

Diplomityö

Traktorin sähköistysanalyysi virtuaalisimulaatiomallilla (Electrification analysis of the agriculture tractor with virtual simulation model)

Marko Haapaniemi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Marko Haapaniemi

Traktorin sähköistysanalyysi virtuaalisimulaatiomallilla

Diplomityö

2016

106 sivua, 60 kuvaa ja 33 liitettä

Tarkastajat: Tutkijaopettaja TkT Lasse Laurila
Projektitutkija TkT Paula Immonen

Hakusanat: hybridi, traktori, simulaatio, reaaliaikaisimulointi.

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle osana yliopiston sähköisen liikkumisen tutkimusta. Työssä on jatkokehitetty ja dokumentoitu Drive!-projektin hybriditraktorin simulaatiomallia, joka toimii Mevea- ja Simulink-ohjelmistoissa. Mevean simulaatioalustalla on mallinnettu traktorin mekaniikkaa ja ympäristöä, kun taas Simulinkillä on simuloitu hybriditraktorin sähkötekniikkaa, dieselgeneraattoria, energiavarastoa ja apulaitteita.

Työssä on tarkasteltu traktorin erilaisia maatalouden työtehtäviä ja tämän jälkeen tarkasteltu simulaatiomallin ja simulaatioiden avulla minkälaisella hybriditraktorilla näitä töitä olisi mahdollista suorittaa. Lopuksi tarkastellaan vielä simulaatiomallilla noin 75 kW:n hybriditraktorin toimintaa maatalon pihapiirin työtehtävissä ja lasketaan hybridisoinnin lisäinvestoinnille takaisinmaksuaika. Virtuaalimallilla tehtyjen simulaatioiden ja laskelmien perusteella saatiin tulokseksi, että tämän hetken komponentti- ja energiahinnoilla maataloustrak-

torin hybridisointi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Kuitenkin on huomionarvoista, että ajettaessa pelkällä akkusähköllä käytetyn energian hinta on noin kolmannes verrattaessa perinteiseen dieseltraktoriin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical engineering

Marko Haapaniemi

Electrification analysis of the agriculture tractor with virtual simulation model

Master's thesis

2016

106 pages, 60 figures and 33 appendices.

Examiners: Associate professor Lasse Laurila
D. Sc. Paula Immonen

Keywords: hybrid, tractor, simulation, real-time simulation.

This master's thesis has been done for Lappeenranta University of Technology as a part of the research of electrical transportation. In this thesis hybrid tractor simulation model from the Drive!-project is developed further and documented. The simulation model is made with Mevea and Simulink simulation software. Mechanics of the tractor and the working environment have been modelled in Mevea and electrical devices, diesel generator, energy storage and auxiliary machines have been modelled in Simulink.

This thesis deals with different working duties of the agricultural tractor and analyses what kind of hybrid tractor would be suitable for farmyard's work using simulation model. Finally operation of about 75 kW hybrid tractor is modelled using simulation models of the hybrid tractor and environment. Payback time of extra investments due to the hybridization is calculated using that simulation data.

According to simulations of the hybrid tractor and calculations, hybridization is not financially cost-effective with present component and energy prices. However it should be noted

that when driving with pure electrical energy stored in the battery the price of the used energy is about one third compared to traditional diesel tractor.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto.....	13
2.	Traktorin sähköistys	17
2.1	Energiavarasto	17
2.2	Sähköntuotto.....	18
2.3	Rinnakkaishybridi.....	18
2.4	Sarjahybridi	20
2.5	Rinnakkaissarjahybridi	21
2.6	Täyssähköistys.....	23
3.	Liitettävien työkoneiden asettamat vaatimukset traktorille.....	25
3.1	Traktorin vetokyky	25
3.2	Peräkärri.....	28
3.3	Maanmuokkaukoneet	29
3.3.1	Kultivaattori.....	30
3.3.2	Lautasmuokkain	32
3.3.3	Kyntöaura	33
3.3.4	Jyrä	36
3.4	Kylvökoneet	37
3.4.1	Kylvökone	38
3.4.2	Tarkkuuskylvökone	39
3.4.3	Suorakylvökone	41
3.5	Niittomurskaimet	43
3.6	Paalaimet	44
3.6.1	Pyöröpaalain	45
3.6.2	Suurkanttipaalain	46
3.7	Lumilinko	48
3.8	Yhteenveto traktoriin liitettävistä työkoneista.....	50
4.	Virtuaalimalli.....	52
4.1	Matlab.....	52
4.1.1	Sähkökoneiden ohjaus	54
4.1.2	Sähkökoneen simulaatiomalli.....	55
4.1.3	Energiavarasto	58

4.1.4	Dieselgeneraattori.....	61
4.1.5	Voiman ulosoton ja hydrauliiikan mallinnus.....	64
4.1.6	Apu- ja järjestelmälaitteiden mallinnus.....	67
4.2	Mevea.....	69
5.	Case: noin 75 kW:n traktorin sähköistys.....	72
5.1	Traktorin tekniset tiedot.....	72
5.2	Ajomootorit ja välityssuhteet.....	73
5.3	Voiman ulosoton moottori.....	76
5.4	Työhydrauliikan sähkömoottori.....	77
5.5	Apu- ja järjestelmälaitteet.....	78
5.6	Akusto.....	79
5.7	Generaattori.....	80
5.8	Simuloitu ajosykli.....	82
5.9	Työkoneet joita voidaan käyttää.....	84
5.10	Investointihintavertailu ja takaisinmaksuaika.....	85
5.10.1	Investointihintavertailu.....	86
5.10.2	Takaisinmaksuaika.....	87
5.11	Tulokset.....	96
6.	Yhteenveto.....	98
	LÄHTEET.....	99

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta
AUX	Apulaite / apulaitteet
AWD	Nelipyöräveto (all-wheel drive)
CO	Häkä
CVT	Continuously Variable Transmission
D	Diesel / polttomoottori
DC	Tasavirta
EC	EasyCut
ES	Energiavarasto (energy storage)
G	Sähkögeneraattori
HI	Korkea
HC	Hiilivety
Hydr	Hydrauliikka
JD	John Deere
KC	Krone Comprima
LO	Matala
LUT	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
NO _x	Typen oksidit
PN	Pienhiukkasmäärä
PM	Pienhiukkasmassa
PTO	Voiman ulosotto (power take-off)
pu	Per-unit
S	Sähkökone
SH	Speed Hawk
SOC	Varaustaso (state of charge)

Merkinnät

<i>A</i>	Peruskerroin
<i>b</i>	Työleveys
<i>B</i>	Ajonepeuden lineaarinen kerroin
<i>C</i>	Akuston virta suhteessa nimelliskapasiteettiin
<i>C</i>	Ajonepeuden neliöllinen kerroin
<i>C</i>	Lämpökapasiteetti
<i>C</i>	Kapasitanssi
<i>d</i>	Työsyvyys
<i>E</i>	Energia
<i>eta_dmotor</i>	Sähkökoneen hyötysuhde
<i>f</i>	Vierimisvastuskerroin
<i>F</i>	Voima
<i>g</i>	Putoamiskiihtyvyys
<i>i</i>	Virta
<i>i_es</i>	Energiavaraston virta
<i>i_es_dmotor</i>	Ajomootoreiden ja apulaitteiden virta
<i>i_es,dmotor</i>	Ajomootoreiden ja apulaitteiden virta
<i>i_es,gen</i>	Generaattorin virta
<i>i_es,PTO,Hydr,Aux</i>	Voiman ulosoton, hydrauliiikan ja apulaitteiden virta
<i>i_PTO</i>	Voiman ulosoton alennusvaihteen välityssuhde
<i>J_d</i>	Dieselmoottorin hitausmomentti
<i>K</i>	Kerroin
<i>omega_ed</i>	Moottorin pyörimisnopeus
<i>omega_d</i>	Dieselmoottorin pyörimisnopeus
<i>omega_dmotor</i>	Sähkökoneen pyörimisnopeus
<i>omega_dmotor,ref</i>	Sähkökoneen pyörimisnopeus ohje
<i>omega_dmotorFL</i>	Vasenta eturengasta pyörittävän sähkökoneen pyörimisnopeus
<i>omega_dmotorFR</i>	Oikeaa eturengasta pyörittävän sähkökoneen pyörimisnopeus
<i>omega_dmotorRL</i>	Vasenta takarengasta pyörittävän sähkökoneen pyörimisnopeus
<i>omega_dmotorRR</i>	Oikeaa takarengasta pyörittävän sähkökoneen pyörimisnopeus
<i>m</i>	Massa
<i>M</i>	Maalajikerroin

n	Pyörimisnopeus
N	Kappalemäärä
p	Paine
p	Ympyrän kehä
P	Teho
P_{es}	Tehon kulutuksen estimaatti
P_{dmotor}	Sähkökoneen teho
P_{dm}	Ajomoottorin ja vaihtosuuntaajan kuluttama teho
Q	Virtaus
Q	Varaus
R	Vaihteen välityssuhde
R	Resistanssi
s	Luisto
t	Aika
T	Lämpötila
T	Vääntömomentti
T_d	Dieselmoottorin vääntömomentti
$T_{d,ref}$	Dieselmoottorin vääntömomentti ohje
T_{dmotor}	Sähkökoneen vääntömomentti
$T_{drive,ref}$	Sähkökoneen vääntömomentti ohje
$T_{gen,ref}$	Generaattorin vääntömomentti ohje
T_{load}	Kuorman vääntömomentti
T_{PTO}	Voiman ulosoton kuormitusvääntömomentti
u_{es}	Energiavaraston jännite
v	Nopeus
$'X'_{motor_control}$	Sähkökoneen X ohjaussignaali
$'X'_{motor_data}$	Sähkökoneen X kulutus- ja hyötysuhdedata
$'X'_{motor_omega_n}$	Sähkökoneen X nimellipyörimisnopeus

Kreikkalaiset

α	Lämmönsiirtymiskerroin
α	Mäen kaltevuus
η	Hyötysuhde
μ	Kehävoimakerroin
ω	Pyörimisnopeus

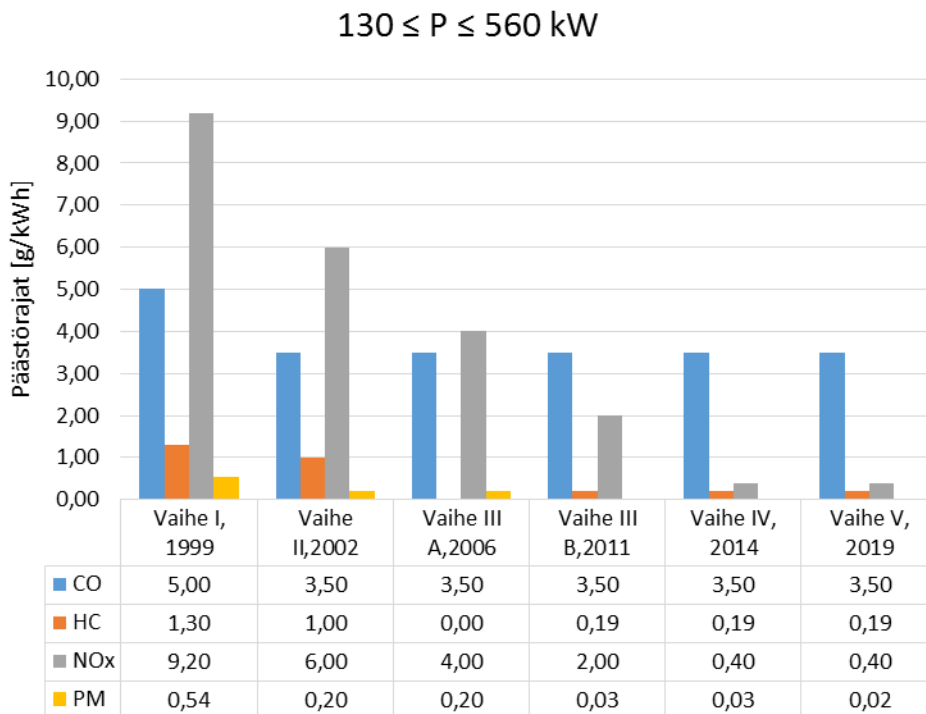
Alaindeksit

es	Akun estimoitu suure
es, alku	Akun alkutila
es, häviöt	Akun häviöt
arvio	Arvio
d,max	Dieselmoottorin maksimi
DCconv	DC hakkuri
ESR,sk	Superkondensaattorin ekvivalentti sarjaresistanssi
hydr	Hydrauliikka
lataus	Latauksen aikainen
low	Pienjännitejärjestelmä
max	Maksimi
moottori, max	Moottorin maksimi
n	Nimellinen
OC	Avoin piiri
OC, kenno	Kennon avoin piiri
optimi	Optimaalisin toimintapiste
PTO	Voiman ulosotto (Power Take Out)
purku	Purun aikainen
s	Luisto
sar	Sarjaankytketty
sisään	Sisään syötetty
sk	Superkondensaattori
sk,max	Superkondensaattorin maksimi
rengas	Rengas
rengas,v_max	Rengas, maksiminopeudella

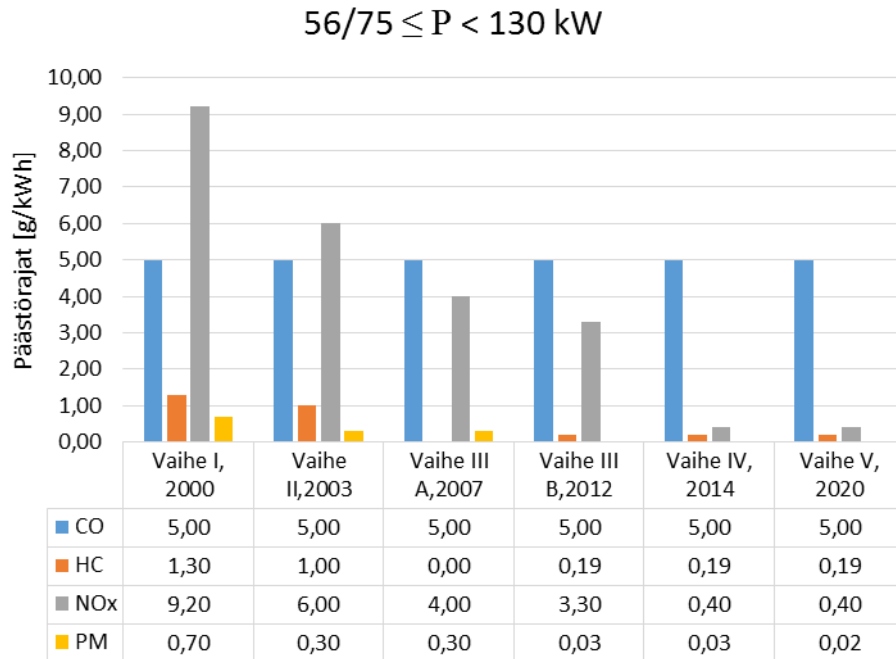
t	Vetovoima / -vastus
tehontarve	Tehontarve
ulos	Ulos saatu
ympäristö	Ympäristö
r	Rinnevastus
rin	Rinnankytketty
v	Vierintävästus
veto	Vetoteho

1. JOHDANTO

Jatkuvasti kiristyvät päästönormit aiheuttavat liikkuvien työkoneiden valmistajille kasvavia paineita kehittää entistä polttoainetaloudellisempia ja vähemmän saastuttavia liikkuvia työkoneita. Yleisesti moottorinvalmistajien keskuudessa onkin kehitetty entistä energiatehokkaampia moottoreita, kun taas syntyviä päästöjä on ryhdytty leikkaamaan erilaisin pakokaasujen kierrätystekniikoiden, ureakatalysaattoreiden ja uusimpana hiukkassuodattimien avulla. Seuraaviin kahteen kuvaan on kerätty Euroopan päästönormien kehitystä kahdelta työkoneiden tehoalueelta.



Kuva 1.1 Maastokäyttöön tarkoitettujen työkoneiden dieselmoottorien, joiden nimellisteho on välillä 130 - 560 kW, päästöstandardeja. III A vaiheen HC- ja NO_x-päästörajat on yhdistetty, jonka takia HC-rajaa ei ole erikseen. Viidennessä vaiheessa pienhiukkasille on esitetty rajoitteeksi massan lisäksi myös lukumäärä, joka on $1 \times 10^{12} / \text{kWh}$. Viidennen vaiheen arvot ovat vielä syyskuussa 2014 esitettyjä arvoja, eivätkä siis lopullisia asetuksia. [1]



Kuva 1.2 Maastokäyttöön tarkoitettujen työkonien dieselmoottorien, joiden nimellisteho on välillä 75 - 130 kW vaiheet I – III B ja 56 - 130 kW vaiheissa IV ja V, päästöstandardeja. III A vaiheen HC- ja NO_x- päästörajat on yhdistetty, jonka takia HC-rajaa ei ole erikseen. Viidennessä vaiheessa pienhiukkasille on esitetty rajoitteeksi massan lisäksi myös lukumäärä, joka on $1 \times 10^{12} / \text{kWh}$. Viidennen vaiheen arvot ovat vielä syyskuussa 2014 esitettyjä arvoja, eikä siis lopullisia asetuksia. [1]

Kuvista 1.1 ja 1.2 nähdään, että yleinen trendi on ollut päästöarvojen jatkuva tiukentaminen ja viidennen vaiheen päästörajoissa ollaankin kiinnittämässä huomiota pienhiukaspäästöihin. Kuvissa CO on häkä-, HC on hiilivety-, NO_x typenoksidi- ja PM on pienhiukaspäästöt. Huomionarvoista on, ettei CO₂, eli hiilidioksidipäästöjä, eikä työkonien energiatehokkuutta ole päästörajoissa huomioitu mitenkään. Toisaalta työkonien energiatehokkuuden kehitys on jossain määrin markkinaohjautuvaa.

Työkonien päästöjä ja etenkin energiankulutusta voitaisiin kuitenkin leikata sähköteknisin ratkaisuin ilman, että työkonien suorituskyky laskisi. Työkoneita, missä hybridisoimisesta tai täyssähköistämistä on saatu hyviä kokemuksia, löytyy kirjallisuudesta ja kaupallisista tuotteista muun muassa täyssähköistetty Bobcat [2], hybridi Bobcat [3], täyssähköistetty pienkaivinkone [4], hybridiisoitu kurottaja [5] sekä hybridiisoitu puskutraktori CAT D7E [6]. Hybridisoinnista ja henkilöautojen täyssähköistämistä on jo kokemuksia, missä yleisenä

trendinä on ollut parempi kokonaisenergiatehokkuus [7] sekä paikallisesti pienemmät päästöt. Lisäksi, jos lataukseen on käytetty uusiutuvaa tai muuten päästötöntä energiantuotantoa, päästään autolla erinomaisiin päästölukemiin kuljettua kilometriä kohden. Kolmas alue, missä hybridisoinnista on saatu jo erinomaisia kokemuksia, on laivaliikenne. Laivojen voimansiirron siirtäminen sähköiseksi on tuonut mukanaan polttoainesäästöjä ja ennen kaikkea huomattavasti aiempaa parempaa laivan ohjattavuutta [8].

Aikaisessa vaiheessa olevia osin sähköistettyjä tai muuten aiempaa päästöttömämpiä traktoreita löytyy muun muassa Fendtiltä, John Deereltä ja New Hollandilta. Fendtiltä on vielä prototyypivaiheessa 700 Vario-sarjan pohjalta rakennettu X Concept [9], jossa voimalinjaan on lisätty generaattori. X Conceptin generaattorilta saadaan siirrettyä tehoa sähköisenä jopa 130 kW:a 700 V:n tasajännitteenä traktoriin kytkettäville työkoneille. John Deereltä löytyy mallistostaan traktori 6210 RE [10], jossa vauhtipyörään on integroitu 20 kW generaattori. Generaattorilta saadaan siirrettyä tehoa sähköisenä 230 V:n ja 400 V:n vaihtojännitteillä ulkoisiin pistokkeisiin sekä paikallaan ollessa työkaluille, että liikkeessä traktoriin liitettäville työkoneille. New Holland on mennyt tuotekehityksessään hieman toiselle suunnalle. Prototyypivaiheessa sillä on vetypolttokennoilla toimiva sähkötraktori [11] ja biometaanilla tai tarvittaessa dieselillä toimiva traktori [12] osana omavaraistalousprojektia Italiassa. Lisäksi New Hollandin uudet traktorit toimivat perinteisellä dieselillä sekä myös sataprosenttisella biodieselillä [13].

Tarkasteltaessa erilaisia työtehtäviä, joissa hybridisointi tai täyssähköistys toisi mukanaan säästöjä käyttökustannuksiin, nousevat esille erityisesti potentiaali- ja liike-energioiden talteenottomahdollisuudet. Perinteisesti taakkaa laskiessa ja vauhtia hidastaessa muutetaan energiaa lämmöksi, joko jarruissa tai hydraulikkaöljyssä. Sähköistäminen tuo kuitenkin mukanaan mahdollisuuden muuntaa nämä talteen otettavissa olevat energiat varastointia varten sähköenergiaksi, jota voidaan myöhemmin käyttää muuhun tarkoitukseen työkoneen järjestelmissä. Hybridisoinnilla ja sähköistämällä on lisäksi mahdollista saavuttaa säästöjä yhdessä älykkään ohjauksen kanssa, verrattaessa perinteiseen polttomoottorilliseen työkoneeseen, työtehtävissä, joissa dieselmoottoria käytetään tuottamaan energiaa osakuormituksella pelkästään jollekin osajärjestelmälle. Tällaisia työtehtäviä ovat esimerkiksi paikallaan tehtävät työt, jossa käytössä on vain työhydraulikka, voimanulosotto tai ilmakompressori. Täl-

löin oikein mitoitettu sähkömoottori on huomattavasti energiatehokkaampi, kuin iso poltto-moottori pienellä osakuormalla, käytettäessä pelkästään jotain traktorin toimilaitetta. Tarkasteltaessa erityistyöolosuhteita, kuten maatalon navettaa tai latoa, joissa melu, päästöt tai kuumuuden aiheuttama syttymisvaara ovat riskitekijöitä, on osittaiselle tai kokonaan sähköistämislle todellinen mahdollisuus osoittaa paremmuutensa.

Tässä työssä tarkastellaan mahdollisuutta saavuttaa polttoainesäästöjä traktorin hybridisoinnilla tai täyssähköistämislle. Tällöin polttoainesäästöjen kautta pienennetään myös traktorin ympäristölle aiheuttamaa päästökuormaa. Sähköistämislle tarkastellaan erilaisia vaihtoehtoja niin työkoneen liikuttelussa kuin myös lisälaitteiden käytössä. Lopuksi tarkastellaan vielä lähemmin noin 75 kW traktorin sähköistämistä. Kokoluokka valittiin sillä perusteella, että se on toimiva erityisesti maatalon pihapiirin töissä tai muissa aputöissä. Sähköistetylle järjestelmälle tarkastellaan sen suorituskykyä, investointi- ja käyttökustannuksia käyttämällä Mevean ja Simulinkin yhdistettyä simulaatiomallia maataloustraktorista. Simulaatiomallinuksessa on käytetty lähtökohtana erästä Drive!-projektin hybriditraktorin virtuaalimallia, jota on edelleen kehitetty ja dokumentoitu. Verrattaessa kustannuksia eri järjestelmien välillä, saadaan vertailun tuloksena investointikustannuksille ero ja takaisinmaksuaika.

2. TRAKTORIN SÄHKÖISTYS

Mietittäessä traktorin sähköistämistä, on olennaisinta ensin tarkastella, minkälaiseen käyttöön traktori tulee. Esimerkiksi, jos traktorilla pääsääntöinen ajo on useita tunteja kerrallaan, on hybridisointi kannattavampi lähestymistapa. Jos taas traktorilla ajot ovat tunnin-kahden kertaluokkaa ja se muuten seisoo, on täyssähköistäminen varteenotettava lähestymistapa. Lisäksi on otettava huomioon oletetut työtehtävät, joita traktorilla ajatellaan suoritettavan.

Seuraava vaihe mietittäessä traktorin sähköistystä on määritellä käytettävä energiavarasto ja mahdollisesti työnaikainen sähköntuottaminen. Voimansiirtoa sähköistettäessä on valittava, mitä osaa voimasta siirretään sähköisessä muodossa ja mitä mekaanisessa muodossa. Mekaanisen voimansiirron huonona puolena ovat vaihteistojen ja laakerointien häviöt, joita voidaan välttää siirrettäessä tehoa sähköisessä muodossa lähemmäksi käyttökohdetta. Vuonna 2005 tehdyssä tutkimuksessa [14] traktoreissa yleisesti käytettävälle CVT-vaihteistolle (continuous variable transmission) määritettiin hyötysuhteeksi 80 – 85 prosenttia, mikä ei ole erityisen hyvä, kun ottaa huomioon dieselmoottorin jo valmiiksi heikon hyötysuhteen. Tällöin jo merkittävästi häviöllisen moottorin tehoa hävitetään edelleen vaihteistossa, mikä näkyy korkeina käyttökustannuksina ja päästöinä. Tarkastellaan seuraavaksi erilaisia traktorin sähköistämisa-alueita ja sähköistämistapoja.

2.1 Energiavarasto

Sähkön energiavarastolla tarkoitetaan yleisellä tasolla joko akkua tai superkondensaattoria. Energiavaraston tehtävänä on välivarastoida sähköenergiaa myöhempää käyttöä varten. Tarkasteltaessa akkuja energiavarastoina, on niiden yleisenä piirteenä hyvä energianvarastointikyky ja kohtalainen tehon luovutus- ja vastaanottokyky. Superkondensaattoreilla taas on erinomainen tehon luovutus- ja vastaanottokyky, mutta huono energian varastointikyky [15]. Siksi onkin oleellista tarkastella sähköjärjestelmää kokonaisuutena ja valittava energiavaraston koko ja teho järjestelmän tarpeiden mukaan.

Tarkasteltaessa erilaisia akkutekniikoita ja -kemioita, nousee litium tämänhetkisistä markkinoilla olevista akkumateriaaleista eniten huomion arvoiseksi [16]. Litium-akuista edelleen litiumrauta-fosfaatti- (LiFePO_4) ja litiumtitanaattikemiat (LiTi) ovat huomionarvoisimmat,

LiFePO₄:n omatessa hyvän energiatiheyden ja yli 2 000 luokkaa olevan lataus- ja purkusyklin keston [17] ja LiTi:n omatessa kohtalaisen energiatiheyden ja yli 16 000 luokkaa olevan lataus- ja purkusyklin keston [18].

2.2 Sähköntuotto

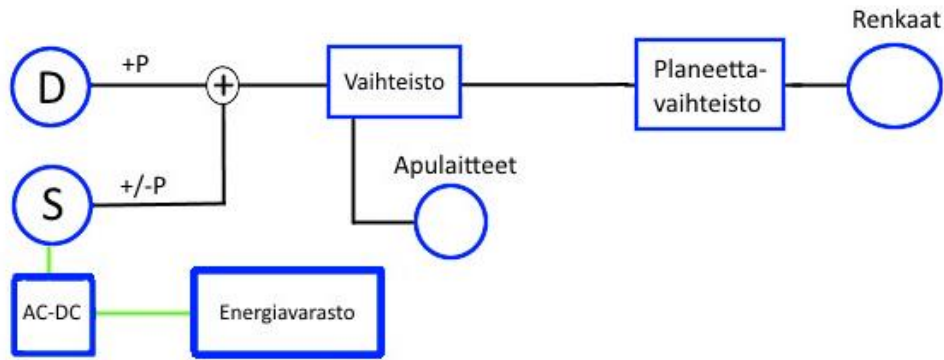
Sähköistetyssä traktorissa sähköenergiaa voidaan tapauksesta riippuen joko ladata suoraan sähköverkosta tai tuottaa dieselgeneraattorilla tai polttokennolla. Sähköverkosta latauksen etuja ovat valmis jakeluinfrastruktuuri ja Suomessa ja Pohjoismaissa tuotetun sähkön vähäpäästöisyys. Suomessa vuoden 2015 ja kevään 2016 sähköntuotannon keskimääräiset CO₂-päästöt kilowattitunnille olivat noin 100 g/kWh [19].

Dieselgeneraattorin etuja ovat pitkälle kehitetty dieselmootoreiden tekniikka ja polttoaineen jakeluverkoston nykyinen laajuus ja helppous. Toisaalta käytettäessä fossiilisia polttoaineita vapautuu ilmakehään kasvihuonekaasuja, mikä ei ole ilmastolle hyväksi. Myöskään dieselgeneraattorin hyötysuhde ei ole erityisen hyvä, sillä satunnaiseen varavoimakäyttöön tarkoitettujen dieselgeneraattoreiden hyötysuhteet ovat tyypillisesti noin 30 % [20] ja veneiden jatkuvampaan käyttöön tarkoitettujen dieselgeneraattoreiden hyötysuhteet ovat tyypillisesti noin 37 % [21].

Polttokennon ja erityisesti vetypolttokennon hyviä puolia ovat päästöttömyys ja dieselgeneraattoria parempi hyötysuhde. Tyypillisesti vetypolttokennon hyötysuhteet ovat yli 50 % [22],[23]. Vedyn kanssa tulee kuitenkin hankaluudeksi sen varastointi ja jakeluketjun puuttuminen. Vedyn varastoinnin ja jakeluketjun kehittyminen voi kuitenkin tuoda vedyn vielä dieselin kilpailijaksi.

2.3 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridillä tarkoitetaan hybridisointia, jossa polttomoottori ja sähkömoottori on mekaanisesti kytketty samaan voimalinjaan. Ne voivat toimia joko yhdessä tai erikseen voimalinjan voimantuottajina. Seuraavaan kuvaan on hahmoteltu rinnakkaishybridisoidun traktorin voimalinja.



Kuva 2.1 Hahmotelma traktorin rinnakkaishybridin voimansiirrosta. Kuvassa D on dieselmoottori, S on sähkökone, mustat viivat ovat mekaanisia yhteyksiä ja vihreät sähköisiä yhteyksiä. Dieselmoottorilta tuleva +P tarkoittaa, että dieselmoottori tuottaa tehoa, ja sähkökoneen +/- P tarkoittaa, että sähkökone voi toimia sekä moottori-, että generaattorimoodissa.

Kuvasta 2.1 voidaan huomata, että rinnakkaishybridisoinnissa perinteiseen polttomoottorillisen traktorin voimalinjaan on liitetty polttomoottorin akselille sähkökone. Ajatellen traktorin valmistajia on rinnakkaishybridisointi helpoin tapa toteuttaa hybridisointi, sillä rinnakkaishybridissä traktorin voimalinjassa muutetaan dieselmoottorin tilalle pienempi moottori ja sähkökone muun voimalinjan jäädessä ennalleen.

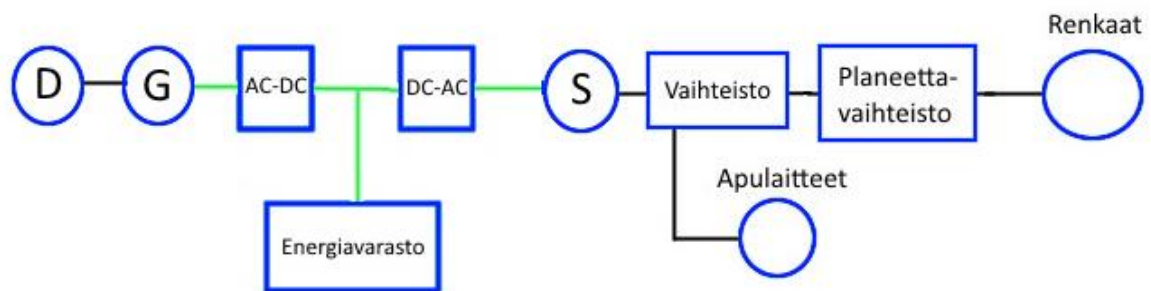
Rinnakkaishybridisoinnilla polttomoottori voidaan mitoittaa keskiarvokuormalle ja sähkömoottori hoitaa kuorman piikkimäiset vaihtelut. Rinnakkaishybridisoinnissa sähkökoneen koko onkin pienempi kuin sarjahybridisoinnissa, jossa sähkömoottori joudutaan mitoittamaan kokonaiskuorman mukaan. Rinnakkaishybridisoinnilla on mahdollista ottaa talteen potentiaali- ja liike-energiaa sähköiseen energiavarastoon, jos vaihteisto ja hydraulikka on toteutettu niin, että voimansiirto onnistuu myös takaisinkinpäin. Rinnakkaishybridisoinnilla on saatu kirjallisuudessa [24] - [27] noin 10 – 35 % polttoainesäästöjä, verrattaessa hybridisoimattomaan voimalinjaan. Saavutettujen säästöjen suuruus riippuu hybridisointi-kohteesta ja toteutustavasta.

Rinnakkaishybridisoinnin etuja ovat polttomoottorin transienttien pieneneminen, minimaalinen traktorin suunnittelun muutos ja tarvittavan energiavaraston suhteellisen pieni koko, jos halutaan leikata polttomoottorilta vain kuormapiikit. Rinnakkaishybridisoinnilla ongelmana on kuitenkin, että polttomoottori toimii edelleen sille epäedullisissa toimintapisteissä,

vaikka transienttivaihtelut pienenevätkin. Lisäksi vaihteiston mekaaniset häviöt laskevat voimalinjan kokonaishyötysuhdetta.

2.4 Sarjahybridi

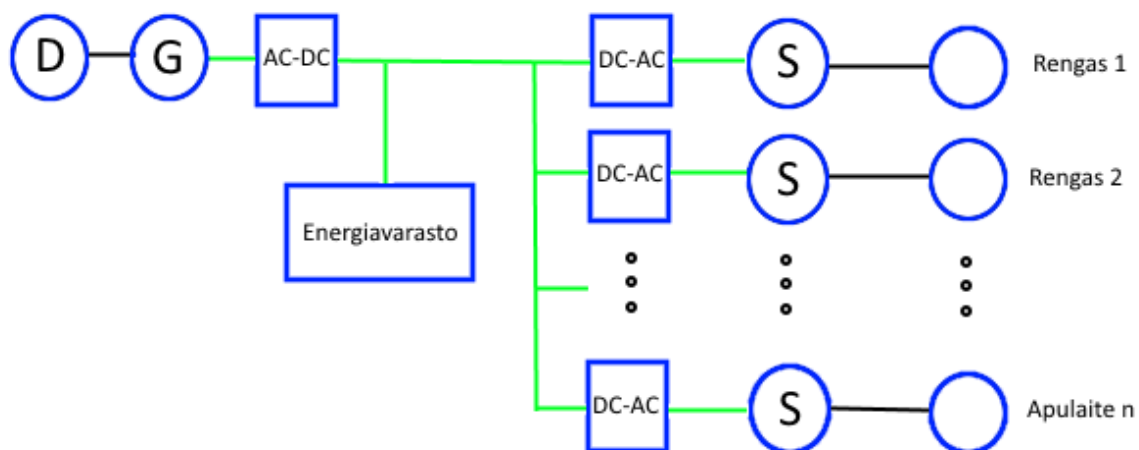
Sarjahybridillä tarkoitetaan hybridisointia, jossa polttomoottori ei mekaanisesti ole kytköksissä kuin generaattoriin. Tällöin polttomoottori ja generaattori voivat toimia jatkuvasti optimitoimintapisteessään parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. Sarjahybridissä hydraulikan ja liikkumisen tarvittava voima siirretään sähköisenä generaattorilta ja energiavara-
stolta sähkömoottoreille. Ratkaisusta riippuen sarjahybridisoinnin voimantuotto voidaan toteuttaa joko yhdellä sähkökoneella tai hajautetusti monella sähkökoneella. Seuraavaan kuvaan on hahmoteltu eräs yksinkertainen traktorin sarjahybridivoimansiirtokaavio.



Kuva 2.2 Hahmotelma yksinkertaisesta sarjahybridin voimansiirrosta. Kuvassa D on dieselmoottori, G on sähkökone generaattorimoodissa ja S on sähkökone, joka voi olla sekä moottori- että generaattorimoodissa. Mustat viivat kuvaavat mekaanista voimansiirtoa ja vihreät viivat kuvaavat sähköistä voimansiirtoa.

Kuvasta 2.2 voidaan havaita, että edellisen kuvan mukainen traktorin voimansiirtolinja on helppo toteuttaa, jos suunnittelu aloitetaan perinteisen dieseltraktorin pohjalta. Tällä tavalla toteutettu hybridisointi vapauttaa dieselmoottorin toimimaan optimaalalueellaan, mutta kuitenkin häviöllisistä vaihteistoista ei päästä vielä eroon.

Jos halutaan välttää vaihteiston häviöitä, on sarjahybridisointi mahdollista toteuttaa myös hajautetulla voimantuotolla. Seuraavaan kuvaan on hahmoteltu sarjahybridisointi, jossa voimantuotto on hajautettu usealle sähkökoneelle.



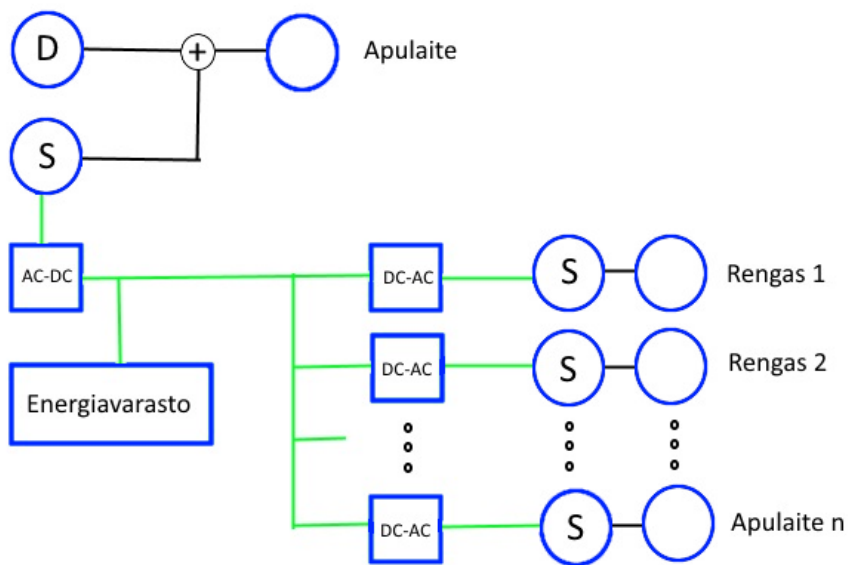
Kuva 2.3 Hahmotelma hajautetusta traktorin sarjahybridivoimansiirrosta. D on dieselmoottori, G on sähkökone generaattorimoodissa ja S on sähkökone, joka voi olla sekä moottori, että generaattorimoodissa. Mustat viivat kuvaavat mekaanista voimansiirtoa ja vihreät viivat kuvaavat sähköistä voimansiirtoa.

Kuten kuvasta 2.3 voidaan huomata polttomoottori ja generaattori syöttävät tasasuuntaajan kautta sähköenergiaa energiavarastolle ja edelleen vaihtosuuntaajien eli inverttereiden ja moottoreiden kautta renkaille ja apulaille. Hajautetun sarjahybridisoinnin etuja ovat osaluokkien optimointi toimimaan parhaalla mahdollisella hyötysuhteella, tarkempi osajärjestelmien hallittavuus sekä mekaanisten häviöiden minimointi. Toisaalta sarjahybridisoituun voimansiirtojärjestelmään tarvitaan hajautetussa järjestelmässä jopa kymmenen sähkömoottoria ja mitoitettaessa voimanulosottoa tarvitsee miettiä laitetaanko sitä pyörittämään traktorin nimellistehon suuruinen moottori, jokin pienempi moottori vai jätetäänkö se kokonaan pois. Ajateltaessa traktorinvalmistajia sarjahybridisoinnilla olisi mahdollista saada paljon energiasäästöjä, mutta traktori itsessään olisi suunniteltava uudelleen alusta asti. Sarjahybridisoinnilla saatuja simuloituja polttoainesäästöjä on kirjallisuudessa [27] ja [28] saatu noin 15 – 50 %, riippuen energiavaraston koosta ja hybridisoinnin kohteesta.

2.5 Rinnakkaissarjahybridi

Kuten nimestä voi jo päätellä rinnakkaissarjahybridi on rinnakkais- ja sarjahybridisoinnin välimuoto. Siinä polttomoottori ja sähkökone toimivat sarjahybridisoinnin tapaan mekaanisesta voimalinjasta erotettuina sähkön tuottajina, kuitenkin sillä erotuksella, että tarvittaessa molemmat voivat tuottaa energiaa jollekin apulaille. Traktorin tapauksessa tämä apulaite

voisi olla voiman ulosotto. Rinnakkais-sarjahybridisoinnilla on kirjallisuudessa [27] saatu simulointituloksissa eräälle isolle työkoneelle polttoainesäästöjä melkein 50 %. Rinnakkais-sarjahybridillä onkin mahdollista saada lähes yhtä paljon polttoainesäästöjä, kuin sarjahybridillä. Erot johtuvat apulaitteen käyttöön tarvittavan tehon transienteista, joihin polttomoottori joutuu jonkin verran reagoimaan. Seuraavassa kuvassa 2.4 on esitetty hahmotelma rinnakkais-sarjahybridisoinnista, jossa voimantuotto renkailla ja apulaitteille on hajautettu usealle eri sähkökoneelle.

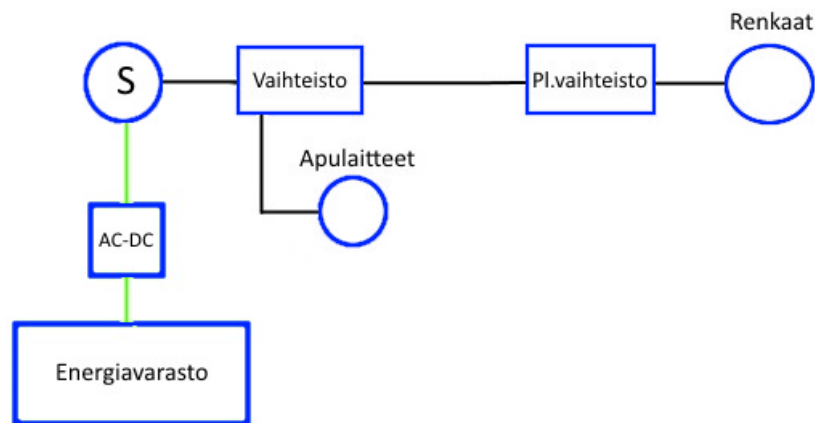


Kuva 2.4 Hahmotelma traktorin rinnakkais-sarjahybridisoidusta voimalinjasta. Kuvassa D on dieselmoottori ja S on sähkökone, joka voi toimia sekä moottori-, että generaattorimoodissa. Mustat viivat kuvaavat mekaanista voimansiirtoa ja vihreät viivat kuvaavat sähköistä voimansiirtoa.

Rinnakkais-sarjahybridisoidun voimalinjan etuja, sarjahybridisoinnin tavoin, ovat osa-alueiden optimisointi toimimaan parhaalla mahdollisella hyötysuhteella, osajärjestelmien ohjattavuus ja mekaanisten häviöiden minimointi. Lisäksi rinnakkais-sarjahybridisointi tarjoaa mahdollisuuden käyttää polttomoottoria ja sähkökonetta yhdessä esimerkiksi juuri voimauosoton tehontarpeen täyttämiseen ilman erillistä suurta sähkökonetta, joka tarvittaisiin sarjahybridisoinnin tapauksessa. Haittapuolena rinnakkais-sarjahybridisoinnissa ovat sarjahybridisoinnin tavoin määrällisesti suuri sähkökoneiden ja tehoelektroniikan tarve sekä mitoitettaessa dieselmoottoria, generaattorina toimivaa sähkökonetta ja energiavarastoa on otettava huomioon kuinka paljon ja kauan polttomoottorilta ja sähkökoneelta otetaan tehoa apulaitteelle.

2.6 Täyssähköistys

Mietittäessä traktorin täyssähköistämistä, voidaan se toteuttaa periaatteessa sekä yhdellä sähkökoneella, että hajautetusti monella sähkökoneella. Jos täyssähköistys toteutetaan yhden sähkökoneen periaatteella, poistetaan polttomoottori kuvan 2.1 kaaviosta ja mitoitetaan sähkömoottori operoimaan muuten perinteisesti suunniteltua traktoria. Seuraavaan kuvaan on hahmoteltu tällä tavoin toteutettu täyssähköistetyin traktorin voimalinja.

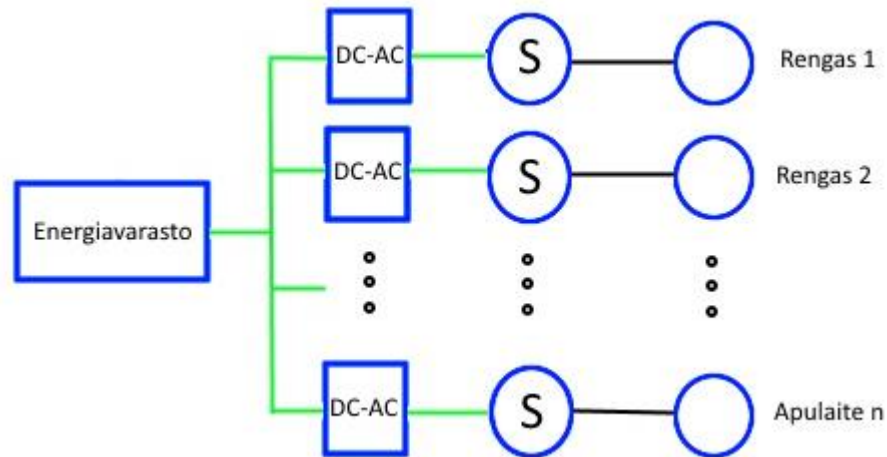


Kuva 2.5 Hahmotelma traktorin täyssähköistämisestä, jossa käytetään vain yhtä sähkömoottoria korvaamaan polttomoottoria. Kuvassa S on sähkökone, joka voi olla sekä moottori- että generaattorimoodissa, mustat viivat kuvaavat mekaanista voimansiirtoa ja vihreät viivat kuvaavat sähköistä voimansiirtoa.

Kuten kuvasta 2.5 voidaan havaita, tämän kaltainen traktorin täyssähköistäminen on traktorin suunnittelun kannalta helpoin, kun polttomoottorijärjestelmä korvataan vain sähkökoneella, tehoelektroniikalla ja jonkinlaisella sähköisellä energiavarastolla. Vaikka tällainen järjestelmä onkin suhteellisen helppo toteuttaa, ei sillä kuitenkaan päästä koko järjestelmän energiatehokkuuden kannalta parhaaseen mahdolliseen ratkaisuun. Häviöitä syntyy erityisesti voimansiirrossa vaihteistoissa ja apulaitteiden toimintaa ei voida optimoida yhtä pitkälle, kuin hajautetulla voimantuotolla on mahdollista.

Jos taas traktorin täyssähköistäminen toteutetaan kuvan 2.3 mukaisesti hajautetulla voimantuotolla, joudutaan traktorin suunnittelun kannalta aloittamaan periaatteessa puhtaalta pöydältä. Kuitenkin tällöin on helpompi osaoptimoida traktorin kokonaisenergiatehokkuus paremmaksi, kuin mitä yhdellä sähkökoneella toteutetun perinteisemmän voimalinjan tapauk-

sessä. Lisäksi, operoitaessa pienellä osakuormalla, on sopivan kokoinen sähkökone apulaitteella energiatehokkaampi, kuin mitä iso sähkökone on pienellä teholla pyöriessään. Seuraavaan kuvaan on hahmoteltu hajautetun sarjahybridisoinnin tapaisesti toteutettu sähköistäminen.



Kuva 2.6 Hahmotelma traktorin täyssähköistämisestä, jossa voimantuotto on hajautettu useille eri sähkökoneille. Kuvassa S on sähkökone, joka voi toimia sekä moottori-, että generaattorimoodissa, mustat viivat kuvaavat mekaanista voimansiirtoa ja vihreät viivat kuvaavat sähköistä voimansiirtoa.

Kuvasta 2.6 nähdään suoraan, että toteutettaessa traktorin voimalinja usean sähkökoneen avulla, voidaan jokaista rengasta ja apulaitetta käyttää ja ohjata yksilöllisesti. Lisäksi ylimääräisistä mekaanisista häviöistä on päästy eroon, kun voimansiirrosta vaihteisto on jätetty pois. Tämä lisää traktorin voimansiirron kokonaishyötysuhdetta huomattavasti. Tarkasteltaessa järjestelmää energian talteenoton kannalta, voidaan huomata sen olevan helposti järjestettävissä ja talteen otettu energia on suoraan siirrettävissä sähkökoneelta toiselle. Kuitenkin kuvan 2.6 tapaisen järjestelmän huonona puolena on usean sähkökoneen ja vaihtosuuntaajan suurempi investointihinta.

3. LIITETTÄVIEN TYÖKONEIDEN ASETTAMAT VAATIMUKSET TRAKTORILLE

Mitoitettaessa traktorin moottoreita ja voimansiirtoa on otettava huomioon myös liitettävien työkoneiden vaatima lisäteho. Ajomoottoreiden mitoituksessa eniten on kiinnitettävä huomiota traktorin oman massan lisäksi peräkärryn tai työkoneen aiheuttamaan lisävastukseen. Aloitetaan erityisvaatimusten tarkastelu tarkastelemalla ensin traktorin vetokykyä, jonka jälkeen peräkärryn vetämiseen tarvittavaa tehoa ja erilaisten maatalouden tyypillisimpien traktoriin liitettävien työkoneiden tehontarpeita.

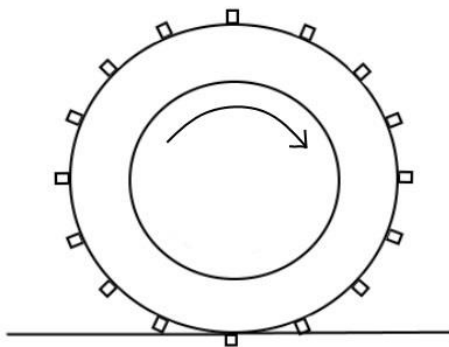
3.1 Traktorin vetokyky

Traktorille tyypillisimpiä työtehtäviä on erilaisten kärkyjen tai liitettävien työkoneiden vetäminen. Traktorin vetokykyyn vaikuttavat alusta, renkaiden vierintävastus ja traktorin massa. Alusta vaikuttaa traktorin vetokykyyn, niin renkaiden vierintävastuksen kautta, kuin alustan leikkauslujuuden kautta. Seuraavaan taulukkoon on koottu traktorin renkaiden tyypillisiä vierimisvastuskertoimia.

Taulukko 3.1 Tyypillisiä traktorin renkaiden vierimisvastuskertoimia. [29]

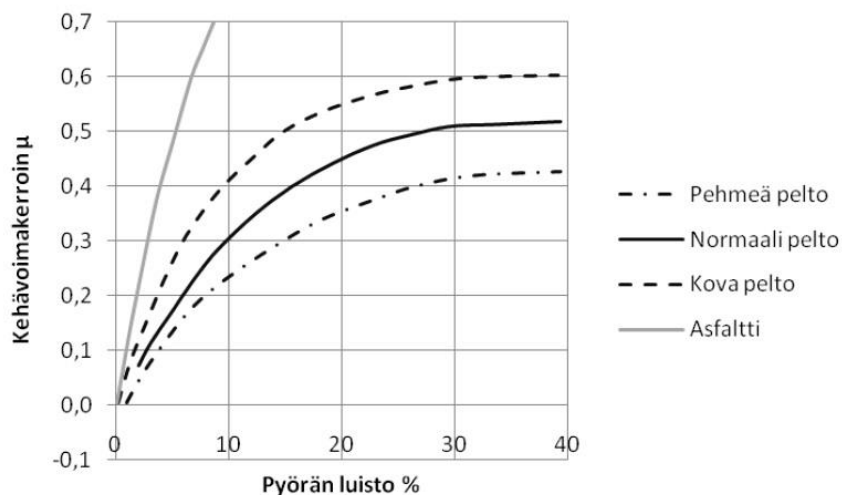
Alusta	Vierimisvastuskerroin f
Asfaltti	0.02
Soratie	0.04 – 0.05
Normaali pelto	0.07 – 0.10
Pehmeä pelto	0.10 – 0.30

Vierimisvastuskertoimen f arvot ovat alustojen keskimääräisiä arvoja. Kuitenkin vierimisvastukseen vaikuttaa lisäksi renkaan koko ja rengaspaine. Verrattaessa traktorin renkaiden vierintävastusta asfaltilla 0.02 henkilöauton vierintävastukseen asfaltilla 0.007 – 0.014 [30], huomataan työkoneiden renkaiden vierintävastusten olevan aivan omassa luokassaan. Toinen alustan tyyppin mukanaan tuoma vaikutus traktorin vetokykyyn on alustan ja renkaan välinen pito. Traktorin renkaan pito muodostuu, etenkin pehmeällä alustalla, alustan leikkauslujuudesta, kun renkaan ripa uppoaa alustaan ja pyrkii leikkaamaan sitä. Seuraavassa kuvassa 3.1 on havainnollistettu traktorin rengasta pehmeällä alustalla.



Kuva 3.1 Traktorin renkaan pito perustuu alustan leikkauslujuuteen

Tätä alustan leikkauslujuutta kuvataan seuraavassa kuvassa kehävoimakertoimena μ .



Kuva 3.2 Tyypillisiä kehävoimakertoimia. [29]

Tarkasteltaessa edellistä kuvaa 3.2 havaitaan kehävoimakertoimen muuttuvan luiston funktiona. Luiston arvoa 20 % on etenkin katsottava tarkemmin, sillä tällöin ei synny vielä maaperään merkittävää uraa, jonka rengas olisi kaivanut siihen. Ahokas on käsitellyt ”Traktorit ja työkoneet” [29] kappaleessa ”5.6 Renkaiden vaikutus” tarkemmin rengaspaineen ja rengaskoon vaikutusta traktorin vetokykyyn.

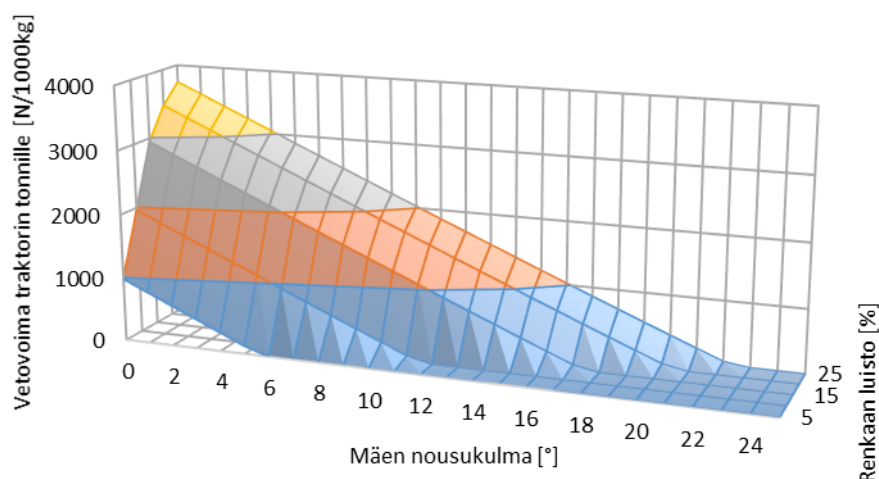
Nyt voidaan vierintävastusten, taulukon 3.1, ja kehävoimakertoimien, kuvan 3.2, avulla laskea traktorin vetovoima seuraavalla yhtälöllä

$$F_t = mg(\mu - f), \quad (3.1)$$

jossa m on traktorin massa, g on putoamiskiihtyvyys, μ on kehävoimakertoimen kuvasta 3.2 ja f on vierintävastus taulukosta 3.1. Tarkasteltaessa traktorin vetokykyä mäessä, otetaan mukaan mäen nousu- tai laskukulma α

$$F_t = mg(\mu - f - \sin \alpha). \quad (3.2)$$

Seuraavassa kuvassa on esitetty miten traktorin vetovoima käyttäytyy mäen ja luiston muuttuessa, kun alustana on normaali pelto.



Kuva 3.3 Traktorin vetovoima, yhtälön (3.2) mukaan, painon tonnille eri renkaan luiston ja mäen nousukulman arvoilla, kun alustana on normaali pelto.

Kuvaajasta 3.3 havaitaan, että luiston kasvaessa tiettyyn rajaan asti traktorin vetovoima myös kasvaa, mikä voidaan havaita myös kehävoiman kuvaajasta kuva 3.2. Toisaalta pehmeällä alustalla ajettaessa mäen nousukulma pudottaa traktorin vetovoiman lopulta nolnaan, mikä tarkoittaa traktorin pysähtymistä.

Luiston kasvattaminen ei kuitenkaan ole ainoastaan positiivinen asia, sillä iso luisto aiheuttaa peltoon renkaiden muodostamia uria sekä häviötehoa luistossa. Luiston häviötehoa, P_s , voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä

$$P_s = mg\mu v \frac{s}{1-s}, \quad (3.3)$$

jossa v on ajonopeus ja s on luisto.

3.2 Peräkärri

Tyypillisimpiä työtehtäviä traktoreille maatalouskäytössä on vetää erilaisia peräkärriä. Tarkastellaankin seuraavaksi minkä kokoista kärriä traktorilla voi vetää. Kärriä vedettäessä vastustavia voimia ovat kärriin vierintävastus sekä mäen aiheuttama rinnevastus. Vierintävastusta, F_v , voidaan arvioida yhtälöllä

$$F_v = mgf, \quad (3.4)$$

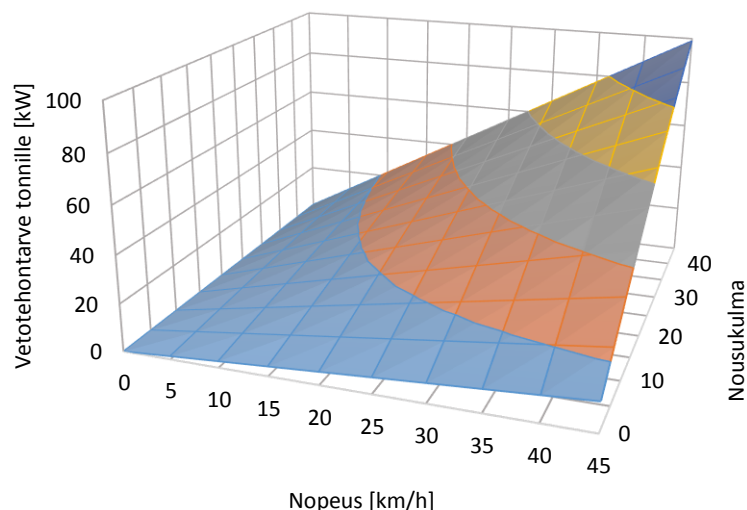
jossa m on kärriin kokonaismassa ja f on vierintävastuskerroin edellisen kappaleen taulukosta 3.1. Rinteen aiheuttamaa vastusta, F_r , voidaan arvioida yhtälöllä

$$F_r = mg \sin \alpha, \quad (3.5)$$

jossa α on mäen nousukulma. Tarkasteltaessa paljonko tehoa peräkärri tarvitsee liikkuakseen, saadaan tulos seuraavalla yhtälöllä

$$P_{\text{veto}} = (F_v + F_r)v = (mgf + mg \sin \alpha)v. \quad (3.6)$$

Seuraavassa kuvassa nähdään kuinka paljon vetotehoa kärri tarvitsee kärriin kokonaismassan tonnia kohden.



Kuva 3.4 Peräkärryn vetotehontarve kärryn kokonaismassan tonnille ajettaessa normaalilla pellolla. Arvot on saatu yhtälöllä (3.6).

Kuvasta 3.4 havaitaan, että merkittävin vastusvoima kärkeä vedettäessä on mäen kaltevuuden aiheuttama nousuun vaadittava voima. Toisaalta laskeuduttaessa rinteä alas tämä potentiaalienergia on mahdollista varastoida takaisin akustoihin. Tarkasteltaessa toista vastustavan voiman komponenttia, vierintävastusta yhtälöstä (3.4), havaitaan alustan mukanaan tuoman vierintävastuskertoimen, f , arvojen, taulukko 3.1, olevan suurempia pehmeillä alustoilla ja pieniä kovilla alustoilla. Tällöin ajettaessa tiellä ei tarvita niinkään paljon tehoa mitä edellisen kuvaajan pellolla ajettaessa tarvittaisiin.

3.3 Maanmuokkuskoneet

Maataloudessa yleisesti käytettäviä maanmuokkuskoneita ovat äkeet, kultivaattorit, lautasmuokkaimet, kyntöaurat, jyrät sekä näiden erilaiset yhdistelmäkoneet. Maata muokatessa tehontarpeeseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa maanlaatu, -kosteus, työskentelysyyvyys, -leveys ja ajonopeus. Ahokas on käsitellyt [29] kappaleessa ”4.3.1 Yleinen vetovastuksen yhtälö” yleisellä tasolla maanmuokkauksen tehontarvetta, mutta tarkastelemme nyt maanmuokkuskoneiden tehontarvetta suuntaa-antavasti valmistajien ilmoittamien tehontarpeiden perusteella. Maanmuokkuskoneen vaatima vetovoima F_{veto} työleveyyden metrille voidaan arvioida seuraavan yhtälön avulla

$$F_{\text{veto}} = \frac{P_{\text{tehontarve}}}{bv_{\text{arvio}}}, \quad (3.7)$$

jossa $P_{\text{tehontarve}}$ on valmistajan ilmoittama tehontarve, b on työleveys ja v_{arvio} on arvio millä nopeudella valmistaja on ilmoittanut työkoneen vaatiman tehontarpeen. Ajettaessa kaltevalla pinnalla voidaan maanmuokkuskoneen traktorilta vaatima teho arvioida yhtälön (3.6) tapaisesti, kun vaihdetaan vierintävastuksen vaatima voima maanmuokkuskoneen vetovoimalla

$$P_{\text{veto}} = (F_{\text{veto}} + F_r)v = \left(\frac{P_{\text{tehontarve}}}{bv_{\text{arvio}}} + mg \sin \alpha \right) v. \quad (3.8)$$

Tarkastellaan seuraavaksi tyypillisimpiä maataloudessa tarvittavia maanmuokkuskoneita.

3.3.1 Kultivaattori

Kultivaattori on maatalouden työväline, jolla on tarkoitus hajottaa ja murustaa maan rakennetta aina 40 cm syvyyteen saakka. Kultivaattorissa erilaisia piikkejä vedetään maan sisällä, jolloin maa murentuu.



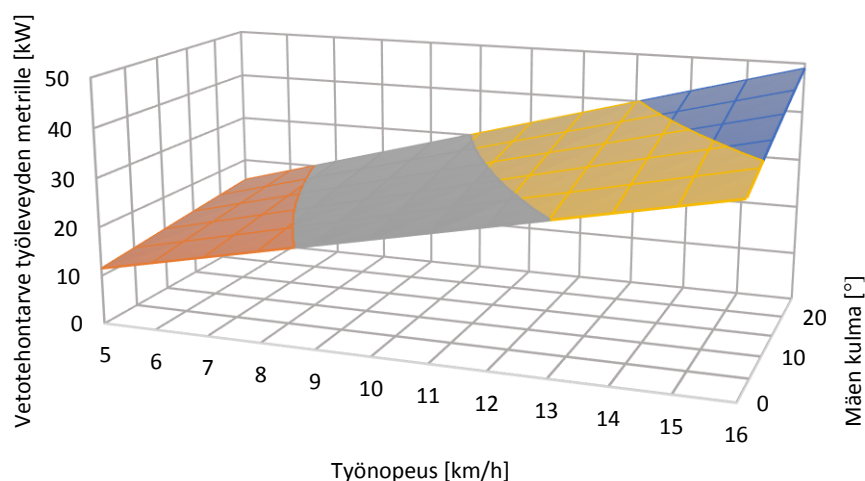
Kuva 3.5 Esimerkki kultivaattorista. [31]

Seuraavassa taulukossa on esitetty Väderstadin Swiftin vähimmäisvetotehontarpeita.

Taulukko 3.2 Väderstadin Swift-kultivaattoreiden tehontarpeita [32]

Malli	400	440	560	720	870
Tehontarve [kW]	97	104	127	164	194
Työleveys [m]	4.06	4.45	5.60	7.15	8.70
Piikkien määrä	21	23	29	37	45
Paino [kg]	3 000	3 100	3 500	4 600	5 100

Taulukon 3.2 arvoista saadaan keskimäärin vetotehontarpeeksi noin 4.5 kW piikkiä kohden ja noin 23 kW työleveysmetriä kohden. Oletettavasti työskentelynopeus on tällöin 10 km/h, sillä esitteessä [32] mainitaan tämän olevan alin nopeus, jolla saadaan paras työnlaatu. Tällöin kultivaattorin keskimääräiseksi vetovoimantarpeeksi saadaan yhtälöllä (3.7) noin 8.3 kN työleveyden metrille. Keskimääräiseksi painoksi työleveyden metrille taulukon 3.2 kultivaattoreille saadaan noin 660 kg. Tällöin saadaan seuraavassa kuvassa esitetty kultivaattorimallien keskimääräinen tehontarve työskentelyleveyttä kohden eri nopeuksilla ja eri mäen nousukulmilla yhtälön (3.8) mukaan.



Kuva 3.6 Arvio kultivaattorin tehontarpeesta työleveyden metrille suhteessa työskentelynopeuteen yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.6 saadaan jonkinlainen arvio kultivaattorin tehontarpeesta, mutta mitoitettaessa traktorin vetotehoa on kuitenkin muistettava, ettei kuvassa ole huomioitu eri työsyvyyyksiä, eikä eri maalajeja. Lisäksi työstettäessä mäkiä peltoja tuo mäen nouseminen vielä oman

lisätehontarpeensa. Kuvaaja antaa kuitenkin suuntaa antavan vähimmäisarvon mitoitettaessa traktoria ja kultivaattoria toisiinsa.

3.3.2 Lautasmuokkain

Lautasmuokkain on maatalouden maanmuokkaukone, jolla maanmuokkaus tapahtuu kultivaattoria pinnemmassa. Syvimmillään lautasmuokkaimet toimivatkin enintään 15 cm syvyydessä mallista riippuen. Lautasmuokkaimessa lautaset leikkaavat ja murentavat maata sekoittaen kasviperäistä puintijätettä maan sisään. Usein lautasten perässä on vielä jyrä tiivistämässä muokattua maata ylimääräisen eroosion minimoimiseksi.



Kuva 3.7 Esimerkki lautasmuokkaimesta. [31]

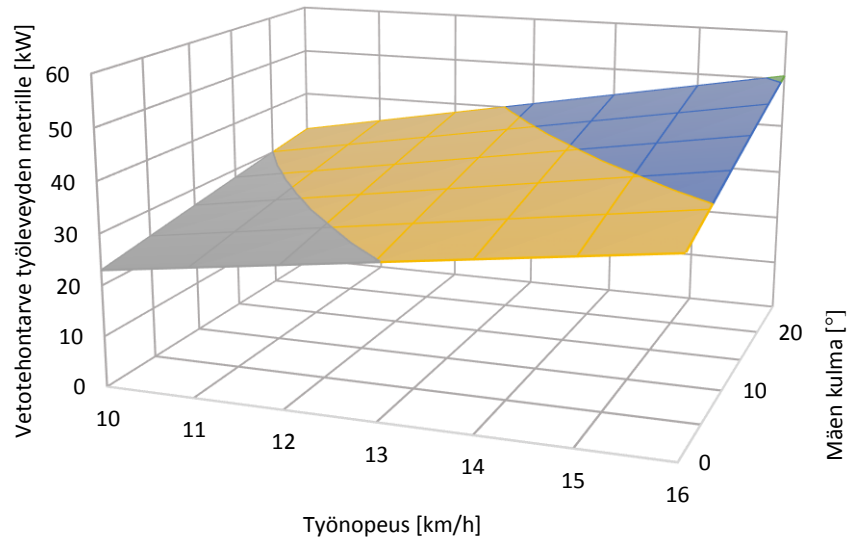
Seuraavassa taulukossa on esitetty Väderstad Carrier-lautasmuokkainten tehontarpeita.

Taulukko 3.3 Väderstad Carrier-lautasmuokkainten tehontarpeita [32]

Malli	300	350	400	420	500	650	820	1225
Vetotehontarve [kW]	63	75	82	90	112	142	187	276
Työleveys [m]	2.64	3.19	3.66	3.94	4.95	6.44	7.94	11.94
Paino alk. [kg]	1900	2100	2300	3400	4050	4990	5960	9750

Taulukon 3.3 arvoista saadaan laskettua lautasmuokkaimen keskiarvoiseksi vetotehontarpeeksi työskentelyleveyden metrille noin 23 kW/m. Oletetaan valmistajan ilmoittamalle vetotehontarpeelle työskentelynopeudeksi taas 10 km/h, jolloin keskimääräiseksi vetovoimaksi työskentelyleveyden metrille saadaan noin 8.3 kN/m. Laskettaessa lautasmuokkainten keskimääräistä painoa, saadaan tulokseksi työleveyden metrille noin 750 kg/m. Tällöin saadaan

lautasmuokkaimen keskimääräinen tehontarve työskentelyleveyden metrille eri nopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) avulla, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.8 Arvio lautasmuokkaimen vetotehon tarpeesta työskentely leveyden metriä kohden eri nopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.8 saadaan jonkinlainen arvio mitoitettaessa lautasmuokkaimen vetotehontarvetta ja traktoria yhteen. Lisäksi on muistettava mitoituksessa ottaa huomioon eri maalajien ja olosuhteiden tuomat lisätehontarpeet.

3.3.3 Kyntöaura

Kyntöauraa käytetään maan muokkaukseen, jossa pintamaa käännetään syksyllä ympäri. Tällöin puinnin kasvijätteet sekä rikkakasvit jäävät maan sisään ja tehostetaan roudan maata murentavaa vaikutusta.



Kuva 3.9 Esimerkki kyntöaurasta. [33]

Kyntöauran vetovastusta voidaan arvioida Ahosen [29] esittämällä yhtälöllä

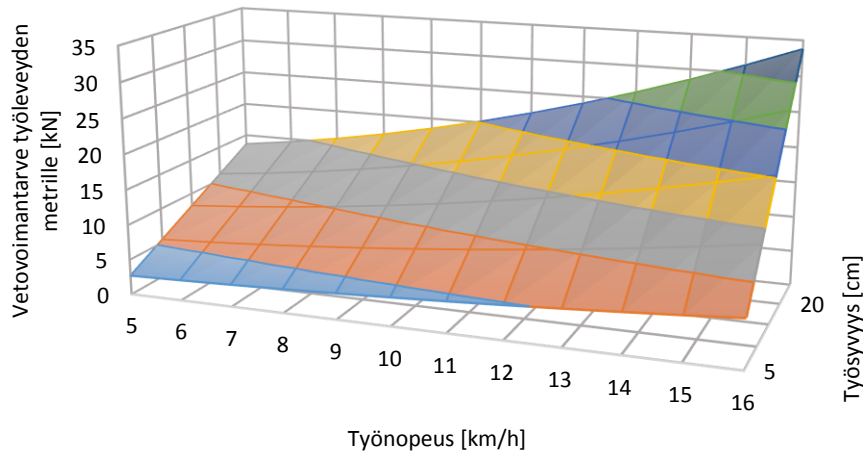
$$F_t = M(A + Bv + Cv^2)bd, \quad (3.9)$$

jossa M on maalajista riippuva kerroin, A on peruserroin, B on ajonopeudesta lineaarisesti riippuva kerroin, C on ajonopeuden neliöstä riippuva kerroin, v on ajonopeus, b on työleveys ja d on työsyvyys. Ajonopeudesta on huomioitava, että tähän yhtälöön se on sijoitettava yksiköllä km/h. Sijoitetaan yhtälöön Ahosen ”Traktorit ja työkoneet” sivulta 21 taulukosta 4.2 [29] seuraavat arvot.

Taulukko 3.4 Ahosen ”Traktorit ja työkoneet” sivulta 21 taulukosta 4.2 [29] arvot kyntöauralle yhtälöön (3.9).

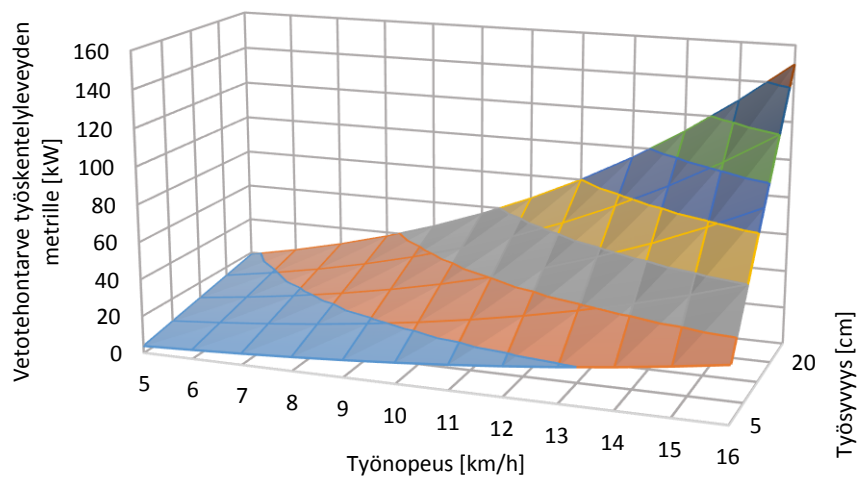
Muuttuja	Arvo
M	0.7
A	65 kN/m ²
B	0 kN/(m ² km/h)
C	0.5 kN/(m ² km ² /h ²)
d	0,05-0,25 m
b	1 m

Tällöin saadaan kyntöauralle yhtälöllä (3.9) työlevyden metrille vetovastuksen arvoksi seuraavan kuvan mukaiset tulokset.



Kuva 3.10 Arvio yhtälön (3.9) mukaan kyntöauran vetovoimantarpeesta työlevyden metriä kohden eri nopeuksilla työsyvyyden ollessa välillä 5 - 25 cm.

Kun edellisen kuvan 3.10 vetovastus kerrotaan vielä työnopeudella, saadaan arvio tarvittavasta vetotehontarpeesta, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.11 Arvio kyntöauran vetotehontarpeesta työlevyden metriä kohden eri nopeuksilla työsyvyyden ollessa 5 – 25 cm.

Kahdesta edellisestä kuvasta, kuvat 3.10 ja 3.11, nähdään, ettei tehontarve käyttäydy lineaarisesti nopeuden muuttuessa. Kuitenkaan tällä työskentelynopeusvälillä ei tehontarve kasva eksponentiaalisen räjähdysmäisesti, jolloin työkoneiden arviot lineaarisesta tehontarpeen muutoksesta eivät vie tarkasteluja paljoakaan virheelliseen suuntaan.

3.3.4 Jyrä

Jyrä on maataloudessa käytettävä työkone, jolla tiivistetään ja hienonnetaan pintamaa aieman maanmuokkauksen jäljiltä, jolloin saadaan minimoitua eroosion vaikutus peltoon.



Kuva 3.12 Esimerkki jyrästä. [31]

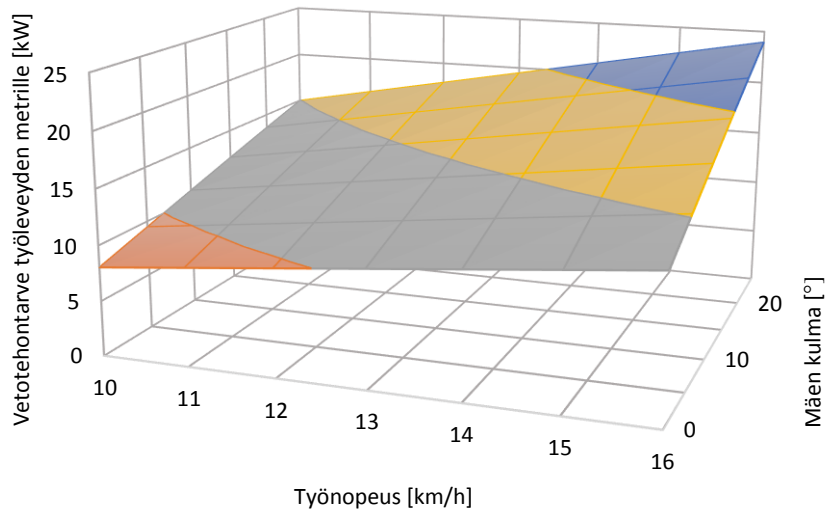
Seuraavaan taulukkoon on kasattu Väderstadin Rexius-jyrien vetotehontarpeita.

Taulukko 3.5 Väderstadin Rexius-jyrien vetotehontarpeita [32]

Malli	650	820	940	1020
Vetotehontarve [kW]	52	67	75	82
Työleveys [m]	6.5	8.2	9.4	10.2
Paino alk. [kg]	3 820	5 900	5 200	5 550

Taulukon 3.5 arvoista saadaan jyrän keskimääräiseksi tehontarpeeksi työleveyden metriä kohden noin 8 kW/m, joka on vetovoimana noin 2.9 kN/m, kun oletetaan vetotehon tarpeen olleen ilmoitettu 10 km/h nopeudella. Jyrälle saadaan taulukon 3.5 arvoista keskimääräiseksi

painoksi työleveyden metrille noin 600 kg/m. Tällöin saadaan arvio jyrän vetotehon tarpeesta eri nopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.13 Arvio jyrän vetotehontarpeesta työleveyden metriä kohden eri nopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.13 saadaan arvio jyrän vetotehon tarpeesta, kun mitoitetaan traktoria ja jyrää yhteen.

3.4 Kylvökoneet

Maata viljeltäessä muokattu maa seuraavaksi kylvetään. Tarkasteltaessa uusia maatalouden työkoneita voidaan huomata, että myös koneenvalmistajat pyrkivät tekemään koneistaan entistä monipuolisempia ja tehokkaampia. Tällä saadaan vähennettyä työvaiheita ja säästetään aikaa sekä polttoainetta. Koneiden monipuolistuessa onkin joissain tapauksissa entistä hankalampi määrittellä, mikä on maanmuokkaukone ja mikä kylvökone, kun maanmuokkaukoneella kylvetään maata muokattaessa ja kylvökoneella samalla työvaiheella muokataan maata. Tarkastellaan seuraavaksi perinteisempää viljojen kylvökonetta, tarkkuus- ja suora-kylvökonetta.

3.4.1 Kylvökone

Aloitetaan tarkastelu perinteisemmän tyylisestä kylvökoneesta, jolla on tarkoitus kylvää valmiiksi muokattuun peltoon. Tällöin kylvökoneen omat maanmuokkaimet ovat minimaaliset ja tarvittava traktorin vetoteho on myös pienempi.



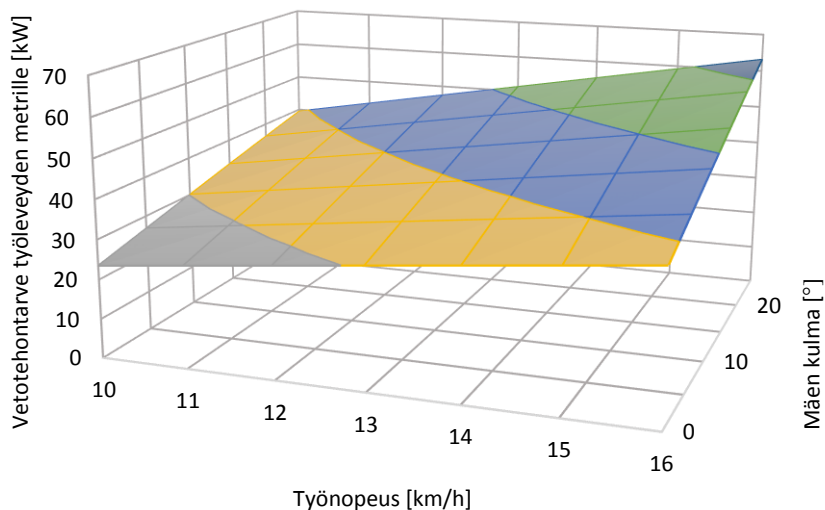
Kuva 3.14 Esimerkki kylvökoneesta. [31]

Seuraavaan taulukkoon on kasattu Väderstadin Rapid C- ja S-sarjan kylvökoneiden vähimmäistehontarpeita.

Taulukko 3.6 Väderstadin Rapid C- ja S-sarjan kylvökoneiden vähimmäistehontarpeita [34]

Malli	RD 300S	RD 300C	RD 400S	RD 400C
Tehontarve [kW]	67	75	90	97
Työleveys [m]	3.0	3.0	4.0	4.0
Paino [kg]	4 200	4 900	4 600	5 400

Taulukon 3.6 arvojen perusteella keskimääräiseksi vähimmäisvetotehontarpeeksi työleveyden metrille saadaan noin 24 kW/m, joka on noin 8.5 kN/m, kun oletetaan valmistajan ilmoittaman tehontarpeen olevan 10 km/h työnopeudella ja keskimääräiseksi painoksi työleveyden metrille saadaan noin 1 400 kg/m. Tällöin keskimääräiseksi vähimmäistehontarpeeksi työleveyden metrille saadaan yhtälön (3.8) avulla eri työnopeuksille ja pintojen kaltevuuksille seuraavan kuvan mukaisia tehoja.



Kuva 3.15 Arvio kylvökoneen vähimmäistehontarpeesta työleveyden metrille eri työnopeuksilla ja pintojen kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.15 saadaan suuntaa-antava käsitys vetotehontarpeesta, kun mitoitettaessa traktoria ja kylvökonetta toisiinsa. On kuitenkin muistettava, että kylvökoneen maanmuokkainten muuttaminen aggressiivisemmiksi kasvattaa vetotehontarvetta.

3.4.2 Tarkkuuskylvökone

Tarkkuuskylvökone on kylvökone, jolla kylvetään halutulla rivi- ja siemenvälillä. Näin kylvettäviä lajikkeita ovat esimerkiksi auringonkukka, porkkana ja sokerijuurikas.



Kuva 3.16 Esimerkki tarkkuuskylvökoneesta. [31]

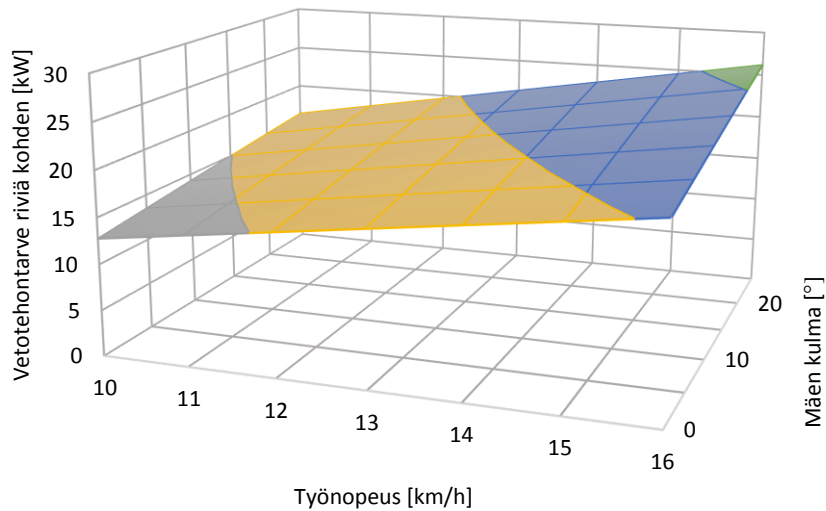
Väderstadin Tempo R-sarjan tarkkuuskylvökoneen tehovaatimuksia on kasattu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 3.7 Väderstadin Tempo R-sarjan tarkkuuskylvökoneen tehontarpeen vähimmäisarvoja [34]

Malli	R4	R6	R6	R6	R7
Rivimäärä	4	6	6	6	7
Riviväli [mm]	700- 800	450- 500	700- 800	900- 1000	600
Tehontarve [kW]	52	52	75	112	75
Työleveys [m]	2.8-3.2	2.7-3.0	4.2-4.8	5.4-6.0	4.2
Paino [kg]	1 500	1 700	1 900	2 200	2 000

Malli	R8	R9	R12	R12
Rivimäärä	8	9	12	12
Riviväli [mm]	700- 800	600	450- 500	700- 800
Tehontarve [kW]	112	112	112	187
Työleveys [m]	5.6-6.4	5.4	5.4-6.0	8.4-9.6
Paino [kg]	2 500	2 700	3 200	3 600

Taulukon 3.7 arvoista saadaan laskettua keskimääräiseksi tehontarpeeksi riville noin 13 kW ja työskentelyleveyden metriä kohden noin 18 kW. Oletetaan, että suurin osa kokonaistehontarpeesta tarvitaan vetotehoksi ja että valmistajan ilmoittamien tehontarpeiden työnopeutena on 10 km/h, saadaan tällöin keskimääräiseksi voiman tarpeeksi noin 4.6 kN riviä kohden ja noin 6.5 kN työleveyden metriä kohden. Keskimääräiseksi painoksi taulukon 3.7 arvoista saadaan tarkkuuskylvökoneen riville noin 310 kg/rivi ja työleveyden metrille noin 450 kg/m. Nyt voidaan esittää arvio tehontarpeesta yhtälön (3.8) avulla eri työnopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.17 Arvio tarkkuuskylvökoneen vähimmäistehontarpeesta riville eri työskentelynopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.17 voidaan arvioida tarvittavaa vähimmäistehontarvetta, kun mitoitetaan traktoria ja tarkkuuskylvökonetta toisiinsa.

3.4.3 Suorakylvökone

Suorakylvöllä tarkoitetaan kylvämistä edellisen kasvukauden sängin sekaan ilman maanmuokkaamista. Suorakylvötekniikoilla saadaan säästöä kokonaisenergian kulutuksessa ja etenkin ajassa, jolloin kylvö voidaan suorittaa kokonaisuudessaan optimaalisimmalla ajankohdalla.



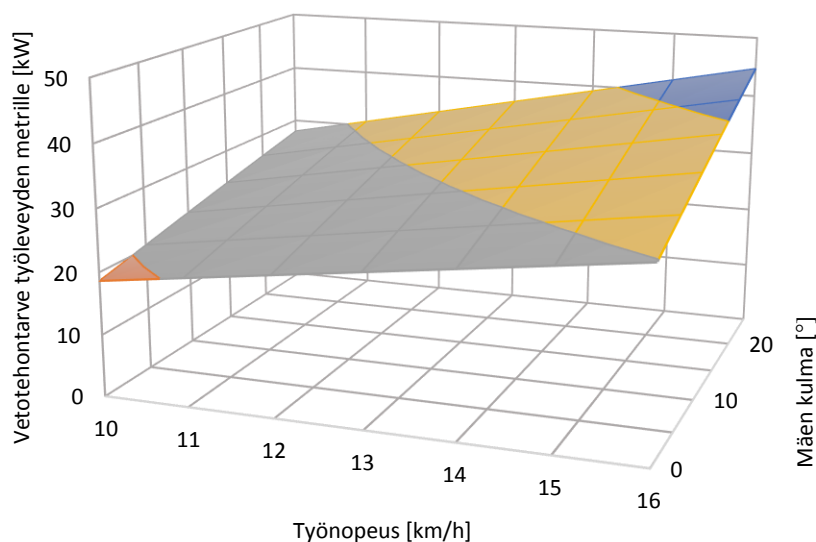
Kuva 3.18 Esimerkki suorakylvökoneesta. [31]

Fäderstadin Speed Hawk-suorakylvökoneiden vähimmäistehontarpeita on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 3.8 Fäderstadin Speed Hawk-suorakylvökoneen vähimmäistehontarpeita [34]

Malli	SH 600C	SH 800C
Tehontarve [kW]	112	149
Työleveys [m]	6.0	8.0
Paino [kg]	5 100	6 100

Taulukon 3.8 arvoista saadaan suorakylvökoneelle vähimmäistehontarpeeksi työleveyden metrille keskimäärin noin 19 kW/m, joka on noin 7 kN/m, kun oletetaan valmistajan ilmoittaman tehontarpeen olleen 10 km/h nopeudessa. Suorakylvökoneen keskimääräiseksi painoksi työleveyden metrille saadaan taulukon 3.8 arvoista noin 800 kg/m. Nyt saadaan arvio suorakylvökoneen tehontarpeesta eri työnopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.19 Arvio suorakylvökoneen tehontarpeesta työleveyden metrille eri työnopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla yhtälön (3.8) mukaan.

Kuvasta 3.19 saadaan arvio suorakylvökoneen vähimmäistehontarpeesta, kun mitoitettaessa traktoria ja suorakylvökonetta yhteen. On kuitenkin muistettava, että eri maalaadut vaikuttavat tehontarpeeseen lisäävästi.

3.5 Niittomurskaimet

Niittomurskainkoneita käytetään enenevässä määrin perinteisten niittokoneiden tilalla, kun halutaan tehostaa niitettävän kasvimassan kuivumista.



Kuva 3.20 Esimerkki niittomurskaimesta. [35]

Seuraavaan taulukkoon on kasattu Kronen eri niittomurskainten teknisiä tietoja.

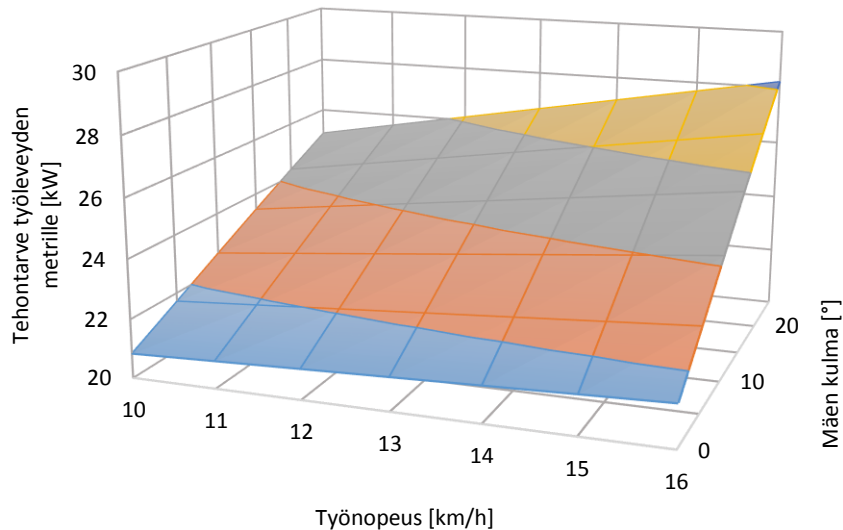
Taulukko 3.9 Kronen niittomurskainten teknisiä tietoja [35] ja [36].

	Etunostin-mallit		Taakse kytkettävät		Perhosyhdistelmä
	EC 28CV	EC 32 CV Float	EC 280 CV-Q	EC 320 CV-Q	
Malli	EC 28CV	EC 32 CV Float	EC 280 CV-Q	EC 320 CV-Q	EC B 1000 CV + EC 32 CV Float
Tehontarve [kW]	51	60	58	66	190
Paino [kg]	880	980	1 060	1 180	4 380
Työleveys [m]	2,71	3,14	2,71	3,14	10,1

Taulukon 3.9 arvoista saadaan keskimääräiseksi voiman ulosoton tehontarpeeksi työleveyden metrille, P_{PTO} , noin 20 kW/m ja keskimääräiseksi painoksi työleveyden metrille noin 370 kg/m. Niittomurskaimen tehontarvetta voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä

$$P = P_{PTO} + mg(f + \sin \alpha)v. \quad (3.10)$$

Nyt voidaan esittää seuraavassa kuvassa arvio niittomurskaimen tehontarpeesta eri työnopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla, kun vierimisvastuksen arvo f on taulukosta 3.1 normaalin pellon 0.1.



Kuva 3.21 Arvio yhtälön (3.10) mukaan niittomurskaimen keskimääräisestä tehontarpeesta työlevyden metrille eri työnopeuksilla ja pinnan kaltevuuksilla, kun alustana on normaali pelto.

Kuvasta 3.21 havaitaan, että suurin osa niittomurskaimen tehontarpeesta tulee suoraan voimanulosotosta, mutta kuitenkin ajettaessa mäkisellä pellolla tarvitaan traktorilta lisätehoa mäen nousemiseen.

3.6 Paalaimet

Paalaimille tyypillistä on, että niiden tehontarve ei siirry niihin suoraan vetämällä ja hydraulilla, vaan niissä suurin osa tehontarpeesta siirretään voiman ulosoton kautta. Tällöin tarkastelussa on arvioitava kuinka paljon tehoa tarvitaan voiman ulosotosta ja kuinka paljon tehoa tarvitaan muuten. Lisäksi paalaimille on tyypillistä, että viimeisessä tiivistysvaiheessa hetkellisesti saatetaan tarvita jopa kaksinkertaisesti tehoa keskimääräiseen tehoon verrattuna työnopeuden ollessa lähes seisahduksissa. Yleisimpiä paalaimia ovat pyöröpaalaimet, joissa kasvimaassa kiedotaan kerroksittain tiukalle rullalle, ja kanttipaalaimet, joissa kasvimaassa puristetaan halutun kokoiseksi kanttipaaliksi ja sidotaan kiinni.

3.6.1 Pyöröpaalain

Pyöröpaalaimella tyypillisesti kasataan niitetty ja pöyhitty kasvimassa talteen. Erilaisia pyöröpaalaimia on kiinteä- ja muuttuvakammioiset pyöröpaalaimet ja joihinkin on vielä integroitu lisäksi paalainkäärimet, jolloin säästytään yhdeltä erilliseltä työvaiheelta. Tarkastellaankin seuraavaksi pyöröpaalaimia, joissa on paalainkäärimet integroituna samaan työkooneeseen.



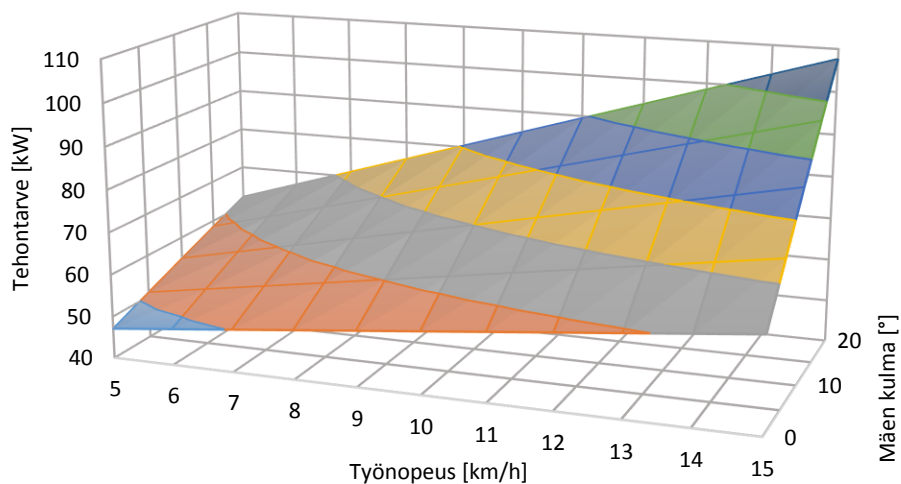
Kuva 3.22 Esimerkki paalainkäärimellisestä pyöröpaalaimesta. [37]

Seuraavaan taulukkoon on kasattu John Deeren 744-sarjan, Kronen Comprima ja Agronicin paalainkäärimellisten pyöröpaalainten tehontarpeita.

Taulukko 3.10 Paalainkäärimellisten pyöröpaalainten tehontarpeita [38] - [40].

Malli	JD 744	JD 744 Pre	KC CF 155 XC	KC CV 150 XC	ACC PulseM	1302 RRHiT
Tehontarve [kW]	89	89	51	51	80	70
Paalinkoko [m ³]	1.7	1.7	2.1	2.1	1.9	1.7
Paino [kg]	6 150	6 340	-	-	5 250	4 800

Oletetaan, että valmistajien ilmoittamat tehontarpeet ovat voiman ulosoton tehontarpeita. Tällöin taulukon 3.10 arvoista paalainkäärimellisille pyöröpaalaimille keskimääräiseksi voiman ulosotosta tarvittavaksi tehoksi paalin tilavuutta kohden saadaan, P_{PTO} , noin 40 kW/m³ ja paalainten keskipainoksi noin 3 200 kg/m³. Tällöin yhtälön (3.10) avulla saadaan arvioitua keskimääräinen kokonaistehontarve paalin kuutiometriä kohden, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.23 Arvio yhtälön (3.10) mukaan paalainkääräimellisen pyöröpaalaimen tehontarpeesta eri nopeuksilla ja rinteiden kaltevuuksilla paalin kuutiometriä kohden alustan ollessa normaali pelto.

Edellisestä kuvasta 3.23 voidaan arvioida suuntaa antavasti paalainkääräimellisen pyöröpaalaimen tehontarvetta mitoittaessa traktoria ja paalainta toisiinsa. Kuitenkin on muistettava, että paalin loppuvaiheen kiristyksessä traktorilta vaaditaan voimanulosotosta hetkellisesti jopa kaksinkertaisesti tehoa verrattuna keskimääräiseen tehontarpeeseen. Tämä on tärkeää ottaa huomioon mitoittaessa sähköistetyn traktorin voimanulosottoa.

3.6.2 Suurkanttipaalain

Toisin kuin pyöröpaalaimessa, kanttipaalaimessa paalattava kasvimassa tiivistetään ensin siivuksi, jonka jälkeen siivut puristetaan yhteen isommaksi kanttipaaliksi.



Kuva 3.24 Esimerkki suurkantipaalaimesta. [41]

Tarkastellaan seuraavaksi suurkantipaalainten tehontarpeita, joita on kasattu seuraavaan taulukkoon.

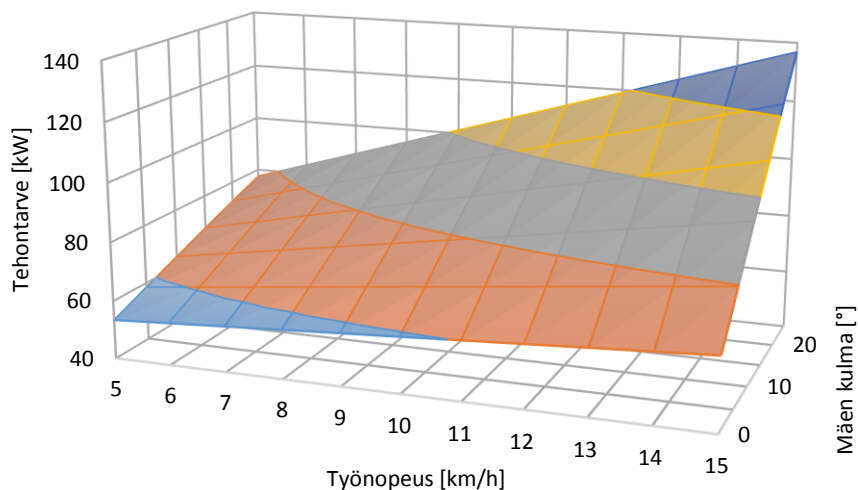
Taulukko 3.11 Krone Big Pack-suurkantipaalainten tehontarpeita. [41]

Malli	HS 890 XC	HS 1270 XC	HS 1290 XC	4 x 4 XC
Paalin max koko [m³]	1,944	2,268	2,916	4,992
Tehontarve alk. [kW]	95	100	105	145
Paino [kg]	8 560	9 740	10 020	12 340

Malli	HS 870 XC	HS 1290 HDP XC	1290 HDP II XC
Paalin max koko [m³]	1,512	3,456	3,456
Tehontarve alk. [kW]	120	145	190
Paino [kg]	9 600	12 630	15 800

Taulukon 3.11 arvoista saadaan laskettua suurkantipaalaimen keskimääräiseksi voiman ulosoton tehontarpeeksi paalin kuutiometrille noin 48 kW/m³ ja paalaimen keskimääräiseksi painoksi paalin kuutiometrille noin 4 200 kg/m³. Käytetään taas yhtälöä (3.10) arvioitaessa

suurkanttipaalaimen tehontarvetta, jolloin keskimääräiseksi kokonaistehontarpeeksi paalin kuutiometriä kohden saadaan arvioitua. Tämä on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.25 Arvio yhtälön (3.10) mukaan suurkanttipaalaimen tehontarpeesta eri nopeuksilla ja rinteiden kaltevuksilla paalin kuutiometriä kohden alustan ollessa normaali pelto.

Edellisestä kuvaajasta 3.25 voidaan arvioida suurkanttipaalaimen tehontarvetta, kun mitoitetaan suurkanttipaalainta ja traktoria yhteen. On kuitenkin muistettava näiden tehontarpeiden olevan keskiarvoisia ja traktorilta voidaan hetkittäin tarvita suurempaa tehoa, kuin on arvioitu.

3.7 Lumilinko

Viljelyskauden ulkopuolella etenkin pohjoisilla leveyspiireillä traktoreita käytetään usein kaupunkialueiden ja sivuteiden talvikunnossapitoon. Tarkastellaankin seuraavaksi lumilinkojen tehontarpeita. On kuitenkin muistettava, että lumen paksuus, kosteus ja jäisyys vaikuttavat huomattavasti niin tehontarpeeseen, kuin työnopeuteen, jolloin arvioidut tehontarpeet voivat olla todellisuudessa jossain määrin erilaisia. Lumilingon peruseriaate on, että lingon reuna kasaa lunta ja jonkinlainen kierukka tai lapa heittää lumen syöksytorven kautta tien sivuun.



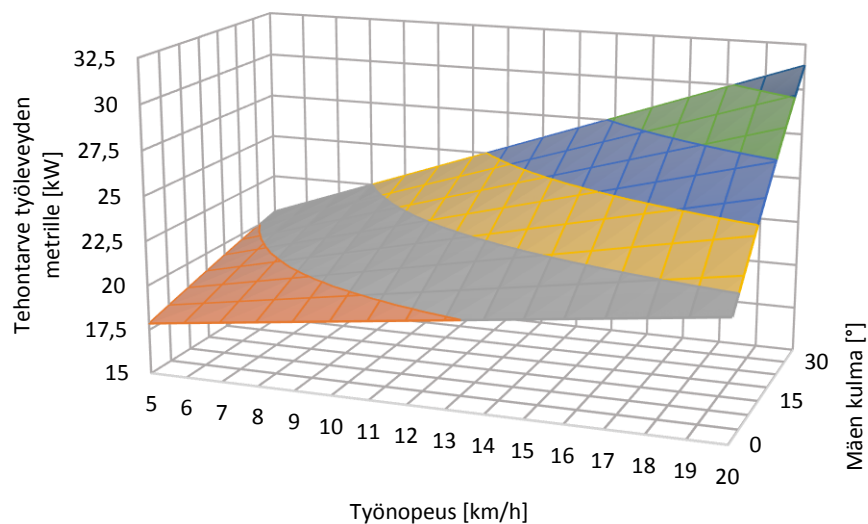
Kuva 3.26 Esimerkki lumilingosta. [42]

Lumilingon tehontarvetta on arvioitu määrittämällä eri linkojen keskimääräistä tehontarvetta ja painoa, jotka on kasattu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 3.12 Lumilinkojen teknisiä tietoja [42] ja [43].

Malli	Tempo		Nokka Esko	
	Lumi-linko 2.3	Lumi-linko 2.6	LV 3292	LR 4271
Tehontarve [kW]	20	45	40	60
Työleveys [m]	2.3	2.6	2.75	2.7
Paino [kg]	510	590	1 100	1 180
	Nokka Esko			
Malli	LR 4251	LV 3291	LV 312	LV 1232
Tehontarve [kW]	60	50	40	30
Työleveys [m]	2.5	2.75	2.75	2.25
Paino [kg]	750	1 100	920	350

Taulukon 3.12 arvoista saadaan keskimääräiseksi lumilingon voiman ulosotosta tarvitsemaksi tehontarpeeksi työleveyden metrille noin 17 kW/m ja keskimääräiseksi painoksi työleveyden metrille noin 310 kg/m. Kun lumisen tien vierintävastuskertoimeksi f oletetaan 0.3, saadaan yhtälöllä (3.10) arvio tarvittavasta lumilingon tehontarpeesta työleveyden metrille, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3.27 Lumilingon arvioitu tehontarve työleveyden metrille yhtälön (3.10) mukaan, kun keskimääräiseksi voimanulosoton tehontarpeeksi on arvioitu noin 17 kW/m, keskimääräiseksi painoksi on arvioitu noin 310 kg/m ja lumen vierintävastuskertoimeksi on arvioitu 0.3.

Kuvaajasta 3.27 huomataan, että lumilinko ei tarvitse suuria tehoja traktorilta. On kuitenkin muistettava, että märkä nuoskalumi painaa tilavuuteensa nähden enemmän, kuin kevyempi puuterilumi, jolloin traktorilta vaadittava tehontarve on tällöin suurempi.

3.8 Yhteenveto traktoriin liitettävistä työkoneista

Mitoitettaessa traktoria ja liitettävää työkoneita yhteen, voidaan käyttää apuna kolmannen kappaleen liitettävien työkoneiden tietojen pohjalta tehtyjä arvioita. Kuitenkin on muistettava, että maanmuokkauslaitteissa työsyvyys ja maanlaatu vaikuttavat vaadittavaan tehontarpeeseen. Seuraavaan taulukkoon on kasattu työkoneiden tehontarpeita yhteenvetona.

Taulukko 3.13 Yhteenveto traktoriin liitettävien työkoneiden tehontarpeesta työnopeuden ollessa 10 km / h

Työkone	Tehontarve @ 10 km/h, tasainen alusta
Peräkärri	2.7 kW / tonni
Kultivaattori	23 kW / m
Lautasmuokkain	23 kW / m
Kyntöaura, työsyvyys 10 cm	22 kW / m
Kyntöaura, työsyvyys 20 cm	45 kW / m
Jyrä	8 kW / m
Kylvökone	24 kW / m
Tarkkuuskylvökone	13 kW / rivi
Suorakylvökone	19 kW / m
Niittomurskain	21 kW / m
Pyöröpaalain	55 kW / m ³
Suurkanttipaalain	59 kW / m ³
Lumilinko	19 kW / m

Taulukon 3.13 arvoista voidaan havaita, että etenkin paalaimet tarvitsevat traktorilta paljon tehoa. Lisäksi on muistettava, että työkone ei ole useinkaan saatavilla yhden metrin levyisenä, vaan liitettävän työkoneen todellinen työleveys voi vaihdella kahdesta metristä yli kymmeneen metriin. Esimerkiksi kappaleessa 5 esitettävässä noin 75 kW:n hybriditraktorilla ei olisi mahdollista käyttää uudenmallisia isoja liitettäviä työkoneita, koska traktorin tehot eivät yksinkertaisesti riittäisi.

4. VIRTUAALIMALLI

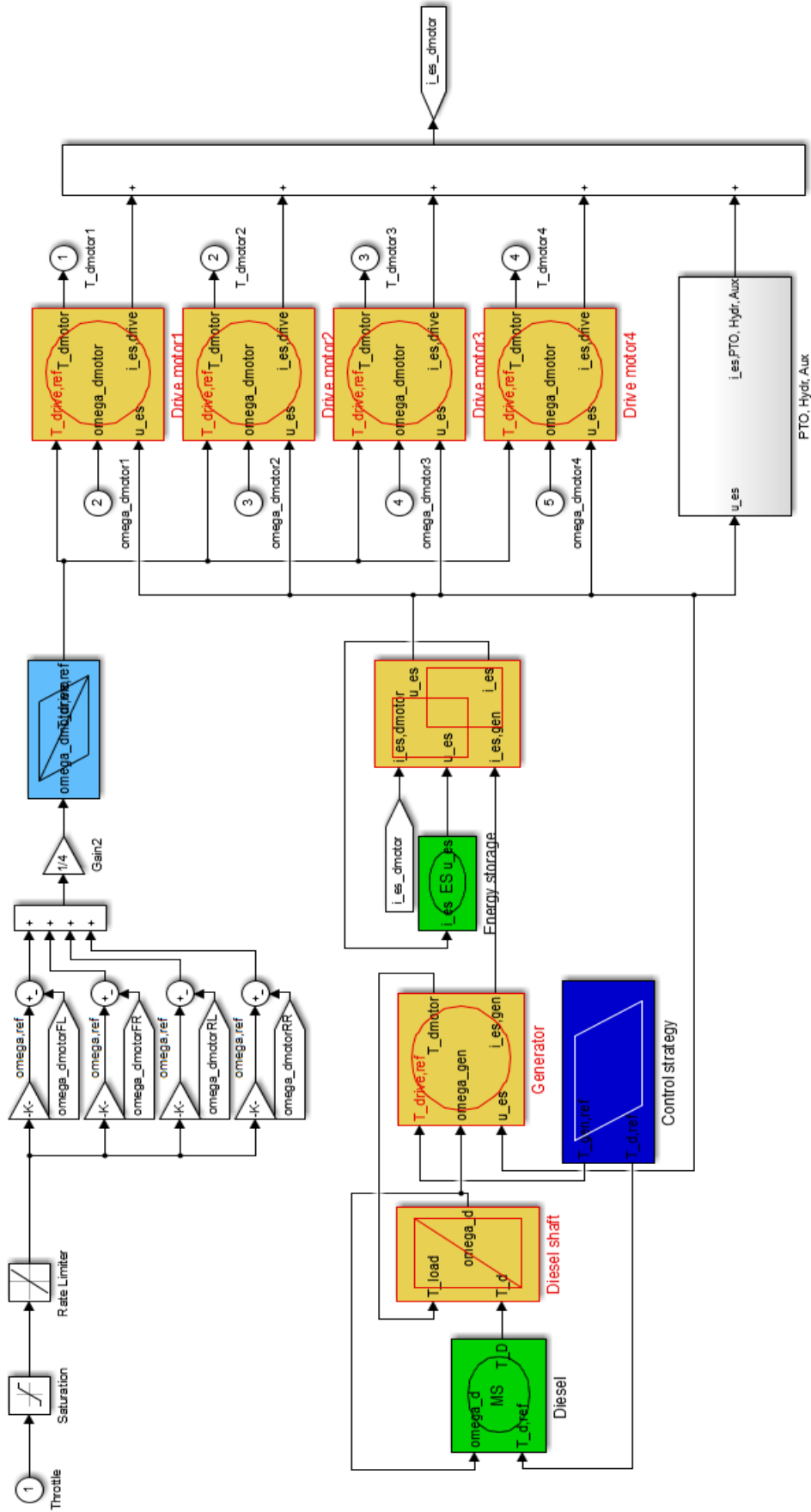
Virtuaalimallilla tarkoitetaan tässä työssä hybriditraktorin simulaatiomallia, jota on mahdollista vapaasti ohjata virtuaaliympäristössä reaaliaikaisesti. Työssä käytettävä virtuaalimalli on toteutettu Matlab- ja Mevea-ohjelmistoilla. Matlabissa simuloidaan dieselgeneraattoria, energiavarastoa, vaihtosuuntaajia, sähkökoneita, apu- ja järjestelmälaitteita, kun taas Meveassa simuloidaan traktorin mekaniikkaa ja visualisoidaan sekä traktoria että ympäristöä.

Työssä muutettiin Drive!-projektin hybriditraktorin simulaatiomallin 1/2016 versiosta ajomoottorin ohjausta, apu- ja järjestelmälaitteet siirrettiin dieselmoottorilta omille sähkökoneilleen, dieselgeneraattorin ohjausstrategia uusittiin ja Mevean simulaatiomalli muutettiin mitoiltaan ja painoiltaan vastaamaan kappaleessa 5 esitettyä case-traktoria. Lisäksi voiman ulosotolle ja työhydrauliikalle mallinnettiin yksinkertaiset kuormat sekä korjattiin joitain epätarkkuuksia ja virheitä.

Aikaisempia Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa LUT tehtyjä virtuaalimallinnuksia samassa ohjelmaympäristössä on vuosilta 2010 - 2015 muun muassa Kaikon geneerinen traktorimalli [44], Montosen, ym. sähkökäytön mitoitus käyttäen apuna virtuaalimallia [45], Nokan sähköajoneuvon sähkötekniikan ja mekaniikan yhdistelmäsimulaatio virtuaalimallilla [46], Huttusen Mevean aloittelijan tutoriaali [47] sekä Nokan, ym. työkoneen virtuaalimalliin pohjautuva mitoitusarkastelu [48].

4.1 Matlab

Matlabin Simulinkissä ylimmällä tasolla hoidetaan ohjelmien välinen tiedonsiirto. Ohjelmien välillä siirretään joka aika-askeleella Meveasta Simulinkkiin kaasupolkimen asento, ajomoottoreiden pyörimisnopeudet, vaihteiden pyörimisnopeudet ja vääntömomentit, renkaiden pyörimisnopeudet sekä vaihteen valitsijan tila. Simulinkistä Meveaan lähetetään jokaisella aika-askeleella ajomoottoreiden vääntömomentit, sekä vaihteistojen tilat. Simulaatiomalli mallintaa hybridijärjestelmässä dieselgeneraattorin, energiavaraston, ajomoottoreiden sekä apu- ja järjestelmälaitteiden toimintaa. Seuraavassa kuvassa 4.1 on esitetty hybridijärjestelmän Simulink-kaavio.

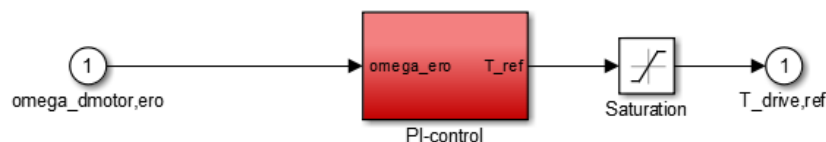


Kuva 4.1 Hybridijärjestelmän Simulink-kaavio.

Kuvassa 4.1 vasemmalla ylhäällä tuodaan malliin ”Throttle”-signaali, eli kaasusignaali, joka antaa ajomoottoreiden ohjaukselle ohjeen ajonopeudesta. Ohjain laskee ajomoottoreille vääntömomentin ohjearvon, jonka sähkökoneiden mallit tuottavat välitettäväksi lukuarvona Mevean simulaatioon. Siellä sähkökoneiden tuottama vääntömomentti muutetaan edelleen mallin liike-energiaksi. Kuvassa 4.1 vasemmalla alhaalla on dieselmootorin ja generaattorin simulaatiomalli, jota ohjataan energiavaraston varaustason mukaan. Apu- ja järjestelmälaitteita mallinnetaan kuvassa 4.1 oikealla alhaalla, jotka toimivat itsenäisesti ilman ulkoisia herätteitä. Tarkastellaan seuraavaksi hybridijärjestelmän mallia tarkemmin.

4.1.1 Sähkökoneiden ohjaus

Sähkökoneiden ohjaus on toteutettu PI-ohjaimella. Ohjain saa tuloarvonaan renkaiden pyörimisnopeuksien ja pyörimisnopeuksien ohjearvon keskimääräisen eron, jonka perusteella se laskee ajomoottoreiden vääntömomentille pyyntiarvon. Ohjaimen integraattorissa käytetään integroimismenetelmänä puolisuunnikkasmenetelmää ja saturaatiolla rajoitetaan vääntömomentin pyyntiarvo sähkökoneen suorituskyvyn mukaan. Apu- ja järjestelmälaitteiden ohjaimille on laitettu vielä lisäksi pyörimisnopeuden pyyntiarvolle On / Off -tyylinen kerroin, jolla kyseinen laite voidaan kytkeä simulaation asetuksista tarvittaessa pois päältä. Seuraavassa kuvassa 4.2 on esitetty sähkökoneen ohjaimen kaaviokuva.



Kuva 4.2 Ajomoottorin PI-säätäjän kaavio yltäasolla.

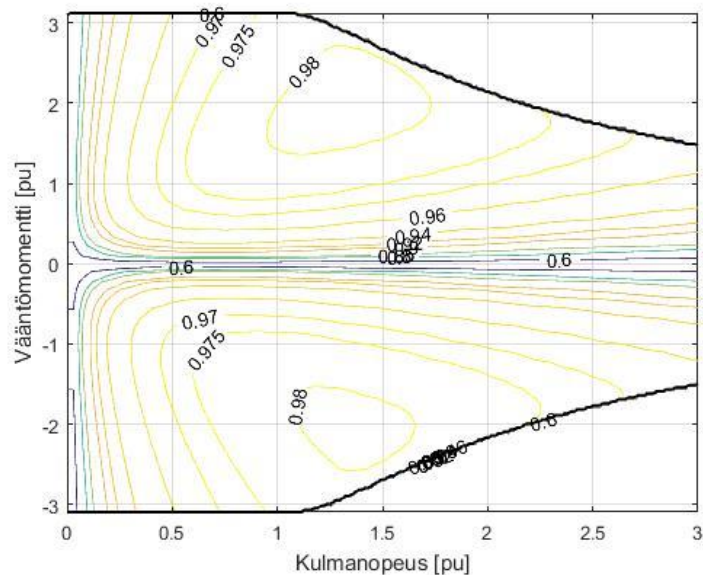
Toinen vaihtoehto ajomoottoreiden ohjaukseen voisi olla jättää integraattori ohjaimesta kokonaan pois ja skaalata kuvan 4.1 ”Throttle”-signaali sähkökoneiden maksimivääntömomentilla. Tällöin ohjaus muistuttaisi nykyisiä polttomoottoriajoneuvoja ja niiden kaasupoljinta.

Kolmas vaihtoehto ajomoottoreiden ohjaukseen voisi olla jokaisen ajomoottorin ohjaaminen omalla PI-ohjaimellaan. Tällöin ohjausta tulisi kehittää niin, että kääntyminen huomioitaisiin muuttuvalla parametrilla ja ajomoottoreiden voimantuotto pysyisi tasapainossa.

Kaikissa kolmessa ohjaustavassa on kuitenkin ongelmana, että mikään ajomoottori ei toimi optimitoiminta-alueellaan vajaan kuormituksen takia. Kokonaisenergiatehokkuutta optimoitaessa olisikin järkevintä tuottaa vaadittu teho esimerkiksi ensin taka-akselilla ja sitten etuakselilla, kun taka-akselin sähkökoneiden suorituskyky loppuu.

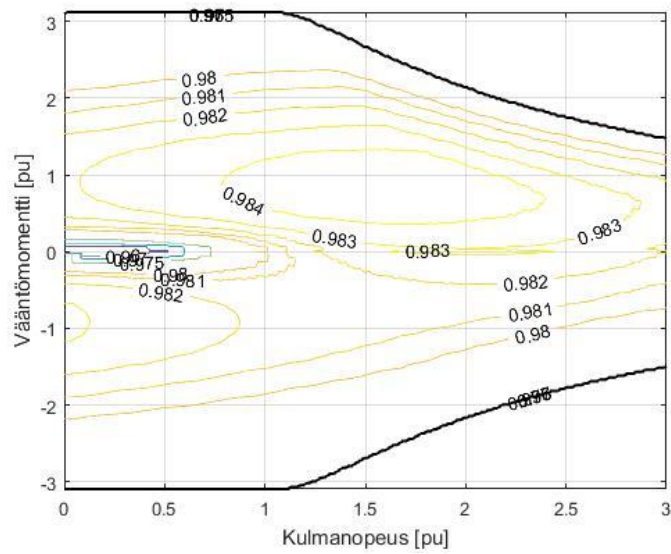
4.1.2 Sähkökoneen simulaatiomalli

Sähkökonetta ja vaihtosuuntaajaa mallinnettaessa on käytetty kestmagneettitahtikoneiden ja vaihtosuuntaajien hyötysuhdemalleja [49]. Seuraavassa kuvassa on esitetty kestmagneettitahtikoneen hyötysuhdekartta pu-yksiköissä.



Kuva 4.3 Kestomagneettitahtikoneen hyötysuhdekartta.

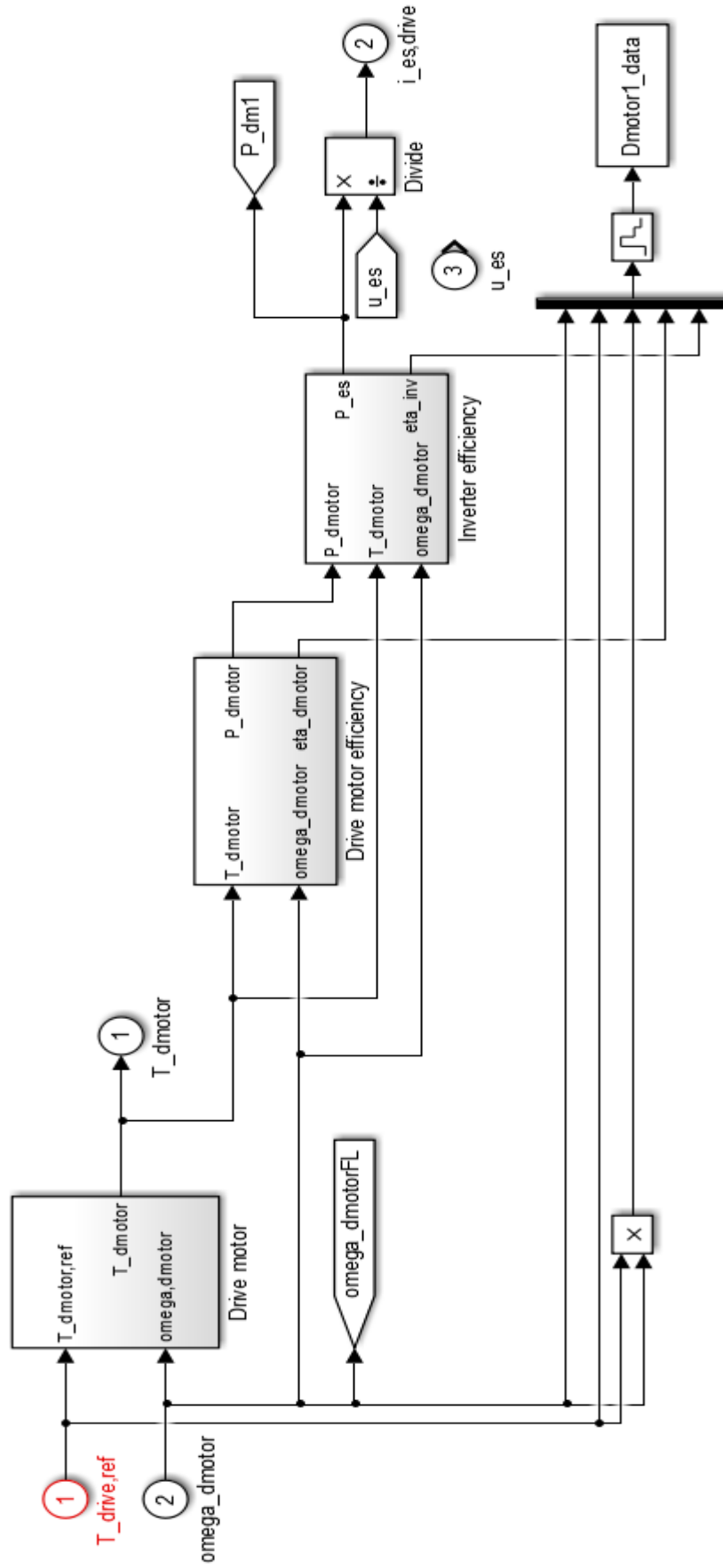
Edellisen kuvan 4.3 hyötysuhdekartasta voidaan havaita, että toimintapisteen ollessa kauempana koordinaatiston akseleiden nollatasoilta, on kestmagneettitahtikoneen hyötysuhde erittäin hyvä laajalla alueella. Vaihtosuuntaajan hyötysuhdekartta on vastaavasti esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4.4 Vaihtosuuntaajan hyötysuhdekartta.

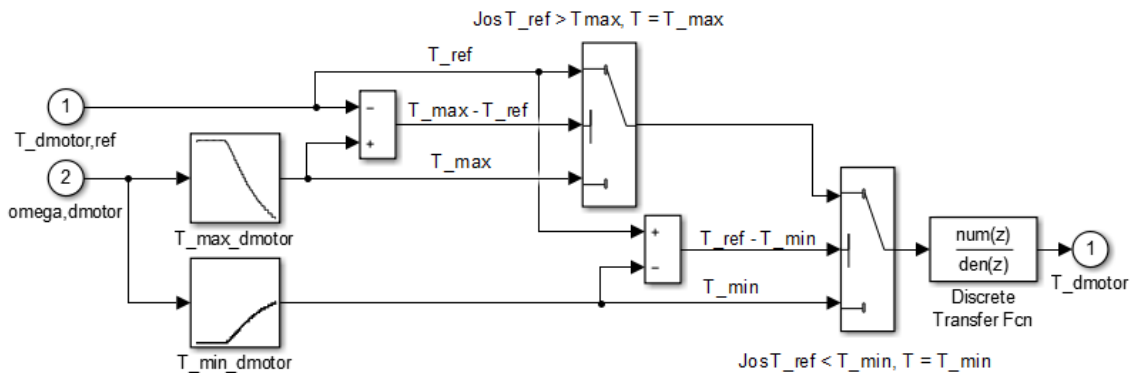
Vaihtosuuntaajan hyötysuhdekuvaajasta 4.4 voidaan havaita, että vaihtosuuntaajan hyötysuhde on erinomainen lähes koko toiminta-alueella.

Mallinnettaessa virtuaalimallin hybriditraktoria ovat edelliset hyötysuhdekartat muunnettu kertomalla kuvien 4.3 ja 4.4 arvot sopivalla kertoimella. Tällöin hyötysuhdekartat on saatu vastaamaan mitoitettujen kokoisten sähkökoneita, niin tehoiltaan, kuin hyötysuhteeltaan. Näiden sähkökoneen ja vaihtosuuntaajan mallien avulla on tehty seuraavassa kuvassa 4.5 esitetty yhden ajomoottorin simulaatiomalli.



Kuva 4.5 Ajomoottorin simulaatiomalli.

Kuvan 4.5 ajomoottorin simulaatiomalli saa tuloarvoina vääntömomentin pyyntöarvon, pyörimisnopeuden ja energiavaraston jännitteen, joiden perusteella simulaatiomallin ”Drive motor”-osio määrittää sähkökoneen tuottaman vääntömomentin. Ajomoottorin simulaatiomalli määrittää sähkökoneen ja vaihtosuuntaajan kuluttaman tehon vääntömomentin ja pyörimisnopeuden avulla kuvien 4.3 ja 4.4 kaltaisista hyötysuhdekartoista ja lopuksi laskee kulutetun virran energiavaraston jännitteen avulla. Sähkökoneen malli tallentaa myös pyörimisnopeuden, vääntömomentin pyyntiarvon, sähkökoneelta pyydetyn tehon, sähkökoneen sen hetken hyötysuhteen sekä vaihtosuuntaajan sen hetken hyötysuhteen myöhempää tarkastelua varten. Tarkastellaan seuraavaksi seuraavassa kuvassa 4.6 ”Drive motor”-osaa tarkemmin.

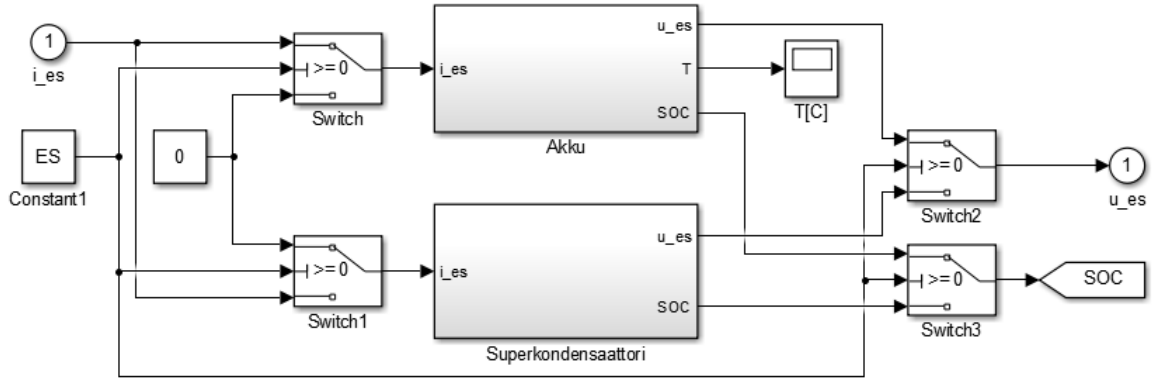


Kuva 4.6 Ajomoottorin simulaatiomallin ”Drive motor”-osa.

Kuvassa 4.6 on esitetty kuvan 4.5 ”Drive motor”-osio. Siinä ensin rajoitetaan vääntömomentin ohjearvo T_{ref} ajomoottorin minimi ja maksimi suoritusarvojen väliin, jonka jälkeen vääntömomentin ohjearvo syötetään sähkökoneen ensimmäisen kertaluvun siirtofunktiolle. Siirtofunktiolta saadaan ajomoottorin tuottama vääntömomentti, joka välitetään kuvassa 4.5 esitettyyn simulaatiomalliin.

4.1.3 Energiavarasto

Hybriditraktorin virtuaalimallissa energiavarasto on mallinnettu sekä akustona että superkondensaattorina käyttäen Immosen väitöskirjassa kappaleessa 2.2 [27] esittämiä yhtälöitä. Asetuksista voidaan valita, käytetäänkö akustoa vai superkondensaattoria energiavarastona. Seuraavassa kuvassa on esitetty energiavaraston simulaatiokaavio.



Kuva 4.7 Energiavaraston malli ylätasolla. Akun ja superkondensaattorin toiminta on mallinnettu seuraavien yhtälöiden (4.1) – (4.8) mukaan.

Kuvan 4.7 akusto on mallinnettu käyttäen yksinkertaista staattista mallia, joka koostuu jännitelähteestä ja vastuksesta. Akun valmistajan ilmoittamien $R_{\text{lataus}}(SOC)$, $R_{\text{purku}}(SOC)$ ja $u_{OC,kenno}$ avulla pystytään mallintamaan yksittäistä akkukennoa sekä kokonaista akustoa. Akuston varaustasoa, $SOC(t)$, simulaatiomallissa on mallinnettu seuraavalla yhtälöllä

$$SOC(t) = \frac{\int i_{es} dt}{Q_{\max} + SOC_{\text{alku}}}, \quad (4.1)$$

jossa i_{es} on akuston virta, Q_{\max} on akuston maksimivaraus ja SOC_{alku} on akuston varaustila alussa. Akuston avoimen piirin jännite, $u_{OC}(SOC)$, on vastaavasti mallinnettu seuraavalla yhtälöllä

$$u_{oc}(SOC) = N_{\text{sar}} u_{oc,kenno}(SOC), \quad (4.2)$$

jossa N_{sar} on sarjaankytkettyjen kennojen määrä ja $u_{OC,kenno}(SOC)$ on yksittäisen kennon avoimen piirin jännite. Edelleen akuston navoilta mitattava jännite kuormituksen aikana voidaan mallintaa seuraavan yhtälön mukaan

$$u_{es}(SOC, i_{es}) = N_{\text{sar}} u_{oc,kenno}(SOC) + \frac{N_{\text{sar}}}{N_{\text{rin}}} R_{\text{lataus/purku}}(SOC) i_{es}, \quad (4.3)$$

jossa N_{rin} on rinnankytkettyjen kennojen määrä, $R_{\text{lataus/purku}}(SOC)$ on akuston varaustilasta ja virransuunnasta riippuva sisäresistanssi. Akuston häviöitä voidaan mallintaa yhtälöllä

$$P_{\text{es,häviöt}} = R_{\text{lataus/purku}}(SOC) i_{\text{es}}^2 \quad (4.4)$$

ja hyötysuhdetta yhtälöllä

$$\eta_{\text{es}} = \begin{cases} \frac{u_{\text{OC}}(SOC) i_{\text{es}}}{\left(u_{\text{OC}}(SOC) + \frac{N_{\text{sar}}}{N_{\text{rin}}} R_{\text{lataus}}(SOC) i_{\text{es}} \right) i_{\text{es}}}, & i_{\text{es}} > 0 \\ \frac{\left(u_{\text{OC}}(SOC) - \frac{N_{\text{sar}}}{N_{\text{rin}}} R_{\text{purku}}(SOC) i_{\text{es}} \right) i_{\text{es}}}{u_{\text{OC}}(SOC) i_{\text{es}}}, & i_{\text{es}} \leq 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Akuston pintalämpötilaa, T_{es} , on mallinnettu yhtälöllä

$$T_{\text{es}} = T_{\text{es,alku}} + \int \frac{P_{\text{es,häviöt}} - \alpha A (T_{\text{es}} - T_{\text{ympäristö}})}{mC} dt, \quad (4.6)$$

jossa $T_{\text{es,alku}}$ on akuston lämpötila alkutilanteessa, α on lämmönsiirtymiskerroin, A on lämpöä haihduttava pinta-ala, m on massa, C on lämpökapasiteetti ja $T_{\text{ympäristö}}$ on ympäristön lämpötila. [27]

Energiavaraston superkondensaattori on mallinnettu käyttäen yksinkertaistettua ensimmäisen kertaluvun mallia, joka koostuu resistanssista ja kapasitanssista. Superkondensaattorin navoilta mitattavaa jännitettä, u_{es} , on mallinnettu yhtälöllä

$$u_{\text{es}} = \frac{1}{C_{\text{sk}}} \int i_{\text{es}} dt - i_{\text{es}} R_{\text{ESR,sk}}, \quad (4.7)$$

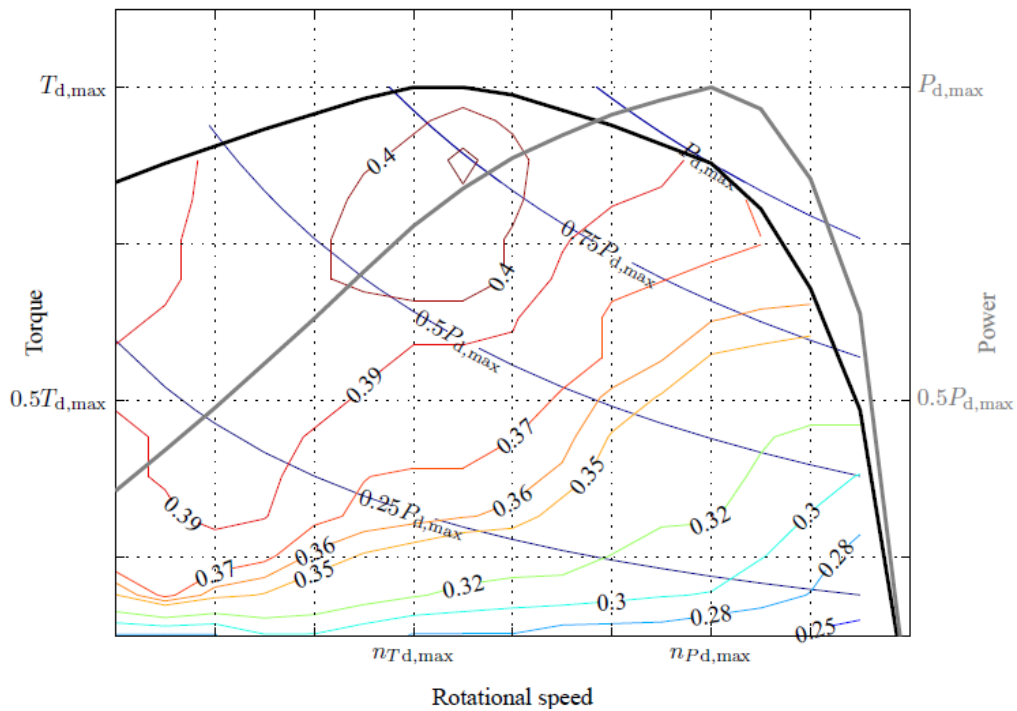
jossa C_{sk} on superkondensaattorin kapasitanssi, i_{es} on superkondensaattorin virta ja $R_{ESR,sk}$ on superkondensaattorin ekvivalentti sarjaresistanssi. Vastaavasti superkondensaattorin varaustaso, SOC , on mallinnettu seuraavalla yhtälöllä

$$SOC = \frac{u_{es}^2}{u_{sk,max}^2}, \quad (4.8)$$

jossa $u_{sk,max}$ on superkondensaattorin maksimijännite. [27]

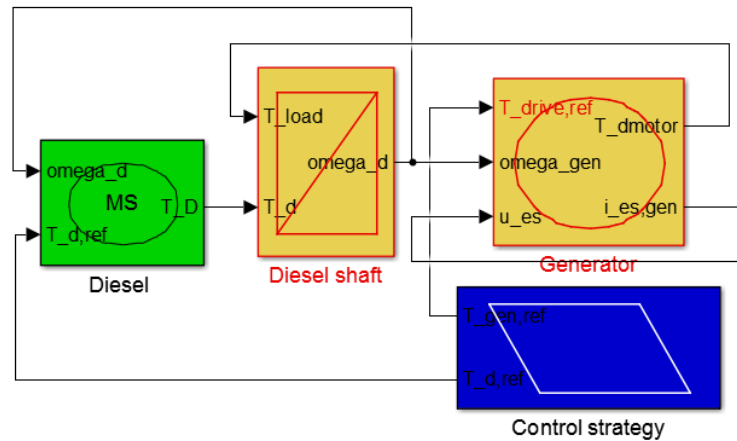
4.1.4 Dieselgeneraattori

Dieselgeneraattorin malli perustuu dieselmoottorin ja sähkökoneen malleihin. Dieselmoottorin malli on polttomoottorin kulutukseen pohjautuva malli [27] ja sähkökoneen malli perustuu kappaleessa 4.1.2 esitettyihin hyötysuhdekarttoihin. Seuraavassa kuvassa 4.8 on esitetty erään dieselmoottorin jatkuvuustilan hyötysuhdekartasto.



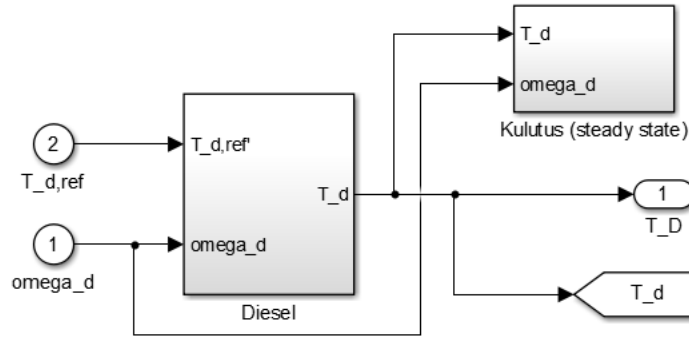
Kuva 4.8 Dieselmoottorin jatkuvuustilan hyötysuhdekartasto, missä on lisäksi esitetty maksimivääntömomentti ja tehokäyrät. [27]

Edellisen kuvan 4.8 hyötysuhdekartasta nähdään, että dieselmoottorin paras hyötysuhde saavutetaan toimintapisteessä, joka on lähellä maksimivääntömomenttia, noin 75 % maksimitehosta. Tarkasteltaessa dieselmoottorin maksimitehon toimintapistettä, voidaan havaita sen sijaitsevan huomattavasti suuremmalla pyörimisnopeusalueella ja ennen kaikkea huonommalla hyötysuhdealueella. Seuraavassa kuvassa 4.9 on esitetty dieselgeneraattorin simulaatiomalli.



Kuva 4.9 Dieselgeneraattorin simulaatiomalli.

Kuvassa 4.9 dieselmoottori tuottaa vääntömomenttia akselilleen ohjauksen mukaan ja generaattori vastaavasti kuormittaa akselia. Dieselmoottori on mallinnettu seuraavan kuvan 4.10 mukaan, jossa ”Diesel”-osiossa yksinkertaisesti rajoitetaan väännön ohjearvo $T_{d,ref}$ dieselmoottorin kyseisen pyörimisnopeuden maksimi vääntömomentin mukaan. ”Kulutus”-osiossa verrataan moottorin toimintapistettä kulutuskarttaan, josta saadaan integraattorin avulla määritettyä polttoaineen kulutus simulaation ajalta.



Kuva 4.10 Dieselmoottorin simulaatiomalli.

Kuvan 4.9 ”Diesel shaft”-osiossa mallinnetaan akselin pyörimisnopeuden käyttäytymistä yhtälöllä

$$\omega_d = \int \frac{T_d + T_{load}}{J_d} dt, \quad (4.9)$$

jossa ω_d on akselin pyörimisnopeus, T_d on dieselmoottorin tuottama vääntömomentti, T_{load} on generaattorin vääntömomentti ja J_d on dieselmoottorin hitausmomentti. Kuvassa 4.9 generaattori on mallinnettu kappaleen 4.1.2 mukaan. Dieseliä ja generaattoria ohjataan energiavaraston varaustason, SOC , mukaan niin, että varaustaso pysyy tiettyjen raja-arvojen sisällä. Taulukossa 4.1 P_{optimi} on dieselmoottorin teho parhaimmalla hyötysuhteella ja P_{max} on dieselmoottorin maksimi teho.

Taulukko 4.1 Dieselgeneraattorin säätöstrategia.

Akun varaustila	Dieselgeneraattorin teho
$SOC > \text{yläraja}$	$P = 0$
$\text{yläraja} > SOC > \text{alaraja}$	$P = P_{optimi}$
$\text{alaraja} > SOC$	$P = P_{max}$

Alkuperäisessä traktorin hybridimallissa hybridisointi oli toteutettu kappaleen 2.5 mukaisesti rinnakkaisarjahybridinä, jossa dieselmoottorilta otettiin voimaa generaattorin lisäksi

voiman ulosotolle, hydraulikalle, apu- ja järjestelmälaitteille. Työssä kuitenkin haluttiin minimoida sarjahybriditraktorin dieselmoottorin transientit ja käyttää sitä mahdollisimman optimaalisessa pisteessä, jolloin dieselmoottorin kuormaksi jätettiin ainoastaan generaattori ja muiden järjestelmien voimantarve tuotetaan erillisillä sähkökoneilla.

4.1.5 Voiman ulosoton ja hydraulikan mallinnus

Koska voiman ulosotolle ja hydraulikalle ei ollut käytössä toimilaitteeseen perustuvaa kuormitusmallia, on voiman ulosottoa ja hydraulikkaa mallinnettu enimmäistehon avulla. Perinteisissä dieseltraktoreissa moottorin koko teho on käytettävissä vaihteiston kautta ja ainoita standardoituja asioituja voiman ulosotossa ovat voiman ulosoton pyörimisnopeus ja nivelselän liitäntäpinta. Voiman ulosoton standardipyörimisnopeudet ovat 540 rpm ja 1000 rpm. Tällöin pyörimisliikkeen tehon yhtälöllä saadaan mitoitettua voiman ulosottoa pyörittävä moottori

$$P = \omega T, \quad (4.10)$$

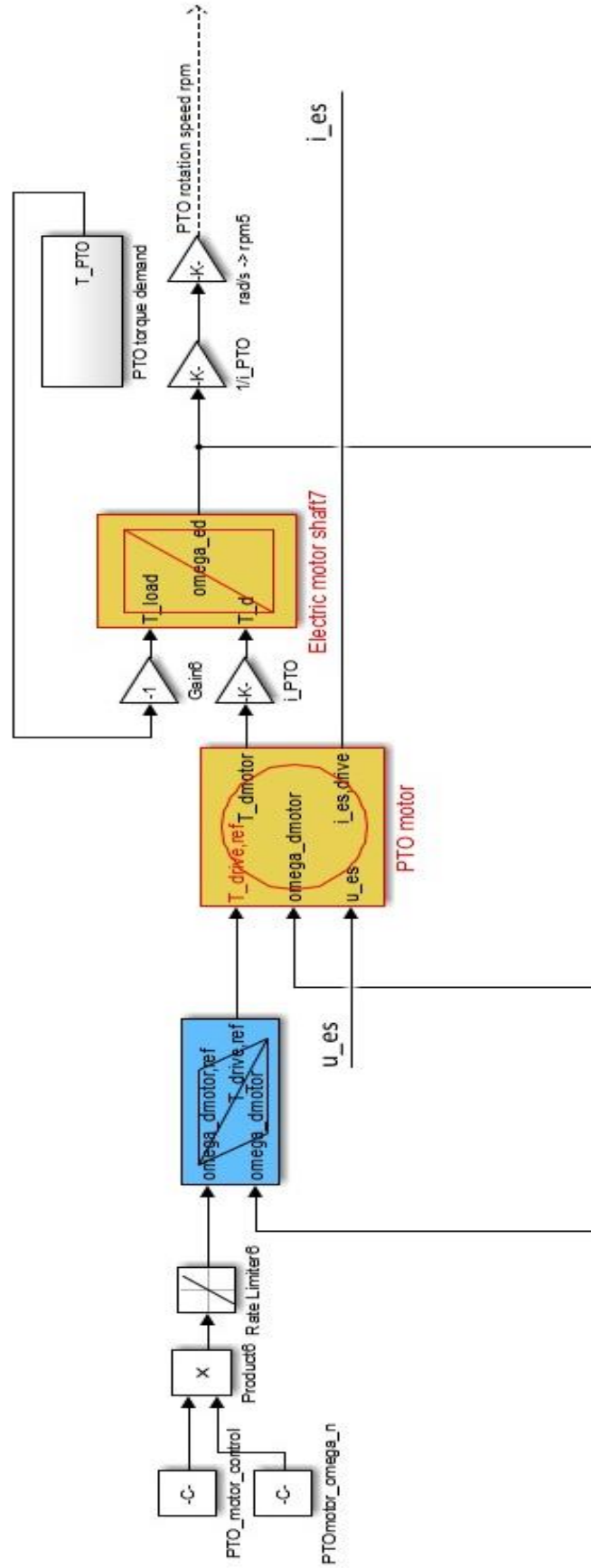
jossa ω on pyörimisnopeus ja T on vääntömomentti. Nyt kuorman vääntömomentti saadaan ratkaistua, kun tiedetään voiman ulosoton teho ja pyörimisnopeus. Vastaavasti hydraulikalle saadaan laskettua ensin vaadittavaksi kokonaistehoksi yhtälön

$$P_{\text{hydr}} = \frac{pQ}{\eta_{\text{hydr}}} 1000 \quad (4.11)$$

mukaan, jossa p on paine, Q on virtaus ja η_{hydr} on hydraulipumpun hyötysuhde, jonka jälkeen voidaan hydraulipumpun tarvitsema vääntömomentti laskea pyörimisnopeuden tehon yhtälöllä (4.10).

Seuraavassa kuvassa 4.11 on esitetty voiman ulosoton simulaatiomalli, jossa sähkökone pyörittää alennusvaihteen läpi voiman ulosottoa. Sähkösäädin ohjaimen pyörimisnopeusohje on kerrottu On / Off -kontrolliparametrilla, jolloin voiman ulosotto on mahdollista laittaa simulaation asetuksista päälle ja pois. Kuormana oleva ”PTO torque demand” on yhtälöllä

(4.10) saadun maksimivääntömomentin ja jonkinlaisen normalisoidun käyrän tulo, jolloin voidaan simuloida traktoriin liitettävän työkoneen tehontarpeen käyttäytymistä.



Kuva 4.11

Voiman ulosoton malli.

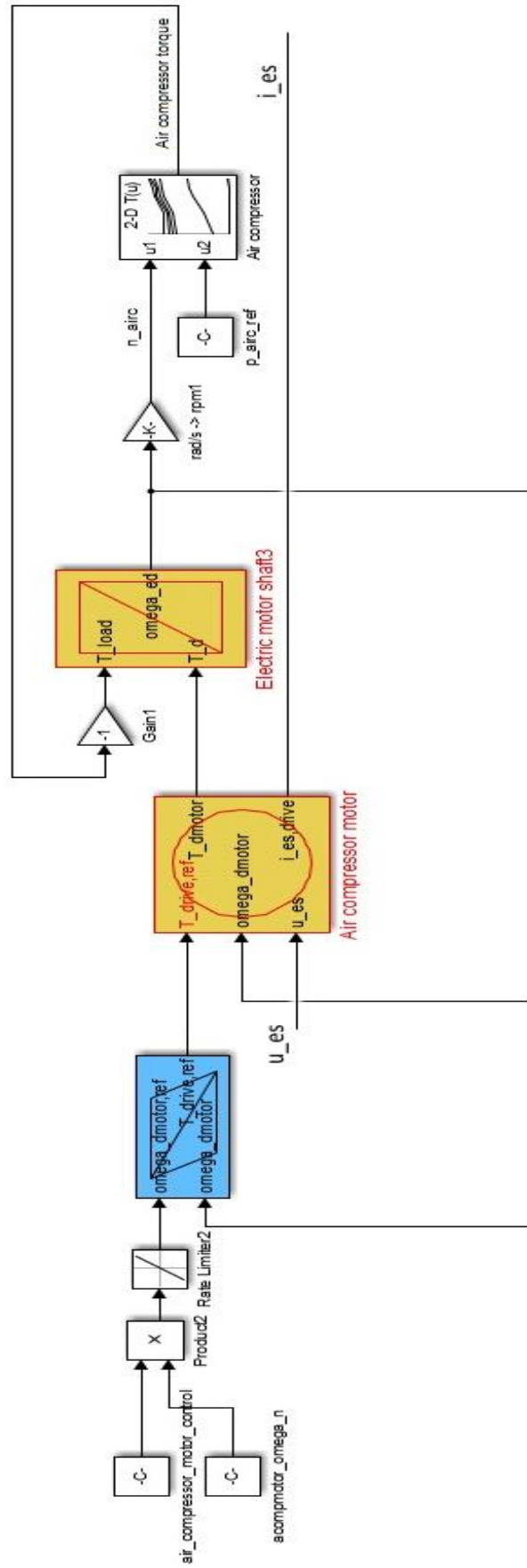
Vastaavasti hydrauliiikan simulaatiomallintaminen on toteutettu yhtälöillä (4.9) ja (4.10) saatujen arvojen perusteella, jolloin hydrauliiikan voimantarvetta on saatu mallinnettua erilaisilla kuormilla.

Hydrauliiikan mobiilikäytöissä on huomioitava, että hydrauliiikan kokonaishyötysuhde ei ole erityisen hyvä. Perinteisissä polttomoottoritraktoreissa hydrauliiikkajärjestelmän hyötysuhde on tyypillisesti 9 – 60 %, keskimäärin 22 %, ja huomioitaessa kumulatiiviset häviöt polttomoottorilta työsylinterille saadaan hyötysuhteeksi keskimäärin noin 14 %. [50] Tämä on otettava huomioon mallinnettaessa tilannetta, kun liike-energiaa muutetaan hydrauliikkajärjestelmän läpi jälleen sähköiseksi.

4.1.6 Apu- ja järjestelmälaitteiden mallinnus

Alkuperäisessä rinnakkaissarjahybridimallissa apu- ja järjestelmälaitteet olivat dieselmootorin kuormana. Kuitenkin dieselmoottori on haluttu vapauttaa näiden laitteiden aiheuttamista kuorman transienteista, jolloin dieselmoottoria voidaan käyttää energiatehokkaammin. Toinen syy, miksi apu- ja järjestelmälaitteet on haluttu erottaa sähkökoneiden kuormaksi, on tarkemman säädön mahdollistaminen laitteille. Kirjallisuudessa [50] - [52] on raportoitu useiden prosenttien säästöistä kokonaisenergiankulutuksessa, kun verrataan perinteistä polttomoottorin jatkuvasti pyörittämää laitetta ja tarpeen mukaan pyöritettävää laitetta On / OFF - tai pyörimisnopeussäädöllä. Pääsyyt energiankulutuksen vähenemiseen ovat juurikin laitteen vapaa toimintapiste riippumatta polttomoottorin toimipisteestä ja mahdollisuus olla käyttämättä laitetta ollenkaan, jos sille ei ole juuri sillä hetkellä tarvetta.

Hybriditraktorin simulaatiomallissa on mallinnettu apu- ja järjestelmälaitteina tuuletinta, vesipumppua, ilmakompressoria, hytin ilmastointilaitetta ja pienjännitejärjestelmän laturina DC-hakkuria. Mallintamisessa on käytetty eräiden laitteiden mitattuja tehontarpeita eri toimintapisteissä ja DC-hakkuria on mallinnettu käyttäen hakkurin tehoa ja keskimääräistä hyötysuhdetta. Seuraavassa kuvassa 4.12 on esitetty ilmakompressorin ja sitä pyörittävän sähkömoottorin simulaatiomalli. Vastaavasti muita apu- ja järjestelmälaitteita simuloidaan erillisillä sähkömoottoreilla ja mitattuihin toimintapisteisiin perustuvilla kuormitusarvoilla.

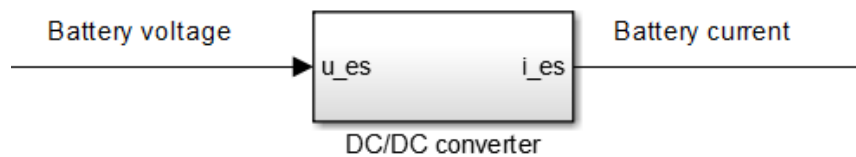


Kuva 4.12

Ilmakompressorin simulaatiomalli.

Samalla lailla kuin voiman ulosotolla ja hydraulikalla, myös apu- ja järjestelmälaitteille on asetettu hallinnointiparametri ”X_motor_control”, jolla voidaan jokainen yksittäinen laite kytkeä simulaation asetuksista päälle tai pois. Laitteita pyörittävät sähkömoottorit on mallinnettu samalla tavalla kuin kappaleessa 4.1.2 on esitetty, mutta mitoitettu vain yhteensopivaksi käytettävän laitteen kanssa.

DC-hakkuria mallinnetaan seuraavan kuvan 4.13 mukaisesti.



Kuva 4.13 DC-hakkurin ylätasoon simulaatio kaavio.

Hakkurin energiavarausta kuluttama virta i_{es} lasketaan simulaatiomallissa seuraavan yhtälön mukaisesti

$$i_{es} = \frac{U_{low} I_{low}}{u_{es} \eta_{DCconv}}, \quad (4.12)$$

jossa U_{low} on pienjännitejärjestelmän jännite, I_{low} on pienjännitejärjestelmään syötettävä virta, u_{es} on ajoakuston jännite ja η_{DCconv} on hakkurin hyötysuhde.

4.2 Mevea

Mekaniikkamallinnusohjelmalla Mevealla on mahdollista mallintaa erilaisten työkoneiden mekaniikka, hydraulikkaa, voimansiirtoa, kitkoja, ulkoisia ja sisäisiä voimia, erilaisia antureita, ympäristöä ja ympäristön kanssa vuorovaikutusta. Meveasta on myös mahdollista siirtää ja vastaanottaa tietoa toisesta ohjelmistosta tai laitteesta. Tällöin virtuaalimallin ohjaaminen voidaan toteuttaa joko ohjelmallisesti, näppäimistöä tai ulkoiselta hallintalaitteelta. Visualisointi voidaan vastaavasti toteuttaa joko tietokoneen kuvaruudulta tai simulaatiokopilla, jossa usealla näyttöruudulla voidaan näyttää koko ohjaamon näkymä. [53]

Työn simulaatiomallissa Meveassa on pelkistetyksi mallinnettu traktoria tasaisessa ympäristössä, voimansiirtoa ja renkaiden kitkoja. Hydrauliiikkaa tai muita toimilaitteita ei ole mallinnettu. Seuraavassa kuvassa 4.14 on esitetty traktorin geneerisen mallin visualisointi kuva [44]. Drive!-projektin hybridimalli, jota työssä on edelleen kehitetty ja dokumentoitu, on geneerisestä mallista hieman muutettu simulaatiomalli. Projektin hybridimallissa pääpaino on rinnakkaisarjahybriditraktorin mallintamisessa.



Kuva 4.14 Mevea-simulaattorin visualisointikuvaa. [44]

Voimansiirtoa mallinnettaessa on Meveassa käytetty moottoreita, manuaalivaihteistoa, alennusvaihteistoa ja traktorin renkaiden akselien moottoreita. Mallissa jokaisella renkaalla on omat moottorit ja voimansiirrot. Moottoreiden simulaatiomallit saavat tuottamansa vääntömomentin lukuarvon kappaleessa 4.1 esitetystä ajomoottoreiden simulaatiomallista. Moottorin tuottama teho välitetään seuraavaksi manuaalivaihteistolle, josta valitun vaihteen välityssuhteen mukaan teho välitetään alennusvaihteelle. Kiinteävälitteinen alennusvaihte välittää lopuksi moottorin tuottaman tehon renkaiden akselille, josta renkaiden kitkamallinnuksella teho saadaan virtuaalimallin liikkeeksi. Meveassa vaihteiston häviöitä on mahdollista mallintaa vaimennuskertoimella, mutta simuloinneissa vaihteisto on mallinnettu ideaalisena häviöttömänä vaihteistona. Renkaiden pitoa on mallinnettu LeGre:n kitkamallilla [54], jolla voidaan mallintaa renkaiden dynaamista pitoa ja luistoa. Mevean kitkamalli ei kuitenkaan ota huomioon vierintävastusta, mikä on erikseen lisätty jarruihin staattiseksi jarruttavaksi voimaksi. Työn simulaatioissa traktoria jarruttavan voiman suuruudeksi on asetettu normaalin pellon vierintävastuksen, f on 0.1, suuruinen voima. Traktorin simulaatiomalli on muokattu mitoiltaan ja

painoiltaan myöhemmin kappaleessa 5.1 esitettävien teknisten tietojen mukaan käyttäen apuna Mevean tutoriaaleja [47].

5. CASE: NOIN 75 kW:N TRAKTORIN SÄHKÖISTYS

Tarkasteluun on valittu kuvitteellinen noin 75 kW:n dieseltraktorin suorituskykyinen ladattava sarjahybriditraktori ja sen sähköistysjärjestelmäksi hajautetun voimantuoton AWD-malli, joka on hahmoteltu kuvassa 2.3. Mallissa on jokaisella renkaalla omat sähkömoottorinsa, jolloin vaihteisto on saatu minimoitua alennusvaihteeseen ja kaksivaihteiseen vaihteistoon. Näin vaihteistohäviöt on saatu minimoitua, jotka CVT-vaihteistolla voivat olla toimintapisteestä riippuen 15 – 20 % [14]. Ajomoottorit mitoitetaan traktorin teoreettisen vetokyvyn mukaan, jolloin ajomoottoreiden nimellistehojen summaksi saadaan noin 71 kW, ja voiman ulosotto mitoitetaan 40 kW:n suuruiseksi. Tällöin traktorilla voidaan suorittaa erilaisia pienimuotoisia voiman ulosottoa vaativia töitä ja maatalouden tukitöitä. Traktorin pääasiallisiksi työtehtäviksi on ajateltu maatalon pihapiirin päivittäisiä työtehtäviä, kuten rehujen ja tavaroiden siirtoa. Mitoituksissa on kuitenkin huomioitu, että hybriditraktorilla on mahdollista käyttää lyhyitä aikoja myös raskaampia vedettäviä työkoneita. Päivittäiseksi käyttöajaksi on arvioitu yhdestä kahteen tuntia, joka sisältää vielä jonkin verran joutokäyntiä. Apu- ja järjestelmälaitteille, kuten hydraulikalle, ilmastoinnille, ilmakompressorille, tuulettimelle ja vesipumpulle, sähkömoottorit on tässä tarkastelussa laitettu jokaiselle laitteelle erikseen, jolloin jokaista laitetta voidaan ohjata ja käyttää mahdollisimman optimaalisesti ja tarkasti. Ratkaisu tuo kuitenkin kappalemäärällisesti monta sähkökonetta ja vaihtosuuntaajaa traktoriin, jolloin investointihinta nousee. Työssä ei tarkemmin oteta kantaa sähkötekniikan tilantarpeesta ja sen sijoittelusta hybridisoituun traktoriin. Voimansiirron komponenttien poistamisesta ja lisäämisestä johtuva traktorin massan suhteellinen muutos ei ole oletettavasti merkittävä, sillä traktori itsessään painaa jo paljon, jolloin arviot vastustavista voimista ovat suhteellisen tarkat.

5.1 Traktorin tekniset tiedot

Suunniteltavan keskiarvotraktorin tekniset tiedot saatiin ottamalla noin 75 kW kokoluokassa John Deeren 5100M ja 6100MC, Massey Fergusonin 4709 ja 5611, New Hollandin T4.95 ja TD5.95 sekä Valtran A93 ja N93 traktorimallien teknisistä tiedoista keskiarvo. Saadut arvot on esitetty seuraavassa taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 John Deeren 5100M ja 6100MC, Massey Fergusonin 4709 ja 5611, New Hollandin T4.95 ja TD5.95 sekä Valtran A93 ja N93 traktorimallien teknisistä tiedoista laskettu keskiarvo [55] - [60].

	Keskiarvo
Teho [hv]	100
Teho [kW]	75
Max vääntö [Nm]	413
Max nopeus [km/h]	39
Hydr. paine [bar]	198
Hydr. tuotto [l/min]	62
Etur. halk. [mm]	1 219
Etur. paino [kg]	142
Takar. halk. [mm]	1 592
Takar. paino [kg]	256
Etuaks. raideväli [mm]	1 450
Taka-aks. raideväli [mm]	1 660
Akseliväli [mm]	240
Maavara [mm]	448
Paino [kg]	4 100
Polttoainesäiliö [l]	150

5.2 Ajomoottorit ja välityssuhteet

Työssä ajomoottoreille käytetään alennusvaihteita, koska traktorilla työskenneltäessä nopeudet ovat usein hitaita, alle 20 km/h. Tämä yhdistettynä traktoreiden suuriin renkaiden halkaisijoihin (yli metrin) johtaa siihen, että ilman alennusvaihdetta ajomoottorin pyörintänopeudet olisivat suuruusluokaltaan vain muutamia kierroksia sekunnissa ja vaadittavat vääntömomentit tuhansissa Nm:ssä. Tällainen sähkökone on fyysisiltä mitoiltaan niin suuri, ettei se mahtuisi traktoriin, jolloin käytettäessä fyysisesti pienempiä sähkökoneita on käytettävä myös alennusvaihdetta. Ajomoottoreiden mitoituksessa on aloitettu valitsemalla moottoreiden nimellispyörimisnopeudeksi 3000 rpm. Tällöin alennusvaihteen välityssuhde R saadaan mitoitettua etu- ja takarenkaille käyttäen yhtälöitä

$$\omega_{\text{rengas,v_max}} = \frac{2\pi v_{\text{max}} \cdot 1000 / 3600}{p_{\text{rengas}}} \quad (5.1)$$

ja

$$R = \frac{n_{\text{moottori,max}} \cdot 2\pi / 60}{\omega_{\text{rengas,v_max}}}, \quad (5.2)$$

jossa v_{max} on traktorin maksiminopeus, p_{rengas} on renkaan kehänpituus ja $n_{\text{moottori,max}}$ on moottorin maksimipyörimisnopeus. Tällöin käytettäessä taulukon 5.1 arvoja saadaan arvot etu- ja takarenkaiden alennusvaihteiden välityssuhteiksi, kun oletetaan moottorin maksimipyörimisnopeuden olevan 1.5 kertainen nimellisnopeuteen verrattuna.

Taulukko 5.2 Case-traktorin alennusvaihteiden välityssuhteet yhtälöiden (5.1) ja (5.2) mukaan.

Alennusvaihde	Välityssuhde
Eturenkaiden	1 : 25.8
Takarenkaiden	1 : 33.8

Edelleen on valittu traktorille toimintanopeuksiksi HI-vaihteella 40 km/h ja LO-vaihteella 10 km/h, jolloin vaihteiston välityssuhteet, R , saadaan seuraavan yhtälön mukaan

$$R = \frac{v_{\text{vaihdemax}}}{v_{\text{max}}}, \quad (5.3)$$

missä $v_{\text{vaihdemax}}$ on maksiminopeus kyseisellä vaihteella ajettaessa. Tällöin saadaan edellisellä yhtälöllä vaihteiden välityssuhteiksi seuraavaa.

Taulukko 5.3 Case-traktorin vaihteiston välityssuhteet yhtälön (5.3) mukaan.

Vaihde	Välityssuhde
HI	1 : 1
LO	1 : 4

Välityssuhteiden jälkeen mitoitetaan ajomoottoreiden vääntömomentti. Tämä aloitetaan laskemalla traktorin teoreettinen vetokyky [29] ilman häviöitä yhtälöllä

$$F_t = mg\mu, \quad (5.4)$$

käyttäen taulukossa 5.4 esitettyjä arvoja.

Taulukko 5.4 Traktorin vetokyvyn laskentaan käytettyjä arvoja.

Traktorin omamassa	4 100 kg
Kehävoimakkeroin kova pelto, μ	max 0.6, kun $s \geq 30\%$
Vierintävastus normaalipelto, f	0.1

Tällöin traktorin häviöttömäksi vetovoimaksi saadaan noin 24.1 kN. Kun lisätään luistoon menevä voima

$$F_{\text{slip}} = mg\mu \frac{s}{1-s} \quad (5.5)$$

ja traktorin renkaiden vierintävastukseen menevä voima yhtälöstä (3.4), saadaan häviöihin kuluva voima yhteensä noin 14.3 kN. Tällöin traktorin renkaiden kehältä tarvitaan yhteensä noin 38.5 kN.

Jaettaessa voimat tasan kaikille neljälle renkaalle ja otettaessa huomioon renkaiden halkaisijat taulukosta 5.1 saadaan renkaiden akseleille vaikuttaviksi vääntömomenteiksi seuraavaa.

Taulukko 5.5 Traktorin renkaiden akselilta tarkasteltu vääntömomentti.

Eturenkaan akselin vääntömomentti	5.9 kNm
Takarenkaan akselin vääntömomentti	7.7 kNm

Otettaessa huomioon alennusvaihteet ja vaihteen LO välitykset saadaan ajomoottoreille mitoitettua nimellisvääntömomentiksi noin 56.7 Nm.

Taulukko 5.6 Ajomoottoreiden nimellisarvot.

Pyörimisnopeus	3 000 rpm
Vääntömomentti	56.7 Nm

5.3 Voiman ulosoton moottori

Kun voiman ulosotosta siirretään teho mekaanisena liitettävään työkoneeseen, on traktoriin laitettava sähkökone pyörittämään voiman ulosottoa. Tähän tarvitaan erillinen sähkökone sen takia, että sarjahybridissä, jossa voimantuotto on toteutettu hajautetusti, ei ole mekaanista yhteyttä renkaiden ja voiman ulosoton välillä. Toteutettaessa traktorin sarjahybridisointi yhdellä sähkökoneella kuvan 2.2 tapaan ei tarvittaisi erillistä sähkökonetta voimanosotolle, mutta tällöin ei päästäisi vaihteiston häviöistä eroon. Valitulla hajautetun voimantuoton ratkaisulla on vältetty vaihteiston mekaanisen ja hydraulisen voimansiirron häviöt. Paras ratkaisu olisi tietenkin siirtää teho sähköisenä liitettävään työkoneeseen, jolloin traktoriin ei tarvitsisi voiman ulosottoa ollenkaan. Tällaisia sähköllä toimivia liitettäviä työkoneita ei kuitenkaan vielä ole markkinoilla, jolloin voimansiirto on toteutettava mekaanisesti. Tarkastelussa on valittu voiman ulosoton ja sitä pyörittävän moottorin nimellistehoksi 40 kW. Tällöin voidaan käyttää pienempiä paalaimia, niittomurskaimia ja lumilinkoa.

Kuten ajomoottoreiden tapauksessa, myös voiman ulosoton pyörimisnopeudet ovat suhteellisen hitaita. Joitain hitaasti pyöriviä moottoreita on markkinoilla, joiden nimellisyörimisnopeudet ovat samaa luokkaa voiman ulosoton standardoitujen pyörimisnopeuksien kanssa, mutta nämä sähkökoneet ovat tyypillisesti teholuokiltaan megawateissa. Voiman ulosoton moottorin pyörimisnopeudeksi valitaan 3 000 rpm, jolloin sähkökoneen fyysiset mitat ovat pienemmät. Tällöin, kun voiman ulosoton standardipyörimisnopeudet ovat pienillä tai keskisuurilla tehoilla 540 rpm ja suurilla tehoilla 1 000 rpm, saadaan pienitehoiselle voiman

ulosotolle välityssuhteeksi noin 1 : 5.6. Edelleen voidaan laskea tarvittu vääntömomentti tehon yhtälöstä

$$P = \omega_n T_n, \quad (5.6)$$

kun pyörimisnopeus tiedetään. Voiman ulosoton moottorin nimellisvääntömomentiksi saadaan noin 127 Nm.

Taulukko 5.7 Voiman ulosoton moottorin nimellisarvot.

Pyörimisnopeus	3 000 rpm
Vääntömomentti	127 Nm
Välityssuhde	1 : 5.6

5.4 Työhydrauliikan sähkömoottori

Työhydrauliikkaa ja sen sähkökonetta mitoitettaessa tarvitaan taulukosta 5.1 hydrauliikkapumpun tuottama paine 200 bar ja virtaus 62 l/min. Kun arvioidaan hydrauliikkapumpun hyötysuhteeksi 95 % (hydrauliikkasuunnittelijan haastattelun [61] perusteella), saadaan hydrauliikkapumpun sähkömoottorin tehoksi

$$P_{\text{hydsäh}} = \frac{pQ}{\eta_{\text{hyd}} 600} 1000, \quad (5.7)$$

jossa p on paine, Q on virtaus ja η_{hyd} on hydrauliikkapumpun hyötysuhde. Edellä mainituilla lukuarvoilla saadaan sähkömoottorin tehoksi noin 21.7 kW. Kun valitaan sähkömoottorin pyörimisnopeudeksi 1 500 rpm ja oletetaan hydrauliikkapumpun pyörimisnopeudeksi myös 1 500 rpm, voidaan hydrauliikkapumppua käyttää ilman alennusvaihdetta. Tällöin sähkömoottorin nimellisvääntömomentti voidaan laskea yhtälön (5.6) avulla, jolloin moottorin vääntömomentiksi saadaan noin 138 Nm.

Taulukko 5.8 Työhydrauliikan sähkömoottorin nimellisarvot.

Pyörimisnopeus	1 500 rpm
Vääntömomentti	138 Nm

5.5 Apu- ja järjestelmälaitteet

Apulaitteita ovat ilmakompressori sekä ilmastointi ja nämä ovat usein traktoriin ostotilanteessa lisättäviä vapaaehtoisia lisälaitteita. Järjestelmälaitteita ovat taas laturi, tuuletin ja vesipumppu. Laturilla perinteisessä dieseltraktorissa muutetaan moottorin tehoa sähköksi, jolla edelleen ladataan akkua ja käytetään traktorin sähkölaitteita. Vesipumppu ja tuuletin taas huolehtivat traktorin dieselmoottorin lämmön säätelystä. Hajautetussa sarjahybridisoidussa traktorimallissa näiden laitteiden tehontuotto on kuitenkin siirretty dieselmoottorilta erillisille sähkömoottoreille ja laturin tapauksessa DC-hakkurille. Seuraavaan taulukkoon on kasattu edellä mainittujen laitteiden arvioituja tehontarpeita, jotka on otettu huomioon sarjahybriditraktorin simulaatiomallissa.

Taulukko 5.9 Dieseltraktorin apu- ja järjestelmälaitteiden tehontarpeita.

Ilmakompressori	2.2 kW
Ilmastointi	3.3 kW
DC-hakkuri	12 V / 60 A, $\eta = 95 \%$
Tuuletin	2.9 kW
Vesipumppu	380 W

Tarkasteltaessa apu- ja järjestelmälaitteita diesel-, hybridi-, ja täyssähköistetyssä traktorissa voidaan olettaa, että jäähdytysjärjestelmää olisi mahdollista pienentää jonkin verran hybriditraktorissa ja merkittävästi täyssähköistetyssä traktorissa. Lisäksi käytettäessä hakkuria pienjännitejärjestelmän lataukseen parannetaan pienjännitejärjestelmän latauksen hyötysuhdetta ja vähennetään traktorista liikkuvia ja kuluvia osia.

5.6 Akusto

Tarkastelussa akustoksi on valittu litiumtitanaattioksidin perustuva akusto, jolla on akku-markkinoiden pisimmästä päästä oleva käyttöikä, yli 16 000 lataussykliä huoneen lämpötilassa [18]. Tällöin saadaan laskennallisesti kerran päivässä ladattaessa yli 43 vuoden akuston oletettavissa oleva elinaika, mikä on investointina järkevämpi verrattaessa LiFePO₄-akuston yli 2 000 lataussyklin, eli reilun viiden vuoden oletettuun elinaikaan. Akuston elinajalla tarkoitetaan lataussyklien määrää, jolla akun kapasiteetti on laskenut 80 %:n. Toinen syy LiTi-akuston valintaan on, että sitä on LUT:ssa käytetty aikaisemmin tutkimuksissa [27], [45] sekä [62] ja on siten tutumpi. Akustona virtuaalimallissa on käytetty Altairnanon 2.26 V nimellisjännitteellistä 60 Ah kennoista [18] tehtyä akustoa, jonka nimellisjännite on 600 V. Tällöin saadaan vaihtosuuntaajalle ja sähkökoneelle käyttöön jännitereserviä tilanteisiin, jossa tarvitaan hetkellistä ylikuormitusta. Kennon ja akuston hyvänä puolena ovat lisäksi sen suuret jatkuvat purku- ja latausvirrat 6 C ja hetkelliset purku- ja latausvirrat 10 C.

Taulukko 5.10 Virtuaalimallin akusto, joka on tehty 2.26 V ja 60 Ah LiTi kennoista [18].

Akuston nimellisjännite	600 V
Akuston varaus	60 Ah
Akuston energia	35 kWh
Akuston maksimiteho [10 C]	360 kW
Akuston paino	490 kg
Akuston tilavuus	230 l

Tämän kokoinen akusto voitaisiin sijoittaa, esimerkiksi traktorin pohjaan, jolloin sen mitat voisivat olla 4 m x 0.57 m x 0.1 m. Tällöin menetettäisiin 10 cm maavaraa, mutta parannettaisiin traktorin stabiiliutta alentamalla sen massakeskipistettä. Osa akustosta voitaisiin sijoittaa myös vaihteistolta ja pienemmältä polttoainetankilta vapautuneeseen tilaan.

Seuraavaan taulukkoon on kasattu työtehtäviä ja suoritteita, joita 35 kWh:n akustolla olisi mahdollista suorittaa laskennallisesti, kun oletetaan akuston koko varauksen olevan käytävissä.

Taulukko 5.11 35 kWh akuston sähköllä laskennallisesti suoritettavissa olevat työtehtävät. Nimellinen vetovoima on 24.1 kN, työnopeus on 10 km/h, alusta normaali pelto, luisto 10 % ja 100 % varauksen purku.

Kuormitus	Toiminta-aika
Pelkkä traktori @ 10 km/h	noin 113 min
Pelkkä traktori @ 40 km/h	noin 28 min
25 % vetovoimasta	noin 59 min
50 % vetovoimasta	noin 40 min
75 % vetovoimasta	noin 30 min
100 % vetovoimasta	noin 24 min

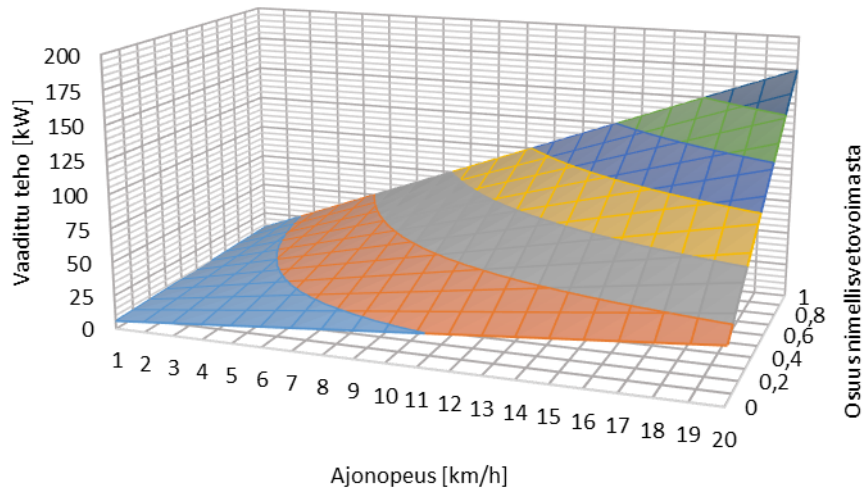
Vastaavasti ajettaessa soratiellä, jolloin vierintävastus on pienempi, saadaan samalla vetovoimalla ja luistolla 2 – 10 minuuttia lisää toiminta-aikaa. Ajettaessa taas tyhjällä traktorilla 10 km/h nopeudella voitaisiin täydellä akustolla ajaa laskennallisesti noin 160 minuuttia ja 40 km/h nopeudella noin 40 minuuttia.

Kuitenkin ajatellen akuston elinikää, akuston koko varausta ei ole useinkaan järkevää käyttää. Litium-akustoilla tyypillinen varauksenpurku on 80 %, jolloin edellisen taulukon 5.11 toiminta-ajat olisivat 20 % pienemmät ajettaessa pelkällä akkusähköllä. Huomattavaa kuitenkin on, että tämän kokoisella akustolla olisi mahdollista työskennellä maatalon pihapiirissä pelkällä akkusähköllä tunnista kahteen tuntia kevyttä työtä tehden. Verrattaessa tätä toiminta-aikaa New Hollandin vetypolttokennotraktorin puolen päivän toiminta-aikaan tankillisella [11] ja perinteisten dieseltraktoreiden koko päivän toiminta-aikaan tankillisella, ei täysin akkusähköllä toimiva traktori ole vielä toimiva pidempiaikaiseen jatkuvaan työskentelyyn. Suuritehoisella pikalatauksella (3 x 32A tai suurempi) olisi mahdollista ladata akusto reilussa tunnissa, mutta tällaisen latauspisteen järjestäminen voi olla ongelmallista. Hybridi-järjestelmän dieselgeneraattorilla on kuitenkin mahdollista pidentää traktorin toiminta-aikaa.

5.7 Generaattori

Mitoitettaessa generaattoria on tarkasteltava ensin traktorin energiankulutusta. Seuraavaan kuvaan on havainnollistettu traktorin teho ajettaessa normaalilla pellolla ja 10 % luistolla eri nimellisvetovoiman arvoilla. Traktorin vierintävastus normaalilla pellolla on noin 4 kN, luis-

toon häviävä voima on noin 2.3 kN ja nimellisetvoimana on käytetty kappaleessa 5.2 saatua häviötöntä vetotehoa 24.1 kN. Apu- ja järjestelmälaitteiden keskimääräiseksi tehoksi on arvioitu yhteensä 4 kW.



Kuva 5.1 Traktorin energiankulutus ajettaessa normaalilla pellolla ja 10 % luistolla eri nimellisetvoiman arvoilla, kun apu- ja järjestelmälaitteiden keskimääräiseksi tehoksi on arvioitu 4 kW.

Kuvan 5.1 perusteella on mahdollista mitoittaa generaattorin koko jatkuvan energiankulutuksen mukaan. Esimerkiksi 56 kW generaattorilla maksimiteholla on mahdollista työskennellä jatkuvasti puolella traktorin nimellisetvoiman kuormituksella 10 km/h nopeudella. Vastaavasti generaattorin optimikuormituksella, joka on usein noin 80 % dieselgeneraattorin maksimitehosta, on mahdollista työskennellä samalla lailla puolella traktorin nimellisetvoimalla noin 7 km/h nopeudella. Usein maatalon pihapiirin työt eivät ole kuitenkaan jatkuvan tehon tyylisiä, jolloin generaattori on mahdollista mitoittaa pienemmäksi. Koska valittu toimintaympäristö on maatalon pihapiiri ja työt kevyitä, on dieselgeneraattorin maksimitehoksi valittu 35 kW. Tällöin generaattorin avulla on traktorilla jonkin verran mahdollista avustaa myös viljelyskauden kevyissä aputoissa, kuten peräkärryn vetämisessä.

Mallinnuksessa on käytetty seuraavan taulukon mukaisia akuston varaustilan arvoja generaattorin ohjauksessa.

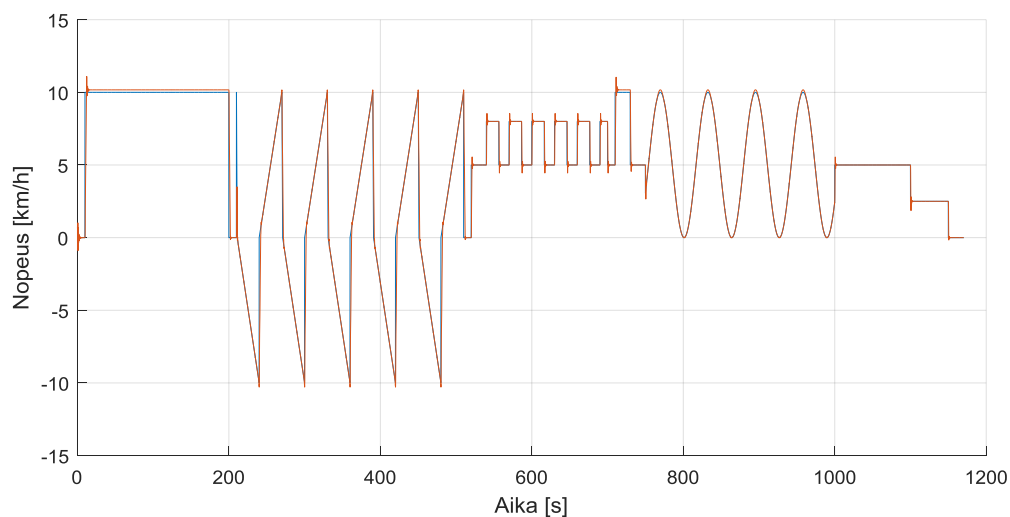
Taulukko 5.12 Dieselgeneraattorin ohjausparametrit.

<i>SOC</i> :n yläraja	0.5
<i>SOC</i> :n alaraja	0.3

Taulukon 5.12 arvoilla generaattori on seisahduksissa, kun akun varaustila on yli ylärajan 0.5. Varaustilan ollessa ylärajan 0.5 ja alarajan 0.3 välillä generaattori toimii optimihyötysuhdepisteessään, P_{optimi} , noin 20.4 kW:n teholla ja varaustilan alittaessa alarajan 0.3 generaattori toimii täydellä tehollaan, P_{max} , 35 kW. Generaattorin ohjauksen rajat ovat asetettu sen takia mataliksi, että generaattoria on tarkoitus käyttää ainoastaan toiminta-ajan jatkamiseen, eikä niinkään keskiarvokuorman tyydyttämiseen. Myöhemmin takaisinmaksuaikaa tarkasteltaessa kappaleessa 5.10.2 nähdään, että verkosta ladatulla akkusähköllä ajo on merkittävästi edullisempaa, kuin dieselillä ajo.

5.8 Simuloitu ajosykli

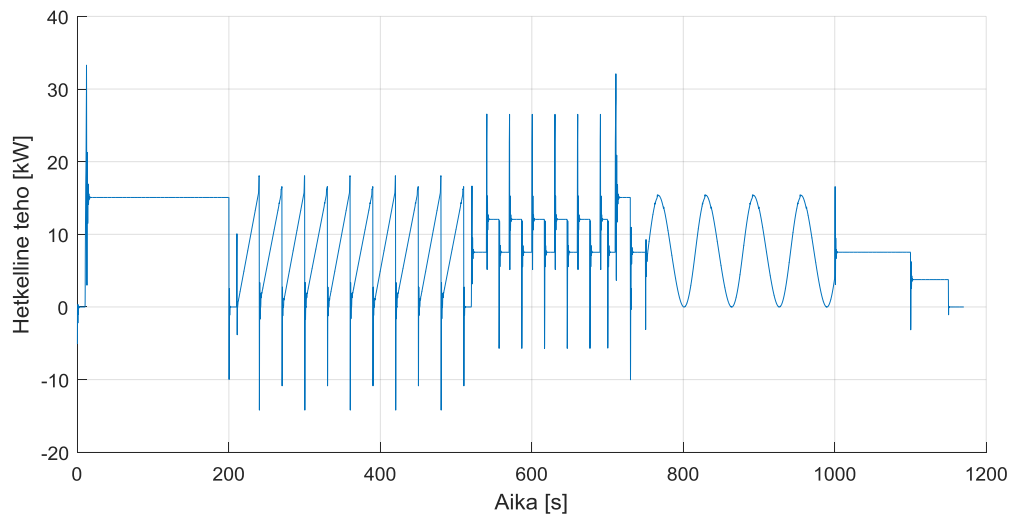
Simuloitu ajosykli kuvaa tyhjällä traktorilla tehtävää maatalon pihapiirissä työskentelyä. Simuloitaessa ajosykliä on traktorin ajomoottoreiden nopeuden referenssiksi annettu kuvitteellinen ajosykli, joka on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 5.2 Simuloidun ajosyklin nopeus. Sininen käyrä on nopeuden pyyntiarvo ja punainen käyrä on simuloinnin tuloksena saatu nopeus.

Kuvassa 5.2 tasaiset osuudet kuvaavat siirtymäaajoa, peräkkäisillä ramppimuodoilla kuvataan tyypillistä tavaroiden siirtelyä, jossa kiihdytyksen jälkeen jarrutetaan nopeasti, ja siniaaltokuviolla kuvataan ajoa, jossa ympäristön takia voidaan ajaa välillä kovaa ja välillä joudutaan lähes pysähtymään. Kuvasta havaitaan, että traktorin virtuaalimallin nopeus seuraa hyvin ohjearvoaan. Suurimmat erot tulevat askelmaisissa muutoksissa, joissa PI-ohjain ohjaa hetkellisesti hieman liian kovaa. Alun pienet piikit johtuvat mallin asettautumisesta paikallaan ollessa. Kokonaisuutena kuitenkin traktori seuraa tarkasti ohjearvoaan.

Tarkastellaan seuraavaksi ajomoottoreiden tuottamaa hetkellistä tehoa seuraavasta kuvasta.



Kuva 5.3 Simuloidun ajosyklin ajomoottoreiden tuottama hetkellinen teho.

Kuvasta 5.3 havaitaan, että ajomoottoreiden tuottamat tehot ovat lähellä teorian perusteella laskettuja arvoja. Kuvassa 5.3 ajomoottoreiden tuottamaksi kokonaisenergiaksi saadaan noin 2.9 kWh. Kun simuloitu ajosykli kesti 19 minuuttia 30 sekuntia, saadaan traktorin ajomoottoreiden tuottamaksi keskimääräiseksi tehoksi noin 8.8 kW tunnissa ajettaessa tyhjällä traktorilla.

Arvioitaessa jäähdytysjärjestelmän tehoa ajotilanteessa on dieseltraktorin vesipumpun ja tuulettimen yhteistehoksi arvioitua keskimäärin 3.3 kW. Tällöin käyttäen ajojärjestelmien arvioituja häviötehoja saadaan sarjahybriditraktorille lineaarisesti arvioitu jäähdytystehontarve, kun ajetaan sarjahybridimoodissa ja sähkömoodissa. Edellä mainitut jäähdytystehontarpeet on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5.13 Dieseltraktorin ja sarjahybriditraktorin arvioituja jäähdytystehontarpeita, kun jäähdytysjärjestelmän tehontarpeet on ajateltu käyttäytyvän lähes lineaarisesti häviötehoon nähden.

	Dieseltraktori	Sarjahybridimoodi	Sähkömoodi
Jäähdytystehontarve	3.3 kW	2.1 kW	0.6 kW

Lisättäessä ajomoottoreiden keskiteho noin 8.8 kW taulukon 5.13 arvoihin saadaan sarjahybriditraktorille keskimääräiseksi tehonkulutukseksi sarjahybridimoodissa noin 10.9 kW ja sähkömoodissa noin 9.4 kW. Simuloitua ajosykliä olisi mahdollista ajaa tyhjällä traktorilla laskennallisesti pelkällä akkuihin varastoidulla sähköllä, 100 % varauksen purulla, reilu kolme tuntia, mikä riittäisi tavoitelluksi tunnin kahden toiminta-ajaksi.

Simuloitaessa ajosykliä sarjahybridimoodissa niin, että akuston varaustilan lähtö- ja lopputaso olivat dieselgeneraattorin ohjauksen ylärajalla 0.5, saatiin kuvan 5.2 simuloidun ajosyklin (19 min 30 s) polttoainekulutukseksi noin 1.26 l. Tällöin dieselgeneraattori toimi akun varaustilan mukaan optimaalisimmassa toimintapisteessään noin 20.4 kW:n sähkötehoilla. Simuloidun ajosyklin keskimääräiseksi kulutukseksi saadaan laskettua noin 3.9 l/h. Verrattaessa kulutusta kaupallisten [20], [21] dieselgeneraattoreiden kulutuksiin havaitaan simuloidun dieselgeneraattorin optimitoimintapisteen kulutuksen olevan samaa suuruusluokkaa kaupallisten dieselgeneraattoreiden kulutuksen kanssa.

5.9 Työkoneet joita voidaan käyttää

Tarkisteltaessa mitä ja minkä kokoisia liitettäviä työkoneita mitoitettuun traktoriin voidaan liittää, aloitetaan tarkastelu vertaamalla kappaleessa 5.2 mitoitettua traktorin häviötöntä vetokykyä ja traktorin voiman ulosottoa kappaleesta 5.3 työkoneiden vaatimiin voiman tarpeisiin kappaleesta 3. Tällöin traktorin 24.1 kN:n vetovoimalla ja 40 kW:n voiman ulosotolla voitaisiin normaalilla pellolla, jossa on kymmenen asteen kaltevuus, käyttää seuraavan taulukon kokoisia liitettäviä työkoneita.

Taulukko 5.14 Arvio suurimmista case-traktoriin liitettävistä työkoneista, ajettaessa kymmenen asteen kaltevuosisella normaalilla pellolla.

Työkone	Max koko
Peräkärry	~8 tonnia
Kultivaattori	~2.2 metriä leveä
Lautasmuokkain	~2.2 metriä leveä
Kyntöaura, syvyys 20 cm	~1.5 metriä leveä
Jyrä	~6 metriä leveä
Kylvökone	~2.2 metriä leveä
Tarkkuuskylvökone	4 rivinen
Suorakylvökone	~3.0 metriä leveä
Niittomurskain	~2.0 metriä leveä
Pyöröpaalain	~1 m ³
Suurkantipaalain	~0.8 m ³
Lumilinko	~2.4 metriä leveä

Tarkasteltaessa taulukon 5.14 arvoja on kuitenkin muistettava, että etenkin paalaimia ei välttämättä löydy näin pieniä. Lisäksi energiavaraston ja generaattorin mitoitus perustuu kevyeen maatalon pihapiirin työhön, jolloin intensiivinen viljelykoneen käyttö ei onnistu kuin vähän aikaa. Ajateltaessa pitkään kestävästä työskentelystä olisi generaattori mahdollista mitoitaa suuremmaksi, jolloin akusto toimisi vain energian välipuskurina.

5.10 Investointihintavertailu ja takaisinmaksuaika

Tehtäessä investointihintavertailua ja takaisinmaksuajan tarkastelua, on ensin tarkasteltava mitä osia ei hybriditraktoriin tule, kun verrataan sitä perinteiseen dieseltraktoriin. Tällöin saadaan arvio traktoreiden investointikustannuksien välille. Takaisinmaksuaika taas voidaan määrittää käyttökustannuksien, tässä tapauksessa polttoaineen ja sähkön hinnan, avulla. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty traktorin huoltokustannukset sekä sähkön hinnassa kiinteät kuukausimaksut.

5.10.1 Investointihintavertailu

Tarkastelussa perinteisestä polttomoottoritraktorista on ajateltu poistettavan moottori ja voimansiirto planeettavaihteistoa lukuun ottamatta. Vastaavasti tehtäessä nelivetosarjahybriditraktoria tuodaan traktoriin akusto, dieselgeneraattori, jokaiselle renkaalle oma sähkökone ja vaihtosuuntaaja, voiman ulosotolle sähkökone ja sille vaihtosuuntaaja, hydraulikalle sähkökone ja sille vaihtosuuntaaja sekä apu- ja järjestelmälaitteille kullekin omat sähkökoneet ja vaihtosuuntaajat. Alennusvaihteiden ja planeettavaihteiston investointikustannusten arvioidaan menevän lähelle toisiaan, jolloin ne on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Seuraavaan taulukkoon on kasattu eräiden valmistajien yksittäis- ja varaosahintoja edellä mainituille traktorin komponenteille.

Taulukko 5.15 Diesel- ja hybriditraktorin investointihintojen vertailu. Taulukon hinnat ovat traktorin komponenttien yksittäis- ja varaosahintoja.

Dieseltraktori		Hybriditraktori	
Dieselmoottori	~16 000€	Akusto 35 kWh	~52 000€
Päävaihteisto	~13 500€	Dieselgeneraattori 35 kW	~9 000€
		Ajomoottorit (4 kpl) ~18 kW	~7 000€
		Ajom. vaihtosuuntaajat (4 kpl)	~7 500€
		PTO:n sähkökone ~40 kW	~2 500€
		PTO:n vaihtosuuntaaja	~3 000€
		Työhydr. sähkökone ~20kW	~2 000€
		Työhydr. vaihtosuuntaaja	~2 000€
		Apu- ja järjestelmälaitteiden moottorit (4kpl)	~3 000€
		Apu- ja järjestelmälaitteiden vaihtosuuntaajat (4 kpl)	~1 500€
Yhteensä	~29 500€	Yhteensä	~89 500€

Taulukon 5.15 arvoista saadaan investointihinnoille eroksi noin 60 000€ dieseltraktorin hyväksi. Hybriditraktorin investointihintoja voitaisiin yrittää pienentää akustoa vaihtamalla tai yhdistelemällä voiman ulosoton, hydraulikan sekä apu- ja järjestelmälaitteiden sähkökoneita. Tällöin kuitenkin menetettäisiin akuston elinikää sekä voimantuoton hajauttamisen mukanaan tuomat energiankulutuksen potentiaaliset säästöt.

5.10.2 Takaisinmaksuaika

Laskettaessa takaisinmaksuaikaa on tarkastelussa oletettu käyttäjän olevan maatalousyrittäjä jolloin sekä polttoaineesta, että sähköstä menee pienempi arvonlisävero. Huoltokustannuksia ja sähköliittymän kuukausimaksuja ei ole otettu huomioon laskelmissa. Tarkastellaan ensin polttomoottoritraktorin ja hybriditraktorin kulutusta voimalinjojen hyötysuhteiden avulla. Dieseltraktorin voimalinjassa on dieselmoottori, vaihteisto ja alennusvaihte, kun taas sarjahybriditraktorin voimalinja koostuu generaattorista, akusta, vaihtosuuntaajasta, sähkökoneesta ja alennusvaihteesta. Sarjahybridia ajettaessa pelkästään verkosta akkuun ladatulla sähköllä puhutaan sähkömoodista ja dieselgeneraattorin ollessa toiminnassa puhutaan sarjahybridimoodista.

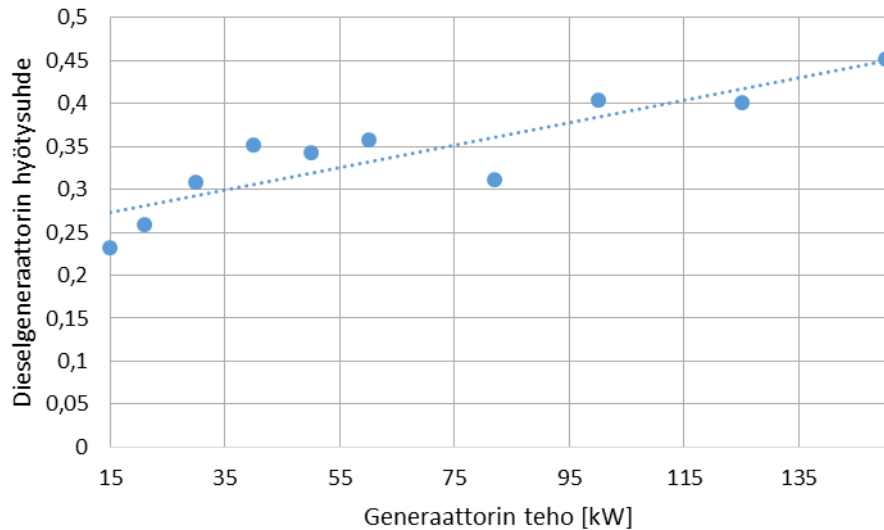
Traktorin voimasiirron hyötysuhde

Dieseltraktorin hyötysuhdetta tarkasteltaessa voidaan kirjallisuudesta havaita, että traktoreille on vetotesteissä [50] saatu tehoa hyötykäyttöön noin 3.0 kW kulutettua polttoainetta litraa kohden. Käytettäessä kevyen moottoripolttoöljyn lämpöarvoa 10.7 kWh/l saadaan traktorin hyötysuhteeksi tällöin 0.28. Kun traktoreiden vaihteistoilla tyypilliset hyötysuhteet ovat 0.8 – 0.85 välillä [14] ja alennusvaihteiden hyötysuhteet ovat 0.98 luokkaa [63], saadaan dieselmoottorin hyötysuhteeksi laskettua noin 0.34. Tämä on kuitenkin usein optimaalisimman toimintapisteen hyötysuhde, jolloin operoitaessa eri toimintapisteissä ja näiden välillä ei dieseltraktorin hyötysuhde ole enää näinkään hyvä [64].

Sarjahybriditraktorin hyötysuhdetta tarkasteltaessa voimalinjan ensimmäisenä komponenttina on generaattori. Generaattorin hyötysuhdetta on tarkastelussa selvitetty kulutetun polttoaineen lämpöarvon ja ulossyötetyn tehon avulla. Hyötysuhteet on laskettu yhtälöllä

$$\eta = \frac{E_{ulos}}{E_{sisään}}, \quad (5.8)$$

jossa E_{ulos} on generaattorin tuottama energia ja $E_{sisään}$ on generaattorin kuluttama energia. Erikseen myytävien varavoimakäyttöön tarkoitettujen dieselgeneraattoreiden [20] hyötysuhteita on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 5.4 Erillisinä myytävien [20] varavoimakäyttöön tarkoitettujen dieselgeneraattoreiden hyötysuhdeita.

Kuvasta 5.4 havaitaan, että generaattoreiden hyötysuhde vaikuttaa kasvavan, kun sen koko kasvaa. Valitulla 35 kW:n dieselgeneraattorilla hyötysuhde on kuvaajan trendilinjan perusteella noin 0.30 ja lähinten referenssipisteiden keskiarvon perusteella noin 0.325. Toisaalta John Deeren laivakäyttöön tarkoitella 44 kW:n dieselgeneraattorilla [21] päästään noin 0.37 hyötysuhteeseen. Tällöin oletettavaa on, että jatkuvaan käyttöön tarkoitettulla dieselgeneraattorilla päästään parempaan hyötysuhteeseen kuin varavoimakäyttöön tarkoitettulla. Arvioidaan siis 35 kW:n dieselgeneraattorin hyötysuhteeksi 0.36. Hybriditraktorin litium-akustoille on kirjallisuudessa esitetty hyötysuhteeksi 0.94 – 0.97 [62]. Koska valitun akuston valmistaja [18] ei ole erikseen ilmoittanut akun hyötysuhdetta, oletetaan sen olevan litium-akustoille tyypillisellä alueella 0.95. Edelleen sarjahybriditraktorin voimansiirtolinjassa vaihtosuuntaajalle on keskimääräiseksi hyötysuhteeksi ilmoitettu noin 0.96 – 0.97 [65] ja kestopagneettitahtikoneille riippuen kokoluokasta 0.93 – 0.96 [66].

Seuraavaan taulukkoon on kasattu voimansiirtolinjan hyötysuhdeita energiavarastolta renkaalle, kun dieseltraktorin moottorin ja vaihteiston keskimääräisen hyötysuhteen on oletettu olevan kolme prosenttia parasta hyötysuhdetta matalampi.

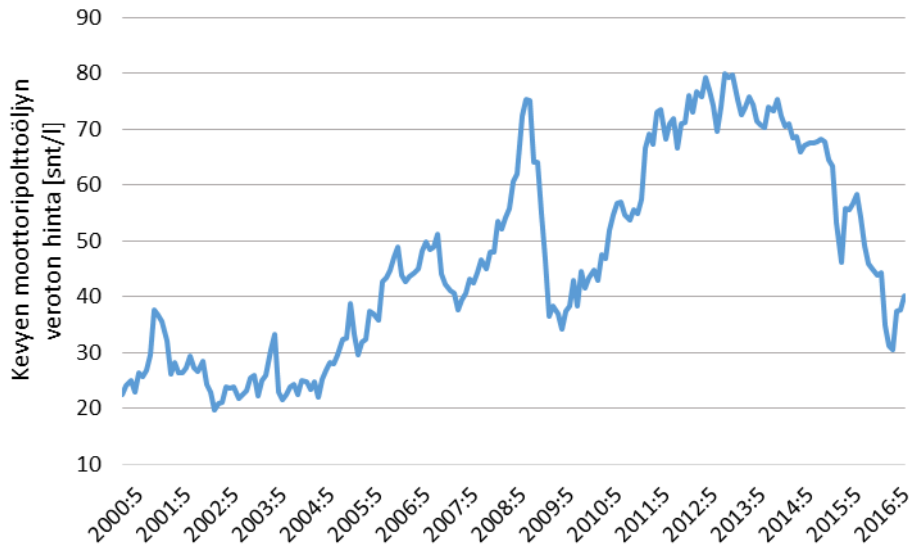
Taulukko 5.16 Kirjallisuuden perusteella arvioituja dieseltraktorin ja sarjahybriditraktorin voimansiirron hyötysuhteita tankista tai akusta renkaalle.

Dieseltraktori		Sarjahybridimoodi		Sähkömoodi	
Moottori	0.31	Generaattori	0.36	Akku	0.95
Vaihteisto	0.82	Akku	0.95	Vaihtosuuntaaja	0.97
Alennusvaihde	0.98	Vaihtosuuntaaja	0.97	Sähkömoottori	0.94
		Sähkömoottori	0.94	Alennusvaihde	0.98
		Alennusvaihde	0.98		
Yhteensä	0.25	Yhteensä	0.31	Yhteensä	0.85

Taulukosta 5.16 nähdään, että voimalinjojen hyötysuhteet eroavat huomattavasti verrattaessa täysin sähköllä toimivaa traktoria ja perinteistä dieseltraktoria, ja jonkin verran, kun verrataan sarjahybriditraktoria, jonka sähkö tuotetaan generaattorilla, ja perinteistä dieselt- raktoria.

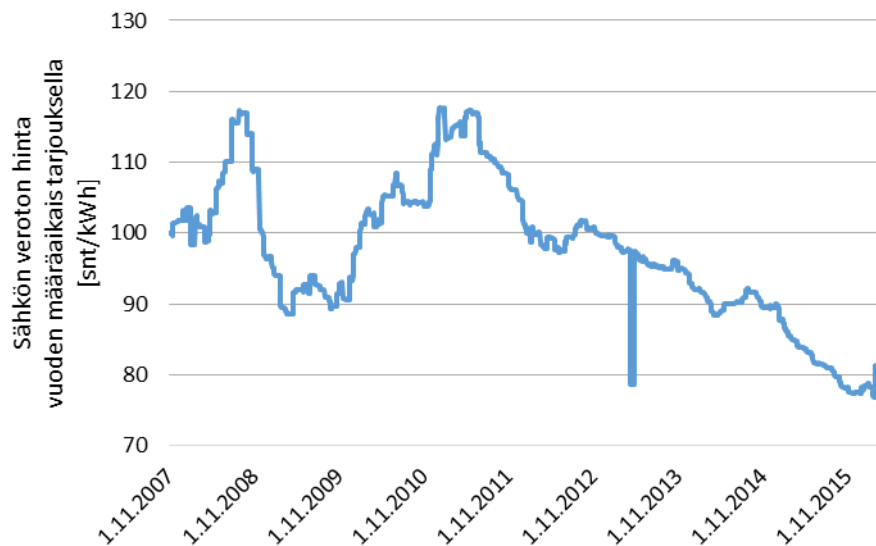
Käytetyn energian hinta

Tarkasteltaessa käytetyn energian hintaa, saadaan eräältä polttoainetoimittajalta kevyen moottoripolttoöljyn hinnaksi 0.7039 €/l pihaan toimitettuna, ja sähkön kokonaishinnaksi 8.6417 senttiä/kWh. Kun kevyen moottoripolttoöljyn lämpöarvoksi arvioidaan 10.7 kWh/l, saadaan kevyen moottoripolttoöljyn hinnaksi 6.5785 senttiä/kWh. Hinnat ovat 14.4.2016 saatuja hintoja, joissa ostajan on oletettu olevan maatalousyrittäjä, tai muuten matalamman veroasteen laskutuksen piirissä. Seuraavissa kuvissa 5.5 ja 5.6 on esitetty kevyen moottori- polttoöljyn ja sähkön hinnan kehitystä aikaisemmilta vuosilta.



Kuva 5.5 Keven moottoripolttoöljyn verottoman hinnan kehitys vuosilta 2000 – 2016. [67]

Kuvasta 5.5 havaitaan, että keven moottoripolttoöljyn verottoman hinnan suuntakehitys on ollut nousujohteinen lukuun ottamatta viimevuosien taloustaantumaa. Onkin perusteltua olettaa, että tämän hetken hinta on lähellä edullisinta mahdollista hintaa ja tulevaisuudessa talouden piristyessä lähtee keven moottoripolttoöljyn hinta jälleen nousuun.

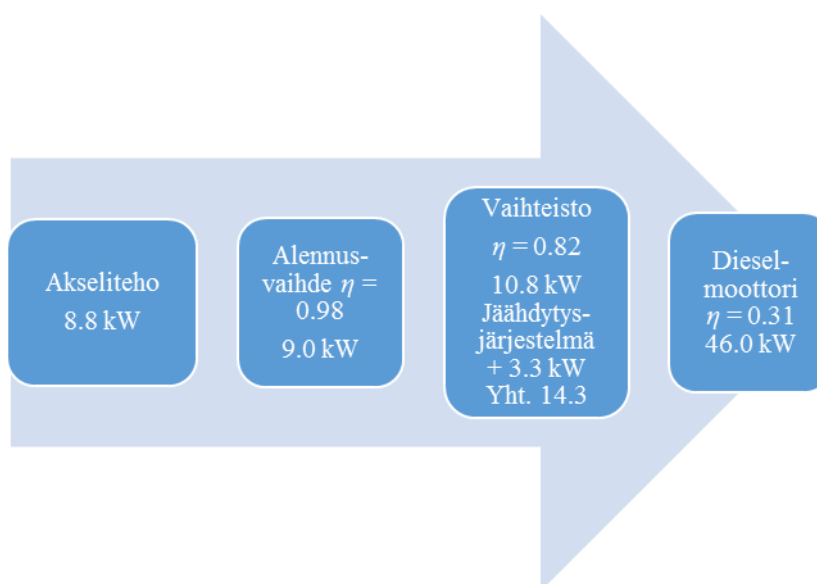


Kuva 5.6 Sähkön veroton hinta vuoden määräaikaisarjokselle vuosilta 2007 - 2016. Sisältää siirtomaksun, huoltovarmuusmaksun ja energian hinnan. [68]

Kuvasta 5.6 havaitaan, että sähkön veroton hinta on tullut viime vuosina alaspäin. Sähkön keskihinta on kuitenkin pysynyt lähellä 100 snt/kWh, jolloin sen hinta ei todennäköisesti lähde nousemaan talouden piristyessä yhtä voimakkaasti, kuin kevyen moottoripolttoöljyn hinta.

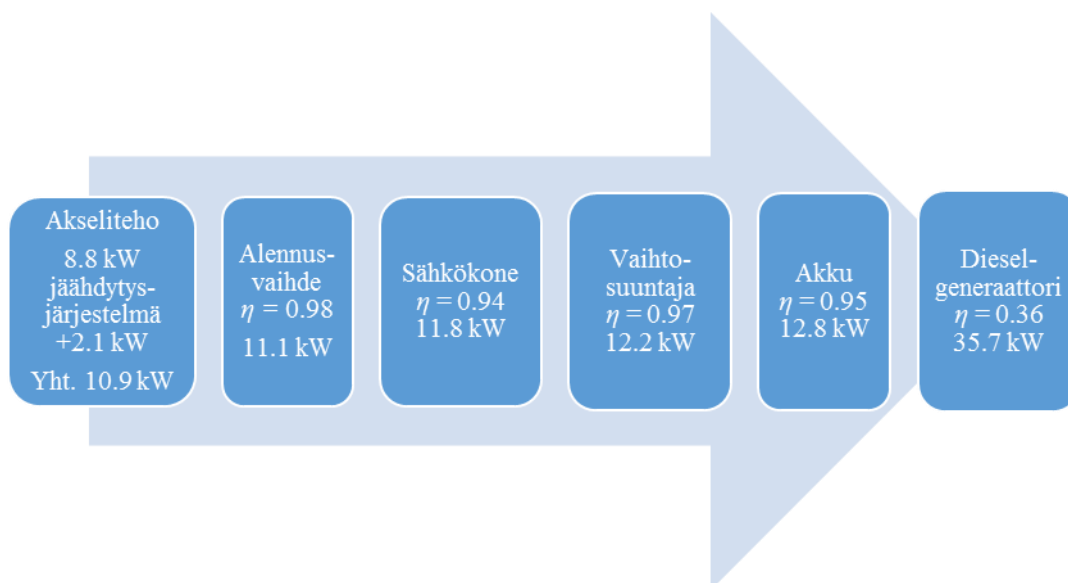
Tehontarve

Simulaatiomallilla ajettulla ajosyklillä, kappaleessa 5.8, jossa mallinnettiin maatalon pihapiirin päivittäistä työajoa, vaadittiin kokonaisuudessaan mekaanista energiaa noin 2.9 kWh 19 minuutin ja 30 sekunnin ajosyklin aikana. Tällöin traktorin keskitehoksi tunnissa saatiin noin 8.8 kW, johon lisättäessä jäähdytysjärjestelmän arvioitu keskimääräinen teho taulukosta 5.13, saadaan tyhjällä traktorilla ajettaessa keskimääräiseksi tehoksi sarjahybridimoodissa noin 10.9 kW ja sähkömoodissa noin 9.4 kW. Vastaavasti dieseltraktorille voidaan arvioida, että sen renkaiden akseliteho on simulaatiossa saatu tulos 8.8 kW ja moottorilta otetaan lisäksi 3.3 kW tehoa jäähdytysjärjestelmälle. Seuraavissa kuvissa 5.7 – 5.9 on havainnollistettu taulukon 5.16 hyötysuhteiden arvoja ja kulutettua tehoa.



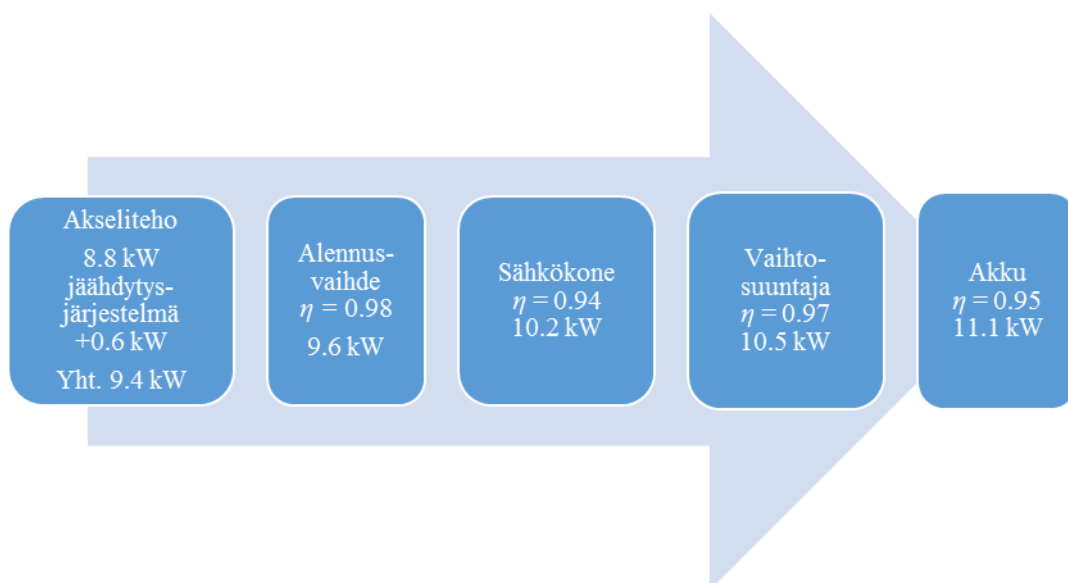
Kuva 5.7 Dieseltraktorin tehonkulutus kaavio.

Kuvasta 5.7 havaitaan, että dieseltraktorin vaihteistossa ja moottorissa muodostuu paljon häviötehoja ajon aikana. Seuraavassa kuvassa 5.8 on havainnollistettu sarjahybriditraktorin voiman siirtoa sarjahybridimoodissa.



Kuva 5.8 Sarjahybriditraktorin tehonkulutus sarjahybridimoodissa.

Kuvasta 5.8 havaitaan, että sarjahybriditraktorin häviötehot ovat alennusvaihteen ja sähkötekniikan osalta pienet. Kuitenkin ajettaessa sarjahybridimoodissa, jossa dieselgeneraattorilta otetaan tehoa, havaitaan dieselgeneraattorin olevan vähiten energiatehokas. Lisäksi johdettua dieselgeneraattorin häviöistä tarvitaan jäähdytysjärjestelmältäkin enemmän tehoa verrattaessa seuraavan kuvan 5.9 sarjahybriditraktorin sähkömoodiin. Seuraavassa kuvassa 5.9 on havainnollistettu sarjahybriditraktorin sähkömoodin tehonkulutusta.



Kuva 5.9 Sarjahybriditraktorin tehonkulutus sähkömoodissa.

Kuvasta 5.9 havaitaan, että ajettaessa sähkömoodissa kokonaisjärjestelmän hyötysuhde on parempi kuin kuvissa 5.7 ja 5.8 esitetyillä dieseltraktorilla ja sarjahybriditraktorilla sarjahybridimoodissa.

Energiankulutus vuodessa ja takaisinmaksuaika

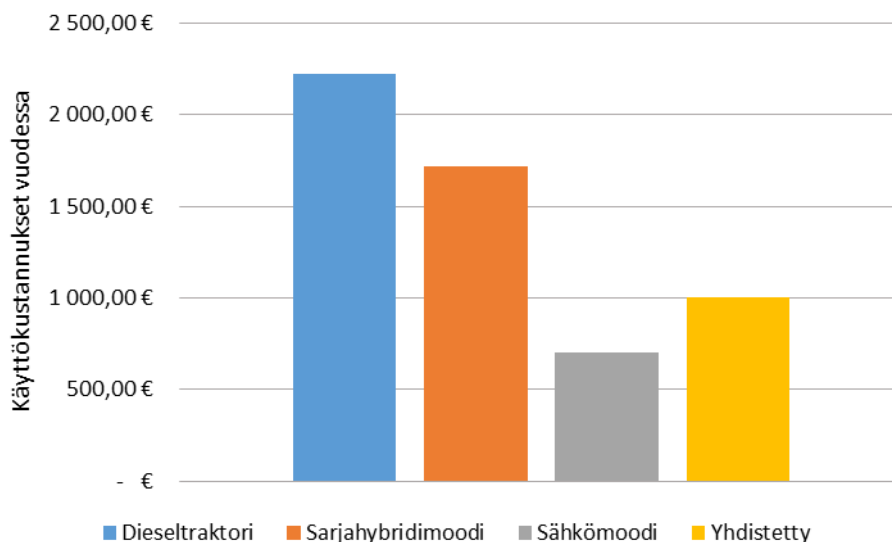
Kuvissa 5.7 – 5.9 havainnollistettujen tehontarpeiden avulla voidaan laskea, paljon kahden tunnin päivittäisellä ajolla kuluu energiaa vuodessa. Vuodessa kulutetulle energialle saadaan edelleen hinta käyttäen kappaleen 5.10.2 osion 'Käytetyn energian hinta' arvoja. Seuraavassa taulukossa 5.17 on esitetty traktoreiden kuluttama energiamäärä tunnissa ja vuodessa sekä traktoreiden käyttökustannukset, kun traktoreiden keskimääräiset hyötysuhteet on otettu huomioon. Tarkastelussa päivittäistä ajoa on kaksi tuntia.

Taulukko 5.17 Traktoreiden energiankulutuksen ja käyttökustannusten analyttinen kokonaiskulutukseen perustuva vertailu, kun päivittäistä ajoa on kaksi tuntia.

	Dieseltraktori	Sarjahybridimoodi	Sähkömoodi
Kulutus tunnissa	~ 46.6 kWh/h	~ 35.7 kWh/h	~ 11.1 kWh/h
Kulutus tunnissa	~ 4.3 l/h	~ 3.3 l/h	-
Kulutus vuodessa	~ 33.8 MWh/a	~ 26.1 MWh/a	~ 8.1 MWh/a
Kulutus vuodessa	~ 3 150 l/a	~ 2 440 l/a	-
Energian hinta	~ 6.78 snt/kWh	~ 6.78 snt/kWh	8.64 snt/kWh
Käyttökustannukset	~ 2 220 €/a	~ 1 720€/a	~ 700 €/a
Ero	0 €/a	- 500 €/a	- 1 520 €/a

Verrattaessa dieseltraktorin ja sarjahybriditraktorin eri moodien käyttökustannuksia, havaitaan sähkömoodin olevan huomattavasti edullisempi verrattaessa muihin. Jos oletetaan vielä, että vuoden aikana 70 % ajetaan sähköverkosta ladatulla sähköllä ja 30 % ajetaan kevyellä moottoripolttoöljyllä, saadaan yhdistetyksi käyttökustannukseksi noin 1 000 € vuodessa.

Seuraavassa kuvassa 5.10 on havainnollistettu käyttökustannuksia eri traktoreilla ja moodeilla.



Kuva 5.10 Traktoreiden ja toimintamoodien käyttökustannukset vuodessa, kun päivittäinen ajo on kaksi tuntia. Yhdistetyssä käytetty energia on 70 % verkkosähköä ja 30 % generaattorista.

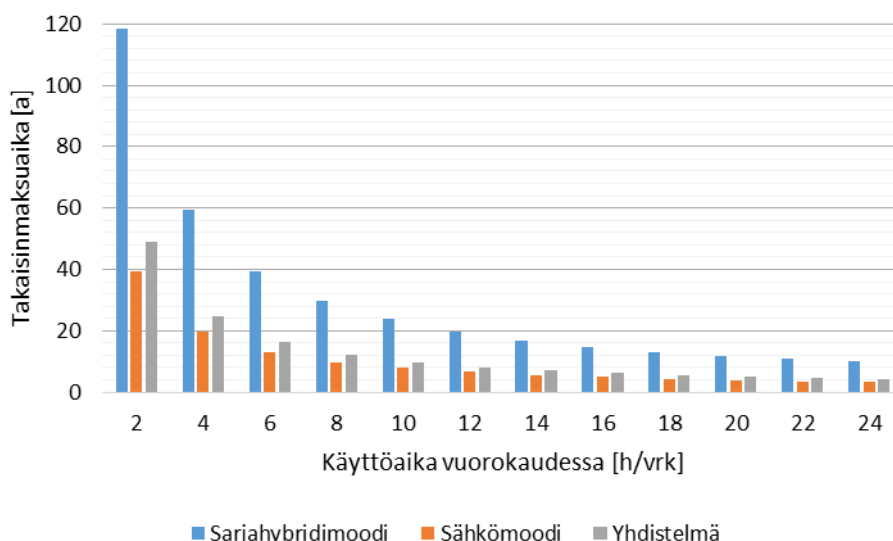
Kuvasta 5.10 voidaan havaita, että pelkällä sähköllä ajettaessa säästetään jopa 69 % käyttökustannuksissa verrattaessa dieseltraktoriin. Saatujen käyttökustannuserojen avulla voidaan nyt laskea hybriditraktorille takaisinmaksuaika. Tällöin edellisen kappaleen, 5.10.1, hybridisoinnin lisäinvestointihinta, noin 60 000 €, maksaisi itsensä seuraavan suuruisena ajanjaksona.

Taulukko 5.18 Sarjahybriditraktorin takaisinmaksuajat eri toimintamoodeilla verrattaessa polttomoottoritraktoriin, kun päivittäistä ajoa on kaksi tuntia.

	Sarjahybridimoodi	Sähkömoodi	Yhdistetty 70 % / 30 %
Takaisinmaksuaika	~ 118 a	~ 39a	~ 49 a

Taulukosta 5.18 voidaan havaita, että lisäinvestointi hybriditraktoriin ei ole tällä hetkellä kannattavaa kahden tunnin päivittäisellä ajolla. Huomattavaa kuitenkin on, että sähköllä ajettaessa käyttökustannukset ovat suurin piirtein kolmanneksen verrattaessa perinteiseen dieseltraktoriin. Lisäksi on oletettavaa, että sähköisen voimansiirron huoltokustannukset ovat

pienemmät verrattaessa perinteiseen dieseltraktorin voimansiirtoon, jolloin todellinen takaisinmaksuaika voi olla huomattavastikin pienempi, kuin mitä tulokseksi saatiin. Eri käyttöajoilla vastaavasti saadaan seuraavaan kuvan 5.11 esittämiä takaisinmaksuaikoja.



Kuva 5.11 Sarjahybriditraktorin lisäinvestoinnin takaisinmaksuaikoja eri käyttöajoilla vuorokaudessa.

Kuvasta 5.11 havaitaan, että kahdeksan tunnin vuorokautisella työskentelyllä päästään sähkömoodilla ajettaessa jo noin 10 vuoden takaisinmaksuaikaan ja sarjahybridimoodilla noin 30 vuoden takaisinmaksuaikaan.

Takaisinmaksuaika vaihtoehtoisilla komponenteilla

Käytettäessä vaihtoehtoisesti esimerkiksi akuston hintana LiFePO_4 -kennostojen hintaa 640 €/kWh [69] tai Teslan autojen arvioitua akuston hintaa 250 \$/kWh (noin 220 €/kWh) [70], [71], saadaan takaisinmaksu ajaksi tällöin seuraavassa taulukossa 5.19 esitettyjä aikoja.

Taulukko 5.19 Sarjahybriditraktorin takaisinmaksuaika vaihtoehtoisilla akustoilla ja eri toimintamodeilla, kun päivittäistä ajoa on kaksi tuntia.

Takaisinmaksuaika akustolle	Sähkömoodi	Sarjahybridimoodi	Yhdistetty 70 % / 30 %
LiFePO_4	~ 20 a	~ 60 a	~ 25 a
Teslan akusto	~ 10 a	~ 31 a	~ 13 a

Tehtaessä täysin sähköistetty traktori, jossa ei olisi generaattoria, saataisiin Teslan akuston hinnalla reilu neljän vuoden takaisinmaksuaika, kun päivittäinen ajoaika on kaksi tuntia. Nämä takaisinmaksuajat ovat huomattavasti pienempiä, verrattaessa taulukon 5.17 arvoihin, mutta tällöin kuitenkin menetetään LiTi-akuston erinomainen oletettavissa oleva elinikä.

5.11 Tulokset

Kappaleessa 5 mitoitettu kuvitteellinen sarjahybriditraktori toimii virtuaalimallilla tehdyllä simuloinnilla hyvin. Suorituskyvyltään traktori vastaa kokoluokan perinteisiä dieseltraktoreita lukuun ottamatta voiman ulosottoa, joka on tarkoituksella mitoitettu pienemmäksi. Simuloitujen tulosten ja traktoreiden voimansiirron keskimääräisten hyötysuhteiden perusteella saatiin vuositason käyttökustannuksissa etenkin puhtaasti sähköllä ajettaessa merkittäviä käyttökustannussäästöjä. Verrattaessa kuvassa 5.10 esitettyjä käyttökustannuksia, havaitaan sähköllä ajamisen olevan käyttökustannuksiltaan noin kolmanneksen dieseltraktorin polttoainekustannuksiin nähden. Lisäksi omalla uusiutuvan energian sähköntuotannolla on mahdollista pudottaa käyttökustannuksia edelleen.

Kuitenkaan hybridijärjestelmän komponenttien tämänhetkisillä yksittäishinnoilla ei traktorin hybridisointi tai täyssähköistys ole taloudellisesti kannattavaa. Etenkin akuston hinta nostaa kokonaisinvestointikustannukset merkittävän suuriksi. Vaihtoehtoiset akustot laskevat hintaa, mutta silti akusto muodostaa merkittävän osan lisäinvestoinneista. Tämän hetken hinnoilla ainoastaan täysin sähköistetty traktori Teslan akustojen hinnalla ilman generaattoria on järkevä ratkaisu kustannuslaskennallisesti, mutta tällöinkin päästään vasta noin neljän vuoden lisäinvestoinnin takaisinmaksuaikaan, kun päivittäistä ajoa on keskimäärin kaksi tuntia vuodessa. Tällöin kuitenkin tulee rajoitettu toiminta-aika, joka ei varsinkaan aktiiviviljelijöille ole mahdollista.

Verrattaessa sarjahybridimoodin keskiarvoisiin hyötysuhteisiin perustuvaa analyttistä polttoainekulutusta (noin 3.3 l/h) simuloituun polttoainekulutukseen (noin 3.9 l/h), havaitaan simuloidun kulutuksen olevan noin 15 % korkeampi. Tämä ero johtuu On / Off -säädön aiheuttamista dieselmoottorin transienteista, kun analyttisessä tarkastelussa niitä ei ole huomioitu yhtä tarkasti.

Työn rajauksista on huomioitava, että tarkastelussa ei ole huomioitu traktorin massan muutosta hybridisoinnin seurauksena eikä sähkötekniikan (sähkökoneet, vaihtosuuntaajat, akusto) tilantarvetta ole huomioitu. Tarkisteltaessa traktorin massaa voidaan olettaa painon muutoksen olevan sadoissa kiloissa, jolloin neljän tonnin painoisessa traktorissa muutos on alle 10 %. Tämän suuruudesta massan muutoksesta seuraa hieman suurempi vierintävastus, mutta kokonaisuutta ajatellen tästä ei seuraa suurta virhettä kuin tyhjällä traktorilla ajoon. Vastaavasti sähkötekniikan tilansuhteen ei ole tehty arvioita, mutta isoin komponentti akusto on mahdollista sijoittaa esimerkiksi traktorin pohjaan pienellä maavaran kustannuksella.

Lähtöleveysuuden akkujen ominaisuuksien ja -hinnan kehitys ovat todennäköisesti sellaisia, että traktorin hybridisointi tai täyssähköistys tulee kannattavaksi. Lisäksi ajateltaessa maataloustraktorilla tehtäviä työtehtäviä kannattasi kiinnittää myös huomiota liitettävien työkooneiden ja traktoreiden kokonaisenergiatehokkuuteen. Tämä tarkoittaisi käytännössä mekaanisten ja hydraulisten voimansiirtojen minimointia ja muuttamista mahdollisuuksien mukaan sähköiseksi.

Tarkasteltaessa virtuaalimallin jatkokehityskohteita pääpaino on ajomoottoreiden ohjauksen kehittämisessä. Optimaalisella ajomoottoreiden ohjauksella on mahdollista päästä vielä hieman pienemmälle energiankulutukselle ja luistonesto olisi myös mahdollista toteuttaa ohjelmallisesti.

6. YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin maataloustraktorin hybridisointia virtuaalimallin avulla ja noin 75 kW:n traktorin hybridisointia. Simuloidun ajosyklin perusteella saadulla traktorin tehonkulutuksella laskettiin traktoreiden arvioitujen hyötysuhteiden perusteella kokonaisenergiankulutukset, käyttökustannukset ja investointien takaisinmaksuajat. Tulokseksi saatiin kahden tunnin päivittäisellä ajolla parhaimmillaan pelkällä sähköllä ajettaessa noin 39 vuoden takaisinmaksuaika valitulle kokoonpanolle, joka ei ole taloudellisesti kannattavaa. Kuitenkaan tarkastelussa ei ole otettu huomioon traktoreiden huoltokustannuksia ja investointikustannusten tarkastelussa ei välttämättä ole kaikkia traktorista poistettavia ja lisättäviä komponentteja, jolloin todellinen takaisinmaksuaika voi olla pienempi. Huomionarvoisinta tuloksissa on kuitenkin, että tämän hetken kevyen moottoripolttoöljyn ja sähkön hinnoilla on mahdollista päästä noin kolmannekseen käyttökustannuksissa ajettaessa pelkällä verkkosähköllä. Tällä hetkellä maataloustraktorin hybridisoinnissa on rajoittavimpana tekijänä akustojen hinta, minkä voidaan kuitenkin olettaa tulevan alaspäin tulevina vuosina. Tällöin hybridisointi ja traktorin täyssähköistäminen tulevat taloudellisesti huomattavasti kannattavammaksi.

LÄHTEET

- [1] DieselNet, ”European Union - Nonroad Engines”, verkkosivu, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <https://www.dieseln.net.com/standards/eu/nonroad.php#vessel>
- [2] Lindberg, S., ”Han kör Sveriges första batteritraktor”, 25.12.2015 NyTeknik, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/article3954073.ece
- [3] Bertini, A., Ceraolo, M., Lutzemberger, G., ”Development of a hybrid skid loader through modelling”, Energy Conference and Exhibition (Energycon), Pages 1022 – 1027, 2012 IEEE International.
- [4] Vauhkonen, N., Liljeström, J., Maharjan, D., Mahat, C., Sainio, P., Kiviluoma, P., Kuosmanen, P., ”Electrification of excavator”, 9th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering" - 24-26 April 2014, Tallinn, Estonia.
- [5] Merlo, ”Merlo 42.7 Hybrid”, verkkosivu, 2014 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.merlo.com/home/novit%C3%A0-prodotti-products-news/merlo-427-hybrid/?nazione=FI%2fFIN>
- [6] Catepillar, ”CAT | D7E WH Waste handler | Catepillar”, verkkosivu, 2016 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.cat.com/en_GB/products/new/equipment/dozers/waste-handling-dozers/1000012860.html
- [7] Green Car Congress, ”Study finds energy savings of PHEVs relative to HEVs dependent on charging coverage and daily VMT”, verkkosivu, 2014, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2014/03/20140311-lin.html>
- [8] Green Car Congress, ”New ABB Azipod D for electric marine propulsion requires 25% less installed power, boosts flexibility”, verkkosivu, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2015/03/20150325-abb.html>
- [9] Fendt, ”Fendt X Consept”, verkkosivu, 2016 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.fendt.com/us/2466.asp>

- [10] John Deere, "6R Series Tractors", verkkosivu, 2014 Viitattu 11.5.2016. Saatavissa: <http://www.utilben.ro/wp-content/uploads/2014/03/Specificatii-tehnice-tractor-John-Deere-6125R-Premium-TLS.pdf>
- [11] New Holland, "NH2 Tractor", verkkosivu, 2016 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://agriculture.newholland.com/us/en/About-New-Holland/Innovation/Pages/NH2-Tractor.aspx>
- [12] Journaltimes, Michael Bruke, "New Holland tractor uses farm's biomethane", verkkosivua, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://journaltimes.com/news/local/new-holland-tractor-uses-farm-s-biomethane/article_bc6127e2-2c77-5e0b-abfc-46dc37c51848.html
- [13] New Holland, "Biodiesel support", verkkosivu, 2016, viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://agriculture.newholland.com/us/en/About-New-Holland/CEL/Biodiesel-Support/Pages/default.aspx>
- [14] Renius, K., Resch, R., "Continuouslyvariable tractor transmissions", ASAE Distinguished Lecture No. 29, sivut 1 – 37, Agricultural Equipment Technology Conference, Feb 2005, Louisville, Kentucky, USA, Saatavissa: <https://elibrary.asabe.org/data/pdf/6/cvtt2005/lectureseries29rev.pdf>
- [15] Maxwell, "Ultracapacitor Overview", verkkosivu, 2016, Viitattu 12.5.2016 Saatavissa: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/>
- [16] Scrosati, B., Garche, J., "Lithium batteries: Status, prospects and future", Journal of Power Sources, 195 (9), sivut 2419–2430.
- [17] Sinopoly, "Battery products", verkkosivu, 2016, Viitattu 12.5.2016, Saatavissa: <http://www.sinopolybattery.com/en/products.aspx?cid=10>
- [18] Altairnano, "60 Amp Hour Cell" verkkosivu, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.altairnano.com/products/60-amp-hour-cell/>
- [19] Energiateollisuus, "Sähköntuotannon polttoaineet ja CO₂-päästöt", 5/2016, pdf-tiedosto, Viitattu 24.5.2016, Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/a_sahkontuotannon_kk_polttoaineet_huhti.pdf

- [20] GeneratorSales, "Diesel generators", verkkosivu, 2016, Viitattu 12.5.2016, Saatavissa: <http://www.centralmainediesel.com/diesel-generators.asp>
- [21] John Deere, "4045DFM704.5L Gen-Drive Engine 46 kW (62 hp) @ 1800rpm – Engine details", 2016, verkkosivu, Viitattu 17.5.2016, Saatavissa: http://www.deere.com/en_US/products/engines_and_drivetrain/marine/generator_drive_certified/4045_series/4045DFM70_B_1800.page#viewTabs
- [22] Motiva, "Polttokennoautot", verkkosivu, 2013, Viitattu 13.5.2016, Saatavissa: http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot
- [23] Yoshida, H., Sawa, T., Hyakudome, T., Ishibashi, S., Tani, T., Iwata, M., Moriga, T., "The high efficiency multi-less (HEML) fuel cell — A high energy source for underwater vehicles, buoys, and stations", OCEANS 2011 IEEE – Spain, sivut 1 – 6.
- [24] Franče, Z., Punčochář, I., Šimandl, M., "Effect of Optimal Control on Fuel Savings of Parallel Hybrid Electric Vehicle", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE.
- [25] Bücherl, D., "Simulation of the Electrical Machine's Fuel Saving Potential in Parallel Hybrid Drive Trains", Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International.
- [26] Dingxuan, Z., Tianyu, L., Zhiwen, Z., Chunbo, X., "Research on Energy-saving of Parallel Hybrid Power Loader", Information Science and Technology (ICIST), 2013 International Conference on.
- [27] Immonen, P., "Energy Efficiency of a Diesel-Electric Mobile Working Machine", Tohtorin väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013.
- [28] Sezer, V., Gokasan, M., Bogosyan, S., "A Novel ECMS and Combined Cost Map Approach for High-Efficiency Series Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume:60 , Issue: 8), 2011.

- [29] Ahokas J., Energia-Akatemia, ”Traktorit ja työkoneet”, verkkojulkaisu, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.energia-akatemia.fi/attachments/article/54/Traktorit%20ja%20ty%C3%B6koneet.pdf>
- [30] National research council of the national academies, “TRB special report 286 - Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy”, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2006.
- [31] Väderstad Ab, verkkosivusto, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.vaderstad.com>
- [32] Väderstad-Verken AB, ”Muokkaus”, Esite, Saatu 1/2016, Hankkija Oy, Lahti
- [33] Agrolux, ”Agrolux ploughs”, verkkosivusto, 2014, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.agrolux-ploughs.com>
- [34] Väderstad-Verken AB, ”Kylvö”, Esite, Saatu 1/2016, Hankkija Oy, Lahti
- [35] Krone Groop, “EasyCut B 970, B 1000 CV / CV Collect Niittokone- ja niittomurskainyhdistelmät”, pdf, 2013, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.agrimarket.fi/Liitetiedostot/Docs/krone-easycut-perhosniittomurskaimet-esite.pdf>
- [36] Krone Groop, ” EasyCut Nostolaitesovitteiset lautasniittokoneet”, pdf-tiedosto, 2011, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.agrimarket.fi/Liitetiedostot/Docs/EasyCut_Anbau_2011_Druck_FI_144dpi.pdf
- [37] Krone, ”Comprima Pyöröpaalaimet Paalainkäärimet”, verkkoesite, 2011, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.agrimarket.fi/Liitetiedostot/Docs/Comprima_2011_Druck_FI_144dpi.pdf
- [38] John Deere, ”Kiinteä- ja muuttuvakammioiset paalaimet”, Esite, Esite, Saatu 1/2016, Hankkija Oy, Lahti.

- [39] Agronic Oy, ”Agronic 1302 RRHiT”, pdf-tiedosto, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.agronic.fi/images/stories/pdf/Esitteet2015/Agronic_1302_RRHiT_2016.pdf
- [40] Agronic Oy, ”Agronic ACC PulseM”, pdf-tiedosto, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.agronic.fi/images/stories/pdf/Esitteet2015/Agronic_ACC_PulseM%20_2015.pdf
- [41] Krone Groop, “BiG Pack Big Balers” Verkkoesite, pdf-tiedosto, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://landmaschinen.krone.de/english/products/large-square-balers/big-pack/>
- [42] Agri-Kymi Oy, “Tempo Lumilingot”, pdf-tiedosto, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.agrikymi.fi/fi/tyokoneet/tiejalumikoneet/lumilingot>
- [43] Nokka Oy, ”Tuotteet \ Lumilingot”, verkkosivu, 2016, Viitattu 2.3.2016, Saatavissa: <http://www.nokka.fi/category/tuotteet/lumilingot/>
- [44] Kaikko, E-P., “Development of generic simulation model for mobile working machines”, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2015, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201502201666>
- [45] Montonen, J., Montonen, J-H., Immonen, P., Murashko, K., Ponomarev, P., Lindh, T., Lindh, P., Laurila, L., Pyrhönen, J., Tarkiainen, A., Rouvinen, A., “Electric Drive Dimensioning for a Hybrid Working Machine by Using Virtual Prototyping”, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on 2-5. syyskuuta 2012, Marseille, Sivut: 921 – 927.
- [46] Nokka, J., ”Sähköajoneuvon sähkökäytön ja mekaniikan reaaliaikaisen yhdistelmäsimulaation toteuttaminen virtuaaliympäristössä” Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201210259493>
- [47] Huttunen, S., ”Tutorials for MeVEA Simulation Software”, Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2010, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201103181359>

- [48] Nokka, J., Laurila, L., Pyrhönen, J., "Virtual Simulation in Energy Efficient Hybrid Powertrain Design", Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference, elokuu 2014, Lappeenranta, Sivut 1 – 12.
- [49] Ruuskanen, V., Immonen, P., Nerg, J., Pyrhönen, J., "Determining electrical efficiency of permanent magnet synchronous machines with different control methods", Electrical Engineering Volume 94, Issue 2, pp 97-106, kesäkuu 2012.
- [50] Hoy, R., Rohrer, R., Liska, A., Luck, J., Isom, L., Keshwani, D., "Agricultural Industry Advanced Vehicle Technology: Benchmark Study for Reduction in Petroleum Use", pdf-tiedosto, 2014, Saatavissa: <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/agindustry/AgIndustryAVTbenchmarkStudy.pdf>
- [51] Simic, D., Kral, C., Pirker, F., "Simulation of the Cooling Circuit with an Electrically Operated Water Pump", 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-7 Sept. 2005, Chicago, IL.
- [52] Shin, Y. H., Kim, S. C., Kim, M. S., "Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption", Energy Volume 57, 1 elokuu 2013, Sivut 624–631, Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213004465?np=y>
- [53] Mevea Simulation solutions, verkkosivusto, 2016, Viitattu 16.5.2016, Saatavissa: <http://mevea.com/>
- [54] Johansson, K., Canudas-de-Wit, C., "Revisiting the LuGre friction model", 2008, IEEE Control Systems (Volume:28, Issue: 6), sivut 108 – 114.
- [55] Nurmela, N., "Konedata.net - traktoreiden ja leikkuupuimureiden teknisiä tietoja" verkkosivusto, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.konedata.net/>
- [56] Massey Ferguson, "MF 4700" verkkosivusto, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://read.uberflip.com/i/596421-mf-4700-en>
- [57] New Holland – Agriculture, "New Holland T4", verkkosivu, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.agritek.fi/new-holland-malli?=&url_nimi=t4

- [58] Michelin, "2013/2014 Tyre Technical Data Book MICHELIN Agriculture and Compact Line", pdf-tiedosto, 2013, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.michelin-agricultural-tyres.co.uk/var/michelin_lpag/storage/original/application/MICHELIN-databook-2013-uk-2.pdf
- [59] Mudstruck, "R1 TIRE SIZES", verkkosivu, 2010 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.mudstruck.com/tech%20pages/tire-inf.htm>
- [60] Goodyear, "Tyre learn", Verkkosivu, 2016, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://www.goodyear.com.jm/tyres/farm/tire_learn.html
- [61] Häkli, E., Hydraulikkasuunnittelija PMC Polarteknik Oy Ab, Haastattelu, Lahdessa 30.3.2016.
- [62] Murashko, K., "Thermal modelling of commercial lithium-ion batteries", Tohtorin väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2016, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-908-8>
- [63] Roymeck, "Gear Efficiency", 2013, verkkosivu, Viitattu 12.5.2016, Saatavissa: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Drive/Gear_Efficiency.html
- [64] Van Horn, C., "Steady state and transient efficiencies of a four cylinder direct injection diesel engine for implementation in a hybrid electric vehicle", M.S. thesis, 2006, The Graduate Faculty of The University of Akron, Saatavissa: https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/akron1154354134/inline
- [65] ABB, "ABB string inverters", pdf-tiedosto, 2011, Viitattu 12.5.2016, Saatavissa: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider22/technical-documentation/solar-inverter-pvs300-flyer.pdf?sfvrsn=2>
- [66] Wem group, "Permanent magnet synchronous motors for inverter operation", pdf-tiedosto, Viitattu 12.5.2016, Saatavissa: http://www.wem-group.com/fileadmin/content/pdf/Download/Kataloge/Kataloge/pm_en.pdf

- [67] Öljy- ja biopolttoaineala ry, ”Hinnat : Kuluttajahintaseuranta vuodesta 2000”, verkkosivu, 2016, Viitattu 24.5.2016, Saatavissa: https://docs.google.com/spreadsheets/d/11_jUasrAh8GkDrImU1mTsPyN8H_ojNV06JbPWuSb3jo/pub?single=true&gid=13&output=html
- [68] Energiavirasto, ”Sähkön hintavertailu > Hintatilastot”, verkkosivu, 2016, Viitattu 24.5.2016, Saatavissa: <http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs>
- [69] Arctic Electric Vehicles Oy, “Sinopoly 3,2V 66Ah LiFePO₄-kenno (matala)”, verkkosivu, 2016 Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: http://arctic-ev.omaverkkokauppa.fi/epages/arctic-ev.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2015010202/Products/5100016
- [70] Green Car Congress, ”Anderman report on Tesla’s battery prospects with the Gigafactory”, verkkoartikkeli, 2014, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2014/09/anderman-report-on-teslas-battery-prospects-with-the-gigafactory.html>
- [71] Clean Technica, “Tesla Gigafactory & Battery Improvements Could Cut Battery Costs 50%”, verkkoartikkeli, 2015, Viitattu 11.5.2016, Saatavissa: <http://cleantechnica.com/2015/09/21/tesla-gigafactory-battery-improvements-could-cut-battery-costs-70/>