

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jarkko Nokka

**KAIVOSLASTAUSKONEEN HYBRIDISOINTIANALYYSI VIRTUAALI-
JA IN-LOOP-SIMULOINNIN AVULLA**

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
TkT Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jarkko Nokka

KAIVOSLASTAUSKONEEN HYBRIDISOINTIANALYYSI VIRTUAALI- JA IN-LOOP-SIMULOINNIN AVULLA

2013

Diplomityö
68 s, 51 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
TkT Lasse Laurila

Hakusanat: Hybridityökoneet, In-loop-simulaatiot, sähkökäytöt
Keywords: Hybrid working machines, In-loop-simulations, electrical drives

Työssä tutkitaan raskaiden työkoneiden hybridisointimitoitusta simuloimalla. Työssä esitetään simulation-in-the-loop-simulointiin perustuva järjestelmä, jolla esimerkkitapauksena oleva kaivoslastauskone työympäristöineen voidaan mallintaa mekaaniselta osaltaan monikappaledynamiikkaan perustuvalla ohjelmistolla ja hybridijärjestelmän osalta Simulinkissa. Yhdistetty simulointi mahdollistaa hybridityökoneen virtuaalimallin ohjaamisen käyttäjän toimesta reaaliajassa. Simuloinnista saadaan tuloksena mm. työsykli, jota voidaan käyttää hybridisointimitoitukseen. Hybridisointi toteutetaan kahdella erilaisella kokoonpanolla, joista analysoidaan suorituskykyä sekä polttoaineen kulutusta. Tuloksia verrataan pelkästään dieselmoottoria voimanlähteenä käyttävään lastauskoneeseen.

Työssä tehty tutkimus osoittaa, että (sarja-) hybridisoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja raskaiden työkoneiden polttoainetehokkuudessa. Dieselmoottoria voidaan ajaa sellaisessa staattisessa toimintapisteessä, jonka hyötysuhde on korkea riippumatta työkoneen kuormituksesta. Saavutettu hyöty on toteutetussa tutkimuksessa parhaimmillaan jopa 56 % vähennys polttoainekulutuksessa. Lisäksi tarvittava dieselin nimellisteho pienenee huomattavasti.

Tutkimuksen osana esitellään myös Hardware-in-the-Loop -laitteisto, jonka avulla voidaan liittää oikea sähkömoottori ja taajuudenmuuttaja osaksi virtuaalisesti simuloitua työkoneita.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Jarkko Nokka

UNDERGROUND MINE LOADER HYBRIDIZATION ANALYSIS WITH VIRTUAL AND IN-LOOP -SIMULATIONS

2013

Master's Thesis

68 p, 51 pictures, 3 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen
 D.Sc. Lasse Laurila

Keywords: Hybrid working machines, In-loop-simulations, electrical drives

In this thesis hybridization of heavy duty mobile working machines is studied by simulations. In the thesis is presented a system based on the concept of simulation-in-the-loop-simulation, which can be used to model the working machine mechanical parts using multibody dynamics simulation and the hybrid system using Simulink. The machine example is a load haul machine used in underground mines. Hybridization is done with two different concepts, which are analyzed in terms of performance and fuel consumption. Results are compared to traditional diesel powered machine.

The research presented in the thesis shows that (series-) hybridization can yield significant benefits in fuel efficiency of heavy duty working machines. The diesel motor can be driven in such a static operation point, where the efficiency is at maximum, regardless of the loads of the machine itself. In the research the gained benefit was at best 56 % drop in fuel consumption. In addition, the required diesel motor rated power decreases significantly.

As a part of the research also a Hardware-in-the-Loop simulation system is presented. With the system it is possible to attach a real electrical motor to otherwise virtually simulated working machine.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, Sähkötekniikan osastolla. Se kytkeytyy oleellisesti Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen (Tekes) ECV -hankekokonaisuuden Tubridi -tutkimuskokonaisuuteen. Työ pohjasi joiltain osin aiemmin kirjoittamaani kandidaatintyöhöni ja toimi sille luontevana. Työ oli mielenkiintoinen, sillä se laajensi ymmärrystäni sähkökäyttöjen monimuotoisuudesta ja niiden käytöstä työkoneteollisuudessa. Lisäksi työ oli haastava, sillä virtuaalisimulointi sekä suuremman mittakaavan työkoneen voimansiirron analysointi sekä sen hybridisointi olivat minulle kokonaan uusia asioita. Simulointimallien rakentaminen oli jo opintojeni aikana tullut tutuksi, mutta tällainen kokonaisvaltainen järjestelmäsimulointi opetti ajattelemaan ohjelmistojen käyttöä kokonaan uudella tavalla. Tutkimustyö aiheesta jatkuu edelleen.

Tämä lähes vuoden mittainen tutkimusprojekti on ollut antoisa, mutta ilman saamaani tukea se olisi ollut huomattavasti työläämpi. Kiitokset erityisesti vaimolleni sekä vanhemmilleni kaikesta siitä tuesta, jota olen opintojeni aikana saanut. Kiitokset myös työni ohjaajille ja tarkastajille mittavasta työpanoksesta.

Lappeenrannassa 6.5.2013

Jarkko Nokka

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Hybridijärjestelmät	11
1.1.1 Sarjahybridijärjestelmät	11
1.1.2 Rinnakkaishybridijärjestelmät	12
1.1.3 Sarja-rinnakkaishybridijärjestelmät	13
1.1.4 Hybridijärjestelmien vertailua	14
1.2 In-loop-simulointiperiaate	16
1.2.1 Hardware-in-the-loop	16
1.2.2 Human-in-the-loop	17
1.2.3 Simulation-in-the-loop.....	18
1.2.4 In-loop-simulaatiot ja signaalirajapinnat	18
1.3 Tutkimustavoitteet ja -tulokset	19
2 TYÖKONEEN JA YMPÄRISTÖN VIRTUAALISIMULOINTI	20
2.1 Case: Yhden ajomoottorin sarjahybridi	21
2.2 Case: Kolmen ajomoottorin sarjahybridi.....	23
3 HYBRIDIJÄRJESTELMÄN SIMULOINTI SIMULINK- YMPÄRISTÖSSÄ	26
3.1 Yleiskuva ja liityntä MeVEAn mekaniikkasimulaatioon.....	26
3.2 Sähkömoottorit	27
3.3 Energiavaraston mallinnus	32
3.4 Dieselmoottori ja latauspiiri	34
4 HARDWARE-IN-THE-LOOP-SIMULOINTILAITTEISTO.....	40
4.1 Kuormakoneen mitoitus	43
5 TULOKSET	49
5.1 Case: Yhden ajomoottorin sarjahybridi	50
5.2 Case: Kolmen ajomoottorin sarjahybridi.....	52
5.3 Case: Alkuperäinen dieselyökone	57
5.4 Tulosten analyysi	59
5.5 Hardware-in-the-Loop-järjestelmä	60
6 YHTEENVETO JA JATKONÄKYMÄT	63
LÄHTEET	65

Liitteet:

Liite I	Hybridijärjestelmän Simulink-mallin alustustiedosto
Liite II	Hardware-in-the-Loop -koneikon moottoreiden kilpiarvot

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Latinalaiset

B	kitkakerroin
e	lähdejännite
f	taajuus
I, i	virta
J	hitausmomentti
k	kerroin
L	induktanssi
n	pyörimisnopeus
P	teho
p	napapariluku
R	resistanssi
T	vääntömomentti
t	aika
u	jännite

Kreikkalaiset

α	kulmakiihtyvyys
η	hyötysuhde
φ	vaihekulma
$\cos\varphi$	tehokerroin
Ψ	käämivuo
Ω	mekaaninen kulmanopeus
ω	sähköinen kulmanopeus

Alaindeksit

s	staattori-
PM	Kestomagneetti, permanent magnet
d	dq-koordinaatiston d-akselin suuntainen komponentti
q	dq-koordinaatiston q-akselin suuntainen komponentti
md	magnetointi-
napa	akun navoissa esiintyvä suure
sisä	akun sisäinen suure
häviö	akun häviöitä kuvaava suure
lataus	akkua lataava suure
L	kuorma-
n	nimellinen
ref	ohjearvo

Lyhenteet

ECV	Electric Commercial Vehicles, Sähköiset hyötyajoneuvot
EVE	EVE- Sähköisten ajoneuvojen järjestelmät 2011–2015, Tekes-ohjelma
IP	Internet Protocol, Internetprotokolla, tiedonsiirtoprotokolla
OE	Oikea etupyörä
OT	Oikea takapyörä
PM	Permanent Magnet, Kestomagneetti
UDP	User Datagram Protocol, tiedonsiirtoprotokolla
VE	Vasen etupyörä
VT	Vasen takapyörä

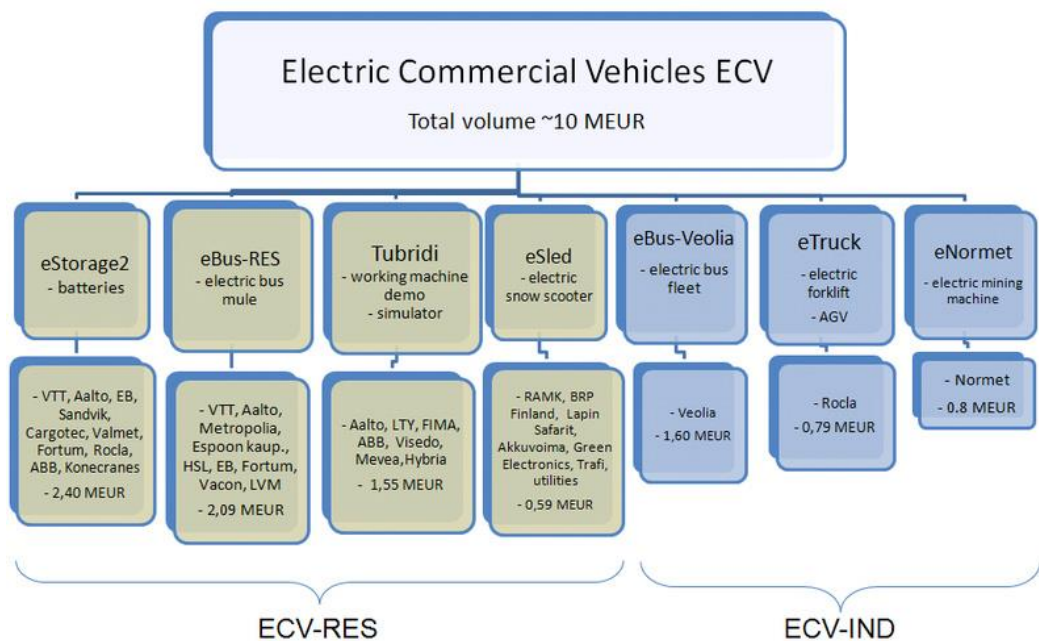
1 JOHDANTO

Dieselmoottorit ovat hallitseva voimanlähde raskaissa liikkuvissa työkoneissa ja niiden voimansiirrossa. Vaikka dieselmoottorinkin hyötysuhde jää keskimäärin tyypillisesti alle 40 %:n, mahdollistaa käytettyjen polttoaineiden suuri energiatiheys sen, että näin matalahyötysuhteisia moottoreita voidaan käyttää. Polttoaineen suuri energiatiheys mahdollistaa työkoneiden pitkät käyttösyklit ilman, että polttoainetankki - koneen energiavarasto - kasvaa liian suureksi. Verrattaessa esimerkiksi litiumionitekniikalla toteutettuun akkuun, on näiden energiavarastojen energiatiheys selkeästi havaittavissa; sekä bensiini että dieselöljy sisältävät noin 45 megajoulea energiaa kilogrammaa kohti siinä missä litiumioniakun maksimienergiatiheys on noin 0,72 megajoulea kilogrammaa kohti. Bensiinin energiatiheys on siis noin 62,5-kertainen litiumioniakkuun nähden. (Alaküla 2006). Matalasta hyötysuhteestaan huolimatta dieselmoottori on kuitenkin paras käytännössä saatavissa oleva energianmuunnin työkonekäyttöön. Polttokennot pystyvät periaatteessa parempaan, mutta niiden aika ei vielä näytä koittavan.

Kun otetaan huomioon se, että öljyn hinta on jatkuvassa nousussa, tunnetut öljyvarannot pikkuhiljaa tyhjenemässä ja työkonealan kilpailu on erittäin kovaa, on selvää, että raskaiden työkoneiden kokonaishyötysuhdetta on jollain keinolla saatava kasvatettua tai energialähde on vaihdettava toiseen. Hybridikäytöt - sähkökäyttöjen ja polttomoottoreiden yhdistelmä, on yksi tällä hetkellä kiinnostusta herättävimpiä raskaiden työkoneiden kehityssuuntia kohti pienempiä polttoaineenkulutuksia ja alempia päästöarvoja, kuitenkin työtehokkuudesta tinkimättä. Päästöjen vähentämistä on tähän asti toteutettu polttomoottoritekniikassa mm. pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmien avulla, jossa pakokaasua kierrätetään takaisin sylinteriin. Menetelmä vähentää pakokaasun typen oksidien pitoisuuksia, mutta toisaalta alentaa moottorin tehoa ja lisää polttoaineenkulutusta. Dieseltetekniikassa typen oksideja vähennetään nykyisin mm. ruiskuttamalla urealiuosta pailotilaan.

Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen (Tekes) EVE-ohjelmaan (Sähköisten ajoneuvojen järjestelmät) kuuluva ECV (Electric Commercial Vehicles)-hankekokonaisuus pyrkii luomaan Suomeen monipuolisen sähköisten hyöty-

ajoneuvojen testaus- ja kehitysympäristön. Yksi ECV:n seitsemästä projektista on nimeltään Tubridi (Tulevaisuuden (plug-in) hybridisähköinen työkonelusta ja sen komponentit), jossa tavoitteena on rakentaa hybridisähköisen työkoneen demonstraattori, jonka suorituskyky on merkittävästi parempi ja polttoaineen kulutus pienempi perinteiseen työkoneeseen verrattuna. Samalla demonstraattori toimii kansainvälisestikin ainutlaatuisena testialustana, missä kotimaiset voimansiirtokomponenttien valmistajat voivat testata ja demonstroida tuotteitaan. Testausalustaksi on valikoitunut maanalaisessa kaivoksessa käytetty lastauskone, jossa voidaan testata sekä ajovoimansiirtoa että työhydrauliikkaa. ECV:n työpaketit on esitetty kuvassa 1.1.



Kuva 1.1. ECV-kokonaisuuden tutkimustyöpaketit ja yrityshankkeet (ECV 2013).

Tämä tutkimusraportti esittää virtuaalisen In-Loop-simulaatioympäristön käyttöä työkaluna hybridijärjestelmän mitoituksessa ja raskaiden työkoneiden hybridisoinnin vaikutuksia tutkittaessa. Tutkittava työkone-esimerkki on maanalaisessa kaivoksessa toimiva lastauskone. Rakennettava järjestelmä ei ole rajoitettu pelkästään yhteen työkone-esimerkkiin, vaan sitä voidaan soveltaa käytännössä kaikkiin liikkuviin työkoneisiin. Esimerkkikuva kyseisestä lastauskoneesta on esitetty kuvassa 1.2. Muita liikkuvia työkoneita ovat esimerkiksi erilaiset kauhakuormaajat, nosturit, satamatyökoneet ja metsätyökoneet. Vastaavankaltaisia simulaatioympä-

ristöjä on harvassa, mutta toinen In-Loop-simulaatioita hyödyntävä laitteisto on esimerkiksi tutkimusyritys Tecnalian Dynacar-projekti, jossa virtuaalisimuloinnin avulla voidaan suunnitella erilaisia henkilöajoneuvoja (Dynacar 2013). Hybridisointiin liittyvää tutkimusta on Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tehty aiemminkin (Immonen 2008) (Gamburger 2009) (Chizh 2010), mutta kyseisenkaltaisen In-Loop-järjestelmän käyttö on urauurtava menetelmä hybridisointitutkimuksessa. Pelkästään hardware-in-the-loop-simulointiin perustuvaa hybridisointitutkimusta on toki tehty aiemminkin (Lee et. al. 2009) (Timmermans et. al. 2007).



Kuva 1.2. Maanalaisen kaivoslastauskoneen ja työympäristön virtuaalimalli.

Kuvassa 1.2 esitetyn lastauskoneen työnkuva kaivoksessa on siirtää irtiräjätettyä kiviainesta pois räjäytyspaikalta. Kone tarvitsee suuren vääntömomentintuottokyvyn kiviaineen kauhomisen ja nostamisen yhteydessä, mutta toisaalta joutuu ajamaan kaivostunnelissa pitkiäkin matkoja. Koneen hybridisoinnilla voidaan pienentää koneessa käytettävän dieseltehon määrää tinkimättä suorituskyvystä. Pienempi dieselteho näkyy pienempänä kulutusarvona ja päästöjen vähenemisenä. Lastauskoneen hybridisoinnilla on myös ympäristöystävällisiä kerrannaisvaikutuksia; lastauskoneen vähentyneet päästöt vähentävät kaivoskuilun ilmastointiin käytetyn energian tarvetta. Dieseltyökoneiden päästöt ovat yksi pääasiallinen kaivosilmanvaihdon mitoittamiseen käytetyistä tunnusluvuista (Tumbde 2011). Australiassa

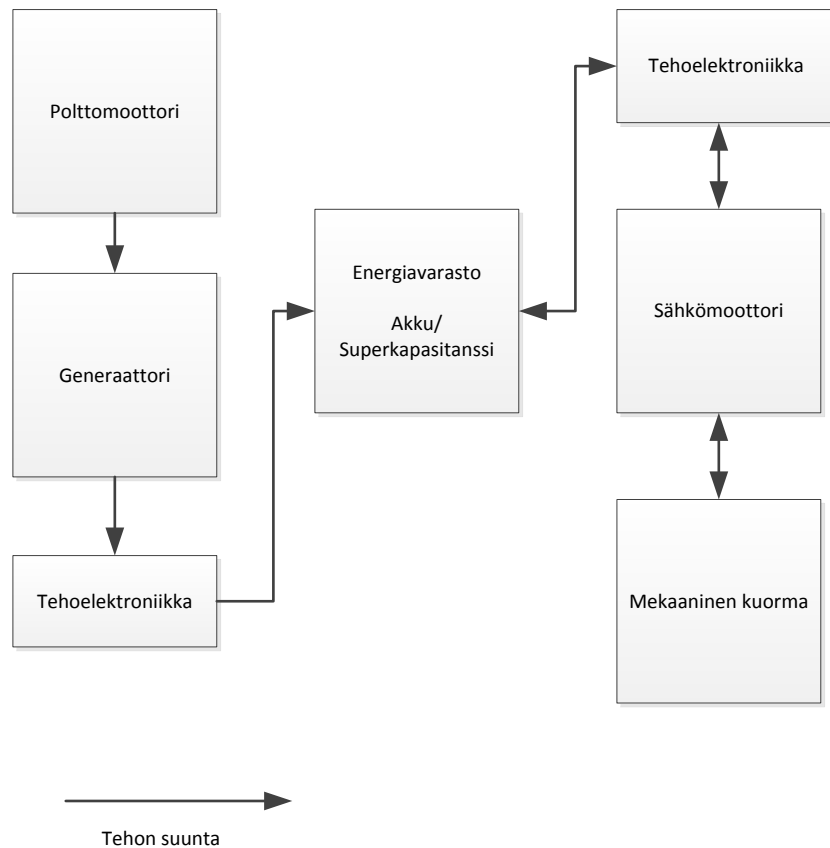
kaivostunnelin ilmanvaihto dieselkoneen toimintaympäristössä määritetään suoraan dieselkoneen tehon mukaan, ilmanvaihdon tarve on esimerkiksi Länsi-Australiassa 0.05...0.06 kuutiometriä sekunnissa kilowattia kohden riippuen käytetyn dieselkoneen typpioksidi- ja häkäpäästöistä (Hedges et. al. 2007). Käytännössä syvää kaivosta tuulettavan järjestelmän tehontarve on merkittävästi suurempi kuin kaivokseen installoitu dieselteho.

1.1 Hybridijärjestelmät

Hybridijärjestelmä koostuu polttomoottorista, yhdestä tai useammasta sähkömoottorista tai generaattorista, jonkinlaisesta energiavarastosta tai -varastoista sekä tehoelektronikasta. Riippuen näiden komponenttien keskinäisestä asettelusta hybridijärjestelmää voidaan kutsua esimerkiksi sarjahybridiksi, rinnakkaishybridiksi tai näiden yhdistelmäksi, sarja-rinnakkaishybridiksi.

1.1.1 Sarjahybridijärjestelmät

Sarjahybridiperiaatteella toteutetuissa työkoneissa työtä tekevä voima tuotetaan kokonaisuudessaan sähkömoottorilla tai -moottoreilla. Polttomoottori toimii siis ikään kuin paikallisena voimalaitoksena, eikä sillä ole mekaanista yhteyttä kuormaan. Polttomoottori pyörittää generaattoria, jota käytetään pääasiassa sähköisen energiavaraston lataamiseen. Sähkömoottorit ottavat tarvittavan tehon energiavarastosta tai generaattorilta, ja voivat tietyissä tapauksissa syöttää tehoa takaisin energiavarastoon käyttämällä regeneroivaa jarrutusta, joka on kuvattu myöhempanä. Sarjahybridijärjestelmän kaaviokuva on esitetty kuvassa 1.3.

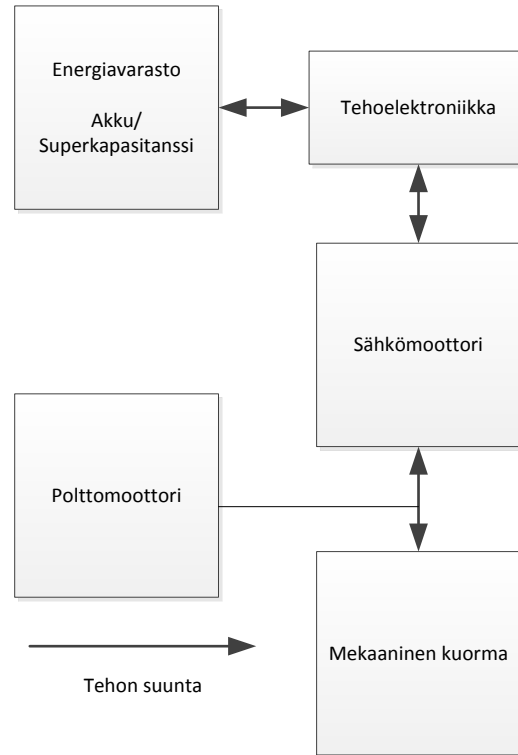


Kuva 1.3 Sarjahybridijärjestelmän vuokaaviomalli tehon suuntaa kuvaavine nuolineen. Polttomoottori pyörittää generaattoria, joka lataa energiavarastoa. Sähkömoottori tuottaa kaiken järjestelmän mekaanisen voimansiirron vaatiman tehon ottaen sähkötehon energiavarastosta. Ajomoottori kykenee myös lataamaan energiavarastoa jarrutusenergian talteenoton avulla.

Kuten kuvasta 1.3 voidaan nähdä, polttomoottorin koko mekaaninen teho muunnetaan sähköiseksi, ja siirretään energiavarastoon. Mekaanista yhteyttä polttomoottorin ja kuorman välillä ei siis ole. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli esimerkiksi energiavaraston varaustila on tarpeeksi suuri, voidaan latauspiiri sammuttaa kokonaan. Vastaavasti, kun latauspiiri on käytössä, voidaan sen toimintapiste valita vapaasti, täysin ajopiiristä riippumatta. Latauspiiri voidaan säätää aina toimimaan parhaan hyötysuhteen omaavassa toimintapisteessä.

1.1.2 Rinnakkaishybridijärjestelmät

Rinnakkaishybridijärjestelmissä sekä polttomoottori että sähkömoottori kytkeytyvät mekaanisesti kuormaan. Älykäs järjestelmän säätö varmistaa sen, että kuormitus jakautuu optimaalisesti sähkö- ja polttomoottorin välille tai tarvittaessa vain toiselle näistä. Rinnakkaishybridijärjestelmän kaaviokuva on esitetty kuvassa 1.4.



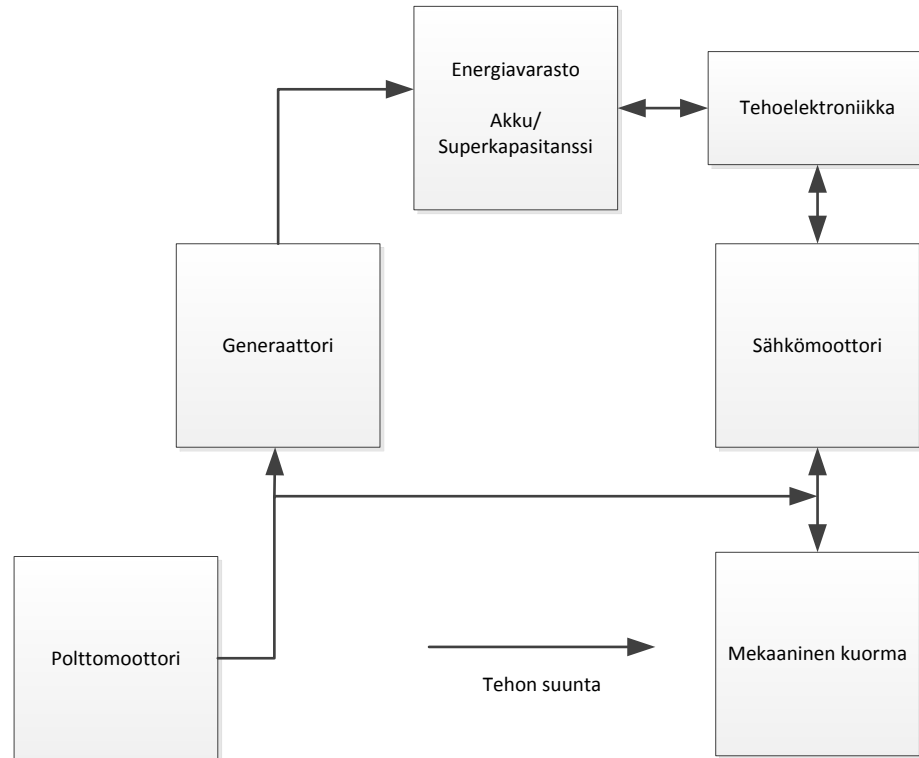
Kuva 1.4. Rinnakkaishybridijärjestelmä tehon suuntaa kuvaavine nuolineen. Sekä polttomoottori että sähkömoottori kytkeytyvät mekaanisesti kuormaan. Akkua voidaan ladata jarrutusenergian talteenoton avulla tai silloin, kun sähkömoottorin toimintatila muutetaan generaattoriksi, jolloin polttomoottori tuottaa tarvittavan tehon sekä mekaanisen kuorman että generaattorin tarpeisiin.

Kuvasta 1.4 nähdään, että rinnakkaishybridijärjestelmässä sähkömoottoreiden ja tarvittavan tehoelektronikan määrä on huomattavasti pienempi kuin sarjahybridijärjestelmässä. Rinnakkaishybridijärjestelmässä tarvitaan vain yksi sähkömoottori, koska polttomoottori kytkeytyy mekaanisesti samalle voimansiirtoakselille. Pienempi tehonmuokkauksen tarve voi periaatteessa parantaa järjestelmän hyötysuhdetta, mutta energiavaraston lataus ei ole mahdollista silloin kun sähkökone toimii moottorina.

1.1.3 Sarja-rinnakkaishybridijärjestelmät

Sarja-rinnakkaishybridijärjestelmä toimii käytännössä samoin kuin rinnakkaishybridijärjestelmä, mutta polttomoottorin akselille on lisätty erillinen generaattori, jolla voidaan ladata energiavarastoa riippumatta voimansiirtoakselille tehoa tuot-

tavan sähkömoottorin toimintatilasta. Kaaviokuva sarja-rinnakkaishybridijärjestelmästä on esitetty kuvassa 1.5.



Kuva 1.5. Sarja-rinnakkaishybridijärjestelmä. Toimintaperiaate on muutoin sama kuin kuvan 1.4 rinnakkaishybridijärjestelmässä, mutta polttomoottorin akselille on lisätty erillinen generaattori, jolla energiavarastoa voidaan ladata, vaikka ajomoottori olisi moottoritilassa.

1.1.4 Hybridijärjestelmien vertailua

Hybridijärjestelmiä verrattaessa täytyy ottaa huomioon tapauskohtaisesti kunkin työkonen toimintaympäristö ja sen käyttösykli sekä työkonen voimansiirron rakenne. Energiatehokkuusmielessä paras hybridisointimenetelmä määräytyy työsyklin luonteesta. Autoteollisuudessa yleinen tapa toteuttaa hybridi-auton voimansiirto on käyttää samaa mekaanista voimansiirtoa kuin polttomoottoriautossa ja käytännössä lisätä tarvittavat komponentit polttomoottorin kanssa mekaanisesti samalle akselille tai sen rinnalle, riippuen valitusta hybridijärjestelmästä. Vuonna 2007 tehty kanadalainen tutkimus vertaa SUV (Sports Utility Vehicle) — tyyppisellä ”katumaastoautolla” sarja- ja rinnakkaishybridien kokonaishyötysuhdetta (Li et. al. 2007). Tutkimuksessa painotetaan erityisesti sitä, että vaikka sarjahybridit mahdollistaa generaattoriin käyttämisen ajopiiristä irrallaan paranta-

en sen hyötysuhdetta, rinnakkaishybridi on kuitenkin hyötysuhteeltaan parempi keino hybridisoida katumaastoauto. Vertailun kokonaishyötysuhteet ovat n. 26 % sarjahybridille ja 43 % rinnakkaishybridille käyttäen UDDS-ajosykliä (Urban Dynamometer Drive Schedule). Eroa perustellaan muun muassa sillä, että sarjahybridin koko energiatuotanto on polttomoottorin vastuulla, mikä alentaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta siinä, missä rinnakkaishybridin tehontuotanto on jaettu akulle ja dieselmoottorille. Perustelu on sinänsä erikoinen, koska kaikkia hybridijärjestelmiä voidaan ajaa siten, että energiavaraston varaustasapaino ei pysy vakiona (energiavarastoa tyhjenetään jatkuvasti), jolloin myös sarjahybridin hyötysuhde kasvaisi. Rinnakkaishybridin suuri hyötysuhde vaatii kuitenkin älykkään, optimoidun hallintajärjestelmän, kun taas sarjahybridissä säädön optimoinnilla oli pieni vaikutus.

Kiinalaisessa hybridibussitutkimuksessa (Cao et. al. 2009) tutkittiin eri hybridijärjestelmiä kaupunkiajossa olevan bussin tapauksessa. Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että sarjahybridijärjestelmä soveltuisi paremmin kaupunkiajossa olevan bussin tapaiseen vaihtelevaan ajoon. Rinnakkaishybridin dieselmoottorin vaihteleva pyörimisnopeus vaikutti koko järjestelmän hyötysuhteeseen. Shanghain yliopistossa Kiinassa (Xiong et. al. 2008) tehty vertaileva hybriditutkimus käyttää perinteistä perheautoa ja kahta eri ajosykliä (US EPA Federal Test Procedure ja China Automobile Technology & Research Center:n ajosykli). Hybridisointivaihtoehtoina oli kaksi rinnakkaishybridiratkaisua ja yksi sarjahybridiratkaisu. Tutkimuksen tavoite oli tutkia taloudellista kannattavuutta. Tutkimuksen mukaan rinnakkaishybridi olisi paras ratkaisu, perustellen tätä rinnakkaishybridin yksinkertaisella rakenteella sekä sarjahybridin akuston ylläpitokustannuksilla. Tutkimuksessa mainitaan myös, että sarjahybridiratkaisun päästöt sekä yleiset ylläpitokustannukset ovat vertailun pienimmät. Tutkimuksessa jätetään kuitenkin huomiotta esimerkiksi rinnakkaishybridien akustojen vaihtotarve, joka sarjahybrideillä on otettu mukaan analyysiin. Edellä esitetyn (Li et. al. 2007) tutkimuksen tavoin Caon (2009) tutkimus vaikuttaa joiltain osin asenteelliselta.

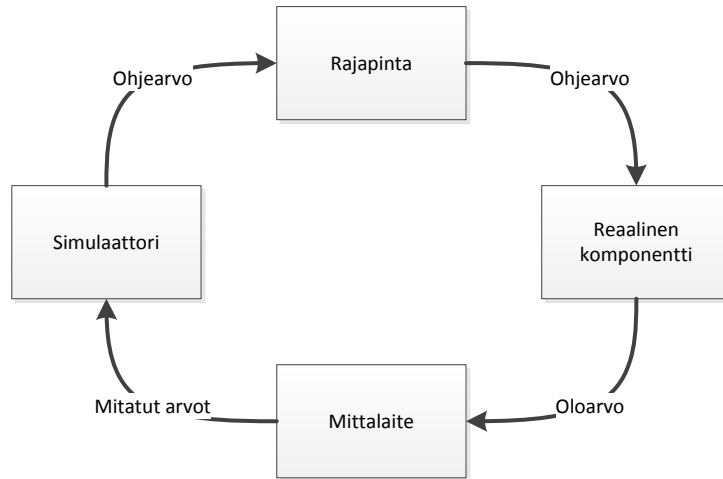
Saman ajoneuvon eri hybridisointimenetelmien välisiä vertailevia tutkimuksia on tehty hyvin vähän, ja ne keskittyvät lähinnä tiellä liikkuviin ajoneuvoihin (henkilöautot, bussit).

1.2 In-loop-simulointiperiaate

In-loop- eli silmukkasimulaatio tarkoittaa sellaista simulaatiotapaa, jossa simulaatio-osa on vuorovaikutuksessa jonkin ulkoisen, erillisen komponentin kanssa. Simulaation nimi määräytyy sen mukaan, mikä erillinen komponentti on kyseessä. Ohjelmallisen komponentin käyttö tuottaa Software-in-the-Loop-simulaation, mekaanisen tai sähköisen (esim. elektroniikkapiiri) Hardware-in-the-Loop:in. Muita mahdollisia esimerkkejä ovat Human-in-the-Loop- ja Simulation-in-the-Loop-simulaatiot.

1.2.1 Hardware-in-the-loop

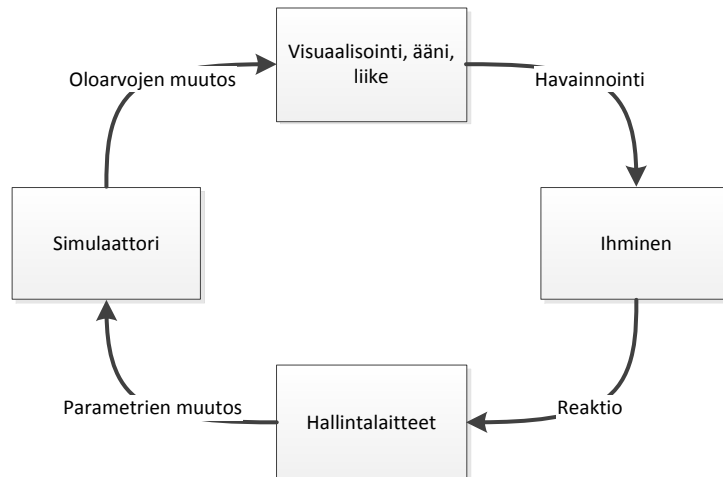
Hardware-in-the-loop-simulointi yhdistää simuloinnin todelliseen, fyysiseen komponenttiin. Esimerkkisimulaationa mainittakoon tässäkin tutkimuksessa käytetty Hardware-in-the-Loop-järjestelmä, jonka voimansiirtoon tehoa tuottava moottori on todellinen 4 kW oikosulkumoottori ja sillä vastaava kuormakone, mutta loput voimansiirrosta ja kuormittavasta ympäristöstä simuloidaan virtuaalisesti. Jotta virtuaalinen ja reaalin osa yhteissimulaatiosta saadaan kytkettyä yhteen, tarvitaan niiden välille rajapinta, joka esimerkkitapauksessa muodostuu ajomoottoria kuormittavasta toisesta oikosulkumoottorista, tehoelektronikasta sekä tiedonsiirto-ohjelmista. Reaalisesta komponentista mitataan tarvittavat oloarvot, jotka välitetään virtuaalisimulaattorille syötteenä. Virtuaalisimulaatio reagoi syötteisiin sille ominaisella tavalla ja palauttaa tiedon tästä takaisin reaaliselle komponentille. Muodostuva silmukka on esitetty kuvassa 1.6.



Kuva 1.6. Hardware-in-the-loop-simulaation vuokaaviomalli. Reaalista komponenttia kuormitetaan rajapinnan välityksellä oikeaa vastaavalla kuormituksella.

1.2.2 Human-in-the-loop

Human-in-the-loop-simulointi on todennäköisesti yleisin virtuaalisimuloinnista mieleen tuleva simulaatiotyyppi. Esimerkiksi erilaisten työkoneiden tai vaikkapa lentäjien koulutussimulaattorit täyttävät human-in-the-loop-simuloinnin tunnuspiirteet. Human-in-the-loop-simuloinnissa virtuaalisimulaation ja ihmisen välistä vuorovaikutusta voidaan kuvata kuvan 1.7 mukaisella vuokaaviomallilla.



Kuva 1.7. Human-in-the-loop-simuloinnin vuokaaviomalli. Simulaattori ja käyttäjä kommunikoivat keskenään käyttöliittymän avulla. Käyttäjä vaikuttaa simulaatioon käyttöliittymän (kosketusnäytöt, hallintalaitteet, joystick, päänpaikannus, liike yms.) avulla ja simulaatio muuttaa käyttäjän havaitsemaa ympäristöä, jonka muodostavat esimerkiksi kuva, ääni ja liike.

1.2.3 Simulation-in-the-loop

Simulation-in-the-loop-termiä käytetään jonkin verran rinnakkain muiden nimitysten kanssa, mutta kyseinen nimitys otettiin työn kontekstissa käyttöön, jotta yhteys muihin in-Loop-simulaatioihin pysyy selkeänä. Simulation-in-the-loop on verrattavissa hardware-in-the-loop-simulointiin sillä erotuksella, että reaalisen komponentin sijasta simulointisilmukassa on simulaatiomalli reaalisesta komponentista. Esimerkiksi työkonetta, jonka moottori tai koko voimansiirto on simuloitu erillisellä, vaikkapa Simulink -simulaatiomallilla, toteuttaa simulation-in-the-loop-simuloinnin. Toinen nimitys simulaatiotavalle on esimerkiksi Coupled Simulation eli yhdistetty simulaatio.

1.2.4 In-loop-simulaatiot ja signaalirajapinnat

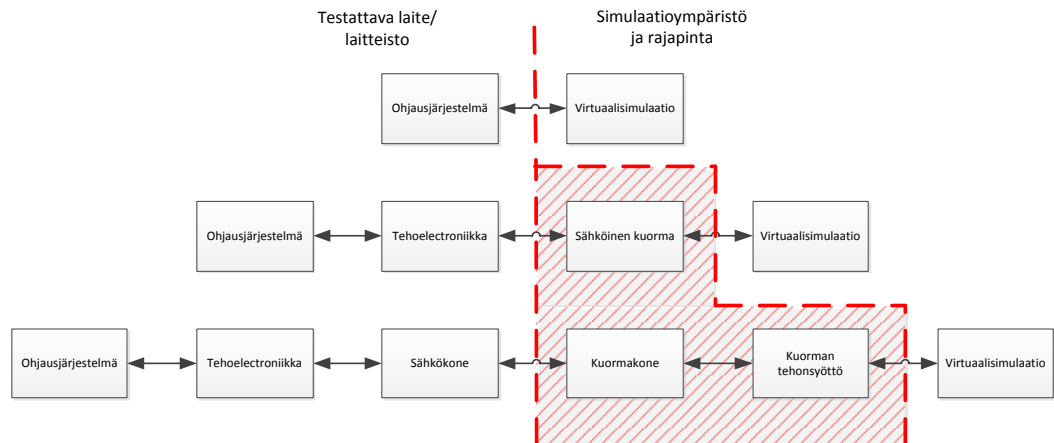
In-loop-simuloinnin monimuotoisuudesta johtuen muodostuu virtuaalisimulaation ja erillisen komponentin välinen ns. signaalirajapinta tärkeäksi osaksi simulaation toimivuutta. Rajapinnan tehtävä on siirtää erillisen komponentin ja virtuaalisimulaation keskinäisessä vuorovaikutuksessa olevat signaalit toisilleen kuvan 1.8 tavoin.



Kuva 1.8. In-loop-simuloinnin toimintaperiaate. Virtuaalisimulaatio yhdistetään erilliseen järjestelmään rajapinnan avulla. Rajapinta määritellään erillisen komponentin mukaan ja voi olla esimerkiksi ohjelmallinen tai ohjelmallis-mekaaninen.

Signaalirajapinta rakennetaan vastaamaan käytetyn simulaation tarpeita. Human-in-the-loop-simuloinnissa voidaan kuvan lisäksi käyttää liikettä ja ääntä signaalirajapintana virtuaalisimulaatiolta ihmiselle ja vastaavasti hallinta- ja ohjainlaitteita toiseen suuntaan. Yleisesti voidaan todeta, että human-in-the-loop-simuloinnin rajapinnassa on teknisessä mielessä hyvin vähän variaatioita. Hardware-in-the-loop-simuloinnissa tilanne on päinvastainen jo siitäkin syystä, että reaalin komponentti voi muuttua. Rajapinta rakennetaan vastaamaan käytettyä komponenttia.

Kuvassa 1.9 on esitetty erilaisia rajapintamäärittelyjä sähkökäytön sisältävässä hardware-in-the-loop-simulaatioissa.



Kuva 1.9. Erilaisia hardware-in-the-loop-simulaatioita ja niissä käytettyjä rajapintoja. Kuvassa vasen puoli kuvaa testattavaa reaalista komponenttia. Esimerkkinä sähkökäytön simulointi kolmella eri tasolla. Ylinnä sähkökäytön ohjausjärjestelmän testausympäristö, jossa rajapinta on puhtaasti ohjelmallinen. Alaspäin siirryttäessä reaalisen osan laajuus kasvaa ja rajapinta muuttuu tätä silmällä pitäen käsittämään myös mekaanisen osan. Punaisella viivoituksella merkityllä alueella on merkitty rajapinnan toiminnallisuuteen liittyvät todelliset komponentit.

1.3 Tutkimustavoitteet ja -tulokset

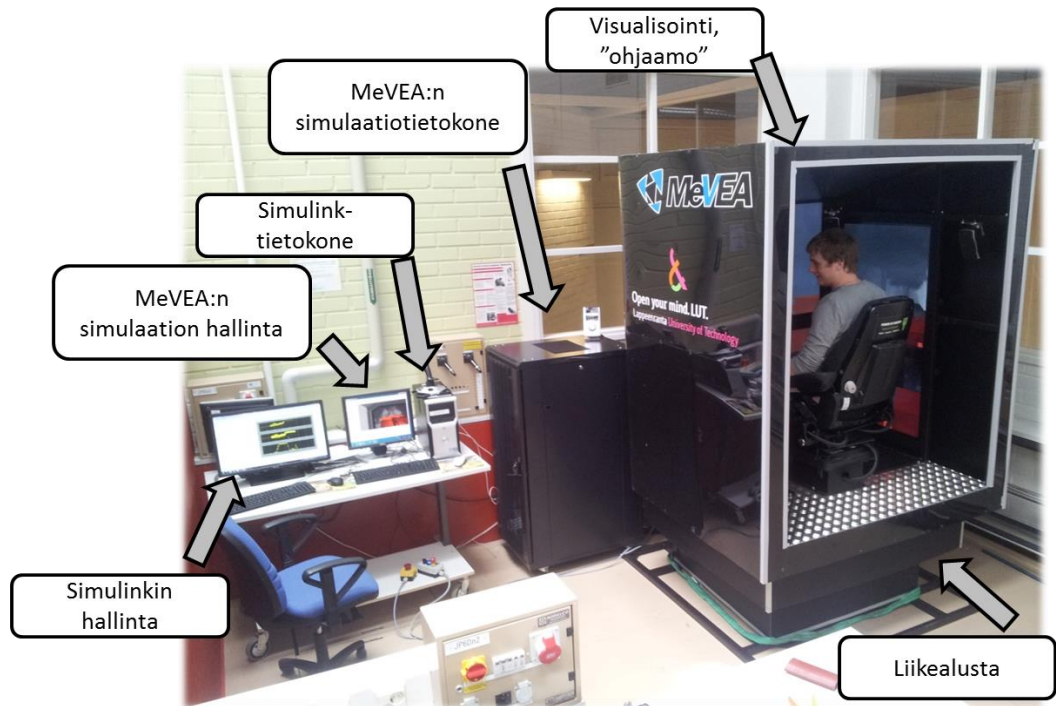
Tutkimuksen tavoitteena on toteuttaa reaaliaikaista mekaniikan ja työympäristön virtuaalisimulointia hyödyntäen Simulation-in-the-Loop- (Simulaatio silmukan osana) sekä Hardware-in-the-Loop (toimilaitte osana simulaatiosilmukkaa)-järjestelmät, joita voidaan käyttää työkaluina hybridijärjestelmien mitoittamiseen ja suunnitteluun. Järjestelmät toimivat työkaluina jatkotutkimusta varten. Simulation-in-the-Loop -järjestelmän avulla tutkitaan erilaisia hybridisointiratkaisuja ja niiden vaikutuksia työkoneneen polttoaineenkulutukseen ja käyttäytymiseen. Tutkimuksen vertailukohteena käytetään pelkästään dieselmoottoria voimanlähteenä käyttävää työkonetta. Toteutetulla järjestelmällä tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan osoittaa, että (sarja-) hybridisoinnilla voidaan merkittävästi pienentää työkoneneen tarvitseman dieseltehon määrää ja vastaavasti pienentää työkoneneen polttoaineenkulutusta.

2 TYÖKONEEN JA YMPÄRISTÖN VIRTUAALISIMULOINTI

Hybridityökoneen mekaaninen käyttäytyminen ja työympäristö mallinnetaan MeVEA Oy:n työkoneiden virtuaalisimulointiin tarkoitetulla järjestelmällä. MeVEA valmistaa ja toimittaa virtuaalisimulointilaitteistoja ja -ohjelmistoja, joiden tarkoitus on toimia osana työkoneiden tuotekehitysprosessia tai koulutussimulaattoreina. Tehtävässä tutkimuksessa MeVEAn toimittamaa simulaattorilaitteistoa ja siihen yhdistettäviä sähkökäyttömalleja käytetään hybridityökoneen toiminnan kuvaajana erilaisia hybridisointiratkaisuja testattaessa. Virtuaalisena toimintaympäristönä toimii testikaivos, joka on mallinnettu vastaamaan todellista testikaivosta. Työkonemallin ja ympäristön mallinnus perustuu monikappaledynamiikkaan (MeVEA 2013).

Monikappaledynamiikka perustuu määritelmään, jossa joukko jäykkiä kappaleita, massoja, on yhdistetty toisiinsa liitoksilla. Kappaleille määritetään massakeskipiste ja massa sekä kiertymisominaisuudet inertiamatriisin avulla. Riippuen kappaleiden ominaisuuksista ja liitoksien sallimista liikeradoista (pallonivel, sarana, liukuliitos...) voidaan koko kappalesysteemin tila laskea (de Jalón & Bayo 1994).

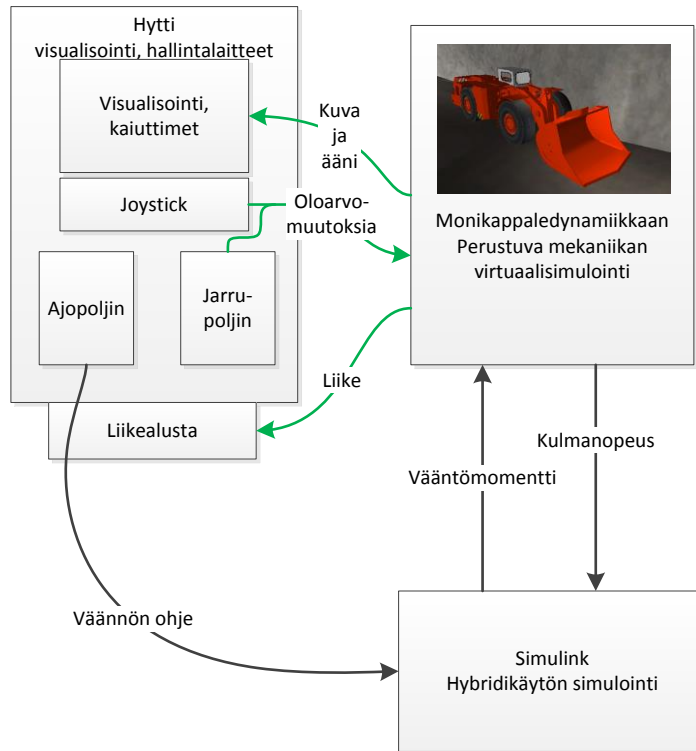
Kun jokaisen komponentin mekaaniset ominaisuudet ja sen liitospisteiden käyttäytyminen tunnetaan, voidaan sen paikkatieto laskea. Kun massakappaleiden muodostamaan systeemiin lisätään voimansiirto, eli osaan kappaleista (renkaat) syötetään vääntömomentti, voidaan kokonaisen työkoneen käyttäytyminen simuloida. Työkoneen ja toimintaympäristön virtuaalimallit muodostavat In-loop-simulaation virtuaalisen osan. Ohjaamohytin ja liikealustan välityksellä toteutuu Human-in-the-loop-simulaatiosilmukka. Tarvittaessa myös Simulation-in-the-Loop tai Hardware-in-the-Loop-simulaatiosilmukat ovat käytettävissä. Työkoneena on käytetty kuvan 1.2 maanalaista kaivoslastauskonetta, joka perinteisesti on toteutettu dieselmoottorilla. Tässä osiossa on esitellään kaksi eri sarajahybridikonseptia ja vertaillaan niistä saatuja tuloksia. Virtuaalisimulaattori on esitetty kuvassa 2.1



Kuva 2.1. MeVEA Oy:n valmistama työkoneiden virtuaalisimulaatioympäristö. Kuljettaja istuu ohjaamohytissä todellisen näköisessä, tuntuksessa ja kuuloisessa ympäristössä (Human-in-the-Loop). Hytin kuusi näyttöä visualisoivat toimintaympäristön ja kaiuttimet ja liikealusta tuottavat äänen ja liikkeen. Hallintalaitteet koostuvat kahdesta joystick -ohjaimesta ja kahdesta polkimesta.

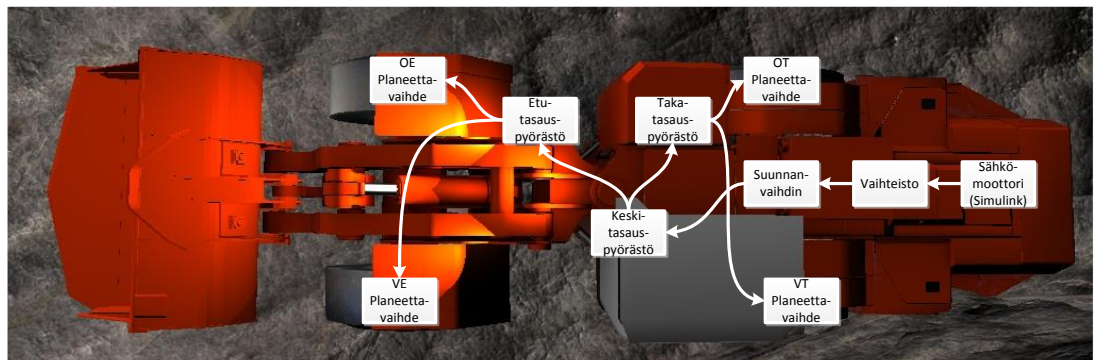
2.1 Case: Yhden ajomoottorin sarjahybridi

Yhden ajomoottorin hybridilastauskone on toteutettu käyttäen rakennetta, jossa koneen liikkumiseen tarvittava teho on tuotettu vain yhdellä sähkömoottorilla. Käytännössä työkoneen mekaaninen voimansiirto on muutoin sama kuin perinteisen, dieselmootoria voimanlähteenään käyttävän koneen, mutta dieselmoottori on vaihdettu sähkömoottoriksi. Virtuaalimallin ja Simulink-hybridijärjestelmämallin välinen signaalitason kytkentä on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Toteutetun simulaation signaalitason kytkentä. Simulation-in-the-loop-silmukka on piirretty mustilla nuolilla ja human-in-the-loop-silmukka vihreillä. Todellisuudessa vääntöohje tulee ohjaamohytin polkimelta mekaniikkasimulaation kautta ennen siirtoa Simulink:iin, mutta kuvassa selkeyden vuoksi sen reitti on piirretty suoraan ohjaamohytiltä Simulink-simulaatioon.

Työkoneen voimansiirto on suora kopio dieselvetoisen koneen voimansiirrosta ja koostuu sähkömoottorista pyörään päin lukien vaihteistosta, suunnanvaihtajasta sekä taseuspyörästä, jotka ensin jakavat mekaanisen tehon etu- ja taka-akseleille ja edelleen pyörille. Voimansiirtokaavio on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Yhden ajomoottorin mallin mekaanisen voimansiirron kaavio. Yhden sähkömoottorin tuottama teho välittyy vaihteiston ja suunnanvaihtimen kautta ja jaetaan etu- ja taka-akseleille. Pyörillä on lisäksi alennusvaihteet.

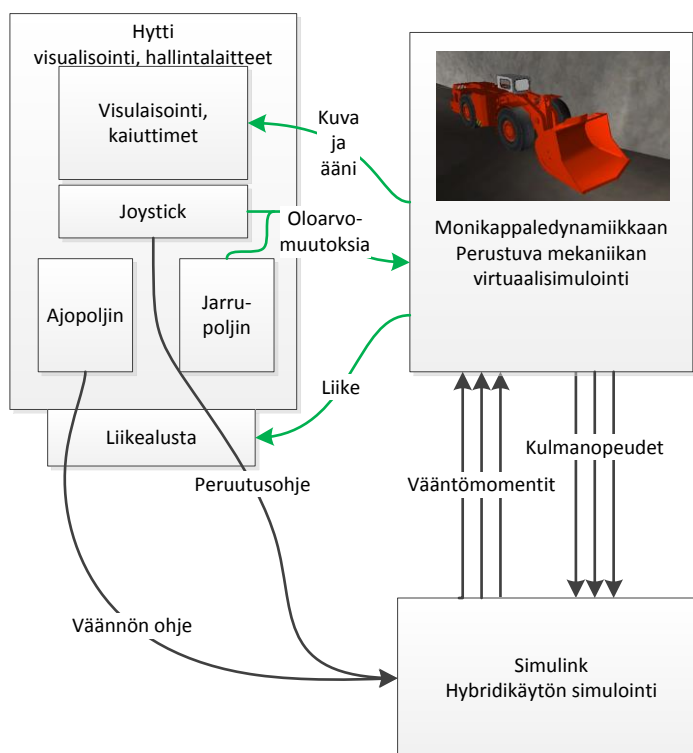
Kuvassa 2.3 esitetyn työkoneen ajovoimansiirron eri komponenttien välityssuhteet on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Yhden ajomoottorin hybridikoneen ajovoimansiirron välityssuhteita

Sähkömoottori	Vaihteisto		Suunnanvaihdin	Keskitasauspyörästö	Etu-/takatasauspyörästö	Planeetta - vaihteet	Kokonaisvälityssuhde
1	1.vaihde	4.7	1	1	4.1	6	115.62
	2.vaihde	2.5					61.5
	3.vaihde	1.4					34.44
	4.vaihde	0.8					19.68

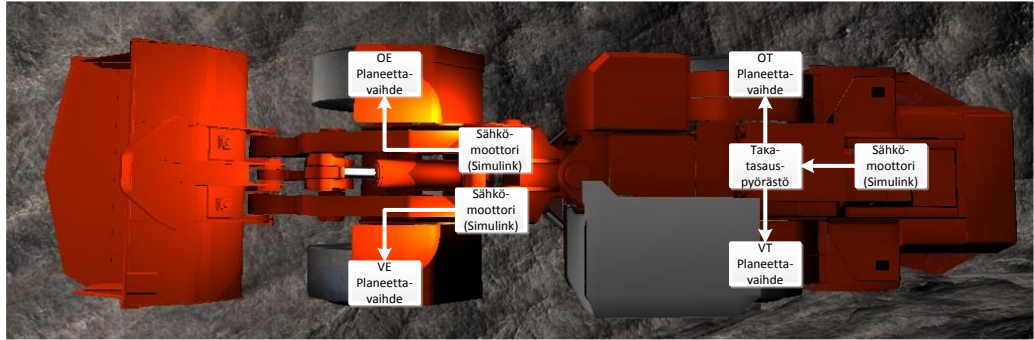
2.2 Case: Kolmen ajomoottorin sarjahybridi

Kolmen ajomoottorin järjestelmä eroaa edellä esitetystä yhden ajomoottorin järjestelmästä merkittävästi. Kolmen ajomoottorin järjestelmässä työkoneen molemmilla etupyörillä on planeettavaihteen välityksellä omat sähkömoottorit kolmannen sijoittuessa taka-akselille molempien takapyörien voimanlähteeksi. Työkoneen alkuperäinen voimansiirto on tässä versiossa lähes kokonaan poistettu, joten esimerkiksi vaihteiston ja suunnanvaihtajan toiminnallisuudet joudutaan miettimään uudelleen. Kolmen ajomoottorin toteutustapa on valittu siksi, että se vastaa Tubridi-projektissa toteutettavan todellisen testausalustan voimansiirtoa.



Kuva 2.4 Kolmen ajomoottorin sarjahybridin simulaation signaalitason kytkentä. Software-in-the-loop-silmukka on piirretty mustilla nuolilla ja human-in-the-loop-silmukka vihreillä. Todellisuudessa vääntö- ja peruutusohjeohje tulevat ohjaamohytin ohjainlaitteilta mekaniikkasimulaation kautta ennen siirtoa Simulink:iin, mutta kuvassa selkeyden vuoksi sen reitti on piirretty suoraan ohjaamohytiltä Simulink-simulaatioon.

Kuvassa 2.4 kuvatuilla ohjaussignaaleilla, vääntö- ja peruutusohje ohjataan kaikkia kolmea ajomoottoria. Polkimen asento tuottaa siis saman vääntömomenttiohjeen kaikille kolmelle moottorille. Peruutusohje on digitaalinen signaali, jota käytetään etumerkkinä vääntöohjeelle; käytännössä kun peruutussignaalin lähteenä toimivaa nappia painetaan, polkimen tuottaman vääntöohjeen etumerkki vaihtuu. Tällöin on mahdollista peruuttaa ilman suunnanvaihtajaa. Jotta laite saavuttaisi tarvittavan väännön esimerkiksi työnnettäessä kauhaa kivikasaan lisätään mallin etupyörille planeettavaihteen lisäksi kaksiportainen vaihteisto. Todellisuudessa prototyyppilaitteeseen suunnitellaan kaksiportaista planeettavaihdetta. Ero ei kuitenkaan ole merkittävä, sillä käytetty mekaniikan simulointiohjelmisto käyttää vielä toistaiseksi ideaalisia voimansiirtokomponentteja. Kolmen ajomoottorin järjestelmän voimansiirtokaavio on esitetty kuvassa 2.5.



Kuva 2.5. Kolmen ajomoottorin hybridimallin ajovoimansiirtokaavio. Molemmilla etupyörillä on omat sähkömoottorinsa ja taka-akselilla kolmas. Joka pyörällä on oma alennusvaihteensa, jonka lisäksi etupyörillä on kaksiportaiset vaihdelaatikat.

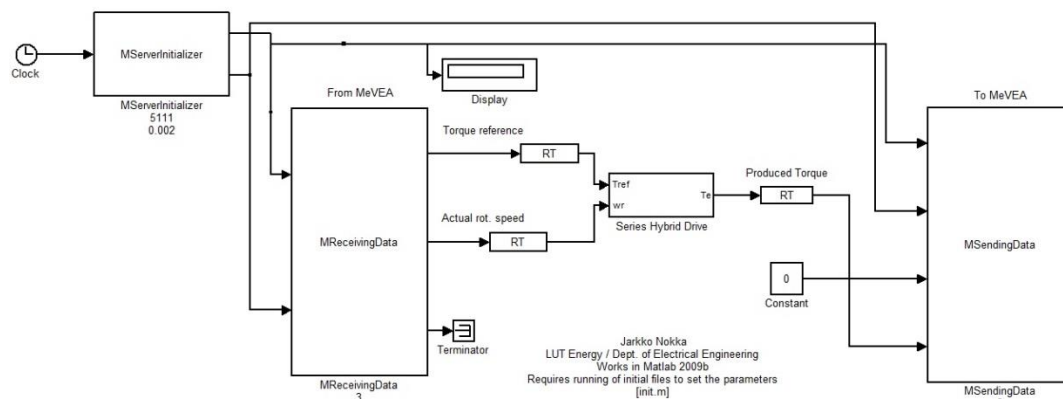
Koska kolmen ajomoottorin työkonessa ei ole perinteisen työkonen mekaanista voimansiirtoa siihen kuuluvine komponentteineen (suunnanvaihtajat, kytkin, automaattivaihteisto), vaatii ajovoimansiirron suunnittelu hieman erilaista ajattelua. Työkonen jokaisella pyörällä oleva planeettavaihde mitoitettiin välityssuhteelle 33, joka likimain vastaa yksimoottorisen työkonen kolmatta vaihdetta. Tällaisella välityksellä kone pystyy liikkumaan työympäristössä. Kun renkailta vaaditaan suurta vääntömomenttia (kauhan työntäminen kivikasaan), voidaan se vaihteistojen sijaan toteuttaa esimerkiksi järjestelyllä, jolla voidaan hetkellisesti esimerkiksi kaksinkertaistaa moottorin vääntömomenttiohje. Lisäksi erillistä peruutusvaihdetta ei tarvita, koska vääntömomenttiohjeiden etumerkkiä muuttamalla saadaan suoravetoinen kone peruuttamaan.

3 HYBRIDIJÄRJESTELMÄN SIMULOINTI SIMULINK-YMPÄRISTÖSSÄ

Tutkittavien työkoneiden mekaaniseen voimansiirtoon kytkeytyvää hybridijärjestelmää simuloitiin Matlabin Simulink-ohjelmalla. Simulaatiomalli sisältää ajomoottorit, akun sekä generaattorista ja dieselmoottorista koostuvan latauspiirin. Osiossa esitellään käytetty malli ja sen keskeiset osat. Hybridijärjestelmän simulaatiomallin alustuksessa käytetyn m-tiedoston sisältö on esitetty liitteessä 1.

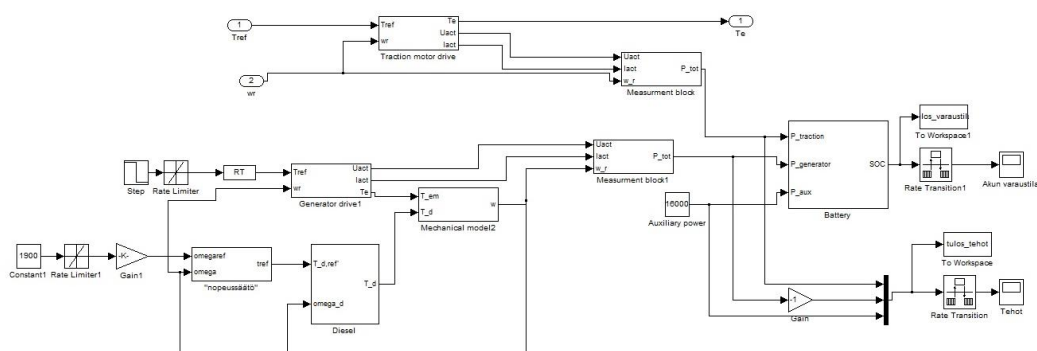
3.1 Yleiskuva ja liityntä MeVEAn mekaniikkasimulaatioon

MeVEAn mekaniikkasimulaatio yhdistyy ulkopuolisiin komponentteihin Socket IP-yhteyden välityksellä. Ohjelma koostaa simulaatioaika-askelleen päätteeksi siirrettävät suureet paketiksi, joka lähetetään mallissa määritettyyn IP-osoitteeseen valitulla portilla. Simulink-mallissa tämä datapaketti puretaan ja jaetaan omiin suureisiinsa simulaatiomallin käyttöön. Samalla Simulink-laskennan tulos koostetaan ja lähetetään takaisin MeVEAlle. Tämän jälkeen molemmat osapuolet aloittavat uuden laskentakierroksen. Simulink-simulaation ylin kerros eli ohjelmallinen signaalirajapinta on esitetty kuvassa 3.1. Hybridimalli tuottaa lähtösuurena sähkömoottorin tuottaman vääntömomentin, jolla siis vaikutetaan virtuaalisen työkonemallin mekaaniseen voimansiirtoon. Vastaavasti hybridimalli saa paluuarvona pyörimisnopeuden.



Kuva 3.1. Simulink -mallin kytkeytyminen IP Socketin välityksellä MeVEAn simulaatioon. MServerInitializer-lohko hallinnoi Simulink-simulaation ajoittamista ja määrittää käytettävän portin. MSendingData hoitaa signaalien lähetyksen MeVEAn simulaatioon ja MReceivingData sisääntulevien signaalien käsittelyyn. Series Hybrid Drive-lohko sisältää koko sarjahybridijärjestelmän. Kuvan kaavio on yhden ajomoottorin mallista, kolmen ajomoottorin mallissa tuloja ja lähtöjä on huomattavasti enemmän.

Itse hybridijärjestelmä koostuu ajomoottoreista, akkumallista ja dieselgeneraattori-latauspaketista, joista jokainen esitellään omassa osiossaan. Kokonaiskuva yhden ajomoottorin hybridikäytöstä on esitetty kuvassa 3.2.

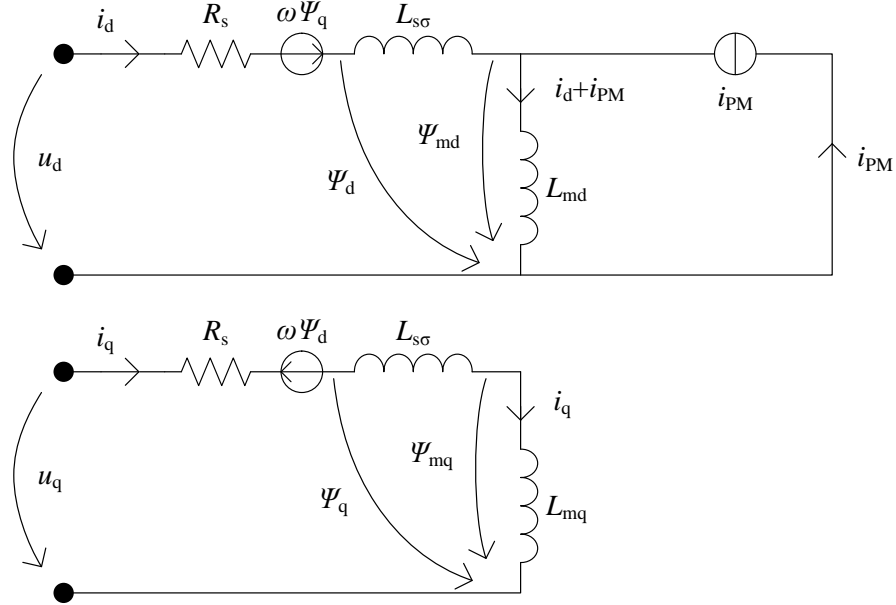


Kuva 3.2. Sarjahybridijärjestelmän Simulink-simulaatiomalli.

3.2 Sähkömoottorit

Simulaatiomalleissa käytetty sähkökonetyyppi on kestopagneettitahtikone, jolloin roottorin tyhjäkäyntikäymä tuotetaan erillisen magnetointikäymän sijasta kestopagneeteilla. Kestomagneettitahtikoneiden mallinnus tehdään yleisesti rootto-

riin sidotussa dq-koordinaatistossa, joka mahdollistaa virta- ja jännitesuureiden tarkastelun vaihtovirtatason sijasta tasavirtatasossa (Pyrhönen 2010). Vaimentamattoman kestopagneettitahtikoneen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Vaimentamattoman kestopagneettitahtikoneen sijaiskytkentä.

Kestomagneettikoneen toimintaa kuvaavat jännite- ja käämivuoyhtälöt

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega \psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega \psi_{sd} \end{aligned} \quad (3.1)$$

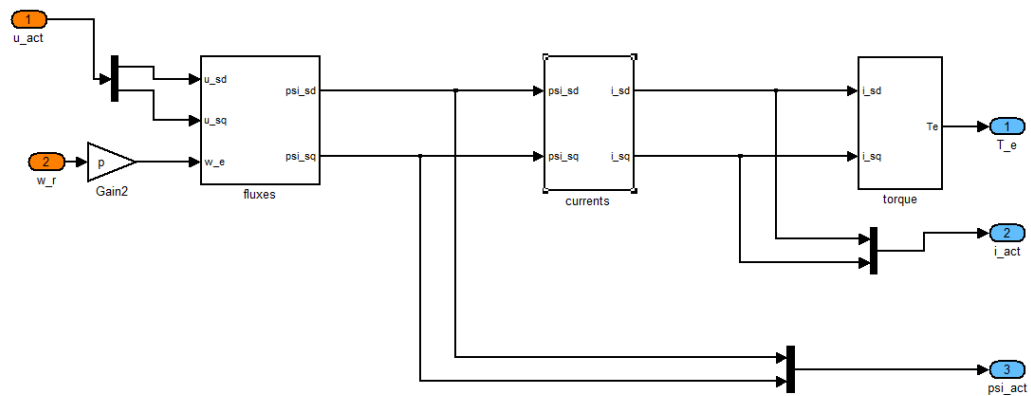
ja

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_{sd} i_{sd} + \psi_{PM} \\ \psi_{sq} &= L_{sq} i_{sq}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

missä kestopagneetin käämivuon voidaan sijaiskytkennän avulla ajatella muodostuvan kestopagneetissa sijaitsevasta vakiovirtalähteestä ja magnetointi-induktanssista sijaiskytkennän kanssa yhtälön

$$i_{PM} = \frac{\psi_{PM}}{L_{md}} \quad (3.3)$$

avulla. Sähkömoottorin Simulink-malli pohjautuu edellä esitettyihin yhtälöihin ja on käytännössä lohkokaavioesitys niistä. Kuvassa 3.4 esitettyssä mallissa sähkömoottorin yhtälöistä ratkaistaan ensin d- ja q-akselien suuntaiset staattorikämmivuokomponentit, sen jälkeen vastaavat virrat ja viimeisenä tuotettu vääntömomentti.



Kuva 3.4. Sähkömoottorin Simulink-malli. Vasemmalta oikealle ratkaistavat kokonaisuudet ovat d- ja q-akseleilla vaikuttavat kämmivuot sekä virrat ja sen jälkeen akselille tuotettu vääntömomentti.

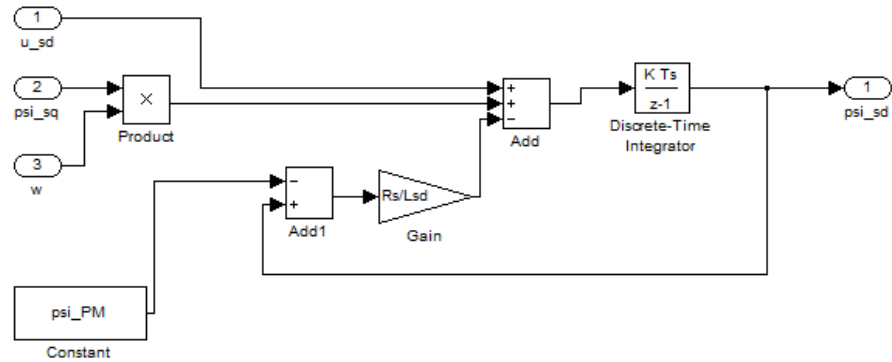
Yhtälöistä (3.1) voidaan ratkaista kämmivuot

$$\begin{aligned}\Psi_{sd} &= \int (u_{sd} + \omega \Psi_{sq} - R_s i_{sd}) dt \\ \Psi_{sq} &= \int (u_{sq} - \omega \Psi_{sd} - R_s i_{sq}) dt.\end{aligned}\quad (3.4)$$

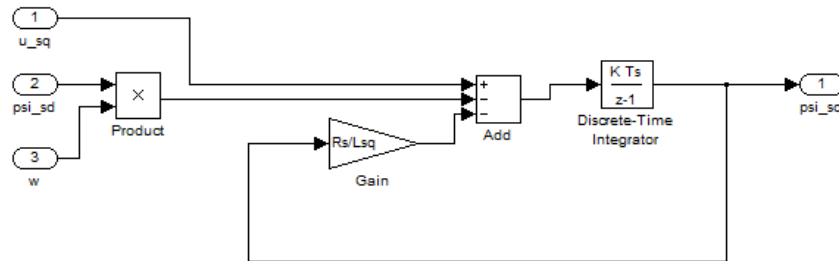
Yhtälöistä (3.2) voidaan ratkaista virtakomponentit

$$\begin{aligned}i_{sd} &= \frac{\Psi_{sd} - \Psi_{PM}}{L_{sd}} \\ i_{sq} &= \frac{\Psi_{sq}}{L_{sq}}.\end{aligned}\quad (3.5)$$

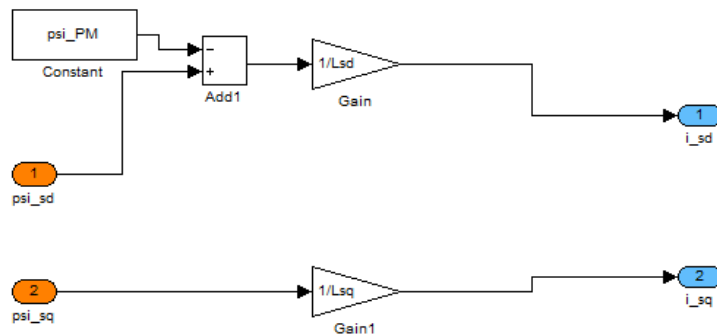
Ratkaistut virrat voidaan sijoittaa kämmivuoyhtälöihin, joten lopputuloksena kämmivoiden simulointi toteutetaan kuvissa 3.5 ja 3.6 esitettyllä tavalla. Virtojen simulointi on toteutettu kuvan 3.7 mukaisella mallilla.



Kuva 3.5. d-akselin suuntaisen käämivuokomponentin laskentalohko. Lohko toteuttaa yhtälöryhmän 3.4 ensimmäisen yhtälön.



Kuva 3.6. q-akselin suuntaisen käämivuokomponentin laskentalohko. Lohko toteuttaa yhtälöryhmän 3.4 toisen yhtälön.

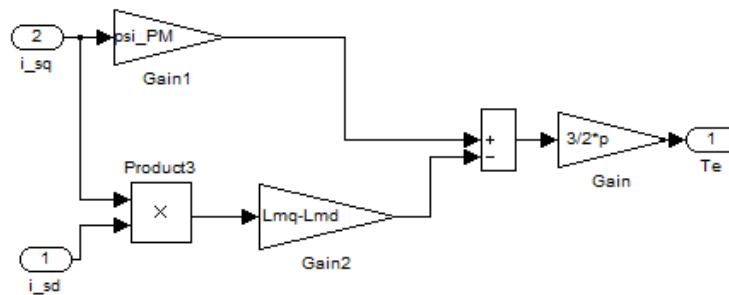


Kuva 3.7. Sähkömoottorin virran laskenta. Lohko toteuttaa yhtälöt (3.5)

Kun sähkömoottorin virrat tunnetaan, voidaan niiden perusteella ratkaista sen tuottama vääntömomentti.

$$T_e = \frac{3p}{2} (i_{sq} \psi_{PM} - (L_{mq} - L_{md}) i_{sq} i_{sd}) \quad (3.6)$$

Vääntömomentin yhtälö koostuu kahdesta osasta. Ensimmäisellä termillä lasketaan moottorin kestopagneettien käämivuon ja staattorivirran q-komponentin tulo, joka kuvaa ristikenttäväääntöä ja jälkimmäisessä koneen d- ja q-akselien induktanssien eroon perustuvaa, niin kutsuttua reluktanssivääntöä. Kuvassa 3.8 on esitetty yhtälön (3.6) mukainen simulointilohko. Moottori itsessään on mallinnettu taulukossa 3.1 esitettyjen parametrien mukaan (Pyrhönen 2010).



Kuva 3.8. Vääntömomentin laskenta. Mallin ylempi haara laskee ristikenttäperiaatteen mukaisen vääntömomentin ja alempi reluktanssivääntöä.

Taulukko 3.1. Simuloidun kestopagneettitahtikoneen parametrit

p	3
I_s	115 A
P_n	66 kW
$\cos\varphi$	0.95
f_n	100 Hz
n_n	2000 rpm
R_s	53 m Ω
L_{sd}	1.12 mH
L_{sq}	1.16 mH
Ψ_{PM}	0.418 Vs

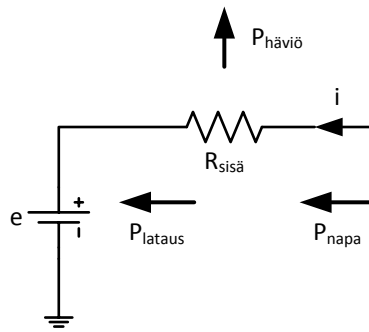
Koska kestopagneettitahtikoneen induktanssiero d- ja q-akselien välillä on pieni, on perusteltua käyttää moottorin säädössä $i_d=0$ -virtavektorisäätöä. Säädössä staat-

torivirran d-akselin suuntainen komponentti asetetaan nolaksi (reluktanssivääntömomentti jätetään huomiotta) ja q-akselin suuntainen virtaohje lasketaan suoraan vääntömomenttiohjeesta

$$i_{q,\text{ref}} = \frac{T_{\text{ref}}}{\frac{3}{2}p\psi_{\text{PM}}} \quad (3.7)$$

3.3 Energiavaraston mallinnus

Simuloidun hybridijärjestelmän energiavarastoksi on valittu tässä tapauksessa akku. Akun yksinkertainen piirimalli on esitetty kuvassa 3.9 (Alaküla 2006).



Kuva 3.9. Akun kytkentäkuva ja eri suureiden nimet. Akun napoihin tuleva teho P_{napa} jakautuu varsinaiseen lataustehoon P_{lataus} ja sisäresistanssissa kuluvaan häviötehoon $P_{\text{häviö}}$.

Tavallisesti akun lähdejännite ja sen sisäresistanssi vaihtelevat akun varaustilan, kuormittavan tehon tai lämpötilan mukaan. Jotta simulaatio säilyisi yksinkertaisena ja vähän laskentatehoa vaativana, on joitain yksinkertaistuksia tehtävä. Tässä tapauksessa oletetaan, että akun lähdejännite e ja sisäresistanssi $R_{\text{sisä}}$ pysyvät vakioina. Akun kuvan 3.9 mukainen tehon jakautuminen voidaan nyt kuvata kuormittavan virran funktiona

$$P_{\text{napa}} = (e + R_{\text{sisä}}i)i = ei + R_{\text{sisä}}i^2 \quad (3.8)$$

Yhtälön jälkimmäisessä muodossa kuvan 3.9 tehon jakautuminen näkyy selvästi. Jotta napa-, häviö- ja lataustehot voidaan laskea, täytyy kuormitusvirta ratkaista toisen asteen yhtälöstä (3.8), jolloin virraksi saadaan

$$i = -\frac{e}{2R_{\text{sisä}}} \pm \sqrt{\left(\frac{e}{2R_{\text{sisä}}}\right)^2 + \frac{P_{\text{näpa}}}{R_{\text{sisä}}}}. \quad (3.9)$$

Nyt häviöteho voidaan laskea

$$P_{\text{häviö}} = R_{\text{sisä}} i^2 \quad (3.10)$$

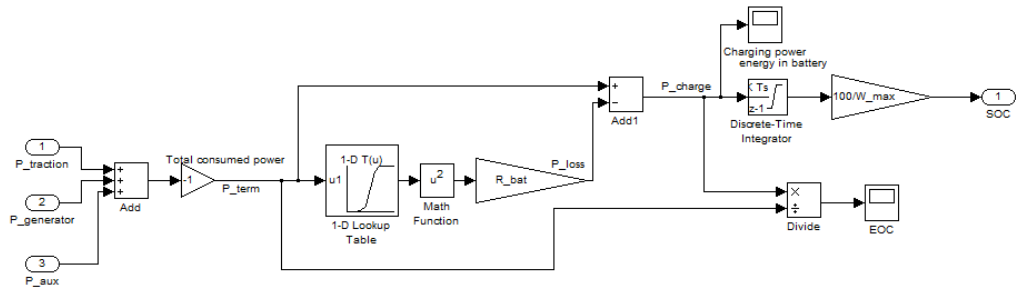
ja viimein latausteho ja lataushyötysuhde

$$P_{\text{lataus}} = P_{\text{näpa}} - P_{\text{häviö}} \quad (3.11)$$

Ja edelleen

$$\eta_{\text{lataus}} = \frac{P_{\text{lataus}}}{P_{\text{näpa}}} \quad (3.12)$$

(Alaküla 2006). Kuvassa 3.10 on esitetty yhtälöiden (3.8 ... 3.12) mukaan toteutettu simulaatiomalli. Virtayhtälön (3.9) ratkaisut on laskettu simulaation initialisointivaiheessa ja taulukoitu valmiiksi Look-Up Table-lohkoon.



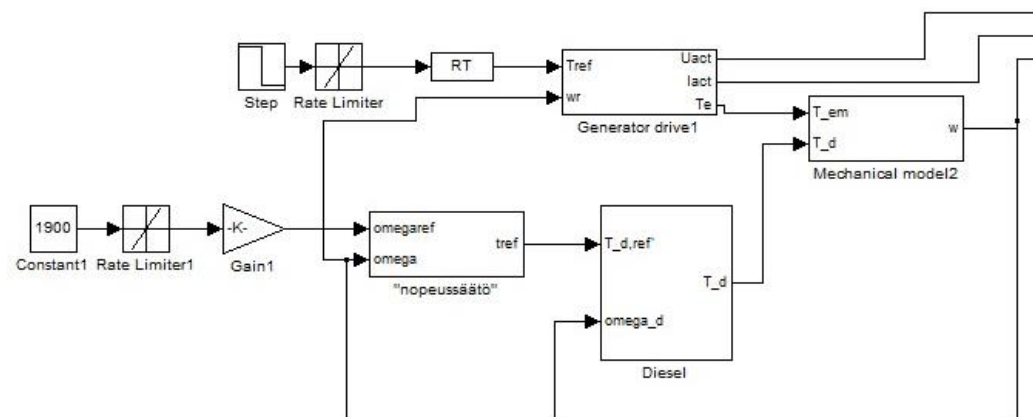
Kuva 3.10. Akun Simulink-malli. Malli on toteutettu yhtälöiden (3.8...3.12) pohjalta. Akun napoihin vaikuttava teho on summa koko järjestelmän tehoista. Kerroin -1 kääntää tehon siten, että tehon positiivinen suunta on akkuun päin, toisin sanoen positiivinen teho on aina lataustehoa. Look-Up Table-lohkolla ratkaistaan akun virta, josta saadaan edelleen akun häviöteho. Akun latausteho saadaan yhtälön (3.11) mukaan napatehon ja häviötehon erotuksena. Varsinainen energiavaraston varaustila on integraali lataustehosta.

Kuvan 3.10 akkumalli toimii siis siten, että akkua kuormittaa sitä lataavien ja purkavien komponenttien muodostama summateho. Yhtälöstä (3.9) voidaan laskea akun virta kyseisen summatehon funktiona, jolloin tehoyhtälöä (3.10) käyttäen voidaan laskea, millainen tehohäviö muodostuu akun sisäresistanssissa. Varsinai-

nen akkua lataava (tai purkava) teho muodostuu summatehon ja häviötehon erotuksesta.

3.4 Dieselmoottori ja latauspiiri

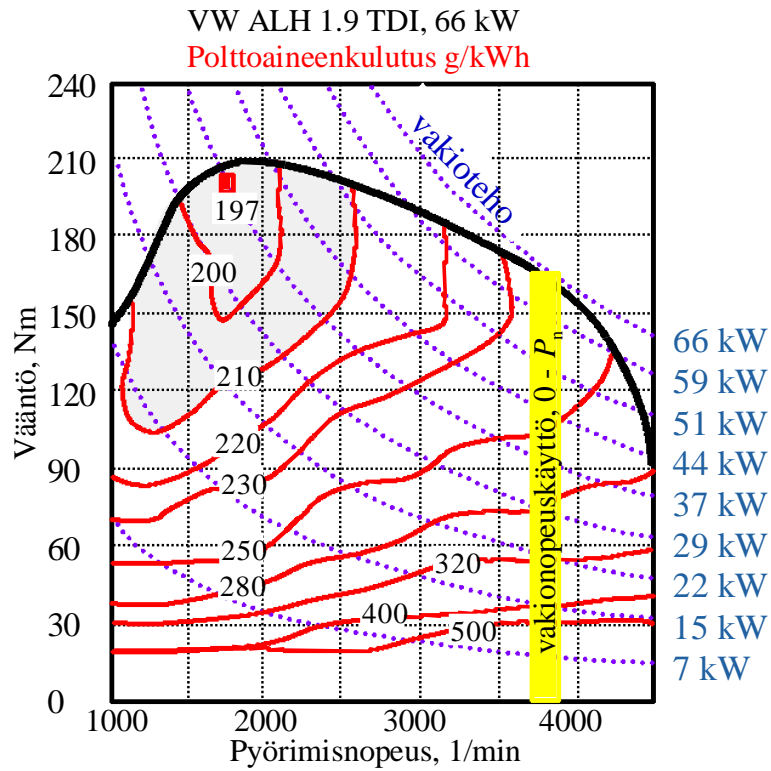
Hybridijärjestelmän latauspiiri koostuu dieselmoottorista, kestopagneettitahtigeneraattorista sekä näiden välisestä akselista. Dieselmoottorin malli on yksinkertainen dieselmoottorin toiminnan kuvaus, jossa yhden aikavakion järjestelmä seuraa vääntöohjetta. Vääntöohje rajoitetaan moottorin maksimivääntökäyrään. Malli laskee myös moottorin kuluttaman energian hyötysuhdekartan avulla. Hybridimal- lissa dieselmoottoria ajetaan vakionopeudella ja kuormittavaa kestopagneettitah- tigeneraattoria vakioväännöllä, joten latausteho on myös vakio. Kuvan 3.2 va- semmassa alareunassa näkyy dieselmoottorin ja kestopagneettigeneraattorin muodostama latauspiiri. Koneet ovat yhteydessä toisiinsa hitausmassana simu- loidulla akselilla. Dieselin säätötaso on esitetty kuvassa 3.11.



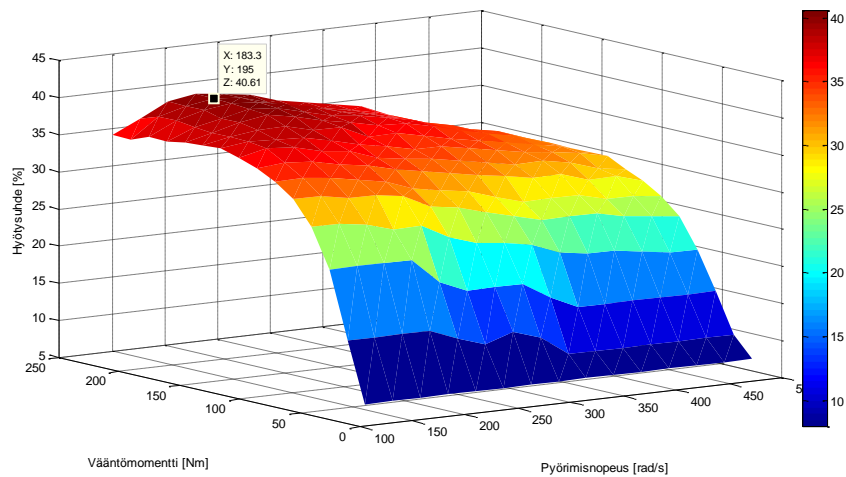
Kuva 3.11. Dieselmoottorin ja generaattorin muodostama latauspiiri. Dieselmoottorin pyörimisno- peusohje muutetaan vääntöohjeeksi PID- säätimellä. Generaattori saa vääntömomentti-ohjeen. Diesel-lohkossa lasketaan moottorin tuottama vääntömomentti ja lisäksi suoritetaan polttoaineen- kulutuslaskelma.

Dieselmootorin kulutusanalyysi on tehty puoliksi staattisella kulutussimulaatiolla, johon on korjauskertoimilla otettu huomioon moottorin transienttikulutukset. Dieselmootorilla on jokaisessa vääntömomentin ja pyörimisnopeuden määräämässä toimintapisteessä tietty hyötysuhde, joka kertoo, paljonko energiaa kuluu polttoaineeseen siihen, että akselille tuotetaan tietty määrä työtä. Hyötysuhde pätee, jos toimintapiste pysyy stabiilina eikä siten muutu. Kun otetaan huomioon myös transienttikulutus, lisätään edellä mainitulle hyötysuhteelle kerroin, joka ottaa huomioon toimintapisteen muuttumisnopeuden (Lindgren 2005) (Lindgren & Hansson 2004). Vaikka käytännössä dieselmootorin hyötysuhde- ja transienttikulutuskartat ovat moottorikohtaisia, voidaan summittaisilla kartoilla saada jonkinlainen kuva moottorin kulutuskäyttäytymisestä. Tarkemmat moottorikohtaiset kulutuskartat ovat yleensä vaikeasti saatavilla, joten jonkinlaisiin approksimoimisiin joudutaan turvautumaan.

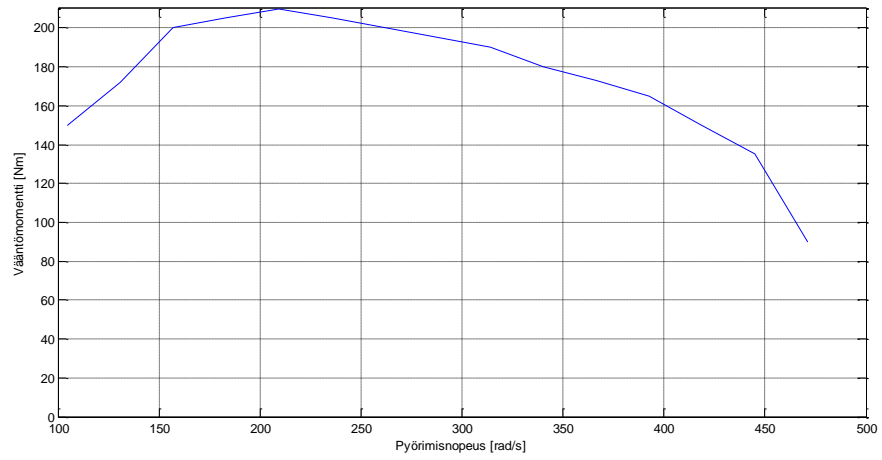
Tutkimuksessa käytetty dieselmoottori on mallinnettu käyttäen kuvassa 3.12 esitettyä kulutus- ja maksimivääntömomenttikarttaa. Simuloidun dieselmootorin maksimivääntömomenttikäyrä sekä polttoaineenkulutus on laskettu kuvan 3.12 tietojen perusteella. Kartan tiedot siirrettiin Matlab-ohjelman avulla osaksi Simulink-mallia Look-up table -lohkoksi. Hyötysuhdekartta on esitetty kuvassa 3.13 ja maksimivääntömomenttikäyrä kuvassa 3.14. Transienttikulutuksen kartat on esitetty kuvissa 3.15 ja 3.16.



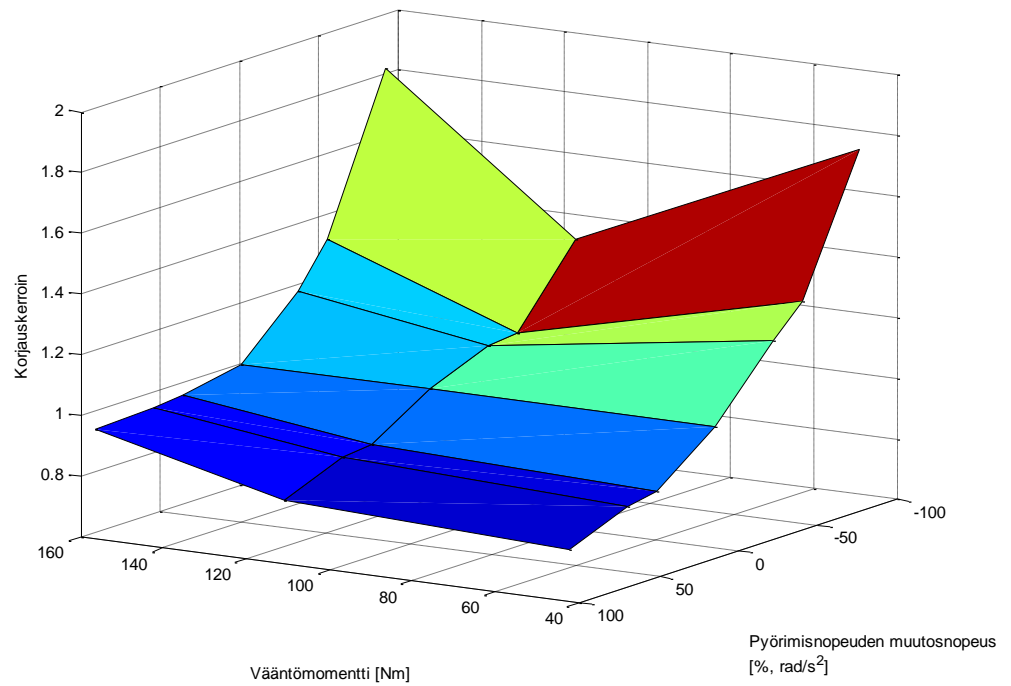
Kuva 3.12. 66kW dieselmoottorin kulutus- ja maksimivääntömomenttikartta. Kartta perustuu Volkswagenin Passat-mallin moottoriin. (modifioitu lähteestä Georgi et. al. 1997).



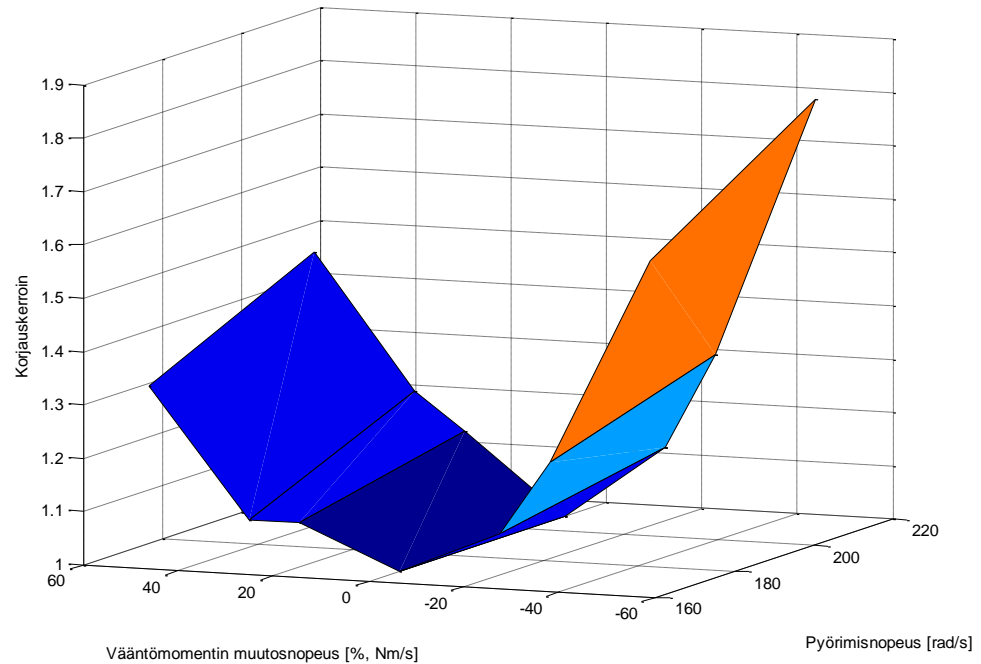
Kuva 3.13. Kuvan 3.12 pohjalta työstetty dieselmoottorin hyötysuhdekartta. Moottorin maksimihyötysuhde 40,61% saavutetaan pisteessä 183,3 rad/s, 195 Nm.



Kuva 3.14 Dieselmootorin maksimivääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona.



Kuva 3.15. Pyörimisnopeuden muutoksen huomioonottava transienttikulutuksen korjauskertoinkartta.



Kuva 3.16. Vääntömomentin muutoksen huomioonottava transienttikulutuksen korjauskertoinkartta.

Dieselmoottorin polttoaineenkulutus lasketaan sen akselitehon avulla. Vääntömomentin ja pyörimisnopeuden määrävän toimintapisteen hyötysuhteen avulla voidaan laskea puoliksi staattinen polttoainetehon tarve. Transienttikulutusanalyysiä varten lasketaan myös vääntömomentin ja pyörimisnopeuden aikaderivaatat. Transienttikulutuskalkelma antaa tuloksena kertoimen, jolla puoliksi staattista kulutusta pitää kertoa, jotta se sisältää myös toimintapisteen muuttumisen aiheuttaman tehontarpeen. Dieselmoottorin kokonaispolttoaineenkulutus saadaan lasketua tehomuodossa yhtälöllä

$$P_{\text{polttoaine}} = \frac{P_{\text{akseli}}}{\eta} \cdot [1 + (k_{dT} + k_{d\omega} - 2)] \quad (3.13)$$

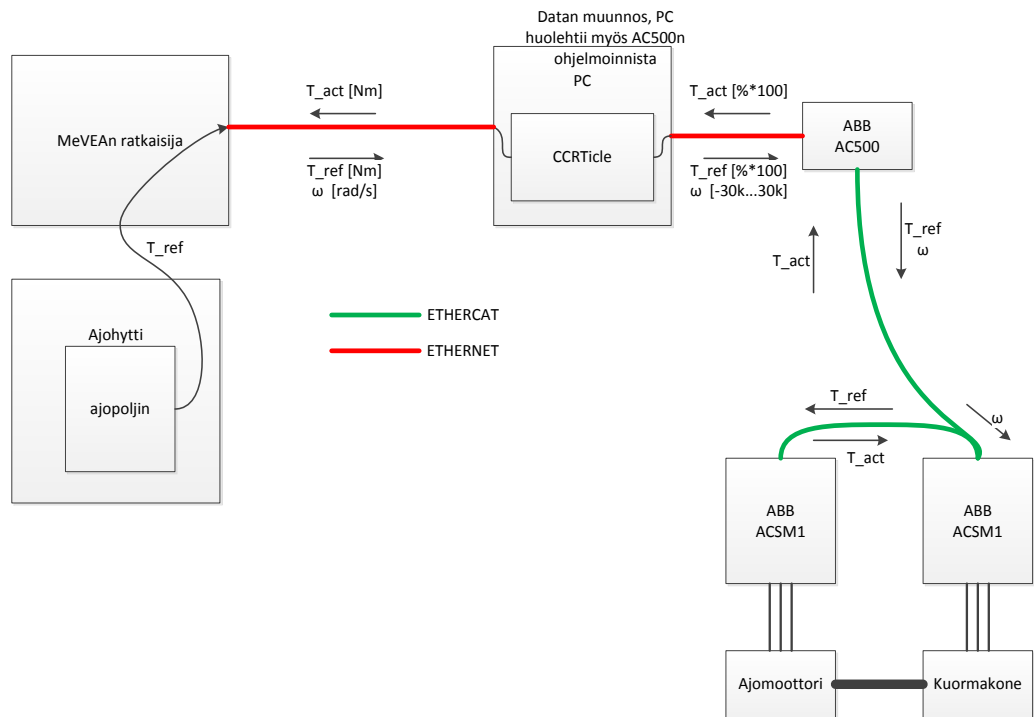
Missä $P_{\text{polttoaine}}$ on polttoaineelta vaadittava teho, P_{akseli} akseliteho, η puoliksi staattisen hyötysuhdekartan hyötysuhdearvo sekä $k_{d\omega}$ ja k_{dT} kulmanopeuden ja vääntömomentin muutosnopeudesta aiheutuvat polttoaineen kulutusta lisäävät transienttikertoimet. Transienttikertoimet saadaan kuvien 3.15 ja 3.16 kartoista. Kerroin $k_{d\omega}$ saadaan esimerkiksi kuvan 3.15 kartan avulla, kun tiedetään kulmanopeu-

den muutosnopeus tietyllä vääntömomentin arvolla. Kerroin k_{dT} toimii samoin vääntömomentin muutosnopeuden ja kulmanopeuden oloarvon suhteen. Kun polttoaineen energiasisältö tunnetaan, voidaan tehon sijasta kulutus ilmaista esimerkiksi grammoina sekunnissa.

4 HARDWARE-IN-THE-LOOP-SIMULOINTILAITTEISTO

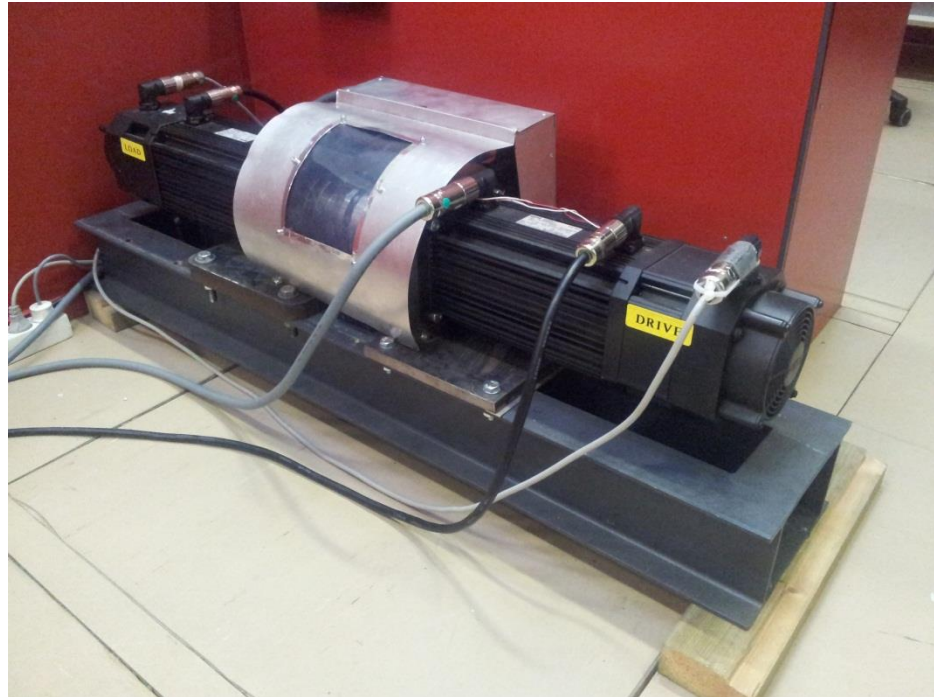
Sen lisäksi, että hybridisointitutkimusta tehdään Simulation-in-the-loop-simuloinnin avulla, tutkimusta tehdään myös hardware-in-the-loop-simulointia käyttäen. Tavoitteena on lopulta rakentaa virtuaaliseen työkonemalliin kytkettynä täydellinen hybridijärjestelmä, jossa mm.on ajomoottori, energiavarasto sekä generaattoripaketti. Tutkimus on edennyt vaiheeseen, jossa kaksi 4 kW:n oikosulkukonetta toimii kuvassa 1.9 alimman kaavion esittämällä tavalla. Toinen kone toimii kaivoslastauskoneen ajomoottorina ja toinen kuormamoottorina. On tietysti selvää, että 4 kW:n moottori on aivan liian pieni kyseisen työkonen tehontuottoon, mutta ajomoottorin vääntömomentti voidaan kertoa sopivalla kertoimella paremmin työkonen tarvetta vastaavaksi. 4 kW:n koneikko on rakennettu eräänlaiseksi välivaiheeksi ennen siirtymistä oikean kokoisiin koneisiin; nykyisen koneikon avulla järjestelmä voidaan signaalitasolla saada sellaiseen kuntoon, että siirtyminen täyteen mittakaavaan on mahdollisimman helppoa. Vastaavanlaista moottorin skaalausta on käytetty muun muassa suunniteltaessa raiteilla kulkevaa kevyttä ajoneuvoa (Liu et. al. 2009).

Hardware-in-the-Loop-laitteisto koostuu kahdesta 4 kW:n oikosulkukoneesta, jotka on kytketty samalle akselille vastakkain. Toinen koneista toimii virtuaalisen mekaniikkasimulaation mekaaniseen voimansiirtoon vaikuttavana ajomoottorina ja toinen kuormakoneena, joka välittää mekaanisen voimansiirron pyörimisnopeuden takaisin oikosulkukoneiden väliselle akselille. Molempia koneita ajetaan ABB:n ACSM1 -taajuusmuuttajilla. Muuttajien ohjaus on toteutettu kenttäväylän ja ABB AC500-logiikan avulla. Logiikka on UDP-protokollan kautta yhteydessä LUT:ssa kehitettyyn CCRTicle-rajapintasovellukseen, joka edelleen on Socket IP-yhteydellä kiinni virtuaalisimulaatiossa. Signaalitason kaavio on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Hardware-in-the-Loop-simulaatioympäristön signaalikaavio ja siirtoväylät

Kuvassa 4.2 on esitetty koelaitteistona käytetty 4 kW oikosulkumoottorikoneikko ja kuvassa 4.3 taajuusmuuttajat, logiikka ja CCRTicle-rajapintasovellusta käyttävä kannettava tietokone. Moottorien perusparametrit on taulukoitu liitteeseen 2.



Kuva 4.2. Hardware-in-the-Loop-simulaation oikosulkukoneikko, joka koostuu kahdesta vastakkain kytketystä 4 kW oikosulkukoneesta. Oikea toimii ajomoottorina ja vasen emuloi kuormaa.

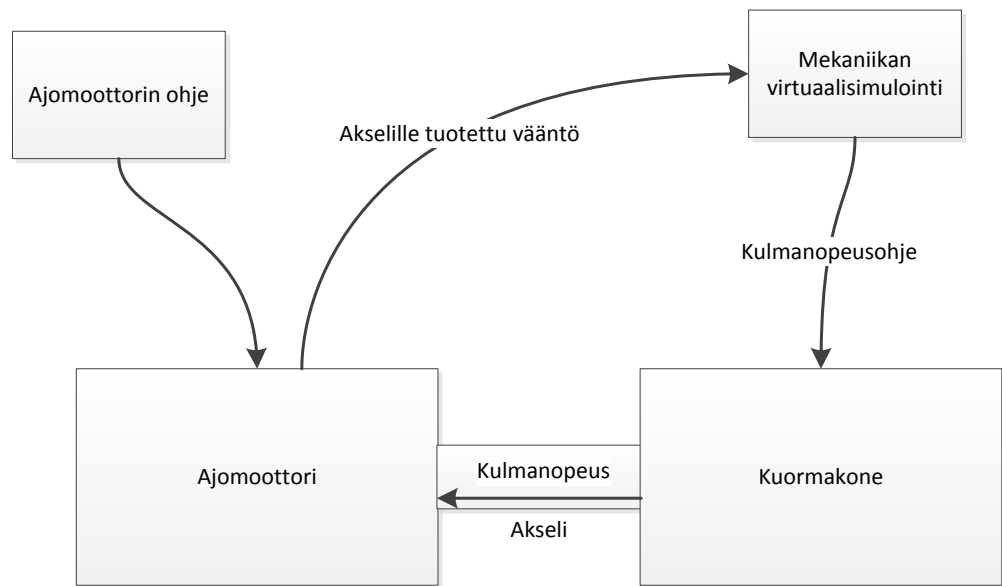


Kuva 4.3. Hardware-in-the-Loop-simulaation ACSM1-taajuusmuuttajat sekä verkkovaihtosuuntaaja, AC500-logiikka ja CCRTicle -rajapintasovellusta suorittava kannettava tietokone.

4.1 Kuormakoneen mitoitus

Jotta Hardware-in-the-loop-simulaatio saataisiin mahdollisimman tarkaksi, täytyy virtuaalisimulaation ja ajomoottorin välisen rajapinnan olla mahdollisimman virheetön. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että signaalien siirtoviive on mahdollisimman pieni ja että esimerkiksi virtuaalimallin ja ajomoottorien pyörimisnopeuksien täytyy vastata toisiaan. Koska kuormamoottorin tehtävä on välittää pyörimisnopeustieto virtuaalisen työkoneen voimansiirrosta todellisten koneiden väliselle akselille, täytyy kuormakoneen väännöntuottotarve mitoittaa oikein. Ideaalitapauksessa hardware-in-the-loop-koneikon ajomoottori kokee todellista tilannetta vastaavan kuormituksen (Rodic et. al. 2004)

Kuormakoneen oikea mitoitus muodostaa tärkeän osan virtuaalisimulaation ja todellisen ajomoottorin välisen rajapinnan toimivuudesta. Vaikka ohjelmallinen osuus rajapinnasta olisi kuinka nopea ja virheetön tahansa, voi esimerkiksi kuormakoneen liian pieni vääntömomentin tuottokyky vääristää ja tasoittaa pyörimisnopeuden käyrämuotoja ja nopeimmat piikit voivat puuttua kokonaan. Yksinkertaisesti ilmaistuna kuormakoneen täytyy siis olla mitoitettu siten, että se kykenee pakottamaan itsensä ja ajomoottorin välisen akselin pyörimään juuri sillä nopeudella kuin virtuaalisimulaatiolta tuleva pyörimisnopeusohje määrää. Kuormakoneen täytyy siis joka hetkellä kyetä tuottamaan sellainen vääntömomentti, joka kompensoi ajomoottorin tuottaman vääntömomentin ja sen lisäksi saa akselin hitausmassan pyörimään halutulla nopeudella. Kaaviokuva laitteistosta on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Hardware-in-the-Loop-simulaation signaalit. Ajomoottoria ohjataan vääntöohjeella. Ajomoottorin vääntö lähetetään mekaniikan virtuaalisimulaatiolle, joka laskee akselin pyörimisnopeuden. Pyörimisnopeus siirretään kuormakoneen välityksellä ajomoottorin akselille. Kuormakoneen täytyy voida pitää pyörimisnopeus ohjearvon mukaisena riippumatta ajomoottorin tuottamasta väännöstä.

Kuormakoneen tarvitsema vääntökapasiteetti voidaan arvioida, kun tiedetään

- Kulmanopeustieto
- Ajomoottorin tarvitsema vääntömomentin tuottokyky
- Järjestelmän hitausmassa

Laskennassa oletetaan, että ainut akselilla vaikuttava vastavääntöä tuottava tekijä on sen hitausmassa J . Nopeudesta riippuvaa kitkakerrointa B ei ole otettu huomioon. Tarkastelu lähtee liikkeelle pyörimisliikkeen perusyhtälöstä

$$T = T_L + J\alpha, \quad (4.1)$$

Jossa kuormakoneen tuottama vääntömomentti T kuluu ajomoottorin vääntömomentin T_L kompensoimiseksi ja kulmakiihtyvyyden α aikaansaamiseksi akselin hitausmassaan J .

Pyörimisnopeustiedosta voidaan laskea akselilla vaikuttava kulmakiihtyvyys erotusosamäärän avulla yhtälön

$$\alpha = \frac{\Omega(n) - \Omega(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \quad (4.2)$$

mukaisesti, jossa $\Omega(n)$ ja $t(n)$ ovat mitatun ajosyklin pyörimisnopeuden oloarvo ja vastaava aika-arvo.

Koska ajomoottorin vääntömomentti voi vaikuttaa kuormakoneen väännön kanssa joko saman- tai erisuuntaisesti, pitää olettaa, että ajomoottorin vääntömomentti vaikuttaa aina kuormamomentin toiminnan kannalta epäedullisesti. Esimerkiksi tilanne, jossa virtuaalisesti simuloitu mekaniikka hidastaa vauhtia ylämäen vaikutuksesta, mutta ajomoottori pyrkii työntämään konetta ylämäkeen. Vastaavasti täytyy olettaa, että joka hetkellä ajomoottorin tuottama vääntömomentti on maksimiarvossaan, jolloin kuormakoneen vääntömomentti on riittävän suuri aina, riippumatta ajomoottorin väännöstä. Liikeyhtälö saadaan nyt välivaiheineen muotoon

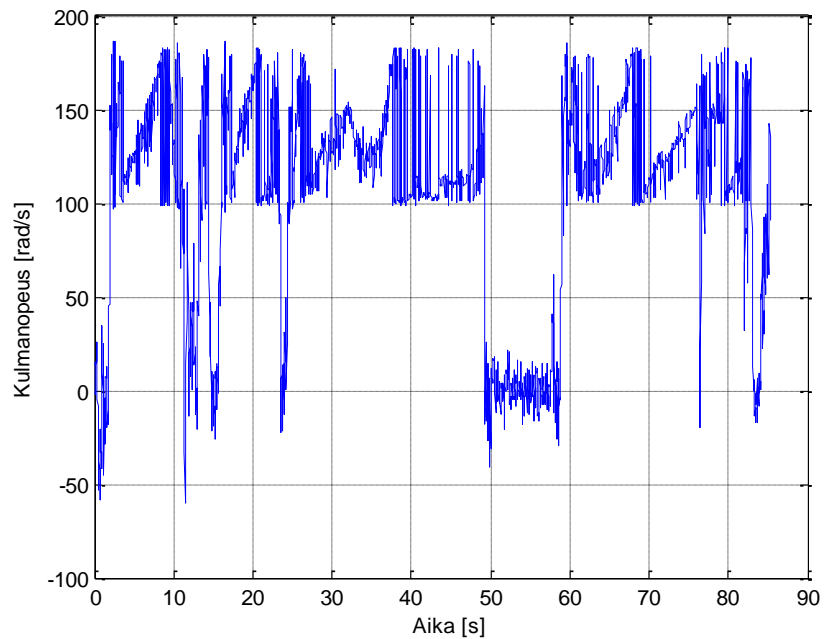
$$\begin{aligned} T - T_{L,\max} &= J\alpha = J \frac{\Omega(n) - \Omega(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \\ \Rightarrow T &= |J\alpha| + T_{L,\max} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Itseisarvon käytöllä varmistutaan siitä, että kuormakoneen vääntömomentintarve olettaa ajomoottorin vääntävän aina pyörimisnopeuden muutosta vastaan.

Kun toteutettavan Hardware-in-the-loop-simulaatiokoneikon ajomoottorin suurin mahdollinen vääntömomentintuottokyky sekä akselin hitausmassa tiedetään, voidaan kyseessä olevan työkonetyypin työsyklin pyörimisnopeustiedon avulla mitoitaa, kuinka suuri vääntömomentti kuormakoneen täytyy tuottaa, jotta ajomoottorin akseli pystyy seuraamaan virtuaalisimulaation antamaa ohjearvoa.

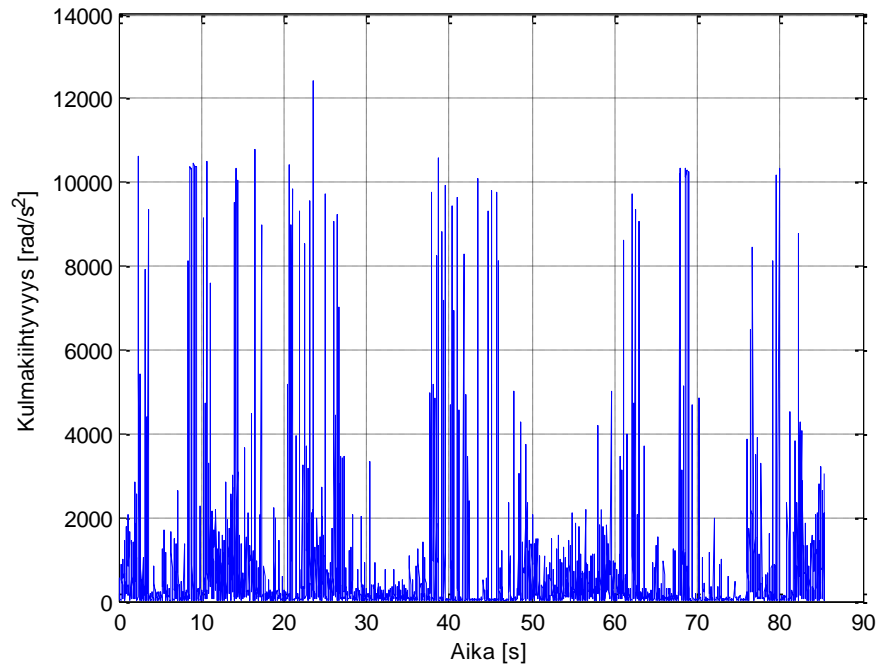
Aiheeseen liittyvä tutkimuskysymys oli määrittää kertoimeen perustuva vääntösuhde ajo- ja kuormakoneiden välille, mutta yhtälöstä (4.3) voidaan havaita, että vaikka kertoimen määrittäminen onkin mahdollista, on se käytännössä turhaa, koska tarvittava vääntö riippuu sekä ajomoottorin vääntömomentista että akselin hitaus-

massasta. Yhtälön ratkaisu on siis tapauskohtainen ja tulee ratkaista erikseen jokaiselle tapaukselle. Lähinnä kertoimen käyttö on perusteltua, jos tapauskohtaisesti halutaan verrata ajo- ja kuormamoottorien kokoja. Esimerkkinä käytetään kuvan 4.5 mukaista ajosyklin kulmanopeustietoa. Ajomoottorin maksimivääntömomentti on 500 Nm, joka on kyseisen mittauksen kokoonpanolle määritetty, koneen toimintakyvyn ylläpitämiseksi riittävä vääntömomentti.



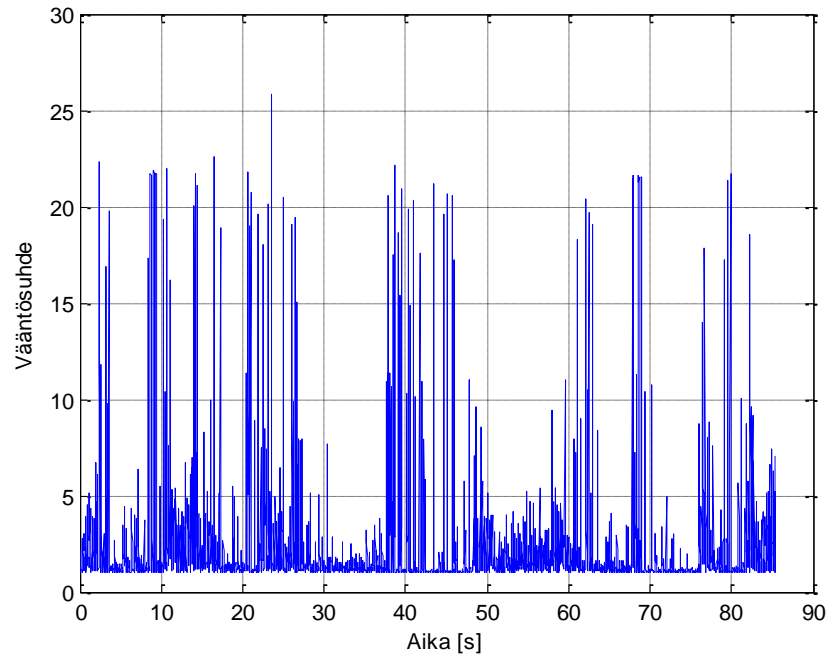
Kuva 4.5. Kaivoslastauskoneen ajosyklin kulmanopeustieto.

Kuvan 4.5 kulmanopeuskäyrästä voidaan yhtälön (4.2) avulla muodostaa kulmakiihtyvyyssä, jonka itseisarvo on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. Ajosyklin kulmakiiktyvyyskäyrän itseisarvo.

Kuvista 4.5 ja 4.6 havaitaan, että kulmanopeus- ja kiihtyvyyssiето eivät välttämättä ole suoraan käyttökelpoisia. Esimerkiksi kuvassa 4.5 esiintyvä noin 80 rad/s amplitudilta oleva hyvin nopea kulmanopeuden värinä 40 sekunnin kohdalla tuottaa todella suuria kulmakiiktyvyyden arvoja. Koska yhtälön (4.3) mukaan tämä kulmakiiktyvyyden arvo on hitausmassalla J kerrottuna suoraan verrannollinen tarvittavaan kuormamoottorin vääntömomentintuottotarpeeseen, joudutaan tällaiset nopeat, värinämaiset piikit jättämään huomiotta kuormakonetta mitoitettaessa. Yhtälöstä (4.3) saadaan lopullinen, tarvittava kuormamoottorin vääntömomentintarve. Vääntökäyrä suhteutettuna ajomoottorin maksimivääntömomenttiin on esitetty kuvassa 4.7 olettaen, että akselin hitausmassa on 1 kgm^2 .



Kuva 4.7. Esimerkkisyklin ajo- ja kuormakoneen välinen vääntömomenttisuhte.

Kuvasta 4.7. Havaitaan erityisesti kuvassa 4.5 esiintyvä kulmanopeuden värinä ja sen ilmeneminen kasvaneena väännöntarpeena kuormakoneessa: värinä tuottaa jopa 20-kertaisen vääntömomentintarpeen. Jos värinä jätetään huomiotta, voitaneen silmämääräisesti arvioida, että kuormakone tarvitsee noin 4-kertaisen eli noin 2000 Nm vääntömomentintuottokyvyn, jotta se kykenisi seuraamaan kulmanopeusohjetta. Keskiarvo kuvan 4.7 käyrästä on noin 2.2. Huomioitavaa on tosin hitausmassan vaikutus sekä se, että ajomoottorin väännön on worst-case-henkisesti arvioitu olevan aina negatiivisesti vaikuttavassa maksimiarvossa.

5 TULOKSET

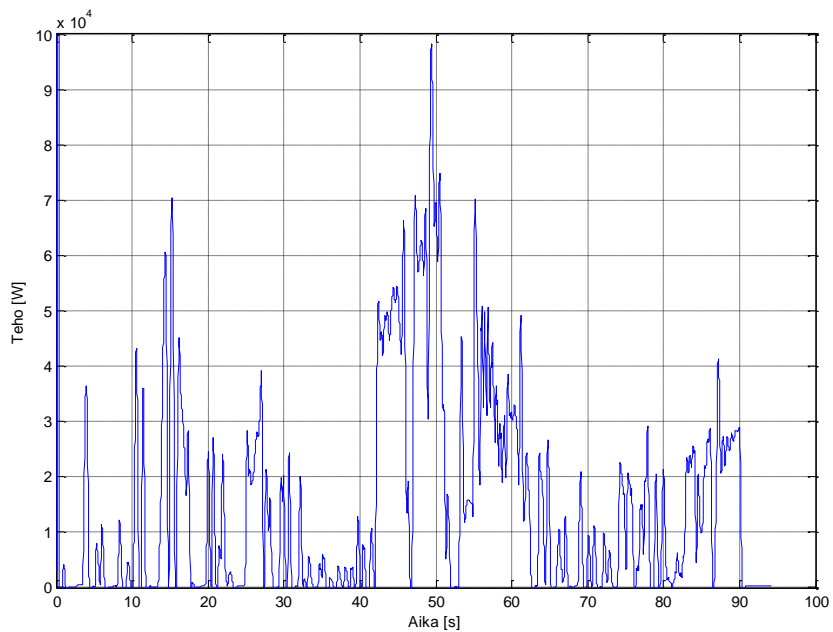
Tarkasteltavan lastaustyökoneen hybridisoinnista saavutettavia hyötyjä tutkittiin luvuissa 2-4 esitettyjen kokonaisuuksien muodostamalla erilaisilla simulaatiojärjestelmillä. Simulation-in-the-loop-simuloinnilla tutkittiin yhden ja kolmen ajomoottorin sarjahybridien polttoaineenkulutusta ja verrattiin sitä alkuperäiseen, ainoastaan dieselmoottoria voimanlähteenään käyttävään työkoneeseen. Työsyklinä käytettiin vähän yli sadan sekunnin mittaista jaksoa, jossa työkone ajetaan kivikasalle, kauha täytetään kivillä, kone ajetaan edelleen tyhjennyspaikalle, jossa kauha tyhjenetään ja lopuksi peruutetaan kone takaisin lähtöpaikkaan.

Jotta tuloksista saatiin keskenään vertailukelpoisia, jouduttiin tekemään seuraavia oletuksia:

- Koska nykyinen simulaatio-ohjelmisto ei tue sitä, että työkoneen hydraulijärjestelmän sähköinen tehonkulutus kuormittaisi sarjahybridin Simulink-mallin energiavarastoa, lisättiin energiavarastoon ylimääräinen vakiotehokuorma. Kuorma laskettiin keskiarvona ajosyklin hydraulijärjestelmän tuottamasta kuormituksesta. Keskimääräisellä tehonkulutusarviolla voidaan arvioida hyvin dieselgeneraattorin lataustehon tarve, koska keskimäärin akkua kuormitetaan todellista vastaavalla teholla. Jatkotutkimusta ajatellen on kuitenkin tärkeää saada hetkellinen hydrauliteho mukaan simulaatioon, koska akun hetkittäiskuormitus on todellisuudessa suurempi kuin keskimääräisellä hydrauliiikan tehonkulutuksen arviolla.
- Perinteisen työkoneen dieselmoottori on mallinnettu hyvin yksinkertaisesti, eikä siitä ollut saatavilla polttoaineenkulutustietoa. Polttoaineenkulutus laskettiin soveltaen luvun 3.4 hyötysuhdekarttaa ja transienttikulutusta siten, että moottorin vääntömomentti- ja pyörimisnopeusalueet skaalattiin vastaamaan käytettyä moottoria.

Hydraulijärjestelmän voimanlähteenä käytettiin sarjahybridityökoneissa toista dieselmoottoria, jonka kuormitus ei näy sarjahybridimallissa. Hydrauliiikan tehonkulutus voitiin tallentaa MeVEAn ratkaisijasta, jonka jälkeen siitä voitiin laskea keskimääräinen teho ja näin saada myös hydrauliiikka kuormittamaan sarjahybridia, ainakin välillisesti. Keskimääräinen tehonkulutus toimii karkeana arviona

siitä, kuinka akku voisi todellisessa tilanteessa kuormittua. Hydrauliiikan tehonkulutus käytetyllä työsykllillä on esitetty kuvassa 5.1. Laskennallisesti saatu keskiarvo oli noin 16 kW. Tämä menettely on välivaihe tutkimuslaitteiston kehityksessä ja kuuluu seuraaviin jatkokehityskohteisiin. Tulevaisuudessa hydraulijärjestelmän tehonkulutusta käsitellään hetkellistehona.

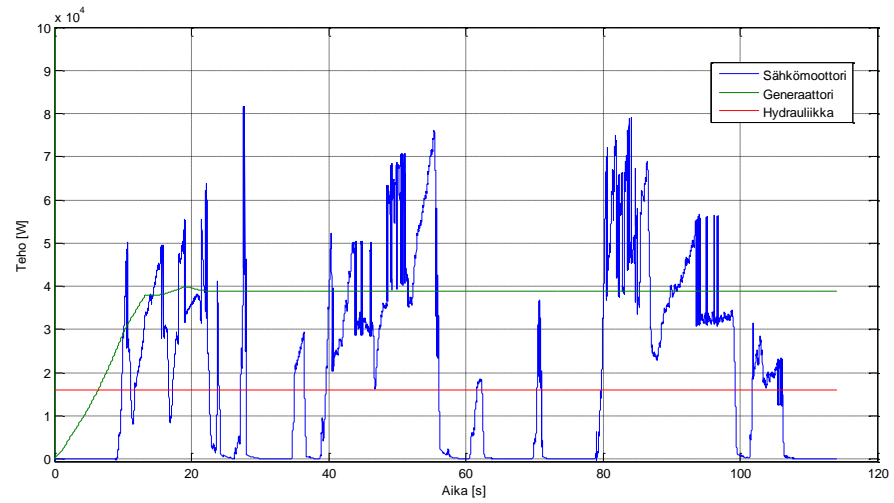


Kuva 5.1. Hydrauliiikan tehonkulutuksen arviolaskelmassa käytetty tehokäyrä. Keskiarvo on noin 16 kW.

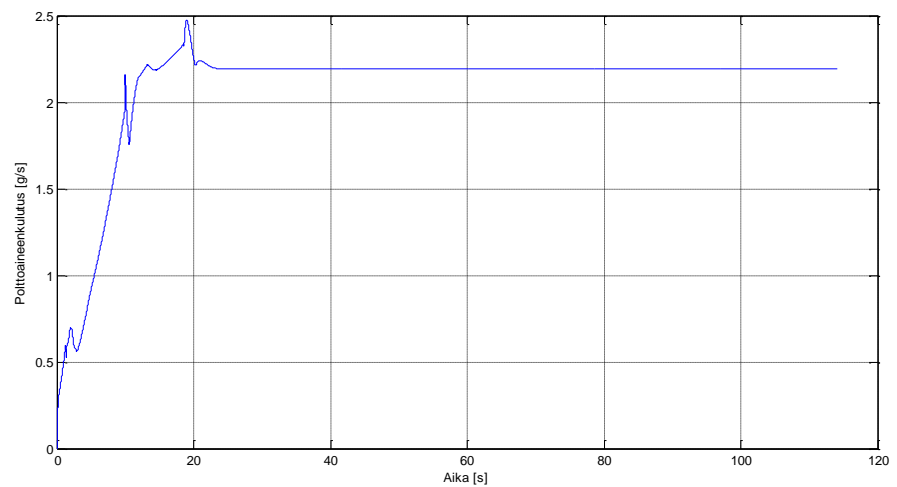
Kuten kuvasta 5.1 nähdään, hydrauliiikan hetkellinen tehontarve on huomattavasti suurempi kuin keskimääräinen 16 kW. Lähes 100 kW piikkiteho kuormittaisi akkua selkeästi eri tavalla kuin käytetty keskitehoarvio.

5.1 Case: Yhden ajomoottorin sarjahybridi

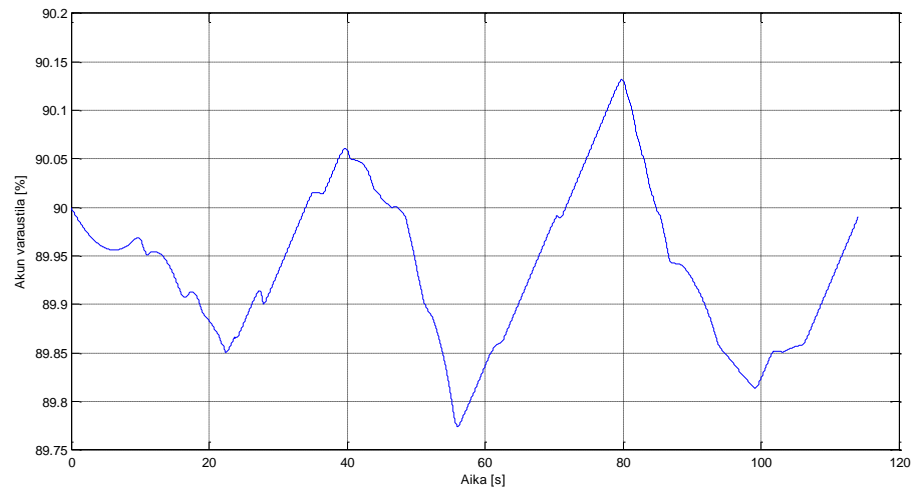
Yhden ajomoottorin sarjahybridilastauskoneen ajosykli on esitetty kuvissa 5.2...5.4. Kuvassa 5.2 on esitetty tehonkulutus- ja -tuottojakauma, kuvassa 5.3 dieselgeneraattorin kulutuslaskelma ja kuvassa 5.4 akun varaustila.



Kuva 5.2. Yhden ajomoottorin sarjahybridikaivoslastauskoneen tehonkulutus ja -tuotto. Kuvassa on esitetty ajomoottorin kuluttama teho, dieselgeneraattorin latausteho sekä hydraulijärjestelmän arvioitu tehonkulutus



Kuva 5.3 Dieselgeneraattorin kulutuslaskelma grammoina sekunnissa. Koska generaattoria ajetaan vakio toimintapisteessä, sen tuottama tehokin on vakio. Työjaksona luvun alussa kuvattu sykli.



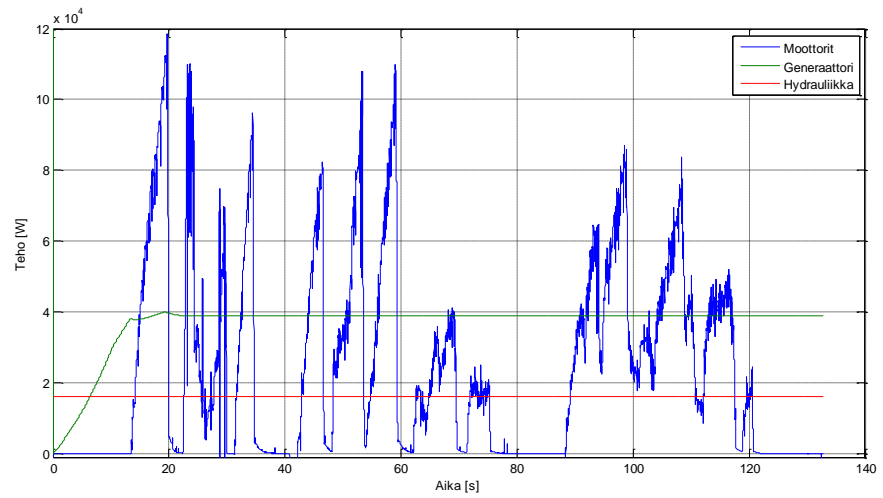
Kuva 5.4 Akun varaustila työsyklin ajalta. Kun sähkömoottorin kuluttama teho laskee alle dieselgeneraattorin tuottaman tehon, akun varaustila alkaa nousta.

Kuvasta 5.4 voidaan huomata, että toteutetun sarjahybridin energiavaraston varaustila palautuu ajosyklin lopussa lähes alkuarvoonsa, n. 90 prosenttiin. Tästä voidaan päätellä, että dieselgeneraattorin teho on riittävä ylläpitämään jatkuvaa työskentelyä; sen tuottama teho vastaa keskimäärin työsyklissä vaadittavaa tehoa. Kuvasta 5.2 nähdään työsyklin dynaaminen luonne. Sähkömoottorin maksimiteho käy hetkellisesti jopa 80 kW:ssa asti, mutta dieselgeneraattori käy jatkuvasti hieman alle 40 kW:n teholla.

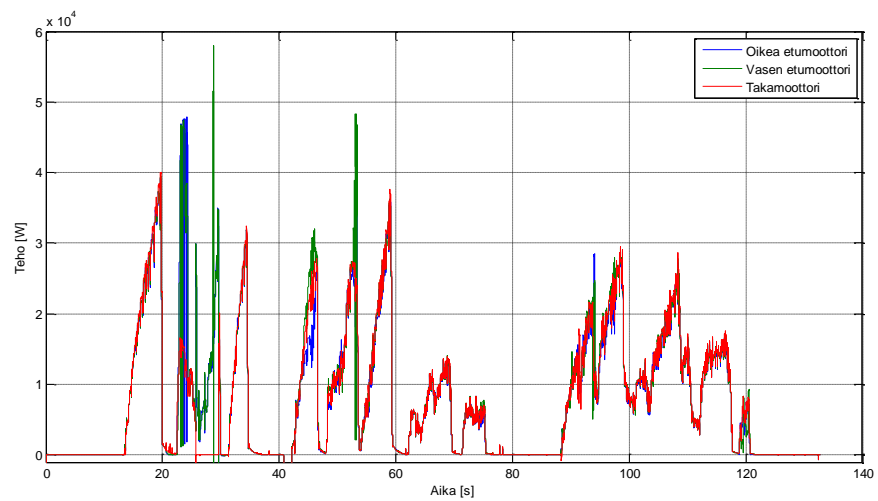
Dieselgeneraattorin vakiona pysyvä kuormituspiste (1900 kierrosta minuutissa, 200 Nm) tuottaa vakaan polttoaineenkulutuksen; kun generaattori saavuttaa toimintapisteensä, kulutuskäyrä asettuu noin 2,2 g/s arvoon. Kokonaisuudessaan työsyklissä kului polttoainetta 238 g.

5.2 Case: Kolmen ajomoottorin sarjahybridin

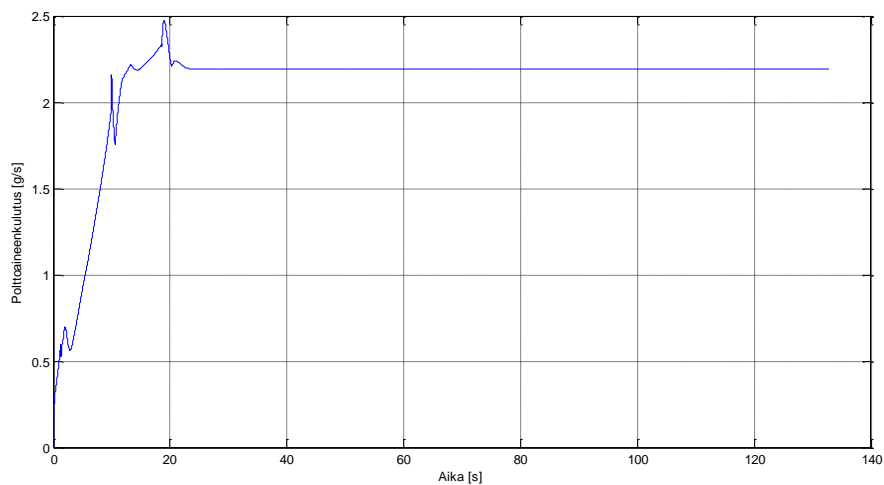
Kolmen ajomoottorin sarjahybridilastauskoneen vastaava ajosykli on esitetty kuvissa 5.5...5.8. Kuvassa 5.5 on esitetty ajovoimansiirron ja hydraulikan kuluttamat tehot sekä generaattorin tuottama teho. Kuvassa 5.6 on eritelty kaikkien kolmen ajomoottorin tehonkulutus. Kuvat 5.7 ja 5.8 esittävät generaattorin polttoaineenkulutuksen sekä energiavaraston varaustilan.



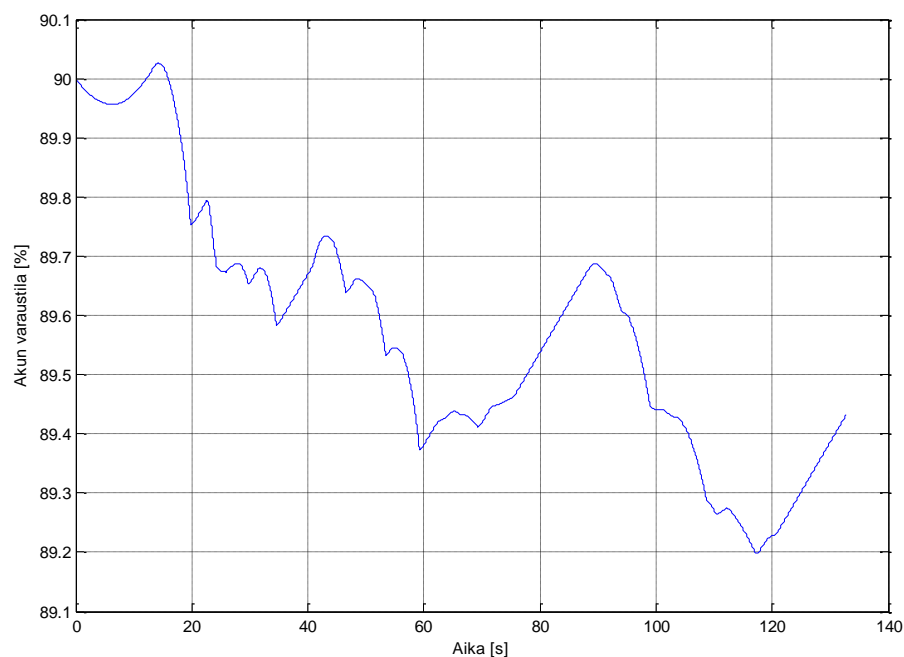
Kuva 5.5. Kolmen ajomoottorin sarjahybridikaivoslastauskoneen tehonkulutus ja -tuotto. Kuvassa on esitetty ajomoottorien kuluttama kokonaisteho, dieselgeneraattorin latausteho sekä hydraulijärjestelmän arvioitu keskimääräinen tehonkulutus



Kuva 5.6. Kolmen ajomoottorin sarjahybridikaivoslastauskoneen yksittäisten moottorien tehot.



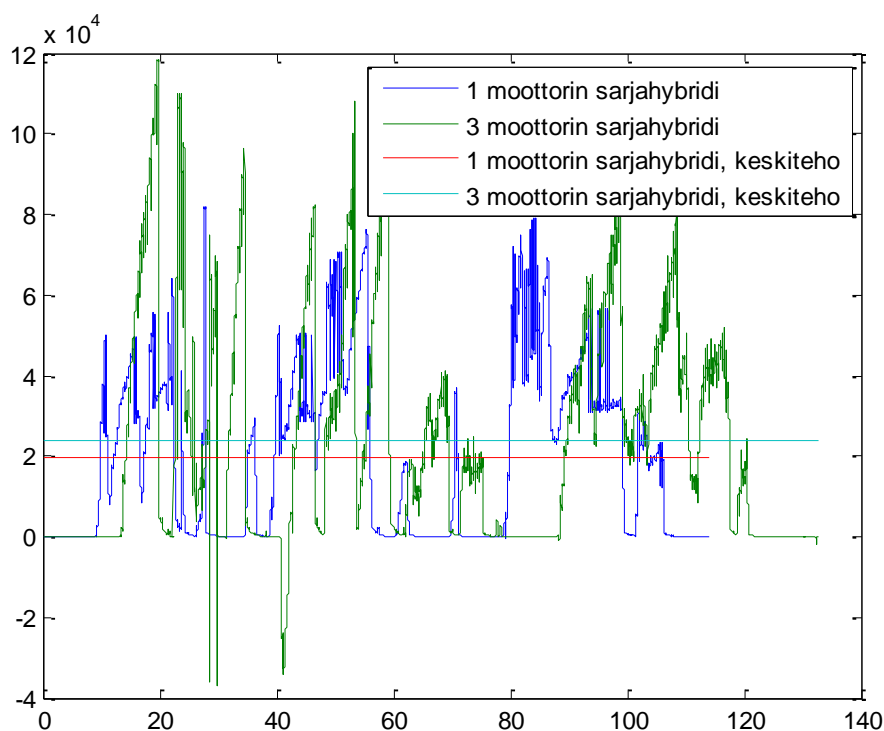
Kuva 5.7 Dieselgeneraattorin kulutuslaskelma grammoina sekunnissa. Koska generaattoria ajetaan vakio toimintapisteessä, sen tuottama tehokin on vakio. Työjaksona luvun alussa kuvattu sykli.



Kuva 5.8 Akun varaustila työsyklin ajalta. Varaustila jää syklin lopussa hieman alle lähtötason.

Edellä esitetyistä kuvista voidaan huomata selkeä ero yhden ajomoottorin sarjahybridilastauskoneeseen. Hetkellinen ajovoimansiirrossa kuluva teho nousee jopa 120 kW:iin asti, mikä näkyy myös akun varaustilassa selvänä alenemana; varaustila ei pääse työsyklin lopussa takaisin lähtöarvoonsa. Suurempi kokonaisteho on seurausta yhden ajomoottorin tapaukseen verrattuna erilaisesta voimansiirtoraken-

teesta; koska mekaaninen voimansiirto ei esimerkiksi sisällä moniportaista vaihteistoa, joudutaan sähkökoneiden vääntömomenttiohje ja alennusvaihde mitoittamaan siten, että toisaalta vääntömomentti on riittävä ja toisaalta koneen maksiminopeus ei ole liian alhainen. Erilaisella vääntömomenttiohjeella koneen pyörimisnopeus nousee helposti ylös, mikä aiheuttaa luistoa sekä häviöitä, jolloin (etenkin kokemattoman kuljettajan käytössä) moottorien teho nousee huomattavasti. Hetkellinen tehopiikki kuormittaa raskaasti akkumallia, jonka maksimiteho oli alun perin mitoitettu 100 kW:iin. Tehopiikkejä aiheutuu moottorien liian yksinkertaisesta ohjauksesta. Perustilassa kaikkia moottoreita ajetaan samalla vääntömomenttiohjeella, jolloin yhden renkaan pidon heiketessä sen teho nousee nopeasti maksimitehoon, jota rajoittaa pelkästään moottorin nopeusraja. Ilmiötä pyrittiin lieventämään lisäämällä erityisesti vääntöä vaativiin tilanteisiin (kauhan työntäminen kivikasaan) erillinen toimintamoodi, joissa eturenkaiden vääntömomenttiohje tuplattiin ja samalla takamoottorille ei annettu vääntömomenttiohjetta. Monimoottorijärjestelmä vaati ehdottomasti luistoneston toteuttamista, jotta monimoottorikäytöstä saadaan sen periaatteessa tarjoamat edut esille. Kuva 5.9 esittää erityisesti tätä tehopiikkiongelmaa.



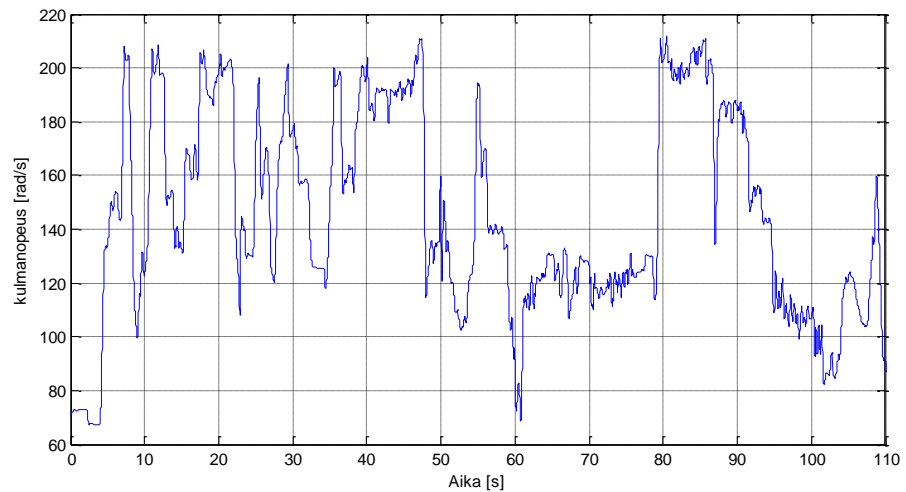
Kuva 5.9. Tehovertailu yhden ja kolmen ajomoottorin sarjahybridityökoneen välillä. Kolmen ajomoottorin ajomoottorien osittain tarpeettomat tehoiikit erottuvat selvästi. Lisäksi keskiteho on kolmen ajomoottorin tapauksessa suurempi ja sykli pidempi. Tämä johtunee siitä, että moottorien hallintajärjestelmä on mallissa osin kehittymätön ja jatkotutkimuksen aihe.

Mallin toimivuuden kannalta selkeitä jatkokehitysalueita olisi esimerkiksi akkumallin kehittäminen vastaamaan paremmin syklissä ilmenevää tehoaluetta ja moottorien ohjauksen suunnittelemine uudelleen. Lisäksi vaihteiston lisääminen etupyörille voisi parantaa mallin suorituskykyä. Jonkinlaisella luistonestojärjestelmällä renkaan luistamisesta aiheutuvat tehoiikit todennäköisesti saataisiin kuriin.

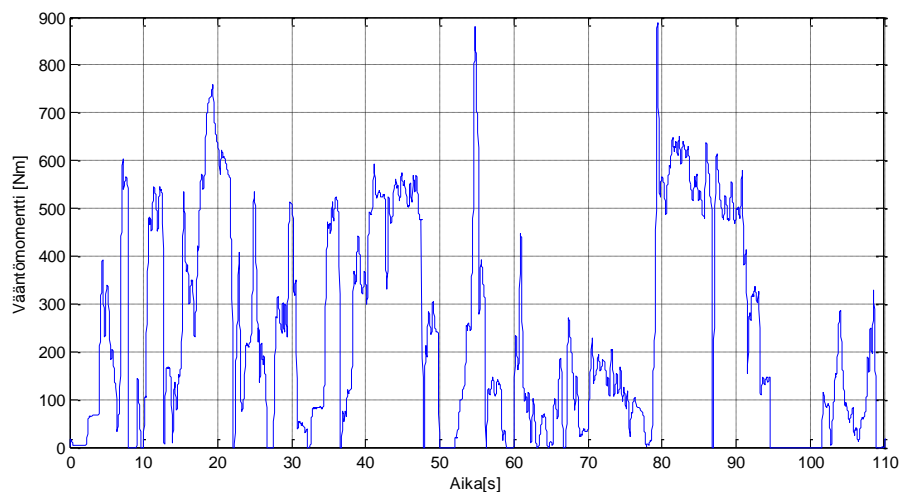
Kolmen ajomoottorin lastauskoneen generaattoripaketti toimii samassa toimintapisteessä kuin yhden ajomoottorinkin, joten kulutuslukema asettuu samaan, noin 2,2 g/s arvoon. Moottorien yksinkertaisen ohjauksen takia työsyklin ajamisessa kesti kuitenkin hieman kauemmin, joten kokonaiskulutuskin on suurempi, noin 279 g.

5.3 Case: Alkuperäinen dieselyökone

Perinteisellä, pelkästään dieselmoottoria voimanlähteenään käyttävällä kaivoslastauskoneella ajetun työsyklin kulutus vaati luvussa 3.4 esitetyn kulutuslaskelmallin muokkausta, sillä dieselin koko ei vastannut kuvan 3.12 VW Passatin moottoria, jonka hyötysuhdekarttaa käytettiin, eikä moottorin toimintapisteen tietoja voitu myöskään siirtää reaaliaikaisesti Simulinkiin. Kulutuslaskelmaa varten ajettiin ajosykli, jonka dieselmoottorin pyörimisnopeus- ja vääntötiedot tallennettiin tekstitiedostoon, jonka jälkeen ne voitiin siirtää datavektoreiksi Simulinkiin. Kulutuskartta sovitettiin eri tehoalueella toimivalle dieselille skaalaamalla vääntö- ja pyörimisnopeusakselit tallennetun mittausdatan maksimiarvojen mukaan. Käytetty hyötysuhdekartta on siis sama, mutta sen akselit skaalattiin siten, että pyörimisnopeusakseli tyhjäkäynnistä maksiminopeuteen sekä vääntömomenttiakseli ovatkin diesellastauskoneen moottorin mukaiset. Ajosykli pyrittiin pitämään mahdollisimman samana kuin hybridiverisioilla. Käytetty voimansiirto on käytännössä sama kuin yhden ajomoottorin sarjahybridilastauskoneella. Kulmanopeus- ja vääntömomenttikäyrät on esitetty kuvissa 5.10 ja 5.11.

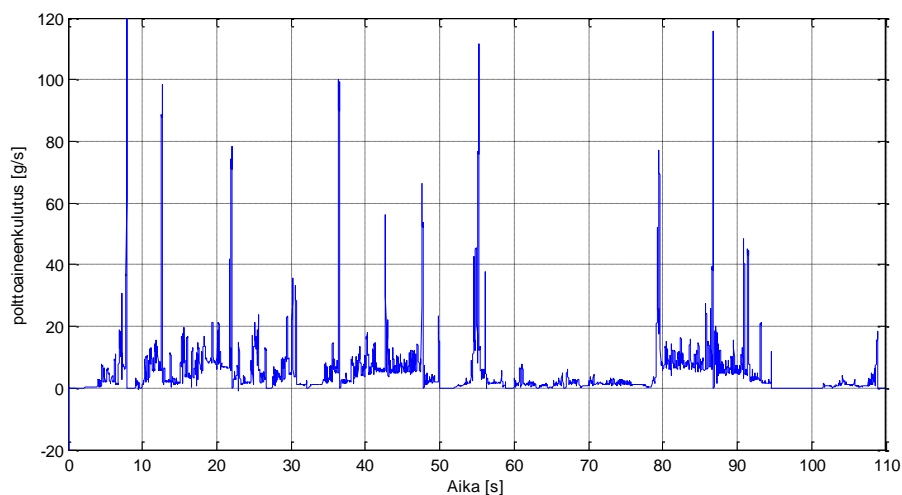


Kuva 5.10. Diesellastauskoneen kulmanopeuskäyrä yhdeltä ajosykliltä.



Kuva 5.11. Diesellastauskoneen vääntömomenttikäyrä yhdeltä ajosykliltä.

Dieselin kulutuslaskelmaa varten malli viritettiin siten, että dieselmoottorin maksimivääntömomentti on 1050 Nm ja kulmanopeusalue (tyhjäkäynnistä maksiminopeuteen) 68-216 rad/s. Lisäksi vääntökäyrää rajoitettiin siten, että se ei voi saada negatiivisia arvoja. Hetkellinen kulutus on esitetty kuvassa 5.12.



Kuva 5.12. Dieselmoottorin polttoaineenkulutus. Aikaisemmista kulutuskäyristä poiketen kulutus vaihtelee jatkuvasti.

Kuvan 5.12 dieselmoottorin kulutuskäyrä eroaa huomattavasti aiemmin esitetystä hybridiversioiden kulutuskäyristä. Koska dieselmoottori ottaa vastaan kaikki kuormituksessa tapahtuvat dynaamiset muutokset, sen toimintapiste muuttuu koko ajan. Toimintapisteen muutos aiheuttaa myös transienttikulutusta. Integroimalla

kuvan 5.12 kulutuskäyrä saadaan suoraan ajosyklin aikana kuluneen polttoaineen massa, joka on noin 545 grammaa. Mikäli transienttikulutus jätetään huomiotta, jää kokonaiskulutus noin 363 grammaan. Kokonaiskulutuslukemat on koottu taulukoon 5.1.

5.4 Tulosten analyysi

Hybridityökoneiden ja perinteisen dieselyökoneen polttoaineenkulutus testiajosyklillä on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Simuloitujen ajosykliden kokonaiskulutukset eri työkoneilla.

	Kulutus yhdellä syklillä	Suhteellinen osuus, verrattuna puoliksi staattiseen	Syklin pituus, noin
Perinteinen diesel, puoliksi staattinen	363 g	100 %	110 s
Perinteinen diesel, puoliksi staattinen malli lisättynä transienttikulutusmallilla	545 g	150 %	110 s
Yhden ajomoottorin sarjahybridi	238 g	66 %	110 s
Kolmen ajomoottorin sarjahybridi	279 g	77 %	130 s

Taulukon 5.1 arvoja analysoimalla tulokset ovat selkeät; vaikka transienttikulutusanalyysi jätettäisiin huomiotta, hybridisointi laskee simulointien perusteella kaivoslastauskoneen polttoaineen kulutuksen jopa kahteen kolmasosaan. Jos transienttikulutusmalli otetaan huomioon, pienenee kulutus toteutetun tutkimuksen perusteella parhaimmillaan jopa 56 prosenttia. Hybridityökoneilla ajatut työsyklit olivat keskenään hieman erimittaiset. Siinä missä yhden moottorin sarjahybridiltä kului sykliin noin 110 sekuntia, meni kolmen ajomoottorin sarjahybridiltä noin 130 sekuntia. Tämä ei merkitse sitä, että koneesta tulisi näin ollen huonompi vaan sitä, että se tarvitsee nyt toteutettua järjestelmää kehittyneemmän ohjauksen. Kolmen moottorin hybridi on toistaiseksi huonosti hallittavissa esim. luistoneston puuttuessa. Sarjahybridien polttoaineenkulutuksien ero johtuu kauemmin kestäneestä syklistä; dieselgeneraattori oli kolmen ajomoottorin työsyklillä yksinkertai-

sesti kauemmin päällä joten polttoainettakin kului enemmän. Koneiden älykkäämmällä ohjauksella kolmen ajomoottorin sarjahybridityökoneen työsykliä saataisiin nopeammaksi. Korostetaan vielä, että nämä syklit ovat diplomityöntekijän itsensä ajamia vertailusyklejä, joissa suorituskyky riippuu kokemattoman kuljettajan taidoista. Ammattikuljettajaa ei ollut tässä vaiheessa käytettävissä.

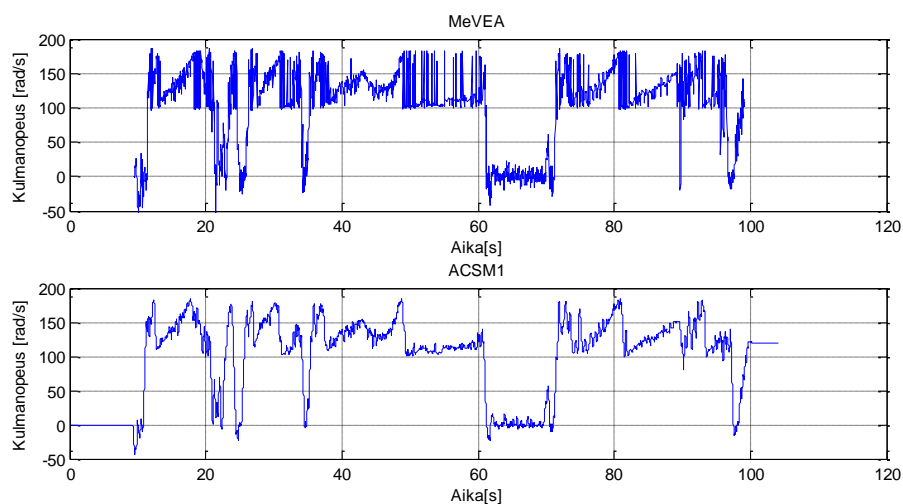
Edellä esitettyjen simulointitulosten perusteella (sarja-)hybridisoinnilla saavutetaan selkeä etu verrattuna perinteiseen dieselyökoneeseen. Polttoaineenkulutuksen vähentäminen ja dieselmoottorin maksimitohon alentuminen ovat merkittävät tekijät taloudellisemman työkoneen ja sen toimintaympäristön saavuttamiseksi (kaivoksen tuuletus). Huomattavaa on tosin myös se, että sarjahybridisoitua työkoneita on huomattavasti helpompi ajaa kuin dieselyökoneita; moottorin sammumisesta ei esimerkiksi tarvitse huolehtia lainkaan. Hybridityökoneisiin verrattuna haastavampi ajettavuus todennäköisesti nostaa dieselyökoneen kulutusta, ainakin kokemattoman kuljettajan käsissä. Huomattavaa on myös se, että hybridityökoneiden simulaatiomalleissa ei tällä hetkellä vielä ole minkäänlaista liike- tai potentiaalienergiaa talteenottavaa järjestelmää, joka voi entisestään alentaa hybridityökoneiden polttoaineenkulutusta.

5.5 Hardware-in-the-Loop-järjestelmä

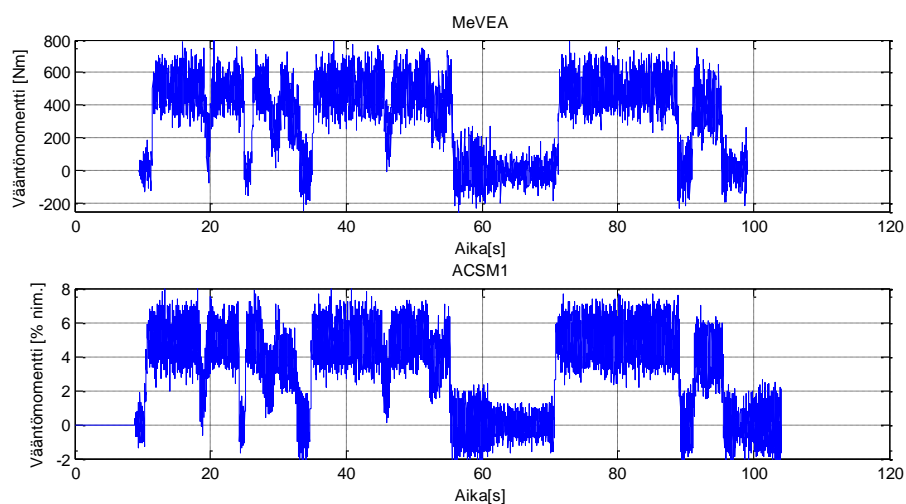
Hardware-in-the-loop-järjestelmä toimii signaalitasolla kuva 4.1 tavoin. Oikosulkumoottorikoneikon ns. ajava moottori toimii vääntömomenttilähteenä, jonka tuottama vääntömomentti siirretään virtuaaliseen työkonemalliin. Malli laskee, kuinka järjestelmä reagoi kyseiseen vääntömomenttiin. Paluarvona virtuaalisimulaatio antaa pyörimisnopeuden, jolla ajavan moottorin akselin tulisi pyöriä. Pyörimisnopeustieto lähetetään ajavan moottorin kanssa samalle akselille kytketylle kuormakoneelle, joka pakottaa koneiden väliselle akselille virtuaalisimulaation ohjeistaman pyörimisnopeuden.

Hardware-in-the-loop-simulaation toimiva signaaliyhteys voidaan osoittaa kuvien 5.13 ja 5.14 avulla. Kuviin on piirretty kulmanopeus- ja vääntömomenttikäyrät toisaalta mitattuna ajavan moottorin oloarvoina (ACSM1) ja toisaalta virtuaalisen

työkonemallin mekaanisesta voimansiirrosta (MeVEA). Hardware-in-the-loop-simulaation ajosykli on samanlainen edeltävien mittausten kanssa.



Kuva 5.13 Hardware-in-the-loop-simulaation kulmanopeuskäyrät. Ylempänä työkonteen virtuaalimallin voimansiirrosta tallennettu kulmanopeus ja alempana oikean sähkömoottorilta resolverin avulla mitattu kulmanopeus.



Kuva 5.14. Hardware-in-the-loop-simulaation vääntömomenttikäyrät. Ylempänä työkonteen virtuaalimallin voimansiirrosta tallennettu vääntömomentti ja alempana oikean sähkömoottorin taajuusmuuttajan estimoima. ACSM1 -taajuusmuuttajan vääntömomenttikäyrä on esitetty prosentteina nimellisestä vääntömomentistä (10.8 Nm).

Edellä olevat kuvat osoittavat, että hardware-in-the-loop-simulaatiolaitteisto toimii signaalitasolla siten, että vääntömomentti- ja kulmanopeustieto siirtyvät virtuaalisen ja reaali maailman välillä ja että oikean sähkömoottorin vääntömomentti on siirrettävissä virtuaalimallin käyttämään muotoon. Kuvasta 5.13 huomataan, että pyörimisnopeus pysyy suurin piirtein samana molemmissa käyrissä mutta kaikkein nopeimpia muutosnopeuksia moottorit eivät kykene seuraamaan. Tämä johtuu moottoreihin kytkettyjen taajuusmuuttajien parametreissa olevista nopeuserampeista, jotka rajoittavat pyörimisnopeuden muutosta. Toisaalta, virtuaalimallissa esiintyvä värinä saattaa hyvinkin johtua esimerkiksi virtuaalisen työkonemallin laskennassa esiintyvistä ideaalisuuksista; akselien joustaminen rajoittaisi todellisessa työkoneessa pyörimisnopeuden muutosnopeutta.

Kuvassa 5.14 esitetyn vääntömomenttikäyrät kuvaavat vääntömomentin siirtymistä ajavalta sähkömoottorilta virtuaalityökoneen voimansiirtoon. Kuvasta voidaan havaita, että käyrämuodot ovat hyvin samanlaiset, ainoa ero löytyy käyrien skaaloista; 5 % nimellisväännöstä sähkömoottorilla vastaa tässä tapauksessa 500 Nm vääntömomenttia virtuaalimallissa.

Tässä kuvatulla pienen tehon (4 kW) hardware-in-the-loop-järjestelmällä on todettu käytettyjen tiedonsiirtomenetelmien ja rajapintojen toimivuus valmistauduttaessa suurempitehoisten järjestelmien ohjaukseen samoilla periaatteilla.

6 YHTEENVETO JA JATKONÄKYMÄT

Esitetyn in-loop-simulaatiojärjestelmän avulla toteutettiin kaivoslastauskoneen hybridisointianalyysi. Virtuaalisimulaattorin ja Simulinkin hybridijärjestelmän simulaatiomallien avulla tehdyn tutkimuksen perusteella hybridisointi näyttäisi olevan erittäin tehokas menetelmä kaivoslastauskoneen polttoaineenkulutuksen pienentämiseksi. Perinteisessä dieselkäyttöisessä lastauskoneessa ajovoimansiirrossa vaikuttavat dynaamiset kuormitukset heikentävät dieselin hyötysuhdetta ja pakottavat dieselin maksimitehon suureksi. Hybridisoinnin avulla dynaaminen kuormitus voidaan siirtää sähkömoottorin ja energiavaraston hoidettavaksi, jolloin dieselmoottori voidaan asettaa sellaiseen vakaaseen toimintapisteeseen, jossa se tuottaa vaadittavan keskimääräisen tehon parhaalla mahdollisella hyötysuhteella ilman toimintapisteen muutosta. Toteutetussa tutkimuksessa simulointien perusteella esimerkkitapauksena toimineen kaivoslastauskoneen polttoaineenkulutusta voitiin alentaa 50 prosentista aina jopa lähes 70 prosenttiin riippuen kulutuslaskelman toteutustavasta. Lisäksi dieselmoottorin maksimitehoa voitiin alentaa 175 kW:sta aina 40 kW:iin asti.

Tutkimus on kuitenkin vielä kesken. Käytetyt mallit ovat monin paikoin yksinkertaistettuja, joten todellinen säästö polttoaineenkulutuksessa jäänee nyt arvioitua pienemmäksi. Jatkotutkimusaiheita ovat esimerkiksi:

- Dieselmoottorimallin kulutuslaskelmien tarkentaminen erityisesti transienttikulutusten osalta
- Moottorien ohjauksen uudelleensuunnittelu vastaamaan paremmin työympäristöä
- Akkumallin tarkentaminen
- Hydrauliiikan hetkellisen tehonkulutuksen lisääminen sarjahybridimalliin
- Liike- ja/tai potentiaalienergian talteenotto
- Todellisen työkoneen mittausten vertailu simulointituloksiin
- Useiden erilaisten työkoneiden mallintaminen ja verifiointi
- Hybridisoinnin vaikutus työkoneen käytettävyyteen ja ajotuntumaan
- Hybridisoinnin vaikutus työn tuottavuuteen

- Ajotapojen vaikutus polttoaineenkulutukseen

Esitetyllä laitteistolla on mahdollista toteuttaa myös hardware-in-the-loop-simulointiin pohjaava todellisen hybridijärjestelmän testausjärjestelmä, jossa virtuaalisesti mallinnettu kuorma kuormittaa oikeaa hybridijärjestelmää. Järjestelmän rakentaminen on edennyt siihen vaiheeseen, että pienen tehon järjestelmässä 4 kW oikosulkumoottoria (ajomoottori) voidaan pyörittää osana virtuaalisesti mallinnettua voimansiirtoa. Jatkossa moottorien kokoa kasvatetaan vastaamaan todellista työkoneen tarvetta. Tämän jälkeen järjestelmään lisätään energiavarasto ja lopulta generaattoripaketti.

LÄHTEET

- (Alaküla 2006) Alaküla M., 2006, *Hybrid Drive systems for Vehicles - Part I*, Lunds tekniska Högskola 2006, Luentomateriaali, Internetlähde (Viitattu 8.1.2013),
http://www.iea.lth.se/hfs/Kompendium%2006/Hybridkompendium_1_2006.pdf
- (Cao et. al. 2009) Cao Z., Wu S., Li M., Du C., *Series and Parallel Hybrid System Performance Comparison Based on the City Bus Cycle*, 2009, Power and Energy Engineering Conference 2009, s.1-5, 27.-31.3.2009
- (Chizh 2010) Chizh A., *Permanent Magnet Synchronous Machine for Parallel Hybrid Vehicle*, diplomityö, Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2010
- (Dynacar 2013) Dynacar – Internetlähde (Viitattu 18.2.2013)
<http://www.dynacar.es/en/home.php>
- (ECV 2013) Sähköiset hyötyajoneuvot - Electric Commercial Vehicles, Internetlähde (Viitattu 8.1.2013)
<http://www.ecv.fi/>
- (Gamburger 2009) Gamburger K., *Electrical Machine in a Hybrid Electrical Vehicle*, diplomityö, Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2009
- (Georgi et. al. 1997) Georgi B., Hunkert S., Liang J., William M., 1997, *Realizing future trends in Diesel Engine Development*, SAE Technical Paper Series 972686, Internetlähde (Viitattu 25.1.2013)
<http://128.146.169.169:1027/collect/saeold/index/assoc/HASH0162/0a4d0b24.dir/doc.pdf>

- (Hedges et. al. 2007) Hedges K., Djukic F., Irving G., 2007, *Diesel Particulate Matter in Underground Mines- Controlling the Risk (an update)*, Queensland Mining Industry Health & Safety Conference 2007
- (Immonen 2008) Immonen P., *Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkooneen energian talteenottojärjestelmäksi*, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2008
- (de Jalón & Bayo 1994) de Jalón J.G., Bayo E., *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time challenge*, ISBN 0-387-94096-0, Springer-Verlag, New-York, 1994, Luettavissa internetistä (Viitattu 7.2.2013): <http://mat21.etsii.upm.es/mbs/bookPDFs/bookGjB.htm>
- (Lee et. al. 2009) Lee J., Jeon N., Lee H., *HIL Simulation Approach for Feasibility Study of a Tram with an Onboard Hybrid Energy Storage System*, ICCAS-SICE 2009, s. 5305-5312, Elokuu 2009
- (Li et. al. 2007) Li X., Williamson S., *Comparative Investigation of Series and Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Efficiencies Based on Comprehensive Parametric Analysis*, 2007, Vehicle Power and Propulsion Conference 2007, s.499-505
- (Lindgren 2005) Lindgren M., 2005, *A Transient Fuel Consumption Model for Non-road Mobile Machinery*, Biosystems Engineering Vol 91 Issue. 2, s. 139-174, Heinäkuu 2005.

- (Lindgren & Hansson 2004) Lindgren M., Hansson P.-A., 2003, *Effects of Transient Conditions on Exhaust Emissions from two Non-road Diesel Engines*, 2003, Biosystems Engineering Vol. 87 Issue 1, s.57-66, Tammikuu 2004
- (Liu et. al. 2009) Liu W., Luo G., Zhao N., Dou M., *Design and HIL simulation of proportional compression Salient-pole Permanent Magnet Synchronous Motor for Electrical Traction Vehicle*, Vehicle Power and Propulsion Conference 2009, s. 884-889, Syyskuu 2009
- (MeVEA 2013) MeVEA- www.mevea.com , internetlähde (viitattu 7.2.2013)
- (Pyrhönen 2010) Pyrhönen J., *Electrical Drives*, 2010, Luentomateriaali, Luvut 7 ja 9, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- (Rodic et. al. 2004) Rodic M., Jezernik K., Trlep M., *Use of Dynamic Emulation of Mechanical Loads in the Design of Adjustable Speed Applications*, The 8th IEEE Internal Workshop on Advanced Motion Control 2004, s.677-682, Maaliskuu 2004
- (Timmermans et. al. 2007) Timmermans J-M., Van Mierlo J., Lataire P., *Test Platform for Hybrid Electric Power Systems: Development of a HIL Test Platform*, Power Electronics and Applications 2007, s. 1-7, Syyskuu 2007
- (Tumbde 2011) Tumbde A., 2011, *Ventilation*, Internetlähde (Viitattu 15.1.2013)
<http://technology.infomine.com/reviews/ventilation/welcome.asp?view=full>

- (Xiong et. al. 2008) Xiong W., Wu Z., Yin C. ja Chen L., 2008, *Economical Comparison of Three Hybrid Electric Car Solutions*, 2008, Vehicle Power and Propulsion Conference 2008, s. 1-6

Liite I, Simulink-mallien Matlab- alustustiedosto

```
%% Series hybrid system Simulink model initialization script
% Jarkko Nokka 2013

%% Motor parameters

p=3;
Is=115;
P_n=66000;
cosphi=0.95;
fn=100;
n_n=2000;
w_n=n_n*2*pi/60;
T_n=P_n/w_n;
T_max=2*T_n;
J_motor=0.5;

%% Equivalent circuit parameters
Rs = 0.053;

psi_PM=0.418;

Lsd=0.00112;
Lsq=0.00116;

%% Sample time
sample_base=50e-6;

%% I_d=0 control init block

w_nom=2000*2*pi/60; %Motor's nominal (Drives 9.7)
w_limit=0.9*w_nom;

%% Diesel Init
%% Definitions
T=0:15:210;
n=1000:250:4500;
omega=n/60*2*pi;
table=load('Diesel_kulutus.txt');
J_diesel=1.7;

%% Calculations
%%Efficiency
E_J=450000000; %J/kg
E=E_J/1000/3600/1000; %kWh/g
eff=1./(E.*table);

%%Torque Behaviour
T_max=[150 172 200 205 210 205 200 195 190 180 173 165 150 135
90];

% Time constant behaviour
```

```

omega_d=[700 900 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200
2300]/2300*4500/60*2*pi; % [rpm]
tau_d = [2 1.8 1.8 1.7 1.6 1.5 1.7 1.8 1.8 3];

%% Transients

q_T=load('qt.txt');
q_n=load('qn.txt');

rel=[-25 -15 -10 0 10 15 25].*0.01;
t_vect=[100 250 350]/460*210;
omega_vect=[1600 2000]./60.*2.*pi;
omegarel=rel.*(4500-1000)/60*2*pi;
Trel=rel.*210;

%% battery init

E_bat=600; %emf
P_bat=100000; %max power
R_bat=E_bat^2/(4*P_bat);
C=60; %Capacity [Ah]
W_max=C*3600*E_bat;%energy [Ws]
P_term=[-P_bat:100:P_bat];
i_bat=real(-
E_bat/(2*R_bat)+sqrt((E_bat/(2*R_bat))^2+P_term./R_bat));

```

Liite II, Hardware-in-the-Loop-koneikon moottoreiden kilpiarvot

Lenze MDFKAIG080-22

U_n	390 V
I_n	9.1 A
P_n	3.9 kW
T_n	10.8 Nm
n_n	3455 rpm
$\cos\varphi$	0.8
f_n	120 Hz