

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Sähkötekniikan laitos

Matti Liukkonen

HYBRIDITYÖKONEEN TEHOELEKTRONIIKKAKOMPONENTTIEN
TOIMINNALLINEN SIMULOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 30.5.2008

Työn valvoja Professori Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja Tekn. tri Jussi Suomela

Tekijä:	Matti Liukkonen
Työn nimi:	Hybridityökoneen tehoelektronikkakomponenttien toiminnallinen simulointi
Päivämäärä:	30.5.2008
	Sivumäärä: 96
Tiedekunta:	Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Professori:	S-81 Tehoelektronikka
Työn valvoja:	Professori Jorma Kyyrä
Työn ohjaaja:	Tekn. tri Jussi Suomela
<p>Tämä työ käsittelee hybridityökoneen tehonsiirtoa sarjahybridijärjestelmässä. Kirjallisuustutkimuksena käydään lävitse erilaisia hybridijärjestelmiä, polttokennojärjestelmää ja täyssähköistä järjestelmää ajoneuvokäytöissä. Kirjallisuustutkimuksessa pohditaan eri ajoneuvokäyttöjen tehonsiirron toimintaa ja eri järjestelmien etuja sekä heikkouksia. Työssä esitellään hybridijärjestelmän tehonsiirrosta ja energian varastoinnissa käytettävät komponentit, komponenttien tarkoitus ja toiminta. Työssä kehitetään hybridityökoneen sarjahybriditehonsiirtojärjestelmälle yleistä simulointimallia, joka mahdollistaa sarjahybridijärjestelmän ohjauksen kehittämisen ja eri valmistajien toimittamien osakomponenttien toimivuuden testauksen. Simulointimalli toteutetaan Matlab Simulink -ohjelmistolla ja siinä tavoitellaan 20 Hz:n aikatason tarkkuutta.</p>	
Avainsanat:	Hybridijärjestelmä, työkone, tehoelektronikka, toiminnallinen, simulointi, sähkömoottori, DC – DC – muuttaja, vaihtosuuntaaja, superkondensaattori, polttokenno, akku, polttomoottori, hyötyjarrutus

HELSINKI UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

ABSTRACT OF THE
MASTER`S THESIS

Author:	Matti Liukkonen	
Name of the Thesis:	Functional Simulations of Power Electronics Components in Hybrid Machinery	
Date:	May 30, 2008	Number of Pages: 96
Faculty:	Faculty of Electronics, Telecommunication and Automation	
Professorship:	S-81 Power Electronics	
Supervisor:	Professor Jorma Kyyrä	
Instructor:	D.Sc. (Tech.) Jussi Suomela	
<p>This thesis is about series-hybrid power transmission in heavy machinery. Different topologies in vehicle drives are introduced in the literature research. The topologies introduced are series, parallel and series-parallel -hybrid systems, fuel cell system and full electric system. The literature research considers operation of different topologies, their benefits and weaknesses. Primary and secondary power generation components, and also power transfer components of hybrid system are introduced, and their operations are reviewed. This thesis presents functional simulation model for series-hybrid power transfer system. The simulation model should provide possibility for development of power control in series-hybrid system, and also testing of suitable components from different manufacturers. Simulation model is created with Matlab Simulink software, and it aims at 20 Hz time domains accuracy.</p>		
Keywords:	Hybrid system, heavy machinery, power electronics, functional, simulation, electric motor, DC – DC – converter, inverter, supercapacitor, fuel cell, battery, internal combustion engine, regenerative braking	

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun tehoelektroniikan laboratoriossa HybDrive – projektille, joka on osa sähköisen työkoneen hybridienergiajärjestelmän simulointi- ja ohjausprojektia.

Työn ohjaajana toimi automaatio- ja systeemitekniikan laitokselta tohtori Jussi Suome-la, jota haluan kiittää hyvästä perehdytyksestä hybridi- ja työkonetekniikkaan. Työn valvojana toimi professori Jorma Kyyrä, jolle suuret kiitokset asiantuntevista neuvoista, diplomityön sisällön kommentoinnista ja oikoluvusta.

Kiitokset HybDrive – projektissa mukana olleille henkilöille ja yhteistyöyrityksille, joilta sain vinkkejä ja kehitysehdotuksia työhöni liittyen. Kiittäessä ei tule unohtaa tehoelektroniikka laboratorion väkeä, joilta myös sain tukea kirjoitustyöhön, sekä ystäviäni ja läheisiä, jotka ovat minua diplomityön tekoaikana tukeneet.

Espoossa toukokuussa 2008

Matti Liukkonen

Sisällysluettelo

Alkulause	4
Symboli- ja lyhenneluettelo	7
1 Johdanto	9
2 Hybridijärjestelmä.....	11
2.1 Hybridijärjestelmätopologioiden vertailua ajoneuvotarpeita ajatellen	11
2.1.1 Sarjahybridijärjestelmä	15
2.1.2 Rinnakkaishybridijärjestelmä	16
2.1.3 Sarja – rinnakkaishybridiyhdistelmä.....	18
2.1.4 Polttokennoajoneuvo.....	20
2.1.5 Sähköajoneuvo	21
3 Hybridikäyttöisen työkoneen tehonsiirtokomponenttien esittely	23
3.1 Sähkömootorivaihtoehdot hybridikäyttöisen työkoneen ajomootorina.....	23
3.1.1 Yleisesti.....	23
3.1.2 Tasavirtakoneet	24
3.1.3 Epätahtikoneet.....	25
3.1.4 Kestomagnetoidut tahtikoneet	28
3.1.5 Kestomagneettiaavusteiset tahtireluktanssikoneet.....	30
3.1.6 Vierasmagnetoidut tahtikoneet	32
3.1.7 Vaihtoreluktanssikoneet.....	33
3.1.8 Hyötysuhdekartat ja linkkilista	36
3.2 DC – DC – muuttajat	38
3.2.1 Yleisesti.....	38
3.2.2 Mahdollisia DC – DC – muuttajatopologioita hybridijärjestelmän tehonsiirtoon	42
3.3 Vaihtosuuntaaja eli DC – AC – muuttaja ja generaattorisilta hybridijärjestelmän osana	44
3.4 Superkondensaattorit.....	46
3.5 Polttokennot	48
3.6 Akut.....	53

3.7	Polttomoottori hybridijärjestelmässä	56
3.8	Hyötyjarrutus ja potentiaalienergian hyödyntäminen	58
4	Hybridijärjestelmän komponenttien simulointi	60
4.1	DC-DC – muuttajien simulointimallin toteuttaminen.....	61
4.1.1	DC-DC – muuttajansimulointimallin toiminnan havainnollistaminen..	64
4.1.2	Riittävän lyhyen diskreetointiajan etsiminen.....	66
4.2	Generaattorisillan ja generaattorin simulointimalli	72
4.3	Kuormituksen mallintaminen simuloinneissa.....	73
4.4	Superkondensaattorimoduulin simulointimalli	74
4.5	Jarrukatkojan simulointimalli	75
4.6	Esimerkki ECU: n sisältämästä ohjauksesta	76
4.7	Sarjahybridijärjestelmän tehonsiirron esimerkkisimulointi	77
4.8	Simulointimallin kehittäminen.....	81
5	Tehonsiirron hyötysuhdemittaukset.....	83
6	Yhteenveto	86
	Lähdeluettelo.....	88
	Liitteet.....	94
	Liite 1 Buck-boost muuttajan hyötysuhteen mittadata laskevana katkojana.....	94
	Liite 2 Buck-boost muuttajan hyötysuhteen mittadata nostavana katkojana	95

Symboli- ja lyhenneluettelo

Symbolit

C	Kapasitanssi
D	Pulssisuhde
E	Energia
g	Maan vetovoiman putoamiskiihtyvyys
m	Massa
P	Teho
R	Resistanssi
r_C	Kondensaattorin sarjavastus
r_L	Induktanssin sarjavastus
t	Aika
U_e	Energiavarastonjännite
U_j	Jännitevälipiirinjännite
U_{max}	Energiavaraston maksimikäyttöjännite
U_{min}	Energiavaraston minimikäyttöjännite
v	Nopeus
ω_{max}	Maksimi pyörimisnopeus
ω_{nom}	Nimellinen pyörimisnopeus

Lyhenteet

AC	Vaihtosähkö
BEV	Battery Electric Vehicle, täyssähköinen ajoneuvo
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
DC	Tasasähkö
ECU	Electrical Control Unit, sähköisten alijärjestelmien ylemmän tason ohjaus
FC	Fuel Cell, polttokenno

FCV	Fuel Cell Vehicle, polttokennoajoneuvo
GM	General Motors
HEV	Hybrid Electric Vehicle, hybridiajoneuvo
ICE	Internal Combustion Engine, polttomoottori
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, eristetyllä hilalla varustettu puolijohdekytkin
IPM	Interior Permanent Magnet motor, sisäkestomagneettimoottori
Li-Ion	Litium -ioniakku
Li-P	Litium -ioni polymeeri akku
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MR-PM	Magnetic Ring Permanent magnet Motor, magneettirengaskestomagneettimoottori
NdFeB	Neodyymi -rauta-booriseos
NEDC	New European Driving Cycle
NiMH	Nikkelimetallihydridi -akku
NO _x	Typpioksidi
PEM	Polymer Electrolyte Membrane fuel cell, polymeerielektrolyytimembraanipolttokenno
PID	Proportion, Integration and Derivative, suhde-, integrointi, ja muutossäättäjä
PRM	Permanent magnet assisted Reluctance Motor, kestomagneettia-vusteinen tahtireluktanssimoottori
SmCo	Samariumkoboltti
SPM	Surface Permanent Magnet motor, pintakestomagneettimoottori
SRM	Switched Reluctance Motor, vaihtoreluktanssimoottori
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno
THD	Total Harmonic Distortion
ZOH	Zero Order Hold

1 Johdanto

Fossiilisilla polttoaineilla toimivien ajoneuvojen tuottama kasvihuonepäästökuorma on luonut tarpeen etsiä vaihtoehtoisia toteutustapoja ajoneuvojen tehontuotannolle. Ajoneuvojen hiilidioksidipäästöissä on huomattavaa pienennyspotentiaalia, mikä on realisoitavissa jos ajoneuvotekniikassa pystytään ottamaan käyttöön energiatehokkaampia ja vähemmän saastuttavia ratkaisuja. Ajoneuvojen tuottaman suuren kasvihuonepäästöosuuden vuoksi olisi ihanteellista tavoitella ajoneuvoissa täysin päästötöntä tekniikkaa. Tällaisilla tavoitteilla on suuri merkitys siihen millaiseksi ihmiskunta muokkaa parhaillaan ja tulevaisuudessa elinympäristöään. Siksi tulevaisuuden ajoneuvojärjestelmiä tutkittaessa tavoitteina ovat energiatehokkuus, vaihtoehtoiset energialähteet ja -varastot sekä näiden kautta päästöjen pienentäminen. Kaikissa mahdollisissa ajoneuvojen topologiaratkaisuissa ei tavoitella suoraan täysin päästötöntä ajoneuvoa, vaan kehitetään ratkaisuja, jotka eivät kohtaa ongelmia esimerkiksi luotettavuudessa tai infrastruktuurin puutteessa. Päästöjä vähentäviä tavoitteita pyritään saavuttamaan lisäämällä ajoneuvoihin sähkömoottoreita, tehoelektroniikkaa sekä uudentyyppistä voimansiirtoa, joilla pystytään toteuttamaan tehonsiirto useammasta teholähteestä ajoneuvon akselille ja samalla optimoidaan käytössä olevan polttomoottorin hyötysuhdetta. Uusilla ratkaisuilla olisi tarkoitus mahdollistaa energialähteiden sekä varastojen käyttö juuri niille parhaiten sopivalla hyötysuhteen alueella ja lisäksi mahdollistaa hidastettaessa menetettävän liike-energian talteenotto energiavarastoihin, mikä nykyisissä ajoneuvoratkaisuissa jää kokonaan hyödyntämättä.

Tämä diplomityö on osa sähköisen työkoneen hybridienergiajärjestelmän simulointi- ja ohjausprojektia HybDrive: ä. HybDrive -projekti toteutetaan yhteistyössä sähkötekniikan, koneenrakennustekniikan, automaatio- ja systeemitekniikan laitosten ja yhteistyöyritysten henkilöstön kanssa. Projektissa on tavoitteena simuloida ja toteuttaa raskaan työkoneen sarjahybriditehonsiirtojärjestelmä. Simuloinneissa on tarkoituksena saavuttaa sarjahybridijärjestelmästä yleistä kokonaisuutta kuvaava simulointimalli, jota voidaan käyttää työkoneen tehontuotannon ohjauksen suunnitteluun ja yksittäisistä

komponenteista tarkempia simulointimalleja, jotka kuvaavat paremmin komponenttien todellista toimintaa. Sarjahybridijärjestelmän yleisen simulointimallin on tarkoitus mahdollistaa erilaisten komponenttien ja topologioiden toimivuuden testaus simuloinnalla. Yleisessä simulointimallissa on tarkoituksenmukaista saavuttaa helppo muokattavuus, jotta mallilla voidaan testata eri valmistajien tarjoamia komponenttinvaihtoehtoja pelkästään simulointimallin parametreja muuttamalla. Simulointimallien toimivuutta on tarkoitus projektin aikana verifioida yksipyörätestasemassa ja saatua tietoa on myöhemmässä vaiheessa tarkoitus käyttää hyödyksi sarjahybridijärjestelmän kehittämisessä. Diplomityö esittelee pääsuuntaukset eri hybriditekniikatopologioista ja käy lävitse tehonsiirrossa käytettävät komponentit. Toteutettu simulointimalli sisältää jännite- ja virtaohjatut DC – DC – muuttajalohkot, superkondensaattori, kuormitustieto ja jarrukatkojalohkot sekä myös generaattorisilta – generaattorilohkon.

Luvussa kaksi tarkastellaan eri hybriditehonsiirto perustopologioiden, polttokennojärjestelmän ja täyssähköisenjärjestelmän etuja ja heikkouksia ajoneuvokäytöissä. Eri järjestelmien tehonohjausperiaatteita tuodaan esille ja järjestelmien toimivuuksia pohditaan. Luvussa kolme käydään lävitse hybridityökoneessa käytettävät komponentit, niiden tarkoitus ja toiminta. Luvussa käsitellään eri sähkömoottorivaihtoehtojen toimivuuksia, tuodaan esille mahdollisia DC–DC -muuttaja topologioita, käsitellään vaihtosuuntaustekniikkaa, superkondensaattorimoduulia, akkuteknologioita, polttomoottoritekniikkaa sekä pohditaan hyötyjarrutuksen ja potentiaalienergian hyödyntämistä hybridityökoneessa. Luvussa neljä esitellään simulointimallin tavoitteet, simulointimallin toteutus ja esitellään simulointimallin toimintaa. Luvussa viisi on yhteenveto työntulokista.

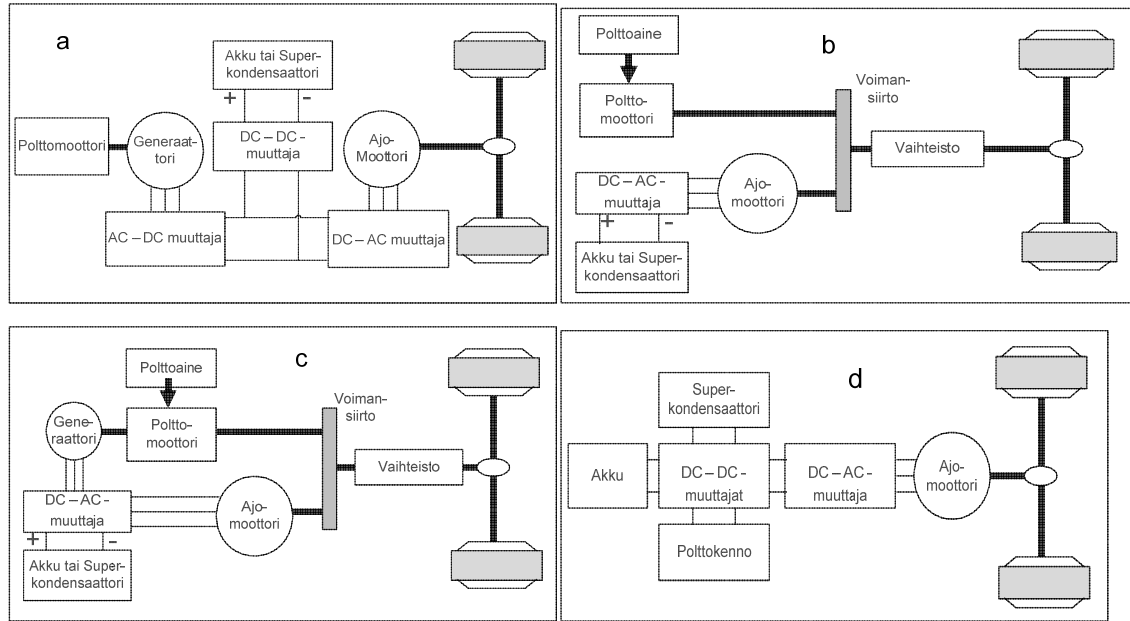
2 Hybridijärjestelmä

Erilaisilla hybridijärjestelmillä tavoitellaan päästöjen vähentämistä, energiansäästöä, uutta toiminnallisuutta ja suorituskykyä nykyiseen tekniikkaan verrattuna. Päästöjen vähentämistä tavoitellaan, koska hiilidioksidin tuotto kulkuvälineillä arvioidaan olevan jopa 32 prosenttia koko ihmiskunnan tuottamasta hiilidioksidipäästökuormasta [3, v.1999]. Toisaalta energiansäästö on suorassa suhteessa myös päästöjen vähennystavoitteeseen. Hallitumpaa ohjausta ja uutta toiminnallisuutta tuo mukanaan digitaali-tekniikan mukaantulo. Nykyistä parempaa suorituskykyä luo sähkömoottorin käyttö ajomoottorina.

2.1 Hybridijärjestelmätopologioiden vertailua ajoneuvotarpeita ajatellen

Hybridiajoneuvojärjestelmien toteutustopologioita löytyy kirjallisuudesta useita. Yleisimmin kuitenkin vastaan tulevat juuri sarjahybridi-, rinnakkaishybridijärjestelmä ja näiden kahden eriaisteiset yhdistelmät sarja – rinnakkaishybridijärjestelmät, jota markkinoilla tällä hetkellä olevat henkilöautot edustavat. Näiden lisäksi kehitetään polttokennohybridijärjestelmiä, kevyitä hybridijärjestelmiä ja pelkästä akusta energiansaavia sähköajoneuvoja. Kuva 2.1 esittelee erilaisia yksiakselisia hybridijärjestelmiä.

HybDrive -projektissa toteutettava diplomityö tähtää sähköisen tehonsiirtojärjestelmän mallintamiseen sarjahybridijärjestelmässä, johon voidaan liittää lisävoimanlähteeksi polttokennosto. Simulointimallissa tavoitteena oleva helppo muokattavuus mahdollistaa myös muiden hybriditopologioiden vertailun. Tässä kappaleessa esitellään ja vertaillaan olemassa olevia hybridijärjestelmätopologioita ja pohditaan eri ratkaisujen etuja sekä heikkouksia.



Kuva 2.1 a) sarjahybridijärjestelmä, b) rinnakkaishybridijärjestelmä, c) sarja- rinnakkaishybridijärjestelmä, d) polttokennojärjestelmä

Sähköisinä energiavarastoina hybridijärjestelmässä voivat toimia erityyppiset akut, superkondensaattorit tai huimamassat. Kondensaattoreiden nopean tehontuotantokyvyn ansiosta ne toimivat nopeina energialähteinä transienteissa kuorman muutoksissa. Tämä mahdollistaa nopeamman reagoinnin kuormituksen muutokseen kuin mitä perinteisissä polttomoottoriajoneuvoissa on totuttu. Akkujen tehontuotanto on hitaampaa ja lisäksi niiden eliniän kannalta niitä olisi edullista kuormittaa tasaisemmin. Akkujen elinikä sekä purkaus- latauskyklien kesto on ollut pitkään mm. sähköajoneuvojen yleistymisen esteenä. Akkujen energiatilanteen niin salliessa, on hybridiajoneuvoilla mahdollista sammuttaa polttomoottori ja käyttää liikkumiseen akkuihin varastoitunutta energiaa. Huimamassa on suurihitausmassainen sähkömoottori. Sen tehontuotannossa päästään taajuusmuuttajatekniikassa totuttuihin kymmenien millisekunttien vasteaikoihin.

Hybridijärjestelmissä käytetään usein DC – DC – muuttajia eri sähköisten energialähteiden välillä. Tämä mahdollistaa energiavarastojen ja -lähteiden koon optimoinnin kustannusten kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. On myös mahdollista jättää kyseiset DC – DC – muuttajat pois järjestelmästä (ns. suoravetoinen järjestelmä) ja kytkeä akku tai kondensaattorit suoraan DC – AC – muuttajien jännitelähteiksi. Tällaisia jär-

jestelmiä on maailmalla testattu, mutta näissä järjestelmissä on omat rajoitteensa. Akkujen ja kondensaattoreiden jännitteet eivät vastaa toisiaan niitä purettaessa samalla energiamäärällä. Toisin sanoen kondensaattorin jännite laskee enemmän kuin akun jännite näiden latausta purettaessa. Pelkkiä akkuja käytettäessä on ongelmana nopean tehontuotantokyvyn puute ja pelkillä superkondensaattoreilla jännitteen jakautuminen eri kennojen välillä. Lisäksi suora rinnankytkentä ei mahdollista energianvarastoinnin kontrollointia näiden komponenttien välillä. Tasainen varaustila superkondensaattorissa ja akussa vaikuttaa positiivisesti näiden elinikään.

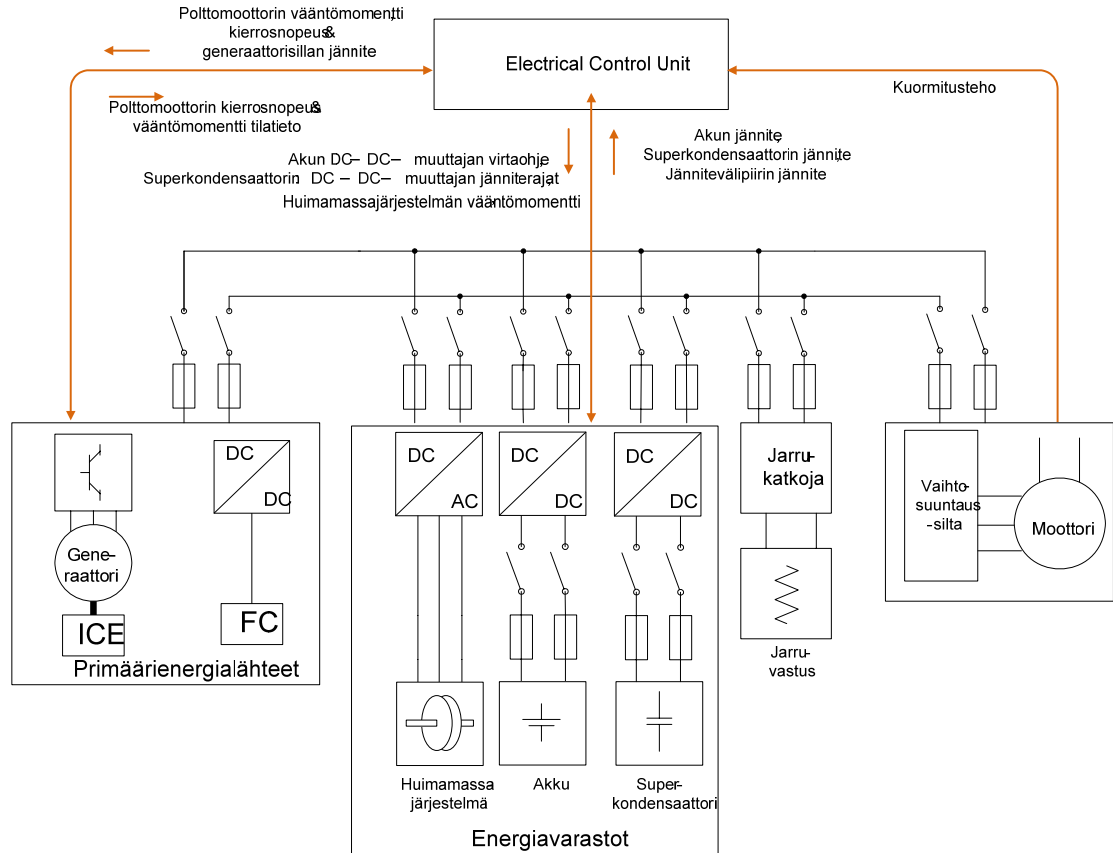
Hybridijärjestelmä yhdistää polttomoottorin ja sähkömoottorin parhaita ominaisuuksia. Polttomoottorin huonona puolena on vääntömomentin tuottokyky pienillä käyntinopeuksilla ja huono hyötysuhde osakuormilla. Riittävän vääntömomentin tuottaminen ajoneuvon kiihdyttämistä varten on kasvattanut nykyisten ajoneuvojen polttomoottorit suhteettoman suuritehoisiksi. Ylitehoisten polttomoottoreiden voimavaroista käytetään normaaliajossa vain pientä osaa, jolloin polttomoottori toimii suurimman osan ajasta hyötysuhteeltaan epäedullisessa toimintapisteessä. Hybridijärjestelmän ideana on valjastaa polttomoottori pelkästään tai osittain järjestelmän tehontuotantoon ja käyttää ajomoottorina joko pelkkää sähkömoottoria tai kumpaakin rinnakkain. Tällä tavoin polttomoottori voidaan pienentää ja ohjata kohti toimintapistettä, jossa on edullisin polttoaineen kulutus (g / kWh) tai pienin päästöjen kuten typpioksidin, hiilidioksidin ja hiilimonoksidin (NO_x, CO₂, CO) tuotanto.

Sähkömoottorin etuna polttomoottoriin nähden on sähkömoottorin lähes ideaaliseksi ohjattava vääntömomenttikäyrä. Pelkästään oikealla sähkömoottorin valinnalla voidaan saavuttaa vaihteettomasti lähes vastaavanlainen vääntömomenttikäyrä kuin mitä polttomoottorilla saadaan aikaiseksi vaihteiston kanssa [3, s. 39]. Sähkömoottorilla saadaan aikaiseksi yhtenäinen vääntömomenttikäyrä nolla pyörimisnopeudesta aina maksiminopeuteen saakka ja se mahdollistaa kytkimen sekä momentinmuuntimen jättämisen pois järjestelmästä. Sähkömoottorin edullisuutta ajomoottorina polttomoottoriin nähden lisää myös sen hyötysuhteen käyttäytyminen kokonaisuudessaan momentti – pyörimisnopeus kartalla, millä sähkömoottorin hyötysuhde ei putoa vastaavanlaisesti kuin polttomootto-

rin hyötysuhde toimittaessa osakuormituksella. Tämä ominaisuus mahdollistaa hyvän hyötysuhteen saavuttamisen sarjahybridijärjestelmällä myös maantieajossa pienen tehonkulutuksen aikana. Kaupunkiajossa toistuvat kiihdytykset ja jarrutukset toimivat kuormitusaskeleina ajoneuvon ajomoottorille ja vaativat huomattavan paljon enemmän energiaa kuin vakionopeuksinen ajo.

Polttomoottoreiden vaste kuormituksen muutokseen on hitaampaa kuin sähkömoottoreilla. Lisäksi polttomoottoreilla hukataan kokonaan liike-energiaksi sitoutunut energia, mitä hybridijärjestelmällä on mahdollista osittain hyödyntää. Kaupunkiajon vaatima suurempi energiankulutus johtaa polttomoottoriajoneuvoilla suurempiin päästöihin kuin hybridijärjestelmässä, jossa energiaa on mahdollista varastoida ja kuluttaa nopeasti jännitevälipiirin kondensaattoreista tai sähköisistä energiavarastoista kuten superkondensaattoreista.

Kuva 2.2 esittelee HybDrive – projektissa toteutettavan sarjahybridijärjestelmän topologian. Teholähteet ja energiavarastot on kytketty tehoa siirtävän jännitevälipiirin kautta järjestelmää kuormittaviin ajo- ja työmoottoreihin. Tehontuottajia ja -kuluttajia ohjataan ylemmästä ohjauksesta Electrical Control Unit: sta (ECU), minkä rajapinnat komponentteihin esitetään kuvassa.



Kuva 2.2 Sarjahybridijärjestelmän komponentit, Electrical Control Unit ja rajapinnat

2.1.1 Sarjahybridijärjestelmä

Sarjahybridijärjestelmä (Series Hybrid Electric Vehicle, series HEV) toteuttaa sähköisen tehonsiirron suoravetoisesti ja mahdollistaa energianvarastoinnin jännitevälipiiriin DC-DC – muuttajilla kytketyissä energiarastoissa. Ideana on polttomootorin valjastus tehontuotantoon, jarrutus- sekä potentiaalienergian generointi energiarastoon ja sähkömoottorin käyttö ajomoottorina. Polttomoottori toimii järjestelmässä ainoana primäärinä energianlähteenä. Polttomootorin tuottama mekaaninen energia muutetaan generaattorin ja AC – DC muuttajan avustuksella tasajännitteeksi, jota voidaan varastoida tasajännitteenä akuissa tai superkondensaattoreissa. Näiden tasajännitteisten energiapuskureiden avulla voidaan polttomootorin tehonkulutus huippuja pienentää ja jarrutus sekä potentiaalienergiaa varastoida. Nykyisissä polttomoottoriajoneuvoissa ei

toimita parhaalla hyötysuhdealueella kuin kiihdytyksen aikana. Sarjahybridijärjestelmällä voidaan polttomoottori pakottaa toimimaan maksimihyötysuhteella [50]. Ajoneuvon ohjausstrategiasta ja energijärjestelmien tilasta riippuen voidaan esimerkiksi sammuttaa polttomoottori kokonaan mikäli energiavarastot täyttyvät tai toimitaan energiaa hidastuksesta generoivassa moodissa. Energiavarastoja voidaan käyttää hyödyksi liikkeen tuottamisessa pienillä kuormilla, jolloin sähköenergiavarastojen hyötysuhde on parhaimmillaan. Tällöin polttomoottori voi olla sammutettuna ajoneuvon ollessa pysähdyksissä, ajoneuvon ryöminnän aikana ja suurilla sähkömoottorin pyörimisnopeuksilla matalan tehontarpeen aikana.

sarjahybridijärjestelmän edut [6]:

- polttomoottorin ja generaattorin sijoittamisen joustavuus
- yksinkertainen laitteistokokoonpano
- soveltuvuus lyhyisiin matkoihin eli kaupunkiajon jarrutuksiin ja kiihdytyksiin
- ajomatkan säädeltävyys

sarjahybridijärjestelmän heikkoudet [6]:

- järjestelmä tarvitsee kaksi moottoria ja yhden generaattorin
- järjestelmän ajomoottorit on mitoitettava suurimman tehontarpeen mukaan
- kaikki järjestelmän moottorit on mitoitettava suurimman pitkäkestoisen tehoraajan mukaan, sillä pidemmällä ajomatkalla akkujen tyhjennyttyä koko teho tuotetaan polttomoottorilla

2.1.2 Rinnakkaishybridijärjestelmä

Rinnakkaishybridijärjestelmässä (parallel HEV) on nimensä mukaisesti polttomoottori ja sähkömoottori kytketty rinnakkain mekaaniseen voimansiirtoon. Moottorit voidaan kytkeä mekaanisesti rinnakkain käyttämällä planeettavaihdetta tai sähkömekaanisesti

käyttämällä kelluvastaattorista sähkömoottoria. Näitä ratkaisuja on esitelty hybridiajoneuvojärjestelmiä käsittelevissä tutkimuksissa ja kirjallisuudessa [3]. Voimansiirrolla mahdollistetaan moottoreiden joko nopeus- tai momenttikytkeytyminen akselistoon. Erilaisilla voimansiirron kytkeytymisillä mahdollistetaan polttomoottorin ja ajomoottorin toimintapisteiden vapaampi ohjattavuus halutulle toiminta-alueelle.

Polttomoottorin ja sähkömoottorin rinnankytkentä mahdollistaa niiden käytön ajomoottorina joko yhdessä tai erikseen. Kiihdytettäessä on edullista käyttää pelkästään sähkömoottoria sen vääntömomenttiominaisuuksien ansiosta. Rinnakkaisten sähkö- ja polttomoottoreiden tehon mitoitus voidaan jättää normaalia ajoneuvoa jonkin verran pienemmäksi. Pienempi tehoisen polttomoottorin toimintapisteeseen on helpompi vaikuttaa kuin suurempitehoisen, jota pitää tavoitteeseen pääsemiseksi kuormittaa enemmän. Polttomoottorin kuormitusta voidaan tarvittaessa lisätä generoimalla energiaa varastoon ajoon tuotettavan tehon lisäksi. Vastaavasti suurta tehoa vaativissa tilanteissa tehontuottoon voidaan käyttää sekä poltto- että sähkömoottoria.

Kuva 2.1b esittelee yleiskuvan yksi-akselisesta rinnakkaishybridijärjestelmästä. Kirjallisuudessa on myös esitelty topologioita, joissa on käytetty vaihteistoja moottoreiden akseleilla tai kelluvastaattorista sähkömekaanista kytkentää ja näiden erilaisia yhdistelmiä.

rinnakkaishybridijärjestelmän edut [6]:

- rinnakkaishybridijärjestelmä tarvitsee vain kaksi moottoria, sillä sähkömoottoria voidaan käyttää molemmansuuntaiseen tehonsiirtoon
- järjestelmässä voidaan käyttää tehoiltaan pienempää polttomoottoria ja sähkömoottoria, mikäli toimitaan toiminta-alueella, jossa akkujen lataus riittää
- polttomoottori on mitoitettava pidempien matkojen maksimitehontarpeen mukaan. Rinnakkainen sähkömoottori pienentää vääntömomentin tarvetta kiihdytettäessä

rinnakkaishybridijärjestelmän heikkoudet [6]:

- o ongelmana on ohjausstrategian ja voimansiirron monimutkaisuus, koska vääntömomentti pitää tuottaa sekä mekaanisesti kytketyltä polttomoottorilta että sähkömagneettisesti kytketyltä sähkömoottorilta

2.1.3 Sarja – rinnakkaishybridiyhdistelmä

Sarja – rinnakkaishybriditopologiaa (series – parallel HEV) käytetään tällä hetkellä markkinoilla olevissa hybridihenkilöautoissa. Yhdistelmässä rinnakkaisjärjestelmää vastaavaan kokoonpanoon on lisätty generaattori polttomoottorin akselille, jolla voidaan generoida tehoa sähköisiin energiavarastoihin. Tällöin voidaan polttomoottoria ja sähkömoottoria käyttää yhtäaikaisesti ajomoottoreina ja samanaikaisesti ladata energiavarastoja generaattorilla. Generaattorin lisääminen mahdollistaa polttomoottorin toimintapisteen vapaamman valinnan. Kiihdytystilanteissa voidaan tehoa kierrättää polttomoottorilta generaattorin ja DC – AC muuttajan kautta sähkömoottorille, jolloin kiihdyttäessä käytetään hyväksi sähkömoottorin vääntömomenttiominaisuuksia. Vakionopeudella ajettaessa generaattori voi kasvattaa polttomoottorin kuormitusta hyötysuhteeltaan paremman toimintapisteen tavoittamiseksi. Generaattori polttomoottorin akselilla varmistaa että sähköinen energiavarasto ei tyhjene. Kyseinen topologia ei siis kärsi energiavarastojen tyhjentymisestä pidempiä matkoja yhtäjaksoisesti ajettaessa, mikä on ongelmana pelkällä rinnakkaisjärjestelmällä. Topologian toimivuus myös pidemmän matkan ajossa mahdollistaa polttomoottorin ja sähkömoottorin mitoittamisen reiluun puoleen vaaditusta maksimitehosta. Myöskään käytetyn generaattorin tehon ei tarvitse olla ajomoottorin luokkaa sillä polttomoottorin tehosta osa joudutaan ohjaamaan ajoneuvon akselille myös generointitilanteessa.

Tällä hetkellä hybridi ajoneuvojen valmistuksessa pioneerina toimii Toyota Motor Company. Toyota on tuonut ensimmäiset versiot hybridi ajoneuvostaan ”Prius” Japanin markkinoille jo vuonna 1997. Tämän hetkinen versio Priuksesta on jo kolmas ja Toyota mainostaa tuovansa uusia ”kolmannen sukupolven” hybridi ajoneuvoja markkinoille vuoden 2010 aikana. Uusien versioiden joukossa pitäisi olla myös plug-in Hybridi, joka on varustettu normaalia hybridi ajoneuvoa suuremmalla akulla ja akun suoralla sähköverkkolatausmahdollisuudella [30]. Taulukko 2.1 vertailee samanmassaisen Priuksen ja Corollan polttoaineen kulutuksia eri moottorivaihtoehdoilla.

Taulukko 2.1 Toyota Priuksen ja Corollan polttoaineen kulutusten vertailu [32] & [33]

KULUTUS JA PÄÄSTÖT	Prius	Corolla	Corolla
	1.5 bensiini	1.4 diesel	1.6 bensiini
Yhdistetty (litraa/100 km)	4,3	4,9	6,9
Maantie (litraa/100 km)	4,2	4,3	5,8
Kaupunki (litraa/100 km)	5	5,8	9
Omamassa (kg)	1350	1355	1315-1330

sarja -rinnakkaishybridiyhdistelmän edut:

- akkujen tyhjentymisen ei rajoita tehokkaan ajomatkan pituutta kuten rinnakkaishybridi järjestelmässä
- mahdollisuus mitoittaa poltto- ja ajomoottori pienemmiksi kuin sarja- tai rinnakkaishybridi järjestelmissä

sarja -rinnakkaishybridiyhdistelmän heikkoudet:

- järjestelmä tarvitsee polttomoottorin, generaattorin ja sähkömoottorin
- järjestelmän ohjauksen ja voimansiirron monimutkaisuus lisääntyy

2.1.4 Polttokennoajoneuvo

Polttokennoajoneuvojärjestelmässä (Fuel Cell Vehicle, FCV) energianlähteenä toimii joko vety tai polttoaine, josta voidaan valmistaa vetyä paikallisesti reformoimalla. Toimiakseen ajoneuvon energianlähteenä polttokenno tarvitsee kuormituksen transientteja muutoksia varten tuekseen akkuja ja / tai superkondensaattoreita. Eduksi polttokennoajoneuvoteknologialle on, että sillä saavutetaan polttomoottoriajoneuvoa vastaava toimintasäde. Polttokennoajoneuvo on käytettäessä päästötön, mutta päästöjä syntyy vetyä tuottaessa. Vedyn tuotannosta syntyvät päästöt voidaan ottaa talteen tai vety voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä. Polttokennoajoneuvon etuna edellä esiteltyihin hybridijärjestelmiin nähden on tarve vain pelkille sähköisille ajomoottoreille. Polttomoottorin puuttuminen johtaa ajoneuvon alhaiseen käyntiääneen.

Polttokennoteknologiaan ajoneuvokäytöissä kohdistetaan kritiikkiä erityisesti Yhdysvaltojen yliopistopiireissä. Artikkelissa [16] esitetään polttokennoajoneuvon olevan hyötysuhdeparannukseltaan heikoin ja kustannuksiltaan kaikkein kallein ratkaisu kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Teollisuudessa ja Yhdysvaltojen hallituksessa tilannetta ei nähdä välttämättä samoin, sillä GM kertoo aloittavansa polttokennoajoneuvojen valmistuksen jo vuoden 2010 aikana [17]. Näkemyseroihin todennäköisesti vaikuttavat useat ongelmat, jotka heikentävät polttokennoajoneuvojen yleistymismahdollisuuksia. Tällaisia ongelmia ovat esimerkiksi vedyn varastointi ajoneuvon polttoainesäiliöön ja jakelujärjestelmän puute. Lisäksi kokonaisjärjestelmällä saavutetaan suhteellisen pieni hyöty verrattuna järjestelmän toteuttamiskustannuksiin ja järjestelmän monimutkaisuuteen.

polttokennoajoneuvon edut:

- polttokennoajoneuvon ajomoottoriksi riittää yksi sähkömoottori, mikä tekee järjestelmän toiminnasta yksinkertaisen ja ajoneuvon käyntiäänien alhaiseksi
- paikallisesti päästötön
- polttokennon hyötysuhde kaikilla kuormituksen asteilla
- nykyisessä polttoainetuotannossa sivutuotteena syntyvän vedyn käyttö polttoaineena
- polttokennotekniikalla on hieman polttomoottoritekniikkaa parempi hyötysuhde

polttokennoajoneuvon heikkoudet:

- saavutetaan vain pieni kokonaishyötysuhteen parantuminen suhteutettuna järjestelmän toteuttamiskustannuksiin ja järjestelmän monimutkaisuuteen
- vedyn jakelu infrastruktuurin puute ja sen rakentamisen kalleus
- vedyn varastoiminen ajoneuvoissa on ongelmallista johtuen sen pienestä tiheydestä ja vedyn diffuusiosta polttoainesäiliön lävitse
- päästöt vetyä tuottaessa

2.1.5 Sähköajoneuvo

Täyssähköisten ajoneuvojen (Battery Electric Vehicle, BEV) yleistymistä henkilöajoneuvoina suurimmin tällä hetkellä rajoittava tekijä on niiden lyhyt toimintasäde ja massatuotteen puute. Yhden latauskerran toimintasäde on 160 - 400 kilometrin luokkaa [48]. Akkuteknologioista puuttuu yhdistelmä riittävästä eliniästä, edullisesta hinnasta, luotettavuudesta ja ominaistehosta. Elinikää akuilla rajoittaa lataus-purkaus syklien kesto. Syväsykleinä ilmaistuna tämä tarkoittaa tämän hetkellisellä teknologialla noin 1000 sykliä [3], mutta valitsemalla ohjausstrategiaksi akkujännitteen pitäminen mahdollisimman muuttumattomana voidaan saavuttaa huomattavasti pidempi elinikä. Syväsykli

tarkoittaa akun lataus- purkaussykliä, millä tavoitetaan akun sallitut maksimi- ja minimivaraustilat. Hinta ajoneuvoihin sopivissa akkutyypeissä on tällä hetkellä vielä huomattava, mikä osaltaan rajoittaa tekniikan yleistymismahdollisuuksia. Litium -ioni akkuteknologia on lupaavin energiavarasto sähköajoneuvoja varten, minkä käyttöönoton esteenä sarjatuotetussa sähköajoneuvossa on tähän asti ollut vikaantumisen aiheuttama räjähdysvaara.

Ideana sähköajoneuvo kuulostaa todella houkuttelevalta vaihtoehdolta. Täyssähköinen ajoneuvo on käytössä täysin päästötön kulkuväline, jolla päästään yli 90 prosentin hyötysuhteisiin akun lataus – purkaussykleissä. Se ei myöskään kärsi vedyn valmistuksessa menetetyt energian aiheuttamasta hyötysuhteen pienenemisestä kuten polttokennoajoneuvo. Sähköajoneuvoa voidaan ajatella täysin päästöttömäksi, mikäli akkujen lataamiseen kulutettava sähköenergia tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä tai ydinvoimalla ja käyttöikänsä kuluttanut vanha akku kierrätetään täysin. Sähköajoneuvo ei kärsi energianjakeluinfrastruktuurin puutteesta samalla tavoin kuten polttokennoajoneuvo, koska akkuja voidaan ladata sähköverkosta vaikka omassa kotipihassa. Sähköajoneuvon suorituskyky on todistettu riittäväksi henkilöautokäyttöön. Tästä on osoituksena useita valmistettuja konsepti- ja prototyyppi-autoja [18].

[1] [3] [6] [12] [27]

3 Hybridikäyttöisen työkoneen tehonsiirtokomponenttien esittely

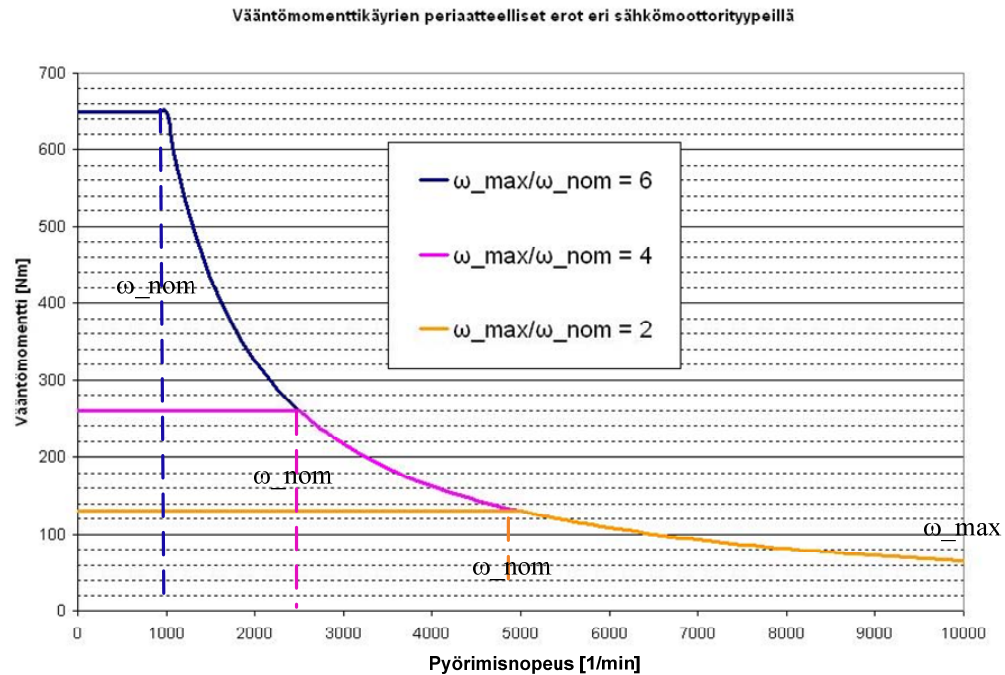
3.1 Sähkömoottorivaihtoehdot hybridikäyttöisen työkoneen ajomoottorina

3.1.1 Yleisesti

Työkoneen voimantuotantoon ei ole ainutta oikeaa sähkömoottorityyppiä. Sähkömoottorin valintaan vaikuttaa pääasiassa sähkökonetyypillä saavutettava vääntömomenttikäyrä ja tätä ohjaava tehoelektroniikka. Moottoreita voi olla pelkästään yksi, rungossa erikseen jokaiselle pyörälle tai näitä voidaan sijoittaa drive-by-wire tyyppisesti suoraan pyörännapaan. Moottorin suorituskyvyn ja toimivuuden lisäksi on otettava huomioon moottorityypin vaikutus sitä ohjaavaan tehoelektroniikkaan, jotta voidaan optimoida koko järjestelmän paino, tilavuus, suoritusarvot ja kokonaiskustannukset.

Sähkömoottorin valintaan vaikuttaa matalilla pyörimisnopeuksilla eli kiihdytettäessä haluttu vääntömomentti, siis vakiomomenttialueen momentti. Tähän sähkömoottoreissa vaikuttaa se, kuinka moottori magnetoidaan ja se tuottaako moottori reluktanssimomenttia staattorikäämien induktanssin vaihtelusta. Sähkömoottoria on mahdollista ylikuormittaa kiihdytystilanteessa. Moottorin valintaan vaikuttaa myös käytöltä vaadittu maksiminopeus. Tällöin moottoreista tulee vertailla kentänheikennysalueen toimintaa ja erityisesti kuinka moninkertaisiin nimellisnopeuksiin kentänheikennysalueella päästään.

Sähkömoottorin hintaan vaikuttaa merkittävästi tarvitaanko käytössä nopeus- tai asentoanturin takaisinkytkentää. Matalat pyörimisnopeudet ovat erityisesti ongelmallisia oikosulkumoottorin ohjauksessa ilman nopeusanturia ja vaihtoreluktanssikoneen ohjauksessa tarvitaan tieto roottorin asennosta. Rajoitteena sähkömoottorin valinnassa on sopivien anturillisten moottoreiden saatavuus.



Kuva 3.1 Vääntömomenttikäyrä erilaisten sähkömoottorityyppien vertailuperusteena

Kuva 3.1 esittää kuinka maksimipyörimisnopeuden suhde nimellisyörimisnopeuteen nähdessä vaikuttaa moottorin vääntömomenttikäyrään. Sähkömoottoreita vertailtaessa tulee muistaa sähkömoottorin fyysisen koon olevan suoraan verrannollinen sähkömoottorilla saavutettuun vääntömomenttiin, joten kuvassa vertailtavat momenttikäyrät johtavat fyysisesti erikokoisiin moottoreihin. Suorituskykyvaatimuksiin nähden liian pientä maksiminopeuden ja nimellinopeuden suhdetta voidaan parantaa vaihteistolla, mikä ei ole oikealla moottori valinnalla tarpeen.

3.1.2 Tasavirtakoneet

Tasavirtakoneita on käytetty jo pitkään liikennevälinesovelluksissa, mutta ne ovat jääneet historiaan taajuusmuuttajalla syötettyjen vaihtovirtakoneiden yleistyessä. Tähän on johtanut digitaalitekniikan suoma vaihtovirtakoneen ohjauksen helppo toteuttaminen, hyötysuhde, rakenne, luotettavuus ja halvempi hinta. Kulkuvälineet kuten dieselsähköi-

set veturit, laivat ja raitiovaunut ovat olleet tyypillisiä sovelluskohteita. Ajoneuvoissa vaadittu kentänheikennysalueen ohjauksen helppo toteuttaminen ja ohjauselektronikan yksinkertaisuus ovat olleet tasavirtakoneissa vahvuutena. Nykyisillä tasavirtakoneilla päästään suurempiin vääntömomenttitiheyksiin kuin esimerkiksi oikosulkumoottorilla, koska tasavirtakoneen magnetointi voidaan toteuttaa kestopagneetein jos kentänheikennystä ei tarvita.

Tasavirtakoneen tyypillinen käyttöalue on nykyisin pienitehoisissa sähkökäytöissä. Nykyisissä ajoneuvoissa saattaa olla kymmeniä pieniä tasavirtamoottoreita, joissa magnetointiin on usein käytetty kestopagneetteja. Tasavirtakoneiden ajomoottori-käyttöä heikentää niiden säännöllisen huollon tarve ja roottorin rakenteesta johtuva suurempien kierrosnopeuksien keston heikkous. Säännöllistä huoltoa tasavirtakoneissa tarvitaan mekaanisen kommutaattorin ja hiiliharjojen kuluessa.

Tasavirtakoneen etuja joissain sovelluksissa ei pidä kiistää, mutta sähköisten ajomoottoreiden kehitystyö on keskittynyt muihin sähkökonetyyppeihin. Tällaisia ovat esimerkiksi oikosulkumoottorit, eri magnetointiasteiset kestopagneetikoneet ja vaihtoreluktanssikoneet. [7] [40]

3.1.3 Epätahtikoneet

Epätahtikoneet ovat teollisuuden yleiskoneita. Kulkuneuvokäytössä epätahtikonetyypeissä on erityisesti keskitytty oikosulkukoneisiin. Oikosulkukoneen etuina ovat yksinkertainen rakenne, taajuusmuuttajaohjaus ja saatavuus laajalla tehoalueella. Ne ovat robusteja ja niillä päästään kestopagneetikonetta pidemmälle kentänheikennysalueelle. Oikosulkukoneelle löytyy sopivia sovelluskohteita myös sähköisten työkonien ajovoimantuotannossa.

Huonona puolena oikosulkukoneissa on koneen toimintaperiaate. Moottori magnetoidaan ulkoisesti staattorivirralla, mikä kasvattaa moottorin kokoa kestopagneetoihin

moottoreihin nähden. Toimintaperiaate aiheuttaa oikosulkumoottorille tyypillisen jättämän ja luo jättämähäviöt oikosulkumoottorin roottorille. Näiden häviöiden poisjohtaminen tehokkaasti on ongelmallista erityisesti ajoneuvokäytöissä. Roottorin jättämähäviöiden poisjohtamiseen käytetään konvektiota, jota avustetaan akselille kytketyllä tuulettimella. Taulukko 3.1 vertailee eri lämmönsiirtotapojen lämmönsiirtokertoimia. Oikosulkukoneilla päästään hieman tasavirtakonetta parempaan hyötysuhteeseen, mutta hävitään selvästi kestopagnetoiduille moottorivaihtoehdoille. Ero kestopagnetoituihin moottoreihin selittyy oikosulkukoneen jättämähäviöistä.

Taulukko 3.1 Lämmönsiirtokertoimien suuruusluokkia [26]

Lämmönsiirtotapa	Lämmönsiirtokerroin
säteily	$\alpha_{em} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$
johtuminen	$\alpha_{cd} \approx 0 \text{ W/m}^2\text{K}$
konvektio (luonnollinen ilmajäähditys)	$\alpha_{cv} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$
konvektio (kiihdytetty ilmajäähditys)	$\alpha_{cv} = 25 \dots 110 \text{ W/m}^2\text{K}$
konvektio (vesijäähditys)	$\alpha_{cv} \approx 500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Oikosulkumoottoria kuten myös kestopagnetoitua moottoria ohjataan nykyisin parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi vektorisäätömenetelmillä. Vektorisäädössä moottorille syötettävä virta on jaettu vääntömomenttiin ja magnetointiin vaikuttaviin komponentteihin. Tämä moottorin ohjaustapa on yleistynyt viime aikoina teollisuuden kaikissa taajuusmuuttajateholuokissa aivan halvimpia ja pienempitehoisia lukuun ottamatta. Vaihtoehtoisesti oikosulkumoottorin ohjauksessa on käytetty skalaarisäätöä tai -ohjausta. Se on vektorisäätöä yksinkertaisempi toteuttaa, mutta on säätöominaisuuksiltaan huonompi kuin vektorisäätö. Skalaariohjaus mahdollistaisi useamman moottorin ohjauksen samasta vaihtosuuntaajan lähdöstä, mutta tämä saattaa olla ongelmallinen sovellettava ajoneuvon renkaiden vaatiman nopeuseron takia. Skalaariohjaus eroaa skalaarisäädöstä nopeuden takaisinkytkennän puuttumisella.

Oikosulkukoneet ovat ulkoisesti magnetoitavia moottoreita, eli magnetointivirta tulee syöttää tehoelektroniikan kautta. Magnetointivirran syöttäminen jännitevälipiiristä lisää tehoasteen näennäisteholuokitusta. Tämä on toisaalta etuna verrattaessa oikosulkumoot-

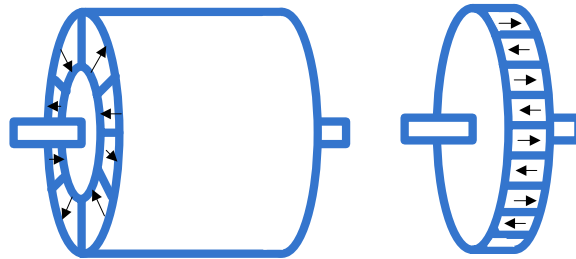
torin kentänheikennysalueen toimintaa kestopagnetoiuihin moottoreihin, sillä tällöin magnetointiin on yksinkertaisempaa vaikuttaa ja oikosulkukoneella päästään tämän johdosta pidemmälle kentänheikennysalueelle kuin kokonaan kestopagnetoidulla moottorilla. Oikosulkumoottorin etu kentänheikennysalueen pituudessa häviää vertailtaessa sitä kestopagneettiavusteiseen moottoriin, jossa magneettivuon on luotu vain osittain kestopagneeteilla. Roottorin rakenne oikosulkukoneessa on yksinkertainen ja robusti, ja se kestää suuriakin pyörimisnopeuksia.

Oikosulkukoneiden toiminta perustuu moottorin käämien ylitse syötetyn jännitteen luoman staattorivirran ja moottorin ilmavälissä pyörivän ilmavälivuon vaihe-eroon. Roottorin oikosuljettuun häkkikäännytykseen indusoituneen virran taajuus on riippuvainen oikosulkumoottorin kuormituksesta, mikä lisää roottorivuon taajuutta ja kasvattaa roottorin jättämää tahtikäyntiin nähden. Moottorityypin epätahtisuus onkin ongelmana joissain sovelluksissa. Tämä saattaa johtaa vaatimukseen nopeusantureiden käytöstä. Jättämän takia oikosulkumoottorin nopeutta on hankalaa estimoida anturittomassa ohjauksessa. Nopeuden estimoinnissa ongelmia tuottavat erityisesti pienet nopeudet ja moottorisäätö on hankalaa generoitaessa tehoa jännitevälipiiriin pienillä pyörimisnopeuksilla.

Erikoistapauksena epätahtikoneista mainittakoon kaksoissyötetyt liukurengaskoneet, joissa roottorikäännytyks on kytketty liukurenkaiden ja harjojen kautta pienempään taajuusmuuttajaan. Sähköverkkoon kytkettyyn työkoneeseen kaksoissyötetty liukurengaskone voi olla vaihtoehto. Roottorivirran ohjaaminen mahdollistaa roottorin jättämän asettelun, jolloin epätahtikoneen toiminta lähenee tahtikoneen toimintaa [8]. Tällöin päästään eroon roottorin jättämähäviöistä, mutta ongelmana on että käytössä ei päästä nollanopeuteen. Käyttökohteet kaksoissyötetyillä epätahtikoneilla ovat pääasiassa suurissa megawattiluokan sovelluksissa. Lisäksi haittana ovat kuten tasavirta- tai vieras-magnetoiduissa moottoreissa liukurenkaiden ja harjojen huollontarve. [8] [14] [26] [40]

3.1.4 Kestomagnetoidut tahtikoneet

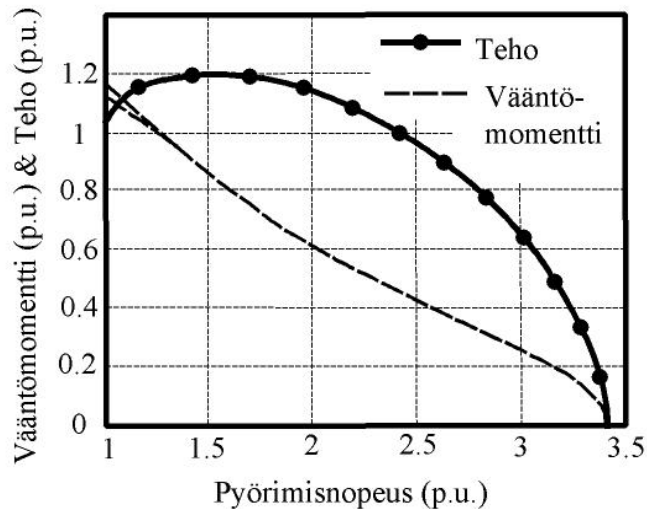
Kestomagnetoidut tahtikoneet magnetoidaan yleensä neodyymi-rauta-booriseos kestopagneettimateriaalilla (NdFeB), mutta myös kalliimpaa samariumkobolttia (SmCo) käytetään. NdFeB:n magneettiset ominaisuudet kestävät 150 – 200 celsius-asteen lämpötilan ja SmCo:n 250 – 300 asteen lämpötilan. Magnetoinnin järjestäminen kestopagneetein poistaa roottorilta jättämähäviöt, joista oikosulkumoottori kärsii. Kestomagnetoiduilla moottoreilla päästään noin 80 Nm/l vääntömomenttitiheyteen [23]. Kuva 3.2 esittelee kestopagnetoinnin asettelua radiaali- ja aksiaalisvuo kestopagneettisähkömoottorin roottorissa. Kuvan nuolet osoittavat magneettivuon suuntaa.



Kuva 3.2 Yleiskuva radiaali- ja aksiaalisvuo kestopagneettisähkömoottorin roottorista

Kestomagnetointi saa aikaan muita moottorityyppejä selvästi paremman hyötysuhteen. Magneettisen materiaalin arvo nostaa kestopagnetoidun moottorin hinnan muita moottorityyppejä korkeammaksi. Kestomagnetoitu moottori pienentää sitä syöttävää vaihtosuuntaajaa ja jännitevälipiiriä, koska magnetointivirtaa ei syötetä siihen ulkoisesti. Muuttamalla kestopagneetein synnytettyä sähkömoottorin ilmavälivuota saadaan vaikutettua moottorin kokoon ja kentänheikennysominaisuuksiin. Pienentämällä kestopagnetointia nimellisen ilmavälivuon aiheuttamasta määrästä voidaan paremmin vaikuttaa moottorin kentänheikennysalueen toimintaan. Tällöin moottorin koko kasvaa, koska osa magnetoinnista toteutetaan vaihtosuuntaajan ohjaamalla virralla. Lisäksi kestopagnetoitujen moottoreiden etuna on mahdollisuus kasvattaa moottorin ilmaväli suuremmaksi ilman, että moottorin ominaisuuksista joudutaan tinkimään. Ilmavälin suurenus on etu erityisesti raskaissa ja tärisevissä käytöissä.

Kestomagneettimoottorin lyhyt kentänheikennysalue rajoittaa sen sovelluskohteita. Tyypillisesti kestmagnetoiduilla moottoreilla päästään kentänheikennysalueella noin kaksin – kolminkertaiseen nimellisoopeuteen saakka, mikä on riittämätön jos halutaan yhdistää vaihteetta korkea vakiomomenttialueen momentti ja suuri maksimipyörimisnopeus. Kestomagneettiavusteisista tahtireluktanssikoneissa magnetointia on vähennetty nimellisestä, minkä avulla päästään pidemmälle kentänheikennysalueelle. Kokonaan kestmagnetoidun moottorin ominaisuudet tulevat edullisiksi sovelluksissa, joissa ei vaadita suurta maantienopeutta tai hyvin tilakriittisissä kohteissa kuten renkaan napamoottoreissa. Lyhyt kentänheikennysalue kestmagnetoiduilla moottoreilla johtuu roottorin kestmagnetoinnista, jota joudutaan demagnetoimaan, jotta päästäisiin nimellisoopeutta suuremmille pyörimisnopeuksille. Maksimimomenttiraja laskee kentänheikennysalueella muita moottorityyppejä nopeammin, sillä demagnetoivan virran lisääminen vähentää vääntömomenttia tuottavan virran määrää. Tämä aiheuttaa kestmagneettimoottoreille pyöreähkö maksimitehokäyrän (Kuva 3.3). Eräänä keinona kentänheikennysalueen laajennukseen on esitetty moottorin vyyhtiryhmien uudelleen kytkemistä kontaktorein ajon aikana [43]. Tämä lisäisi järjestelmään eräänlaiset vaihteet ja lisäisi järjestelmän huollon määrää.



Kuva 3.3 Pintamagneetti- (SPM) ja sisämagneettimoottoreiden (IPM) maksimivääntömomentti ja maksimitehokäyrät [28]

Erikoistapauksena kestmagneettimoottoreissa on harjaton tasavirtamoottori, englannin-kieliseltä nimeltään brushless-DC motor. Kyseisen moottorityypin käyttö vaatii vaihtosuuntaajalta kantikasta virtaa sinimuotoisen virran sijaan. Tämä johtuu magneettien asettelun aiheuttamasta trapetsimaisesta vastasähkömotorisesta voimasta. Moottorinohjaus on siksi suunniteltava edeltävän vaatimuksen mukaan.

Kestomagneettimoottoreille on ongelmallista vikaantuminen kentänheikennysalueella suurilla pyörimisnopeuksilla. Suurilla pyörimisnopeuksilla kestmagnetoidulla roottorilla saadaan aikaan moottorin ohjauksen äkillisesti loppuessa liitinjännite, joka voi nousta yli nimellisten liitinjännite arvojen riippuen moottorin pyörimisnopeudesta. Tällöin voidaan vioittaa moottoria tai sitä ohjaavaa vaihtosuuntaajaa.

Kestomagnetoidun materiaalin demagnetoituminen voi olla vikaantumistilanteessa ongelmana. Demagnetoituminen johtaa koneen suorituskyvyn laskuun, vaikkei välittömästi rikkoisi sitä. Kestomagneettimoottoreiden vikaantumista kentänheikennysalueella on tutkittu Ruotsissa, jossa hybridiajoneuvotekniikan tutkimus on ollut käynnissä pidempään [49]. Kestomagnetoinnin ongelmiin kuuluu lisäksi NdFeB:n herkkyys kosteudelle, jota voidaan poistaa suojaamalla kestmagneetti pinnoitteella kuten esimerkiksi teflonilla.

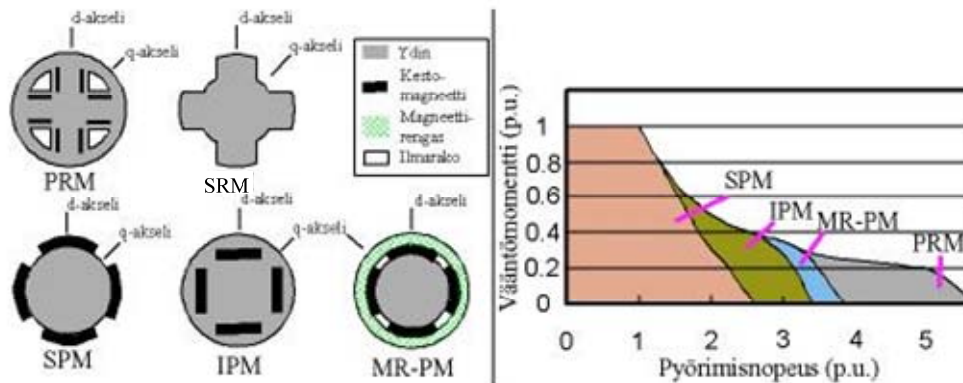
Kestomagnetoidut moottorit ovat alkaneet yleistyä viimeisen vuosikymmenen aikana teollisuussähkökäytöissä. Teollisuussähkökäyttöjä valmistavat yritykset eivät keskity kehittämään taajuusmuuttajia tai sähkömoottoreita ajoneuvokäyttöjä varten. Teollisuuskäytöt eroavat ajoneuvokäytöistä vaaditun suojausluokan, jäähtyksen ja tärinän sieton kohdalla. [8] [14] [42] [44] [46]

3.1.5 Kestomagneettivasteiset tahtireluktanssikoneet

Tahtireluktanssikoneiden toiminta perustuu magneettivuon pyrkimykseen minimoida kenttäenergia. Staattorivirran aiheuttama sinimuotoinen pyörivä staattorimagneettivuon

vetää perässään magneettisesti johtavaa roottoria, jonka reluktanssi riippuu asennosta. Tällöin roottorin d-akseli (Kuva 3.4) jää jälkeen magneettivuosta kuormasta riippuvan vaihe-eron verran. Suuremmalla kuormituksella vaihe-ero kasvaa ja vastaavasti pienemmällä kuormituksella pienenee. Reluktanssikoneita on olemassa sinimuotoisella virralla ohjattavia tahtireluktanssikoneita ja pulssimaisella virralla ohjattavia vaihtoreluktanssikoneita, joiden ohjaukseen käytetään poikkeavaa tehoastetta. Vaihtoreluktanssikoneita käsitellään kappaleessa 3.1.7.

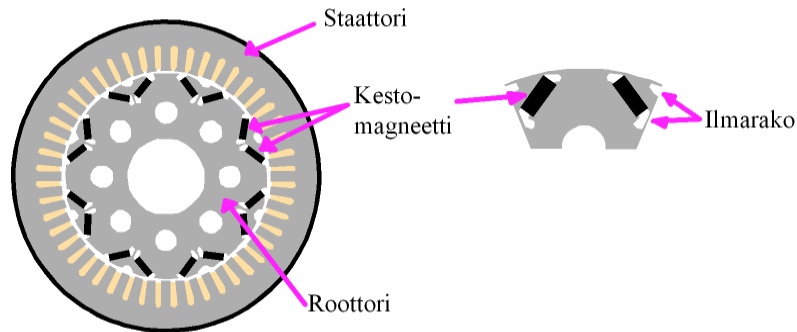
Kuva 3.4 esittää eri konetyyppien poikkileikkauksia ja näillä saavutettavia vääntömomenttikäyriä. Vertailussa kestmagneettiavusteinen tahtireluktanssimoottori (Permanent magnet assisted Reluctance Motor, PRM), pintakestmagneettimoottori (Surface Permanent Magnet motor, SPM), sisäkestmagneettimoottori (Interior Permanent Magnet motor, IPM) ja magneettirengaskestmagneettimoottori (Magnetic Ring Permanent Magnet motor, MR-PM). Vertailusta puuttuu vaihtoreluktanssimoottori (Switched Reluctance Motor, SRM), jolla päästään 5 – 6 kertaiseen nimellinopeuteen. [22]



Kuva 3.4 Kestomagneetoitujen roottoreiden poikkileikkauksia ja vääntömomenttikäyriä [22]

Tahtireluktanssikoneen toimintaperiaatteesta johtuen sen toiminnassa päästään aina tahtikäyntiin, eli jättämästä ei kärsitä kuten oikosulkumoottorin tapauksessa. Konetyypillä on mahdollista päästä oikosulkumoottoria suurempaan vääntömomenttitiheyteen. Tehokerrointa vertailtaessa tahtireluktanssikoneella hävitään selvästi oikosulkumoottorille (oikosulkumoottori ~ 0,84; tahtireluktanssimoottori ~ 0,75) [21]. Tehokertoimen mata-

luus johtaa moottoria syöttävän vaihtosuuntaajan näennäisteholuokituksen kasvuun, mikä ei ole taloudellista eikä suotavaa tilavuuskriittisissä sovelluksissa. Tämän johdosta tahtireluktanssimoottorin ominaisuuksia parannetaan lisäämällä sen roottorille kestmagnetointia, jolla parannetaan moottorin tehokerrointa ja vääntömomenttia. Kuva 3.5 havainnollistaa kestmagneettien asettelua roottorille.



Kuva 3.5 Esimerkki kestmagneettiavusteisen tahtireluktanssikoneen poikkileikkauksesta [22]

Kestomagneettiavusteisia tahtireluktanssimoottoreita käytetään henkilöajoneuvokäytöissä. Tällöin ei kärsitä oikosulkumoottorin jättämähäviöistä eikä nollanopeusalueen vääntömomentti ongelmista. Kestomagneettiavusteisen tahtireluktanssimoottorin maksimipyörimisnopeus on suhteessa suurempi kuin oikosulkumoottorin vertailtaessa maksiminopeutta moottorin nimellisnopeuteen. Kuva 3.4 vertailee kestmagneettiavusteisen moottorin (PRM) kentänheikennysalueen toimintaa muihin kestmagneeteilla varustettuihin moottorityyppeihin nähden. [14] [42] [44] [46]

3.1.6 Vierasmagnetoidut tahtikoneet

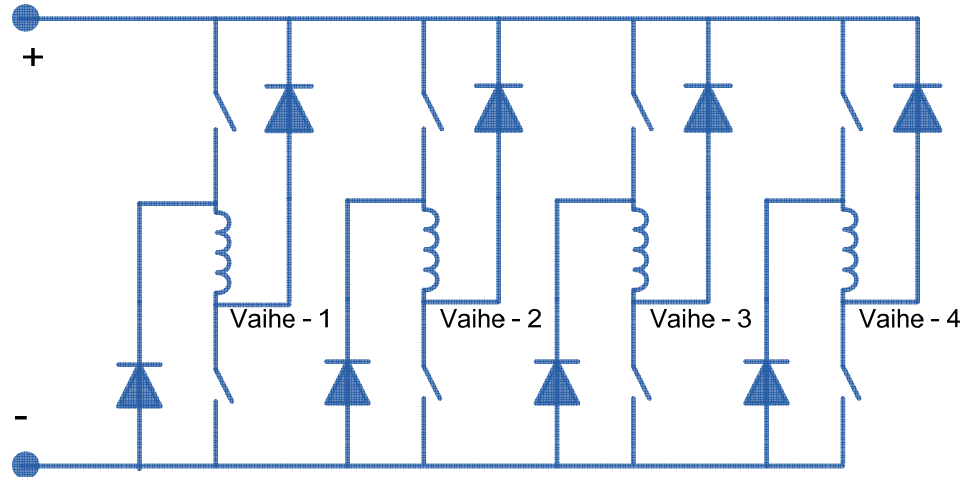
Vierasmagnetoidut tahtikoneet ovat perinteisesti toimineet sähköntuotannossa sähköverkkoon kytkettyinä megawattiluokan generaattoreina. Niillä on käyttöä hyvin suuritehoisissa sovelluksissa kuten suurten laivojen, kaivosnostureiden ja valssauslaitosten käyttömoottoreina. Epätahtikoneeseen verrattuna vierasmagnetoiduilla tahtikoneilla saavutetaan parempi hyötysuhde ja ulkoisen tasavirtamagnetoinnin takia kentänheiken-

nys on yksinkertaista toteuttaa. Haittana työkonesovelluksia ajatellen on korkea hinta, monimutkaisempi rakenne ja tasavirtamagnetointiin tarvittavien liukurenkaiden huollon tarve. Vierasmagnetoitu tahtikone voidaan rakentaa harjattomaksi, mutta muuttuvan nopeuden vuoksi se ei sovi liikennevälinekäyttöön. Pienillä tehoalueilla vierasmagnetoitua tahtikonetta käytetään servomoottorina, mutta nykyisin ne voidaan korvata kes- tomagnetoidulla moottorilla. [8]

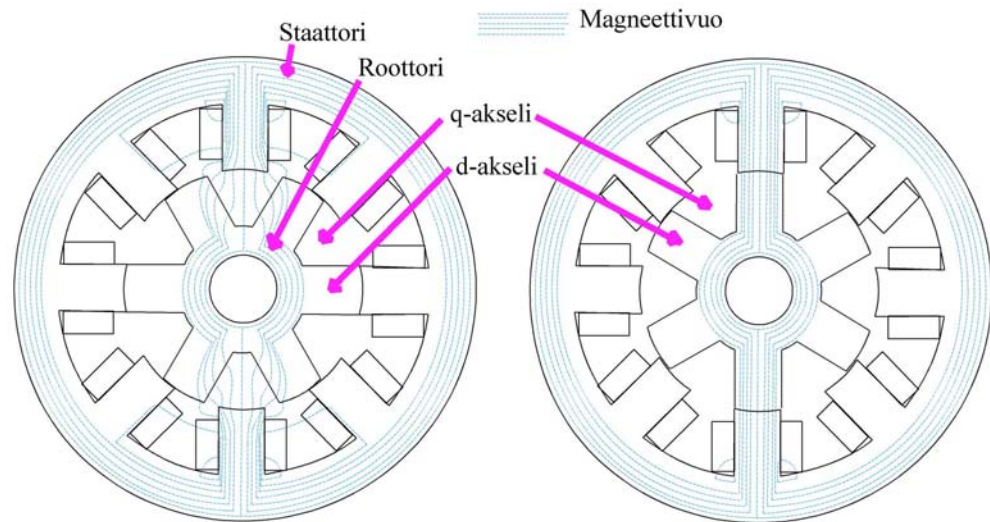
3.1.7 Vaihtoreluktanssikoneet

Vaihtoreluktanssikone (engl. Switched reluctance motor) eli molemmin puolin avonapainen reluktanssimoottori on mahdollinen vaihtoehto työkoneen voimantuotantoon, kun käytöltä vaaditaan laajaa pyörimisnopeusalueita. Se sopii pyörimisnopeusominaisuuksiensa puolesta erinomaisesti henkilöajoneuvokäyttöön. Kirjallisuudessa [3] moottorityypillä arvioidaan päästävän kuusinkertaiseen nimelliseen nopeuteen ja eräs valmistaja [24] lupaa viisinkertaista nimelliseen nopeuteen. Moninkertaisia nimelliseen nopeuksia vaaditaan, jos halutaan vaihteettomasti päästä suurille pyörimisnopeuksille.

Vaihtoreluktanssikoneen ohjaukseen käytetään perinteisistä kolmivaiheisista vaihtosuuntaussilloista poikkeavaa tehoastetta. Kuva 3.6 esittää nelivaiheisen vaihtoreluktanssikoneen tehoastetta. Kuva 3.7 esittää nelivaiheisen vaihtoreluktanssikoneen poikki- leikkauksen ja magneettivuon kulkureitin.



Kuva 3.6 Vaihtoreluktanssikoneen nelivaiheinen tehoaste [25]



Kuva 3.7 Vaihtoreluktanssikoneen magneettivuon kulkureitti 8 / 6 -pylväisessä koneessa, vas. minimi- ja oik. maksimi-induktanssi [25]

Konetyypin etuna on staattorin ja roottorin yksinkertainen rakenne, mikä tekee sen valmistamisen helpoksi ja kustannuksiltaan edulliseksi. Jäähdytyksen kannalta roottori-häviöt eivät ole kyseisessä moottorityypissä päähuolenaiheena, kuten oikosulkumoottorissa. Lämpöhäviöt vaihtoreluktanssikoneessa muodostuvat pääasiassa staattorin resistiivisinä häviöinä. Roottorin häviöt muodostuvat vain rauta- ja ilmanvastushäviöistä. Konetyypillä on mahdollista muodostaa suuri vääntömomentti myös paikallaan olevalle tai pienillä pyörimisnopeuksilla pyörivälle roottorille, johtuen moottorin toimintaperiaatteista. Vääntömomentin tuotto kyseisellä koneella perustuu eri käämien induktanssi-

en maksimoimiseen asennolla. Vääntömomentti moottorin akselilla on aina johtavan syöttövaiheen suurempaa induktanssia kohden.

Vaihtoreluktanssikonetta ohjaavan tehoasteen suojaus kytkinten oikosulkuutilanteiden varalta on helpompi toteuttaa kuin perinteisen kolmivaiheisen tehoasteen, koska vaihtoreluktanssikoneen induktanssi kytkeytyy aina sarjaan kytkimien kanssa, eikä tällöin ole mahdollista suoraan oikosulkea jännitevälipiiriä kuten kolmivaiheisessa tehoasteessa (Kuva 3.6).

Suurilla pyörimisnopeuksilla ei tällä moottorityypillä ole vaaraa vastasähkömotorisen voiman indusoimasta virrasta tehoasteen vikaantuessa sillä vastasähkömotorinen voima muodostuu kyseisessä moottorityypissä syöttövirran funktiona [25]. Vaihtoreluktanssikoneen ohjaus voidaan suunnitella siten, että moottori toimii yhden vaiheen rikkoutumisen jälkeenkin.

Vaihtoreluktanssikoneella on muita moottorityyppejä paremmat dynaamiset ominaisuudet, koska roottori toimii pelkkänä magneettisena johteena ja sen fyysinen koko on muiden moottorityyppien roottoreita pienempi. Vääntömomentin tuotto vaihtoreluktanssikoneella perustuu magneettivuon pyrkimykseen minimoida kenttäenergia. Vääntömomentin maksimoimiseksi on staattorin navoista näkyvä induktanssivaihtelu maksimoitava. Edeltävän saavuttamiseksi olisi staattorin ja roottorin ilmaväli jätettävä mahdollisimman pieneksi, mikä voi olla rajoite tärisevissä käytöissä [25]. Ilmavälin kasvattaminen johtaa kyseisen moottorityypin suorituskyvyn heikkenemiseen [41].

Vaihtoreluktanssikoneen erityisenä haittana pidetään värähtelevää ja suurilla pyörimisnopeuksilla jopa epäjatkovaa vääntömomenttia. Värähtelevä vääntömomentti ilmenee muita konetyyppejä suurempana meluna. Pienillä pyörimisnopeuksilla ts. matalataajuisella vääntömomenttivärähtelyllä saatetaan aiheuttaa laitteistossa mekaanista tärinää, jos koneen mekaanisen värähtelyn taajuuksia ei oteta kytkinten ohjausta suunniteltaessa huomioon. Vääntömomentin liian suuri värähtely saattaa aiheuttaa laakereiden nopeampaa kulumista. Vääntömomentin tasaiseksi saaminen vaatii ohjauksen limittämistä

päällekkäin vierekkäisten vaiheiden kanssa. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla vääntömomenttivärähtelyn välttäminen saattaa olla mahdotonta.

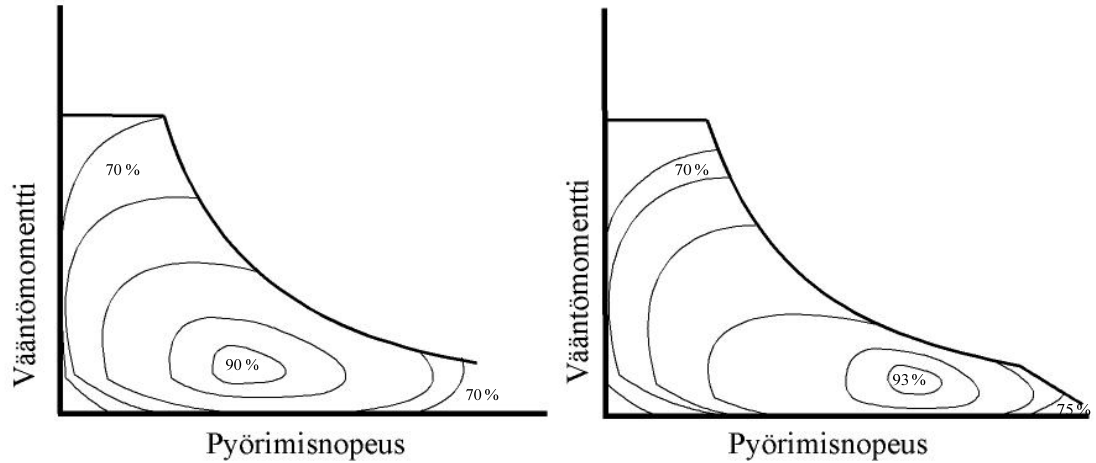
Vaihtoreluktanssikoneen ohjauksen suunnittelu vaatii moottorikohtaisen mittauksiin perustuvan ohjauslogiikan, jossa tehoasteen kytkinten tilat on määrätty roottorin asennon ja pyörimisnopeuden mukaan [20]. Ohjaustekniikan luonteen vuoksi asentoanturin käyttö moottorin akselilla lienee pakollista, mutta tähänkin on esitetty asennon estimointia roottorin asennon mukana vaihtelevaa induktanssia mittaamalla.

Vaikkakin teknologia vaihtoreluktanssikoneelle on toimivaa ja pitkään ollut tiedossa, ei sille löydy suuria teollisia valmistajia. Konetyypin suunnittelua pidetäänkin optimointiongelmanä, jonka lähtökohtana on käytön vääntömomenttivärähtelyn sallitut rajat [20].

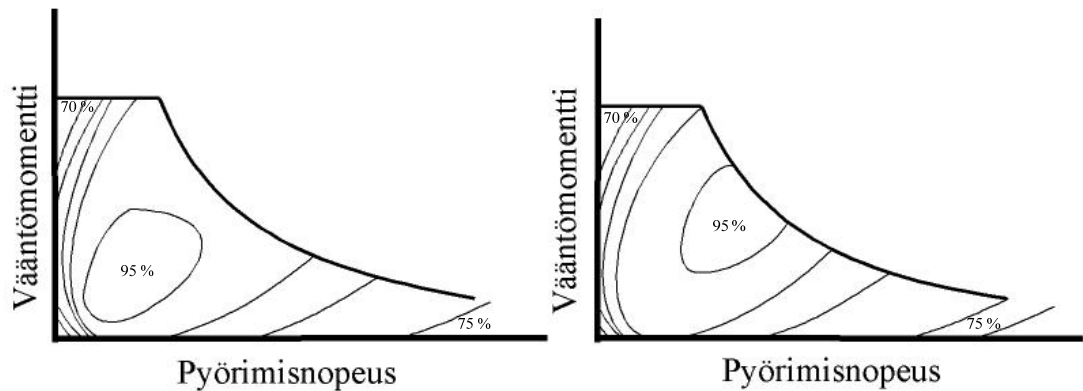
Vaihtoreluktanssikoneen rakenteesta huomioitavia seikkoja on käämityksen edullisuus, sillä käämit kulkevat vain yhden staattorinavan ympäri eivätkä kierrä koko staattorikettä kuten muissa konetyypeissä. Tämä on helpommin valmistettavissa oleva ratkaisu, säästää käämimateriaaleja ja vähentää muiden konetyyppien kärsimiä vyyhdenpäähäviöitä. Roottorin yksinkertaisuuden vuoksi vaihtoreluktanssikone sopii hyvin suurnopeuskoneeksi. Moottorityyppi voittaa vääntömomenttitiheydessään hienoisesti oikosulkukoneen, mutta häviää kestopagnetoidulle moottorille alle 20000 1/min pyörimisnopeuksilla [25]. [14] [47]

3.1.8 Hyötysuhdekartat ja linkkilista

Kuvat 3.8 ja 3.9 havainnollistavat eri sähkömoottorityyppien tyypillisiä hyötysuhdekarttoja. Hyötysuhderajat ja -arvot ovat suuntaa antavia.



Kuva 3.8 Hyötysuhdekartta tyypillisistä oikosulkukoneista vas. ja vaihtoreluktanssikoneista oik. [27], [48], [13]



Kuva 3.9 Hyötysuhdekartta tyypillisistä kesto- sisämagneettikoneista vas. ja pintamagneettikoneista oik. [19], [27], [46]

Taulukko 3.2 luettelee sähkömoottori- ja tehoastevalmistajien internet-osoitteita lisätiedon keräämistä varten.

Taulukko 3.2 Sähkömoottori- ja tehoastevalmistajia ajomoottorikäyttöön, 26.2.2008

http://www.automation.siemens.com/ld/bahnen/html_76/elfa/elfa-01.html
http://www.srdrives.com/hybrid-powertrain.shtml
http://www.brusa.biz/products/e_motoren108.htm

http://www.rockymountaintechnologies.com/
http://www.drs.com/products/Pro_Systems.aspx?cat=Power_Systems&subcat=Sub_Cat_4
http://www.ansaldoelectricdrives.com/
http://www.lynxmotiontechnology.com/
http://www.magnet-motor.de/
http://www.tm4.com/eng/about/
http://www.uqm.com/
http://www.voithturbo.com/vt_en_paa_road_eled_products.htm
http://www.zf.com/content/de/import/zf_konzern/startseite/Startseite.html

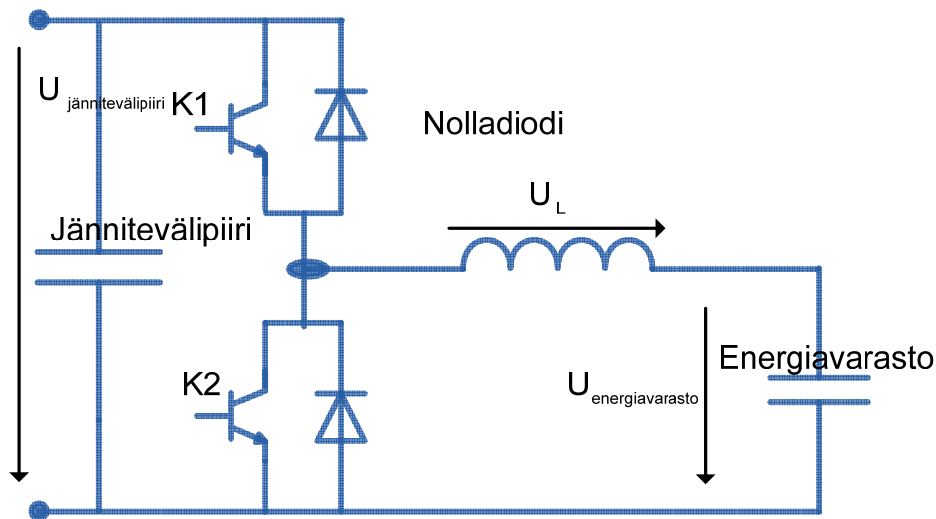
3.2 DC – DC – muuttajat

3.2.1 Yleisesti

Laskevat ja nostavat DC-DC – muuttajat eli Buck-Boost – muuttajat toimivat tehonsiirrossa eri jännitetasojen välillä hybridisähköjärjestelmissä. DC – DC – muuttajien käyttö hybridijärjestelmissä on perusteltua, koska niiden avulla voidaan tehonsiirtoa ohjata hallitusti energiavarastoista jännitevälipiiriin ja takaisin. Energiavarastoihin sitoutunut käyttämätön energiamäärä pienenee kun energiavaraston jänniterajoja ei ole sidottu vaihtosuuntaajan toiminnan vaatimiin rajoihin vaan se sijoitetaan DC – DC – muuttajan taakse, jolloin energiavaraston varausaluetta voidaan käyttää vapaammin. Superkondensaattoria energiavarastona käytettäessä jännitetasot voidaan valita käyttöä varten tarvittavan energiamäärän mukaan. Tällä tavoin saadaan madallettua superkondensaattorimoduulin kustannuksia. Akuilla jännitteen vaihtelu varaustilan mukaan on kondensaattoreita pienempää. Yhtälö (3.1) kertoo kondensaattorissa käytettävissä olevan energian E , kapasitanssin C ja jänniterajojen U_{min} sekä U_{max} funktiona.

$$E = \frac{C * U_{max}^2}{2} - \frac{C * U_{min}^2}{2} \quad (3.1)$$

Energiavaraston nimellistä jännitettä rajoittaa käytettävä DC – DC – muuttajatopologia ja kytkinkomponenttien jännitteenkesto. Kuva 3.10 esittelee DC – DC - muuttajatopologian, missä nolladiodi rajoittaa energiavaraston jännitteen jännitevälipiirin jännitettä pienemmäksi. Jännite energiavaraston puolella rajoittuu kun energiavaraston ja kuristimen jännitteiden summa nousee jännitevälipiirin jännitettä suuremmaksi ja tehoasteen nolladiodi tulee johtotilaan. Yhdellä tehoasteella toteutettu DC – DC – muuttaja ei pysty estämään energiavaraston purkautumista matalampijännitetasoiseen jännitevälipiiriin ilman erotuskytkintä.



Kuva 3.10 Kaksisuuntainen erottamaton buck – boost muuttaja matalalle energiavaraston jännitelle

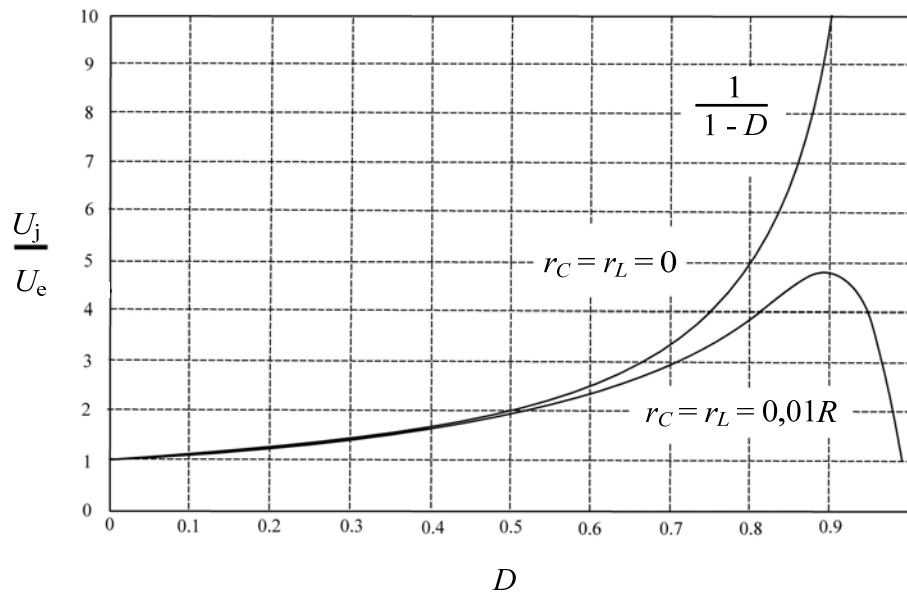
Laskevan ja nostavan katkojan jännitteenmuuntosuhde ilmoitetaan kytkimen pulssisuhteen D funktioina. Käytettäessä kahdensuuntaiseen tehonsiirtoon pystyvää DC-DC -muuttajaa voidaan kytkimiä ohjaamaan pelkästään laskevana tai nostavana katkojana. Tällöin ohjataan pelkästään joko kytkintä K1 tai kytkintä K2. Komplementaarisessa ohjauksessa kytkimiä K1 ja K2 ohjataan vuoronperään. Ohjausperiaatteet eroavat toisistaan induktanssivirran aukottuvalla alueella. Jännitteen muuntosuhteita eri kytkinten ohjauksilla esitetään yhtälöissä (3.2) – (3.4). Yhtälöissä U_j on jännitevälipiirin jännite ja U_e energiavaraston jännite.

$$U_j D = U_e \quad \text{laskeva katkoja} \quad (3.2)$$

$$U_e \frac{1}{1-D} = U_j \quad \text{nostava katkoja} \quad (3.3)$$

$$U_e \frac{D}{1-D} = U_j \quad \text{komplementaariohjaus} \quad (3.4)$$

Resistiiviset häviöt DC – DC – muuttajan induktansseissa ja kondensaattoreissa heikentävät muuttajan hyötysuhdetta toimittaessa suurilla pulssisuhteen D arvoilla. Hyötysuhteen heikkeneminen muuntosuhteen kasvaessa asettaa rajan järkevälle energiavaraston minimivaraustilalle. Nostavassa katkojassa ohjauksuhteen kasvaessa 0,8 - 0,9 lähettyville jännitteen muuntosuhde romahtaa kuristimen ja kondensaattorin resistiivisten häviöiden kasvaessa liian suuriksi. Kuvan 3.10 muuttajatopologialle esitetään ideaalinen ja epäideaalinen muuntosuhde kuvassa 3.11. Ideaalista muuntosuhdetta kuvaavassa käyrässä kuristimen ja kondensaattoreiden sarjaresistanssit on oletettu nolliksi (r_L, r_C). Epäideaalisessa muuntosuhteen käyrässä kuristimen ja kondensaattorin resistanssit ovat sadasosan suuruisia suhteessa kuorman resistanssiin R [15].



Kuva 3.11 Nostavan DC – DC – muuttajan muuntosuhdekäyrät ohjauksuhteen funktiona ideaalisessa ja epäideaalisessa tapauksessa [15]

DC-DC - muuttajien avulla voidaan sähköisten energiavarastojen käyttöä ohjata ECU:n säätelämällä tavalla. Ylemmätason ohjausstrategia määrittelee esimerkiksi energiavarastojen varauksen tavoitetilat tai kuinka suuria polttomoottorin tehohiippuja energiavarastolla pyritään leikkaamaan. ECU:lla voidaan työkoneen tehontuotanto- ja energianvarastointilaite valita senhetkisellemä toiminnalle parhaiten sopivaksi.

DC – DC – muuttajan ohjaus hybridijärjestelmässä voi olla hajautettu muuttajan itsensä toteutettavaksi tai muuttajan ohjaus voidaan jättää ylempitasoisen ECU:n päätettäväksi. Hajautetussa DC – DC – muuttajan ohjauksessa voi esimerkiksi olla kyse jänniteohjauksesta, jolloin muuttajalle on annettu vastuu jännitevälipiirin stabiilina pitämisestä.

Jänniteohjattu DC – DC – muuttaja ohjaa virtaa energiavarastosta jännitevälipiiriin ja takaisin pitääkseen jännitevälipiirin sille määritellyissä jänniterajoissa. Jänniteohjattu DC – DC – muuttaja toimii jännitteen kaksipistesäädöllä eli määritellyillä jännitevälipiirin maksimi ja minimi jänniterajoilla sekä virtaohjeella. Jänniteohjattu muuttaja pysyy pitämään jännitevälipiirin sallituissa jänniterajoissa jos sen virranohjaus mahdollisuus on riittävän suuri eikä energiavaraston varaus ajaudu maksimi- tai minimiarvoonsa. Jänniteohjatun DC – DC – muuttajan ohjaaman energiavaraston varaustilaa päästään muuttamaan ohjaamalla jännitevälipiirin jännite muulla tehonsiirtojärjestelmällä muuttajan ohjausrajalle. Jännitevälipiirin jännite saadaan nostettua DC – DC – muuttajan ohjausrajalle esimerkiksi aktiivisella generaattorisillalla. Energiavaraston lataus tapahtuu esimerkiksi ohjaamalla generaattorisillalla jännitevälipiirin jännite DC-DC - muuttajan jänniterajan yli muuttajan toimiessa omaa virtarajaansa vasten. Jänniteohjaus tarvitsee hystereesin jännitevälipiirin maksimi- ja minimijänniterajojen lataus- ja purkutoimintoja varten.

Virtaohjaus DC – DC – muuttajassa toteutetaan nopealla virranmittauksella ja vertaamalla mittausta virtaohjeen hystereesirajoihin. Virran hystereesirajoista poistuminen aiheuttaa muuttajassa pulssisuhteen D muutoksen. Virtaohjattua DC-DC -muuttajaa ohjataan virran suunnan ja virran ohjearvon mukaan. Virtaohjauksessa siirrettävään te-

hoon päästään suoraan vaikuttamaan toisin kuin jänniteohjauksessa. Energiavaroista tai generaattorisillalta tuotettavan virran ohjearvo voidaan määrittää esimerkiksi voimantuottoon osallistuvien laitteiden toimintapisteen tiedoista kuten tehosta tai vääntömomentista ja pyörimisnopeudesta.

Digitaalitekniikalla toteutetun ECU: n ohjaama teho hybridijärjestelmässä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Virtaohjaussilmukan ympärille voi esimerkiksi rakentaa tehonohjaussilmukan. Tällöin kuormalaitteilta saatava tehonkulutustieto voidaan välittää suoraan energiavaroja ohjaaville DC – DC – muuttajalle tai generaattorisillalle. Kuormalaitteiden tehonkulutustieto voidaan välittää teholähteille myötäkytkentänä, jolloin tehontuotanto ja kulutus jännitevälipiirissä ovat yhtä suuret. Tulevaa tehontarvetta on mahdollista ennustaa tehontiliedon avulla ja ohjauslaitteiden kuten esimerkiksi kaasupolkimen asennosta. Tehontuottajilta siirtämättä jäänyt teho näkyy jännitevälipiirin jännitteessä, jonka erosta referenssiin nähden tulee tehdä korjauksia tehon ohjaukseen.

DC – DC – muuttajien ohjausmenetelmät hybridijärjestelmässä:

1. Jänniteohjaus
2. Virtaohjaus

3.2.2 Mahdollisia DC – DC – muuttajatopologioita hybridijärjestelmän tehonsiirtoon

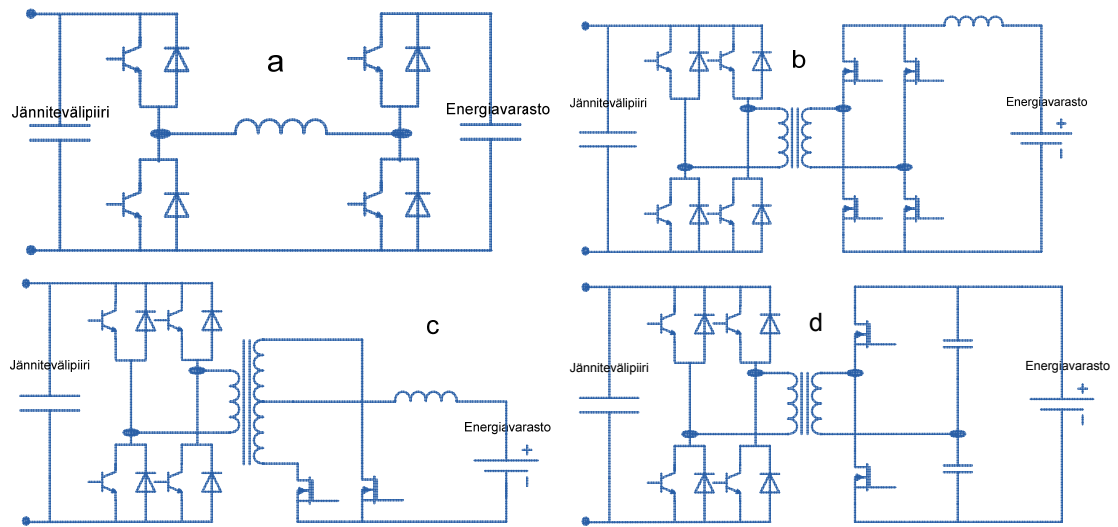
Buck - boost DC – DC – muuttajat joudutaan työkoneiden vaatiman suuren tehon takia toteuttamaan rinnakkaisilla IGBT- tai MOSFET -kytkimillä ja induktanssihaaroilla.

Kuva 3.12 esittelee DC – DC – muuttaja topologioita, joilla energiavarojen jännite saadaan jännitevälipiirin jännitettä korkeammaksi.

Galvaanisen erotuksen aikaansaamiseksi energiavarojen ja jännitevälipiirin välille tarvitaan joko tasavirtakatkaisijoita tai sopiva DC – DC – muuttajatopologia. Energiava-

rastojen galvaanista erotusta muusta sähköjärjestelmästä tarvitaan huoltotöitä ja onnettomuustilanteita varten.

Korkean jännitteen erottamattomalla buck – boost – muuttajalla kuvassa 3.12a saadaan energiavaraston jännite jännitevälipiirin jännitettä korkeammaksi, mutta haittapuolena on lisääntyvä IGBT – kytkinten määrä ja samalla lisääntyvät kytkemishäviöt. Muut kuvassa 3.12 esitellyt muuttajatopologiat sisältävät suurtaajuisen muuntajan ja erottavat muuntajan ansiosta energiavaraston jännitevälipiiristä. Suuremman kytkentätaajuuden takia näissä käytetään energiavaraston puolella MOSFET -kytkimiä.



Kuva 3.12 a) erottamaton buck – boost – muuttaja korkealle energiavaraston jännitteelle, b) erottava virtalähde kokosiltamuuttaja, c) erottava virtalähde push - pull – muuttaja, d) erottava jännitelähde puolisiltamuuttaja [34]

3.3 Vaihtosuuntaaja eli DC – AC – muuttaja ja generaattorisilta hybridijärjestelmän osana

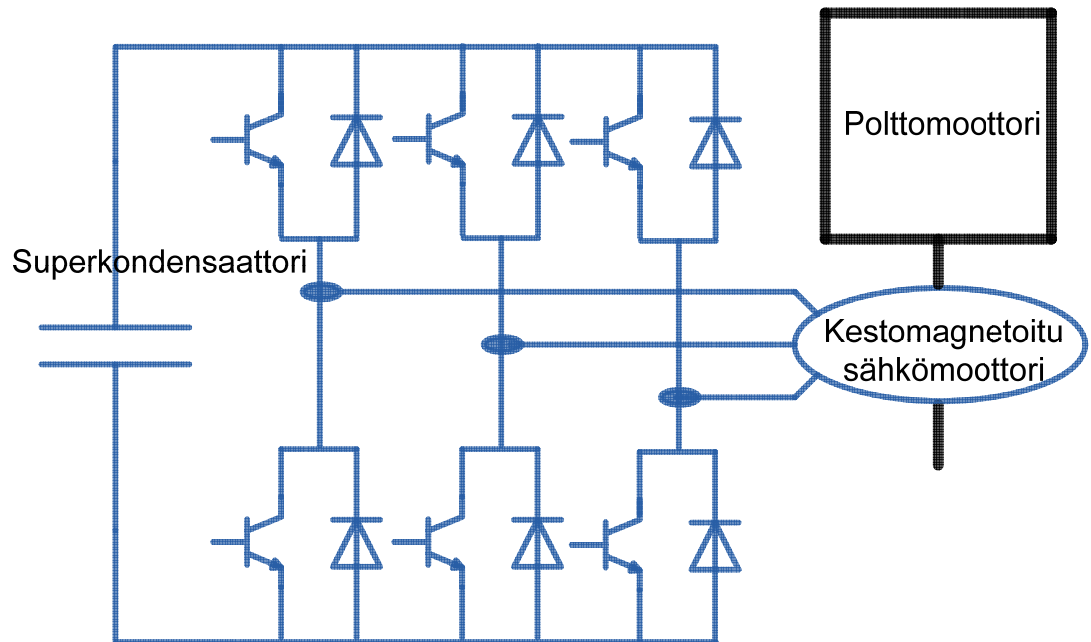
Vaihtosuuntaajat toimivat sähköisessä hybridityökoneessa sähkömoottoreiden ohjauksessa. Vaihtosuuntaaja voi ohjata sähkömoottoria joko vääntömomenti- tai nopeusohjeella. Yleensä on järkevää ohjata sähkömoottoria vääntömomenttiohjeella, jolloin jännitevälipiiristä otettava teho on ennustettavaa. Sähkömoottorin vääntömomenttiohjaus tuo työkoneneen voimantuottoon ajoneuvon kaasupoljinta vastaavan tuntuman. Vaihtosuuntaustekniikan mahdollistama sähkömoottorin nopeusohjaus ajomoottorikäytössä on ongelmallinen tehonkulutuksen ennustamattomuuden vuoksi. Nopeusohjattuna sähkömoottori ottaa satunnaisesti ja nopeasti vaihtuvasta kuormituksesta riippuvan satunnaisen tehon hybridijärjestelmän jännitevälipiiristä.

Vaihtosuuntaajaa voidaan käyttää myös energiavarastona toimivan huimamassan ohjauksessa. Huimamassan ohjauksessa voidaan ajatella käytettävän joko vääntömomentti- tai nopeusohjetta, koska vauhtipyörää kuormitetaan vain vaihtosuuntaajan kautta, eikä nopeusohje aiheuta tällöin ennustamatonta tehonsiirtoa. Nopeusohjeella ohjattaessa tehonsiirto tapahtuisi vääntömomenttirajaa vasten.

Generaattorisiltaa hybridijärjestelmässä käytetään generaattorin tuottaman vaihtosähkön tasasuuntaukseen. Hybridijärjestelmässä käytettävä generaattorisilta voi olla joko aktiivisilla IGBT-, tyristorikytkimillä tai passiivisilla diodikomponenteilla toteutettu silta. Generaattorisillan tyypin valintaan vaikuttaa hybridijärjestelmässä tavoiteltu ohjausstrategia. IGBT- kytkimillä toteutetulla generaattorisillalla voidaan lähtöjännitteen suhdetta lähtövirtaan suurentaa muutoin polttomoottorin kierrosnopeuden määräämästä jännite-virta -suhteesta. Tyristorikytkimillä voidaan generaattorisillan lähtöjännitettä madaltaa ja passiivisilla diodeilla lähtöjännitteen suuruus määräytyy polttomoottorin kierrosnopeudesta. Tahtigeneraattorin tapauksessa lähtöjännitteeseen voidaan lisäksi vaikuttaa generaattorin magnetoinnilla.

IGBT- kytkinten ohjauksella jännitevälipiirin jännite saadaan pysymään vakiojännitearvossa. Tyristori- tai diodisillalla toteutettu generaattorisilta aiheuttaa jännitevälipiiriin generaattorin pyörimisnopeudesta riippuvan jännittesykkeisyyden. Esimerkiksi verkkotaajuudesta vaihtosähköstä aiheutuu jännitevälipiiriin 300 Hz vaihtokomponentin eli kuusinkertaisen taajuuden. [15]

Kolmivaiheista IGBT- kytkinsiltaa voidaan käyttää myös energiavaraston tehonohjaukseen. Kuva 3.13 esittelee järjestelmän missä kolmivaiheinen vaihtosuuntaussilta yhdistää energiavaraston kestmagnetoituun sähkömoottoriin. Järjestelmällä voidaan esimerkiksi regeneroida jarrutusenergiaa ja avustaa polttomoottoria kiihdytystilanteissa. Kiihdytystilanteiden avustaminen mahdollistaa polttomoottorin mitoituksen pienentämisen.



Kuva 3.13 Kolmivaiheinen vaihtosuuntaussilta ohjaa tehoa kestmagnetoitun sähkömoottorin ja energiavaraston välissä

3.4 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit toimivat hybridijärjestelmissä transienttien tehotarpeiden energia-puskureina ja vähentävät primäärienergianlähteiltä vaadittua huipputehontarvetta. Superkondensaattoreiden nopean tehontuottokyvyn vuoksi niillä voidaan vähentää muiden energialähteiden dynaamisen kuormavasteen vaatimuksia. Transientin kuormituksen puuttuminen muilta energianlähteiltä vaikuttaa positiivisesti näiden elinikään ja mahdollistaa osaltaan muiden energianlähteiden ohjauksen kuormitustilanteen kannalta parempaan toimintapisteeseen. Superkondensaattoreiden ohjauksella voidaan pienentää polttomoottorin tai käytettyjen akkujen [11] mitoitusta.

Taulukko 3.3 Superkondensaattoreita energianvarastointiin ja – puskurointiin valmistavia yrityksiä, 27.2.2008

http://www.maxwell.com/
http://www.nesscap.com/products_edlc.htm
http://www.esma-cap.com/Products/Capacitor_modules/?lang=English
http://www.elit-cap.com/files/eng/ups.htm

Taulukko 3.3 esiteltävien superkondensaattorivalmistajien lisäksi hyvä tietolähde superkondensaattoreista ja niiden valmistajista on Tiia-Maaria Ketolan diplomityö [35]. Työn sivulla 53 on listaus kaupallisista superkondensaattori valmistajista, joista kaikki eivät keskity suuren teholuokan energiavarastojen valmistukseen.

Hybridikäyttöisen työkoneen energiapuskureiksi soveltuvia superkondensaattorimoduuleita ovat esimerkiksi Maxwell ® Technologies BMOD0018-P390 ja BMOD0063-P125. Valmistaja mainitsee sovellusalueiksi kyseisille moduuleille regeneratiivisen jarrutuksen, vääntömomenttiavustusjärjestelmät ja moottorin käynnistyksen avustuksen. Kuva 3.14 esittelee BMOD0018-P390 moduulin HybDrive – projektin yksipyörätasausasemalla.

Taulukko 3.4 sisältää BMOD0018-P3-superkondensaattorimoduulin suoritus-tietoja.



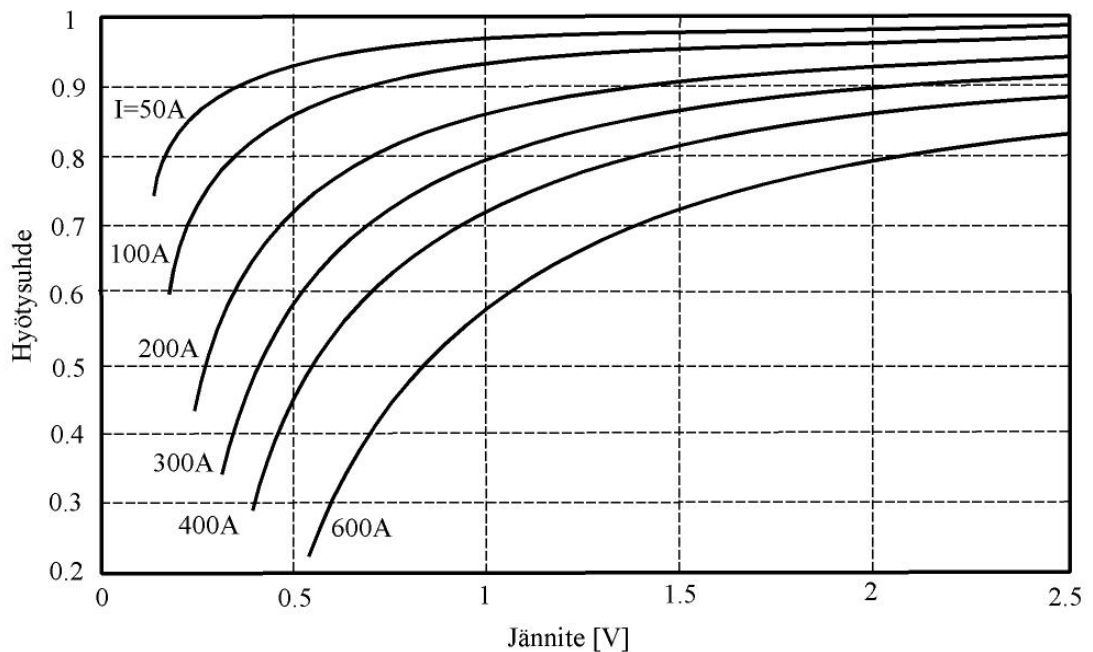
Kuva 3.14 Maxwell ® Technologies BMOD0018-P390-superkondensaattorimoduuli

Taulukko 3.4 Maxwell ® Technologies BMOD0018-P390-superkondensaattorimoduulin suoritus-tietoja [36]

Nimellinen jännite [Vdc]	390
Maksimijännite [Vdc]	394
Syöksyjännite [Vdc]	406
Nimellinen kapasitanssi [F]	17.8
Kapasitanssin toleranssi [%]	20% / 0%
DC-sarjavastus [mΩ]	65.0
Käytettävissä oleva energia (Whr) [jännitevälillä 203 V – 394 V]	282
Itsestään purkautuminen [% alkuperäisestä V] (30 päivää, 12 tunnin lataus ja pito)	50 %
Maksimi jatkuva virta [A] (olettaen 15°C lämpötilan nousun ympäristöön nähden)	150
Maksimi virta [A]	950
Lataus – purku syklejä 390 - 62.5 Vdc [sykliä]	1 000 000
Eristysjännite [Vdc]	3500

Paino [kg]	165
Pituus / Leveys / Korkeus [mm]	1200 / 629 / 288

Superkondensaattorimoduulit kootaan muutaman voltin nimellisjännitteisistä kennoista. Edellä esitelty BMOD0018-P390-moduuli on rakennettu 2,7 voltin kennoista. Matalajännitteisistä kennoista koottu moduuli sisältää jännitteentasaukseen ja lämpötilan tarkkailuun vaadittavaa elektroniikkaa. Kuva 3.15 esittää erään matalajännitteisen superkondensaattorikennon hyötysuhdetta purkuvirran ja kennon jännitteen funktiona.

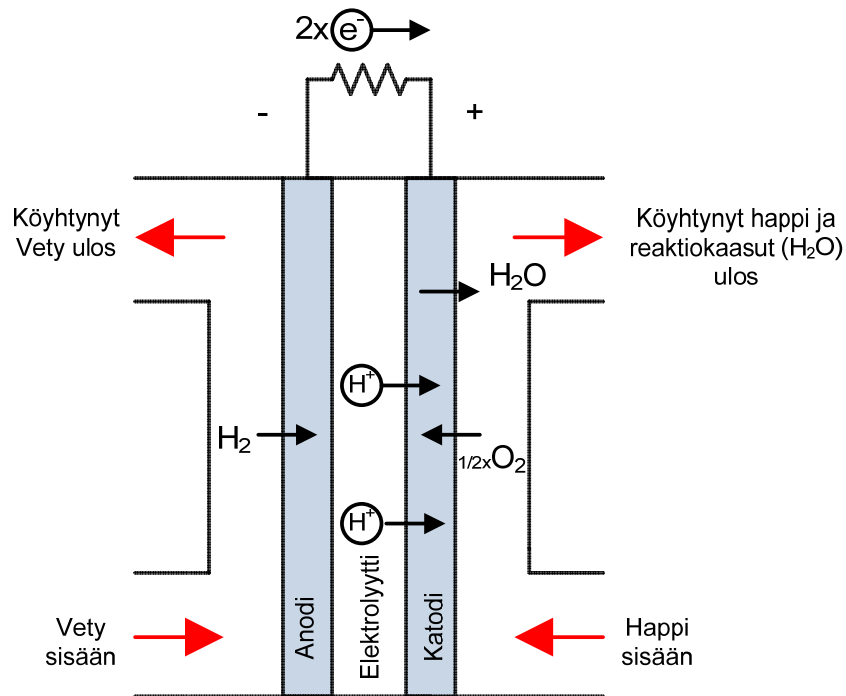


Kuva 3.15 Maxwell @ 2600 F superkondensaattorin lataus-purku hyötysuhdekäyrästä [3]

3.5 Polttokennot

[4] Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa polttoaineen ja hapettimen kemiallisen energian sähköksi ilman liekillistä palamista. Yksinkertaistettuna siihen kuuluu anodi, katodi ja näitä erottava elektrolyytti. Polttoaine hapettuu anodilla, josta vapautuvat elektronit johdetaan elektrodilta ulkoiselle kuormalle ja protonit kulkeutuvat ionijohteenä toimivan elektrolyytin lävitse.

Kuorman kautta elektronit kulkeutuvat katodille, missä ne kohtaavat elektrolyytin läpäisseet protonit ja katodille johdetun hapetusaineen. Katodilla tapahtuva kemiallinen reaktio riippuu käytetystä polttoaineesta ja hapettimesta. Anodilla ja katodilla on katalyyttiä, joka nopeuttaa kemiallista reaktiota. Elektrolyytti estää polttoaineen ja hapettimen suoran kohtaamisen, mutta laskee lävitseen aina jonkin ionin. Tällä tavoin saadaan virta kiertämään polttokennopiirissä. Polttokennot vaativat toimiakseen jatkuvasti ulkoa syötettyjä reaktantteja eli polttoaineita. Yleisimmin polttoaineena käytetään vetyä, joka tällöin reagoi hapen kanssa. Kuva 3.16 havainnollistaa polymeerielektrolyyttimembraanipolttokennossa (PEM) tapahtuvaa kemiallista reaktiota.



Kuva 3.16 PEM - tekniikalla toteutetun polttokennon toimintaperiaate

Rakenteellisesti polttokennoista voidaan erotella seuraavanlaisia komponentteja: elektrolyytti, elektrodit anodi ja katodi, kaasudiffuusiokerrokset, virtauskanavalevyt ja mekaaniset rakenteet.

Elektrolyytti toimii ionijohteena anodin ja katodin välillä. Sen kemiallisiin ominaisuuksiin kuuluu hyvä ionien johtavuus, huono elektronien johtavuus, eli se on sähköeriste, kaasutiiviys sekä mekaaninen ja kemiallinen stabiilius. Elektrolyytissä tapahtuu polttokennon merkittävimmät lämpöhäviöt ja lämpöhäviöiden suuruus on suoraan verrannollinen elektrolyyttimateriaalin paksuuteen.

Elektrodeilla eli anodilla ja katodilla tapahtuvat hapetus- ja pelkistysreaktiot. Reaktioiden synty katalyytillä vaatii olosuhteikseen kolmifaasirajapinnan.

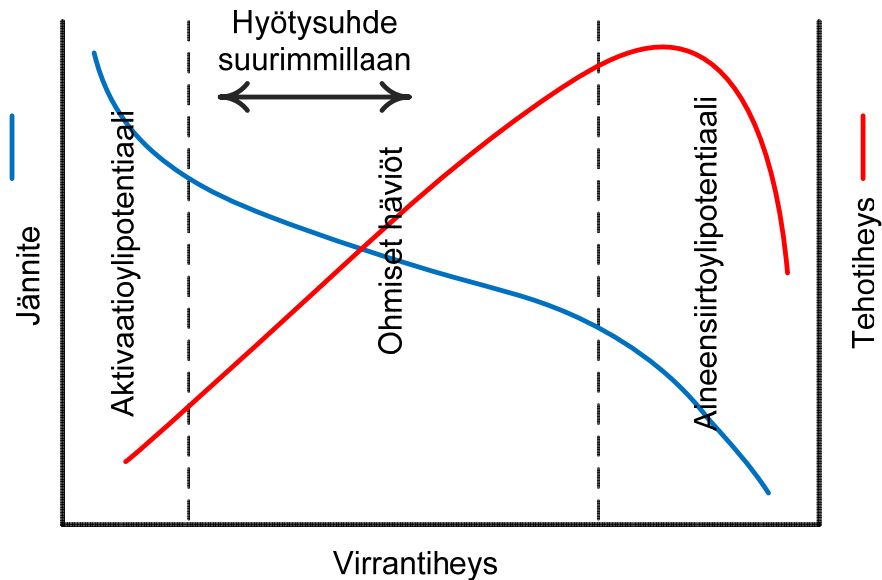
Korkean lämpötilan polttokennoissa käytetään kaasudiffuusioelektrodeja. Kaasudiffuusiokerros on huokoinen rakenne varsinaisen elektrodin ja virtauskanaviston välissä. Tämä on käytössä myös matalalämpökennoissa. Sen tarkoituksena on jakaa reaktantit eli polttoaine tai hapetin tasaisesti elektrodien pinnoille, poistaa ylimääräinen vesi elektrodilta virtauskanavistoon sekä toimia elektroni- ja lämmönjohteena.

Virtauskanavalevyjä pitkin reaktantti kulkeutuu elektrodille ja reaktiossa syntyvä vesi kulkeutuu elektrodilta pois. Niiden tarkoituksena on lisäksi kennon tukeminen ja mahdollinen jäähdyttäminen rakenteeseen tehtyjen jäähdytyskanavien avulla. Virtauskanavalevyjen rakenteeseen voidaan soveltaa monia eri periaatteita riippuen halutuista ominaisuuksista ja tahdotusta sovelluskohteesta. Erilaisia rakenteita virtauskanavalevyille on muun muassa rinnakkaiskanavat, serpentiinikanavat ja rinnakkaiset serpentiinikanavat.

Polttokennoja voidaan valmistaa joko pariston näköisiksi tubulaarisiksi kennoiksi tai tasomaisiksi levykennoiksi. Tasomaisen etuna ovat lyhyet elektronin kulkeutumismatkat ja pienet sisäiset resistiiviset häviöt, mutta ongelmana on lämpölaajeneminen. Rakenteiden erilainen lämpölaajeneminen saattaa aiheuttaa kennon rikkoutumisen tasomaisessa polttokennossa. Tubulaarinen eli pariston mallinen rakenne on lämpölaajenemisen kannalta parempi. Tubulaarinen rakenne pystyy tukemaan itseään, mikäli jokin osa kennossa yrittäisi laajentua toista enemmän. Tubulaarisessa rakenteessa on sen sijaan

suuremmat sisäiset häviöt johtuen ionin pidemmästä kulkeutumismatkasta elektrolyytin lävitse.

Kuva 3.17 esittelee polttokennojen polarisaatiokäyttäytymiseen kuuluvia kolmea eri toiminta-alueita. Toiminta-alueet ovat nähtävissä kennon jännite-virta käyrän muodosta, jota on esitelty kuvassa. Nämä toiminta-alueet ovat aktivaatioylijipotentiaali, ohmiset häviöt -alue ja aineensiirtoylijipotentiaali, järjestyksessä pienimmästä virtatiheydestä suurimpaan. Aktivaatioylijipotentiaali-alueella jännite-virta käyrä laskee normaalia toiminta-alueita nopeammin. Tämä johtuu reaktioiden käynnistymishitaudesta. Ohmisten häviöiden alueella eli normaalilla kennon toiminta-alueella jännite-virta käyrä on kaikkein loivin ja tällä alueella on nimensä mukaisesti pelkästään resistiivisiä häviöitä. Aineensiirtoylijipotentiaalin alueella jännite-virta käyrä laskeutuu jälleen voimakkaasti. Tämä ilmiö johtuu liian hitaasta reaktanttien kulkeutumisesta elektrodeilla.



Kuva 3.17 Polttokennon jännite-virtakäyrä ja tehotiheys eri toimintapisteissä

Polttokennot saavuttavat maksimithehonsa ohmisten häviöiden alueen ja aineensiirtoylijipotentiaali alueen vaihtumiskohdassa. Tässä pisteessä kennon hyötysuhde ei ole parhaimmillaan. Useimmiten polttokennoja käytetään osakuormalla, mikä on alle puolet

maksimitehosta eli toimintapiste on ohmisen alueen alkupäässä. Polttokennoista otetun virran kasvu aiheuttaa resistiivisten häviöiden kasvua neliöllisesti, mikä heikentää hyötysuhdetta. Hyötysuhteen käyttäytyminen kuormituksen suhteen onkin juuri polttokennojen etuna polttomoottoreihin verrattuna. Polttokennojen yli jäävä jännite riippuu kuormituksesta ja on useimmiten 0,7 voltin luokkaa. Pienen lähtöjännitteen johdosta polttokennoja joudutaan käyttämään useimmissa sovelluksissa kytkemällä niitä riittävästi sarjaan.

Hybridikäyttöisiä työkoneita ajatellen lupaavia polttokennotyyppejä ovat PEM - polttokenno ja kiinteäoksidipolttokenno (SOFC). PEM – polttokennojen soveltuvuuden työkonisiin mahdollistaa hyvä suorituskyky, nopea käynnistysaika, hyvät kuormitustransienttiominaisuudet, sopiva toimintalämpötila 30 – 80 celsiusastetta, vähäinen korrosio ja olomuodoltaan kiinteä elektrolyytti - membraani. PEM: in polttoaineena toimii vety ja hapettimena happi, mutta siinä on mahdollista käyttää reformerin avulla neste-mäisiä polttoaineita kuten etanolia, metanolia tai maakaasua.

SOFC – polttokenno on korkean lämpötilan kenno, jonka toimintalämpötila sijaitsee 700 - 1100 celsiusasteen välissä. Elektrolyytinä SOFC käyttää keraamista yttriumstabiloitua zirkoniumoksidia. Korkea lämpötila mahdollistaa halpojen perovskiittirakenteisten katalyyttien käytön ja polttokennon polttoaineen sisäisen reformoinnin toiminnan. SOFC - tekniikan sisäinen polttoaineen reformointi mahdollistaa esimerkiksi maakaasun käytön suoraan polttokennon polttoaineena. SOFC -tekniikassa tavoitellaan entistä matalampaa käyttölämpötilaa mikä olisi etuna erityisesti käynnistystilanteissa. Matalampilämpötilainen polttokenno mahdollistaisi järjestelmän toimintalämpötilan nopeamman saavuttamisen. Suurin ongelma SOFC - tekniikassa on polttokennon rakenteiden erilaiset lämpölaajenemiskertoimet. Materiaalien erisuuruiset lämpölaajennuskerroimet aiheuttavat rikkoutumisia eri materiaalien rajapinnoissa. SOFC - tekniikalla valmistetaan polttokennoja 1 – 125 kW tehoalueelle ja näiden elinikä saavuttaa 25000 tuntia. [29]

Polttokennon toimintaa varten oleellisia lisälaitteita ovat lämpötilansäätimet, massavirtasäätimet, kostutusyksikkö, kompressori, polttoaineen puhdistusyksikkö ja jäähdytyslaite. Polttokennojen hyötysuhde pelkkänä energianlähteenä on noin 40 - 50 prosentin luokkaa, mutta polttokennojärjestelmiin kuuluvien oheisjärjestelmien kuluttama teho ja vedyn valmistukseen kuluva energia laskee kokonaishyötysuhteen noin 20 - 30 prosenttiin.

Käytettäessä vetyä polttokennojen polttoaineena ei aiheuteta suoraan kasvihuonepäästöjä. Päästöjä kuitenkin syntyy vedyn valmistusprosessista riippuen. Vetyä voidaan valmistaa sähkön avulla reformoimalla vedestä.

Vedystä annetaan kuva hyvänä energianvarastointiaineena. Vedyn energianvarastointikyvystä puhuttaessa mainitaan yleensä vain teho-painosuhte, mikä on noin kolme kertaa parempi vedyllä kuin bensiinillä (33 kWh/kg vs. 13 kWh/kg).

Kuitenkin vety on nestemäisenä noin 11 kertaa kevyempää kuin bensiini, joten saman energiamäärän varastoimiseen nestemäisenä tarvitaan vedyllä noin neljä kertaa enemmän tilaa kuin bensiinillä. Vedyn varastoiminen kaasuna vaatii paineistamista ja tällöin joudutaan vielä nestemäistä vetyä huonompaan tilavuuteen. Nykyisin käytetään 345 bar: in (5000 psi) painetta tankissa ja tavoitteena on vielä kaksin- tai nelinkertaistaa paine, jotta päästäisiin riittävän pieneen tilavuuteen [9].

3.6 Akut

Akku on sähkökemiallinen sekundäärinen energianlähde. Sen rakenteeseen kuuluu yksinkertaistetusti elektrodit anodi ja katodi sekä elektrolyytti. Elektrodien ja elektrolyytin kemiallinen reaktio määrää akun suorituskyvyn.

Nikkelimetallihydridiakun (NiMH) toisena elektrodina käytetään nikkeliä ja toisena metalliseosta, johon on imeytetty vetyä. NiMH: n elektrodina toimiva metalliseos pysyy sitomaan ja vapauttamaan vetyä monta kertaa menettämättä ominaisuuksiaan. Nik-

keli on lyijyä kevyempi metalli ja sillä on hyvät sähkökemialliset ominaisuudet. Muita nikkeli-pohjaisia akkuteknologioita ovat nikkeli-rauta, nikkeli-sinkki ja nikkeli-kadmium.

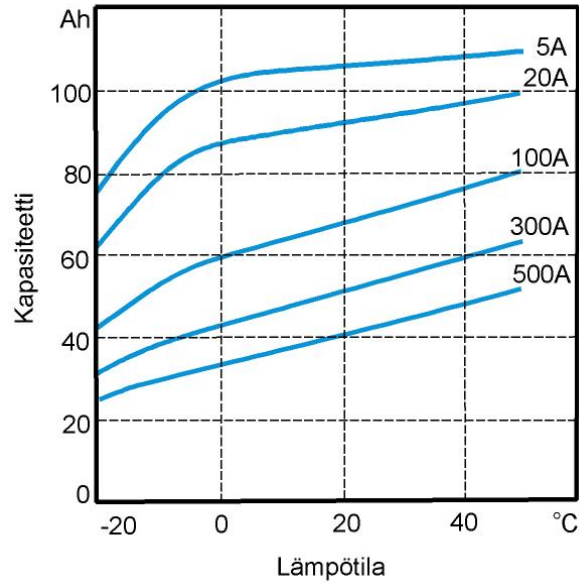
NiMH akut ovat toimineet energiavarastoina viimeisissä Toyotan hybridiajoneuvoissa. Tulevaisuudessa hybridiajoneuvoissa siirrytään NiMH -akun käyttämisestä Litium -ioni akkuihin (Li-Ion). Toyota on ilmoittanut tuovansa ensimmäisen version plug-in hybridistä markkinoille vuoden 2010 tietämällä ja varustettuna nimenomaan Li-Ion akulla [30]. Tähän mennessä energiatihedeltään ja hyötysuhteeltaan NiMH: ta parempaa Li-Ion akkua ei ole otettu käyttöön sarjatuotetuissa ajoneuvoissa näiden käyttöön liittyvien epävarmuuksien takia.

Li-Ion akkuteknologia liikuttaa energiaa litium-ionien reaktioilla. Sillä on hyvä energiapainosuhte ja sen varauksen itsestään purkautuminen on muita akkuteknologioita hitaampaa. Li-Ion akkujen lataus- purkaussykleistä puuttuu ns. muistikäyttäytyminen, jossa akku ei lataudu vajaan latauskerran jälkeen alkuperäiseen maksimivaraustilaan. Huonona puolena teknologialla on ollut väärinkäytön aiheuttama akun vikaantuminen räjähtämällä. Litium on elektrodi materiaalina kevyin mahdollinen metalli. Litiumin avulla saadaan korkea kennojännite sopivaan elektrodipariin yhdistämällä. Elektrolyytti Li-Ion akuissa on perinteisesti litium-suolaa, joka on eloperäinen liuotin.

Litium-ioni-polymeeriakkuteknologia (Li-P) on kehittynyt perinteisen Li-Ion -teknologian pohjalta. Erona perinteiseen Li-Ion teknologiaan on elektrolyytti, jona käytetään kiinteää polymeeriä kuten polyeteenioksidia tai polyakryyliamidia. Etuna perinteiseen tekniikkaan verrattuna ovat pienemmät valmistuskustannukset ja turvallisuus fyysisen rasituksen alla. Molemmilla litium-teknologioilla valmistaja voi muokata akun muotoa haluamallaan tavalla.

Akun kapasiteetti kertoo käytettävissä olevan virran tietyssä aikajaksona. Kapasiteetti ei ole kiinteä ominaisuus, vaan riippuu mm. seuraavista muuttujista: purkuvirran suuruus, elektrolyytin tiheys ja lämpötila, purkusykli, akun ikä ja elektrolyytin kerrokselli-

suus. Kuva 3.18 esittelee akun kapasiteetin muutoksia eri purkuvirran ja lämpötilan arvoilla. Kapasiteetin muuttuminen purkuvirran funktiona tekee järkeväksi käyttää akkua hybridijärjestelmissä pienillä tehotarpeilla, jolloin suurempi osa akun kapasiteetista on hyödynnettävissä.



Kuva 3.18 Akun kapasiteetti lämpötilan ja purkuvirran funktiona [31]

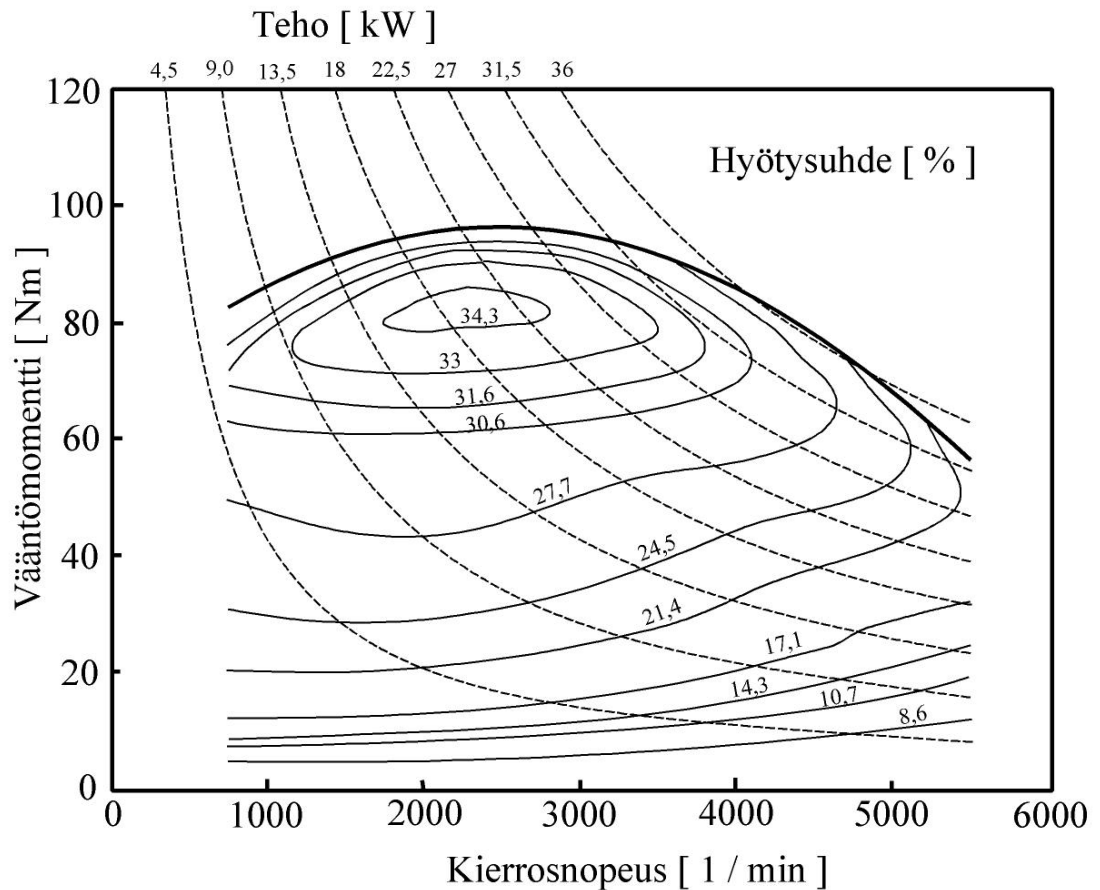
Taulukko 3.5 esittelee eri akkuteknologioiden suoritus tietoja.

Taulukko 3.5 Eri akkuteknologioiden suoritus tiedot vertailussa [37], [38], [39]

	Nikkelimetallihydridi	Litium-ioni	Litiumpolymeeri
energia [Wh] / paino [kg]	30–80	160	130–200
energia [Wh] / koko [dm ³]	140–300	270	300
teho [W] / paino [kg]	250–1000	1800	2800 asti
Lataus- / purku hyötysuhde [%]	66	99,9	99,8
energia / kuluttajahinta [Wh/US\$]	1,37	2,8 - 5	2,8 - 5
itsestään tyhjentyminen [%/kk]	30	5 - 10	5
elinikä [kk]	-	24 - 36	24 - 36
Lataus- / purku syklien kesto	500 -1000	1200	yli 1000
kennojännite [V]	1,2	3,6 - 3,7	3,7

3.7 Polttomoottori hybridijärjestelmässä

[31] Polttomoottorin huonona puolena energiatalouden kannalta on hyötysuhde osakuormituksella. Osakuormituksella polttomoottorin hyötysuhde putoaa noin kolmasosaan parhaan hyötysuhteen toimintapisteestä. Kuva 3.19 esittelee polttomoottorin hyötysuhteen käyttäytymistä kierrosnopeuden, vääntömomentin ja tehon funktioina.

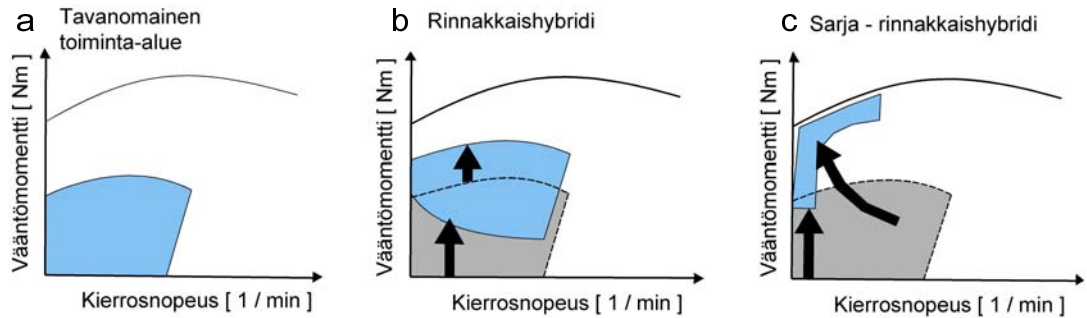


Kuva 3.19 Esimerkki polttomoottorin hyötysuhdekäyttäytymisestä vääntömomentti – teho kartalla [3]

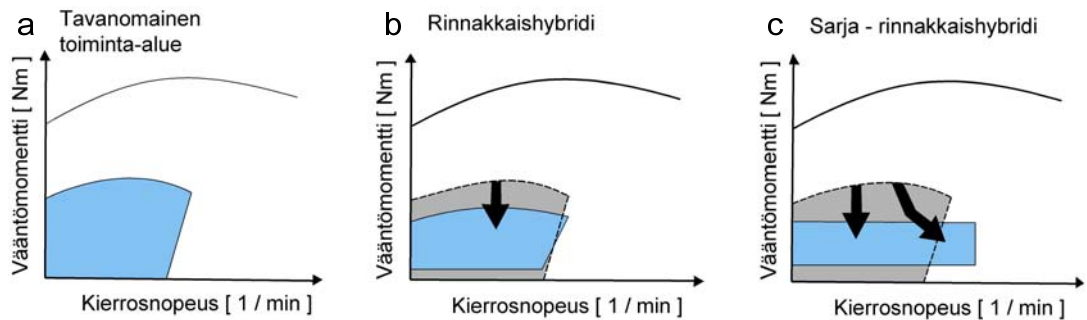
Hybridijärjestelmän ohjausstrategialla tavoitellaan ensisijaisesti polttoaineen kulutuksen pienentämistä ja samalla päästöjen vähentämistä. Tarkennettaessa ohjausstrategiaa voidaan tavoite kohdistaa CO₂ tai NO_x päästöjen vähentämiseen. Ohjausstrategian valintaan vaikuttaa käytetäänkö järjestelmässä bensiini- vai dieselmootoria. Dieselmoot-

toria käytettäessä ohjausstrategialla kohdistutaan NO_x ja pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen ja bensiinimoottoria käytettäessä tavoitellaan CO_2 vähentämistä ja polttoainenkulutuksen pienentämistä.

Kuva 3.20 esittää CO_2 - ohjausstrategian mukaisia polttomoottorin toiminta-alueen muutoksia rinnakkaishybridille ja sarja – rinnakkaishybridille verrattuna perinteiseen ajoneuvoon. Polttomoottorin toiminta-alueen määrää NEDC: n eli New European Driving Cycle: n mukainen ajosykli. Kuva 3.20a on perinteisen polttomoottoriajoneuvon käyttämä toiminta-alue, kuvassa 3.20b on rinnakkaishybridin ja kuvassa 3.20c sarja – rinnakkaishybridin toiminta-alueet. Kuva 3.21 esittelee vastaavat toiminta-alueet tavoiteltaessa NO_x ja pienhiukkaspäästöjen vähentämistä. Sarjahybridijärjestelmällä on mahdollista pakottaa polttomoottori toimimaan pitkin maksimihyötysuhdereittä, aktiivisen generaattorisillan ja polttomoottorin nopeussäädön avulla [50].



Kuva 3.20 Polttomoottorin toiminta-alue tavoiteltaessa CO_2 päästöjen minimoimista, harmaa tavanomainen toiminta-alue ja sininen tavoiteltu toiminta-alue [31]



**Kuva 3.21 Polttomoottorin toiminta-alue tavoiteltaessa NO_x päästöjen minimoimista, harmaa ta-
vanomainen toiminta-alue ja sininen tavoiteltu toiminta-alue [31]**

3.8 Hyötyjarrutus ja potentiaalienergian hyödyntäminen

Nykyisissä ajoneuvoissa jarrutettaessa menetettävä liike-energia kulutetaan kokonaan lämmöksi. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen etuna on liike-energian regenerointi ajomoot-
toreiden ja näitä ohjaavien DC – AC – muuttajien avulla sähköisiin energiavarastoihin. Liike-energian regenerointi ei poista normaalien jarrujen tarvetta sillä tehonsiirtoketjua
pyöriltä energiavarastoon ei ole kannattavaa mitoittaa maksimaalisen yhden g:n hidas-
tuvuuden mukaan ($g =$ maan vetovoiman putoamiskiihtyvyyys). Yhtälö (3.5) havainnoi-
listaa maksimipainoisen täysperävaunuyhdistelmän aiheuttamaa tehonsiirtotarvetta hi-
dastettaessa tätä maksimaalisella yhden g:n hidastuvuudella 72 kilometrin tuntinopeu-
desta (20 m/s) pysähdyksiin. Yhden g:n jarrutus tarkoittaa pysähtymistä 2,04 sekunnis-
sa. Kaavassa (3.5) muuttujina ovat teho P , energia E , aika t , massa m ja nopeus v .

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{\frac{1}{2} \times 60000\text{kg} \times \left(72 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1}{3600}\right)^2}{2,04\text{s}} \approx 5,88\text{MW} \quad (3.5)$$

Pelkällä hyötyjarrutuksella jouduttaisiin megawattiluokan hetkittäinen teho siirtämään
ajoneuvon renkaista kuudella - kahdeksalla DC – AC tehoasteella jännitekiskostoihin ja
sieltä edelleen DC – DC muuntimilla superkondensaattoreihin. Liike-energian re-
generointi ei ole myöskään mahdollista tilanteessa, jossa sähköiset energiavarastot ovat
jarrutuksen alkaessa täynnä.

Jarrutusenergian regeneroinnissa energiavarastoihin voi ajatella päästävän parhaillaan
noin 90 prosentin hyötysuhteeseen jätettäessä tarkastelusta pois muut kuin sähköiset
tehonsiirtoilmiöt. Ajatellaan järjestelmä, jossa jarrutusenergia ohjataan kestopagne-
toidun sähkömoottorin ja sitä ohjaavan tehoasteen lävitse jännitevälipiiriin. Kestomag-
netoidulla sähkömoottorilla päästään parhaillaan 96 - 97 prosentin hyötysuhteeseen [19]

ja tätä ohjaavan vaihtosuuntaajan hyötysuhde vakiotehoalueella on yli 98 prosenttia. Jännitevälipiiristä tehonsiirto energiavarastoon onnistuu parhaimmillaan noin 98 prosentin hyötysuhteella [45]. Edeltävä arvo laskee virran kasvaessa DC – DC – muuttajan johtotilan häviöiden kasvaessa lineaarisesti ja jännitteen muuntosuhteen muuttuessa. Hiljentaessä menetettävän liike-energian uudelleen hyödyntämisessä päästään tällöin noin 80 prosentin hyötysuhteeseen.

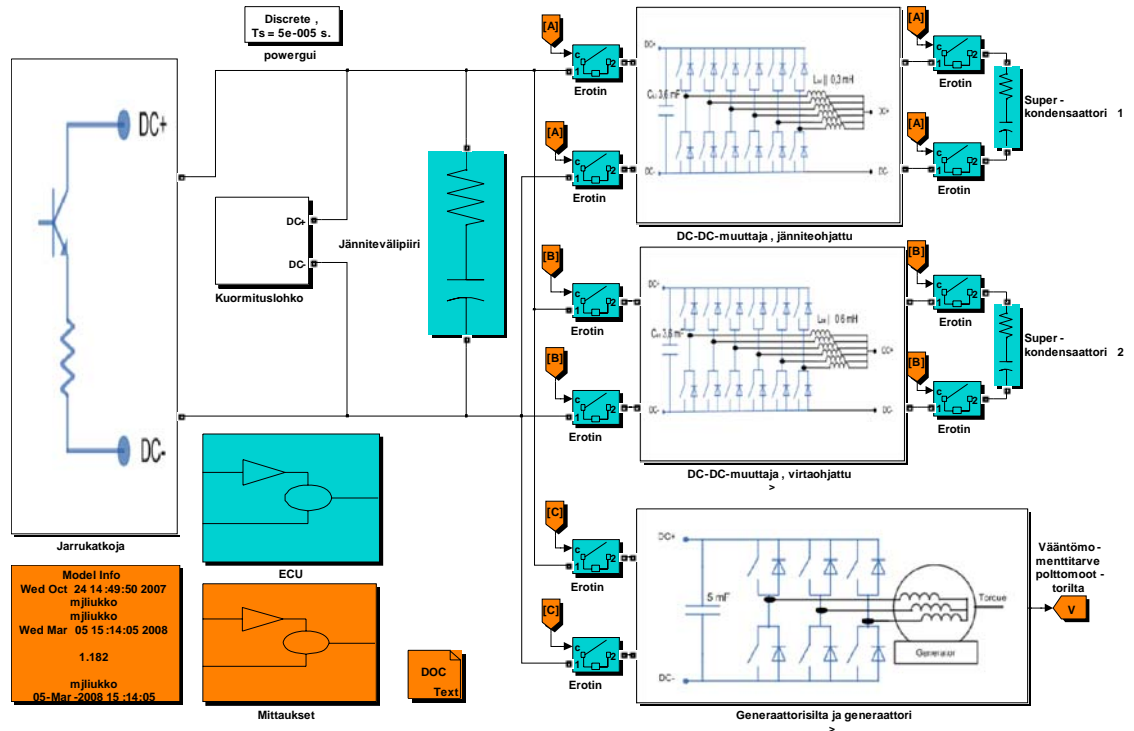
Kuormituksen tai tehonsiirron häiriötilanteita varten jännitevälipiiriin rinnalle kytketään tehopuolijohdekatkoja ja tehovastus sarjaan (Kuva 2.2). Jarrukatkojen tarkoituksena on pitää jännitevälipiirin jännite kondensaattoreiden keston rajaamalla alueella. Häiriötilanteen voi aiheuttaa äkillinen kuormituksen muutos kuten esimerkiksi sähkömoottorin vikaantuminen suurella pyörimisnopeudella.

4 Hybridijärjestelmän komponenttien simulointi

HybDrive – projektissa simuloidaan hybridijärjestelmän komponentit ja toiminta tasolla, mikä mahdollistaa erityyppisten hybridijärjestelmien toimivuuden testauksen ja ohjauksen kehittämisen simulaattorissa. Simulaattorin tavoitteena on antaa tietoa hybridijärjestelmän komponenttien kuten akkujen, superkondensaattoreiden ja polttomoottorin mitoituksista. Tavoitteena on ECU:n kehittäminen simulointimallin ja toteutettavan yksipyörätestausaseman avulla.

Simulointimalleilla tavoitellaan 20 Hz:n aikatasoa, mikä on riittävä tarkkuus suunniteltaessa hybridijärjestelmän tehonsiirron strategiaa. Esimerkiksi tällöin voidaan tutkia ovatko käytettävät tehonsiirtolaitteet virta- vai jänniteohjattuja ja käytetäänkö ohjauksessa esimerkiksi ennustavaa ohjauslogiikkaa. Aikatason valinta 20 Hz:ksi sulkee pois simuloinneista tehopuolijohdekomponenttien kytkentätilanteet, jotka eivät ole ylemmän tason ohjauksen suunnittelussa mielenkiinnon kohteena.

Simulointimallit toteutetaan Matlab – simulointiohjelmiston lohko-ohjelmointi työkalulla Simulink:illä. Simulink lohko-ohjelmointisovelluksesta on peruslohko-ohjelmointikirjaston lisäksi käytössä SimPowerSystem ja Stateflow -kirjastot. SimPowerSystem -kirjasto sisältää sähköjärjestelmien mallinnuksessa käytettävät reaaliset sähkökomponentit ts. komponentit, joiden signaaleina kulkevat jännite- ja virtatieto vektorina. SimPowerSystem:in lohkoja käytetään simulointimallissa kuvaamaan hybridijärjestelmän komponenttien rajapintoja. Stateflow -kirjasto sisältää tilakoneen lohko-ohjelmoinnin, jolla voidaan luoda ohjauslogiikka, joka simuloitavilla hybridijärjestelmän komponenteilla halutaan toteuttaa. Kuva 4.1 esittelee hybridijärjestelmän simulointimallin ylimmän tason, jossa käytetään energiavarastoina kahta superkondensaattorimoduulia.



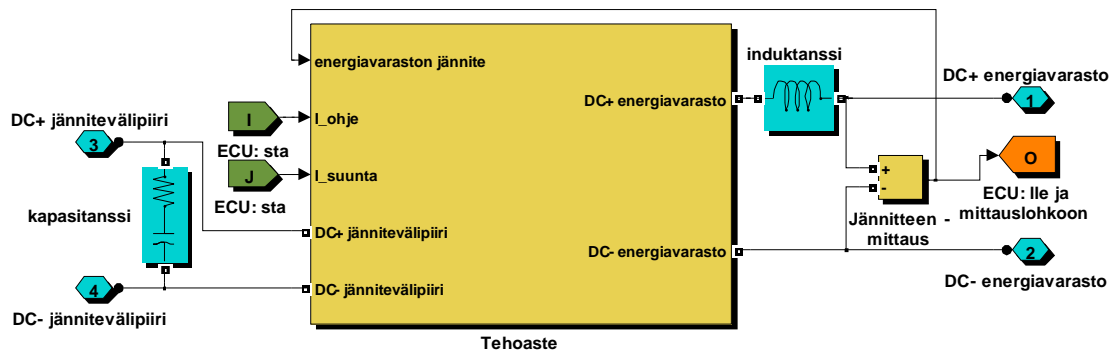
Kuva 4.1 Yleiskuva simulointimallista, jossa energiavaroista on kaksi superkondensaattorimoduulia

Yllä olevassa kuvassa on simulointilohkot virta- ja jänniteohjatuille DC-DC -muuttajille, superkondensaattorimoduulille, generaattorisillalle ja generaattorille, kuormituslohkolle, jarrukatkojalle, ECU: lle ja erottimille.

4.1 DC-DC – muuttajien simulointimallin toteuttaminen

DC-DC -muuttajien simulointimallin perusideana on toteuttaa tehonsiirto eri jännite- tasojen välillä. Kuva 4.2 esittelee DC – DC - muuttajamallin rajapinnat, jotka on toteutettu SimPowerSystem: in kondensaattori- ja kuristinkomponenteilla. IGBT – kytkinsil- lan toiminta on paljon simuloinneissa tavoiteltua 20 Hz: n aikata-son tarkkuutta nope-ampi. Tehoasteen tekemä virranohjaus on muuttajamalleissa toteutettu ohjattavien vir- ta- ja jännitelähteiden avulla ja näiden ohjaus kuin myös ohjauksessa käytettävä logiik- ka Simulinkin peruskomponenteilla ja Stateflow -tilakoneilla.

Kuva 4.2 esittelee DC – DC – muuttajan simulointimallin ylimmäisen tason. Siinä näkyy kytkentä jännitevälipiirin puolelle, jossa lähtöjännitteen dynamiikan määrää lähtökapasitanssin arvo. Tasajännitteisen energiavaraston puolella virran dynamiikan määrää lähtöinduktanssin arvo. Ylimmäisessä tasossa näkyy myös ylemmältä ECU -ohjaukselta tulevat virran ohje ja virranohjauksen suuntasignaalit. Energiavaraston tasajännitteen mittausta käytetään ylemmän ohjauksen toteuttamiseen ja myös DC-DC -muuttajassa energiavaraston puoleisessa virran ohjauksessa. Kyseinen simulointimallin ylin taso on käytössä kun akkua tai superkondensaattoria ohjataan virtaohjatusti ECU: sta. Virran suunnan ohjaussignaali puuttuu simulointimallista, jossa DC-DC -muuttaja ohjautuu itsenäisesti jänniteohjauksella.



Kuva 4.2 DC – DC – muuttajan simulointimallin rajapinnat ja tehoastelohko

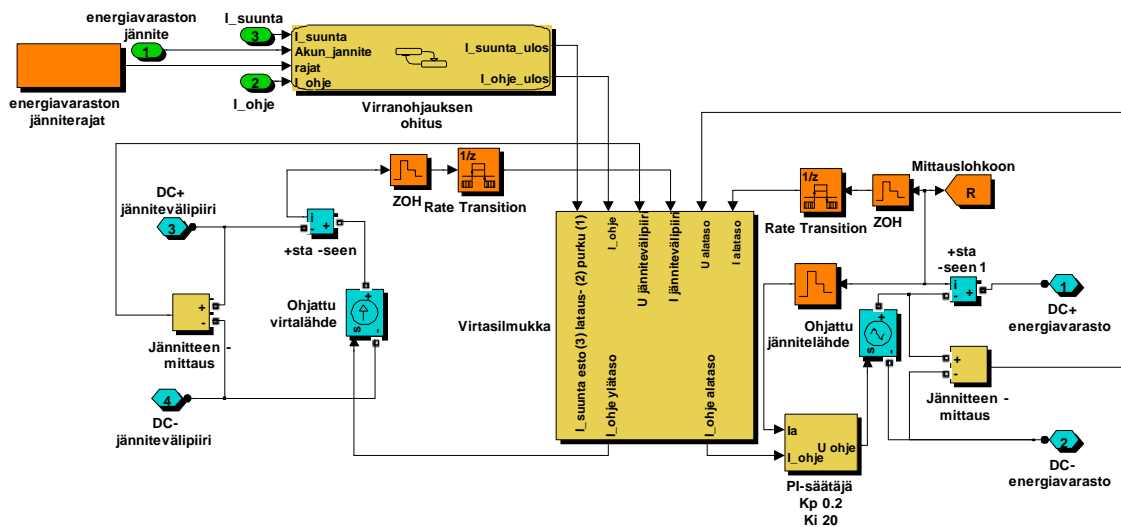
Kuva 4.3 esittelee virtaohjatun DC-DC -muuttajan tehoastelohkon toteuttamisen. Tehoastelohko sisältää ylemmän tason rajapintojen lisäksi ohjattavat jännite- ja virtalähteet, tehosiirron toteuttavan virtasilmuikkalohkon, PI -säädinlohkon, Stateflow:lla toteutetun virranohjauksen ohituslohkon ja toiminnan mahdollistavia takaisinkytkentöjä ja mittauksia virroista sekä jännitteistä.

Virtasilmuikkalohko on toteutettu simulinkin peruskirjaston komponenteilla. Ideana virtasilmuikkalohkossa on virranohjearvon (I_{ohje}) toteuttaminen pyydettyyn suuntaan (I_{suunta}). Siirrettävä teho mitataan ja sitä vastaava virranohjaus toteutetaan vastakkaiselta DC-DC -muuttajan puolelta.

Virranohjauksen ohituslohkon tarkoituksena on ohittaa ylempää tulevat ohjaussignaalit jos energiavaranston jännite ajautuu maksimi- tai minimirajalleen.

PI - säädinlohko mahdollistaa virranohjauksen toteuttamisen ohjattavan jännitelähteen ja virranmittauksen takaisinkytkennän avulla.

Zero-Order-Hold (ZOH) ja Rate Transition lohkoja tarvitaan aikadiskreetin simulointimallin takaisinkytkentähaaroissa luomaan hitautta mitattuihin signaaleihin, jotta simulointimallin ratkaiseminen matemaattisesti ei johtaisi divergoitumiseen. ZOH -lohko luo simulointimalliin hitauden ja rate transition lohko tahdistaa erinopeuksiset simulointimallin osat toisiinsa.

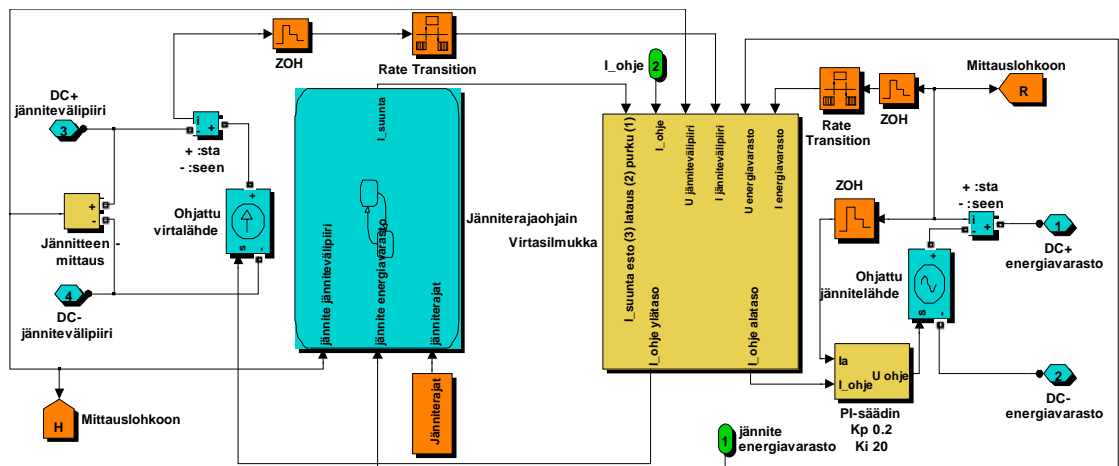


Kuva 4.3 Virtaohjatun tehoastelohkon sisältämät ohjattavat virta-, jännitelähteet ja ohjauslogiikka

Tehoastelohko ei tavoittele häviöiden mallintamista millään tavoin vaan toteuttaa ideaalisen tehonsiirron. Tehohäviöiden huomioon ottaminen DC – DC – muuttajien simulointimalleissa vaatisi mittauksiin perustuvan hakutaulukon käyttöönoton tehoastelohkon sisällä. Tällöin DC – DC – muuttajan hyötysuhde voitaisiin sisällyttää simulointeihin kaksikulotteisena taulukkona siirrettävän virran ja jännitteen muuntosuhteen funktiona. Tehonsiirrossa tapahtuneet lämpöhäviöt saataisiin tällöin erillisenä signaalina DC –

DC – muuttajan simulointimallista eikä huomioituna SimPowerSystem: in jännite-virta vektoreissa.

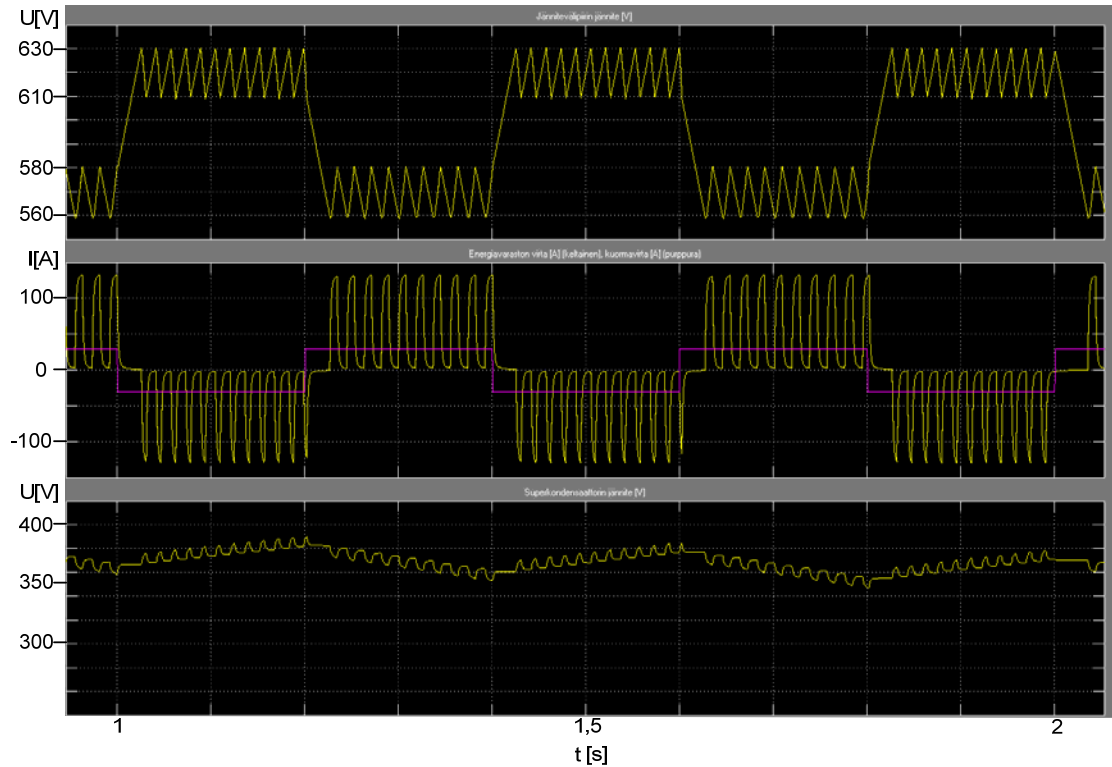
Kuva 4.4 esittelee jänniteohjatun DC-DC -muuttajan simulointimallin tehoastelohkoa. Se eroaa virtaohjatusta simulointimallista vain Stateflow: lla toteutetulla jänniteohjaimella, johon on sisällytetty jännitevälipiirin jänniterajoihin perustuva ohjaus ja energiavaraston jännitteen maksimi- ja minimirajat. Jänniterajaohjainlohko päättelee virran suunnan. Virtaohje annetaan virtasilmukkalohkolle ECU: sta.



Kuva 4.4 Jänniteohjattu DC – DC – muuttaja, tehoastelohko

4.1.1 DC-DC – muuttajansimulointimallin toiminnan havainnollistaminen

Kuva 4.5 havainnollistaa jänniteohjatun DC-DC -muuttajan toimintaa kun jännitevälipiirin maksimijänniteraja on 630 voltia ja minimiraja 560 voltia. Jänniteohjauksen hystereesi on 20 voltia. Jänniteohjauksessa DC – DC – muuttaja pyrkii pitämään jännitevälipiiriä maksimi- ja minimirajojen välissä. Ohjausta rajoittavat energiavaraston minimi- ja maksimijännitearvot. Energiavaraston jänniterajalle jouduttuaan jänniteohjatun DC-DC -muuttajan ohjaus estyy.



Kuva 4.5 yläkuva: jännitevälipiirin jännite, kesk. kuva: DC – DC – muuttajan virta ja kuormavirta, alakuva: energiavaraston jännite

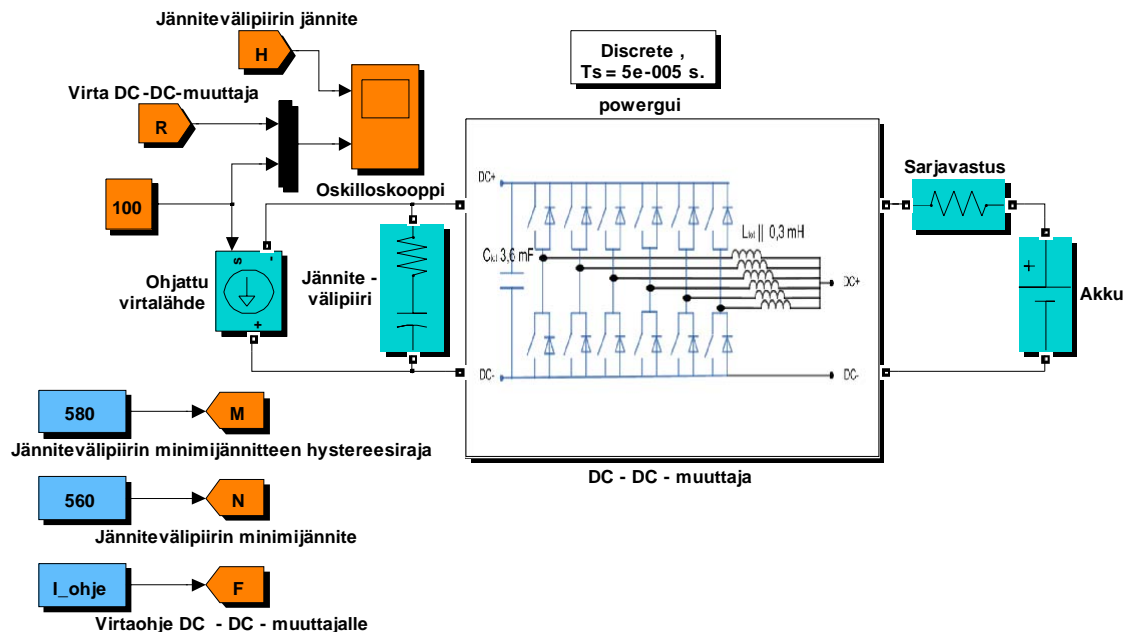
Kuvan 4.5 simuloinnissa on käytetty jännitevälipiirin kapasitanssina 15 mF ja energiavaraston kapasitanssina 0,5 F. Simulointimalli esitellään kuvassa 4.6.

Kuva 4.5 havainnollistaa jännitesykkeisyyttä, jonka jänniteohjaus aiheuttaa jännitevälipiiriin ja energiavaraston ylitse. Vaihtojännitekomponentti jännitevälipiirissä aiheuttaa lämpöhäviöitä jännitevälipiirin kondensaattorin sarjavastuksessa. DC – DC – muuttaja toimii 150 ampeerin virtaohjeella ja tekee lataus-purkuvirrasta pulssimaista. Keskimäisessä kuvassa on käyrämuodot DC-DC -muuttajan virrasta ja 30 ampeerin kantikaasta kuormavirrasta. Energiavaraston jännitteessä näkyy latauksen ja purun yhteydessä sarjavastuksen yli jäävä jännitehäviö.

4.1.2 Riittävän lyhyen diskreetointiajan etsiminen

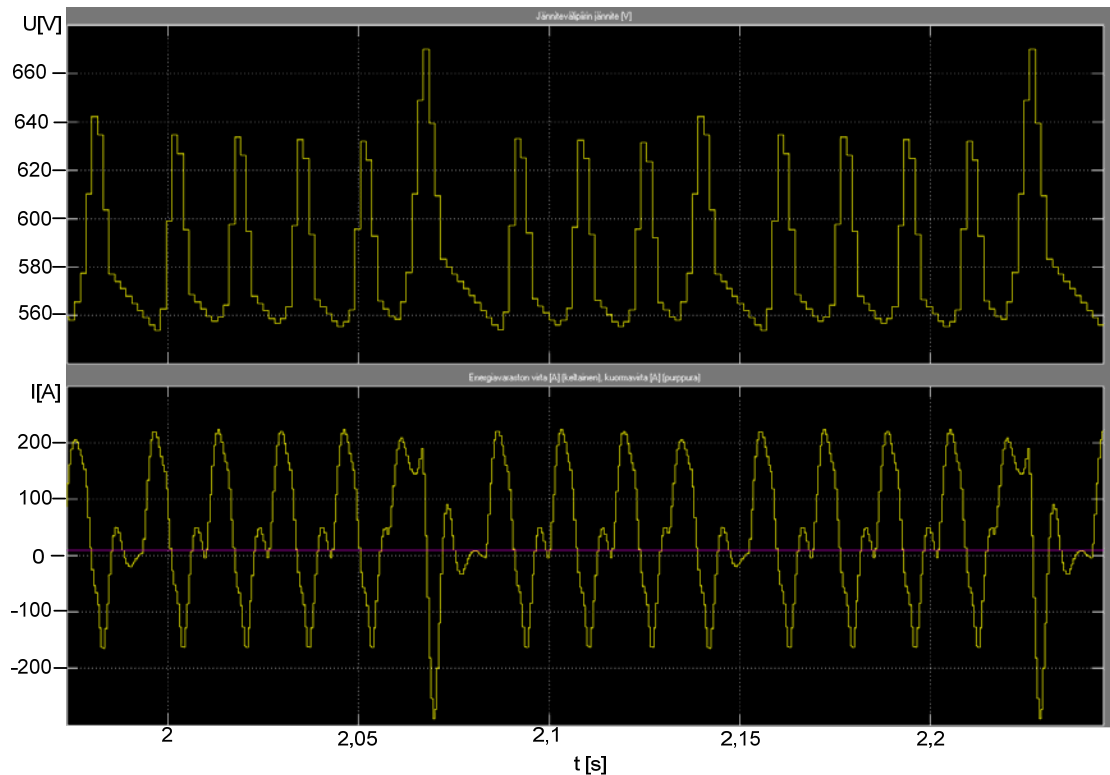
Diskreetin simulointimallin riittävä diskreetointi aikaväli riippuu halutusta simulointitarkkuudesta ja sähköisten ilmiöiden dynamiikkaa kuvaavien komponenttien eli kondensaattoreiden ja induktanssien suuruuksista. Riittävää diskreetointiaikaväliä etsitään jännitevälipiirin jännitesykkeisyyden tarkan mallintamisen avulla kun jännitevälipiiri stabiloidaan jänniteohjatulla DC-DC -muuttajalla.

Kuva 4.6 esittää simulointimallin, jolla simuloidaan jännitevälipiirin jännitteen muuttamista minimijänniterajalla. Simulointi toteutetaan kahdella eri diskreetointiajalla, vaihtuvalla kuormavirralla ja erikokoisilla jännitevälipiirin kapasitanssi arvoilla. Kuvassa esitellyssä simulointimallissa jänniteohjattu DC-DC -muuttaja on kytketty akun ja jännitevälipiirin väliin. Akun varaus oletetaan oheisessa simuloinnissa äärettömäksi. Jännitevälipiiriä kuormitetaan vakioteholla, jolloin jänniteohjattu DC-DC -muuttaja toimii minimijänniterajaa vasten.



Kuva 4.6 Eri diskreetointiaikojen verifiointiin käytetty simulointimalli

Kuva 4.7 esittää jänniteohjauksen käyttäytymistä 5 mF jännitevälipiirin kapasitanssilla ja 0,5 ms diskreetointiajalla. Kuvasta nähdään, että jännitevälipiirin jännite ei pysy ohjausrajoissaan 560 ja 580 voltin välissä, koska DC - DC - muuttaja ei toteuta virtaohjetta hallitusti. Virtaohjeen tulee vaihdella nollan ja virranohjearvon välissä (150 A) jänniteohjauksen hystereesin mukana.

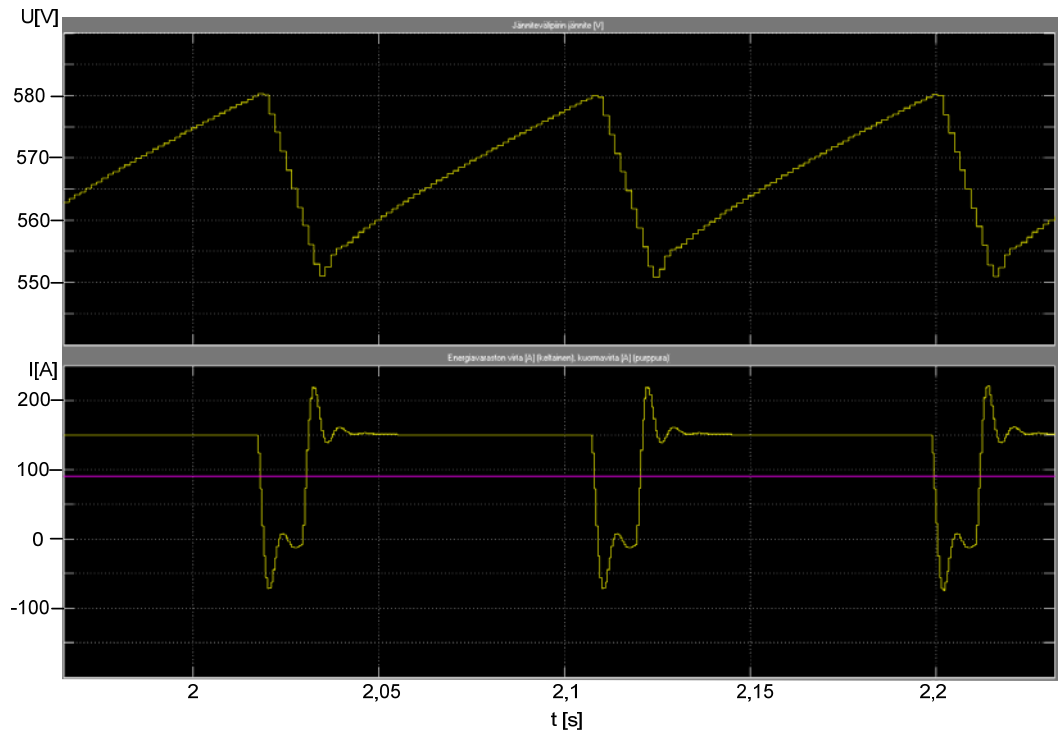


Kuva 4.7 yläkuva: Jännitevälipiirin jännite, alakuva: DC - DC - muuttajan virta (kelt.), kuormavirta (pun.), jännitevälipiirin kapasitanssi 5 mF ja diskreetointiaika 0,5 ms

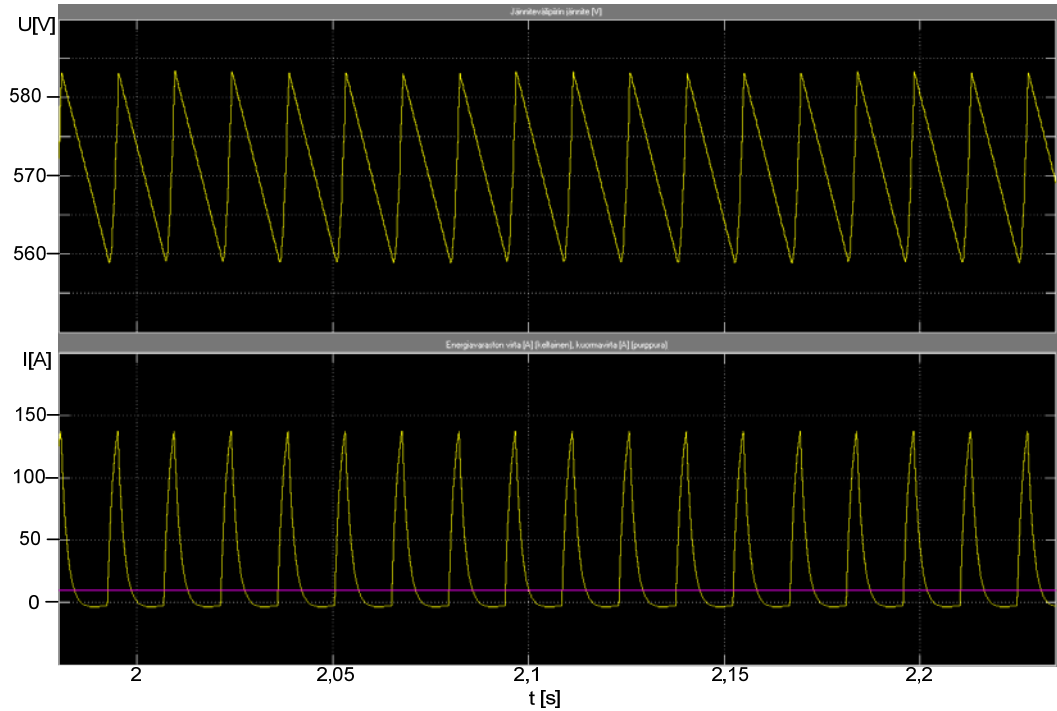
Kuva 4.8 esittää tapauksen, missä jännitevälipiirin kapasitanssi nostetaan 45 mF ja diskreetointiaika säilytetään 0,5 millisekunnissa. Simulointimalli pystyy vasta kyseisen kokoluokan kapasitanssilla ohjaamaan jännitevälipiirin jännitettä lineaarisesti. DC - DC - muuttajan virrassa on yli 50 ampeerin ylitys ohjearvosta.

Kuva 4.9 esittää tapauksen, missä jännitevälipiirin kapasitanssi on 5 mF ja diskreetointiaika on muutettu 0,05 millisekuntiin. Simulointimalli ohjaa jännitevälipiirin jännitettä

odotetusti jänniterajojen 560 V ja 580 V väleissä. Simuloitu DC – DC – muuttajan virta toteuttaa nollan ja 150 ampeerin virtaohjeensa ilman ohjearvon ylitystä.



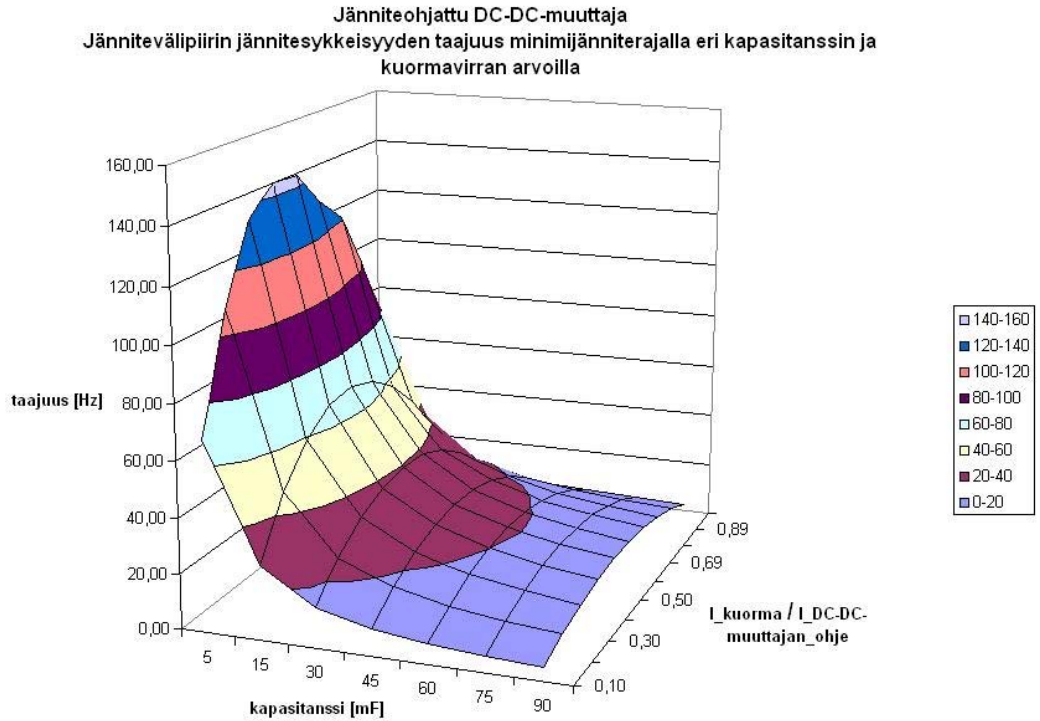
Kuva 4.8 yläkuva: Jännitevälipiirin jännite, alakuva: DC – DC – muuttajan virta (kelt.), kuormavirta (pun.) , jännitevälipiirin kapasitanssi 45 mF ja diskreetointiaika 0,5 ms



Kuva 4.9 yläkuva: Jännitevälipiirin jännite, alakuva: DC – DC – muuttajan virta (kelt.), kuormavirta (pun.) , jännitevälipiirin kapasitanssi 5 mF ja diskreetointiaika 0,05 ms

Diskreetointi aika 0,05 ms lähestyy DC – DC – muuttajissa käytettyä kytkentätaajuutta, joten sitä lyhyempää diskreetointiaikaa ei ole järkevää käyttää. Kuvassa 4.1 esitelty simulointimalli hidastuu reaaliaikaa hitaammaksi siirryttäessä 0,5 ms diskreetointiajasta 0,05 ms diskreetointiaikaan.

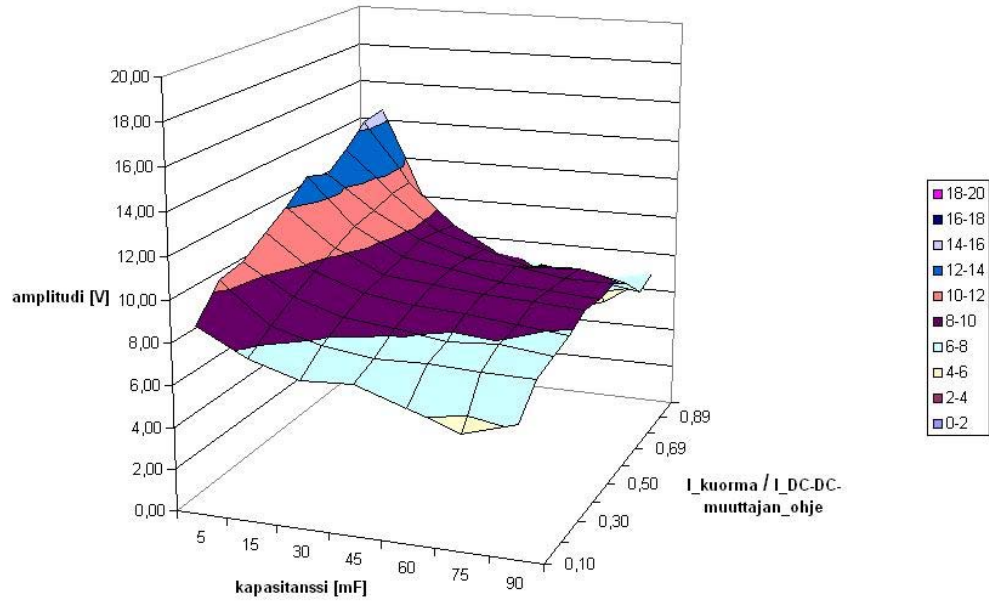
Kuvissa 4.10 – 4.12 esitetään 0,05 ms diskreetointiajalla simuloitu jännitevälipiirin jännitteen taajuus, amplitudi ja Total Harmonic Distortion (THD) arvo. Muuttujina kuvissa ovat jännitevälipiirin kapasitanssi ja kuormavirta. Simulointitulokset on laskettu SimPowerSystemin powergui -lohkolla, joka on sähköisten suureiden mittauslohko SimPowerSystem -kirjastossa.



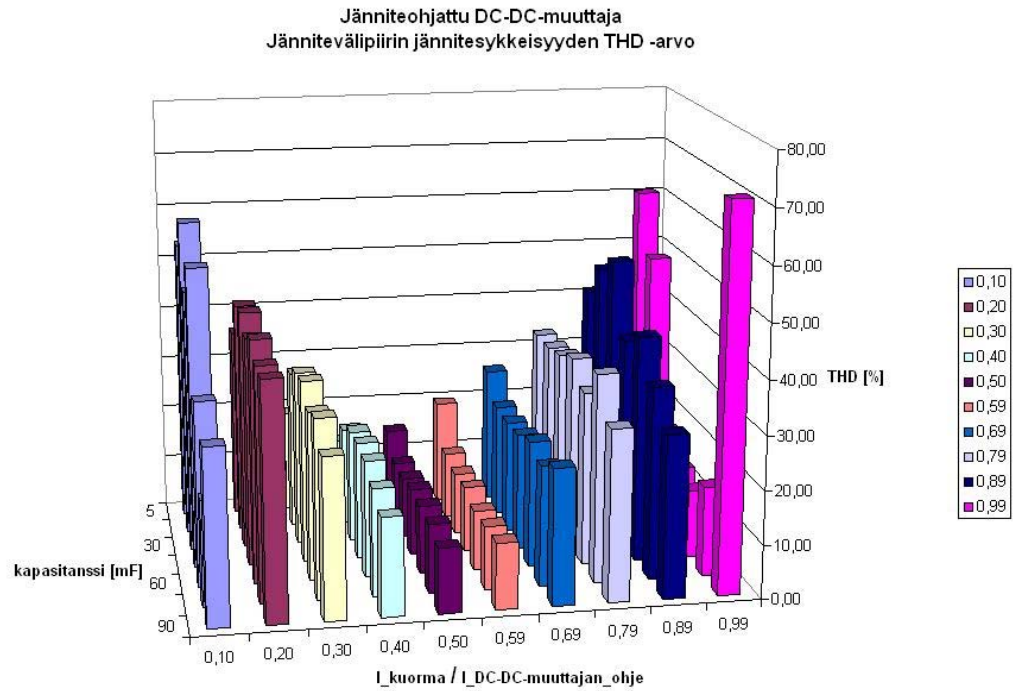
Kuva 4.10 Jännitevälipiirin jännitesykkeisyyden taajuuden peruskomponentti toimittaessa minimijänniterajaa vasten, muuttujina jännitevälipiirin kapasitanssi ja kuormavirta

Kuva 4.10 esittää jännitevälipiirin jännitteen vaihtelun taajuusaluetta eri kapasitanssin ja kuormituksen arvoilla kun toimitaan DC – DC – muuttajan jänniterajaa vasten.

Jänniteohjattu DC-DC-muuttaja
 Jännitevälipiirin jännitesykkeisyyden taajuuden peruskomponentin amplitudi toimittaessa minimijänniterajalla eri kapasitanssin ja kuormavirran arvoilla



Kuva 4.11 Jännitevälipiirin jännitesykkeisyyden taajuuden peruskomponentin amplitudi toimittaessa minimijänniterajaa vasten, muuttujina jännitevälipiirin kapasitanssi ja kuormavirta

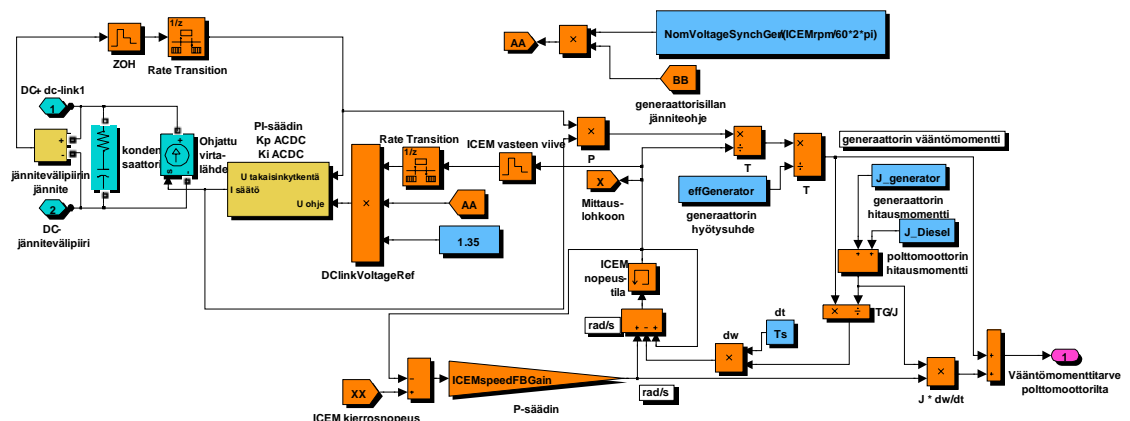


Kuva 4.12 Jännitevälipiirin jännitesykkeisyyden THD -arvo toimittaessa minimijänniterajaa vasten, muuttujina jännitevälipiirin kapasitanssi ja kuormavirta

4.2 Generaattorisillan ja generaattorin simulointimalli

Generaattorisiltaa mallinnettaessa on mietitty kuinka generaattorisillasta jännitevälipiiriin puolelle näkyvä jännite käyttäytyy. Aktiivista generaattorisiltaa käytettäessä voidaan IGB -transistoreiden ohjauksella säätää jännitevälipiiriin jännitettä generaattorin pääjännitteen huippuarvosta ylöspäin. Passiivista diodisiltaa generaattorisiltana käytettäessä jännitevälipiiriin puoleinen jännite on suoraan verrannollinen polttomoottorin nopeuteen. Tyristorisillalla jännitevälipiiriin jännitettä voidaan laskea diodisillan jännitearvoon verrattuna. Generaattorin magnetoinnilla on myös mahdollista vaikuttaa generaattorisillasta saatavaan jännitteeseen esimerkiksi vierasmagnetoidun tahtikoneen tapauksessa.

Kuva 4.13 esittelee generaattorisillalle ja generaattorille toteutettua simulointimallia, jossa ideana on kuvata jännitevälipiiriin tuotetun tehon mukainen vääntömomenttitarve polttomoottorin akselilla. Generaattorisillan lähtöjännite kuvautuu jännitevälipiiriin puolelle. Jännitevälipiiriin siirretty teho mitataan ja vääntömomenttitarve polttomoottorilta ratkaistaan polttomoottorin kierrosnopeudesta ja siirretystä tehosta. Polttomoottorin nopeusohje ja generaattorisillan jänniteohje annetaan simulointimallille ECU: sta. Polttomoottorin nopeuden muutos toteutetaan P-säätimellä.

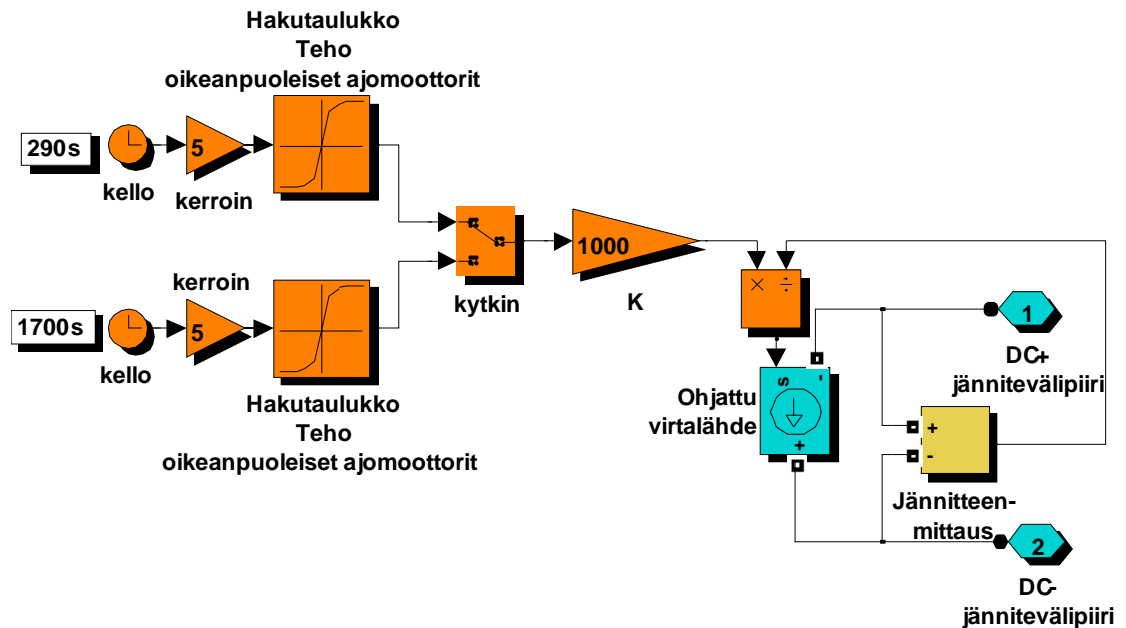


Kuva 4.13 Generaattorisillan ja generaattorin toiminnallisuutta kuvaava simulointimalli

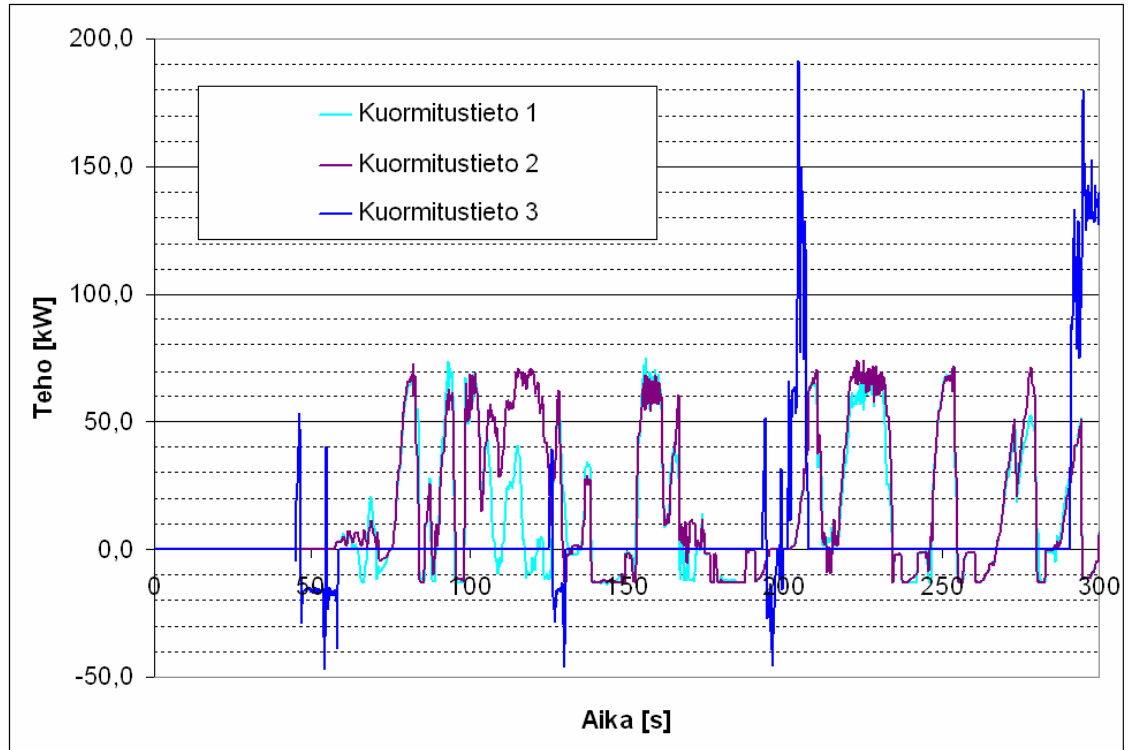
4.3 Kuormituksen mallintaminen simuloinneissa

Sähköisissä työkoneissa on useita järjestelmää kuormittavia laitteita. Sarjahybridijärjestelmässä tehonsiirto tapahtuu jännitevälipiiriin kautta. Jännitevälipiiriin kytketyiltä kuormittavilta laitteilta on mahdollista tallentaa laitteen toimintapisteeseen liittyvää mittaustietoa kuten esimerkiksi tehonkulutustietoa, virtaa ja jännitettä. HybDrive – projektiin osallistuvilla työkonvalmistajilla on käytössään entuudestaan sähköisiä työkoneita. Näissä käytetään sähköisiä ajomoottoreita ja vaihtosuuntaustekniikkaa, mutta ei kuitenkaan vielä hybriditekniikkaa. Siksi on järkevää käyttää jännitevälipiiriin kuormituksen mallintamisessa jo olemassa olevaa mittaustietoa laitteiden siirtämästä tehosta.

Työkoneen voimantuoton aiheuttamaa mitattua tehonkulutussykliä ohjataan jännitevälipiiristä kuvan 4.14 mukaisella simulointilohkolla. Kuormitusta mallinnettaessa hakutaulukkoon tuodaan kuormitusdataa teksti – tai Excel – tiedostosta. Simuloinneissa käytettyä syklistä tehonkulutustarvetta on esitelty kuvassa 4.15. Kuormitustieto on tallennettu sähköisen työkoneen ajo- ja nostolaitteiden parametreista.



Kuva 4.14 Simuloinneissa käytetty kuormituslohko



Kuva 4.15 Simuloinneissa käytetty kuormitustieto

Eräs mahdollisuus kuormituksen kuvaamiseksi on käyttää mittausdatan sijaan Simulinkin Signal Builder lohkoa, jolla voidaan graafisesti piirtää halutunlainen signaali. Lohkolla saadaan nopeasti likimääräinen kuormitus jännitevälipiiristä.

Kuormituksen mallintamista on mahdollista kehittää tekemällä liikeyhtälöihin perustuva simulointilohko. Lohko ratkaisisi työkoneen liikkeen aikaansaamiseksi vaadittavan tehon, työkoneen massan, nopeuden ja maaston muotojen funktiona.

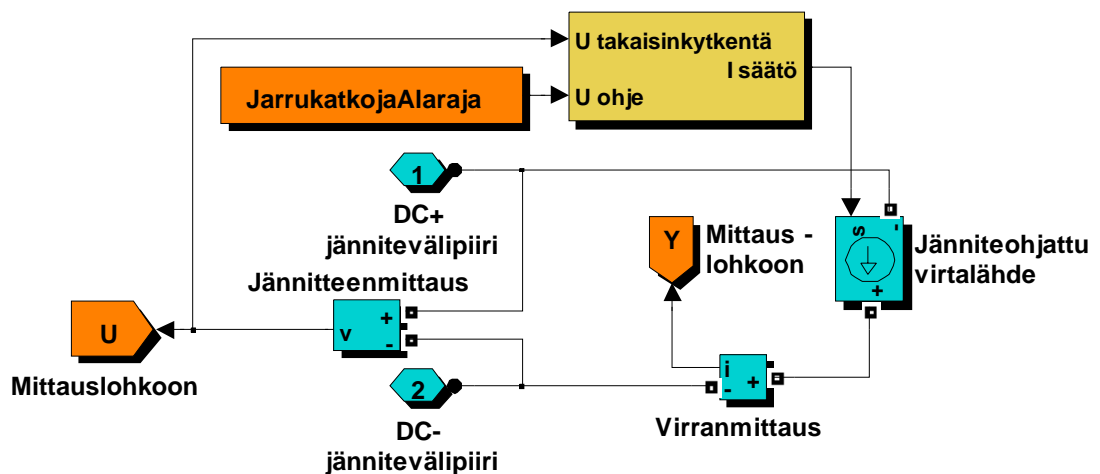
4.4 *Superkondensaattorimoduulin simulointimalli*

Superkondensaattoreita simuloinneissa kuvataan SimPowerSystem:in kondensaattorimallilla, johon voidaan määritellä kondensaattorin kapasitanssi, sarjaresistanssi ja sarjainduktanssi. Simuloinneissa käytetään valmistajien ilmoittamaa kapasitanssia ja sarjaresistanssia. Sarjainduktanssia ei yleensä ilmoiteta komponenttien datalehdillä.

ECU: n sisällön suunnittelun kannalta superkondensaattorimoduulin sisäisten energia-
virtojen mallintaminen ei ole oleellista. Mallinnuksessa toimitaan riittävällä tarkkuusta-
solla kun ylemmän ohjauksen ja DC – DC – muuttajien tarvitsemat jännite- ja virta-
arvot muuttuvat tarkoituksenmukaisesti. Kehitysideana simulointimallille on mittauk-
siin perustuva hakutaulukko, johon on sisällytetty mittausdataa superkondensaattorin
lataus- / purkuvirta – jännitekäyttäytymisestä. Hakutaulukon avulla saadaan simuloin-
teihin sisällytettyä superkondensaattoreiden kapasitanssin riippuvuus superkondensaat-
torimoduulin jännitteestä.

4.5 Jarrukatkojan simulointimalli

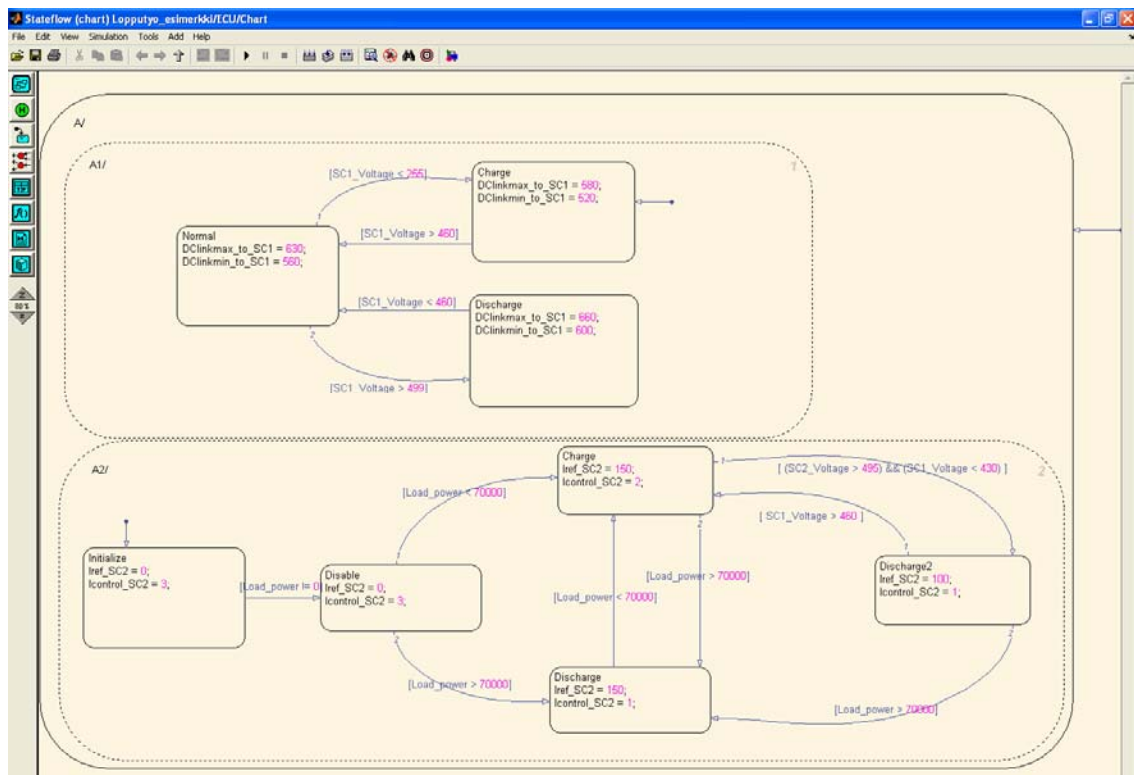
Jarrukatkojan simulointimallin tarkoituksena on toteuttaa jännitevälipiirin jännitteen
rajoittaminen maksimiarvoon. Kuva 4.16 esittelee jarrukatkojan simulointimallin. Siinä
tavoitellaan jarrukatkojan toiminnallisuutta säätämällä katkojan päällä olo aikaa jänni-
tevälipiirin jännitteen mukaan. Katkojaa kuvaa simulointimallissa ohjattava virtalähde.
Toiminnallisuutta kuvaa tehoraja joka voidaan jarruvastukseen kuluttaa. Jarrukatkoja
aktivoituu jännitevälipiirin jännitteen noustua tiettyä jänniterajaa korkeammaksi.



Kuva 4.16 Jarrukatkojan simulointimalli

4.6 Esimerkki ECU: n sisältämästä ohjauksesta

Hybridikäyttöisissä työkoneissa tavoitellaan sähköisen voimantuoton tuomien etujen lisäksi käytettävän polttomoottorin pienentämistä. Polttomoottorin pienentäminen työkoneissa on mahdollista työkoneiden tehonkulutuksen syklisyyden vuoksi. Hybridijärjestelmän ohjaus voidaan suunnitella siten, että voimantuottolaitteiden kuluttamat teohuiput kutistetaan energiavarojen avulla. Energiavaroja käytetään tällöin polttomoottorin tukena voimantuottolaitteiden teohuippujen aikana ja energiavaroja ladataan kun voimantuottolaitteet eivät kuluta tehoa määriteltyä tehorajaa enemmän. Kuva 4.17 esittelee esimerkin teohuippuja leikkaavasta ECU – ohjauksesta. Ohjaus on toteutettu State - flow loholla.



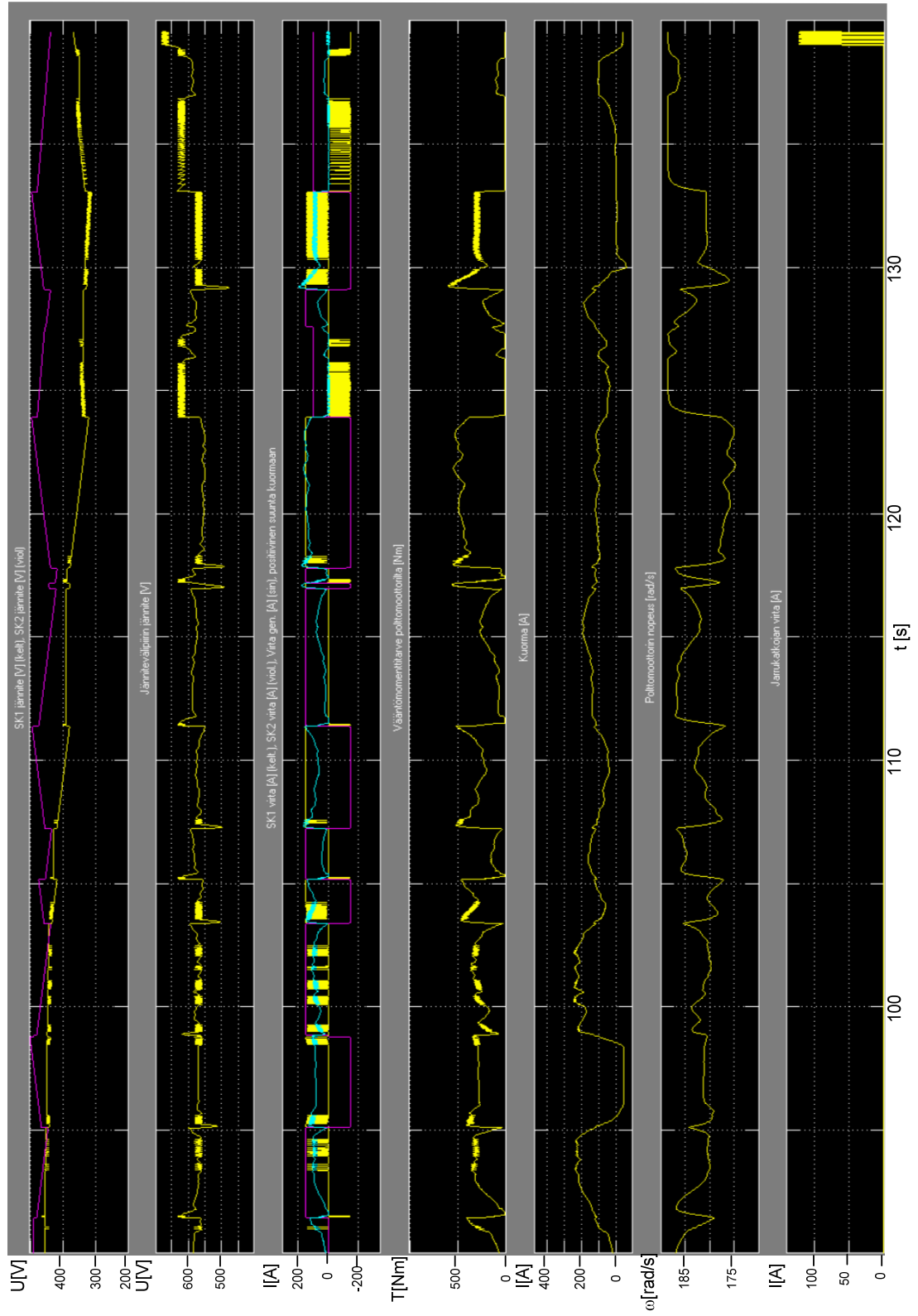
Kuva 4.17 Esimerkki ECU: n sisällöstä kuvan 4.1 järjestelmässä

Simuloitaessa hybridijärjestelmän toimintaa simulaattorissa ECU -lohkoon on mahdollista rakentaa esimerkiksi Anderssonin lisensiaattityössä [12] käsittelemä ohjausstrate-

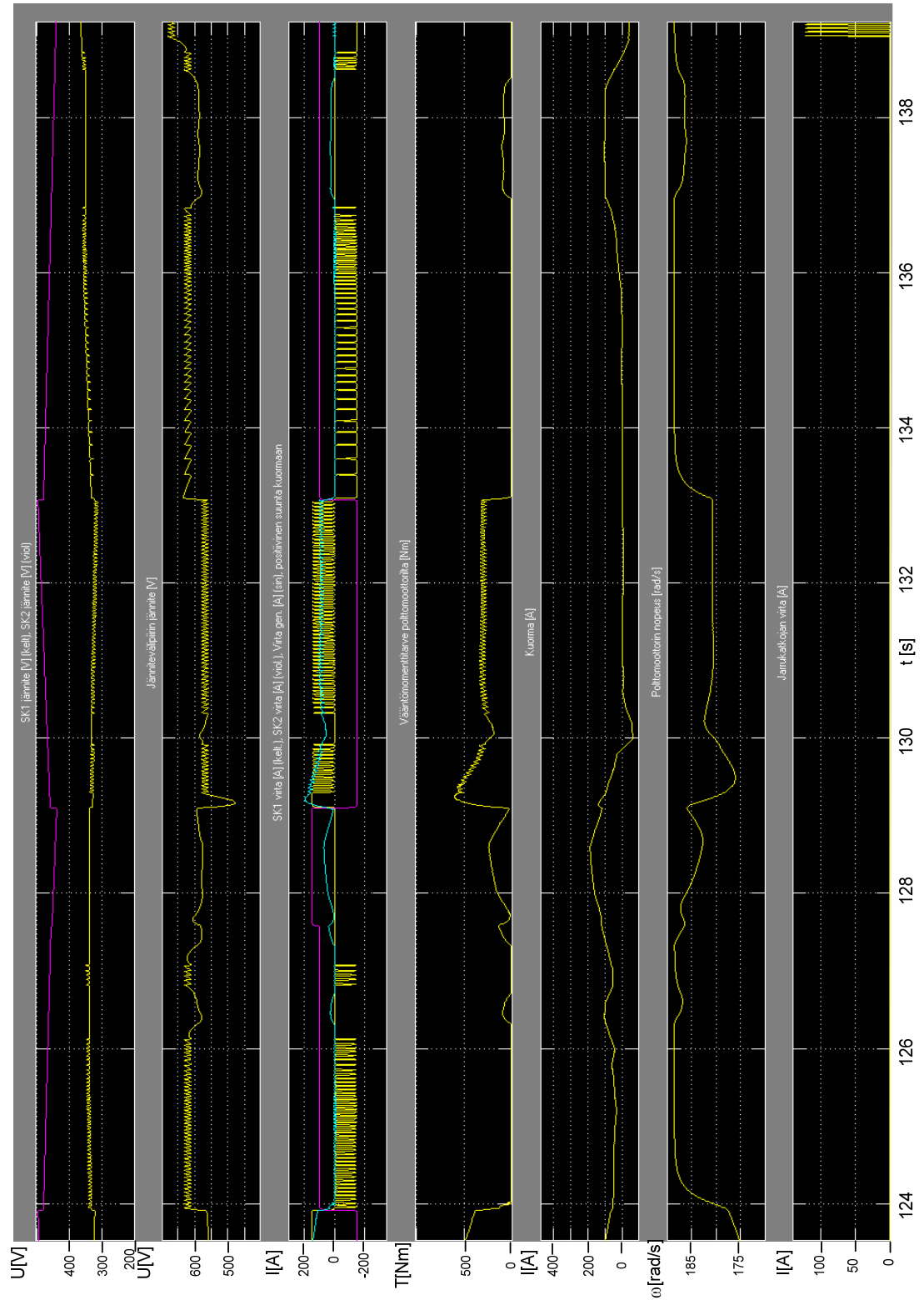
gia. Ennustava energiavarastojen latausstrategia hyödyntää esimerkiksi linja-auton kulke-
keman reitin ennustettavaa ajosykliä. Tällä tavoin polttomoottori toimii tasaisemmin.

4.7 Sarjahybridijärjestelmän tehonsiirron esimerkkisimulointi

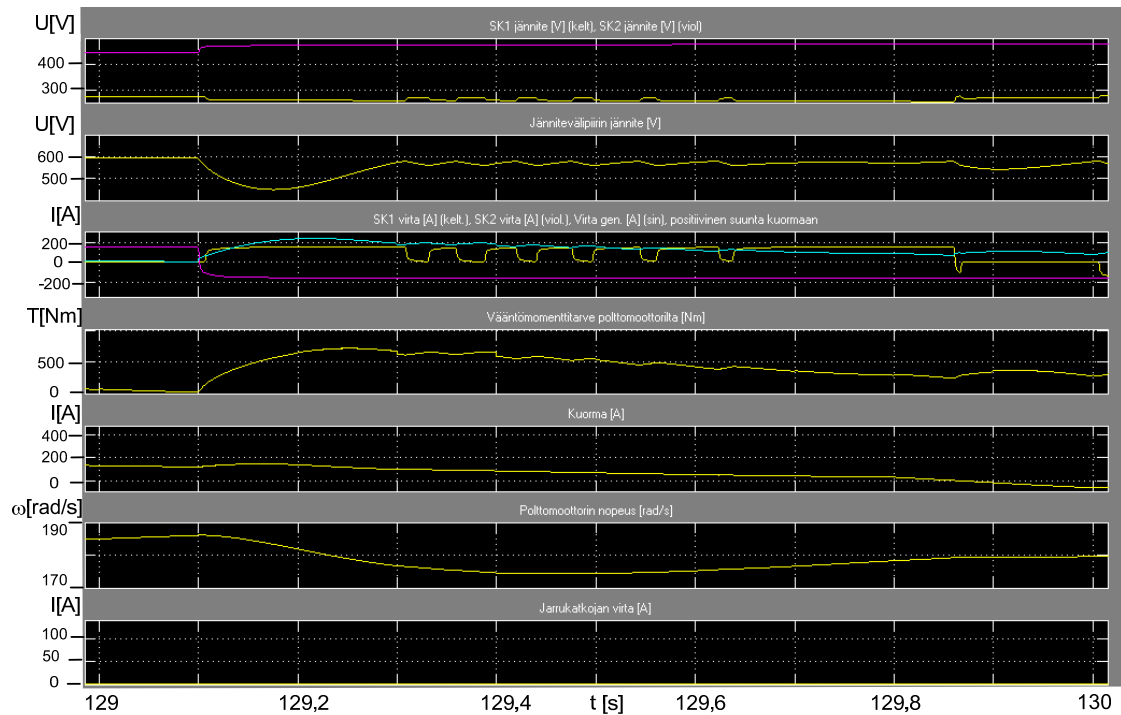
Simuloidaan kuvan 4.1 mukainen järjestelmä. Käytetään järjestelmän kuormituksena kuvan 4.15 esittämää kuormitusdataa ja ohjataan järjestelmää kuvan 4.17 esittämän oh-
jauslogiikan mukaisesti. Kuvissa 4.18 ja 4.19 esitellään simuloinnin tuloksia. Simuloin-
nissa jännitevälipiirin kapasitanssi on 15 mF ja superkondensaattoreiden kapasitanssit
15,75 F.



Kuva 4.18 Simulointi kuormitusdatan 90 – 140 sekunnin välissä



Kuva 4.19 Simulointi kuormitusdatan 124 – 140 sekunnin välissä



Kuva 4.20 Simulointi kuormitusdatan 129 – 130 sekunnin välissä

Simulointikuvien analysointi:

- superkondensaattoreiden jännitteet:
 - jännite- ja virtaohjattujen superkondensaattoreiden jännitteistä nähdään varaus-tilan muutokset
 - superkondensaattoreiden sarjaresistanssissa aiheutuva jännitehäviö (vrt. kuva 4.5)
- jännitevälipiirin jännite:
 - jännitevälipiirin jännitteessä näkyy jänniteohjatun DC – DC – muuttajan jännite-terajaohjaus (vrt. kuva 4.5)
 - jarrukatkojen toiminta
 - nopeat kuormituksen muutokset aiheuttavat jännitevälipiirin jänniteimpulssin, joka aiheutuu generaattorisilta generaattori – lohossa olevasta vääntömoment-

tiviiveestä, jolla kuvataan polttomoottorilta saatavan vääntömomenttivasteen hitautta (0,1 s)

- superkondensaattoreiden ja generaattorisillan virrat:
 - jänniteohjatun superkondensaattorin virta on pulssimaista
 - virtaohjatun superkondensaattorin virta toteuttaa ohjearvon
 - generaattorisillan virran muoto mukailee polttomoottorin vääntömomenttitarvetta, koska generaattorisillan lähtöjännitettä pidetään simuloinnissa vakiona
- polttomoottorin vääntömomenttitarve:
 - polttomoottorin vääntömomenttitarve vastaa vääntömomenttia, jolla polttomoottorin kierrosnopeus ja siirretty teho toteutuvat
 - polttomoottorin vääntömomenttitarpeessa näkyy jänniteohjatun DC – DC – muuttajan aiheuttama vääntömomentinsykeisyys
- kuorma on kuvan 4.15 tehonkulutusdatan summa, joka ohjataan jännitevälipiiristä ulos virtana
- polttomoottorin kierrosnopeus on simuloinnissa 1800 1/min, P-säädin on aseteltu vastaamaan 20 1/min notkahdusta täydellä vääntömomentilla
- jarrukatkojaan menee virtaa kun jännitevälipiirin jännite ylittää jarrukatkojan ohjusrajan, simuloinnissa 139 s hetkellä

4.8 Simulointimallin kehittäminen

HybDrive – projektin yksipyörätestausasemalla on tarkoitus mitata käytettävien DC – DC – muuttajien hyötysuhde. DC – DC – muuttajien hyötysuhde määritetään jännitteen muuntosuhteen, siirrettävän virran ja virransuunnan funktiona. DC – DC – muuttajan hyötysuhdekartta sisällytetään simulointimalliin hakutaulukkona, minkä avulla saadaan muuttajasta toimintapisteen hyötysuhdetieto.

Vaihtosuuntaussilloissa hyötysuhde tulee määrittää lähtötaajuuden ja siirrettävän tehon funktiona.

Hybridijärjestelmän komponenttien hyötysuhdekarttojen pohjalta on mahdollista vertailla tehonsiirtostrategioiden kokonaishyötysuhteita. Hyötysuhdekartat eri tehoelektronikkakomponenteista voidaan sisällyttää simulointimalliin, jolloin simuloimalla saadaan tieto järjestelmän hyötysuhteesta.

Hybridijärjestelmän simulointimallista puuttuu akun, polttokennon ja huimamassan -lohkot. Akkujen mallinnuksessa on ongelmana akun varaustilan huomioonottaminen lähtöjännitteessä. Akun mallinnus voidaan toteuttaa kondensaattori mallilla, mutta tällöin akun jännite ei muutu varaustilan mukaan. Polttokennon ja huimamassan mallinnukseen ei diplomityössä ole paneuduttu. Näitä voisi simulointimallissa mallintaa virtalähteillä.

Polttomoottorin toiminnallista simulointia on tarkoitus projektin puitteissa parantaa mitattuja kuormitusvasteita vastaavaksi

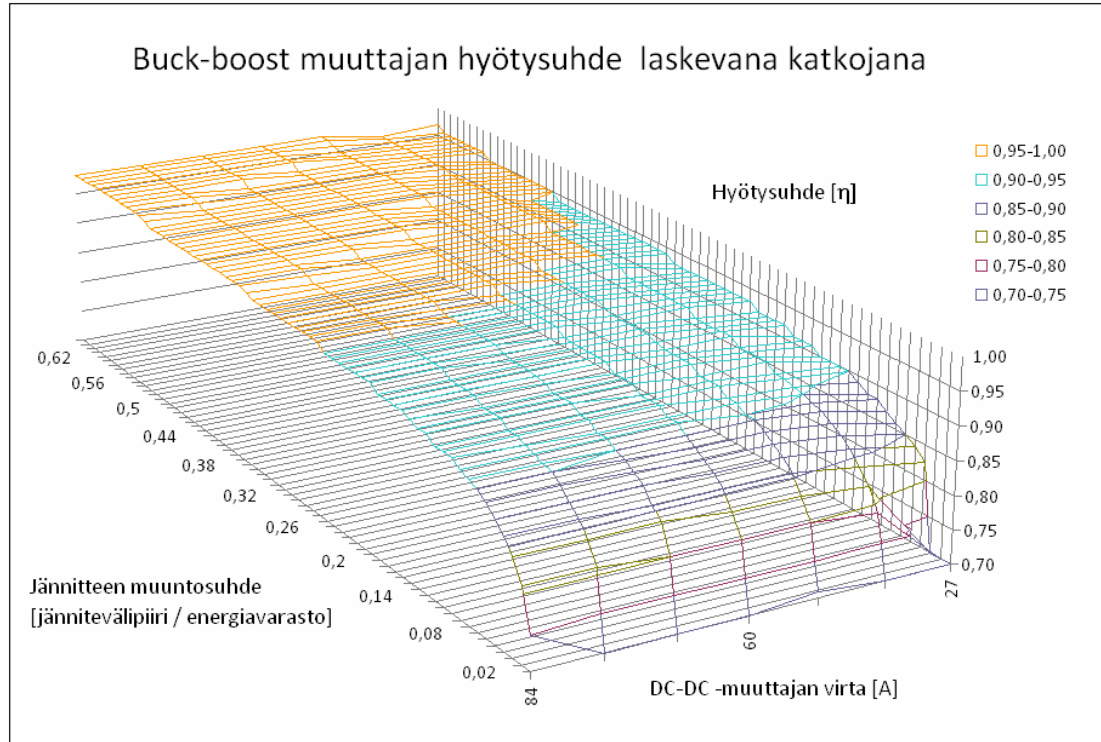
5 Tehonsiirron hyötysuhdemittaukset

HybDrive – projektissa käytetään tehonsiirrossa energiavaraston ja jännitevälipiirin välillä buck-boost muuttaja topologiaa. Sarjahybridijärjestelmän simulointimallissa tehoelektronikka komponenttien aiheuttamat tehohäviöt huomioidaan mittauksiin pohjautuvilla hyötysuhdekartoilla.

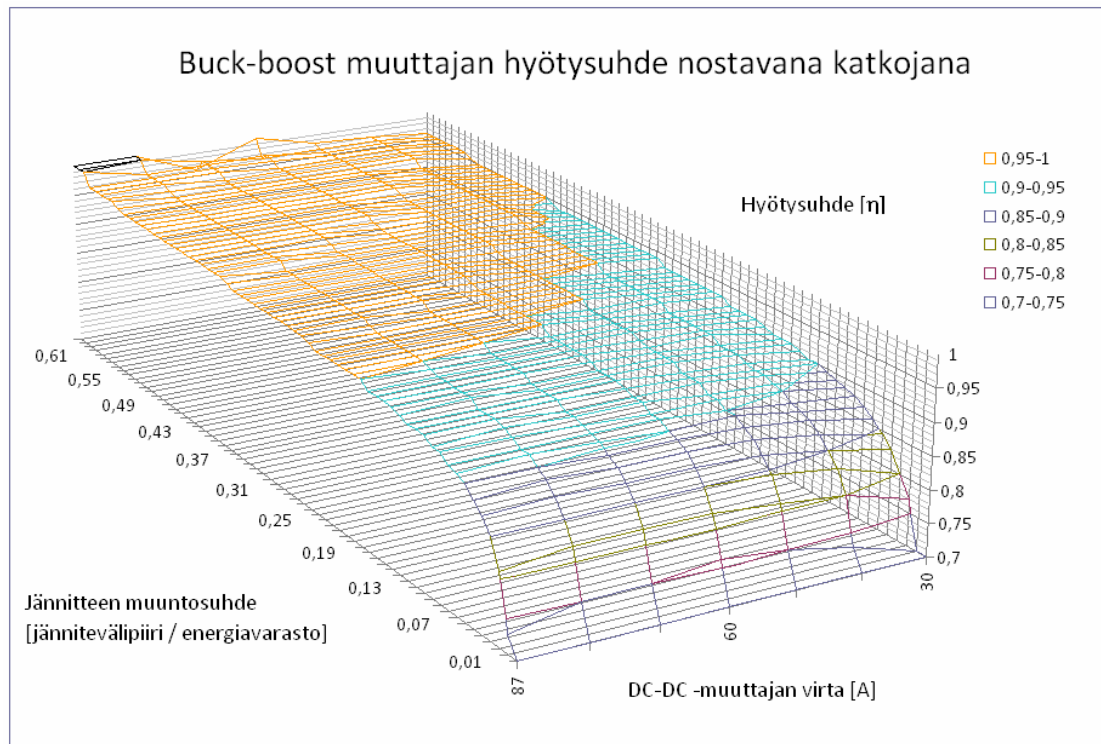
DC-DC -muuttajan hyötysuhdemittaukset suoritettiin sähköverkkoon kytketyn aktiivisen tasasuuntaussillan ja Maxwell BMOD0018-P390 superkondensaattorimoduulin välissä. Aktiivinen tasasuuntaussilta oli asetettu pitämään jännitevälipiirin jännite vakiona 590 voltissa. DC-DC – muuttaja siirsi virtaa muuttajan rajoittaman minimivirran ja sähköverkon sulakkeiden rajoittaman maksimivirran välisillä arvoilla.

Hyötysuhde määriteltiin mittaamalla yläjännitepuolen jännite ja siirrettävä virta sekä alajännitepuolen jännite ja siirrettävä virta. Ylä- ja alajännitepuolien siirrettävät tehot laskettiin virtojen ja jännitteiden avulla. Hyötysuhde määräytyy ylä- ja alajännitepuolien tehojen suhteesta. DC-DC – muuttajan hyötysuhteeseen vaikuttaa jännitteen muutosuhde, joka määrää tehpuolijohdekytkinten ylitse jäävän jännitteen, ja siirrettävä virta. Lisäksi voidaan erotella buck-boost muuttajasta tapaukset jolloin muuttaja toimii laskevana ja milloin nostavana katkojana. Laskevan ja nostavan muuttaja toiminnan erottaa toisistaan käytettävien tehpuolijohdekytkin johtotilat. Mitatut hyötysuhdekartat toimittaessa laskevana ja nostavana katkojana esitellään kuvissa 5.1 ja 5.2. Mittausdata on liitteissä 1 ja 2.

HybDrive – projektissa käytetyn buck-boost muuttajan jatkuva tehoraja on 90 kW:a.



Kuva 5.1 Buck-boost muuttajan hyötysuhde laskevana katkojana



Kuva 5.2 Buck-boost muuttajan hyötysuhde nostavana katkojana

Mittalaitteet:

- Norma, Wide band power analyzer D 6100 (tehoanalysaattori)
S/N F0 77342 KI
- LEM, Norma triax-shunt 1-100A (2 kpl virranmittaus shunttivastuksia)

6 Yhteenveto

Työssä käytiin lävitse kirjallisuustutkimuksena erilaisia hybriditehonsiirtojärjestelmiä ajoneuvo- ja työkonekäyttöihin. Hybridikäyttöistä esiteltiin sarjahybridijärjestelmä, rinnakkaishybridijärjestelmä ja sarja – rinnakkaisjärjestelmä. Lisäksi tuotiin esille poltto-kenno- ja täyssähköinen järjestelmä ajoneuvokäytöissä. Edeltävien järjestelmien etuja, haittoja ja ohjausperiaatteita pohdittiin työn toisessa luvussa.

Hybridikäyttöiseen työkoneeseen tarvittavat osakomponentit esiteltiin kolmannessa luvussa. Eri osien käyttöä ja toimintaa hybridijärjestelmässä pyrittiin selvittämään. Hybridijärjestelmän eri osakomponenttien hyötysuhteita on selvitetty kirjallisuudesta saatujen tietojen pohjalta.

HybDrive – projektissa tavoitteena ollut sarjahybridijärjestelmän yleinen simulointimalli on diplomityön puitteissa kehitetty ja siinä tarkkuustavoitteena ollut 20 Hz: n aikataso on saavutettu. Sarjahybridijärjestelmän simulointimalliin tehtiin lohkot jännite- ja virtaohjatuista DC – DC – muuttajista, jarrukatkojasta, superkondensaattorista, kuormituksesta ja generaattorisillan sekä generaattorin yhdistelmästä. Simuloinneissa käytettiin Matlab Simulink SimPowerSystem kirjastoa. 20 Hz: n aikataason simulointi hidastaa simulointia reaaliaikaa hitaammaksi. Sähköisten ilmiöiden toiminta on simulointimallissa onnistuttu kuvaamaan onnistuneesti. Hybridijärjestelmän osakomponenttien kuten DC – DC – muuttajien, polttomoottorin ja generaattorisillan ohjauksien vaikutuksia toisiinsa on syytä tutkia enemmän. Ilmiöt kuten polttomoottorin vääntömomenttisykkyisyys ja polttomoottorin vääntömomenttiviveen aiheuttama jännitevälipiirin jänniteimpulssi voisivat olla tarkastelun kohteena.

Toteutetun simulaattorin avulla jatketaan sarjahybridijärjestelmän tehonohjauksen kehittämistä ja erilaisten tehonohjauksien kannattavuuden tutkimista. Järjestelmän ohjauksen kokonaishyötysuhteen määrittämiseen pyritään mittaamalla eri komponenttien

hyötysuhteet eri toimintapisteissä. Komponenttien toimintapisteiden hyötysuhdetieto on tarkoitus sisällyttää simulointimalleihin hakutaulukkoina.

Jatkossa simuloimalla voisi keskittyä jännitevälipiirin stabiloimiseen virtaohjatun DC – DC – muuttajalla, aktiivisen generaattorisillan ja polttomoottorin kierrosnopeuden ohjauksen yhteistyönä. Jännitevälipiirin jännite tulee saada pysymään mahdollisimman vakiona kondensaattorin häviöiden minimoimiseksi. Mielenkiintoista on myös kuinka paljon polttomoottorin toimintapisteeseen pystytään edeltävien muuttujien avulla vaikuttamaan. Simulointimallia voi kehittää kytkinkomponenttitasolle ja mallintamalla polttomoottoria sekä generaattoria muuttuva nopeuksisena vastasähkömotorisena voimana ja induktanssina. Lisäksi lisätutkimusta vaatii polttomoottorin vääntömomentti-viiveiden vaikutus jännitevälipiirin stabiiliuteen.

Lähdeluettelo:

- [1] A. Emadi, S. S. Williamson and A. Khaligh, Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems, IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, s. 567-577, toukokuu 2006
- [2] Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset (2004). Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Helsinki, s. 230-232
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay ja A. Emadi (2005), Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamental, Theory and Design. CRC Press, USA, 385 s.
- [4] T. Hottinen (14.3.2006) Yleisöluentosarja Sähköforum: Polttokennot, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, TKK, URL:
http://ecmedia.hut.fi/s/sf/sf_06/14_3_06/osa1/index.htm &
http://ecmedia.hut.fi/s/sf/sf_06/14_3_06/osa2/index.htm, 28.2.2008
- [5] <http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/fuelcell/index.html>, 26.2.2008
- [6] I. Husain (2003), Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, CRC Press, USA, 270 s.
- [7] J. Luomi, J. Niiranen, A. Niemenmaa (2006), Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 1, Kurssin S-17.2020 luentomoniste, Espoo, 166 s.
- [8] J. Luomi, J. Niiranen, A. Niemenmaa (2006), Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 2, Kurssin S-17.2020 luentomoniste, Espoo, 145 s.
- [9] R. Ridley, D. Ridley, The Electric Car, Switching Power Magazine, vol. 6, no. 1, s. 9-25, 2005

- [10] H. Hong-wen, S. Feng-chun, Z. Cheng-ning, Study on Performance of Motor and Its Controller For Electric Vehicle, EVS 21 konferenssi cd, 2005
- [11] J. M. Timmermans, Super capacitors as peak power unit for hybrid electric vehicles in future dual-use applications, In: All Electric Combat Vehicle Conference 2005, Tukholma, Ruotsi
- [12] C. Andersson, Observations on Electric Hybrid Bus Design, lisensiaatintyö, Lund yliopisto, 2001, 111 s.
- [13] <http://www.psnh.com/Business/SmallBusiness/Motor.asp>, 28.2.2008
- [14] Z. Q. Zhu, D. Howe, Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, s. 746-765 , huhtikuu 2007
- [15] J. Kyyrä, Hakkuriteholähteet, TKK:n kurssin S-81.3100 luentomoniste, kevät 2007, 213 s.
- [16] http://www.mcclatchydc.com/staff/robert_boyd/story/16179.html, 30.8.2007
- [17]http://rawstory.com/news/2007/GM_plans_to_produce_hydrogen_car_by_02062007.html, 30.8.2007
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_electric_vehicle, 30.8.2007
- [19] A. Parviainen, projektikokous, 7.1.2008
- [20] P. Silventoinen, Molemmiin puolin avonapaisen reluktanssimoottorin konvertteri, lisensiaatintyö, LTY 26.3.1997

- [21] A. Boglietti, Experimental Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors Performance, IAS 2005
- [22] R. J. Trew, J. E. Brittain, Electric, Hybrid & Fuel Cell Vehicles, Proceedings of the IEEE, No 4, vol 95, s. 704 – 835, huhtikuu 2007
- [23] J. Ley, J. Lutz, Direct drive wheel motor development and demonstration, 7th International All Electric Combat Vehicle Conference, Tukholma, Ruotsi, kesäkuu 2007
- [24] <http://www.srd rives.com/hybrid-powertrain.shtml>, 22.8.2007
- [25] Switched reluctance motor Drives; Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications; R. Krishnan; 2001
- [26] J. Luomi, Sähkökäyttöjen suunnittelu, TKK:n kurssin S-81.3310 luentomoniste, lokakuu 2005, Espoo, 182 s.
- [27] S. S. Williamson, S. M. Lukic, A. Emadi, Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modeling, IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, s. 730-740, toukokuu 2006
- [28] Y.K.Chin, J. Soulard, A permanent magnet synchronous motor for traction applications of electric vehicles, Electric Machines and Drives Conference 2003, Tukholma, Ruotsi
- [29] <http://www.scientific.net/Manufacturing+of+Solid+Oxide+Fuel+Cells+-+Bridging+the+Gap+from+Laboratory+to+Industry.html>, 10.1.2008

- [30] http://www.nytimes.com/2008/01/14/business/14plug.html?_r=1&ref=automobiles&oref=slogin, 14.1.2008
- [31] R. Bosch GmbH (2007), Automotive Electrics Automotive Electronics, Wiley, Englanti, 530 s.
- [32] http://www.toyota.fi/cars/new_cars/prius/tekniset.aspx, 6.2.2008
- [33] http://www.toyota.fi/cars/new_cars/corolla/specs.aspx, 6.2.2008
- [34] J. Lai, D. J. Nelson, Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Proceedings of the IEEE, no 4, vol. 95, s. 766 - 777 , huhtikuu 2007.
- [35] T.-M. Ketola, Superkondensaattoreiden toiminta, diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma, marraskuu 2007
- [36] <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/modules/bmod0018-390v.asp>, 13.2.2008
- [37] http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_metal_hydride_battery, 13.2.2008
- [38] <http://en.wikipedia.org/wiki/Li-Ion>, 13.2.2008
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer, 13.2.2008
- [40] <http://www.ee.lut.fi/sahkomoottori.html>, 28.2.2008
- [41] J. F. Gieras, Comparisons of high-power high-speed machines: cage induction versus switched reluctance motors, United Technologies Research Center, East Hartford, USA, 1999

- [42] A. M. EL-Refaie, T. M. Jahns, Comparison of synchronous PM machine types for wide constant-power speed operation: converter performance, The Institution of Engineering and Technology Electrical Power Applications, s. 217–222, USA, 2007
- [43] E. Nipp, E. Nordberg, On the feasibility of switched stator windings in permanent magnet motors for traction drives, Royal Institute of Technology, EKC, Tukholma, Ruotsi, 1998
- [44] W. L. Soong and T. J. E. Miller, Theoretical limitations to the field-weakening performance of the five classes of brushless synchronous ac motor drive, Electrical Machines and Drives, 6th International Conference, s. 127 – 132, 1993
- [45] L. Fleischli, S. Lemofouet, A. Rufer, Multichannel DC-DC Converter's Efficiency Optimisation by variable Number of active Channels, IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32. konferenssi, s. 2581 – 2586, marraskuu 2006
- [46] Y. Honda, T. Nakamura, T. Higaki, Y. Takeda, Motor design considerations and test results of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles, IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, LA, lokakuu 5-9, 1997
- [47] K. M. Rahman, S. E. Schulz, Design of High-Efficiency and High-Torque-Density Switched Reluctance Motor for Vehicle Propulsion, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 38, no. 6, marras- joulukuu 2002
- [48] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle, 28.2.2008
- [49] O. Wallmark, Control of permanent-magnet synchronous machines in automotive applications, väitöskirja, Göteborg, Ruotsi, 2006

- [50] P. Pisu, G. Rizzoni, A supervisory control strategy for series hybrid electric vehicles with two energy storage systems, IEEE konf. Vehicle Power and Propulsion, syyskuu, 2005

Liitteet

Liite 1 Buck-boost muuttajan hyötysuhteen mittadata laskevana katkojana

Jännitteen muuntosuhde	Virta [A] 27	Virta [A] 39	Virta [A] 50	Virta [A] 60	Virta [A] 69	Virta [A] 77	Virta [A] 84
0,02			0,71				0,75
0,03		0,79	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81
0,04		0,82	0,83	0,83	0,84	0,84	0,84
0,05	0,82	0,84	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
0,06	0,84	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88
0,07	0,85	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
0,08	0,86	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90
0,09	0,87	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91
0,1	0,88	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91
0,11	0,88	0,90	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92
0,12	0,89	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
0,13	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
0,14	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93
0,15	0,90	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
0,16	0,90	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94
0,17	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94
0,18	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
0,19	0,91	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
0,2	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
0,21	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
0,22	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
0,23	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
0,24	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
0,25	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
0,26	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
0,27	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
0,28	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96
0,29	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96
0,3	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
0,31	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
0,32	0,93	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,33	0,93	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,34	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,35	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
0,36	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
0,37	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
0,38	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97
0,39	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
0,4	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
0,41	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
0,42	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
0,43	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
0,44	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,45	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,46	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,47	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,48	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,49	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,5	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,51	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

0,52	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,53	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,54	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98
0,55	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98
0,56	0,95	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
0,57	0,95	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
0,58	0,95	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
0,59	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
0,6	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
0,61	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
0,62	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
0,63	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
0,64	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
0,65	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
0,66	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

Liite 2 *Buck-boost muuttajan hyötysuhteen mittadata nostavana katkojana*

Jännitteen muuntosuhde	Virta [A] 30	Virta [A] 40	Virta [A] 50	Virta [A] 60	Virta [A] 69	Virta [A] 78	Virta [A] 87
0,01	0,55	0,55	0,60	0,61	0,60	0,62	0,60
0,02	0,70	0,73	0,75	0,76	0,75	0,75	0,73
0,03	0,77	0,80	0,81	0,82	0,82	0,82	0,81
0,04	0,80	0,83	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
0,05	0,83	0,85	0,87	0,87	0,87	0,88	0,87
0,06	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89
0,07	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90
0,08	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91
0,09	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91
0,1	0,89	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92
0,11	0,89	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,92
0,12	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93
0,13	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
0,14	0,90	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
0,15	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94
0,16	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94
0,17	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
0,18	0,91	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
0,19	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
0,2	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
0,21	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
0,22	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
0,23	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
0,24	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
0,25	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
0,26	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
0,27	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96
0,28	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96
0,29	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96
0,3	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
0,31	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
0,32	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,33	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,34	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,35	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,36	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
0,37	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

0,38	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
0,39	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97
0,4	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97
0,41	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
0,42	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
0,43	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
0,44	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
0,45	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
0,46	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,47	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,48	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,49	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,5	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
0,51	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,52	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,53	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,54	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,55	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,56	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
0,57	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98
0,58	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98
0,59	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
0,6	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
0,61	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
0,62	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
0,63	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	
0,64	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98		
0,65	0,96	0,97	0,98		0,96		
0,66							