniikan yksikössä. Olen hyvin kiitollinen saamastani aiheesta.

Työn valvojana ja tarkastajana on toiminut professori Juha Pyrhönen, jolle haluan antaa sydämelliset kiitokset, tämän työn aikana saamistani ohjeista ja neuvoista. Lisäksi annan kiitokseni toisena tarkastajana toimineelle professori Pertti Silventoiselle.

Tässä yhteydessä toivotan erityiset kiitokset hyvälle opiskelutovereilleni, jotka omalta osaltaan, ovat auttaneet minua toteuttamaan yhden unelmistani. Lopuksi haluan kiittää aviovaimoani Riitta Määttä koko opiskeluaikana saamastani tuesta.

Lappeenrannassa 11.6.2010

Kaarlo Määttä

## SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	6
1 JOHDANTO .....	8
1.1 Työn taustat ja tavoitteet .....	9
1.2 Työn sisältö .....	10
2 MOOTTORI ja polttoainetankki.....	10
2.1 Kytkin, variaattori ja vaihteisto.....	11
2.2 Telamatto.....	12
2.3 Polttomoottorin teho, vääntömomentti ja kulutus.....	13
3 SÄHKÖMOOTTORIT .....	15
3.1 Tasavirtamoottori .....	16
3.2 Induktiokone .....	17
3.3 Synkroninen reluktanssikone .....	20
3.4 Kestomagneettitahtikone.....	21
4 AKUT.....	22
4.1 Akkutyypit .....	24
4.2 Nikkelimetallihydridiakku .....	24
4.3 Litiumioniakku .....	25
4.4 Superkondensaattorit.....	27
5 MOOTTORITYYPIN valinta .....	28
6 AKKUTYYPIN valinta.....	31
7 YHTEENVETO .....	32
LÄHTEET.....	33
LIITTEET	

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$C$	Varaus, vakio
$E_b$	Bensiinin energia
$E_{pa}$	Polttomoottorin tuottama energia
$E_{po}$	Polttomoottorin kuluttama energia
$f$	Sähkökoneen taajuus
$i_d$	Pitkittäinen ankkurikäänvirta
$i_D$	Pitkittäinen vaimennuskäänvirta
$I_F$	Magnetointivirta
$i_{sd}$	Pitkittäinen staattorivirta
$i_{sq}$	Poikittainen staattorivirta
$i_q$	Poikittainen ankkurikäänvirta
$i_Q$	Poikittainen vaimennuskäänvirta
$L_d$	Pitkittäinen induktanssi
$L_q$	Poikittainen induktanssi
$L_{md}$	Pitkittäinen magnetointi-induktanssi
$L_{mq}$	Poikittainen magnetointi-induktanssi
$n$	Sähkökoneen pyörimisnopeus
$n_{kytkin}$	Kytkimen pyörimisnopeus
$n_s$	Sähkökoneen tahtinopeus
$n_{variaattori}$	Variaattorin nopeus
$n_{vetoakseli}$	Vetoakselin nopeus
$p$	Napapariluku
$P$	Sähkökoneen teho
$P_p$	Polttomoottorin teho
$s$	Epätahtikoneen jättämä
$T_e$	Sähköinen vääntömomentti
$T_p$	Polttomoottorin tuottama vääntömomentti
$T_v$	Vetorataan vääntömomentti
$U_{SV}$	Staattorivyöhykkeen jännite
$V$	Tilavuus
$\dot{V}$	Tilavuusvirtaus

**Kreikkalaiset aakkoset:**

$\delta$	Tehokulma
$\eta_p$	Polttomoottorin hyötysuhde
$\eta_v$	Kytkin – variaattori voimansiirron hyötysuhde
$\kappa$	Kulma
$\psi_F$	Tasavirtakoneen käämivuo
$\psi_{PM}$	Kestomagneetin käämivuo
$\Omega$	Roottorin mekaaninen kulmanopeus
$\omega$	Verkon sähkökulmanopeus
$\omega_s$	Staattorin sähköineen kulmanopeus

**Lyhenteet:**

AC	Vaihtovirta (alternating current)
DC	Tasavirta (direct current)
NiMH	Nikkeli-metallihydridi (nickel-metal hydride)
PMASynRM	Kestomagneettiavusteinen synkroninen reluktassikone (permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor)
Li-ion	Litium-ioni (lithium-ion)
LiFePO <sub>4</sub>	Litium-rautafosfaatti (lithium iron phosphate)

## 1 JOHDANTO

Virallisen määritelmän mukaan ”moottorikelkka on telavetoinen moottorireki, jossa kuljettajan lisäksi tilaa enintään kahdelle henkilölle ja jonka omamassa on enintään 0,5 tonnia”. /1/ Kuva 1.1 esittää tyypillistä moottorikelkkaa käyttöolosuhteessaan.



Kuva 1.1 Moottorikelkka. Kuvassa näkyvät kelkan hallintalaitteet, ohjauksjärjestelmä sekä kelkan alla oleva vetotela. Kelkassa on kaksi istumapaikkaa. /2/

Ensimmäiset lumen päällä kulkevat moottoriajoneuvot on valmistettu viime vuosisadan alussa. Nykyisen malliset moottorikelkat ovat peräisin 1950-luvulta. Moottorikelkkaa Suomessa ovat aluksi käyttäneet lähinnä poromiehet, rajavartijat ja muut viranomaiset. Vasta viime vuosikymmeninä ne ovat yleistyneet tavallisten ihmisten käyttöön. Moottorikelkat olivat aluksi ominaisuuksiltaan hyvin vaatimattomia ja huippunopeudeltaan hitaita.



Moottorikelkat tavallisesti jaotellaan työ-, matka-, ja urheilukelkoiksi. Työkelkat ovat usein raskaita hieman hitaammin kulkevia. Ne soveltuvat pitkän ja leveän telamaton sekä vääntävän moottorin ansiosta hyvin pehmeässä lumessa kulkemiseen. Työkelkka soveltuu kuormien vetämiseen erinomaisesti. Matka- ja urheilukelkat sopivat usein paremmin vapaa-ajankäyttöön.

Perinteisesti moottorikelkka on polttomoottorikäyttöinen. Polttomoottorin voima välitetään kytkimen ja variaattorin kautta telamatolle. Moottorikelkkaa ohjataan kääntämällä ohjaustankoa, joka vaikuttaa edessä oleviin suksiin tai sukseen. Suksien pohjissa on usein kovametallista valmistetut ohjausraudat. Olosuhteista riippuen ohjaukseen voidaan vaikuttaa myös kallistamalla kelkkaa, ajamalla seisaaltaan tai niin sanotusti polvelta eli seisaaltaan toinen polvi istuimen päällä ajaen.

Moottorikelkan runko on mahdollisimman kevyeksi ja jäykäksi tehty alumiinikehikko, johon voidaan asentaa tarvittavat varusteet. Istuimen alla on yleensä tavaroille säilytystila. Käynnistys tapahtuu joko käsi tai sähkökäynnisteisesti. Moottorikelkassa on yleensä ohjaustangossa hätäkatkaisin. Lisäksi on hätänaru, joka kytketään kuljettajan vaatteisiin. Hätänarun avulla kelkka pysähtyy kuljettajan pudotessa kyydistä. Moottorikelkan jarrut ovat tyypillisesti joko mekaaniset tai hydrauliset ja ne kytkeytyvät telamattoa pyörittävään akseliin. Jarruja käytetään ohjaustangossa olevasta kahvasta. /3/

## **1.1 Työn taustat ja tavoitteet**

Tällä hetkellä ovat maailmalla hyvin ajankohtaiseksi tutkimus- ja kehityskohteeksi nousseet erilaiset sähkökäyttöiset ajoneuvot. Tämä johtuu ympäristötietoisuuden lisääntymisestä, öljyn hinnan noususta sekä tekniikan kehittymisestä. Sähköajoneuvoja käytettäessä ei olla riippuvaisia mistään tietystä energiasta, kuten öljystä.

Sähköajoneuvot ovat tavallisesti niin sanottuja hybridiajoneuvoja tai sähköajoneuvoja. Hybridiajoneuvoissa on polttomoottorin lisäksi sähkömoottori. Hybridiajoneuvot voidaan jakaa kolmeen luokkaan toimintaperiaatteen mukaan eli sarjahybrideihin, rinnakkaisyhybrideihin sekä rinnakkaissarjahybrideihin. Sarjahybrideissä polttomoottori pyörittää generaattoria, joka antaa voiman taajuudenmuuttajan ja sähkömoottoreitten kautta pyörille.

Rinnakkaishybrideissä polttomoottori on kytketty voimansiirtoon. Lisäksi polttomotorin rinnalle on kytketty sähkömoottori, joka saa voimansa taajuudenmuuttajan kautta akusta tai akkupaketista. Rinnakkaissarjahybridissä polttomoottori pyörittää sekä generaattoria, että voimansiirron kautta pyöriä. Sähkömoottori saa taajuudenmuuttajan kautta voimansa akusta ja generaattorista. Sähköajoneuvoissa moottori saa voimansa pelkästään esimerkiksi akuista.

Tässä työssä on tavoitteena selvittää mahdollisuuksia toteuttaa sähkökäyttöinen moottorikelkka. Työssä on keskitytty tutkimaan ainoastaan polttomotorin korvaamista sähkömoottorilla. Työssä ei käsitellä niin sanottuja hybridivaihtoehtoja. Voimanlähteenä käytettävät akut on tarkoitus ladata sähköverkosta. /4/

## 1.2 Työn sisältö

Työn luvussa kaksi käsitellään moottorikelkan nykyistä rakennetta tarkemmin. Polttomotorin ja voimansiirron pyörimisnopeusalueet käydään myös läpi. Lisäksi arvioidaan aiheutuvaa kuormitusta ja polttomotorin kykyä selvitä siitä. Luvuissa kolme ja neljä käsitellään eri sähkömoottori- ja akkutyyppjä sekä niiden soveltumista kyseiseen käyttöön. Luvuissa viisi ja kuusi valitaan soveltuva sähkömoottori ja akkutyyppi.

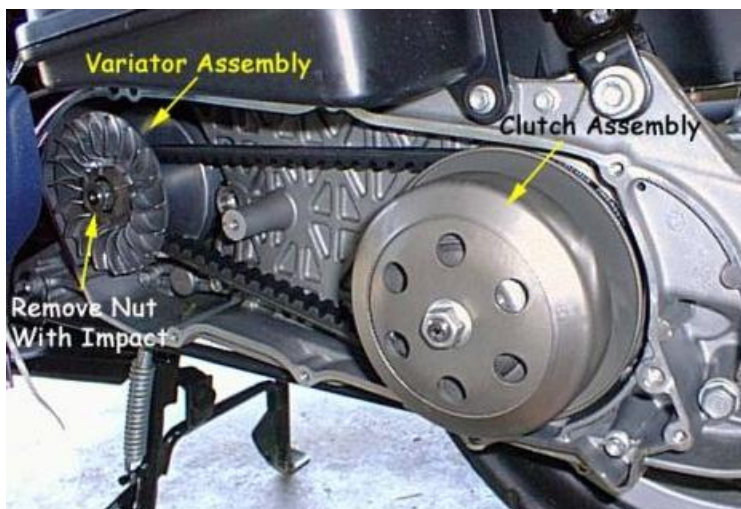
## 2 MOOTTORIT JA POLTTOAINETANKKI

Moottorikelkan moottorit ovat tyypillisesti kaksi- tai nelitahtisia. Aiemmin kelkkojen moottorit olivat ainoastaan kaksitahtisia. Kiristyneiden melu- ja päästö määräysten myötä nelitahtimoottorit ovat yleistyneet niiden kaksitahtikoneisiin verrattuna suuremmasta painosta huolimatta. Moottoreita on sekä yksi- että useampisylinterisiä. Moottorin teho  $P_p$  ilmoitetaan yleensä hevosvoimissa ja vaihtelee alle 30 hevosvoiman ja yli sadan hevosvoiman välillä. Moottorin iskuilavuudet vaihtelevat noin  $300 \text{ cm}^3$  ja yli  $1000 \text{ cm}^3$  välillä. Polttoainetankki on yleensä 30 litran – 50 litran kokoinen. Tankillinen riittää tyypillisesti noin 150 km – 300 km ajoon. Lisäksi usein moottorikelkkailijat varaavat mukaansa jonkin verran varabensiiniä. Tällä tavoin voidaan toimintasädetä hieman kasvattaa. Yleisesti polttomotorin hyötysuhde on raskaahkossa kelkkakäytössä keskimäärin  $\eta_p = 20 - 25 \%$ . /3/

Polttoaineen energiasisältö on suuri, mutta polttomoottorin hyötysuhde heikko. Tämä tarjoaa mahdollisuuden tarkastella sähkökäyttöjä moottorikelkkojen voimalinjassa. Sähkömoottorikäytön hyötysuhde on helposti 90 %:n tietämillä, joten sähkökäyttöisen moottorikelkan energiavaraston tulee suurimmillaankin olla vain noin viides- – neljäs-osa polttomoottorin energiavarastosta.

## 2.1 Kytkin, variaattori ja vaihteisto

Moottorikelkat ovat tyypillisesti yksivaihteisia, mutta joissain malleissa on alennusvaihte. Lisäksi nykyään monesti on peruutusvaihte, Peruutusvaihte voi olla sähköisesti toteutettu siten, että kaksitahtimoottorin pyörimissuunta vaihtuu. Moottorikelkan kytkintä hallitaan ohjaustangossa olevalla kahvalla. Kytkin – variaattori on ”portaaton automaattivaihteisto”. Kytkimen ja variaattorin välillä on kumiseoksesta valmistettu variaattorin hihna. Kytkimessä on hihnapyörä jossa on kaksi kartion mallista lautasta. Näitä kartion mallisia lautasia painavat painorullat, jotka siirtyvät pyörimisnopeuden noustessa keskipakovoiman vaikutuksesta ulospäin, kuva 2.1.



Kuva 2.1 Variaattoriveto moottoripyörässä. /5/

Tällöin nämä kartion malliset lautaset liikkuvat toisiaan vasten ja variaattorin hihna liikkuu lähemmäs ulkokehää. Tällöin toisella puolella vastaavasti variaattori kytkeytyy, koska siinä on myös vastaavat kartiolautaset. Tyhjäkäynnillä lautaset ovat toisistaan erillään eikä tehoa välity. /6/ /7/

Kytkimen ja variaattorin yhdistelmällä voidaan välityssuhdetta muuttaa 3:1 – 1:1 muuntosuhteen välillä. Kytkin säädetään kytkeytymään esimerkiksi silloin, kun Pyörimisnopeus on  $3000 \text{ min}^{-1}$ , tällöin moottorissa on riittävästi vääntömomenttia liikkeelle lähtemiseksi. Kytkettäessä muuntosuhde on suurin eli 3:1. Kytkimen pyöriessä kytkentäkierrosluvulla  $n_{\text{kytkin}} = 3000 \text{ min}^{-1}$ , variaattori pyörii  $n_{\text{variaattori}} = 1000 \text{ min}^{-1}$ . Ketjukotelossa tai vaihteiston toisiopuolella oleva välitys on tavallisesti noin 1:2 eli vetoakseli pyörii  $n_{\text{vetoakseli}} = 500 \text{ min}^{-1}$ .

Kokonaisvälityssuhde on 6:1. Kelkan nopeus on noin 20 km/h. Tällöin moottori antaa esimerkiksi  $P_p = 35 \text{ hv} = 26 \text{ kW}$  tehon. Moottorin teho on suurimmillaan  $60 \text{ hv} = 44 \text{ kW}$  nopeudella  $6000 \text{ min}^{-1}$ , tällöin viimeistään on variaattorin välitys 1:1 ja kokonaisvälitys 2:1. Kytkin – variaattori toiminta-alue on näiden pyörimisnopeuksien välisellä alueella.

Vastaavasti pienennettäessä kaasua riittävästi irtoaa hihnan ote jousitetun keskipakokytkimen avulla, eikä moottorin voimaa enää välity moottorilta telamatolle.

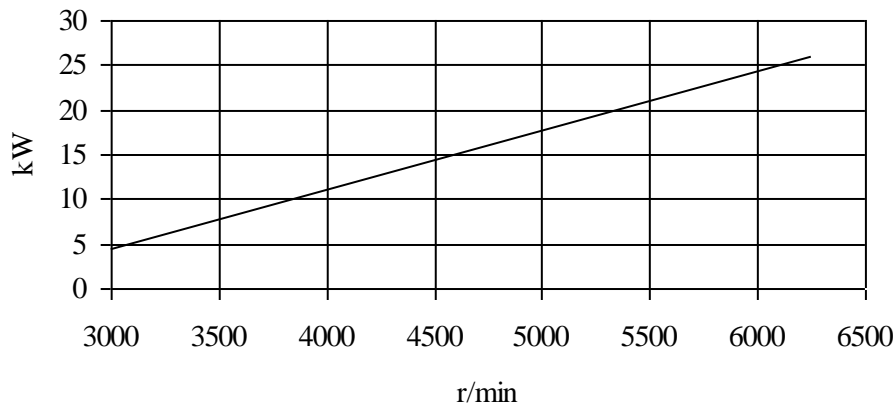
Tällaisen voimansiirtojärjestelmän heikkous on sen mekaaniseksi välitykseksi heikohko hyötysuhde, joka on vain luokkaa  $\eta_v = 80 \% - 85 \%$ . /7/ /8/. Mietittäessä sähkökäyttö-ratkaisua kannattaa siksi pohtia variaattorin poisjättämistä järjestelmästä.

## 2.2 Telamatto

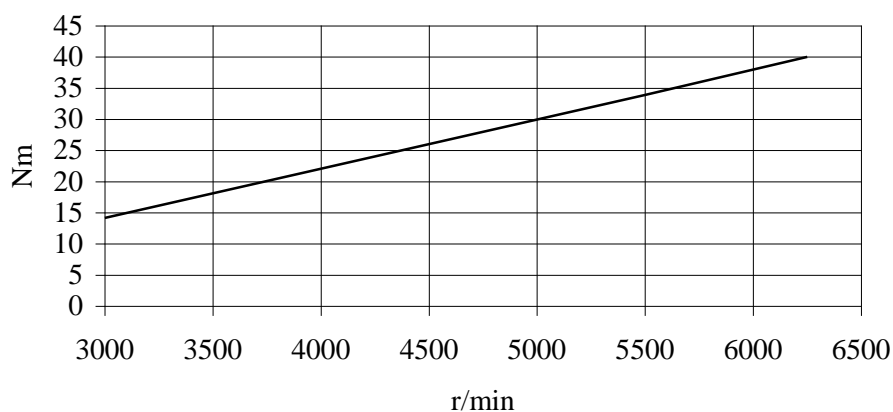
Variaattori pyörittää telamattoa, joka työntää moottorikelkkaa eteenpäin. Moottorikelkan jalusta on varustettu telarullilla ja liukukiskoilla, joita myöten telamatto pyörii. Tavallisin moottorikelkan telamatto on leveydeltään 38 cm – 60 cm. Telamatto ja muu vetolaitteisto on jousitettu ja iskunvaimennuksella varustettu. Telamaton tulee kestää venymättä niin kiihdytyksissä kuin jarrutuksissakin. Telamatto kääntyy niin veto- kuin taka-akselillakin 180 astetta säteen ollessa noin 100 mm. Liian jäykästi pyörivä telamatto vie huomattavasti tehoa. Telamattoja kehitetään siksi jatkuvasti. Telamaton ominaisuudet eroavat lähinnä telamaton harjankorkeuden ja muodon osalta. Lisäksi kumiseokset vaihtelevat jonkin verran. Nykyisin käytetään korkeampia telamaton harjoja. Telamattoja valmistetaan myös erilaisiin käyttöolosuhteisiin kuten syvälle lumelle tai kovalle pinnalle sopiviksi. Telamaton pito vaikuttaa tarvittavaan tehoon, tällöin välityksiä voidaan joutua tihentämään. /9/

### 2.3 Polttomoottorin teho, vääntömomentti ja kulutus

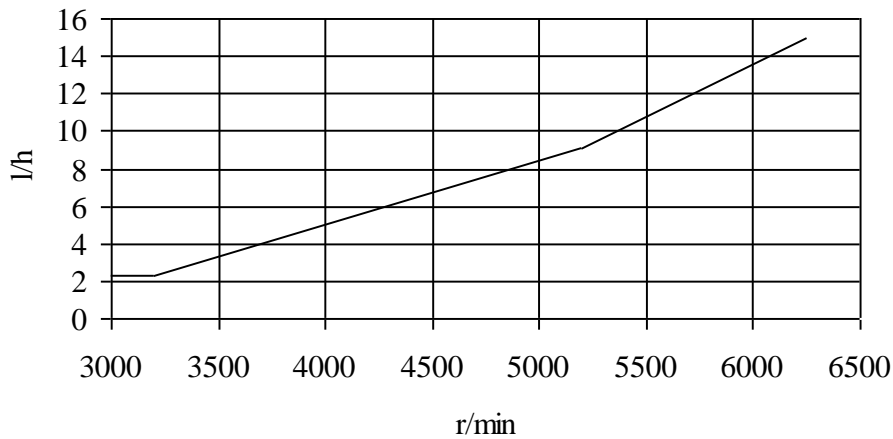
Erään pienitehoisen moottorikelkan moottoritehon kuvaajan muoto pyörimisnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 2.2. Moottorin tarkemmat tiedot on liitteessä I. Moottorin antama teho kasvaa pyörimisnopeuden noustessa kuvan mukaisesti. Moottorin antaman vääntömomentin muoto pyörimisnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 2.3. Vakio-vääntömomentin alue on kuvan perusteella kapea ja vääntömomentti matalilla nopeuksilla alhainen. Tällaisen moottorin bensiininkulutus pyörimisnopeuden funktiona on likimain kuvan 2.4 mukainen. Kuvasta havaitaan, että kulutus kasvaa voimakkaasti pyörimisnopeuden ja tehon noustessa.



Kuva 2.2. Tyypillisen moottorikelkassa käytettävän polttomoottorin teho pyörimisnopeuden funktiona. /10/



Kuva 2.3. Tyypillisen moottorikelkassa käytettävän polttomoottorin vääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona. /10/



Kuva 2.4. Tyypillisen moottorikelkassa käytettävän polttomoottorin kulutus pyörimisnopeuden funktiona.  
/10/

Edellisistä kuvista voidaan havaita, että moottorin tuottama teho  $P_p = 21$  kW, moottorin tuottama vääntömomentti  $T_p = 34$  Nm ja kuluttama bensiini  $\dot{V} = 10.6$  l/h pyörimisnopeuden ollessa  $5500 \text{ min}^{-1}$ . Eli moottorin tunnissa tuottama mekaaninen energia  $E_{pa} = 21$  kWh.

Bensiinin energiasisältö  $E_b$  vaihtelee hieman ja on noin 31 kJ/l eli 8.61 kWh/l. Moottorin tunnissa kuluttama energia  $E_{po} = 91.27$  kWh ja on laskettu kaavalla

$$E_{po} = E_b V, \quad (2.1)$$

jossa  $E_b$  on bensiinin energiasisältö kWh/l ja  $\dot{V}$  on bensiinin kulutus l/h. Hyötysuhde saadaan yhtälöstä

$$\eta_p = \frac{E_{ba}}{E_{bo}} 100\%. \quad (2.2)$$

Polttomoottorin hyötysuhteeksi tällä teholla toimittaessa saadaan  $\eta_p = 23$  %. Mikä vastaa yleisesti esitettyä hyötysuhdetta. Käyttöaika 30 litran polttoainesäiliöllä on noin 3 tuntia.

Moottorikelkan kokonaisvälityssuhde on aiemmin esitetyn mukainen, eli liikkeelle lähettäessä on 6:1 ja välityksen vaihduttua 2:1.

Moottorikelkan polttomoottori antaa liikkeelle lähettäessä kuvan 2.3 tapauksessa variaattorin kytkeytyessä 14.2 Nm:n vääntömomentin pyörimisnopeuden ollessa 3000 min<sup>1</sup>. Tällöin saadaan edellä esitettyjen välityssuhteiden perusteella moottorin vetorataan  $T_v$  vääntömomentiksi 85.2 Nm. Moottorin tuottama suurin vääntömomentti on 40 Nm. Ennen välityssuhteen vaihtumista on vetorataan suurin mahdollinen vääntömomentti 240 Nm. Moottorikelkan variaattorin vaihduttua välityksiä on vetorataan vääntömomentti enintään 80 Nm, koska vaihteiston tai ketjukotelon toisiovälitys kaksinkertaistaa moottorilta tulevan vääntömomentin. Seuraavassa selvitetään, millaisin ehdoin sähkökäyttö voisi korvata ylläesitetyn polttomoottoriperustaisen käytön.

### 3 SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT

Sähkökäyttöinen moottorikelkka tarvitsee sähkömoottorikäytön, joka koostuu sähkömoottorista, tehoelektroniikasta, mittalaitteista sekä säätimestä. Säätimen tehtävänä on annettujen ohjeiden esimerkiksi pyörimisnopeuden ja mittalaitteilta saamiensa tietojen, kuten moottorille syötettävien virtojen, pyörimisnopeuden yms. perusteella antaa ohjeet tehoelektroniikalle. Tehoelektroniikan tehtävänä on saamiensa ohjeiden mukaan syöttää teholähteestä saatava energia oikeassa muodossa sähkömoottorille. Energiavarastona ja sähköisen tehon lähteenä sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa toimii akku tai akusto.

Taajuudenmuuttajaa eli invertteriä käytetään yleisesti sähkömoottoreiden ohjaamiseen. Teollisuudessa käytössä olevissa taajuudenmuuttajissa on tavallisesti tasasuuntaaja, jännitevälipiiri ja vaihtosuuntaaja. Sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa ei tarvita tasasuuntaajaa, koska energia otetaan akuista. Vaihtosuuntaajan kautta halutun suurin ja taajuudeltaan sopiva jännite ohjataan sähkömoottorille. Vaihtosuuntaajassa on kuusi tehotransistoria ja vastarinnan kytketyt diodit. Yleisin on kaksitasoinen jännitevälipiirillinen taajuudenmuuttaja. /11/

Sähköajoneuvokäyttöön soveltuvia moottorityyppejä on useita. Perinteisiä konetyyppejä edustavat tasavirtamoottorit ja induktio- eli oikosulkumoottorit. Uudempia konetyyppejä edustavat synkroniset reluktanssimoottorit ja kestromagneettitahtimoottorit sekä näiden kahden konetyypin yhdistelmät. Kaikilla konetyypeillä ovat omat hyvät ja huonot puolensa.

Kevyissä ajoneuvoissa ja lumen päällä käytettävissä ajoneuvoissa ei suurta vääntömomenttia tarvita kuin 10 – 20 sekuntia kerrallaan. Tämän vuoksi sähkökäyttöisen ajoneuvon moottori tavallisesti mitoitetaan siten, että liikkeelle lähdetessä moottorin vääntömomentti on vain 0,3 – 0,5-kertainen moottorin nimellisvääntömomenttiin nähden. Tällöin käytetään hyväksi sähkömoottorin ylikuormitusominaisuuksia. Sähkömoottoria voi liikkeelle lähdetessä hetkellisesti ylikuormittaa 2 – 3-kertaisella vääntömomentilla, ilman että se lämpenisi liikaa. /4/ /12/

### **3.1 Tasavirtamoottori**

Tasavirta- eli DC-koneet on ohjaustekniikaltaan hyvin yksinkertaisia. Moottorien ominaiskäyriä voidaan muuttaa halutuiksi nykyaikaisella ohjaustekniikalla. Aiemmin ominaiskäyriä muokattiin itse sähkökoneen rakennetta muuttelemalla. Tasavirtamoottorit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, eli sarjamoottoreihin ja vierasmagnetoituihin moottoreihin.

Nykyään käytetään yleensä teollisuudessa vierasmagnetoituja koneita. Vierasmagnetoitua konetta on helppo säätää tehoelektroniikan avulla ja sen säätöominaisuudet ovat hyvät. Rakenteeltaan avoimessa tasavirtakoneessa on korkea vääntömomenttitiheys, jopa korkeampi kuin perinteisessä täysin suljetussa oikosulkumoottorissa.

Mikäli tasasähkömoottoria halutaan syöttää tasasähkölähteestä, kuten sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa akusta, tarvitaan jonkinlainen hakkuriteholähde. Tasavirtamoottorissa on kommutaattori ja hiiliharjat. Näiden tehtävänä on suorittaa mekaaninen vaihtosuuntaus. Hiiliharjat kuluvat käytössä, joten ne on säännöllisesti tarkastettava ja tarvittaessa vaihdettava. Myös kommutaattori vaatii huoltoa



Tasavirtakoneiden kalliin hinnan ja runsaan huoltotarpeen vuoksi vaihtovirta- eli AC-moottorit ovat yleistyneet voimakkaasti kaikissa sähkökäytöissä viime vuosikymmeninä. Tasavirtamoottorin hyviin ominaisuuksiin liikennevälinekäytöissä kuuluu se, että sitä käytettäessä onnistuu helposti myös kentänheikennys, jolloin sähkökäytön nopeus- aluetta ja vääntömomenttia eri nopeuksilla on helppo säätää. /4/ Jos vierasmagnetoitu tasavirtakone on kestopagnetoitu, menetetään joitakin ominaisuuksia, kuten kentänheikennys, mutta samalla koneen monet muut ominaisuudet paranevat.

Täysin kompensoidun tasavirtakoneen käämivuo  $\psi_F$  riippuu vain magnetointivirrasta  $I_F$

$$\psi_F = f(I_F), \quad (3.1)$$

koska kompensoinnilla on poistettu ankkurireaktio eli ankkurivirran  $I_A$  vaikutus koneen magnetointitilaan. Tasavirtakoneen sähköinen vääntömomentti  $T_e$  on riippuvainen säädettävästä käämivuosta ja ankkurivirrasta. Tällöin saadaan

$$T_e = C \cdot I_A \cdot \psi_F, \quad (3.2)$$

jossa  $C$  on koneen rakenteesta riippuva vakio.

Tasavirtakoneen käämivuon säädössä pidetään käämivuo nimellisenä, kun nopeus on alle nimellisnopeuden. Kun halutaan suurempia nopeuksia, niin käämivuota heikennetään kääntäen verrannollisesti nopeuteen. Tätä kutsutaan kentänheikennykseksi. Tasavirtakoneessa ankkurivirralla voidaan nopeasti muuttaa vääntömomenttia, koska käämivuota ei tarvitse muuttaa. /14/

### 3.2 Induktiokone

Täysin suljettu oikosulkumoottori on induktiokone, joka on teollisuuden yleisin käyttämä sähkökonetyyppi. Rakenne on yksinkertainen ja valmistusmäärät ovat suuria, joten ne ovat hinnaltaan edullisia. Epätahtimoottori nimitys johtuu siitä, että koneen roottori pyörii hitaammin kuin koneen magneettikenttä.

Epätahtimoottorin nopeus  $n$  noudattaa yhtälöä

$$n = 2 \pi f (1 - s), \quad (3.3)$$

tahtinopeus  $n_s$  noudattaa yhtälöä

$$n_s = \frac{60f}{p}. \quad (3.4)$$

Yhtälössä  $f$  on verkon taajuus ja  $p$  on koneen napapariiluku. Moottorin jättämä  $s$  ilmaisee, kuinka monta prosenttia hitaammin sähkömoottorin roottori pyörii, verrattuna verkon taajuudesta riippuvaan tahtinopeuteen  $n_s$ .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%. \quad (3.5)$$

Moottorin teho  $P$  pyörimisnopeudella  $n$  on

$$P = 2\pi n T = \frac{1}{p} \omega (1 - s) T = \Omega T, \quad (3.6)$$

missä  $T$  on vääntömomentti,  $\omega$  on verkon sähkökulmanopeus,  $\Omega$  on roottorin mekaaninen kulmanopeus. /8/

Valmistajat tarjoavat vakiokoneita useille eri tehoille ja pyörimisnopeuksille. Yleensä vakiokoneitten jännite on 400 V. Suljettu oikosulkumoottori, jolla on riittävä vääntömomentti, on suhteellisen suurikokoinen. Sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa tarvitaan pienikokoinen, tehotiheydeltään suuri ja hyvin jäähtyvä moottori.

Yksi hyvä vaihtoehto voisi ehkä olla Danaher Motionin tarjoama avoin TSP induktiomoottori. Tällainen avoin moottori ei tosin saa kastua, joten moottorikelkkäkäytössä jäähdytysilma olisi ilmeisesti tuotava jonkinlaisen syklonin kautta moottorille. Tämä moottori jäähtyy hyvin avoimen rakenteensa ansiosta. Kokoluokkia löytyy valmistajan ilmoituksen mukaan välillä 1 Nm – 600 Nm yksittäisen asiakkaan tarpeisiin. Jännite-tasoksi voidaan valita moottorikelkan akkukäytössä sopiva ja turvallinen taso väliltä 24 V – 80 V. /13/

Sähkömoottorikelkkäkäytössä oikosulkukoneen yksinkertaisin säätötapa on skalaarisäätö. Alun alkaen taajuudenmuuttajat olivat toteutettu skalaarisäätöperiaatteella. Skalaarisäätö on perusluonteeltaan taajuussäätö. Tässä ohjaustavassa taajuusmuuttajalle tulee ulkoa joko pyörimisnopeus-, vääntömomentti- tai taajuusohje. Pyörimisnopeus- ja vääntömomenttisäätöä varten on yleensä PI-tyyppinen säädin, joka pyörimisnopeussäädössä on tavallisesti toteutettu digitaalisesti. Skalaarisäätöisessä taajuusmuuttajassa ohjaussuureina on taajuus, jännite ja niiden korjaukset virtamittauksilla. Moottorin pätövirtaa arvioimalla voidaan toteuttaa vääntömomenttisäätöä, vaikka varsinaista moottorimallia ei olekaan. Skalaarisäätöinen taajuusmuuttaja siirtyy vähitellen toimintatilasta toiseen, tämän takia se ei reagoi tarkasti vääntömomentti-askelisiin.

Skalaarisäädössä ns. vakiovoalueella pidetään jännitteen ja taajuuden suhde vakiona. Haluttaessa käyttää oikosulkumoottoria nimellisuopeutta suuremmilla nopeuksilla, joudutaan käyttämään kentänheikennystä. Kentänheikennystä tarvitaan, koska jännite on jo nimellisarvossaan. Tällöin taajuutta nostettaessa jännitteen ja taajuuden suhde pienenee. Samoin pienenee myös käänmivuo. Eli vuo pienenee kääntäen verrannollisesti taajuuteen.

Tavallisella oikosulkumoottorilla ei päästä yli kaksinkertaisiin nopeuksiin, koska koneen vääntömomentti pienenee eikä saavuteta enää nimellistehoa, koska kentänheikennyksessä koneen kippivääntömomentti on pieni. Mikäli koneen suunnittelussa on pyritty optimoimaan kippivääntömomentti, niin vakiotehon maksimipyörimisnopeus voi olla jopa nelin- viisinkertainen nimelliseen verrattuna. Skalaarisäätöisiä taajuudenmuuttajia löytyy yleisesti eri valmistajilta, mutta liikkuviin käyttöihin tarkoitettujen taajuudenmuuttajien kirjo on rajatumpi.

Oikosulkumoottori on yksinkertaisuutensa vuoksi rakenteeltaan luja. Oikosulkumoottorin rakenne kestää yleisesti hyvinkin suuria nopeuksia. /4/ /11/

### 3.3 Synkroninen reluktanssikone

Synkroninen reluktanssikone eli sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa synkroninen reluktanssimoottori on rakenteeltaan yksinkertaisin konetyyppi. Viimeaikoina kiinnostus tätä moottorityyppiä kohtaan on kasvanut ja se on voimakkaan tutkimuksen kohteena. Roottori on tavallisesti tehty sellaiseksi, että vaiheinduktanssivaihtelu kiertymän suhteen olisi mahdollisimman suuri. Tämä on saatu aikaan ferromagneettisen roottorin muotoilulla ja laminoinnilla. Pitkittäisinduktanssin ja poikittais-induktanssisuhteen maksimoinnilla saavutetaan myös maksimivääntömomentti.

Synkronisen reluktanssikoneen ilmväliä ei voida kasvattaa ilman, että koneen ominaisuudet eivät huononisi. Tämän on otettava huomioon ajoneuvokäytössä, jossa esiintyy tärinää. Synkronisen reluktanssimoottorin tehokerroin on hieman alhaisempi kuin oikosulkumoottorilla, mutta hyötysuhde on samaa luokkaa. Taajuudenmuuttajat ovat mahdollistaneet sen, että roottori voidaan valmistaa ilman häkkikämiä. Täten koneen hyötysuhde paranee ja roottorin hitausmomentti pienenee. Synkronista reluktanssimoottoria voidaan käyttää virtavektorisäätöisellä taajuudenmuuttajalla. Ristikenttäperiaatteen mukaan vääntömomentti saa maksimiarvonsa, silloin kun virta- ja käämivuovektori ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa. Vektorisäädön idea on ohjaamalla ja säätämällä asettaa virta- ja käämivuovektorit toisiaan vasten. Ohjattavat suureet ovat vektoreita, joilla on suuruus ja suunta. Tämän konetyypin ja kestomagneetikoneiden yhdistelmä on tällä hetkellä suosittu ajoneuvokäytössä. /11/

Synkronireluktanssikoneen teho saadaan yhtälöstä

$$P = 3 \left( U_{sv}^2 \frac{L_d - L_q}{2\omega_s L_d L_q} \sin 2\delta \right), \quad (3.7)$$

missä  $U_{sv}$  on staattorivyöhykkeen jännite,  $L_d$  on pitkittäinen induktanssi,  $L_q$  on poikittainen induktanssi,  $\omega_s$  on staattorin sähköineen kulmanopeus ja  $\delta$  on tehokulma. /11/

Vastaavasti sähköinen vääntömomentti  $T_e$  noudattaa yhtälöä

$$T_e = \frac{3}{4}(L_d - L_q)i_s^2 \sin 2\kappa, \quad (3.8)$$

missä  $\kappa$  on staattorivirtavektorin ja roottorin d-akselin välinen kulma d-q-koordinaatistossa. Maksimivääntömomentti tietyllä staattorivirralla virralla saadaan, kun  $\kappa$  on  $\pi/4$ . /11/

### 3.4 Kestomagneettitahtikone

Kestomagneettitahtikoneessa on kestopagneetit joko upotettu roottoriin tai asennettu roottorin pinnalle. Pinnalle asennettaessa koneen magnetointi-induktanssit ovat pieniä. Pienestä magnetointi-induktanssista taas seuraa hyvä vääntömomentintuottokyky. Roottori voidaan pyrkiä suunnittelemaan ja muotoilemaan siten, että koneen ilmaväliin muodostuisi mahdollisimman sinimuotoinen vuontiheysjakauma. Tällöin vääntömomentti on mahdollisimman suuri.

Kestomagneettitahtikone on kiinnostava konetyyppi sen suuren vääntömomentti-tiheyden ja korkean hyötysuhteen takia. Kestomagneettitahtikoneita on alettu tutkia magneettimateriaalien kehittymisen myötä. Kestomagneettitahtikoneita voidaan käyttää suoraan hitaasti käyvinä ilman vaihteita. Yleensä kestopagneettitahtikoneilla pyörimisnopeusalue pyritään saavuttamaan riittävän suurella nimellistaajuudella. Ajoneuvokäytössä riittävän pyörimisnopeuden saavuttaminen ilman kentänheikennystä voi olla hankalaa.

Kestomagneettitahtikoneilla kentänheikennyksen käyttäminen on usein rakenteesta johtuen vaikeaa. Mikäli koneen induktanssit ovat kovin pieniä, niin kentänheikennystä ei kannata toteuttaa. Kentänheikennys joudutaan suorittamaan magnetoimalla staattori demagnetoivalla virralla, tästä seuraa staattorin magneettihäviöiden kasvaminen. Lisäksi koneen tuottama vääntömomentti pienenee nopeasti.

Kestomagneetit aiheuttavat koneeseen vastasähkömotorisen voiman, joka on suoraan verrannollinen pyörimisnopeuteen. Käytettäessä kestopagneettitahtikonetta kentänheikennyksessä, demagnetoiva virta ei saa katketa.

Demagnetoitavan virran katketessa on taajuudenmuuttajan kyettävä ottamaan vastasähkömotorisen voiman aiheuttama jännite vastaa. Tästä seuraa, että taajuudenmuuttajan on oltava riittävän suuri.

Kestomagneettitahtikoneen sähköinen vääntömomentti saadaan yhtälöstä

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{PM} i_{sq} - (L_{mq} - L_{md}) i_{sd} i_{sq} + L_{md} i_D i_{sq} + L_{mq} i_Q i_{sd}]. \quad (3.9)$$

Yhtälön termeinä ovat kestopagneetin käämivuo  $\psi_{PM}$ , pitkittäisi- ja poikittaisakseleiden magnetointi-induktanssit ja koneen roottorikoordinaatiston mukaiset staattorin ja roottorin mahdollisen vaimennuskäämin virtakomponentit. Yhtälöä hyödynnetään kestopagneettitahtikoneiden säätöteorioiden kehityksessä. /11/ /14/

Upotetuin magneetein varustetulla kestopagneettitahtikoneella voidaan tehdä kohtalaisen laaja kentänheikennysalue. /4/

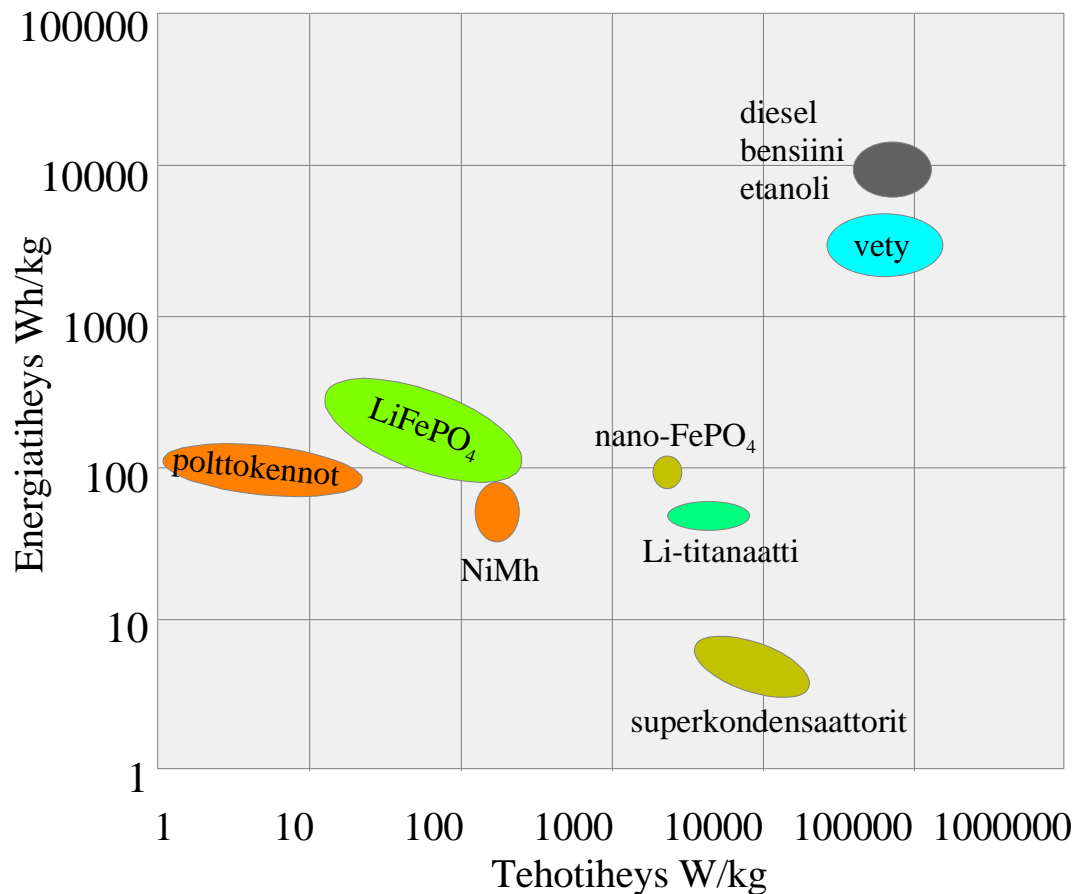
#### 4 AKKU JA SUPERKONDENSAATTORI

Akku on laite joka varastoi tasasähköä. Akkua purettaessa muutetaan kemiallista energiaa tasasähköenergiaksi. Sähköajoneuvokäytössä rajoittavina tekijöinä ovat akkujen kustannukset ja suorituskyky. Akkujen energiatiheys (Wh/kg tai Wh/l) on ollut varsin alhainen. Tästä syystä tarvittava akkukapasiteetti on painanut paljon. Akkujen fyysiset mitat ovat myös olleet rajoittavina tekijöinä sähköajoneuvojen yleistymiselle. Erityisesti sähkökäyttöisen moottorikelkan kohdalla akkujen paino, koko ja turvallisuustekijät, kuten toiminta vikatilanteessa ovat tärkeimmät valintakriteerit.

Akkujen ominaisuuksia verrattaessa on hyvä muistaa, että suurentamalla tehotiheyttä (W/kg tai W/l) voidaan akkua käyttää suuremmilla lataus- ja purkaustehoilla. Tällöin kuitenkin häviöiden pienentämisen takia energiatiheys pienenee. Eli toisen ominaisuuden kasvaessa, toinen ominaisuus yleensä pienenee. Sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa akkupaketti tai niin sanottu akusto koostuu usein useammasta yksittäisestä akusta tai kennosta. Lisäksi tällainen paketti voi sisältää jäähdytysjärjestelmän sekä valvonta- ja suojauspiirejä.

Sähkökäyttöisessä moottorikelkassa akut tulee myös eristää hyvin, koska kylmien akkujen lataaminen on hankalaa. Kylmät akut luovuttavat myös huomattavasti vähemmän energiaa. Sähköajoneuvoissa yleensä käytettävät akkutyypit ovat lyijy Akku, nikkelimetalli-hydridi Akku (NiMH) ja litiumioni Akku (Li-ion). Kuvassa 4.1 on kuvattuna joidenkin akkutyypin sekä energialähteiden energia- ja tehotiheyksiä.

Akut voidaan luokitella kahteen luokkaan eli tehoakkuihin ja energia-akkuihin. Tehoakuista energiaa saadaan lyhyen aikaa suurella virralla. Energia-akuista saadaan paljon energiaa pidemmän aikaa pienemmällä virralla. /4/ /15/



Kuva 4.1. Sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa käytettävien akkutyypin ja energialähteiden energia- ja tehotiheyksiä. /4/

#### 4.1 Lyijyakku

Lyijyakussa on nimensä mukaisesti vähintään kaksi lyijyelektroodia ne ovat rikkihappoa sisältävässä elektrolyytissä. Nykyään akuissa on kuitenkin useampia positiivisia ja negatiivisia levyjä ja niiden välissä voi olla eriste. Yleisesti kutsutaan kennoksi koteloa, missä sijaitsevat elektrodit, eristeet ja elektrolyytti. Kotelo voi olla suljettu, jolloin se on huoltovapaa. Mikäli akuissa on korkit, voidaan niitä huoltaa lisäämällä niihin nestettä. Lisättävä neste on tavallisesti tislattua vettä. Akun ulkopuolella olevat positiiviset ja negatiiviset navat on kytketty elektrodeihin.

Lyijyakkuja käytetään nykyään tyypillisesti esimerkiksi ajoneuvojen käynnistysakkuina, jolloin niiden täytyy pystyä nopeasti luovuttamaan suuri virtamäärä. Tällainen akku on tyypiltään tehoakku. Käynnistysakut voivat antaa hetkellisesti lähemmäs 1000 A. Tällainen akku ei sovellu käytettäväksi kohteissa, joissa on tarvetta purkaa akkua paljon. Purettaessa liikaa tällaista akkua, tapahtuu niin sanottu syväpurkaus, joka lyhentää merkittävästi akun elinikää. Käynnistysakkujen kapasiteetit ovat tyypillisesti noin 40 – 200 Ah.

Trukeissa ja paikalliskäytössä kuten aurinkosähköjärjestelmissä käytettävät akut ovat energia-akkuja ja rakenteeltaan pitkälti samanlaisia. Niissä on suuri kapasiteetti eli ne voivat varastoida enemmän energiaa kuin käynnistysakut, josta taasen saa suuren tehon. Tällainen energia-akku ei kykene luovuttamaan hetkellisesti niin paljon virtaa kuin käynnistysakku. Lyijyakku on painava johtuen huonosta energiatiheydestä, joka on reilusti alle 100 Wh/kg. Tehotiheys sen sijaan on suuri 600 W/kg. Sähkökäyttöiseen moottorikelkkaan lyijyakku soveltuu huonosti suuren painonsa takia. /4/ /15/

#### 4.2 Nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridiakku (NiMH) tuli markkinoille 1980 – 1990-luvulla. Energiatiheys tyypillisesti noin 60 Wh/kg – 80 Wh/kg. Tehotiheys tavallisilla tämän tyyppin akuilla voi olla 250 W/kg. Eräissä käyttösovelluksissa on päästy tehotiheydessä yli 1000 W/kg tasolle. Sähkökäyttöiseen moottorikelkkaan tämän tyyppinen akku soveltuisi ainakin laajan käyttölämpötila-alueensa  $-30\text{ °C} - +45\text{ °C}$  johdosta.



Akku on turvallinen, se ei yllätaudu ja sillä on hyvät syväpurkaus- ja pikalatausominaisuudet. Paino kuitenkin tällä hetkellä rajoittaa tämän akkutyypin käyttöä sähkökäyttöisen moottorikelkan tapauksessa. /4/ /15/

### 4.3 Litiumioniakku

Litium on kevein mahdollinen metalli, ja tämä ominaisuus tekee siitä hyvän materiaalin akkuihin. Litium-ioniakkujen (Li-ion) elektrodeissa on metallioksidista tehty katodi ja hiili-grafiitista tehty anodi. Katodeissa käytetyt materiaalit vaihtelevat paljon. Elektrolyytit ovat erilaisia kiinteitä polymeerejä tai kiinteitä nesteitä. Litium-rautafosfaattiakku ( $\text{LiFePO}_4$ ) yleistyy sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa.

Rauta-fosfaattikennolla syväpurkaukset laskevat kennon elinikää. Tämän takia voidaan joutua rajoittamaan purkauskapasiteettia. Turvallisinta on käyttää varaustasoja välillä 30 – 100 %. Rautafosfaattiakkujen syklinen elinikä vaihtelee eri kennoilla 500 – 3000 välillä. Syklinen elinikä tarkoittaa sitä, kuinka monta kertaa akulle voidaan tehdä lataus-purkaussykli, jossa akkua ladataan 99 %:iin ja puretaan 2.5 %:iin. Matalampia purkauksia rautafosfaattiakku kestää paljon paremmin.

Joidenkin rautafosfaattiakkujen energiatiheys on jopa 200 Wh/kg, mutta tavallisesti se on luokkaa 140 Wh/kg. Li-ioni akkuja kehitetään voimakkaasti ja niiden ennustetaan saavuttavan 5 – 8 vuoden kuluessa energiatiheyden 250 – 300 Wh/kg. European Batteries Oy valmistaa energiatiheydeltään suuria suuntaissärmiön muotoisia litium rautafosfaattiakkuja, kuva 4.2. Kapasiteetiltään suurin akkupaketti on 42 Ah. Monien muiden valmistajien akut ovat muodoltaan lieriöitä. Suuntaissärmiön muotoisten akkujen sijoittaminen voi olla helpompaa moottorikelkkakäytössä.



Kuva 4.2 European Batteries Oy:n perustuoteet. Vasemmalla 42 Ah, 3.2 V LiFePO<sub>4</sub>-kenno ja oikealla kennoista koottu moduuli, joka sisältää akunhallintajärjestelmän. /16/

Tehotiheysoptimoidulla litium-titaaniakuilla on pitkä syklinen elinikä eli syväpurkauksia voidaan tehdä enemmän kuin rautasulfaattiakuilla. Akulla on myös hyvät pikalatausominaisuudet. Energiatiheys on kuitenkin huonompi ja tästä syystä saman energiatason akut ovat kooltaan suurempia. /4/ /15/ Litium-rautafosfaattiakun energiahyötysuhde on hyvä. Esim. European Batteriesin nykyinen kenno tuottaa latauspurkaussyklin hyötysuhteeksi 94.7 % käytettäessä virtaa 0.2 C. Tämä on akun kapasiteetista ampeeritunteina ( $C = 42 \text{ Ah}$ ) laskettua virtaa ampeereina ( $0.2 \text{ C/h} = 8.4 \text{ A}$ ) ja 93.3 % virralla 0.5 C.

Litiumioniakkujen ongelmana on ainakin toistaiseksi se, että kennojen epätasalaatuisuuden vuoksi kennoista koottujen akkujen luotettava toiminta on varmistettava akunhallintajärjestelmällä, joka pitää huolen kennojen tasaisesta latauksesta tai purkauksesta. Tämä on tärkeää, sillä – kuten edellä todettiin – akkutyypin ei kestä syväpurkausta eikä ylilatausta. Jos yhden kennon kapasiteetti on muita pienempi ja akku puretaan tyhjäksi, menee pienikapasiteettinen kenno äärimmäiseen syväpurkaukseen ja sen polariteetti voi jopa vaihtua, mikäli akussa ei ole hallintajärjestelmää. Tällöin kennon elinikä lyhenee radikaalisti. Valmistajien mukaan lähiaikoina ei ole todennäköistä päästä niin tasalaatuisiin kennoihin ja kennokohtaisiin jäähdytysolosuhteisiin, ettei akunhallintajärjestelmää tarvittaisi.

#### 4.4 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit ovat kondensaattoreita, joilla on korkea tehotiheys ja hyvä hyötysuhde. Tällaisen kondensaattorin toiminta muistuttaa akkua, vaikkei siinä tapahdu kemiallista reaktiota. Tehoa vaativissa sovelluksissa käytetään superkondensaattoreissa hiiliperusaineisia elektrodeja, kun taas elektroniikkasovelluksissa käytetään metalliperusaineisia elektrodeja. Superkondensaattoreitten energiatiheys on alhainen ja ne purkautuvat itsestään enemmän kuin akut. Superkondensaattorin hyviä ominaisuuksia ovat laaja lämpötila-alue, nopea purkaus- ja latausaika sekä huoltovapaus.

Superkondensaattoreita sarjaan kytkettäessä tulee käyttää ohjauspiiriä, joka tasoittaa kunkin kondensaattorin toimintaa. Jännite laskee kondensaattoreille tyypilliseen tapaan melko nopeasti.

Superkondensaattorista saatavan energian yhtälö noudattaa kondensaattorin yhtälöä

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (\Delta U)^2, \quad (4.1)$$

jossa  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi ja  $\Delta U$  on jännitteen muutos. Superkondensaattoreiden ominaisuuksia akkuun verrattuna on esitetty taulukossa 4.1. /15/

Taulukko 4.1. Superkondensaattorin ja akun ominaisuuksia.

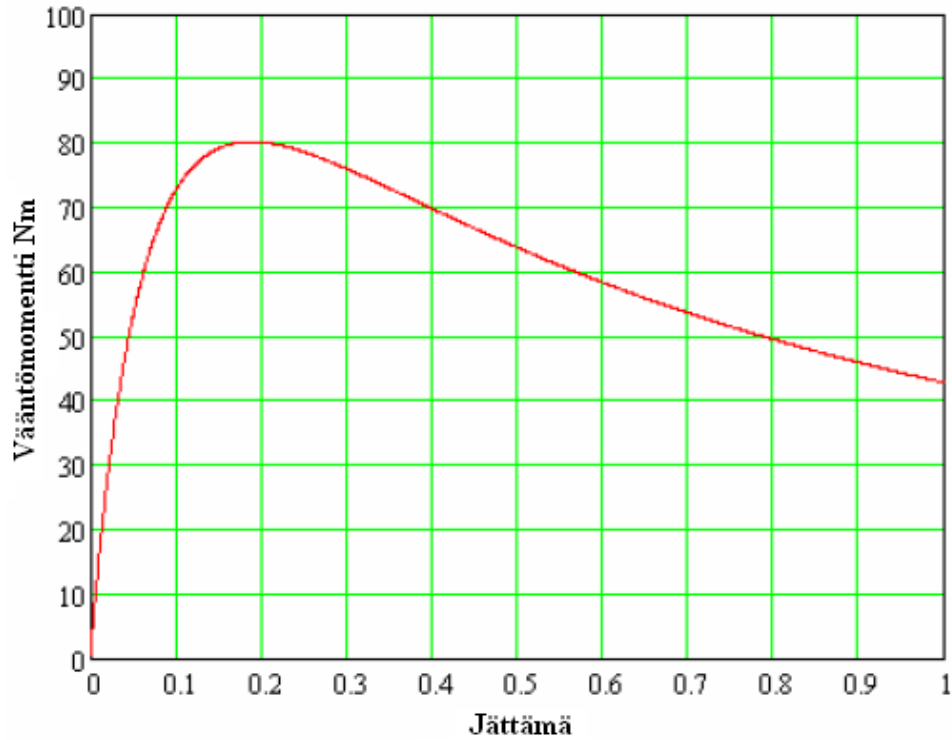
Ominaisuus	Superkondensaattori (sähkökemiallinen)	Akku
Purkausaika	1 – 30 s	0.3 – 3 tuntia
Latausaika	1 – 30 s	1 – 5 tuntia
Energiatiheys Wh/kg	1 – 11	20 – 150
Tehotiheys W/kg	1000 – 10000	50 – 200
Lataus/purkaus-hyötysuhde	0.90 – 0.95	0.70 – 0.95
Käyttölämpötila	–40 °C – +70 °	–20 °C – +60 °
Toimintajaksojen lukumäärä	>500000	500 – 2000

Pienen energiatiheyden vuoksi superkondensaattori ei yksinään sovellu käytettäväksi sähkökäyttöisessä moottorikelkassa. Niitä sovelletaan ajoneuvokäyttöihin muutamien sekuntien pituisiin sykleihin. Moottorikelkan pääenergiavarastoksi superkondensaattori ei missään tapauksessa sovellu. Sitä voitaisiin joissain tapauksissa ehkä käyttää antamaan hetkellistä huipputehoa akun rinnalla. Järjestelystä tulee tosin monesti monimutkainen ainakin, mikäli tarvitaan tasajännitehakkuri superkondensaattorin ohjaukseen. Tällöin saataisiin kuitenkin molempien niin sanottujen energiavarastojen hyvät ominaisuudet käyttöön.

## 5 MOOTTORITYYPIN VALINTA

Helpoiten sovellettavat moottorityypit voisivat olla joko oikosulkumoottori tai kestmagneettitahtikone. Molemmilla konetyypeillä on oikein suunniteltuna lähestulkoon samansuuruinen maksimivääntömomentti. Kestomagneettitahtikoneet maksavat enemmän johtuen kalliimmista materiaaleista. Ne tarvitsevat myös vektoriohjauksen. Kestomagneettitahtikoneella on pienillä nopeuksilla suuri vääntömomentti, mikä tekee siitä myös varteenotettavan vaihtoehdon sähkökäyttöisen moottorikelkan moottoriksi. Vektorisäädöllä kestmagneettitahtikoneen suuren vääntömomentin hallinta pienillä nopeuksilla on myös ehkä hieman oikosulkukoneen väännön hallintaa helpompaa.

Sähkömoottorikäyttöisen moottorikelkan moottorityypiksi valitaan kuitenkin oikosulkumoottori sen yksinkertaisen rakenteen ja säätötavan vuoksi. Moottorina voisi ehkä karkeasti arvioiden olla Anastasia Galkinan diplomityössä käytetty nimellisteholtaan 10 kW:n Danaher Motionin avoin TSP oikosulkumoottori. Tämän koneen nimellisjännite on 34 V ja nimellinopeus  $2300 \text{ min}^{-1}$ . Koneen vääntömomentti jättämän funktiona on esitetty kuvassa 5.1. Moottorin nimellinen vääntömomentti on 41 Nm. Kuvasta nähdään, että koneen suurin vääntömomentti vakiovuolla on noin 80 Nm. /17/



Kuva 5.1. 10 kW:n Danaher Motionin avoimen TSP oikosulkumoottorin vääntömomentti jättämän funktiona. /13/

Moottorin nimellisa nopeudella  $2300 \text{ min}^{-1}$  saadaan ilman variaattoria 2:1 toisiovälityksen kautta vetorattaan nimellisa pyörimisa nopeudeksi  $1150 \text{ min}^{-1}$ . Mikä antaa halkaisijaltaan 200 mm vetorattaalla moottorikelkalle nopeudeksi vaatimattoman 43 km/h.

Nopeuden kasvattaminen vaatisi nimellisa nopeudeltaan suuremman moottorin tai mahdollisuuksien mukaan kentänheikennyksen käyttämistä. Tämän kokoluokan moottorin tarvitseman energiamäärä on tällä hetkellä ja rajoitetulla toiminta-ajalla varastoitavissa akkuihin.

Luvussa 2.3 polttomoottorikäyttöisellä moottorikelkalla samalla toisiovälityksellä saatiin liikkeelle lähdössä vetorattaan vääntömomentiksi 81,6 Nm ja välityssuhteen vaihduttua vetorattaan vääntömomentti on 85,2 Nm.

Kyseessä olevalla sähkömoottorilla nimellisa vääntömomentilla vetorattaan vääntömomentiksi saadaan 82 Nm, Mikä vastaa polttomoottorikäyttöisen kelkan vääntömomenttia. Vetorattaan maksimiva ääntömomentti voi olla noin 160 Nm.

Valitun moottorin käyttäminen edellyttää vielä tarkempia laskelmia, kuten moottorin jäähtymisen tarkastamista. On luultavaa, että juuri tämä kone ei termisesti aivan täytä moottorikelkan kuormituskykyä asettamia vaatimuksia, vaikka moottori periaatteessa pystyykin samaan suorituskykyyn kuin kelkan alkuperäinen polttomoottori. Samaa moottorisarjaa on kuitenkin saatavana suojajännitetasolla myös suuremmissa kokoluokissa, joten tästä konesarjasta varmasti kelkkakäyttöönkin soveltuva kone voidaan löytää. Moottori on rakenteeltaan avoin, eli kone ei saa käytön aikana kastua. Tämä on otettava huomioon mm. jäähdytysilmaa johdattaessa.

Danaher Motion tarjoaa myös liikkuviin käyttöihin suunniteltuja taajuusmuuttajia, joissa on MOSFET-päätteaste. Tällaisia yhdistelmiä on käytössä mm. teollisuuden paljon soveltamissa sähkökäyttöisissä haarukkatrukeissa. Kun moottorin laakeriin integroidaan yksinkertainen pyörimisnopeusanturi, voidaan epätahtikoneelle suorittaa riittävän tarkkavektorisaatio ja saada esim. liikkeellelähdössä tarvittava suuri vääntömomentti tuotuksi hallituksi.

Eräs tulevaisuuden kätevä skenaario sähkökäyttöiselle moottorikelkalle olisi suoraan telaa vetävän rummun sisään rakennettava ulkonapakestomagneettimoottori. Täysin suljetuista kestopagneettisähkökoneista pystytään nimellisarvoina ottamaan helposti 20 kPa jännitystermejä /14/. Kun rummun halkaisija on 20 cm ja pituus 38 cm, saadaan esim. 60 %:n aktiivipituudella (40 % varataan vyyhdenpäille ja rummun laakeroinnille) ja 16 cm ilmväliahkaisijalla 20 kPa:n jännityksellä 180 Nm vääntömomentti, jonka pitäisi riittää hyvin kelkan liikkeelle saattamiseen. Pintamagneettikoneilla voi pienen tahti-induktanssin seurauksena olla kippivääntömomenttia jopa viisinkertaisesti nimellisen vääntömomentin verran, joten lähtövääntömomenttia riittäisi varmasti.

Kestomagneettirumpumoottorin etuja olisivat korkea hyötysuhde ja mekaanisen välityksen häviöiden välttäminen, joten se voisi hyvinkin olla mielenkiintoinen kehityskohde sähkökäyttöistä moottorikelkkaa pohdittaessa.

## 6 AKKUTYYPIN VALINTA

Edellä esitettyjen vaatimusten ja akkujen ominaisuuksien perusteella valitaan sähkökäyttöisen moottorikelkan akkutyyppiä litium-rautafosfaattiakku ( $\text{LiFePO}_4$ ). Tarvittava akkupaketti voidaan koota suuntaissärmiön muotoisista European Batteries Oy:n  $\text{LiFePO}_4$  akuista. Akun koko varausalueesta voidaan käyttää hyödyksi 70 %. Näillä akuilla on korkea hyötysuhde, joka vaihtelee virrasta riippuen välillä 94,7 % – 93,3 % välillä. Energiatiheys on myös korkea 138 Wh/kg.

Akun mitoittamisen perusteeksi otetaan sähkökäyttöisen moottorikelkan vähimmäiskäyttöaika 1 tunti. Sähkömoottorin keskimääräiseksi tehoksi otetaan nimellinen 10 kW.

Kooltaan esimerkiksi 10 kW:n sähkömoottorin tunnin käyttöaikana tarvitsema energia on hyötysuhteesta riippuen noin  $10/0,8 \text{ kWh} = 12,5 \text{ kWh}$ , jakamalla tämä 0,7:llä eli kapasiteetillä, joka voidaan koko akun kapasiteetistä käyttää. Saadaan tarvittavaksi energiaksi 17,85 kWh. Tämä voidaan toteuttaa kytkemällä yhteen 8 – 9 kappaletta 2.15 kWh, 42 Ah ja 51,2 V akkua.

Koko akkupaketin energia on 17.2 – 19.4 kWh, varaus on 336 – 378 Ah ja paino on 124 – 140 kg. Kelkan alkuperäinen polttoainesäiliö painaa noin 50 kg, joten akkujen myötä kelkan omapaino kasvaa lähes 100 kg. Akkupaketin jännite on 51,2 V. Jännitetasoa voidaan muuttaa kytkemällä akkuja sarjaan.

Tulevaisuudessa akkujen energiatiheyden kasvaessa voidaan parantaa suorituskykyä ja kasvattaa toimintasädetä.

## 7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia toteuttaa sähkökäyttöinen moottorikelka. Työssä on käyty läpi tyypillisen moottorikelkan nykyinen rakenne ja pyörimisnopeusalueet. Polttomoottorin tehon, vääntömomentin, kulutuksen sekä moottorikelkan välityssuhteiden perusteella on arvioitu tarvittavan sähkömoottorin vääntömomenttia ja tehontarvetta.

Työssä on esitelty soveltuvat sähkömoottori- ja akkutyypit ja kerrattu näiden tärkeimmät ominaisuudet. Työn tuloksena on valittu sähkömoottorityypiksi oikosulkumoottori ja akkutyypiksi litium-rautafosfaattiakku.

Työ antaa hyvät edellytykset sähkökäyttöisen moottorikelkan jatkotutkimukselle ja tarkemmalle suunnittelulle. Sähkömoottorikäyttöjen ja varsinkin akkujen kehittyessä sähkökelkkojen suorituskyky ja toiminta aika kasvavat.



**LÄHTEET**

- /1/ Finlex. Ajoneuvolaki 11.12.2002/1090. 16§ Maastoajoneuvo.  
[http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20021090?search\[type\]=pika&search\[pika\]=Ajoneuvolaki%2011.12.2002%2F1090](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20021090?search[type]=pika&search[pika]=Ajoneuvolaki%2011.12.2002%2F1090). Viitattu 22.5.2010.
- /2/ SES Snow Mobile. <http://queanbeyan.ses.nsw.gov.au/gallery/Alpine-Search/>  
Viitattu 10.6.2010
- /3/ Martti Rautavaara. Lumikenttien kulkurit. ©Alfamer Oy. 2008. Tallinna: Tallinna Raamatutrükikoda. ISBN 978-952-472-097-7
- /4/ Biomera Oy. Sähköajoneuvot suomessa – selvitys. 2009.  
[http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot\\_Suomessa-selvitys.pdf](http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf). Viitattu 22.5.2010.
- /5/ <http://sc-ooter.50megs.com/derestriction.htm> Viitattu 10.6.2010
- /6/ Bishop Christopher, Marotta James. Snowmobile Handbook. Chilton®. 1999. West Chester: W.G.Nichols, Inc. ISBN 0-8019-9124-2
- /7/ Erik Ahmasalo. Kytkin/variaattori. MK-lehti 1994. No 5.  
<http://www.mk-lehti.fi/jutut/kytkin1.asp>. Viitattu 22.5.2010.
- /8/ Erik Ahmasalo. KYTKIN - voimansiirron sydän. MK-lehti 1995. No1.  
<http://www.mk-lehti.fi/jutut/kytkin2.asp>. Viitattu 22.5.2010
- /9/ Erik Ahmasalo. Telamatto, muutakin kuin kumi-hihna. MK-lehti. 1997. No 4.  
<http://www.mk-lehti.fi/jutut/telamatto.asp>.  
Viitattu 22.5.2010

- /10/ Rotax 377 UL - 35 HP. <http://www.leadingedge-airfoils.com/pdf/377info.pdf>. Viitattu 10.6.2010
- /11/ Pyrhönen Juha. Sähkökäytöt luentomateriaalia 2005-2006. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 302 sivua.
- /12/ Braccesi Claudio, Cianetti Filippo, Ortaggi Fabio. Modelling of a snow track vehicle. Institute of Energetics, Faculty of Engineering, University of Perugia, Italy. <http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/euro/1996/EURO9618.PDF>. Viitattu 9.6.2010
- /13/ Danaher motion. AC induction Truck Motor. 2008 [http://www.danahermotion.co.jp/products/files/AC\\_motor\\_sec.pdf](http://www.danahermotion.co.jp/products/files/AC_motor_sec.pdf). Viitattu 22.5.2010.
- /14/ Pyrhönen Juha, Jokinen Tapani, Hrabovcová, Valéria. 2008, Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-69516-6, 512 sivua.
- /15/ Alanen Raili, Koljonen Tiina, Hukari Sirpa, Saari Pekka. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita – Research Notes: 2199. 2003. ISBN 951-38-6160-0 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>. Viitattu 4.6.2010
- /16/ European Batteries. <http://www.europeanbatteries.com/solutions/cells>. Viitattu 10.6.2010
- /17/ Galkina Anastasia. System Investigation for Hybrid Electric Vehicle. 2008. Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Electrical Engineering. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200805221435>. Viitattu 9.6.2010

### ROTAX 377 UL - 35 HP

(Please Note: The ROTAX 377 Engine is No Longer in Production)  
 35 hp @ 6500  
 2 Cylinder / 2 Stroke Piston Ported

**35 hp @ 6500**  
**2 Cylinder / 2 Stroke Piston Ported**

Bore/Stroke: 62/61mm  
 Displacement: 388.3  
 Ignition System: Bosch Flywheel Magneto  
 Generator 12V 110 W + 30W  
 Carburetor: 36mm Bing Double Float Carburetor with hand lever or alternatively cable choke  
 Starter: Rewind or Electric  
 Cooling: Free Air or Fan Cooled  
 Lubrication: 2 stroke oil in fuel; mixing ratio: 50:1  
 Fuel: Premium unleaded NOT BELOW MON 88 OR RON 90 (octane rating)

Description	Weight
Block F.C.	60.6 lbs.
Carburetor	2.5 lbs.
Exhaust	11.0 lbs.
Redrive	10.5 lbs.
<b>Total</b>	<b>84.6 lbs.</b>

Dimensions given in millimeters. To convert to inches multiply by .03937.

#### PERFORMANCE

#### TORQUE

#### FUEL CONSUMPTION

Independent SERVICE CENTRE

**LEADING EDGE AIR FOILS, LLC 1-800-532-3462 info@leadingedgeairfoils.com**  
**www.leadingedgeairfoils.com store.leadingedgeairfoils.com**

Kuva 1. Rotax 377 moottori. /10/