



Lassi Varis

**DIESELMOOTTORIN KORVAAMINEN TÄYSSÄHKÖISELLÄ
VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄLLÄ HILUX-
SÄHKÖTYÖKONEPROJEKTISSA**

**DIESELMOOTTORIN KORVAAMINEN TÄYSSÄHKÖISELLÄ
VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄLLÄ HILUX-
SÄHKÖTYÖKONEPROJEKTISSA**

Lassi Varis
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Lassi Varis

Opinnäytetyön nimi: Dieselmoottorin korvaaminen täyssähköisellä voimansiirtojärjestelmällä Hilux-sähkötyökoneprojektissa

Työn ohjaaja: Mauri Haataja

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2013 Sivumäärä: 46 + 4 liitettä

Opinnäytetyö kuuluu osana Oamkin Tekniikan yksikön autolaboratoriossa toteutettuun Hilux-sähkötyökoneprojektiin. Hilux-sähkötyökoneprojektissa on ollut tavoitteena muuttaa työkoneen alkuperäinen diesel-käyttöinen voimansiirtojärjestelmä täyssähkökäyttöiseksi. Projektin visiointi alkoi vuonna 2007 Oamkin moottorilaboratorion ja oululaisen sähkömoottorivalmistaja Randax Oy:n testausyhteistyöstä.

Hilux-sähkötyökoneprojekti on ollut 2,5-vuotinen tuotekehitysprojekti, joka alkoi 2010 vuoden syksyllä. Tuolloin opiskelijaryhmä suunnitteli ja toteutti mittauslaitteiston, joka asennettiin Oulun kaupungin teknisen liikelaitoksen työkoneeseen. Tässä opinnäytetyössä on esitetty projektin alkuvaiheen diesel-käytön mittausjärjestely ja siitä saadut tulokset laskelmineen. Tähän opinnäytetyöhön liittyy myös Hilux-työkoneeseen kehitetyn nestejäähdytteisen Randax-sähkömoottorin hyötysuhdemittaukset sekä koko täyssähköisen voimansiirtojärjestelmän energiankulutusmittaukset.

Projektin tavoitteena oli kehittää työkone todelliseen käyttöön. Tavoite onnistui, kun Hilux-sähkötyökoneella ajettiin maaliskuussa 2013 viisi päivää testiajtoa teknisen liikelaitoksen toimesta todellisessa toimintaympäristössä. Testiajtoon liittyi olennaisesti kattava tiedonkeruu, jonka perusteella projektissa kehitetyn täyssähköisen voimansiirron voitiin todeta toimivan katujen kunnossapitokäytössä määritellyllä ja halutulla tavalla. Myös ammattikuljettajilta saatu palaute täyssähköisestä voimansiirrosta osoitti järjestelmän toimivuuden ja siitä saata-
vat edut.

Asiasanat: projekti, sähkötyökone, tuotekehitys, hyötysuhde, energiankulutus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	6
2 HILUX-SÄHKÖTYÖKONEPROJEKTI	7
2.1 Alku	7
2.2 Suunnitelmavaihe	7
2.3 Mallinnus- ja rakennusvaihe	8
2.4 Testaus- ja säätövaihe	11
2.5 Julkistaminen ja koekäyttö Teklillä	12
3 AJOSUORITTEEN MÄÄRITYS DIESEL-KÄYTÖLLÄ	14
3.1 Tiedonkeruujärjestelmän periaate	14
3.2 Tiedonkeruujärjestelmän toiminta	15
3.3 Päivittäinen energiankulutus	17
3.4 Sähkömoottorilta vaadittavat suoritusarvot	17
4 TÄYSSÄHKÖISEN VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄN MITTAAMINEN	24
4.1 Sähkömoottorin mittaus moottoridynamometrissa	25
4.1.1 Lämpenemisajot	26
4.1.2 Sähkömoottorin hyötysuhdekartasto	28
4.1.3 Taajuusmuuttajien hyötysuhdetaulukko	29
4.1.4 Sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan kokonaishyötysuhde	30
4.2 Voimansiirtojärjestelmän mittaus alustadynamometrissa	30
5 VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄN ENERGIANKÄYTTÖ TYÖAJOSSA	33
5.1.1 Ensimmäinen ajopäivä 19.3.2013	34
5.1.2 Toinen ajopäivä 20.3.2013	35
5.1.3 Kolmas ajopäivä 21.3.2013	36
5.1.4 Neljäs ajopäivä 25.3.2013	37
5.1.5 Viides ajopäivä 26.3.2013	38
5.1.6 Yhteenveto ajopäivistä	39
6 VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMIEN VERTAILU	40
6.1 Ajonaikainen energiankulutus	40
6.2 Suoritusarvojen vertailu	43

6.3 Käyttäjien palaute	44
7 YHTEENVETO	45
LÄHTEET	46
LIITTEET	
Liite 1. Lähtötietomuistio	
Liite 2. Sähkömoottorin hyötysuhdetaulukko	
Liite 3. Taajuusmuuttajien hyötysuhdetaulukko	
Liite 4. Sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan kokonaishyötysuhdetaulukko	

1 JOHDANTO

Hilux-sähkötyökoneprojekti on Oulun seudun ammattikorkeakoulun (Oamk) Tekniikan yksikön autolaboratoriossa toteutettu tuotekehitysprojekti, jonka tavoitteena on muuttaa työkoneen alkuperäinen diesel-käyttöinen voimansiirtojärjestelmä täyssähkökäyttöiseksi. Projektissa on mitattu kunnossapitokäytössä olleen työkoneen käyttöä todellisessa toimintaympäristössä ja tämän jälkeen optimoitu ja kehitetty mittaustuloksien perusteella työkoneeseen täyssähköinen voimansiirtojärjestelmä palvelemaan kyseistä kunnossapitokäyttöä.

Projekti alkoi 2010 vuoden loppupuolella, ja kuluneen kahden ja puolen vuoden aikana se on edennyt suunnittelu- ja mitoitusvaiheiden kautta aina prototyypin toteutus- ja testausvaiheeseen asti. Projekti on toteutettu opiskelijavetoisesti, ja siihen on osallistunut useita kymmeniä, pääosin auto- ja kuljetustekniikkaan suuntautuneita konetekniikan opiskelijoita.

Tässä työssä esitellään Hilux-sähkötyökoneprojektin eteneminen pääpiirteittäin sen alkuvaiheista valmiiseen prototyyppiin asti. Työn varsinainen painopiste on täyssähköisen voimansiirtojärjestelmän suunnittelu- ja mitoitusperusteiden esittäminen ja mittaaminen kokeellisin menetelmin. Työn tavoitteena on myös osin vertailla alkuperäistä diesel-käyttöä nyt toteutettuun sähkökäyttöön nähden. (Liite 1.)

Työ käsittelee työkoneen ajonaikaista energiankäyttöä. Työssä ei käsitellä eri energiamuotojen valmistus- tai jalostusaikaisia päästöjä tai kustannuksia.

2 HILUX-SÄHKÖTYÖKONEPROJEKTI

2.1 Alku

Hilux-sähkötyökoneprojekti sai alkunsa 2007 vuonna alkaneesta Oamkin auto- ja moottorilaboratorion sekä oululaisen Randax Oy:n yhteistyöstä. Yhteistyö alkoi Randax-sähkökoneiden mittauksilla moottorilaboratorion moottoridynamiometrissa.

Yhteistyön osapuolet pohtivat tuolloin usein uusia mahdollisia sovelluskohteita sähkökoneelle, jonka vahvuudet tunnettiin hyvin. Toisaalta sähkötekniikan heikoudet tiedettiin myös. Osapuolet päätyivät ottamaan yhteyttä Oulun kaupungin tekniseen liikelaitokseen (Tekli), jolla on käytössään useita kunnossapitokäytössä olevia työkoneita. Tällaiset työkoneet ajavat päivän aikana Oulun kaupungin taajama-alueella lyhyitä ajosuoritteita. Niiden nopeudet ovat taajama-alueella melko pieniä ja niiden korkeahko omamassa sekä mahdolliset työtehtävät, kuten aeraus, edellyttävät suurta vääntömomenttia jo pienillä nopeuksilla ajettaessa.

Tekli kiinnostui esitetystä kehitysyhteistyöstä. Suunnitelmaa päätettiin lähtä viemään eteenpäin Oamkin tekniikan yksikön auto- ja kuljetustekniikkaan suuntautuneiden opiskelijoiden tuotekehitysprojektina. Opiskelijoiden rekrytointi projektiin alkoi 2010 vuoden syyslukukauden alussa, ja itse projekti käynnistyi saman vuoden marraskuussa.

2.2 Suunnitelmavaihe

Hilux-projektiin lähti mukaan alkuvaiheessa yhteensä 11 toisen vuosikurssin auto- ja kuljetustekniikkaan suuntautunutta konetekniikan opiskelijaa. Projektin tavoitteeksi muodostui kehittää Teklin kunnossapitokäytössä oleva dieselkäyttöinen Toyota Hilux -työkone sähköllä toimivaksi (1).

Alusta alkaen projektin tarkoituksena on ollut optimoida sähkökäyttö täysin Teklin työkoneen ajosuoritetta vastaavaksi. Ajosuoritteen selvittämiseksi projekti-ryhmä alkoi kehittää tiedonkeruujärjestelmää, joka asennettaisiin käytössä olevaan työkoneeseen ja jonka tehtävänä olisi mitata päivittäinen ajosuorite katta-

vasti, jotta tarvittavan sähkökäytön määrittely olisi mahdollista. Diesel-käytön mittaukseen kehitetyn tiedonkeruujärjestelmän toiminta ja siitä saadut tulokset on esitetty seuraavan pääotsikon alla tarkemmin. Tiedonkeruujärjestelmä asennettiin työkoneeseen 16.12.2010. Järjestelmä mittasi diesel-käytön työajosuoritetta lähes koko 2011 vuoden kevään ajan.

Projektiryhmä, johon kuului tuolloin 11 opiskelijaa, päätettiin jakaa alkuvuoden 2011 suunnitelmavaiheessa kuuteen pienempään osa-alueeseen, joiden todettiin olevan toteutuksen kannalta olennaisia tuotekehityksen kohteita. Osa-alueet olivat seuraavat (1):

1. tiedonkeruujärjestelmän datan analysointi
2. moottorin ja ohjauselektronikan suunnittelu
3. akuston toteutuksen suunnittelu
4. hydraulijärjestelmän suunnittelu
5. lämmitysjärjestelmän suunnittelu
6. 12 voltin järjestelmän suunnittelu.

Eri osa-alueista vastanneet opiskelijaryhmät tekivät kukin suunnitelmaraportin kehityskohteestaan, minkä jälkeen raportit koottiin yhteen 70-sivuiseen Hilux-projektin Suunnitelmavaiheen loppuraportti -nimiseen dokumenttiin 2011 kevät-lukukauden lopussa. Raportti toimi perustana koko projektin tapahtuneelle tuotekehitykselle. Raportissa selvitettiin muun muassa päivittäiseen ajosuoritukseen vaadittava akkukapasiteetti, sähkömoottorilta vaadittavat suoritusarvot sekä sen integrointi työkoneeseen. (1.)

2.3 Mallinnus- ja rakennusvaihe

Syksyllä 2011 Hilux-projekti jatkui aikaisempaan keväänä tehtyjen suunnitelmien perusteella. Tekli luovutti kunnossapitokäytössä olleen Hiluxin projektille lokakuussa. Hiluxista poistettiin alkuperäinen diesel-moottori ja voimansiirto. Vain etu- ja taka-akselit jätettiin paikoilleen, koska ne haluttiin säilyttää konversiossa alkuperäisinä.

Hiluxin kori ja alusta puhdistettiin liasta. Puhdistuksen jälkeen runko ja korin vaihteistotunneli mitattiin ja mallinnettiin CAD-suunnitteluun. CAD-suunnittelu toteutettiin aluksi osana Tuotekehitys-opintojaksoa, jossa suunniteltiin ryhmä-

töinä sähkömoottorin ja akuston kannakointia. Opintojaksolla kartoitettiin myös tehoelektronikan komponentteja. Vuodenvaihteeseen 2011 päättyneen Tuotekehitys-opintokurssin jälkeen projektin rakenteellinen perusta oli selvä. Keväällä 2012 aloitettiin viisi Hilux-projektiin liittyvää opinnäytetyötä. Opinnäytetöiden aiheet ja tekijät olivat seuraavat:

1. Dieselmoottorin korvaaminen täyssähköisellä voimansiirtojärjestelmällä Hilux-sähkötyökoneprojektissa, Lassi Varis
2. Sähkömoottorin kiinnitys ja tuenta Hilux-sähkötyökoneprojektissa, Juuso Turunen
3. Sähkökäyttöisen työkoneen ohjausjärjestelmä, Miika Kajula
4. Polttomoottorin poistamisesta aiheutuvat muutostyöt sähkötyökoneissa, Lasse Kyyhkynen
5. Sähkökäyttöisen työkoneen akuston suunnittelu, Tuomas Tihinen.

Talven ja kevään 2012 aikana projektiin haettiin yhteistyökumppaneita suunnitelmavaiheen loppuraportin ja Tuotekehitys-kurssin tuloksien perusteella. Sähkövoimakomponentteja valmistava ABB Oy lähti projektiin mukaan ja lahjoitti tehoelektronikan määrittelyä vastaavan ABB ACSM1 -taajuusmuuttajan projektin käyttöön. Akkuvalmistaja European Batteries Oy kiinnostui projektista ja toimitti sähköisen voimansiirtojärjestelmän käyttöönoton ajaksi projektin käyttöön seitsemän European Batteries EBattery 30 24s1p -akkumoduulia. Sähkökäytön spesifikaatiomäärittely toteutti Randax Oy.

Insinööriopiskelija Juuso Turusen opinnäytetyönä keväällä 2012 suunnittelema sähkömoottorin kannake valmistettiin Teollisuuden Monipalvelu Oy:ssä. Randax Oy:ltä käyttöönottovaiheeseen saatu ilmajäähdytteinen sähkömoottori asennettiin kannakkeineen Hiluxiin huhtikuussa 2012. Järjestelmän toimintaa Hiluxiin asennettuna testattiin ensimmäisen kerran verkosta otetulla voimavirralla Oamkin autolaboratorion alustadynamometrissa 19.4.2012 (kuva 1).



KUVA 1. Sähkömoottorilla varustetun Hiluxin ensimmäinen dynamometrimittaus 19.4.2012

Kevään 2012 aikana hankittiin myös sähköiset apulaitetehostimet jarruille ja ohjaustehostimelle. Lisäksi suunniteltiin ja valmistettiin niin sanottu Cold plate -jäähdytyslevy taajuusmuuttajan jäähdytykseen (kuva 2).



KUVA 2. Alumiinista valmistettu cold plate -jäähdytyslevy taajuusmuuttajalle

2.4 Testaus- ja säätövaihe

Alkukesästä 2012 Hiluxiin asennettiin akusto ensimmäistä kertaa paikoilleen. Samalla asennettiin myös tarvittavat sähkösuojaukset ja tehoelektroniikkaan ja akuston hallintajärjestelmään tehtiin tarvittavat säätömäärittelyt. Hiluxilla ajettiin ensimmäistä kertaa sähkökäyttöisenä 25.5.2012 (kuva 3).



KUVA 3. Hilux-sähkötyökoneen ensimmäinen testiajo sähkökäyttöisenä 25.5.2012

Kesän 2012 aikana sähköjärjestelmään haettiin säätöarvoja ja ajoneuvo varusteltiin siten, että koekilvin pystyttiin suorittamaan myös tieajokokeita. Lisäksi uudistettiin akuston kannakointirakennetta ja kotelointia ensimmäisestä toteutuksesta.

Näkyvin muutos syksyllä 2012 oli Puukstain Oy:n tekemä Hiluxin yliteippaus. Samaan aikaan ajoneuvo varusteltiin kunnossapitokäyttöön vaadittavilla varusteilla ja alkuperäinen hydraulijärjestelmä asennettiin takaisin paikoilleen. Hydraulijärjestelmän alkuperäinen pumppu korvattiin sähköisellä. Syksyllä aloitettiin

myös kolme Hiluxiin liittyvää opinnäytetyötä viiden aikaisemmin aloitetun opinnäytetyön lisäksi. Syksyllä 2012 aloitettujen opinnäytetöiden aiheet ja tekijät olivat

1. Sähkötyökoneen moottorinohjausjärjestelmän ohjelmointi, Tuukka Penanen
2. Developing marketing communications for university, case: Oulu university of applied sciences – Hilux-project, Lotta Haapaniemi
3. Sähkötyökoneen muutoksastus, Jani Korva.

Talven ja kevään 2013 aikana määriteltiin ja rakennettiin ajoneuvon ohjauslogiikka. Randax Oy toimitti projektin määrittelyjen mukaisen nestejäähdytteisen sähkömoottorin, joka asennettiin Hiluxiin 4.2.2013. Sähköjärjestelmään suoritettiin tämän jälkeen säätö- ja mittaustoimenpiteitä ennen täyssähköisen Hilux-työkoneen julkistamista. Keväällä 2013 aloitettiin lisäksi yhdeksäs projektiin liittyvä opinnäytetyö:

- Introduction of Hilux-project, Bastiaan Reymer.

2.5 Julkistaminen ja koekäyttö Teklillä

Hilux-sähkötyökone julkistettiin Oamkin Tekniikan yksikössä 14.3.2013. Julkistamistilaisuudessa olivat läsnä Oamkin edustajat, Hilux-projektin yhteistyökumppanit ja projektiin osallistuneet opiskelijat.

Hilux-sähkötyökonetta testattiin Teklin kunnossapitokäytössä maaliskuussa 2013. Testaus tapahtui Teklin ammattikuljettajien toimesta viitenä eri testauspäivänä. Kuva 4 esittää projektin lopputuloksena valmistunutta Hilux-sähkötyökonetta Oulun kaupungintalon edustalla testauspäivien jälkeen.



KUVA 4. Hilux-sähkötyökone Oulun kaupungintalon edustalla 22.3.2013

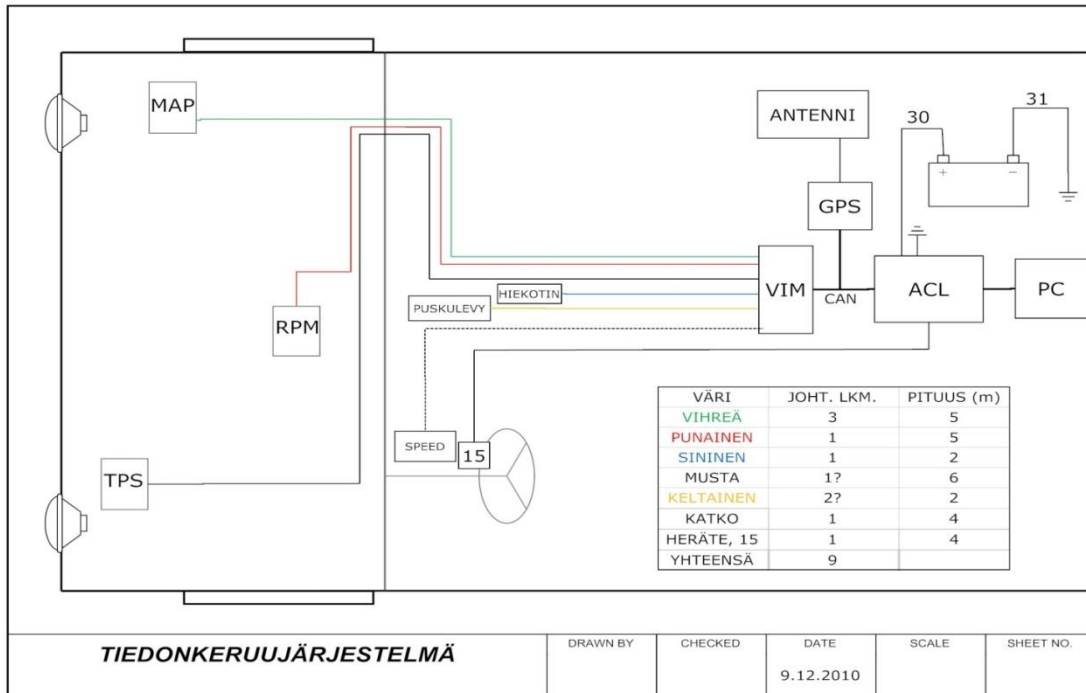
3 AJOSUORITTEEN MÄÄRITYS DIESEL-KÄYTÖLLÄ

3.1 Tiedonkeruujärjestelmän periaate

Tiedonkeruujärjestelmän tarkoituksena oli mitata Teklin kunnossapitoajon ajosuoritetta siten, että mitattavien suureiden perusteella voitiin edelleen määrittää päivittäinen energiankulutus, auran ja hiekoittimen käytön osuus, työkoneen ajonopeudet sekä moottorilta vaadittavat suoritusarvot. Ensimmäiset muistiinpanot tiedonkeruujärjestelmän suunnittelusta on merkitty 9.12.2010. Tuolloin listattiin seuraavia asioita, joita tiedonkeruujärjestelmän tulisi ajon aikana työkoneen käytöstä mitata (2, s. 8):

- ahtopaine (MAP)
- kaasupolkimen asento (TPS)
- moottorin kierrosnopeus (RPM)
- auton nopeus (GPS)
- renkaiden pyörimisnopeus
- auran asento
- hiekoittimen käyttö
- ulkoilman lämpötila.

Tiedonkeruujärjestelmän rakenteesta tehtiin useita luonnoksia ja komponenttien sijoittelua autoon suunniteltiin auton pohjapiirrokseseen. Kuva 5 esittää tiedonkeruujärjestelmän viimeisteltyä suunnittelumallia.



KUVA 5. Tiedonkeruujärjestelmän suunnittelumalli (2, s. 9)

Tiedonkeruujärjestelmä asennettiin Hiluxiin 16.12.2010. Järjestelmään kuuluivat (2, s. 9)

- Motec ACL -keskusyksikkö
- Motec VIM -laajennusyksikkö
- Motec GPS -paikannuslaitteisto
- anturoinnit ja johtimet
- Motec ACL manager -hallintaohjelmisto
- Motec i2 pro -datan analysointiohjelmisto.

3.2 Tiedonkeruujärjestelmän toiminta

Päivittäinen energiankulutus määritettiin siten, että tiedonkeruujärjestelmä tallensi jatkuvasti 20 Hz:n taajuudella ajoneuvon työajossa moottorista imusarjan paineen, kaasupolkimen asennon ja moottorin kierrosnopeuden. Tämän jälkeen Hiluxilla ajettiin Oamkin autolaboratorion alustadynamometrissa moottorin käyttöalueen eri kuormituspisteet läpi. Kuormituspisteiden ja niitä vastaavien kierroslukujen mitattu pyöräteho merkittiin muistiin ja niiden perusteella luotiin pyörätehotaulukko, jossa määräävinä arvoina olivat imusarjan paine ja moottorin kierrosnopeus. Kuvakaappaus taulukosta on esitetty kuvassa 6. (2, s. 18.)

Math Table Properties

Channel Name: Quantity: Rate:

Display Unit: Decimal: Colour:

X Axis Channel: Properties... Units:

Y Axis Channel: Properties... Units:

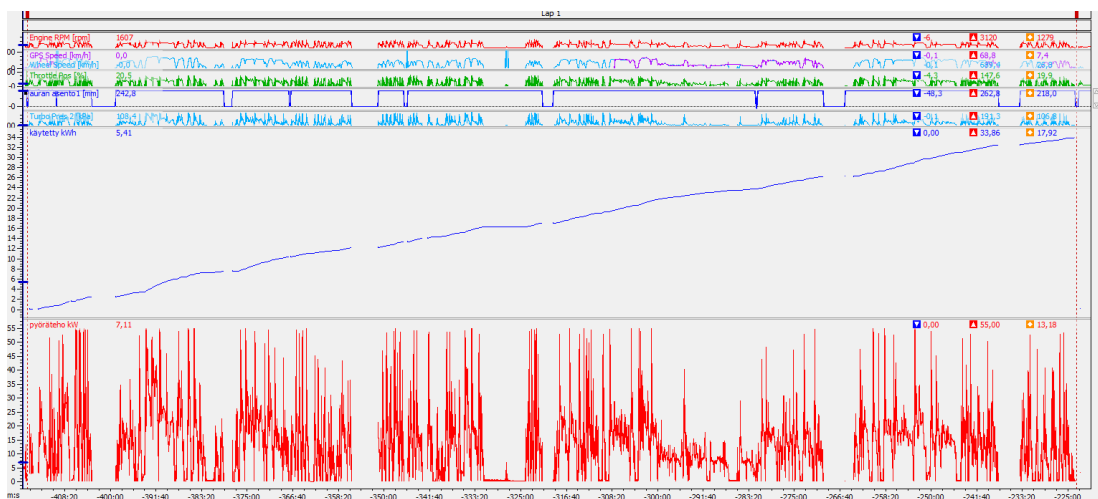
Table Units: Interpolate Data Points

kPa \ rpm	300	500	700	989	1237	1480	1736	1983	2236	2480	2732	2967	3222	3500	3800
104	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
107	0	0	0	10	6	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	12	13	11	9	0	0	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	16	16	15	12	10	0	0	0	0	0	0	0
121	0	0	0	16	20	17	15	13	10	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	16	20	19	17	17	13	9	9	0	0	0	0
130	0	0	0	0	20	21	19	18	17	14	10	0	0	0	0
135	0	0	0	0	20	23	22	21	19	17	13	0	0	0	0
141	0	0	0	0	20	28	23	22	21	19	15	0	0	0	0
145	0	0	0	0	20	29	26	25	24	21	20	15	0	0	0
150	0	0	0	0	20	31	28	27	24	23	21	18	0	0	0
156	0	0	0	0	20	32	32	29	27	26	27	23	0	0	0
161	0	0	0	0	20	35	34	31	30	29	29	26	0	45	45
165	0	0	0	0	0	0	36	35	31	30	30	26	40	47	47
170	0	0	0	0	0	0	38	37	33	32	32	35	50	50	50
175	0	0	0	0	0	0	40	40	36	34	34	50	50	50	50
180	0	0	0	0	0	0	40	44	43	47	55	55	55	0	0
185	0	0	0	0	0	0	0	45	50	54	55	55	55	0	0
190	0	0	0	0	0	0	0	45	50	54	0	0	0	0	0

OK Cancel Help

KUVA 6. Määritetty pyörätehotaulukko Motec i2 pro -ohjelmassa (1, s. 18)

Motec i2 Pro -ohjelma muodosti kuvan 6 taulukon arvojen perusteella ajoneuvon pyörätehon kaikissa ajosuorituksen kuormitusilanteissa ajan funktiona. Päivittäinen energiankulutus voitiin määrittää tästä pyörätehon kuvaajasta integroimalla pyöräteho ajopäivää kohden, jolloin energiankulutuksen yksiköksi muodostui kWh. Kuvassa 7 on esitetty pyöräteho (punainen käyrä) ja siitä määritetty päivittäinen energiankulutus (sininen käyrä).



KUVA 7. Määritetty pyöräteho ja energiankulutus Motec i2 pro -ohjelmassa

3.3 Päivittäinen energiankulutus

Tiedonkeruujärjestelmällä tehtyjen mittausten perusteella havaittiin, että päivittäinen pyörätehosta määritetty energiankulutus Teklin kunnossapitokäytössä on maksimissaan 35 kWh (2, s. 22). Kyseisen arvon virheentarkastelu ei ole tarkoituksenmukaista, koska mittaus on suoritettu polttomoottorikäytöllä, jonka käyttöajon aikana on hyvin erilaista kuin sähkömoottorikäytöllä. Tarkoituksenmukaisempaa on ajatella määritetyn 35 kWh:n olevan suuntaa antava arvo optimoitavissa tarvittavaa akkukapasiteettia.

Tarvittavaa akkukapasiteettia määriteltäessä on huomioitava, että määritetty energiankulutus on määritetty suoraan pyörännapojen tehosta. Voimansiirron häviöiden arvioidaan olevan 15 %. Sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan häviöiden arvioidaan olevan keskimäärin 15 %. Moottorin energiankulutus (E_{moottori}) saadaan huomioimalla voimansiirron, sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan häviöt pyörännavoista määritettyyn kilowattituntimäärään:

$$E_{\text{moottori}} = \frac{35 \text{ kWh}}{0,85 * 0,85} \approx 48,4 \text{ kWh}.$$

Akkuvalmistaja European Batteriesin mukaan akuston nimellisestä energiasisälöstä voidaan käyttää noin 80 %. Mikäli akuston nimellisenergia käytettäisiin kokonaan, se lyhentäisi akuston käyttöikä huomattavasti. Määritetään suuntaa antava akuston nimellisenergisäily (E_{akusto}) huomioimalla käytettävissä oleva energiasäily moottorin energiankulutukseen nähden.

$$E_{\text{akusto}} = \frac{48,4 \text{ kWh}}{0,80} = 60,5 \text{ kWh}$$

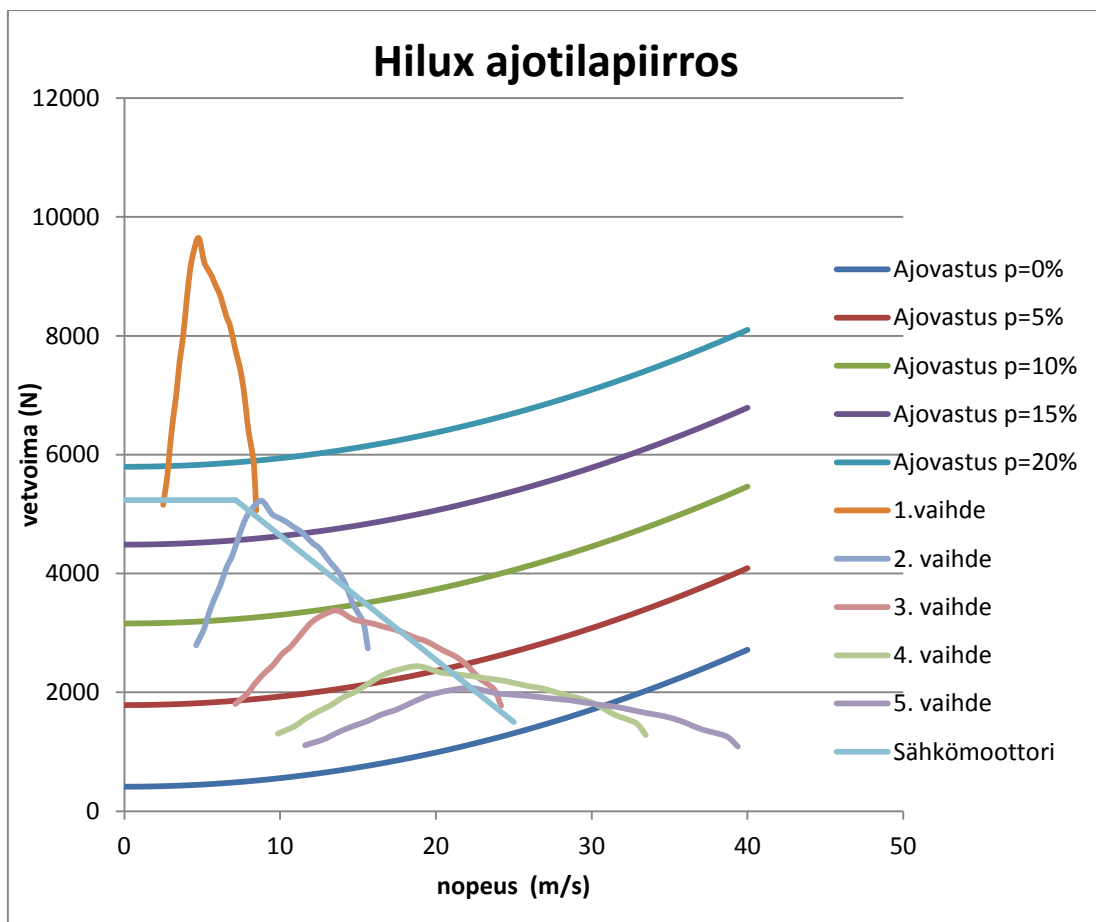
Näin ollen suuntaa antava akuston nimellinen energiasäily päivittäiseen ajo-suoritteeseen Teklin kunnossapitokäytössä tulisi olla noin 60 kilowattituntia.

3.4 Sähkömoottorilta vaadittavat suoritusarvot

Hiluxin alkuperäisen dieselmootorin suorituskyky on osoittautunut riittäväksi Teklin kunnossapitokäyttöön. Sähkömoottorin suoritusarvoja määriteltäessä oli

tavoitteena säilyttää alkuperäisen dieselkäytön suoritusarvot käytännön ajotilan-teissa. Lähtökohtana oli myös tehdä sähkökonversiosta vaihteeton. (3, s. 23.)

Dieselmoottorista dynamometrissa mitattujen suoritusarvojen perusteella luotiin ajotilapiirros, johon sovitettiin sähkömoottorilta vaadittava vetovoimakuvaaja. Ajotilapiirroksen ajovastukset määritettiin Hiluxiin asennetun tiedonkeruujärjes-telmän nopeustiedosta laskettujen hidastuvuuksien perusteella. Dieselmoottorin tarkat suoritusarvot selvitettiin tehodynamometrissa samalla, kun määritettiin päivittäistä energiankulutusta. Kunnossapitolisälaittein varustellun Hiluxin ajoti-lapiirros on esitetty kuvassa 8. (3, s. 26.)



KUVA 8. Hiluxin ajotilapiirros (3, s. 26)

Kuvan 8 perusteella nähdään, että diesel-käytöllä ja pienimmällä, eli 1. vaihteel-la saadaan hetkellisesti kehitettyä todella suuri tiehen välittyvä vetovoima. Tie-donkeruujärjestelmän tietojen perusteella kunnossapitokäyttö ei edellytä vas-taavaa suorituskykyä, joten päädyttiin rajoittamaan sähkömoottorin vetovoima-

kuvaajan 2. vaihteen suorituskyvyn maksimitasolle. Kuvasta 8 nähdään myös, että sähkömoottorilla saavutettaisiin 2. ja 3. vaihteita vastaava suorituskyky, sillä sähkökoneen kuvaaja sivuaa dieselkäytön 2. ja 3. vaihteen kuvaajia.

Projektissa oli tavoitteena myös säilyttää suurelta osin dieselkäytön alkuperäinen ja toimivaksi havaittu voimansiirtojärjestelmä. Aluksi ajateltiin säilyttää jakovaihteiston molemmat nopeusalueet siten, että normaalit ajotilanteet sähkökäytöllä ajettaisiin nopealla suoralla välityksellä ja hitaat kuormittavat ajotilanteet alennusvaihteella. Säilytetyllä jakovaihteistolla pystyttäisiin myös valitsemaan neli- tai takavetotapa. Suoritettujen auraustestien perusteella kuitenkin huomattiin, ettei paksunkaan hangen auraaminen vaadi moottorilta suurta kuormitusta eivätkä renkaat pyri sutimaan. Lisäksi laskettiin vetovoimatarve, joka kuvastaa nelivetoisen lisälaitteen kuormatun Hiluxin talvikelin kitkarajaa. Vetovoimatarve ($F_{\text{vetovoima}}$) laskettiin kaavalla 1. (3, s. 27; 4, s. 54.)

$$F_{\text{vetovoima}} = \mu mg$$

KAAVA 1

$F_{\text{vetovoima}}$ = vetovoimatarve (N)

μ = kitkakerroin (talvikelissä 0,2)

m = ajoneuvon massa (2 800 kg)

g = putoamiskiihtyvyyden (9,81 m/s²)

Sijoitetaan selitteiden yhteydessä ilmoitetut arvot kaavaan 1, jolloin laskennallinen vetovoimatarve on seuraava:

$$F_{\text{vetovoima}} = 0,2 \cdot 2800 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 5490 \text{ N}.$$

Toisin sanoen talviolosuhteissa neliveto kytkettynä kaikki yli 5 490 N tuotettu vetovoima on turhaa, koska sitä ei voida välittää tiehen pidon takia. Näiden tietojen perusteella havaittiin, että yksi välityssuhde riittää kattamaan kunnossapitokäytössä vaadittavat suorituskykytarpeet. Moottorilta vaadittava vääntömomentti laskettiin kaavan 2 perusteella. (3, s. 28.)

$$F = \frac{Mi\eta}{r} \Rightarrow M = \frac{Fr}{i\eta}$$

KAAVA 2

F = renkailla vaikuttava vetovoima (5490 N)

M = moottorin vääntömomentti (Nm)

i = voimansiirron kokonaisvälityssuhde hitaalla välityksellä (11,0338)

η = voimansiirron hyötysuhde (0,85)

r = renkaan dynaaminen vierintäsäde (0,3573 m)

$$M = \frac{5490 \text{ N} \cdot 0,3573 \text{ m}}{11,0338 \cdot 0,85} = 209 \text{ Nm}$$

Sähkömoottorivalmistaja Randax Oy:n kanssa olimme kartoittaneet vaihtoehtoja Hiluxiin asennettavasta sähkömoottoriratkaisusta. Randax Oy:n valmistama ulkohalkaisijaltaan 315 mm kestmagnetoitu tahtimoottori sopi Hiluxin alustaan mallinnuksiemme perusteella ilman tarvetta suuremmille muutostöille. Lisäksi laskennallinen vääntömomenttitarve oli mahdollista saavuttaa kyseisellä moottorikoolla. (3, s. 29.)

Moottorin tehontarve määräytyy ajoneuvon tavoitellun huippunopeuden perusteella. Tiedonkeruujärjestelmän tietojen perusteella kunnossapitokäytössä Hiluxin maksiminopeus ei käytännössä kohonnut yli 60 km/h. Sähkökonversiosta oli tarkoitus tehdä kiinteävälityksinen, joten sen maksiminopeus päätettiin rajoittaa 65 km/h. Tämä reunaehto määritteli moottorin maksimipyörintänopeudeksi 5 300 rpm. (3, s. 30.)

Moottorin tehontarve määriteltiin siten, että ajoneuvolla kyetään ajamaan 65 km/h jatkuvaa nopeutta 5 % nousussa. 5 % nousun huomioiminen tuo suorituskykyyn varmuutta huippunopeuksien lähellä liikuttaessa. Ajovastusmäärittely perusteella nousuprosentin ollessa 5 % ja ajonopeuden ollessa 65 km/h toisin sanoen 18 m/s kokonaisajovastus lisälaittein varustellulle Hiluxille on 2250 N. Vaadittava moottorin vääntömomentti huippunopeudella ajettaessa lasketaan kaavan 2 perusteella. (3, s. 30.)

$$M = \frac{2250 \text{ N} \cdot 0,3573 \text{ m}}{11,0338 \cdot 0,85} = 86 \text{ Nm}$$

Tehon kaavalla (kaava 3) määritettiin huippunopeuden tehovaatimus. (3, s. 31.)

$$P = 2\pi n \cdot M$$

KAAVA 3

P = teho (W)

n = moottorin pyörintänopeus (1/s)

M = moottorin vääntömomentti (Nm)

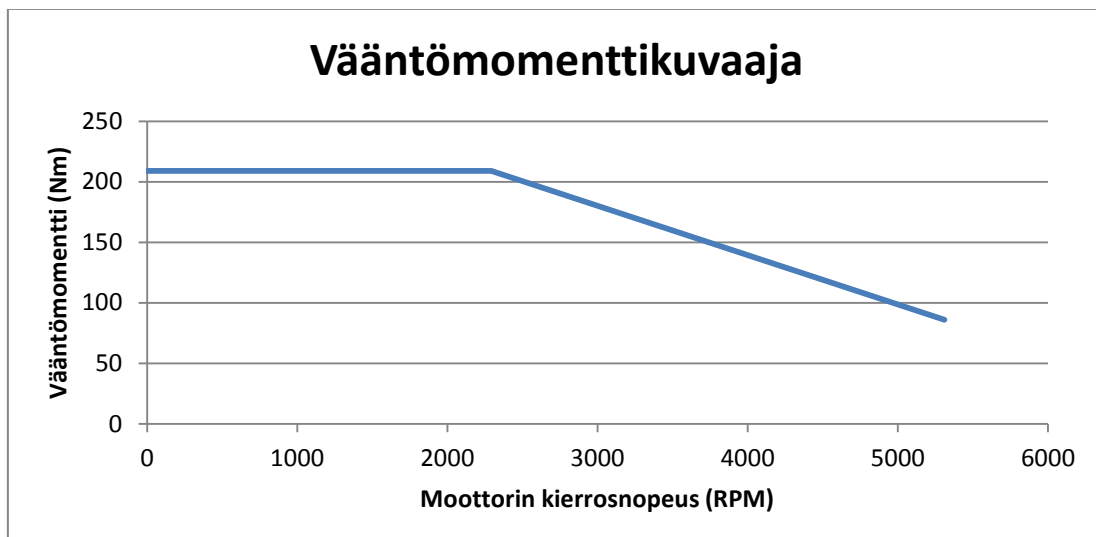
Sijoitetaan moottorin pyörintänopeus 5 300 rpm ja vaadittava vääntömomentti 86 Nm kaavaan 3:

$$P = 2\pi \cdot 88,5 \frac{1}{s} \cdot 86 \text{ Nm} = 47\,821 \text{ W} = 48 \text{ kW}.$$

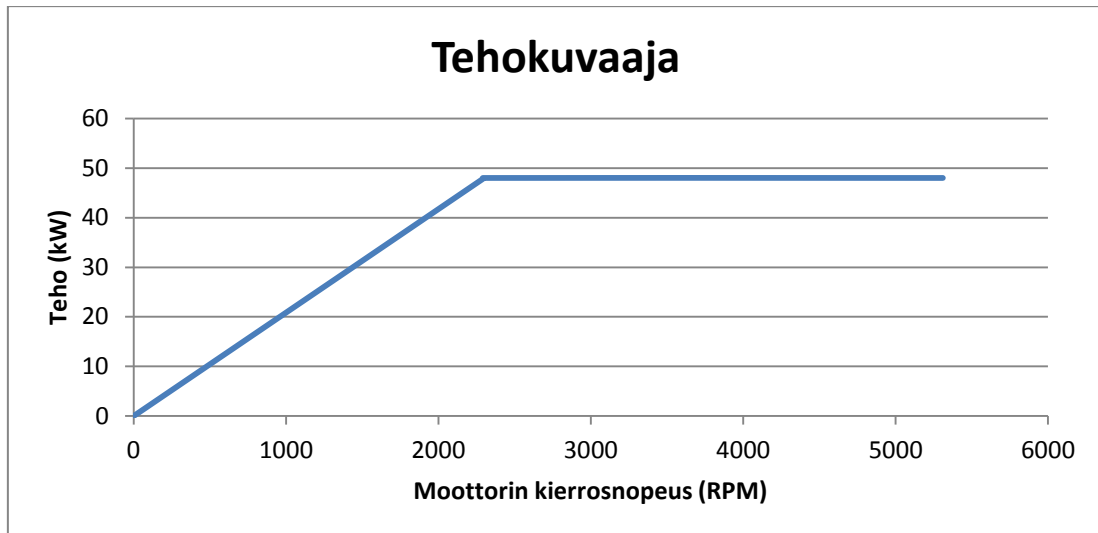
Kestomagnetoitu tahtimoottori mahdollistaa suuren vääntömomentin lähes nol-
lanopeudesta alkaen. Vääntömomentti pysyy tasaisena aina moottorin kentän-
heikennyspisteeseen saakka, jossa moottori saavuttaa huipputehonsa. Vään-
tömomentin pysyessä tasaisena moottorin teho kasvaa lineaarisesti kaavan 3
perusteella. Kentänheikennyspisteen kierrosnopeudeksi muodostuu määritellyil-
lä suoritusarvoilla (3, s. 31)

$$n = \frac{P}{2\pi M} \Rightarrow \frac{48\,000 \text{ W}}{2\pi \cdot 209 \text{ Nm}} = 36,6 \frac{1}{s} = 2\,200 \text{ rpm}.$$

Sähkömoottorilta kunnossapitokäyttöön vaadittava vääntömomenttikuvaaja kier-
rosnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 9. Sähkömoottorilta vaadittava teho-
kuvaaja kierrosnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 10.

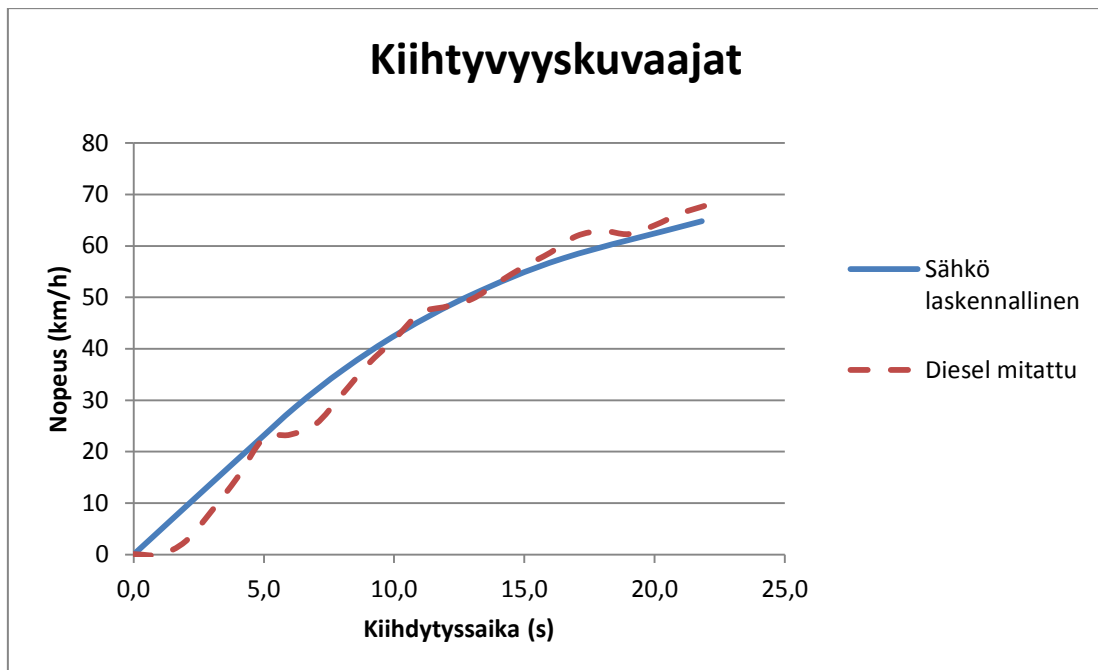


KUVA 9. Sähkömoottorilta vaadittava vääntömomentti kierrosnopeuden funktiona (1, s. 32)



KUVA 10. Sähkömoottorilta vaadittava teho kierrosnopeuden funktiona (1, s. 32)

Sähkömoottorilta vaadittavien laskennallisten suoritusarvojen perusteella selvitetiin lisäksi ajoneuvon kiihtyvyys. Kiihtyvyyssarvot määritettiin ajotilapiirroksesta lasketuilla vetovoiman arvoilla Newtonin toista lakia hyväksi käyttäen. Oma-massaksi sähkökäyttöiselle Hiluxille arvioitiin laskennassa 2 800 kg. Nopeuden funktiona saadut kiihtyvyyssarvot muutettiin käänteiskiihtyvyyksiksi, ja koska integraali käänteiskiihtyvyydestä nopeuden funktiona antaa kiihtyvyyssajan, määritettiin lopullisista arvoista laskennallinen kiihtyvyysskuvaaja (kuva 11). Kiihtyvyysskuvaajassa on myös esitetty vertailun vuoksi tiedonkeruujärjestelmän mitaama kiihtyvyys diesel-käytöllä täyskaasukiihdytyksessä tasaisella maantiellä. (3, s. 33.)



KUVA 11. Kiihtyvyytkuvaaja, jossa nopeus ajan funktiona (1, s. 33)

Kiihdytyskuvaajien perusteella suorituskyky säilyy sähkökäytöllä vastaavanlaisena verrattaessa sitä diesel-käyttöön. Sähkökäytöllä kiihdytysaika paikaltaan lähdeettäessä on noin 18 sekuntia ja diesel-käytöllä noin 15 sekuntia, kun loppunopeus on molemmissa mittauksissa 60 km/h.

4 TÄYSSÄHKÖISEN VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄN MITTAAMINEN

Randax Oy toimitti määrittelyn mukaisen kunnossapitokäyttöön mitoitettun keskomagnetoidun tahtimoottorin tammikuussa 2013. Yhteistyöhön kuului sähkömoottorin testaus Oamkin moottorilaboratorion moottoridynamometrissa. Testauksessa mitattiin moottorin hyötysuhteet läpi koko sen käyttöalueen. Koska Hiluxiin valmistettu Randax-moottori oli nestejäähdytteinen, keskityttiin myös tutkimaan nestejäähdytyksen toimintaa säätelämällä jäähdytysnesteen lämpötilaa ja virtausta. Hiluxin sähkömoottorista Randax Oy käyttää mallinimeä 000112, ja kyseistä mallinimeä käytetään moottorista puhuttaessa myös tässä työssä tästä eteenpäin. 000112-moottori on esitetty kuvassa 12.



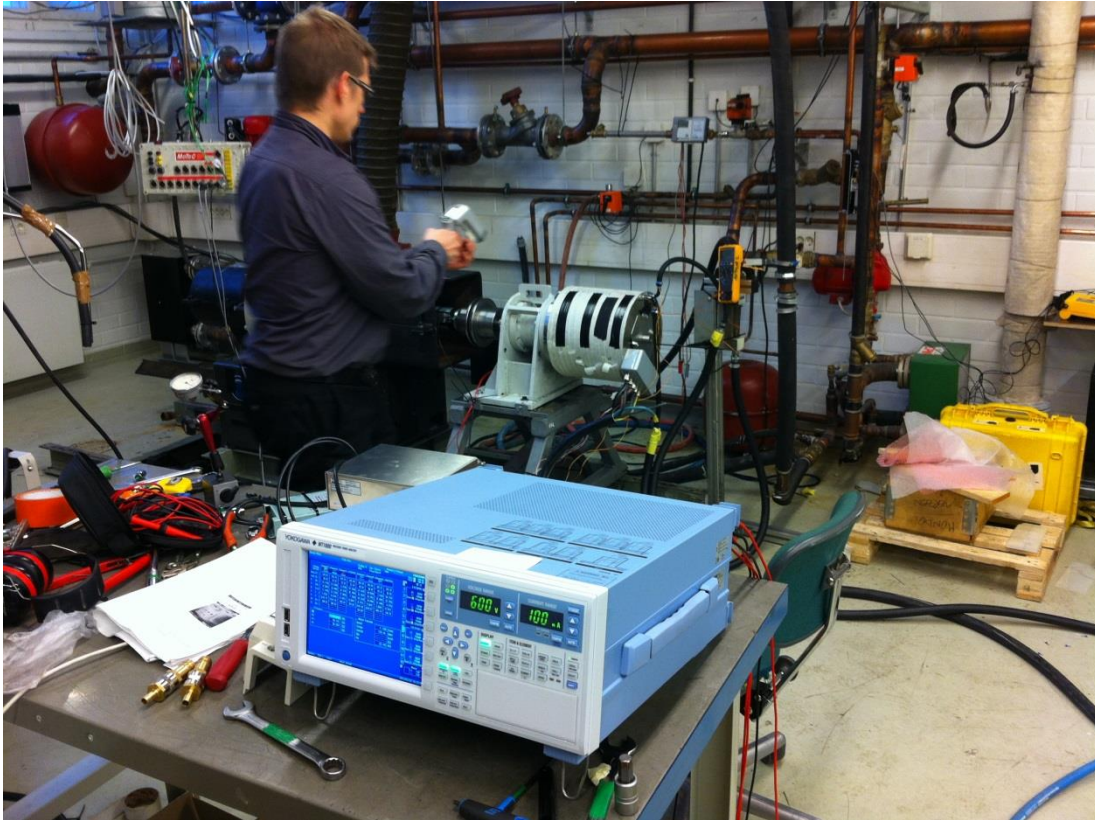
KUVA 12. Nestejäähdytteinen Randax -sähkömoottori, 000112 (5)

4.1 Sähkömoottorin mittaus moottoridynamometrissa

000112:n mittaaminen aloitettiin 25.1.2013. Mittauslaitteisto koostui seuraavista laitteista:

- Randax-sähkömoottori, 000112
- ABB ACS850 -taajuusmuuttaja
- Vacon NXP 0168 -taajuusmuuttaja
- Schenck WT2-380 -moottoridynamometri
- Yokogawa WT1800 -tehoanalysaattori ja tiedonkeruu
- Motec-tiedonkeruujärjestelmä
- Fluke TI20 -lämpökamera
- Fluke 179 -yleismittarit
- analoginen nesteenvirtausmittari.

Mittaaminen aloitettiin nestejäähdytyksen toiminnan tutkimisella ja moottorista saatavan jatkuvan tehon määrittämisellä. Nestejäähdytyksen toimintaa tutkittiin tarkkailemalla moottorin sisälämpötilaa, sisään- ja ulosvirtaavan jäähdytysnesteen lämpötilaa sekä pintalämpötilaa. Moottorin sisälämpötiloja seurattiin moottorilaboratorion Motec-tiedonkeruujärjestelmällä, johon staattorikäymykseen asennetut PT100 -anturit oli kytketty. Jäähdytysnesteen lämpötilat mitattiin K-tyypin lämpöanturilla ja yleismittarilla jäähdytyskanaviston putkista, ja moottorin pintalämpötilan mittaukseen käytettiin Fluke TI20 -lämpökameraa. Kuvassa 13 on esitetty sähkömoottorin mittausjärjestely.



KUVA 13. Sähkömoottori testipenkissä mittauslaitteistoineen

Randax Oy valmisti sähkömoottorin rungon haponkestävästä teräksestä, koska moottori sijoittuu ajoneuvon alustaan ja on siellä suorassa kontaktissa tien epäpuhtauksiin. Kiiltäväpintainen haponkestävä teräs teipattiin maalarinteipillä dynamometrimittauksien ajaksi, koska kiiltävän pinnan kuvaaminen ei olisi muuten onnistunut mittauksissa käytetyllä lämpökameralla.

4.1.1 Lämpenemisajot

ABB ACS850 -taajuusmuuttajalla

Lämpenemisajot aloitettiin 25.1.2013 klo 13:30. Aluksi moottorinohjaimena käytettiin ABB:n ACS850-taajuusmuuttajaa. Myöhemmin moottorinohjain korvattiin tehokkaammalla Vacon NXP 0168 -taajuusmuuttajalla, koska käytetty ACS850-taajuusmuuttaja oli liian pienitehoinen määriteltäessä moottorin suorituskyvyn huippuarvoja.

Alkuvalmisteluiden ja laitteistojen toimivuuskatsauksen jälkeen moottorin pyörintänopeus nostettiin kentänheikennyspisteeseen, joka 000112-moottorilla on

4 200 minuuttikierröksellä. Jäähdytysnesteenä käytettiin vettä, jonka lämpötila moottorille mennessä oli 40 °C ja virtaus noin 8 dm³/min.

Moottorin kuormaa nostettiin 125 Nm, jolloin moottorin staattorivyyhtien sisäisten lämpöantureiden lämpötila nousi aina 118 °C. Moottorin kuormaa laskettiin portaittain 115 Nm, jolloin vyyhdeistä mitattu lämpötila ei jatkanut nousuaan, vaan pysyi 118 °C:ssa. Tasaisella 115 Nm kuormalla ajettiin 50 minuuttia, jona aikana lämpötila vyyhdeissä pysyi tasaisena. Moottorin sisäilmatilassa olleen lämpöanturin mittauslukema pysyi 115 Nm kuormituksen aikana alle 100 °C.

Lämpenemisajoa ja nestejäähdytyksen toiminnan tutkimista jatkettiin nostamalla jäähdytysnesteen virtaus noin 16 dm³/min. Jäähdytysnesteen lämpötila pysyi 40 °C:ssa ja moottoria ajettiin edelleen 4 200 minuuttikierröksellä. Moottorin kuormaa nostettiin nyt aina 135 Nm, jolloin staattorivyyhtien lämpöanturit osoittivat 120 °C:n lämpötilaa. Moottorin kuormaa laskettiin 130 Nm, jolloin vyyhdeistä mitattu lämpötila pysyi 50 minuutin kuormituksen aikana 118 ja 120 °C:n välillä. Moottorin sisäilmatilassa olleen lämpöanturin mittauslukema pysyi 130 Nm kuormituksen aikana alle 100 °C.

Mittauksessa käytetyn ABB:n ACS850-taajuusmuuttajan tehorajat tulivat näiden mittausten jälkeen vastaan. Tämän vuoksi alemmalla jäähdytysnesteen lämpötilalla ajatut lämpenemisajot jouduttiin ajamaan tehokkaammalla Vacon-taajuusmuuttajalla.

Vacon-taajuusmuuttajalla

Lämpenemisajoja jatkettiin tehokkaammalla taajuusmuuttajalla 29.1.2013 klo 13:00. Mittausjärjestely ja moottorin pyörintänopeus olivat edelleen samoja kuin pienemmällä taajuusmuuttajalla ajetuissa testiajoissa. Jäähdytysnesteen lämpötila oli 25 °C ja virtaus 14 dm³/min. Kyseisen jäähdytysnesteen lämpötila ja virtaus ovat olennaisia Hiluxin kannalta, sillä Hiluxin jäähdytysjärjestelmässä käytettävä nestepumppu kierrättää nestettä noin 15 dm³/min ja jäähdytysnesteen lämpötilan on suunniteltu olevan maksimissaan 25 °C.

Moottorin kuormaa nostettiin aina 180 Nm, jolla nostettiin staattorivyyhtien lämpötila 130 °C. Moottorin kuormaa laskettiin portaittain 160 Nm:iin, jolloin vyyhdeistä mitattu lämpötila pysyi tunnin kuormituksen aikana alle 130 °C. Moottorin

sisäilmatilassa olleen lämpöanturin mittauslukema pysyi 160 Nm kuormituksen aikana 98 ja 99 °C:n välissä.

Yhteenveto lämpenemisajoista

Lämpenemisajojen mittausten perusteella ilmoitetaan moottorin nimellistehot eri jäähdytysnesteen lämpötilan ja virtauksen arvoilla. Nimellisteholla tarkoitetaan tässä tapauksessa tehoa, jolla moottoria voidaan kuormittaa jatkuvasti ilman vaaraa ylikuumenemisesta, kunhan jäähdytysnesteen virtaus ja lämpötila huomioidaan. Moottorin lämpenemisajojen tulokset ja nimellistehot on ilmoitettu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Lämpenemisajojen tulokset

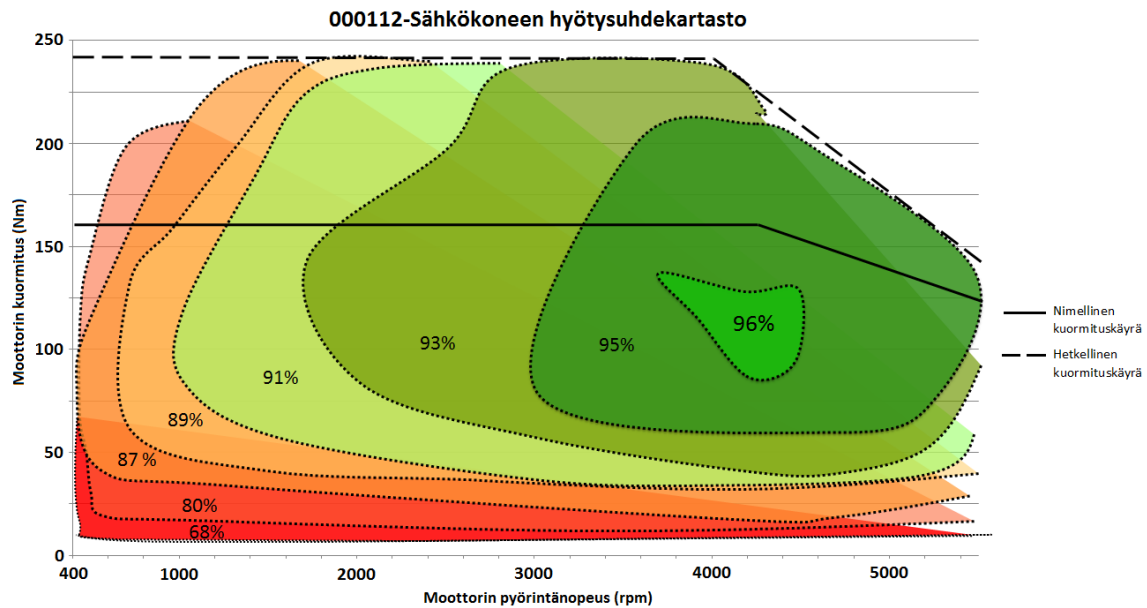
000112 Lämpenemisajojen tulokset					
Pyörintänopeus (RPM)	Kuormitus (Nm)	Teho (kW)	Jäähdytysnesteen lämpötila (°C)	Jäähdytysnesteen virtaus (ltr/min)	Moottorin sisäilmanlämpö (°C)
4200	115	50,6	40	8	100
4200	130	57,2	42	16	100
4200	160	70,3	25	14	100

4.1.2 Sähkömoottorin hyötysuhdekartasto

Sähkömoottorin kuormitusalueelta mitattiin yhteensä 327 mittauspistettä. Mittaus tapahtui siten, että taajuusmuuttajan kautta moottorille asetettiin haluttu pyörintänopeus ja moottoria alettiin kuormittaa moottoridynamometrillä portaittain aina 240 Nm saakka. Alle 1 000 rpm pyörintänopeuksilla ajettuja mittauksia ei voitu kuormittaa aivan 240 Nm:iin saakka, koska mittaukseen käytetyn moottoridynamometrin suorituskyky ei ollut riittävä.

Moottorin hyötysuhde on laskettu jakamalla moottoridynamometrin ilmoittama akseliteho tehoanalysaattorin määrittämällä moottorille syötettävällä teholla. Jokaista mittauspistettä ajettiin kerrallaan vähintään 10 sekuntia, jotta moottoridynamometrin ja tehoanalysaattorin mittauslukemat ehtivät tasaantua. Hyötysuhteita määritettäessä tasaantuminen on huomioitu siten, että jakolaskennassa on käytetty mittauspisteen tuloksista viisi viimeistä sekuntia, kun mittaus tulokset on tallennettu 1 Hz:n taajuudella eli sekunnin välein. Mittauspisteen hyötysuhde on näiden viiden hyötysuhdearvon keskiarvo. Sähkömoottorin hyötysuhdetaulukko on esitetty liitteessä 2 (liitteen taulukko on poistettu julkaista-

vasta työstä). Hyötysuhdetaulukon perusteella luotiin hyötysuhdekartasto, joka on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. 000112-sähkomoottorin hyötysuhdekartasto

Kuvan 14 perusteella nähdään, että 000112-sähkomoottorin paras hyötysuhde esiintyy kentänheikennyspisteen 4 200 rpm kohdalla 100–150 Nm:n välisellä alueella. Tuolloin moottorin hyötysuhde on yli 96 %. Moottorin hyötysuhde on yli 90 % 1 000–5 500 rpm välisellä alueella, kun kuormitus on yli 50 Nm. Pienillä kuormituksilla ja pienillä pyörintänopeuksilla moottorin hyötysuhde laskee.

4.1.3 Taajuusmuuttajien hyötysuhdetaulukko

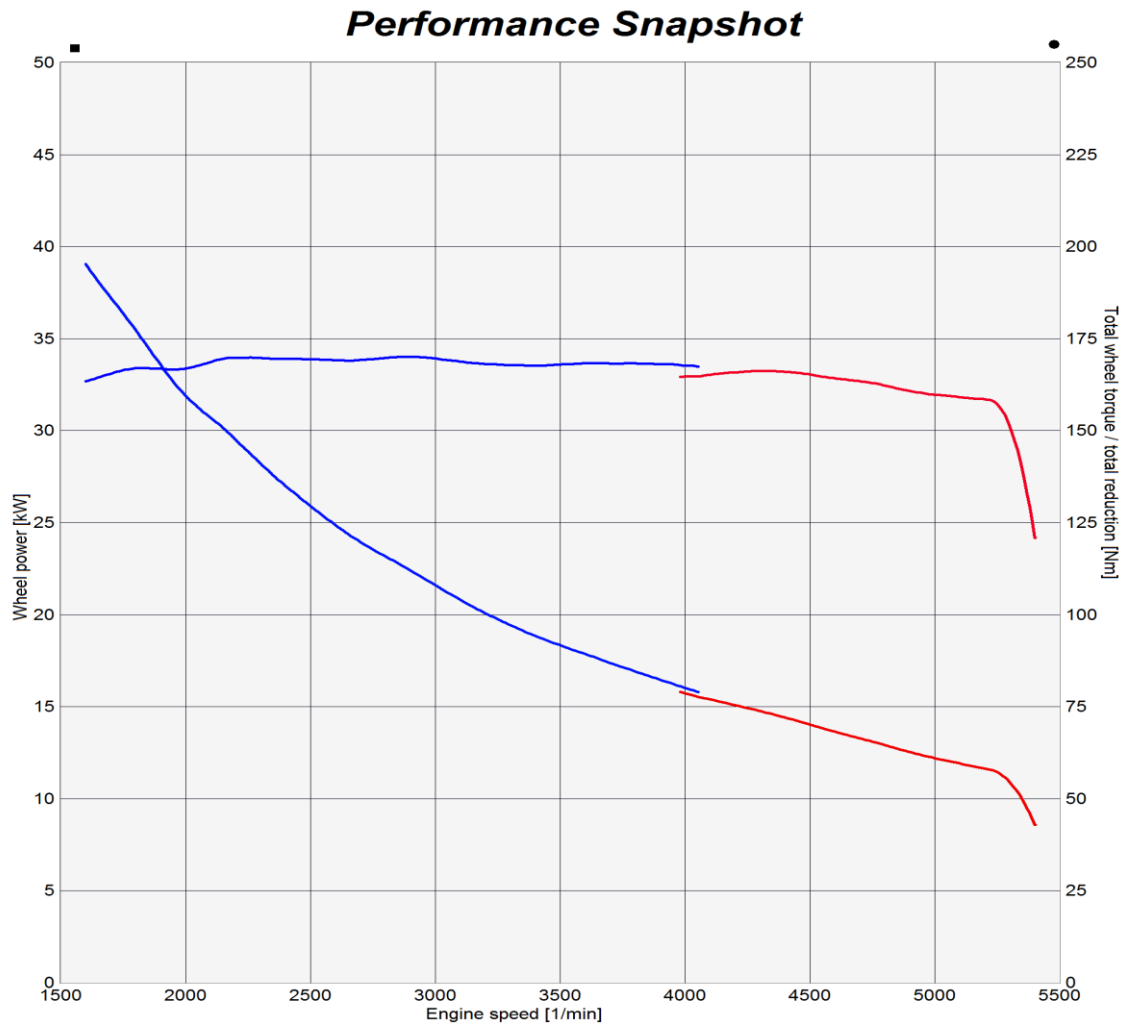
Taajuusmuuttajien hyötysuhde määriteltiin sähkömoottorin mittauksien yhteydessä, koska näin saadaan taajuusmuuttaja-moottoriketjun kokonaishyötysuhde määriteltä. Taajuusmuuttajien hyötysuhde on määriteltä samoissa 327 mittauspisteessä, joissa sähkömoottorinkin. ABB ACS850 -taajuusmuuttajaa käytettiin pienemmillä kuormilla ajetuissa mittauspisteissä ja Vacon NXP 0168 -taajuusmuuttajaan korkeiden kuormitusten ja nopeuksien mittauspisteissä ACS850:n tehorajoituksen vuoksi. Taajuusmuuttajille määritetyt hyötysuhteet on esitetty taulukossa liitteessä 3 (liitteen taulukko on poistettu julkaistavasta työstä).

4.1.4 Sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan kokonaishyötysuhde

Sähkömoottori-taajuusmuuttajaketjun kokonaishyötysuhde on määritetty mittauspisteiden osahyötysuhteiden tulona. Ketjun kokonaishyötysuhteet on esitetty taulukossa liitteessä 4 (liitteen taulukko on poistettu julkaistavasta työstä).

4.2 Voimansiirtojärjestelmän mittaus alustadynamometrissa

Hilux-sähkötyökoneen täyssähköinen voimansiirtojärjestelmä mitattiin Oamkin autolaboratorion alustadynamometrissa 6.4.2013. Mittauksessa tutkittiin moottorinohjauslogiikan toimintaa äkillisissä virranmuutostilanteissa sekä mitattiin pyörännavoille moottorilta välittyvä teho kierrosnopeuden funktiona. Mittaukset suoritettiin takavedolla. Mittauksessa ajoneuvo oli täysin varusteltuna ja säädettynä käyttötötesteihin. Kuvassa 15 on esitetty alustadynamometrissa määritetyt teho- ja vääntökuvaajat kierrosnopeuden funktiona.



KUVA 15. Hiluxin teho- ja vääntökuvaajat kierrosnopeuden funktiona

Kuvan 15 dynamometrimittaus on suoritettu niin sanotulla ramppimittauksella, jossa dynamometrille annetaan ohjeellinen aika, jossa se antaa kierrosnopeuden tasaisesti nousta halutulla nopeusvälillä. Mittauksessa rampin aika oli 20 sekuntia kierrosnopeuden alarajan ollessa 1 500 rpm ja ylärajan 5 500 rpm. Kuvassa 15 esitetty sininen käyrä kuvastaa mittausta suora välitys kytkettynä ja punainen käyrä kuvastaa mittausta alennusvaihteella. Mittauksessa on käytetty alennusvälitystä siitä syystä, että jakovaihteisto resonoi voimakkaasti suoralla välityksellä ajettaessa, kun kierrosnopeus ylittää 4 000 rpm.

Mittaukseen käytetty Rototest VPA-RX83 -alustadynamometri ei mahdollista vääntömomentin mittausta Hiluxin voimansiirrolle alle 1 700 rpm:n pyörintänopeuksilla, koska pyörävääntömomentti kierrosnopeuteen nähden on mittalaitteelle liian korkea. Hiluxiin rakennetun voimansiirtojärjestelmän maksimivään-

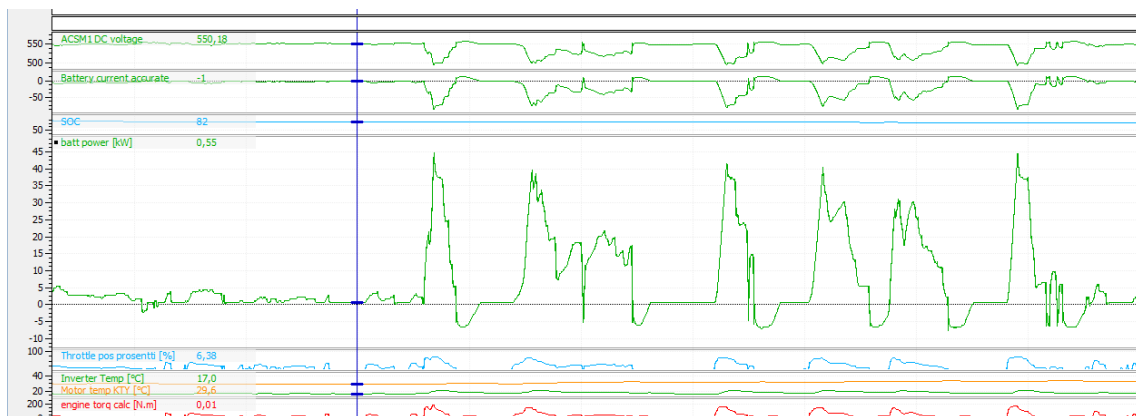
tömomentin mittausta on näin ollen mittaukseen käytetyllä alustadynamometrillä mahdotonta.

Hiluxin sähköinen voimansiirtojärjestelmä saavuttaa maksimitehonsa noin 2 000 rpm kierrosnopeudella. Moottorinohjaus alkaa tällöin rajoittaa akustolta otettavaa virtaa, jolloin teho pysyy tasaisena kierrosluvun edelleen kasvaessa. Hetkellinen maksimiteho on pyöriltä mitattuna 2 890 rpm kierrosnopeudella 34,0 kW. Vääntömomentti alkaa virtaa rajoitettaessa vastaavasti laskea. Vääntömomentti laskee aina maksimikierroksille 5 300 rpm saakka.

5 VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMÄN ENERGIANKÄYTTÖ TYÖAJOSSA

Hilux-sähkötyökoneen täyssähköisen voimansiirtojärjestelmän toimintaa testattiin Teklin työajossa viitenä eri työpäivänä maaliskuussa 2013. Samalla suoritettiin sähköisen voimansiirtojärjestelmän energiankulutusmittaukset työajossa. Hiluxilla ajettiin jokaisen työvuoron aamupäivän ajosuorite, koska käyttöönotto- vaiheen akuston energiasisältö ei riittänyt koko työpäivän ajosuoritteeseen.

Testauspäivien energiankäyttö on eritelty seuraavaksi. Energiankulutus on mitattu akustolta otettavasta tehosta, joka muodostuu välipiirijännitteen ja akustolta otettavan virran tulosta. Välipiirijännite ja virta on tallennettu käytön aikana Motec-tiedonkeruujärjestelmään 10 Hz:n taajuudella. Käytetty sekä regeneroitu kilowattituntimäärä on määritetty integroimalla päivän ajosuoritteen akkutehon käyrä ajan funktiona Motec i2 pro -ohjelmistolla. Tarvittava kilowattituntimäärä on saatu käytetyn ja regeneroidun energian erotuksena. Kuva 16 esittää tiedonkeruujärjestelmän tallentamaa akkutehon käyrää, jonka perusteella energiankulutus on siis määritetty.



KUVA 16. Akkutehon kuvaaja Motec i2 pro -ohjelmistossa

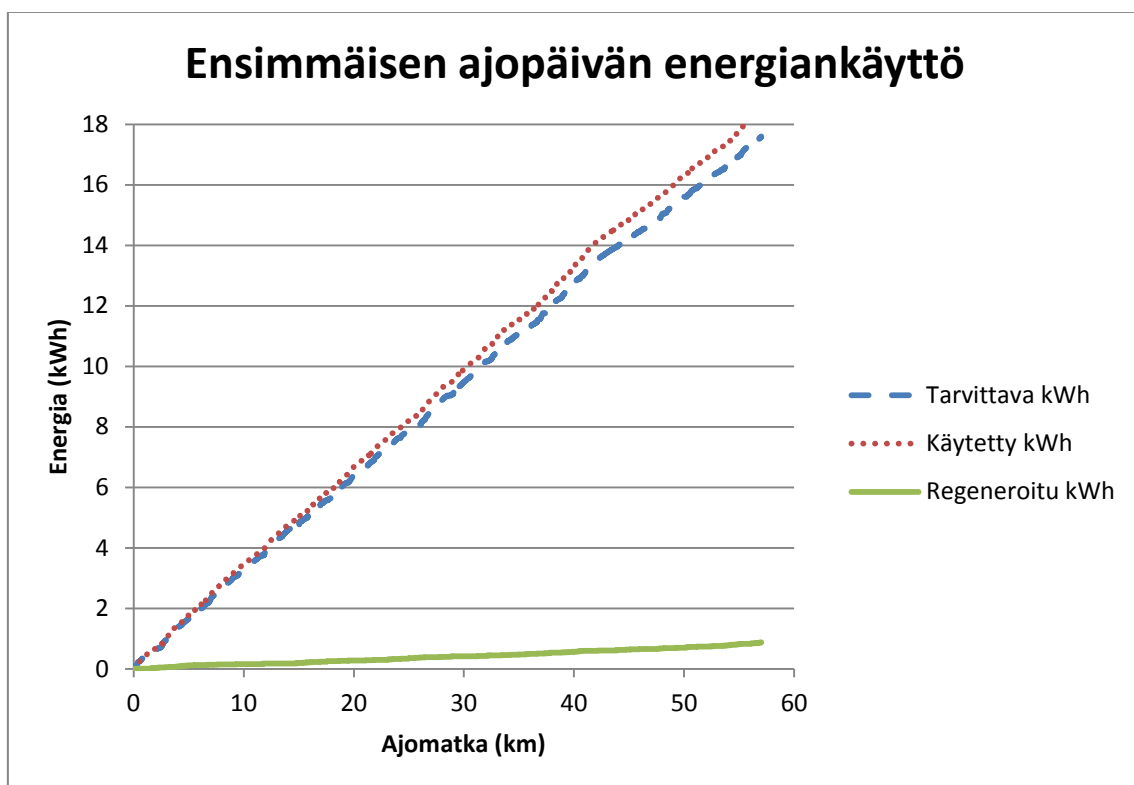
Tavoitteena oli mitata Hiluxin energiankulutusta varsinaisessa lumenaurausajossa, mutta testauspäivien myöhäinen ajankohta ei sitä mahdollistanut. Näiltä viideltä testauspäivältä määritellyt energiankulutukset vastaavat näin ollen kevyempää työkäyttöä kuin mitä lumenaurauskäyttö olisi. Lumenaurausajon energiankulutus on määritettävä myöhemmin sopivissa olosuhteissa.

5.1.1 Ensimmäinen ajopäivä 19.3.2013

Kuvassa 17 on esitetty ensimmäisen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona. Taulukossa 2 on esitetty päivän energiankäyttö ja -kulutus lukuarvoina.

TAULUKKO 2. Ensimmäisen ajopäivän energiankäyttö

Ajomatka (km)	Käytetty energia (kWh)	Regeneroitu energia (kWh)	Tarvittu energia (kWh)	Energiankulutus (kWh/km)
57	18,48	0,88	17,6	0,309



KUVA 17. Ensimmäisen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona

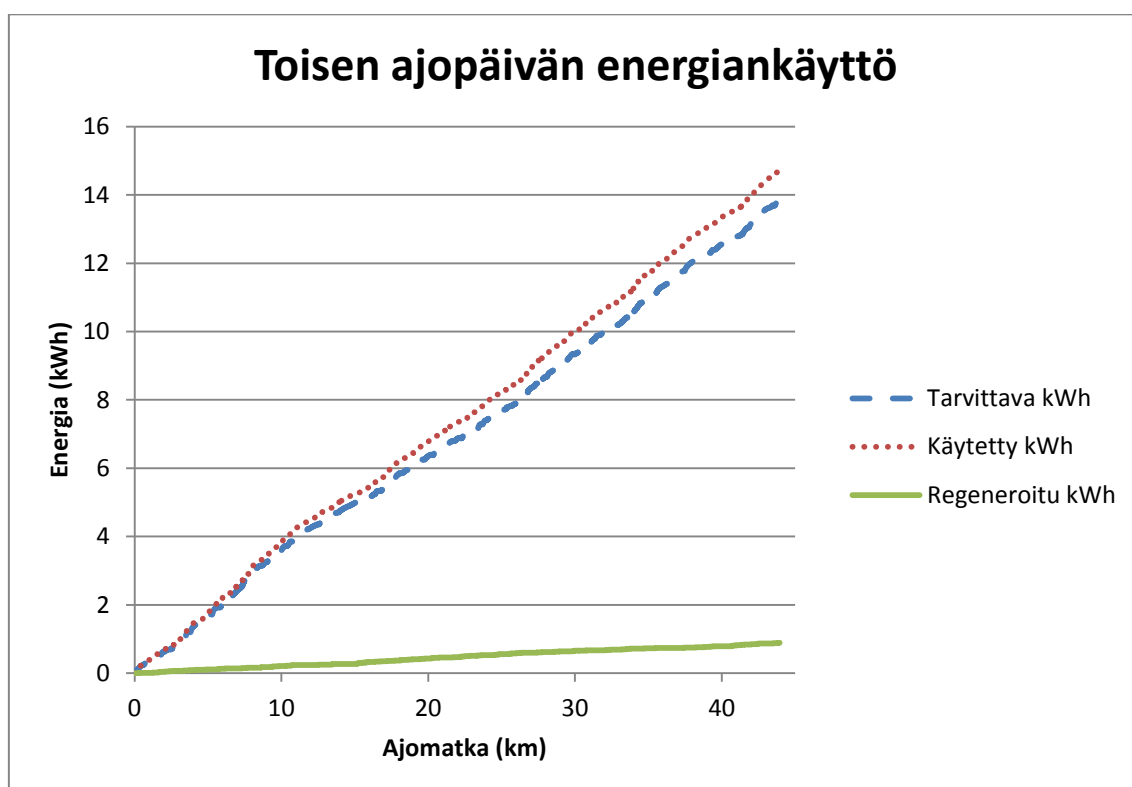
Ensimmäisen ajopäivän ajosuoritteeseen sisältyi hieman auraustyötä, ja siksi energiankulutus on ollut melko suurta verrattaessa sitä muihin ajopäiviin. Ajo oli pääosin hidasta, mikä näkyy siinä, ettei regenerointia ole tapahtunut paljoakaan. Regenerointi on käytössä moottorijarrutuksessa, ja mikäli ajonopeus on päivän aikana pientä, regeneroitava teho ei ole suuri.

5.1.2 Toinen ajopäivä 20.3.2013

Kuvassa 18 on esitetty toisen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona. Taulukossa 3 on esitetty päivän energiankäyttö ja -kulutus lukuarvoina.

TAULUKKO 3. Toisen ajopäivän energiankäyttö

Ajomatka (km)	Käytetty energia (kWh)	Regeneroitu energia (kWh)	Tarvittu energia (kWh)	Energiankulutus (kWh/km)
44	14,71	0,89	13,82	0,314



KUVA 18. Toisen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona

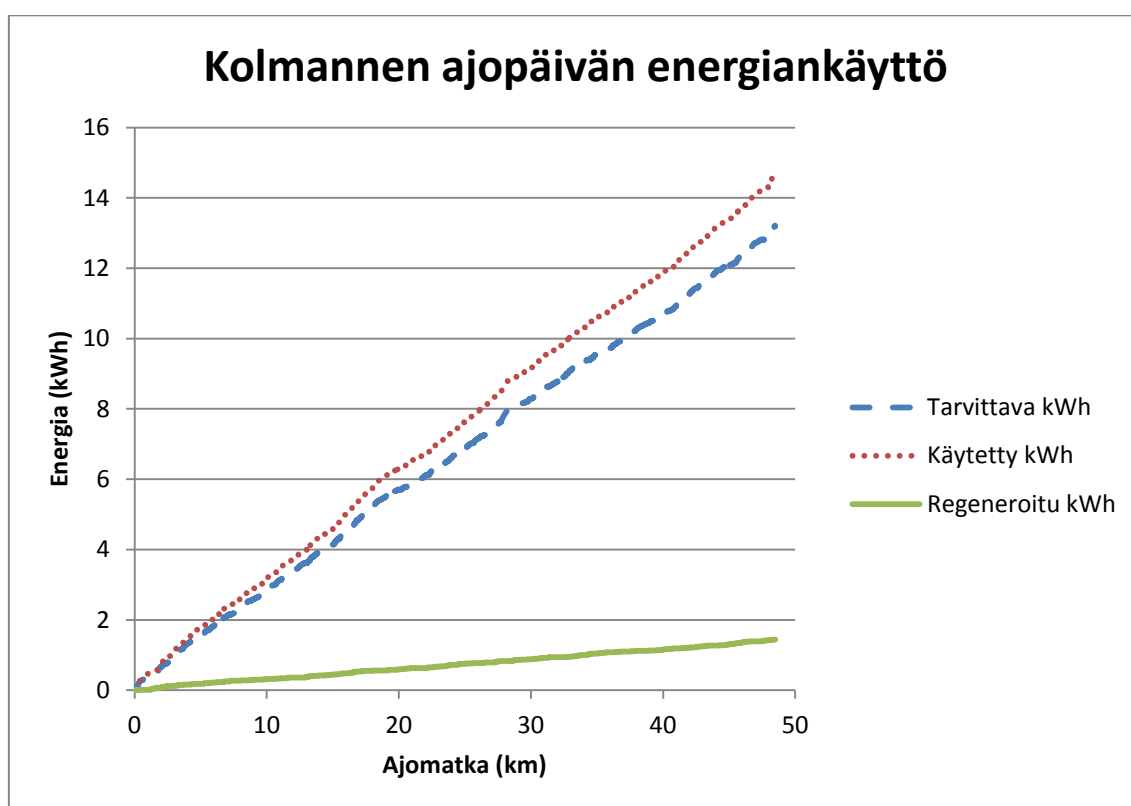
Toisena ajopäivänä energiankulutus kilometriä kohden on ollut testipäivien suurin. Ajopäivään sisältyi myös hieman auraustyötä. Päivän alussa käyttö on ollut hieman energiaa kuluttavampaa, mikä näkyy kuvassa 18, kun ajomatka ollut noin 10 kilometriä. Tuolloin energiankulutus on ollut selvässä kasvussa. Regenerointia on tapahtunut ensimmäistä ajopäivää enemmän, mikä on seurausta hieman korkeammista ajonopeuksista päivän aikana.

5.1.3 Kolmas ajopäivä 21.3.2013

Kuvassa 19 on esitetty kolmannen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona. Taulukossa 4 on esitetty päivän energiankäyttö ja -kulutus lukuarvoina.

TAULUKKO 4. Kolmannen ajopäivän energiankäyttö

Ajomatka (km)	Käytetty energia (kWh)	Regeneroitu energia (kWh)	Tarvittu energia (kWh)	Energiankulutus (kWh/km)
48	14,66	1,44	13,22	0,275



KUVA 19. Kolmannen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona

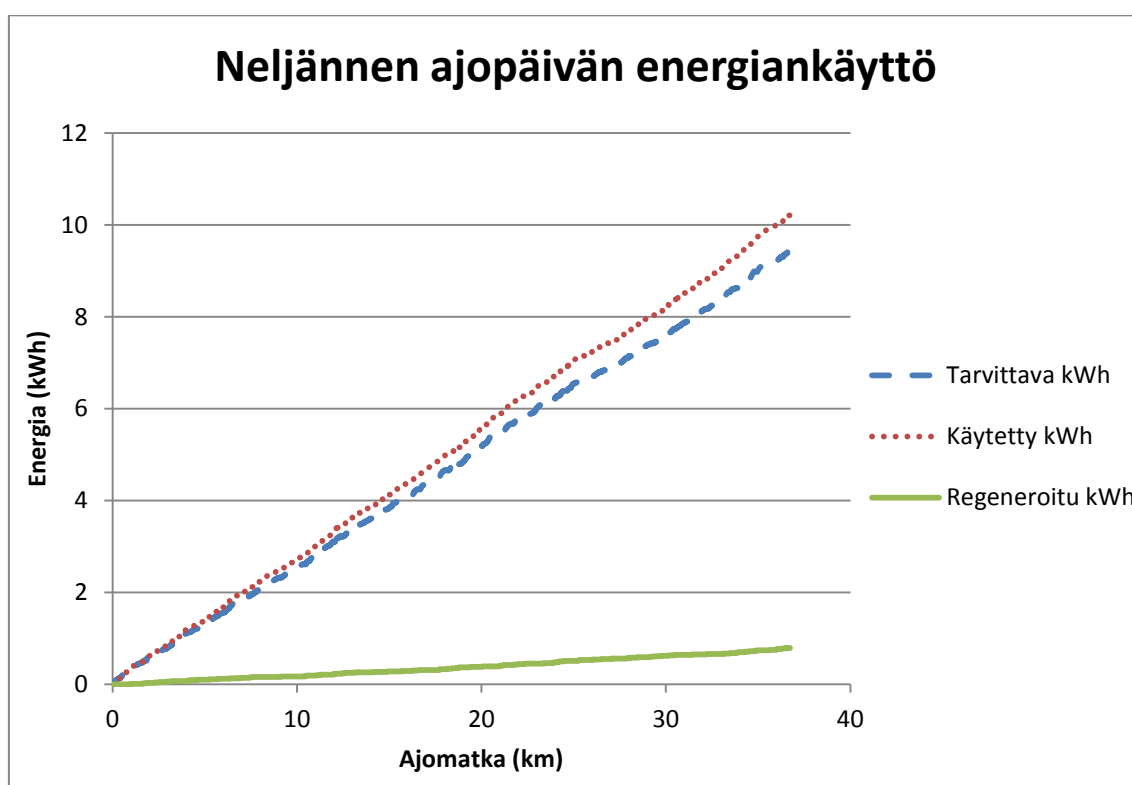
Kolmantena ajopäivänä regenerointi on toiminut tehokkaasti. Tämä on seurausta suuremmista ajonopeuksista. Noin 20 ja 30 kilometrin kohdalla näkyy kuvassa 19 energiankulutuksen kasvua. Tuolloin käyttö on ollut energiaa kuluttavaa. Ajopäiväkirjaan on merkitty muistiin runsas hiekoittimen käyttö päivän aikana. Hiekoitin kuluttaa käytettäessä paljon virtaa, mikä selittää osaltaan myös energiankulutuksen kasvua.

5.1.4 Neljäs ajopäivä 25.3.2013

Kuvassa 20 on esitetty neljännen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona. Taulukossa 5 on esitetty päivän energiankäyttö ja -kulutus lukuarvoina.

TAULUKKO 5. Neljännen ajopäivän energiankäyttö

Ajomatka (km)	Käytetty energia (kWh)	Regeneroitu energia (kWh)	Tarvittu energia (kWh)	Energiakulutus (kWh/km)
37	10,22	0,79	9,43	0,255



KUVA 20. Neljännen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona

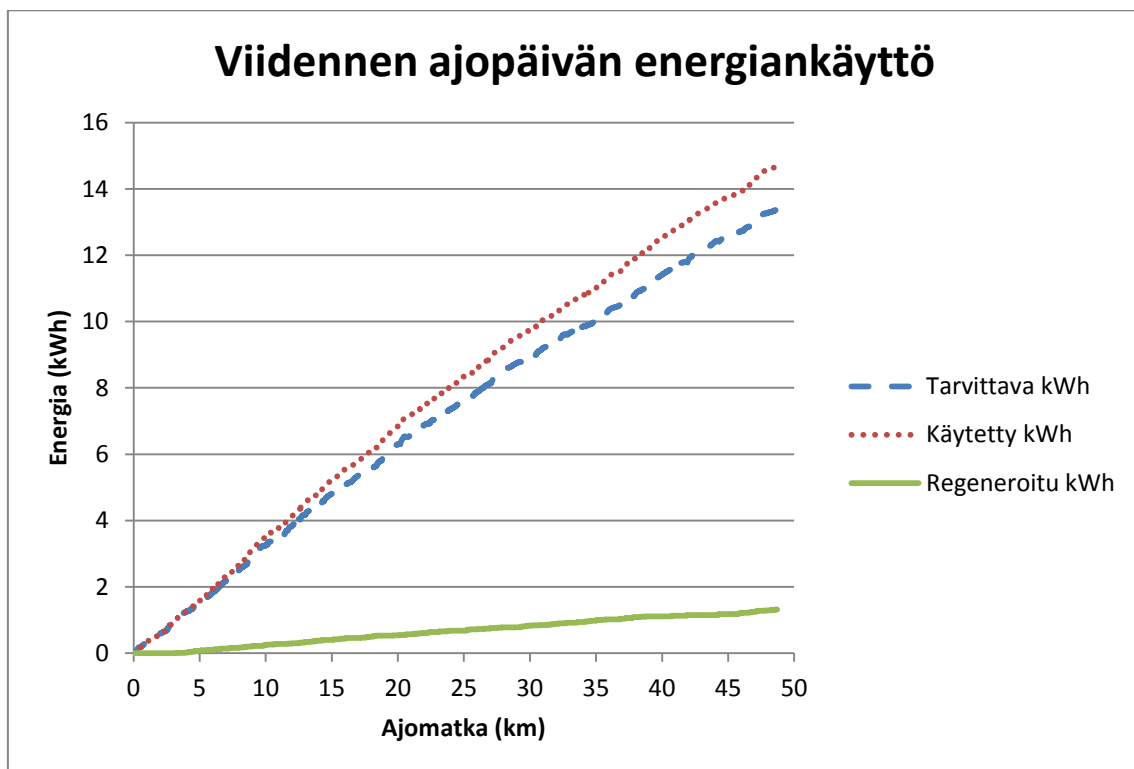
Neljäntenä ajopäivänä ajo oli rauhallista ja ajonopeus säilyi alhaisena. Kävely- ja pyöräteillä ajettiin runsaasti. Hiekkeitä käytettiin jonkin verran, mutta aurasuorityötä ei päivän aikana ollut. Energiakulutus kilometriä kohden on ollut ajopäivistä matalin. Regenerointi on ollut vähäistä.

5.1.5 Viides ajopäivä 26.3.2013

Kuvassa 21 on esitetty viidennen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona. Taulukossa 6 on esitetty päivän energiankäyttö ja -kulutus lukuarvoina.

TAULUKKO 6. Viidennen ajopäivän energiankäyttö

Ajomatka (km)	Käytetty energia (kWh)	Regeneroitu energia (kWh)	Tarvittu energia (kWh)	Energiankulutus (kWh/km)
49	14,73	1,32	13,41	0,274



KUVA 21. Viidennen ajopäivän energiankäyttö ajomatkan funktiona

Viidentenä ajopäivänä ajo on alkanut tehokkaalla työskentelyllä. Kuvan 21 perusteella nähdään, että energiankäytön kasvu laskee ajomatkan kasvaessa. Päivän loppupuolella ajonopeudet ovat olleet suurempia kuin päivän alussa, mikä näkyy regeneroidun energian kasvuna päivän lopussa.

5.1.6 Yhteenveto ajopäivistä

Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto viiden testipäivän ajomatkoista ja energiankulutuksista ajokilometriä kohden. Taulukossa on esitetty myös viiden ajopäivän ajomatkan ja energiankulutuksen keskiarvo ja keskihajonta.

TAULUKKO 7. Yhteenvetotaulukko ajomatkoista ja energian kulutuksista

Ajopäivä	Ajomatka (km)	Energiankulutus (kWh/km)
1	57	0,309
2	44	0,314
3	48	0,275
4	37	0,255
5	49	0,274
Keskiarvo	47	0,285
Keskihajonta	6,5	0,023

Suunnitelmavaiheen loppuraportin mukaan Hiluxilla ajettiin keväällä 2011 työpäivää kohden keskimäärin 75 kilometriä, joskin keskihajonta on tuolloin ollut suurta (1, s. 22). Nyt tehtyjen mittauksien perusteella koko työpäivän ajosuorite olisi 2011 kevääseen verrattuna lähes 20 kilometriä suurempi, kun otetaan huomioon, että testipäivinä ajettiin vain puolen päivän mittaisia ajosuoritteita. Osaltaan tämä saattaa johtua nyt ajettujen testiajajien auraustyön vähäisyydestä, koska auraustyön vähentyessä ajonopeus nousee ja päivittäinen ajomatka näin ollen kasvaa.

Nyt ajettujen testipäivien perusteella määritettyä keskimääräistä energiankulutusta kilometriä kohden 0,285 kWh/km ei voida pitää luotettavana energiankulutusarvona työajoon, jos ollaan mitoittamassa akustoa aurauskäyttöön tulevaan sähköiseen työkoneseen. Mikäli työajoon ei kuitenkaan sisälly varsinaista aurauskäyttöä, voidaan määritettyä kWh-lukemaa pitää hyvänä ohjeellisena arvona kyseiseen käyttöön.

6 VOIMANSIIRTOJÄRJESTELMIEN VERTAILU

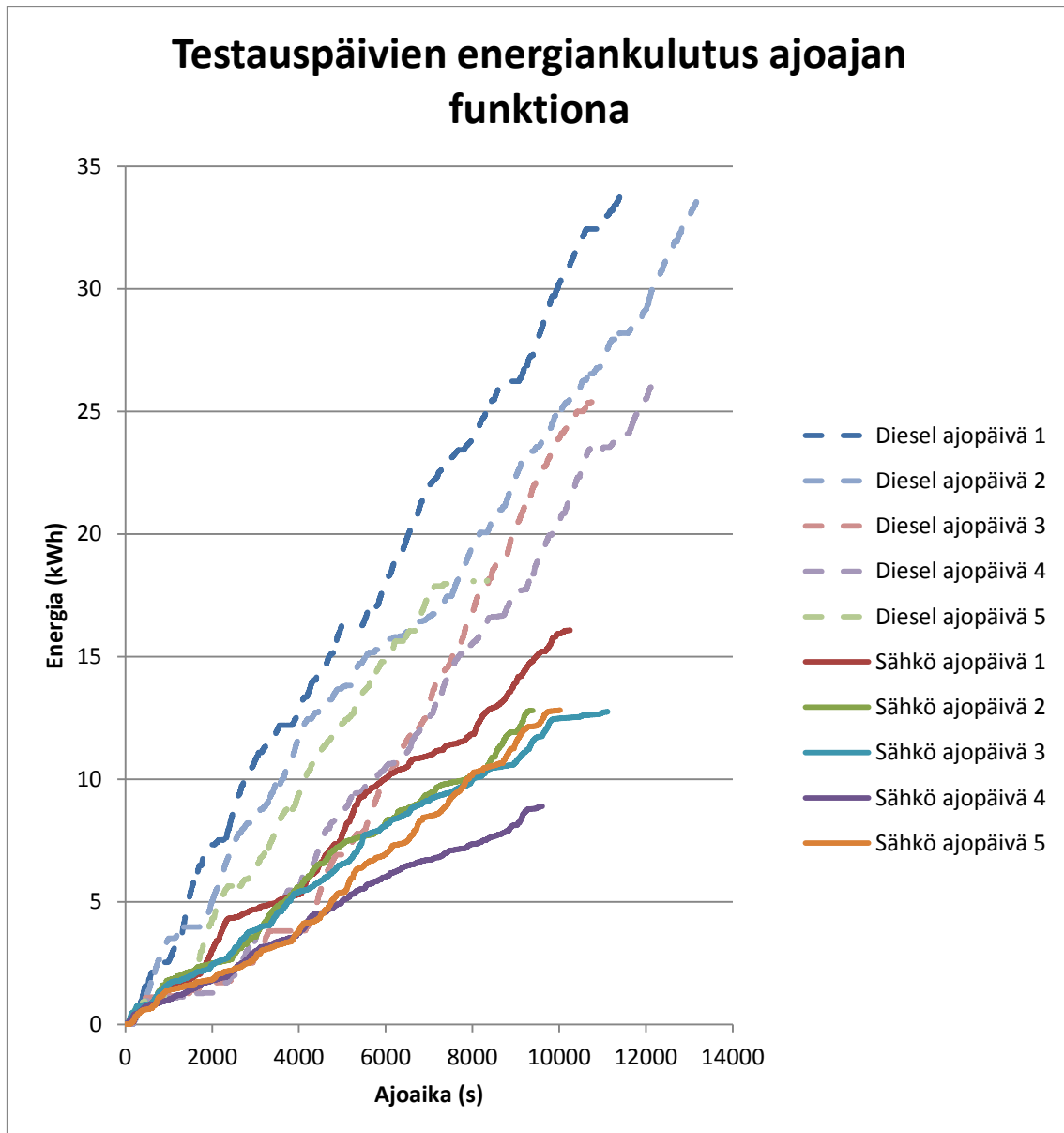
Voimansiirtojärjestelmiä verrattaessa keskitytään vertailemaan Hiluxin alkuperäistä diesel-käyttöistä voimansiirtojärjestelmää nyt rakennettuun täyssähköiseen voimansiirtojärjestelmään nähden. Vertailussa tarkastellaan järjestelmien energiankulutusta ja mitattuja suoritusarvoja. Lisäksi esitetään ammattikuljettajien mielteitä järjestelmien eroista ja ominaisuuksista testauspäivien jälkeen.

Oletuksena verrattaessa voimansiirtojärjestelmien päivittäisiä energiankulutuksia on se, että energiankulutus olisi molemmilla järjestelmillä samankaltaista. Tämä johtuu siitä, että ajosuorite ja työtehtävät pysyvät muuttumattomina, jolloin energiankulutuksen aiheuttava kokonaisajovastusteho ja sen muutokset ovat päivän aikana hyvin samankaltaisia riippumatta voimansiirtojärjestelmän toteutuksesta.

Tähän työhön oli tarkoitus myös sisällyttää tarkka ajonaikainen kulutusvertailu, mutta sen tekeminen epäonnistui, kun diesel-käyttöisen Hiluxin kytkin rikkoutui kulutusmittauksien alussa alustadynamometrissa eikä käytettävissä ollut aika olisi riittänyt vaadittaviin kytkimen korjaustoimenpiteisiin. Kulutus- ja kustannusvertailujen tekeminen ei näin ollen ollut mahdollista.

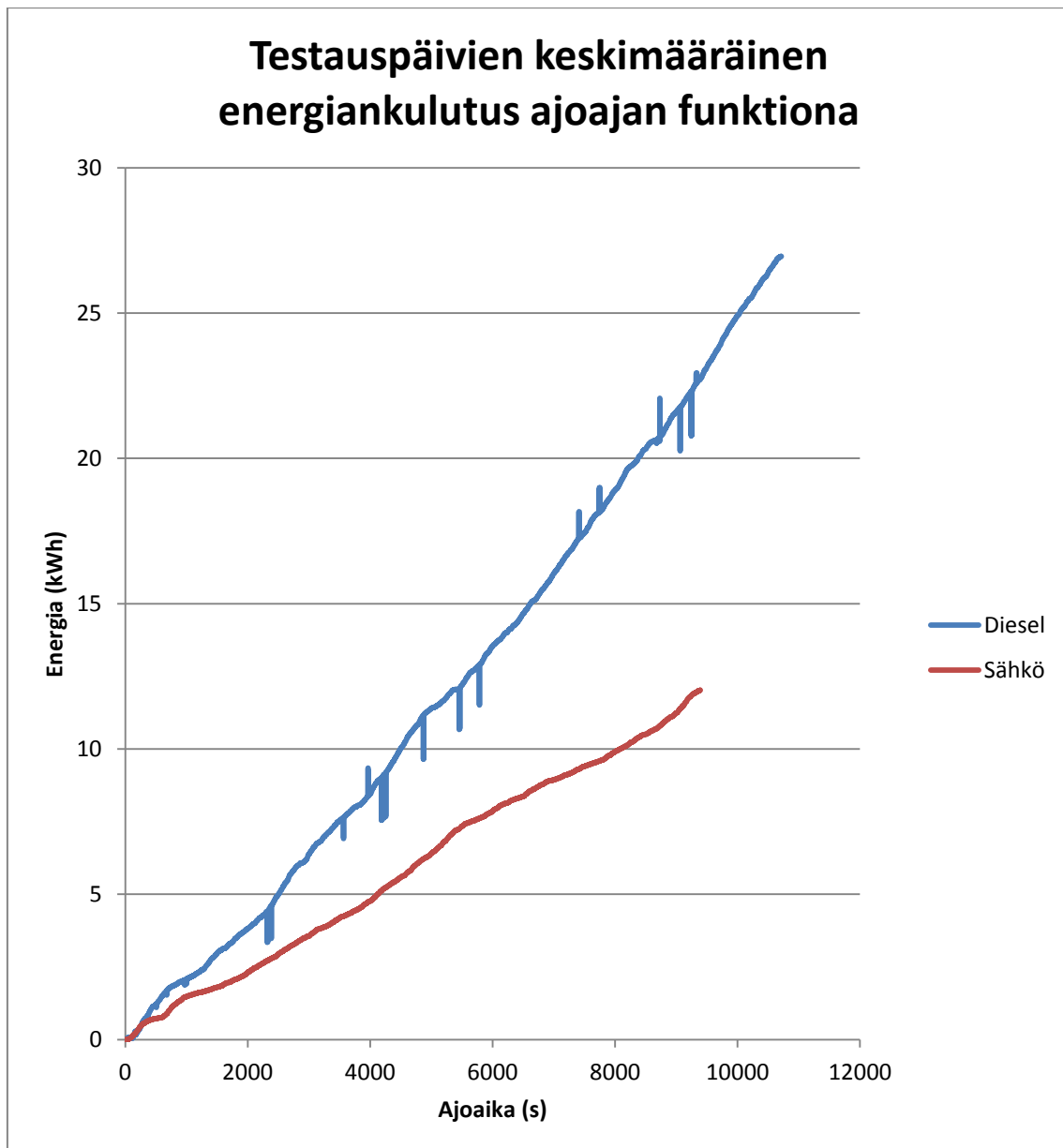
6.1 Ajonaikainen energiankulutus

Kuvassa 22 on esitetty keväällä 2011 mitattujen ajopäivien energiankulutusta diesel-käytöllä katkoviivoin, kun jatkuvat viivat kuvaavat kevään 2013 aikana ajettuja testiajoja täyssähköisellä voimansiirtojärjestelmällä. Energiankulutukset on esitetty ajoajan funktiona, koska diesel-käytön mittauksissa ajomatkan määrittäminen on tiedonkeruujärjestelmään tulleiden häiriösignaalien vuoksi virheellinen. Sähkökäytön energiankulutukset on määritetty arvioidun moottorin akselitehon kautta. Tiedonkeruujärjestelmän mukaan sähkömoottorin keskimääräinen kuormitus on ollut työajossa noin 43 Nm ja keskimääräinen kierrosnopeus noin 2100 rpm. Liitteessä 4 esitetyn taulukon perusteella täyssähköisen voimansiirron kokonaishyötysuhde on kyseisessä kuormituspisteessä noin 87 %.



KUVA 22. Testauspäivien energiankulutus ajoajan funktiona

Kuvassa 23 on esitetty keskimääräiset energiankulutukset ajoajan funktiona. Keskimääräisyydet on määritetty kuvassa 22 esitettyjen käyrien keskiarvosta. Energiankulutuksien tulisi olla samankaltaisia riippumatta voimansiirtojärjestelmästä, mikäli ajosuorite on molemmilla järjestelmillä samanlainen.



KUVA 23. Testauspäivien keskimääräinen energiankulutus ajoajan funktiona

Kuvassa 23 esiintyvä järjestelmien välinen eroavaisuus muodostuikin pitkälti siitä, että diesel-käytön mittauksien aikana satoi runsaasti lunta ja ajosuoritteeseen sisältyi paljon auraustyötä. Tällöin ajovastusteho on lumenvastuksesta johtuen suurempi kuin normaalissa työajossa. Sähköisen voimansiirron mittauksien aikaan lunta ei satanut, eikä ajosuoritteeseen sisältynyt auraustyötä käytännössä ollenkaan.

Kuvan 23 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että järjestelmistä määritetyt energiankulutukset työajossa ovat keskenään loogisia ajosuoritteisiin nähden.

Näin ollen voidaan todeta diesel-käytön energiankulutuksen määrittämisen onnistuneen alkuvaiheessa hyvin. Keväällä 2011 pyörätehosta määritetty 35 kWh:n maksimaalinen energiakulutus päivää kohti on lähellä totuutta, kun ajosuoritukseen sisältyy auraustyötä. Auraustyön vähentyessä myös energiankulutus vähenee.

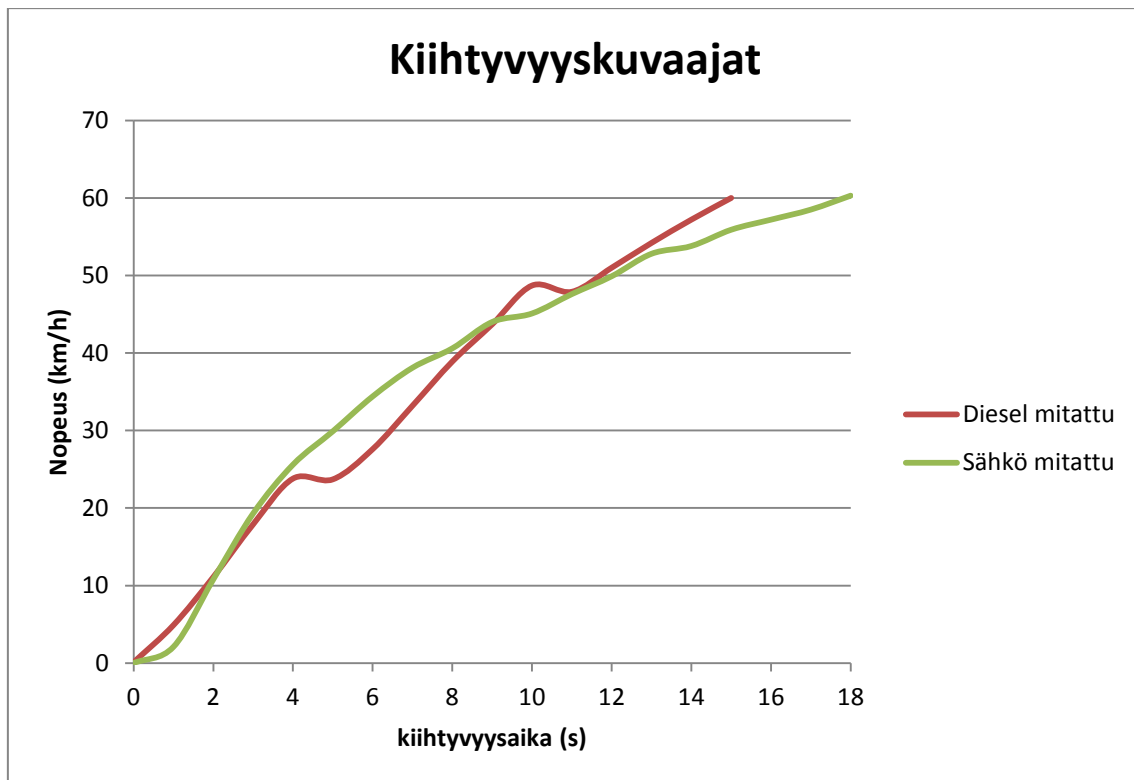
6.2 Suoritusarvojen vertailu

Voimansiirtojärjestelmien suoritusarvoja vertaillaan kiihtyvyyssajoilla. Kiihtyvyyssajat on mitattu kuivalla asfalttipinnotteella täyskaasukiihdytyksessä. Mittaus on suoritettu Motec-tiedonkeruujärjestelmään integroidulla GPS-mittalaitteella, joka tallensi GPS-paikkatiedon 10 Hz:n taajuudella. Mittauksissa diesel-käyttöisen Hiluxin massa oli noin 2 800 kiloa ja sähkökäyttöisen noin 2 400 kiloa. Taulukossa 8 on esitetty diesel- ja sähkökäytön kiihdytysajat.

TAULUKKO 8. Kiihdytysajat diesel- ja sähkövoimansiirtoin

Kiihdytysaika (s)		
km/h	Diesel	Sähkö
0-20	3,2	3,0
0-40	8,2	7,7
0-60	15,0	17,8

Kuvassa 24 on esitetty diesel- ja sähkökäytön kiihtyvyysskavaajat ajan funktiona. Diesel-käytöllä varustettuna Hilux kiihtyy 60 km/h loppunopeuteen 2,8 sekuntia sähkökäyttöä nopeammin. Matalampiin 20 km/h ja 40 km/h nopeuksiin sähkökäyttöinen Hilux kiihtyy diesel-käyttöä hieman nopeammin.



KUVA 24. Nopeudet ajan funktiona kiihdytettäessä

6.3 Käyttäjien palaute

Maaliskuun testiajoissa kerättiin Teklin ammattikuljettajilta palautetta täyssähköisen voimansiirron toiminnasta. Testikuljettajina toimivat Riitta Pennanen, Aila Paakkola ja Pirjo Österlund. Seuraavaksi on esitetty heidän ajatuksiaan järjestelmän toiminnasta (6):

- ”Hiljaisuus plussaa.”
- ”Helppo ja mukava tuntuma.”
- ”Sähköiselle Hiluxille olisi kysyntää helppokäyttöisyyden vuoksi.”
- ”Voiman puute lähdettäessä paikoiltaan vasten suurta kuormaa.”
- ”Kyllä kait tämä ois tämmöisenään jo valmis meille ajoon.”
- ”Jos nyt pitäisi valita, saattaisin ottaa jopa tämän vanhan tilalle.”.

7 YHTEENVETO

Hilux-sähkötyökoneprojektin tavoitteena oli muuttaa työkoneen alkuperäinen diesel-käyttöinen voimansiirtojärjestelmä täyssähkökäyttöiseksi. Projektin lopputuloksena valmistui opinnäytetöiden lisäksi toimiva sähkötyökoneen prototyyppi, joten tavoitteen voidaan katsoa onnistuneen.

Muutostyön perusideana oli optimoida täyssähköinen voimansiirto kunnossapitokäyttöön alkuperäisen diesel-käytön ajosuoritteen mittauksien perusteella. Diesel-käytön mittauksien perusteella määritetyt akuston energiasisällön ja sähkömoottorin suoritusarvojen vaatimukset onnistuivat sähkökäytön testiajojen perusteella hyvin. Tarkemmat diesel- ja sähkökäyttöjen väliset vertailumittaukset edellyttäisivät mittauksia identtisissä keliolosuhteissa. Tässä työssä tehdyissä mittauksissa keliolosuhteet eivät olleet järjestelmille samanlaiset.

Hilux-sähkötyökoneessa käytettävän Randax-moottoriin tehtiin työssä hyötysuhdemittaukset laajalta käyttöalueelta. Mittauksien pohjalta luodun hyötysuhdekartaston perusteella moottorin voidaan todeta olevan hyötysuhteeltaan erinomainen, kun moottoria kuormitetaan kentänheikennyspisteen alueella. Pienillä pyörintänopeuksilla moottorin hyötysuhde heikkenee.

Työn ja projektin aikana tehtiin runsaasti mittauksia liittyen ajovastuksiin, energiankulutuksiin, hyötysuhteisiin ja kiihtyvyyksiin. Mittauksien perusteella täyssähköinen voimansiirto on mahdollinen vaihtoehto diesel-käytölle. Kehittäjän kannalta parhaita mittauksia olivat kuitenkin käyttäjiltä saadut palautteet järjestelmän ajotuntumasta. Projektin alussa visioitiin täyssähköisen voimansiirron ominaisuuksien olevan kunnossapitokäytössä diesel-käyttöä paremmat. Visiointi osoittautui ammattikuljettajilta saadun palautteen perusteella oikeanlaiseksi.

LÄHTEET

1. Hilux-sähköautoprojekti. Suunnitelmavaihe. Loppuraportti. 2011. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.
2. Färm, Ray – Juntunen, Jarno 2011. Hilux-sähköautoprojekti. Suunnitelmavaihe. Loppuraportti. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. S. 8–22.
3. Kajula, Miika – Turunen, Juuso – Varis, Lassi 2011. Hilux-sähköautoprojekti. Suunnitelmavaihe. Loppuraportti. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. S. 23–43.
4. Juurikkala, Jussi 1981. Autotekniikan perusteet. Helsinki: Tammi.
5. Randax Oy 2013. Nestejäähdytys nostaa tehoa. Saatavissa: <http://www.randax.fi/fi/tuotteet/sahkokone/nestejaahdytys>. Hakupäivä 10.4.2013.
6. Hilux. Ajopäiväkirja. 2013. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö, autolaboratorio.

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Lassi Varis

Tilaaaja Randax Oy

Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot

Timo Schäfer, Konetie 33, 90620 Oulu, puh.044 734 6310

Työn nimi Dieselmoottorin korvaaminen täyssähköisellä voimansiirtojärjestelmällä Hilux-sähkötyökoneprojektissa

Työn kuvaus Työssä vertaillaan työkoneen alkuperäistä voimansiirtojärjestelmää sähkökäyttöön nähden. Työssä tullaan tarkastelemaan sekä diesel- että sähkökäytön hyötysuhteita. Lisäksi työssä vertaillaan kummankin järjestelmän energiankäyttöä sekä mitattavissa olevia suoritusarvoja kokeellisin menetelmin.

Työssä käydään läpi myös koko projektin eteneminen pääpiirteittäin.

Työn tavoitteet

Tavoitteena on selvittää miten täyssähköinen voimansiirtojärjestelmä korvaa alkuperäisen dieselikäytön suorituskykyä työkoneessa. Lisäksi työn tavoitteena on käydä läpi projektin eteneminen pääpiirteittäin. Yhteenvedona arvioidaan sekä täyssähköisen voimansiirtojärjestelmän onnistumista ja tavoitteiden saavuttamista kyseisessä työkoneessa että projektin onnistumista yleisestä näkökulmasta.

Tavoiteaikataulu

Opinnäytetyö aloitetaan tammikuussa 2012.

2012 kevätlukukauden loppuun menneessä vertailtavien asioiden suunnittelutyö olisi valmis.

2012 vuoden loppuun mennessä vertailtavista asioista tehtävät mittaukset olisivat valmiit.

Tavoite työn valmistumiselle on 2013 vuoden huhtikuun loppuun mennessä.

Päiväys ja allekirjoitukset

29.3.2012 Lassi Varis

2.4.2012 Timo Schäfer

