



VENEEN SÄHKÖPROPULSION SUORITUSKYVYN MITTAAMINEN

MEASURING THE PERFORMANCE OF AN ELECTRIC BOAT PROPULSION

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2024

Oliver Kuustonen

Tarkastaja: Markku Niemelä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Oliver Kuustonen

Veneen sähköpropulsioin suorituskyvyn mittaaminen

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2024

70 sivua, 7 kuvaa, 18 kuvaajaa ja 7 taulukkoa

Tarkastaja: Markku Niemelä

Avainsanat: pienaluksen sähköpropulsio, sähkövene, voimalinjan suorituskykymittaus

Työssä on mitattu ja dokumentoitu eräeseen uppoumarunkoiseen huviveneeseen asennettavan sähköpropulsiojärjestelmän suorituskyky. Lisäksi työhön liittyen on tehty teknologia-katsaus saatavilla olevista kaupallisista ratkaisuksista uppoumarunkoisen veneen työntövoimaa tuottavan järjestelmän, eli propulsioin sähköistämiseksi. Sähkökonversiot ovat varteen-otettava vaihtoehto erittäin hitaasti uudistuvan venekaluston propulsiojärjestelmien sähköistämiseksi. Hidaskulkuiset uppoumarunkoiset veneet taas ovat venetyyppinä helpoiten ja halvimalla sähköistettävissä.

Valmiita ratkaisuja huviveneiden sähköistämiseksi on tarjolla runsaasti. Sähkötekniisestä näkökulmasta toteutusvaihtoehtoja on useita ja voimalinjaketteja löytyy hyvin laajalla käyttöjännitealueella. Myös voimalinjaratkaisuissa käytettäviä sähkökonetyyppejä on useita ja esimerkiksi sähkökoneen jäähdytyksen toteutustapa vaihtelee. Todennäköisesti useimmat erilaiset ratkaisuvaihtoehdot täyttävät loppukäyttäjän näkökulmasta samat perustarpeet hiljaisesta ja energiatehokkaasta voimalinjasta.

Varsinaiset mittaukset suoritettiin testipenkissä laboratorio-olosuhteissa, missä voimalinjan kuormitusta mallinnettiin taajuusmuuttajaohjatulla kuormakoneella. Mittauksen kohteen oli Vetus E-Line 075 -sähkövoimalinjaketti, joka taajuusmuuttajaohjatulla nestejäähdytetyllä pienoisjännitteisellä oikosulkukoneella varustettuna edustaa melko perinteistä lähestymistapaa. Mittaustulokset osoittivat voimalinjan toimivan pääasiassa valmistajan ilmoituksen mukaisesti. Sähkövoimalinjan hyötysuhde oli odotetusti korkea ja toiminta myös erilaisissa ääritilanteissa pääosin odotettua. Tässä työssä on tarkasteltu sähkövoimalinjan suorituskyvyn lisäksi myös aluksen kokonaissuorituskykyä, mikä riippuu huomattavasti käytetystä energiavarastosta, veneen rakenteesta ja potkurin mitoituksista.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Oliver Kuustonen

Measuring the performance of an electric boat propulsion

Bachelor's thesis

2024

70 pages, 7 figures, 18 charts and 7 tables

Examiner: Markku Niemelä

Keywords: small craft electric propulsion, electric boat, driveline performance analysis

The performance of an electric propulsion for a certain low-speed leisure craft has been measured and documented for this bachelor's thesis. Additionally, there is a technical look-out for different electric propulsion systems for low-speed crafts available on the market today. Electric conversions are especially interesting in the boating sector where the asset lifetimes are typically very long. Especially here in Finland, it isn't uncommon to see leisure boats over forty years old to be still used. Low-speed displacement hulls are the easiest application for electric conversions due to comparably low power and energy needs.

There are many readymade solutions for electrifying slow-speed boats. From the electrical engineering point of view, there are several different technical options that vary for example by the supply voltage level or the basic electrical machine design. There are also different cooling methods being used. Different designs should all be capable of meeting the basic requirements of a quiet and efficient driveline.

The measurements were made on a test bench in a laboratory environment where the load was simulated using a frequency converter-controlled loading machine. The driveline being measured was Vetus E-Line 075 which consists of an extra-low voltage induction machine, a frequency converter, an electronic control lever, an indicator panel, and a liquid water cooling. The combination is somewhat classic without any extremely new and fancy technology. The product has already been on the market for several years.

The results were mostly as expected. The driveline fulfilled the promises given by the manufacturer. Energy efficiency was as good as expected and the behavior on special operating points like low voltage or high load was unsurprising. Also, the overall vessel performance was studied, which in real-world usage scenarios, depends a lot on the boat's properties, like structural design and propeller design.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AC	vaihtovirta
DC	tasavirta
DoD	akun purkauksen syvyys prosentteina (Depth of Discharge)
VAC	vaihtojännite, voltteina
VDC	tasajännite, voltteina
CAN	automaatioväylä, (Controller Area Network)
LCOS	varastoidun energian vertailuhinta (Levelized Cost of Storage)
RMS	tehollisarvo (Root Mean Square)
WPC	akun teho, wattia per kenno (Wats per Cell)

Suureiden tunnukset

<i>E</i>	energia
<i>I</i>	virta
<i>M</i>	massa
<i>P</i>	teho
<i>t</i>	aika
<i>U</i>	jännite
<i>v</i>	nopeus

Yksiköt

s	ajan yksikkö, sekunti
rpm	kulmanopeuden yksikkö, kierrosta minuutissa ($1 \text{ rpm} = (\pi/30) \text{ rad/s}$) vaihtoehtoisesti käytetty termejä pyörimisnopeus tai kierrosnopeus
A	ampeeri, virran yksikkö
V	voltti, jännitteen yksikkö
W	watti, tehon yksikkö
J	joule, energian ja työn yksikkö ($1 \text{ J} = 1 \text{ W/s}$)
Nm	newton-metri, vääntömomentin yksikkö
S/s	näytettä sekunnissa (Samples per Second), näytteenottotaajuuden yksikkö
kn	nopeuden yksikkö, merimailia tunnissa, solmu (knot), ($1 \text{ kn} = 1,852 \text{ km/h}$)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1	Johdanto.....	7
2	Sovelluskohde.....	8
2.1	Vetus E-line 075 -sähkövoimalinja	8
2.1.1	Jäähdytysjärjestelmä.....	9
2.1.2	Valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot.....	10
2.2	Harjoitusalus-Jopi.....	11
2.2.1	Runkotyyppi ja tehon tarve	11
2.2.2	Energiavarasto	13
3	Teknologiakatsaus	16
3.1	Käyttövoimana sähkö	16
3.2	Energiavarasto	17
3.3	Ohjeet ja standardit.....	18
3.4	Aluksen rakenne ja runkomuoto.....	19
3.5	Voimansiirto	19
3.6	Potkuri	20
3.7	Sähköistämiskäytöjen jaottelu	20
3.7.1	Pienisjännitteiset vaihtosähkökoneet.....	21
3.7.2	Pienisjännitteiset tasasähkökoneet.....	22
3.7.3	Pienjännitteiset vaihtosähkökoneet	23
3.8	Markkinoiden kehittyminen	23
4	Mittaussuunnitelma	25
4.1	Mittausasettelu.....	25
4.1.1	Mitattava sähkökäyttö	25
4.1.2	Mitattavat suureet	26
4.1.3	Käytetyt mittalaitteet ja muu laitteisto	27
4.2	Tehtävät mittaukset	29

4.3	Testiajot ja järjestelmään tutustuminen	30
5	Mittaukset	33
5.1	Kuormakoneen profilointi	33
5.2	Ensimmäinen mittaussarja – suorituskyyky Normal-tilassa.....	35
5.3	Toinen mittaussarja – suorituskyyky Power-tilassa	39
5.4	Kolmas mittaussarja – suorituskyyky Eco-tilassa	42
5.5	Mittaussarjat neljä ja viisi – teholähteenä akusto	45
5.6	Kuudes mittaussarja – tunnin mittainen ajo akustolla.....	48
5.6.1	Akuston kapasiteetti	49
5.6.2	Voimalinjan toiminta.....	50
5.6.3	Hyötysuhde.....	51
5.7	Mittaus 7 – tunnin mittainen ajo laturilla tuetulla akustolla.....	52
5.7.1	Toiminta-aika	52
5.7.2	Hyötysuhde.....	53
5.8	Mittaus 8 – vajaa akusto	54
5.9	Mittaus 9 – käynnistymismomentti Normal-tilassa.....	55
5.10	Mittaus 10 – käynnistymismomentti Power-tilassa.....	55
5.11	Mittaus 11 – tunnin mittainen ajo toistettuna	56
5.12	Mittaus 12 – voimalinjan ääri- ja rajatilanteet.....	57
5.12.1	Ensimmäinen mittaus, jänniterajojen hakeminen.....	57
5.12.2	Toinen mittaus, jänniterajojen hakeminen jatkuu	58
5.12.3	Kolmas mittaus, jänniterajojen hakeminen jatkuu, suurempi teho.....	59
5.12.4	Neljäs mittaus, jänniterajojen tarkastaminen.....	60
5.12.5	Viides mittaus, propulsioon huipputeho.....	60
5.12.6	Kuudes mittaus, aluksen pysäyttäminen.....	61
6	Yhteenvedo ja johtopäätökset	64
6.1	Potkurin mitoittamiseen tarvittavat tiedot	64
6.2	Toiminta-aika ja akusto	65
6.3	Käyttäytyminen ääritilanteissa	66
6.4	Yhteenvedo.....	66
	Lähteet.....	68

1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä käsitellään vesiliikenteen sähköistymisen edellyttämää teknologiaa erään esimerkkivoimalinjan suorituskykyanalyysin muodossa. Työn tarkoituksena oli tehdä suorituskykymittaus pienehkön akselivetoisen huviveneen sähkövoimalinjalle ja dokumentoida sekä analysoida saadut tulokset. Lisäksi työssä on luotu katsaus esimerkin kaltaisen aluksen sähköistämiseksi markkinoilla tarjolla oleviin teknisiin ratkaisuihin.

Vedessä kulkeminen vaatii jatkuvaa työntövoimaa, eikä varsinaisia alamäkiä ole. Energiankulutus matkayksikköä kohden kasvaa vesiliikenteessä usein suureksi, myös pienillä aluksilla. Huvialusten sähköistymistä jarruttaa kaluston matala käyttöaste, joka rajoittaa taloudellisesti järkeviä sähköistämiskohteita. Myös huvivenekaluston uusiutuminen on verrattain hidasta, mikä toisaalta tekee juuri sähkökonversioista erityisen mielenkiintoisia.

Tutkimuksessa analysoidaan sähkövoimalinjaa pääasiassa sen käyttökokemuksen näkökulmasta. Analyysi pureutuu voimalinjan suorituskykyyn, hyötysuhteeseen sekä toimintaan erityistilanteissa, kuten akuston tyhjentyessä tai potkuriakselin jumiutuessa. Tutkimuksessa havaittiin sähkövoimalinjan toimivan pääosin odotetusti, eli voimalinjan hyötysuhde on korkea ja suorituskyky luvatus mukainen. Myöskään toiminta poikkeustilanteissa ei herätä erityisiä huolenaiheita.

Sähkövoimalinjan suorituskykyprofiili eroaa tutummista polttomoottoriverrokeistaan, mistä kertoo jo se, että nimellisteholtaan 11,4 hevosvoiman sähkökonetta markkinoidaan 16-hevosvoimaisen polttomoottorin korvaajana. Teho-, vääntö- ja hyötysuhdekäyrät eivät ole polttomoottoreiden kanssa samankaltaisia, mikä on tarpeen huomioida aluksen voimalinjan ja erityisesti potkurin mitoituksessa.

Työssä pyritään avaamaan sähkövoimalinjan toimintaa sen mitoittamisen sekä loppukäyttäjän kannalta olennaisten ominaisuuksien osalta. Vastaako voimalinjan toiminta valmistajan ilmoittamia arvoja? Täyttääkö toiminta veneilijän tarpeet? Toisessa luvussa esitellään mittauksen kohtaan oleva voimalinja sekä Jopi-alus, kolmannessa luvussa luodaan teknologia-katsaus, minkä jälkeen esitellään mittausjärjestely sekä viidenteen lukuun sijoittuvat mitaukset. Viimeisessä luvussa on tutkimuksen johtopäätökset ja yhteenveto.

2 Sovelluskohde

Mittauksen kohteena on *Vetus*-merkkinen valmiina pakettina myytävä sähkömoottori, joka on hankittu asennettavaksi meripelastuksen harjoitusaluksena toimivaan vanhaan Jopi-hinaajaan. Tässä sähkömoottorilla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka korvaa vanhan dieselmoottorin apulaitteineen, virallisemmin kokonaisuutta kuvaamaan voidaan käyttää myös termiä sähkökäyttö. *Vetus E-line 075* -sähkömoottori sisältää itse sähkökoneen sekä samoihin kuoriin integroidun taajuusmuuttajan ja hallintalaitteet sekä merkkivalopaneelin. Tarvittava energiavarasto ja laturi hankittiin erikseen.

2.1 *Vetus E-line 075* -sähkövoimalinja

Vetus on pitkän historian omaavana globaalina toimijana yksi tunnetuimmista venejärjestelmien toimittajista. Alkujaan satamakaupunki Rotterdamissa perustettu myyntiyhtiö on kasvanut monialaiseksi toimijaksi ja tunnetuksi brändiksi. [1] *Vetus*ksen ratkaisu valikoitui käyttötarkoitukseensa sekä sitä myöten mittauskohteeksi muun muassa hyvän maineen, pitkän takuun, teknisten ominaisuuksien sekä hinnoittelunsa ansiosta. Jopiiin haluttiin uuden ja ihmellisen sijaan koeteltua tekniikkaa.

Vetus E-line -sarjan sähkövoimalinja perustuu taajuusmuuttajaohjattuun vaihtosähkökoneeseen. Voimalinjaketille syötetään tasasähköä 48 voltin nimellisjännitteellä, tyypillisimmillään suoraan akustosta, ja tasasähkö muunnetaan sähkökonetta varten vaihtosähköksi voimalinjakettiin kuuluvalla taajuusmuuttajalla. Koneen pyörimisnopeutta säädetään muuttamalla vaihtosähkön taajuutta, mistä tuleekin termi taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajan logiikalle annetaan hallintalaitteen avulla toimintaohjeita. Järjestelmän sisäinen tietoliikenne on toteutettu *Vetus V-CAN* -väyläratkaisulla, joka perustuu pohjimmiltaan standardoituun ja ajoneuvoissa yleiseen CAN-väylään [2].

2.1.1 Jäähdytysjärjestelmä

Taajuusmuuttajan ja varsinaisen sähkökoneen sekä hallintalaitteiston lisäksi järjestelmä sisältää jäähdytyslaitteiston, eli liitännät kiertävälle jäähdytysvedelle sekä koneeseen integroidun jäähdytyspuhaltimen. Propulsion jäähdytysjärjestelmä on ilma- ja nestejäähdytyksen yhdistelmä. Lisäksi tarvitaan jäähdytysvedelle ulkoinen kiertopumppu ja lämpövarasto, johon voimalinjan tuottama hukkalämpö siirretään. Käytännössä lämpövarastona toimii aina lopulta vesistö, ja vaihtoehtoina ovat avoimen sekä suljetun kierron järjestelmät.

Avoimen kierron järjestelmässä voimalinjaan pumpataan suoraan meri- tai järvivettä, joka palautuu lämmenneenä takaisin vesistöön. Menetelmä on tehokas ja yksinkertainen, mutta haittapuolena on vedessä olevien epäpuhtauksien tai mahdollisen jään kertyminen järjestelmään. Myös jäähdytysjärjestelmän korrosio voi osoittautua ongelmaksi avoimen kierron järjestelmässä, jossa sitä ei voida torjua jäähdytysnesteen lisäaineistuksella. Tukkeumia ja järjestelmän likaantumista ehkäistään usein meriveden suodatuksella. Mittausasettelussa simuloidaan avoimen kierron järjestelmää puhtaalla vesijohtovedellä.

Suljetun kierron järjestelmä, jollainen on tulossa myös voimalinjan lopulliseen käyttökohteeseen, perustuu nimensä mukaisesti jäähdytysnesteen suljettuun kiertoon erillisen nestesäiliön ja voimalinjan välillä. Tällaisesta järjestelmästä käytetään usein nimitystä kölitankki-jäähdytys. Hukkalämpö siirtyy kölitankista teräsrungon läpi johtumalla ympäröivään vesistöön. Suljettu kierto mahdollistaa pakkasenkestävän sekä korroosiota ehkäisevän jäähdytysnesteen käyttämisen.

Toinen mahdollinen tapa suljetun kierron toteuttamiselle on erillisen lämmönvaihtimen käyttäminen. Lämmönvaihdin voi puolestaan olla ilma tai vesijäähdytteinen. Ilmajäähdytystä tehostetaan yleensä puhaltimilla, kun taas nestejäähdytyksessä lämmönvaihdinta jäähdytetään useimmiten avoimella merivesikierrolla. Dieselkoneiden kanssa käytetään kaikkia kolmea jäähdytysjärjestelmävaihtoehtoa, joista nykyään huviveneissä selvästi yleisin on suljetun kierron yhdistäminen lämmönvaihtimeen, joka puolestaan jäähdytetään avoimella merivesikierrolla.

On oleellista huomata, että sähkökoneen erittäin hyvän hyötysuhteen takia tarvittava jäähdytysteho on vastaavaan polttomoottorivoimalinjaan verrattuna hyvin pieni. Jos tuotetaan *E-line 075*:n nimellinen 8,5 kW:n akseliteho sähkökoneelle tyypillisellä 80 % hyötysuhteella

on jäädytettävä lämpöteho vain noin 2,1 kW. Jos sama akseliteho tuotettaisiin erinomaisella 50 % hyötysuhteella varustetulla polttomoottorilla, olisi jäädytettävä lämpöteho jo noin nelinkertainen 8,5 kW.

2.1.2 Valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot

Vetuksen voimalinjakettiin kuuluva taajuusmuuttaja sisältää myös DC-DC-muuntimen, joka mahdollistaa 48:n voltin ajoakuston lataamisen paremmin saatavilla olevilla 24:n voltin akkulateureilla. Vaikuttaa tosin siltä, että 48:n voltin teknologia yleistyy ajoneuvoissa ja muissa off-grid-ratkaisuissa. Tällä hetkellä esimerkiksi latauslaitteita on jo hyvin saatavilla, niinpä Jopiinkin tulee suoraan 48 voltin laturi. Myös autoteollisuudessa 48 voltia korvannee aikanaan 12 voltin järjestelmät mahdollistaen paremman hyötysuhteen ja kevyemmän kaapeloinnin [3]. Vetuksen hallinta- ja ohjauslaitteiden tarvitsema 12 voltin tasavirta syötetään järjestelmään virtalukon kautta erillisestä 12 VDC -lähteestä.

Voimalinjan valmistaja Vetus markkinoi tuotteensa olevan soveltuva sekä vaihtokoneeksi että uusiin veneisiin ja voimalinjakäytön kehutaan mahdollistavan hiljainen sekä ympäristöystävällinen veneilykokemus. Myös voimalinjan dynaamisen kyvykkyyden kehutaan mahdollistavan erityisen hyvän veneen hallinta. [4] Kaikkiaan valmistaja ilmoittaa *Vetus E-line 075* -sähkövoimalinjalta taulukkoon 1. kootut tekniset ominaisuudet.

Taulukko 1. Vetus E-line 075 tekniset ominaisuudet, lähde: Vetus [5]

Ominaisuus	Arvo
Suurin pyörimisnopeus	1 500 rpm
Nimellisjännite	48 V
Paino	69 kg
Suurin ottovirta	220 A
Suurin antoteho	8,5 kW
Koneen tyyppi	Harjaton induktio
Suurin vääntömomentti	60 Nm
Polttomoottoriverrokki	16 hv (11,93 kW)
Aluksen suositeltava enimmäispituus	9 m
Aluksen suositeltava enimmäisuppouma	5 000 kg

2.2 Harjoitusalus-Jopi

Sähköistämisen kohteena on Jopi-niminen Suomen Meripelastusseura Etelä-Saimaa ry:n omistuksessa oleva ja harjoitusaluksena käytettävä 7,5 m pitkä teräsrakenteinen vanha hinaaja. Ominaisuuksiltaan Jopi vastaa pientä hidaskulkuista huvivenettä ja onkin palvellut myös sellaisena ennen päätymistään meripelastuksen käyttöön. Alus on rakennettu 1960-luvulla Rauma-Repolan telakalla Savonlinnassa. Kuvassa 1. Jopi on ankkuroituna sen keulakannelle sijoitetun nestekaasukäyttöisen palosimulaattorin ollessa käytössä.



Kuva 1. Sähköistämisen kohde, harjoitusalus-Jopi (Toni Kolhonen 2017)

2.2.1 Runkotyyppi ja tehon tarve

Jopi on runkotyypiltään uppoumarunkoinen, eli se on tarkoitettu kulkemaan korkeintaan, vesilinjan pituudesta määräytyvää, niin sanottua runkonopeutta. Tällöin alus syrjäyttää kulkiessaan jatkuvasti uppoumansa verran vettä. Aluksen rakenne akselivetoisena ja levyperäsimellä sekä perinteisellä kölillä ja kalaraudalla varustettuna on hidaskulkuiselle alukselle

tyypillinen. Käytännössä lähes kaikki pienet laivat ja hidaskulkuiset uppoumarunkoiset veneet noudattelevat samaa perusrakennetta. Rakenteen etuna on sen kestävyys ja yksinkertaisuus sekä verrattain pieni kulkuvastus hitailla ajonopeuksilla.

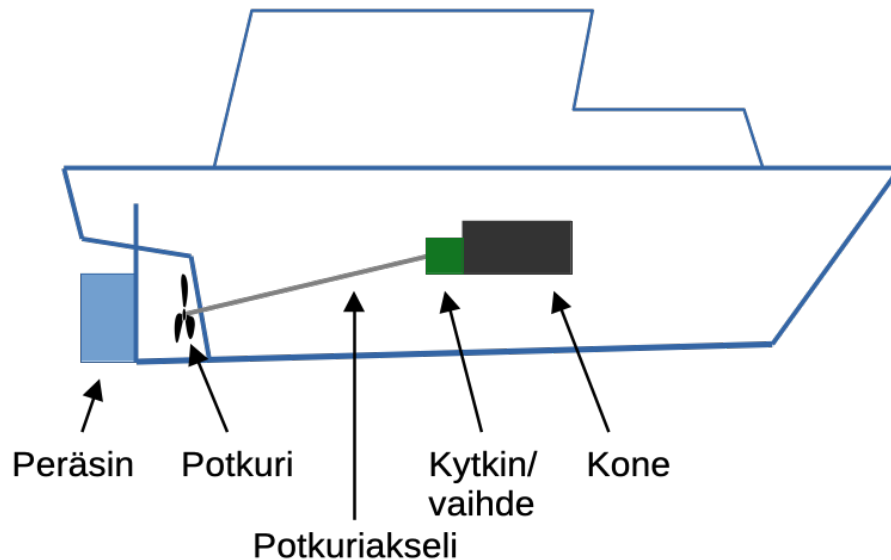
Jopin huippunopeus entisellä dieselmoottorilla oli noin 6 solmua (11 km/h). Tällöin alus painui jo varsin syväälle keula- ja peräaaltonsa väliin. Sähkövoimalinjalla tavoiteltava huippunopeus onkin tässä sovelluskohteessa mielekästä rajata aluksen niin sanottuun runkonopeuteen. Veneen runkonopeudelle on esitetty muun muassa seuraava funktio [6].

$$v = 1,35 * \sqrt{\text{vesilinjan pituus jalkoina}} \quad (1)$$

Jopin vesilinjan pituudeksi voidaan arvioida 23 jalkaa (7 m), jolloin runkonopeudeksi saataisiin 6,5 solmua (12,0 km/h). Myös runkonopeuden ylittäminen on mahdollista, mutta tällöin tehon tarve ja sitä myöten energiankulutus kasvavat jyrkästi [6]. Karkeasti yli kaksinkertaiseen runkonopeuteen kykeneviä aluksia voidaan pitää niin sanotusti puoliliukuvina ja yli kolminkertaiseen runkonopeuteen kykeneviä liukuvina. Myös näiden runkomuodot eroavat Jopin tyypillisestä uppoumarungosta. Nopeusluokan kasvaessa erityisesti suiposta ja pyöreästä perästä siirrytään kantavampaan ja kulmikkaampaan niin sanottuun tasaperään.

Kuvassa 2. on esitetty periaatekaavio akselivetoisen hidaskulkuisen veneen tyypillisestä rakenteesta. Kuva vastaa karkeasti myös esimerkin Jopi-alusta. Oleellista on hahmottaa koneen sijainti likimain aluksen keskellä, mikä edellyttää suhteellisen pitkän potkuriakselin käyttämistä. Periaatekuvassa kone-kytkin-paketti on asennettu vaakasuoraan akselin viettäessä alaviistoon. Tämä on mahdollista, jos rakenteessa käytetään soveltuvaa nivelakselia.

Yleensä pyritään suoraan akselilinjaan, jonka suuntaisesti kone asennetaan, jolloin nivelakselia ei tarvita. Näin rakenteesta saadaan hieman yksinkertaisempi ja yksi mekaanisia häviöitä aiheuttava komponentti jää pois. Jäykkä akselilinja on myös edellytys sähkökoneeseen sisäänrakennetun painelaakerin hyödyntämiselle. Jopissa sähkökone asemoidaan entistä dieselkonetta edemmäs, jotta tasainen lattiatila saadaan maksimoitua. Myös nivelakseli säilytetään ja sen etupuolelle vaihdetaan uusi pidempi akseli.



Kuva 2. Periaatekuva akselivetoisen aluksen rakenteesta

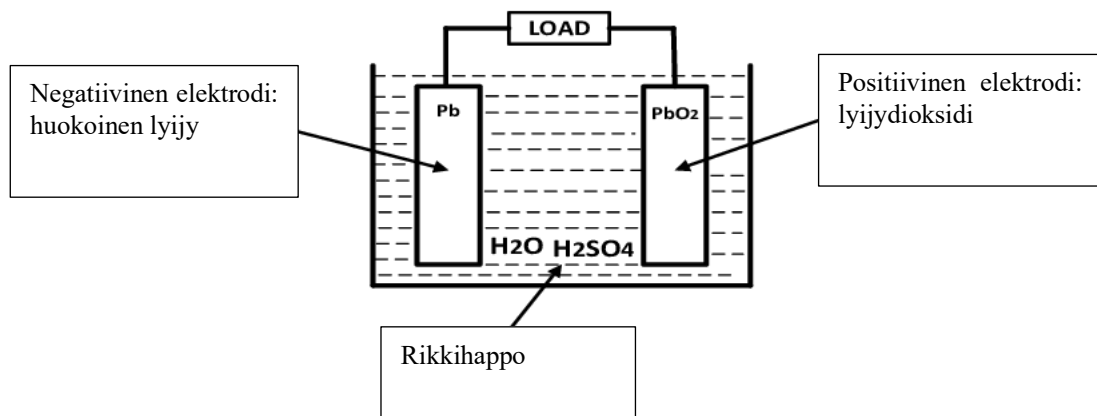
2.2.2 Energiavarasto

Energiavarastona kyseisessä sovelluksessa tullaan käyttämään AGM-tyypin suljettuja lyijy-akkuja. Lyhenne AGM tulee sanoista *absorbent glass mat*, mikä tarkoittaa elektrolyytin olevan imeytettynä lasikuitumattoon. Näin elektrolyytistä saadaan nestemäiseen verrattuna stabiilimpi, eivätkä akut esimerkiksi vuoda kallistettaessa [7, s. 87]. Lyijyakit valittiin sovelluskohteeseen ensisijaisesti niiden edullisen hankintahinnan takia. Lyijyakkujen suhteessa pieni syklikestävyys ei ole ongelma sovelluskohteessa, jossa purkaussykliit ovat tyypillisesti lyhyitä ja niitä tulee harvoin. Suurimman osan ajasta alus seisoo laiturissa akusto täyteen ladattuna.

Lyijyakkujen spesifinen energia, eli energiasisältö painoyksikköä kohden, on huono ja tässäkin tapauksessa vain noin 42 Wh/kg [8], mikä ei kuitenkaan ole ratkaisevaa jo muutenkin painavassa ja hidaskulkuisessa aluksessa. Lyijyakkujen eduiksi voitaneen lukea teknologian hyvä yhteensopivuus, maturiteetti, edullinen hankintahinta ja turvallisuus. Vaikka lyijyakit voidaan kierrättää tehokkaasti, pyrkii muun muassa EU niistä eroon, juuri akkujen sisältämän raskasmetalli-lyijyn takia [9].

Lyijyhappoakun (lead acid battery) historia juontaa juurensa aina vuoteen 1859, kun ranskalainen fyysikko Gaston Planté kehitti teknologian. Lyijyhappoakku oli samalla ensimmäinen kaupallisesti käytetty uudelleen ladattava akku (secondary battery). [7, s. 78] Paristoja oli ollut käytössä jo pidempään. Lyijyhappoakku on edelleen yleisesti käytetty teknologia sen ollessa luotettava ja tehoonsa nähden halpa [7, s. 78]. Suljetut lyijyakut, eli VRLA-akut (valve regulated lead acid), joihin myös AGM-akut kuuluvat, perustuvat edelleen samoihin sähkökemiallisiin reaktioihin, kuin Planté:n akku.

Kaikkien sähkökemiallisten akkujen toiminta perustuu hapetuspelkistysreaktioihin. Akun positiivista napaa, eli elektrodia, kutsutaan katodiksi ja negatiivista elektrodia anodiksi. Elektrodien välissä on elektrolyytti sekä erotin. Elektrolyytti toimii katalyyttinä mahdollistaen ionien liikkumisen akussa. Erotin taas estää elektronien läpikulun, mutta läpäisee samalla ioneja. [7, s. 56] Lyijyakun yhden kennon rakenne on esitetty yksinkertaistettuna seuraavassa periaatekuvassa.



Kuva 3. Lyijyakun rakenne (CC BY-NC 4.0 DEED [10], kuvatekstit käännetty)

Lyijyakun katodimateriaali on lyijydioksidi, anodimateriaali huokoinen lyijy ja elektrolyyttinä on rikkihappo. Akun ollessa täyteen ladattu, rikkihappo on väkevää ja vastaavasti varauksen ollessa purettuna jäljellä on hyvin heikko happo, joka voi esimerkiksi päästä jäätymään. Tyhjän lyijyakun negatiivisella elektrodilla lyijystä muodostuu lyijysulfaattia. [7, s. 57]

Kyseisessä sovelluskohteessa olisi hyvä huomioida ainakin seuraavat *Batteries in a Portable World* -kirjassa mainitut lyijyakkujen käyttöikään vaikuttavat seikat. Akusto tulisi ladata rauhassa täyteen saakka vähintään parin viikon välein, ellei tällaista neljästätoista kuuteentoista tuntia kestävästä latausta voida järjestää jokaisen syklin päätteeksi. Myös kohtuullinen käyttölämpötila, syväpurkausten välttäminen ja lataaminen mahdollisimman usein sekä pian pidentävät akuston käyttöikää.



Kuva 4. Jopin neljä suljettua AGM-akkua testikytkennässä laboratoriossa

Jo käyttöönottoaiheessa tulee huomioida laturin oikeiden asetusten tarkistaminen. Oleellista on, että kellutusjännite (float voltage) säädetään kennotasolla 2,25 ja 2,30 V:n välille. Myös jännitteen lämpötilakompensointi voi olla tarpeen. Varsinainen absorptiolatausjännite (absorption voltage) voi AGM-akuilla olla myös perinteisille lyijyhappoakuille tyypillinen 2,4 V kennoa kohden tai jopa hieman enemmän. [7, s. 88]

3 Teknologia katsaus

Lähtökohta akselivetoisen uppoumarunkoisen huviveneen sähköistämiseksi on polttomoottorin korvaaminen sähkökäytöllä. Sähkökäytön lisäksi tarvitaan energiavarasto, useimmiten akusto, jota voidaan tarvittaessa täydentää generaattorilla. Sähkökäyttö aluksen voimanlähteenä on vanha ja koeteltu keksintö. Ensimmäiset akkusähköiset alukset tunnetaan jo 1800-luvun loppupuolelta. Sähköinen propulsio yhdistettynä polttomoottorigeneraattoriin sen sijaan esiteltiin varhain 1900-luvun alkupuolella. [11] [12] Dieselsähköisiä laivoja on rakennettu Suomessakin esimerkiksi jäänmurtajiksi jo reilusti yli 60 vuotta [13]. Akkusähköiset veneet sen sijaan tekevät vasta nyt uutta tuloaan sitten 1800-luvun lopun.

3.1 Käyttövoimana sähkö

Perinteisessä dieselsähköpropulsiossa aluksen dieselkäyttöiset pääkoneet tuottavat voimalinjan tarvitseman sähkön, eli käytännössä pyörittävät sähköä tuottavia generaattoreita. Generaattori voikin olla esimerkiksi tällainen, jossain määrin perinteinen, polttomoottorigeneraattori, sähköä tuottava polttokenno tai aurinkopaneeleista ja lataussäätimestä koostuva järjestelmä. Mahdollisuus voimalinjaa ajomoottorilla jarruttamalla tapahtuvaan regeneraatioon, kuten sähköautoissa, on käytännössä hyödynnettävissä ainoastaan purjealusissa.

Järjestelmä, joka ei sisällä generaattoria, vaatii aina jonkin ulkoisen sähköenergian lähteen. Tilanne on täysin verrattavissa sähköautoihin, jotka tyypillisesti ladataan verkkosähköllä tarkoitusta varten tehdyn latauslaitteeksi kutsutun liitäntälaitteen avulla. Nykyaikaiset sähköautot voidaan ladata myös suoraan akustolle syötettävällä tasavirralla, jolloin tarvitaan varsinaisen laturin ja sen tarvitseman tehoelektronikan sisältävä latausasema. Sähköveneiden latausratkaisut noudattelevatkin pitkälti autoteollisuuden näyttämää mallia ja maailmalta löytyy jo esimerkkejä ensimmäisistä veneille tarkoitetuista julkisista latausasemista [14].

Vaikka varsinaiset sähköveneiden latausasemat ovat vielä harvinaisuus, on monessa satamassa jo nykyään mahdollisuus liittää alus sähköverkkoon. Satamissa aluksia varten tarjolla olevasta sähköstä käytetään yleensä nimitystä maasähkö. Maasähkön avulla voidaan pitää

esimerkiksi jääkaappi kylmänä ja niin sanotut hupiakut ladattuina. Myös pienehkön sähköveneiden propulsioakut voidaan ladata samalla tavalla, kunhan huolehditaan sähköenergian oikeudenmukaisesta mittauksesta ja laskutuksesta. Tällainen lataaminen on luokiteltavissa sähköajoneuvojen lataustavoista yleisesti käytetyn luokittelun mukaan niin sanottuun lataustapa 1 eli *mode 1* -lataukseen [15].

3.2 Energiavarasto

Täyssähköinen alus tarvitsee toimiakseen sähköenergiavaraston, tyypillisimmillään akuston. Jopiiin valittu suljetuista lyijyakuista koostuva varasto on mitoitettu kyseisen sovelluskohteen erityiseen tarpeeseen. Jopin kohdalla tavoiteltava noin tunnin ajoaika, ei todennäköisesti palvele tyypillistä veneilijää, eikä lyijyakkuihin perustuva ratkaisu ole tällöin edes teknistaloudellisesti järkevä.

Mitoitettaessa aluksen energiavarastoa tulee aluksen ja sen voimalinjan teknisten ominaisuuksien lisäksi huomioida aiottu käyttötarkoitus. Millainen matka aluksella tulee kyetä suorittamaan? Missä olosuhteissa ja millä nopeudella matkasta on selvittävä? Laskennallisen kapasiteettitarpeen lisäksi on huomioitava varakapasiteetti, sillä turvallinen veneily perustuu aina monitasoiseen varautumiseen, jolla matkan keskeytyminen pyritään viimeiseen saakka välttämään. Käyttövoiman loppuminen kesken merimatkan aiheuttaa aina vähintään vaaratilanteen.

Käytettäessä lyijyakkuja suositeltu purkauksen syvyys (depth of discharge, DoD) on aina alle 100 %, tyypillisesti 50–80 %, mikä antaa luonnostaan kohtuullisen varakapasiteetin, kunhan voimalinjan jänniterajat huomioidaan. Sähkö- ja vene -oppaassa mitoituserusteena AGM-akuille on käytetty 50 % nimelliskapasiteetista ja vastaavasti litiumakuille 90 % [16, s. 31]. Oppaassa kehoitetaan erityisesti suurten järjestelmien kohdalla huomioimaan myös akuston lämpötilan valvonta ja hallinta [16, s. 31].

Akkuteknologioita vertailtaessa on oleellista huomata kaikkien teknologioiden olevan lopulta eri tavoin painotettuja kompromisseja. Tästä ajatuksesta on syntynyt vapaasti suomennettu käsite kahdeksankulmainen akku (octagon battery). Hyvällä akulla on oltava vähintään seuraavat kahdeksan ominaisuutta: korkea spesifinen energia (kapasiteetti painoyksikköä kohden), korkea spesifinen teho (teho painoyksikköä kohden), halpa hinta, pitkä käyttöikä,

turvallinen käyttää, laaja käyttölämpötila-alue, alhainen myrkyllisyys ja hyvä latauskyky. [7, s. 50]

Tällä hetkellä lähimpänä ihanneakkua ovat erilaiset litiumpohjaiset akkukemiat, joiden keskuudesta sovelluskohde silmällä pitäen erottuu edukseen litiumrautafosfaattiteknologia (Li-FePO₄ tai LFP). Litiumrautafosfaattiakuilla on moneen muuhun litiumkemiaan verrattuna alhaisempi spesifinen energia, mutta akut ovat muun muassa keskimääräistä halvempia ja turvallisempia sekä erittäin pitkäikäisiä [17]. Jää nähtäväksi, lunastavatko natriumioniakut (sodium ion battery) lupauksensa LFP:n halvempiana ja litiumvapaana korvaajana.

3.3 Ohjeet ja standardit

Venesähköt ovat olleet veneilypiireissä tyypillisesti kiivas puheenaihe. Yleisesti käytetyn kahdentoistavoltin pienoisjännitteen mahdollistamat tee-se-itse-ratkaisut ovat yleisiä ja laatu kirjavaa, myös tehdastekoisissa asennuksissa. Kun sähkö on aluksessa niin sanotun hupisähkön roolin sijaan myös käyttövoimana, kasvavat virrat ja akkujen kapasiteetti viimeistään tässä vaiheessa esimerkiksi paloturvallisuuden näkökulmasta merkittäviksi ja laadun merkitys korostuu entisestään.

Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistämiskeskus STEK julkaisee vapaasti saatavilla olevaa *Sähkö ja vene* -opasta, joka päivittyi viimeksi vuonna 2022 [18]. Opas on suunnattu veneilijöille, eikä niinkään veneiden parissa työskenteleville ammattilaisille. Sisältö on yleistajuista, mutta tarkempia, esimerkiksi kokonaisen veneen sähköjärjestelmän suunnitteluun vaadittavia, yksityiskohtia vain sivutaan. Sähköiset propulsiojärjestelmät on teoksessa lähinnä vain mainittu.

Venesähkösasennuksille löytyy myös SFS-EN-standardit. Standardissa *SFS-EN ISO 16315 Small craft. Electric propulsion system* käsitellään nimenomaan alle 24-metrinen sähköalusten propulsiojärjestelmiä. Kaikki Jopi-projektin asennukset pyritään toteuttamaan standardin mukaisesti. Jopin tasajännitejärjestelmät toteutetaan kustannussyistä yksinapaisina ja järjestelmien miinukset kytketään yhteen virtakiskoon, johon liitetään myös vaihtosähköjärjestelmän suojamaa sekä aluksen teräksinen runko.

3.4 Aluksen rakenne ja runkomuoto

Yleensä aluksen rakenne ja runkomuoto määrittelevät propulsioon siinä määrin, ettei esimerkiksi akselivetoisen aluksen sähköistäminen esimerkiksi sähköperämoottorin avulla ole mielekäs vaihtoehto. Tarkastelussa rajaudutaan siis voimalinjaketteihin, jotka tarjoavat sähkökäytön olemassa olevan potkuriakselin pyörittämiseksi. Akseliveto on propulsioratkaisuna perinteinen, kestävä ja yksinkertainen, eikä siitä siten ole tarpeen pyrkiä eroon.

Aluksen rakenne ja runkomuoto määrittelevät yleensä tavoiteltavissa olevan suorituskyvyn. Huipputehon kasvattaminen sähköiseen voimalinjaan siirryttäessä ei liene monestikaan tarpeen, varsinkaan kun puhutaan hidaskulkuisista uppoumarunkoisista aluksista. On myös hyvä huomata, että Suomessa huviveneen koneen vaihtaminen tehokkaampaan edellyttää valmistajan CE-kilvessä ilmoittaman tehosuosituksen noudattamista tai vanhemmissa CE-kilvettömissä veneissä *Liikenne- ja viestintävirasto Traficom*in taulukoiman maksimitehon huomioimista [19].

3.5 Voimansiirto

Tyypillisessä akselipropulsiossa dieselkoneen perässä on kytkin, eli niin sanottu merivaihte, jossa on vaihteet eteen, taakse ja vapaa. Merivaihteessa on yleensä kiinteä välityssuhde, tyypillisesti noin 2:1. Kyseessä on siis yleensä alennusvaihte, eli potkuriakselin halutaan pyörittävän koneen kierrosnopeutta hitaammin. Useimmiten merivaihteeseen on integroitu myös painelaakeri, joka välittää potkurin tuottaman työntövoiman merivaihteen ja koneen kautta konepetiin ja sitä myöten aluksen runkoon.

Akselivetoisen veneen potkuriakseli kulkee veneen pohjan läpi putkessa, jota kutsutaan vannasputkeksi. Akseli on tyypillisesti tuettu vähintään molemmista päistään liukulaakereilla. Vannasputki on täytetty joko vedellä, öljyllä tai vaseliinilla. Tyypillisimmillään vannasputkessa on vettä ja vannasputken yläpäässä tiivisteboksi, eli niin sanottu taliboksi, joka tiivistetään ja voidellaan vesivaseliinilla. Koska voimansiirto voi tuottaa työntövoimaa tehokkaasti ainoastaan akselin suuntaisesti, tapahtuu ohjaus aina erillisellä peräsimellä. [20]

3.6 Potkuri

Potkuri on kiinnitettyä potkuriakselin päähän, useimmiten kiilauran avulla ja lukittu mutterilla, joka yleensä vielä varmistetaan pidätinruuvilla tai lukkolevyllä. Potkuri muuttaa akselin pyörimisliikkeen alusta kuljettavaksi työntövoimaksi. Maailma on täynnä erilaisia potkureita ja vaikka potkuri on hyvin vanha ja paljon käytetty keksintö, tapahtuu niiden parissa edelleen merkittävää kehitystä, mistä hyvänä esimerkkinä uutisoitiin *Baltic Queen* -autolautan potkuripäivityksen parantaneen polttoainetaloutta jopa 14 % [21]. Potkureiden toiminnan täydellinen mallintaminen on yhä hyvin haastavaa.

Peruseriaatteena voidaan pitää, että potkuri on mitoitettava aina tapauskohtaisesti kullekin alukselle ja voimalinjalle, niiden aiottuun käyttötarkoitukseen. Tärkeimmät suureet potkurin mitoituksessa itse potkurin osalta ovat nousu, eli ns. lapakulma (pitch), lapojen määrä sekä lapojen pinta-ala ja potkurin halkaisija. Muun voimalinjan osalta tärkeimmät suureet ovat potkuriakselin pyörimisnopeus sekä voimalinjan potkuriakselille tuottama vääntömomentti. Potkurin keskiö ja liitostapa on valittava käytettävän akselin mukaan.

Potkurin nousu kertoo potkurin teoreettisen etenemän yhdellä kierroksella. Todellisuudessa potkuri luistaa aina jonkin verran, eikä vene etene yhtä paljoa potkurin kierrosta kohden. Liiallinen potkurin luisto voi johtaa potkurin pinnalla kavitaatioon, jolloin vesi kiehuu alipaineen vaikutuksesta aiheuttaen potkuriin vaurioita, ylimääräistä melua sekä hyötysuhteen heikkenemistä. Potkurin mitoitus on tarkistettava aina, kun aluksen voimalinjaa tai käyttötarkoitusta muutetaan. [22]

3.7 Sähköistämiskäytösten jaottelu

Sähköistämiseksi saatavilla olevia ratkaisuja voidaan vertailla niiden ominaisuuksien perusteella. Tärkeimmät mitoitussuureet ovat sähkökoneen teho ja vääntömomentti. Näiden lisäksi käytännön merkitystä on koneen fyysisillä mitoilla, hyötysuhteella, kestävyydellä, huoltovaatimuksilla, melulla sekä jäähdytyksellä. Jos konetta on tarkoitus kuormittaa pitkiä aikoja maksimiteholla, voi rajoittavaksi tekijäksi muodostua myös voimalinjan jäähdytys.

Esimerkin *Vetus E-Line* -ratkaisu hyödyntää 48 voltin tasajännitettä, joka luokitellaan pienisjännitteeksi. Akkuihin varastoitu tasasähkö vaihtosuunnataan pakettiin kuuluvalla taa-juusmuuttajalla kolmivaiheista vaihtosähkökonetta varten. Muita vaihtoehtoja ovat tasavirtakone sekä pienjännitteellä toimiva vaihtovirtakone. Pienjännitteisen vaihtovirtakoneen vaiheiden välinen nimellisjännite (pääjännite) on tyypillisimmillään jakeluverkoissa käytetty 400 V tai teollisuudessa yleinen 690 V, kuitenkin aina enimmillään yksi kilovoltti (1 kV).

Pienisjännitteellä toimivien ratkaisujen hyödyntäminen helpottaa asennus- ja huoltotöihin liittyvää sääntelyä, sillä pienisjännitteellä toimiviin järjestelmiin kohdistuvia töitä suorittaakseen ei välttämättä tarvitse olla sähköalan ammattihenkilö. Energiavaraston mukaan jännitteestä riippumatta kyseeseen voi kuitenkin tulla valokaaren energiasta johtuva jännitetyövaatimus, sillä tyypillinen isohko akusto pystyy tuottamaan, sinänsä ihmiselle turvallisella jännitteellä, oikosulussa valokaaren, jonka energia on omiaan vahingoittamaan ihmistä. Rajana jännitetyövaatimukselle pidetään puolen megajoulen (0,5 MJ) valokaaren energiaa.

3.7.1 Pienisjännitteiset vaihtosähkökoneet

Esimerkin *Vetus E-line* -ratkaisu nojautuu pienisjännitteiseen vaihtosähkökoneeseen, tarkemmin induktio-, eli oikosulkukoneeseen. Konetyyppi luokitellaan epätahtikoneeksi, eli koneen roottori pyörii magneettikentän kanssa eri nopeudella [23, s. 119]. *Vetus E-line* -koneissa hyödynnetään myös nestejäähdytystä, eli käytännössä avointa vesi- tai suljettua jäähdytysnestekiertoa.

Myös *Bellmarine DriveMaster* -tuotesarjan koneet nojautuvat vaihtosähkökoneeseen, mutta malliston jännitealue ulottuu 48 voltista aina 384 voltin nimellisjännitteeseen, joten osa koneista toimii pienisjännitteen sijaan pienjännitteellä. Bellmarinen koneita on saatavilla sekä ilma- että vesijäähdytteisinä, suunnitellun kuormitusprofiilin mukaan. Suurin ero Vetukseen on sähkökoneen tyyppi, sillä kaikki *DriveMaster*-koneet ovat kestmagnetoituja tahtikoneita (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM).

Markkinoiden suomalainen ylpeys on erityisesti uppoumarunkoisten alusten sisäkoneisiin keskittynyt *Oceanvolt*, jonka kaikki ratkaisut perustuvat 48 voltin tasasähköjärjestelmään. *Oceanvolt* tarjoaa akselivetorakenteelle kahta konesarjaa, joista pienempitehoinen AX tar-

joaa kolme tehovaihtoehtoa välillä 3,7 kW ja 8,3 kW. Koneet ovat kestmagnetoituja tahtikoneita ja niissä on sisäänrakennettu alennusvaihteisto. Koneet toimivat myös generaattoreina purjehdittaessa. [24]

Tehokkaampi AXC-sarja erottuu useimmista kilpailijoistaan täysin erilaisella lähestymisellä, sillä sähkökone on modulaarinen. Tehoalue alkaa kymmenestä kilowatista ja sitä voidaan kasvattaa kytkemällä enintään neljä kymmenen kilowatin moduulia peräkkäin toisiinsa. Moduulit toimivat ikään kuin yhtenä koneena ja pyörittävät yhtä potkuriakselia sekä potkuria. AXC-sarjan koneet ovat vaihteettomia suoravetokoneita. [24]

Tahtikoneessa roottori pyörii magneettikentän kanssa samassa tahdissa [23, s. 119]. Tahtikone mahdollistaa tyypillistä epätahtista oikosulkukonetta paremman hyötysuhteen, minkä takia ne ovatkin yleistyneet ja korvanneet epätahtikoneita esimerkiksi sähköautoissa. Kestomagnetoidun tahtikoneen rakentaminen on kuitenkin kalliimpaa monimutkaisemman rakenteen ja tarvittavien kestmagneettien takia.

Pienoisjännitteisiä vaihtosähkökoneita löytyy myös esimerkiksi *Aquamot*-merkkisinä. Näitä koneita on saatavilla alkaen 24 V koneesta ja päättyen 96 V koneeseen, joten koko mallisto kuuluu pienoisjännitteisiin koneisiin. Sähkökoneen tyyppiä ei ilmoiteta suoraan, mutta koneen mainitaan olevan hyötysuhteeltaan hyvä, ilmajäähdytteinen sekä anturiton. Ilmaus viittaisi äkkiseltään oikosulkukoneeseen. Yleisesti ottaen kestmagnetoidut koneet ovat kalliimpia ja halutumpia, joten kyseinen ominaisuus olisi todennäköisesti kerrottu markkinointimateriaalissa.

Helsingin venemessuilla 2023 oli esillä yksi markkinoiden uusimpia tulokkaita, *Propel D1* -sähköpropulsio. Kyseinen *Propel*-sarja perustuu aksiaalivuokoneeseen (AFPM). Erona tyypilliseen radiaalivuokoneeseen on akselin suuntainen magneettivuon akselin kanssa kohtisuoran magneettivuon sijaan. Myös aksiaalivuokoneet ovat kestmagnetoituja, mihin liittyy samat haasteet kuin tyypillisemmissä kestmagnetoiduissa tahtikoneissa.

3.7.2 Pienoisjännitteiset tasasähkökoneet

Yksi ensimmäisiä Suomen markkinoilla suosiota saaneita sähköpropulsiomerkkejä oli *Epropulsion*, jonka I-sarjan sisäkoneet kattavat mallit 10, 20 ja 40 kW toimien 86–115 V:n tasajännitteellä. Nämä propulsioratkaisut perustuvat harjattomiin tasasähkökoneisiin (BLDC,

Brushless DC). Harjattomat tasasähkökoneet ovat tyypillisimmillään tahtikoneita, joiden toiminta perustuu elektroniseen ohjainlaitteeseen, joka kytkee tasajännitteen vuoron perään moottorin eri käämityksiin saaden aikaan pyörivän magneettikentän.

Ratkaisu on mielenkiintoinen vaihtoehto tyypillisemmille vaihtosähkökoneille, vaikka periaatteellinen ero taajuusmuuttajaohjattuun vaihtosähkökäyttöön on pieni: molemmat perustuvat puolijohteilla tapahtuvaan kytkentään. Harjattomat DC-koneet ovat kuitenkin osoittautuneet tehokkaiksi ja toimiviksi esimerkiksi akkukäyttöisissä työkaluissa, joissa konetyyppiä käytetään hyvin laajalti.

3.7.3 Pienjännitteiset vaihtosähkökoneet

Valmiit kaupalliset ratkaisut ovat tarkastelun kokoluokassa pääasiassa pienoisjännitteellä, eli alle 50 VAC tai 120 VDC toimivia. Osassa ratkaisuista järjestelmän nimellisjännite on alle 120 VDC, mutta järjestelmän sisällä käytettävä vaihtosähkö on yli 50 VAC. Tällöin itse propulsioyksikköön kohdistuvat korjaustyöt ovat luvanvaraisia sähkötöitä, vaikka valmis propulsioratkaisu voitaisiinkin asentaa ja kytkeä esimerkiksi asiansa osaavan venealan yrityksen toimesta.

Veneen sähköpropulsio voidaan rakentaa myös teollisuuden sähkökäyttöihin tarkoitettuja komponentteja hyödyntäen, jolloin järjestelmän nimellisjännitteeksi tulisi tyypillisimmillään 400 VAC. Tällaiset sähkökoneet ja niiden ohjaukseen tarkoitettut taajuusmuuttajat ovat suhteessa hyvin edullisia, joskaan niitä ei ole suunniteltu suoraan kyseiseen käyttötarkoitukseen. Tyypillinen edullinen sähkökone on ilmajäähdytteinen oikosulkumoottori.

Teollisuuden komponentteja hyödynnettäessä tulee ottaa huomioon sähköalan ammattilaista edellyttävä nimellisjännite, tarve ohjaus-, hallinta- ja valvontalaitteistolle sekä komponenttien mahdollinen sopimattomuus meriympäristöön. Haasteeksi voi tulla esimerkiksi sähkökoneen riittävä jäähdytys suljetussa tilassa tapahtuvalla tasaisella ja kovalla kuormituksella.

3.8 Markkinoiden kehittyminen

Uusia vaihtoehtoja ilmestyy sähköpropulsiomarkkinoille tasaiseen tahtiin ja niitä pyritään myymään ensisijaisesti käyttökokemus sekä päästöttömyys edellä. Teknisiä yksityiskohtia

ei välttämättä juurikaan avata ja miksi avattaisiinkaan, jos toimintamatka ja huippunopeus ovat jo selvillä. Polttomoottoripuolella perämoottorit kasvattavat suhteellista suosiotaan voimalinjaratkaisuissa, mutta jää nähtäväksi, valtaavatko isot sähköperämoottorit jalansijaansa perämoottorimarkkinoilla.

Sähköpropulsion yleistyminen huviveneissä ei jää kiinni sähkökoneiden tarjonnasta, vaan paljon suurempi haaste on teknistaloudellisesti järkevän energiavaraston sovittaminen veneeseen. Nopean liukuvan veneen energiankulutuksen haastetta onkin lähdetty murtamaan kehittämällä kantosiipiin perustuvia ratkaisuja, joilla energiankulutus matkayksikköä kohden saadaan pienennettyä jopa 80 % perinteiseen runkoratkaisuun nähden [25]. Kantosiivet eivät kuitenkaan tule kyseeseen jälkiasennettavissa ratkaisuisa, sillä rakenteellisten muutosten tarve kasvaisi kohtuuttomaksi.

Yksi vielä mainitsematon esimerkki sähköpropulsioalaa valtaavasta brändistä on norjalainen *Evoy*, jonka tuotevalikoima kattaa perämoottorit ja sisäkoneet laajalla tehoskaalalla. Tuotteet ovat tosin nimenomaan puoliliukuviin sekä liukuviin, eli selvästi esimerkin Jopia nopeampiin aluksiin tarkoitettuja. Sisäkoneita on saatavilla teholuokassa 120:stä 400 hevosvoimaan (noin 90–300 kW).

Yleisesti venemarkkinassa näkyy trendi, jossa uusissa veneissä yhä isommat perämoottorit korvaavat sisäkoneita. Käytännössä tämä tarkoittaa myös bensiinimoottoreiden suhteellisen osuuden kasvua. Jääkin nähtäväksi, jatkuuko tämä kehitys ja korvautuvatko perämoottorit aikanaan sähköperämoottoreilla vai sähköisillä sisäkoneilla.

Yksi mahdollisuus on myös synteettisten polttoaineiden yleistyminen suoraa sähköistämistä nopeammin. Tämä ei olisi muuten teknistaloudellisesti vartenotettava vaihtoehto, mutta taustalla vaikuttaa edelleen huviveneiden tyypillisesti erittäin matala käyttöaste, jolloin suuremmat käyttökulut voivat olla perusteltuja, jos niillä vältetään esimerkiksi kymmenien tuhansien eurojen investointi kalliimpaan sähkövoimalinjaan.

4 Mittaussuunnitelma

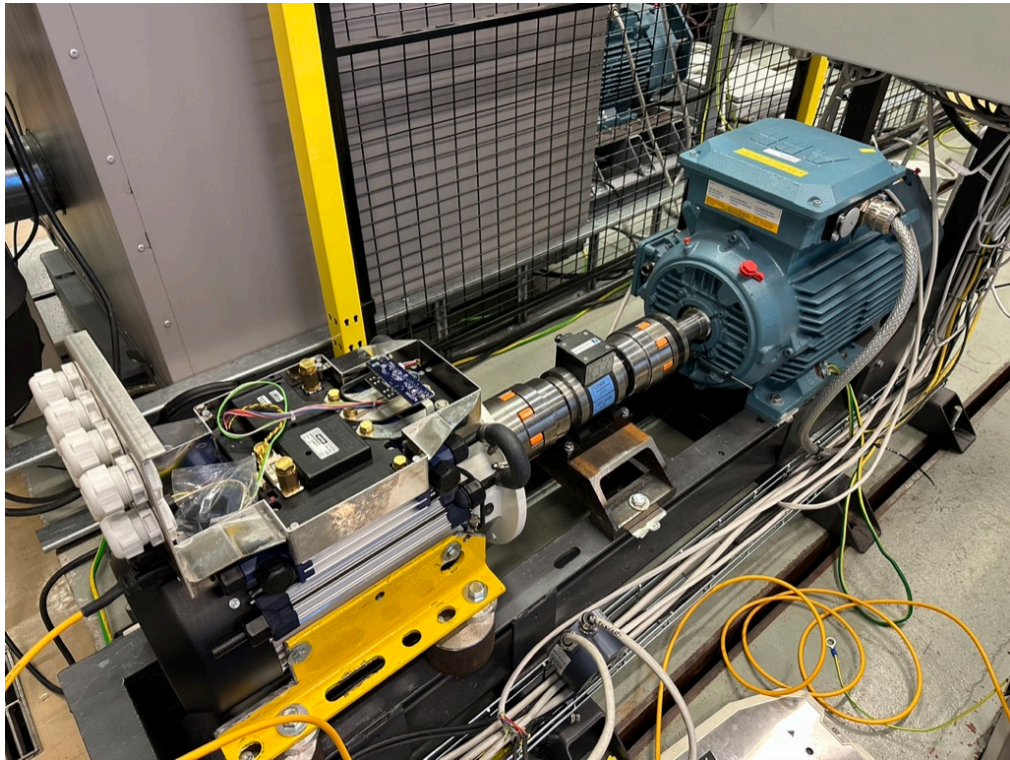
Mittaussuunnitelmassa esitellään mittausasettelu, käytetyt laitteet ja ohjelmistot sekä suunnitellut mittaukset. Suunnitelmaa kehitettiin iteratiivisesti, yhdessä laboratorioinsinöörin kanssa, sitä mukaa kun koneen voimalinjan ominaisuuksia saatiin selvitettyä. Keskiössä pyrittiin pitämään voimalinjan mitoituksen sekä loppukäytön kannalta oleelliset ominaisuudet.

4.1 Mittausasettelu

Sähkökäyttö mitataan laboratorio-olosuhteissa testipenkissä, jossa propulsiokone on kytketty sakarakytkimellä momenttianturiin, joka on puolestaan kytketty toisella sakarakytkimellä kuormakoneeseen. Tämä kokonaisuus on pultattu kiinni tukevaan teräskehikkoon ja akselit on kohdistettu sekä linjattu värähtelyjen minimoimiseksi. Akselilla ja momenttianturilla toisiinsa kytketyt koneet muodostavat tutkimuksen mekaanisen mittausasettelun.

4.1.1 Mitattava sähkökäyttö

Kuvassa 5. nähdään vasemmalta lukien propulsio, momenttianturi ja kuormakone samalle akselille kytkettynä. Propulsio koostuu sähkökoneesta ja sen päällä olevasta taajuusmuuttajasta, jonka suojakansi on kuvassa poistettuna. Myös kuormakone on sähkökäyttö, joka koostuu sähkökoneesta sekä taajuusmuuttajasta. Taajuusmuuttajan nelikvadranttikäyttö mahdollistaa sähkökoneen toimimisen kuormana, eli jarruna. Käytännössä kuormana toimivaa käyttöä ohjataan tuottamaan mitattavalle käytölle haluttu jarrutusväntömomentti.



Kuva 5. Propulsio, momenttianturi sekä kuormakone, kaapelit vielä kytkemättä

Mitattava kone ja taajuusmuuttaja ovat nestejäähdytettyjä. Jäähdytyskiertoon johdetaan mittauksen ajan vesijohtovettä, joka lasketaan kierrosta viemäriin. Järjestelyllä pyritään vakioimaan propulsioon lämpötila mittauksen ajan. Kuormakone on ilmajäähdytteinen oikosulkumoottori. Käytettävien kaapeleiden pituudet minimoidaan ja mekaaninen asennus toteutetaan mahdollisimman tukevana mahdollisten häiriölähteiden minimoimiseksi. Käytännön asennuksesta vastaavat yliopiston sähkökonehallin työntekijät.

4.1.2 Mitattavat suuret

Mitattavat mekaaniset suuret ovat vääntömomenttianturilta saatava vääntömomentti sekä akselin pyörimisnopeus. Näistä saadaan laskettua mekaaninen teho kulmanopeuden ja vääntömomentin tulona.

$$P = n * M \quad (2)$$

Akseliteho pyörimisnopeuden ja vääntömomentin funktiona, missä P on akseliteho watteina [W], n kulmanopeus radiaaneina per sekunti [rad/s] ja M vääntömomentti newtonmetreina [Nm].

Mitattavat sähköiset suureet ovat virta ja jännite seuraavissa pisteissä: akustolta tuleva syöttö taajuusmuuttajan navoilta, laturilta tuleva syöttö laturin navoilta, teholähteeltä tuleva syöttö taajuusmuuttajan navoilta sekä taajuusmuuttajalta sähkökoneelle menevä syöttö, josta mitataan myös taajuus ja loistehokomponentit. Taajuusmuuttajalle syötetään tasavirtaa 48 voltin nimellisjännitteellä ja taajuusmuuttaja syöttää propulsiokoneelle kolmivaiheista vaihtosähköä ennalta tuntemattomalla jännitteellä sekä taajuudella.

DewesoftX-mittausohjelmisto laskee kolmivaihetehon suoraan mitatuista virroista ja jännitteistä sen sisäänrakennetulla *Power*-moduulilla. Ohjelmisto suorittaa laskennan taajuustasossa *Fast Fourier Transform* -algoritmillä (FFT) erikseen virran ja jännitteen perusaallolle ja sen kerrannaisille, eli harmonisille yliaalloille. Jokaisen aallon RMS-arvoista (tehollisarvo, root mean square) lasketaan yhteiset RMS-arvot, joista varsinainen vaihekohtainen teho lasketaan jännitteen, virran ja tehokertoimen arvojen tulona. [26]

Kun virran ja jännitteen tehollisarvot tunnetaan, symmetrinen kolmivaiheteho voidaan yleisesti laskea yhtälön 3. mukaisesti.

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos(\varphi) \quad (3)$$

Symmetrinen kolmivaiheteho, missä P on sähköteho watteina [W], U pääjännite (kahden vaiheen välinen jännite) voltteina [V], I yhden vaiheen virta ampeereina [A] ja $\cos(\varphi)$ tehokerroin.

4.1.3 Käytetyt mittalaitteet ja muu laitteisto

Tasavirtalähteenä käytettiin *Amrel SPS60X333* -virtalähdettä niissä mittauksissa, joissa jännite pyrittiin vakioimaan eikä käytetty lainkaan akustoa. Akustona käytettiin neljää uutta Jopia varten syksyllä 2022 hankittua sarjaan kytkettyä *Power Plus 12 V 240 Ah Deep Cycle AGM* -akkua, joissa valmistajan mallinimi on *GB12-250* [8]. Akuston lataamiseen käytettiin

verkkovirtaan kytkettävää *Victron Skylla TG 48 V 50 A* -akkulaturia, joka sekkin on tarkoitus asentaa Jopi-alukseen.

Mittalaitteistossa vääntömomenttianturina käytettiin *Torquemaster TM 212* -anturia, joka kykenee mittaamaan vääntömomentin aina 200 Nm saakka suurimman sallitun kierrosnopeuden ollessa 24 000 rpm. Samalta anturilta saatiin tieto myös akselin mekaanisesta pyörimisnopeudesta. *Torquemaster TM 200* -sarjan antureissa on myös sisäänrakennettu lämpötilakompensointi [27].

Virrat mitattiin epäsuorasti Hitec-virtamuuntajilla ja vahvistimilla. Käytetyt virtamuuntajat olivat *Hitec Zero-flux Current Transformer* -sarjan 300 ampeerin nimellisvirralle tarkoitettua mallia.

Mittausdata kerättiin kahdella *DewesoftX*-ohjelmistoon liitetyillä *Dewesoft Sirius* -sarjan mittalaitteella. Taulukkoon 2. on koottu *SIRIUSi Dual-Core 8ch 2 x 24 bit ADC* -mittalaitteella tallennetut kanavat ja vastaavasti taulukkoon 3. *SIRIUSi HS 8 ch, 1x16 bit ADC* -mittalaitteella tallennetut kanavat.

Taulukko 2. SIRIUSi Dual-Core 8ch 2 x 24 bit ADC -mittalaitteella tallennetut kanavat

Kanava	Suure	Vahvistin	Näytteenottotaajuus	Suodatus
1	DC-virta	STG	200 kS/s	Anti-aliasing filter (IIR) (BE)
2	Laturin virta	STG	200 kS/s	Anti-aliasing filter (IIR) (BE)
7	Vääntömomentti	STG+	200 kS/s	Anti-aliasing filter (IIR) (BE)
7 counter	Pyörimisnopeus		200 kS/s	-

Taulukko 3. SIRIUSi HS 8 ch, 1x16 bit ADC -mittalaitteella tallennetut kanavat

Kanava	Suure	Vahvistin	Skaala	Näytteenottotaajuus	Suodatus
1	Moottorin jännite U	HV	100 V	1 MS/s	-
2	Moottorin jännite V	HV	100 V	1 MS/s	-
3	Moottorin jännite W	HV	100 V	1 MS/s	-
4	DC-jännite	HV	100 V	1 MS/s	-
5	Moottorin virta	LV	10 V	1 MS/s	-
6	Moottorin virta	LV	10 V	1 MS/s	-
7	Moottorin virta	LV	10 V	1 MS/s	-
4	Laturin jännite	LV	100 V	1 MS/s	-

Kuormakoneena käytettiin ABB:n kolmivaiheista *M3BP 160MLC 4* -oikosulkumoottoria, jonka valmistusvuosi on 2018. Koneen nimellisteho on 18,5 kW, eli mitattavaan käyttöön nähden teho on yli kaksinkertainen. Kuormakonetta ajettiin soveltuvalla ABB:n taajuusmuuttajalla, joka oli kytketty sähkökonehallin pienjännitteiseen jakeluverkkoon.

4.2 Tehtävät mittaukset

Sähkökäyttö mitataan kolmessa eri kytkentätilanteessa. Ensimmäisessä tilanteessa käyttöä syötetään laboratoriovirtalähteellä, jonka tarkoitus on olla likimain vakiojännitelähde. Toisessa kytkentätilanteessa käyttöä syötetään sille mitoitetusta energiavarastosta, eli AGM-akustosta. Kolmannessa kytkentätilanteessa akuston rinnalle lisätään laturi, millä kuvataan käyttötilannetta, jossa akustoa ladataan generaattorilla ajon aikana.

Ajettavat mittaussarjat tähtäävät voimalinjan vääntö- ja hyötysuhdekäyrien määrittämiseen sekä voimalinjan toiminnan tarkasteluun ääritilanteissa. Taajuusmuuttajan ohjausperiaatetta ei tunneta, mutta voimalinjaa oletetaan ohjattavan kierrosnopeusohjeella. Käytännössä ohjauskomennot annetaan CAN-väylään kytketyllä yhdistetyllä vaihde- ja kaasuvivulla, eli niin sanotulla paakilla. Tämä on tyypillinen tapa venemoottorin ohjaamiseen, joskin perinteisemmissä järjestelmissä ohjaustieto välitetään yleensä sähköisen väyläjärjestelmän sijaan vaijerilla.

Mittausten aikana pyritään ajamaan testisyklot 100 rpm välein koneen nimelliseen maksimikierrosnopeuteen saakka ja kuormakoneen vääntömomenttiohjetta pyritään nostamaan joko kaisella kierrosalueella, kunnes ylikuormitustila saavutetaan. Voimalinjan hallintapaneeli on varustettu ylikuormituksen ilmaisimella. Nämä mittaussarjat toistetaan eri virtalähteillä, minkä lisäksi ajetaan pidemmät ajot pelkällä akustolla sekä laturin ja akuston yhdistelmällä. Lopuksi testataan toimintaa myös vajaalla akustolla sekä erilaisissa ääritilanteissa. Tehtävät mittaukset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Tehtävät mittaukset

n.	Mittaus	Virtalähde	Toimintatila	Tulokset
0.	Kuormakoneen profilointi	Tasavirtalähde	Normal	Vääntömomenttiohjeet
1.	Suorituskyky	Tasavirtalähde	Normal	Vääntökäyrä, hyötysuhde
2.	Suorituskyky	Tasavirtalähde	Power	Vääntökäyrä, hyötysuhde
3.	Suorituskyky	Tasavirtalähde	Eco	Vääntökäyrä, hyötysuhde
4.	Suorituskyky	Akusto, täysi	Normal	Vääntökäyrä, hyötysuhde
5.	Suorituskyky	Akusto, täysi	Power	Vääntökäyrä, hyötysuhde
6.	Toiminta-aika	Akusto, täysi	Normal	Toiminta-aika, jännitteet
7.	Toiminta aika	Akusto + laturi	Normal	Toiminta-aika, jännitteet
8.	Suorituskyky	Akusto, vajaa	Power	Vääntökäyrä, hyötysuhde
9.	Käynnistymismomentti	Akusto, vajaa	Normal	Käynnistymismomentti
10.	Käynnistymismomentti	Akusto, vajaa	Power	Käynnistymismomentti
11.	Toiminta-aika, (6. toistettuna)	Akusto	Normal	Toiminta-aika, jännitteet
12.	Ääri- ja rajatilanteet	Tasavirtalähde	Pwr / Normal	Jänniterajat, virhetilat

4.3 Testiajot ja järjestelmään tutustuminen

Ensimmäisten testiajojen perusteella tehtiin sarja havaintoja, jotka auttoivat ymmärtämään, millainen sähkökäyttö on kyseessä. Sähkökoneesta tiedettiin etukäteen ainoastaan sen olevan vaihtovirtakone. Koneen akselin pyöräminen vapaasti sitä ulkoa pyöritettäessä antoi olettaa kyseessä olevan tyypillinen oikosulkumoottori. Oletus vahvistui oikeaksi ensimmäisten testiajojen myötä, kun koneen CAN-väylän kautta ilmoittama sähköinen pyörimisnopeus oli konetta kuormitettaessa aina huomattavasti akselin pyörimisnopeutta suurempi. Myöhemmin huomattiin myös valmistajan ilmoitus siitä, että kyseessä on oikosulkukone (induction motor).

Magneetikentän pyörimisnopeuden, eli niin sanotun sähköisen pyörimisnopeuden sekä roottorin ja siihen kytketyn akselin mekaanisen pyörimisnopeuden erotusta kutsutaan jättämäksi. Vakiolämpötilassa jättämä on suoraan verrannollinen ideaalisen koneen tuottamaan vääntömomenttiin. Jättämän poiketessa nollasta magneetikenttä ja roottori pyörivät eri tahdissa, eli kyseessä on tällöin epätahtikone. Yleensä jättämä esitetään suhteellisarvona.

Koneen tyyppin lisäksi käytetyn taajuusmuuttajan ohjaustapa oli tuntematon ennen ensimmäisiä testiajoja. Yleisesti taajuusmuuttajakäytöissä käytettäviä ohjaustapoja ovat kierrosnopeusohje, vääntömomenttiohje ja virtaohje. Mitatun voimalinjan taajuusmuuttajaa ohjataan CAN-väylään kytketyllä kahvamuodulilla, muuttamalla paakin asentoa. Vaikuttaa siltä, että kahvalla säädetään koneen sähköistä pyörimisnopeutta, eli taajuusmuuttajalle annettava ohje on pyörimisnopeusohje.



Kuva 6. Vetus E-Line -voimalinjan kahvamuoduli, eli ns. paaki

Voimalinjan käyttäytyminen antaa olettaa, ettei roottorin todellisesta pyörimisnopeudesta ole takaisinkytkentää taajuusmuuttajan ohjauslogiikalle, sillä voimalinja ei kompensoi jättämän aiheuttamaa roottorin pyörimisnopeuden laskua kuormaa lisättäessä. Toisaalta käytännön sovelluskohteessa tällä ei myöskään olisi suurta merkitystä. Voimalinja ei myöskään anna ilmoitusta ylikuormasta, vaikka akseli ja siihen kytketty roottori jarrutettaisiin kuormakoneella pysähdyksiin saakka.

Voimalinjakettiin kuuluu yksinkertainen CAN-väylään kytketty merkkivalopaneeli, jossa on ilmaisimet akun varaukselle, ylikuormalle ja ylikämmölle. Akun varaustason ilmaisimien vaikuttaisi perustuvan suoraan akkujännitteeseen, joten ilmaisimen lukema on riippuvainen

myös akuston kuormituksesta. Jopiiin tuleeekin erillinen akkumonitori, jonka toiminta perustuu kuormitusvirran mittaamiseen ja akustosta otetun sekä sinne ladatun energian laskemiseen.

Voimalinja käynnistyy aina *Normal*-toimintamoodissa, jonka lisäksi voidaan valita *Eco*- tai *Power*-toimintatila. *Eco*-moodissa tehoa rajoitetaan ja tilapäisesti käytettävissä olevassa *Power*-moodissa kierrosnopeus kasvaa hieman. Eri toimintatiloja vertaillaan ajamalla niille keskenään samanlaiset mittausajot.

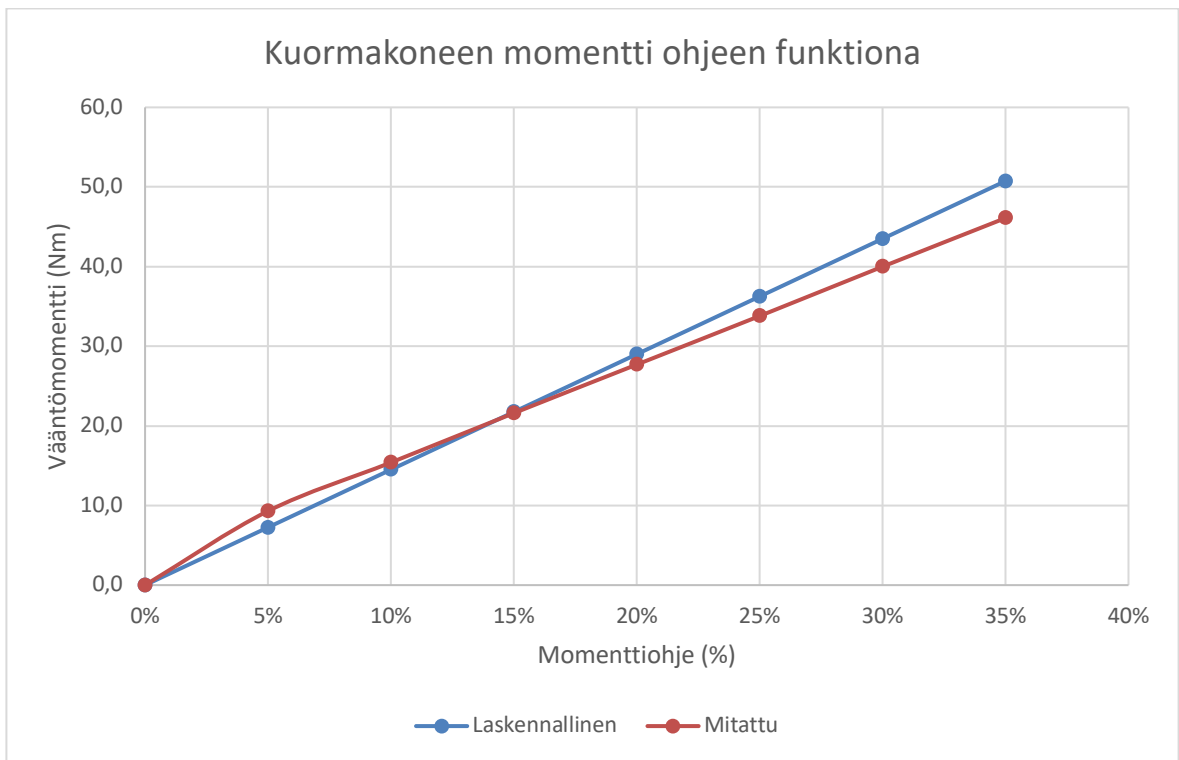
5 Mittaukset

5.1 Kuormakoneen profilointi

Ensimmäisessä mittausvaiheessa tehtiin kuormakoneen profilointi, jossa määritettiin mitauksissa käytettävät kuormakoneen toimintapisteet. Kuormakoneen nimellinen vääntömomentti on 145 Nm ja kuormakonetta ohjaavalle taajuusmuuttajalle annetaan vääntömomenttiohje prosentuaalisena osuutena nimellisestä vääntömomentistä. Profiloinnin tavoitteena oli selvittää vääntömomenttiohjearvot, joilla kuormakone tuottaisi jarrutusmomentit halutulle mittausalueelle.

Propulsiokoneen nimellisen vääntömomentin ollessa 60 Nm, määritettiin mittausalueeksi 10–60 Nm, viiden newtonmetrin portain. Profilointi suoritettiin 1 000 rpm pyörimisnopeudella. Suurin mitattu kuormitusmomentti 5 Nm:n portaina oli 45 Nm, sillä 50 Nm:n jarrutusmomentilla propulsiokone ei enää kyennyt ylläpitämään tasaista pyörimisnopeutta.

Kuvaajasta 1. nähdään, etteivät laskennallinen ja mitattu vääntömomentti ole aivan yhtä suuria. Mitattu vääntömomentti kasvaa prosentuaalista vääntömomenttiohjetta kasvatettaessa hieman laskennallista hitaammin. Tällä ei ole käytännön merkitystä, koska mittauspisteet määriteltiin mitatun vääntömomentin perusteella. Kuvaaja on ensimmäisestä profilointikerasta, jolloin vääntömomenttianturi oli vielä nollaamatta.



Kuvaaja 1. Kuormakoneen vääntömomentti ohjeen funktiona

Vääntömomenttianturin nollaamisen jälkeen profilointi suoritettiin uudelleen ja profiloinnin tuloksena saatiin seuraava taulukko (Taulukko 5.), jota hyödynnettiin varsinaisissa mittauksissa. Kun kuormakonetta ajetaan 6,9 %:n vääntömomenttiohjeella, tuottaa se likimain 10 Nm:n jarrutusmomentin ja vastaavasti 35,6 %:n ohjeella noin 45 Nm:n jarrutusmomentin.

Taulukko 5. Kuormakoneen vääntömomenttiohjeet

Momentti (Nm)	Momenttiohje (%)
10	6,9 %
15	11,0 %
20	15,1 %
25	19,2 %
30	23,3 %
35	27,4 %
40	31,5 %
45	35,6 %
50	*
55	*
60	*

* Mitattava kone ei jaksanut pyöriä

5.2 Ensimmäinen mittaussarja – suorituskky Normal-tilassa

Toimintatila: Normal, teholähde: vakiojännite 50 VDC

Ensimmäisessä varsinaisessa mittaussarjassa kuormakone asetettiin tuottamaan aluksi 10 Nm:n jarrutusmomentti, minkä jälkeen propulsiokoneen pyörimisnopeus sovitettiin mahdollisimman lähelle haluttua kierrosnopeutta. Tämän jälkeen kuormakoneen tuottamaa jarrutusmomenttia kasvatettiin viiden newtonmetrin portaissa, kunnes propulsiokone ei kyennyt ylläpitämään tasaista pyörimisnopeutta, vaan pyöriminen alkoi hidastua. Tämä toistettiin koko kierrosnopeusalueella 100 rpm välein.

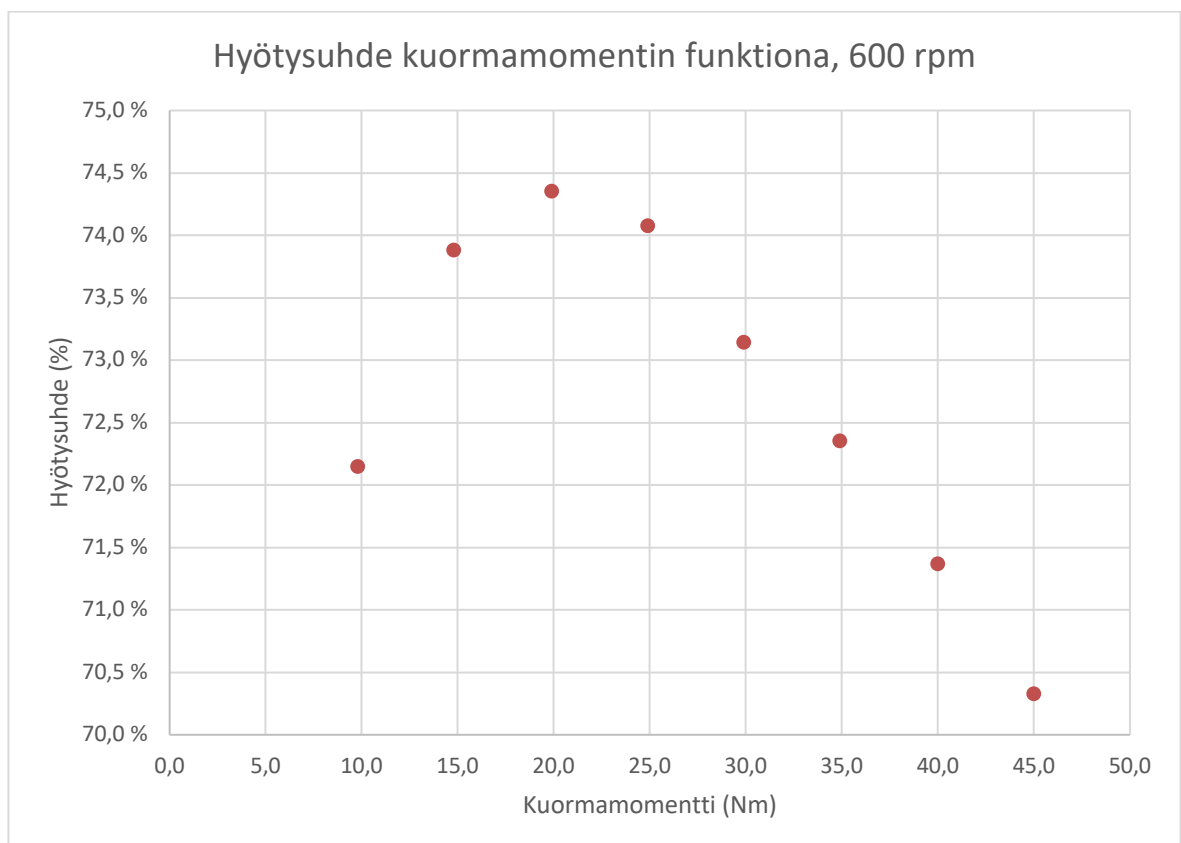
Mittaussarjat ajettiin 300–1400 rpm -kierrosnopeusalueella 300 rpm ollessa pienin ja 1400 rpm suurin mahdollinen tasaluku propulsiokoneen kierrosnopeudelle. Lisäksi mittaus suoritettiin nopeusvalitsin ääriasennossa, eli niin sanotusti täydellä kaasulla, millä ei kuitenkaan ollut enää vaikutusta alkutilanteen kierrosnopeuteen. Propulsiokoneen toimintatilana käytettiin koko mittauksen ajan propulsio *Normal*-toimintatilaa, joka on aina automaattisesti valittuna, kun järjestelmä käynnistetään. Moottorille syötettiin tehoa DC-virtalähteellä 50 voltin vakiojännitteellä.

Propulsioin tärkein tehtävä on tuottaa energiavaraston sisältämästä energiasta alusta eteenpäin kuljettavaa työntövoimaa mahdollisimman tehokkaasti, joten ensin tarkastellaan voimalinjan hyötysuhdetta mittaussarjan eri pisteissä. Tarkastellaan hyötysuhdetta 600 rpm ja sitten 100 rpm -kierrosnopeusalueilla eri kuormamomenteilla. Datapisteet on poimittu käsin, analysointiohjelmistoon piirrettyjä käyriä hyväksikäyttäen, systeemin saavutettua stabiilin tilan jokaisen kuormamomenttimuutoksen jälkeen. Arvot ovat mitattuja arvoja käsin valituista ajankohdista, sitten että ne ovat keskiarvoja näytteistä edellisen 500 millisekunnin ajalta.

Tarkastelu rajautuu alkuun voimalinjan hyötysuhteeseen, eli tarkastellaan, miten tehokkaasti moottoripaketti muuntaa sille syötetyn tasasähkönsä akselin mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi. Mitattujen häviöiden syntyminen voidaan jakaa taajuusmuuttajalle sekä itse sähkökoneelle. Taajuusmuuttajassa tapahtuvat häviöt ovat sähköisiä, kun taas itse sähkökoneessa syntyy myös mekaanisia kitkan ja ilmanvastuksen aiheuttamia häviöitä. Lisäksi häviöitä syntyy mitausasettelun kaapeleissa ja liitoksissa. Nämä resistiiviset häviöt on minimoitu sijoittamalla mittaus mahdollisimman lähelle taajuusmuuttajaa sekä sähkökonetta ja käyttämällä mahdollisimman hyviä liitoksia sekä suuria kaapelipoikkipintoja.

Voimalinjan ohjausjärjestelmän tarvitsema sähkö syötettiin erillisestä verkkovirtaan kytketystä laboratoriovirtalähteestä 12 voltin tasajännitteellä ja jäähdytyksen vesikierto toteutettiin vesijohtoverkon paineella, joten nämä komponentit eivät ole mukana mittauksen häviöissä. Todellisessa käyttötilanteessa sekä ohjausjärjestelmän, että jäähdytyksen kiertopumpun tarvitsema energia otettaisiin tyypillisesti samasta energiavarastosta kuin itse propulsioon vaatima energia.

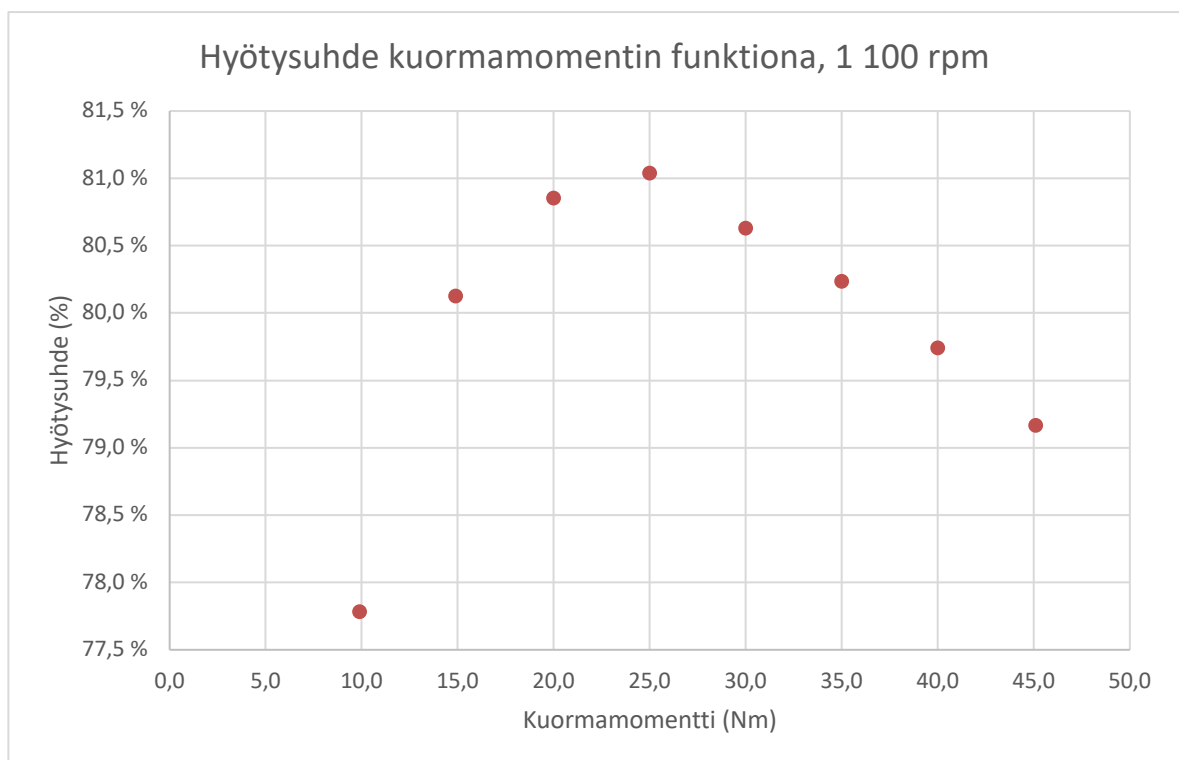
Kuvaajasta 2. nähdään, että voimalinjan hyötysuhde 600 rpm kierrosnopeudella on parhaimmillaan noin 20 Nm:n kuormituksella. Tällöin voimalinjan kokonaishyötysuhde ylittää 74 %. Huonoimmillaankin 45 Nm:n kuormituksella hyötysuhde on yli 70 %. Kuormamomentin vaikutus voimalinjan hyötysuhteeseen on lopulta kohtuullisen pieni, vaikka käyrämuoto erottuu selvästi ja paljastaa, että hyötysuhde on parhaimmillaan kuormamomentin ollessa noin kolmasosa nimellisestä maksimista.



Kuvaaja 2. Hyötysuhde kuormamomentin funktiona, 600 rpm, *Normal*-tila

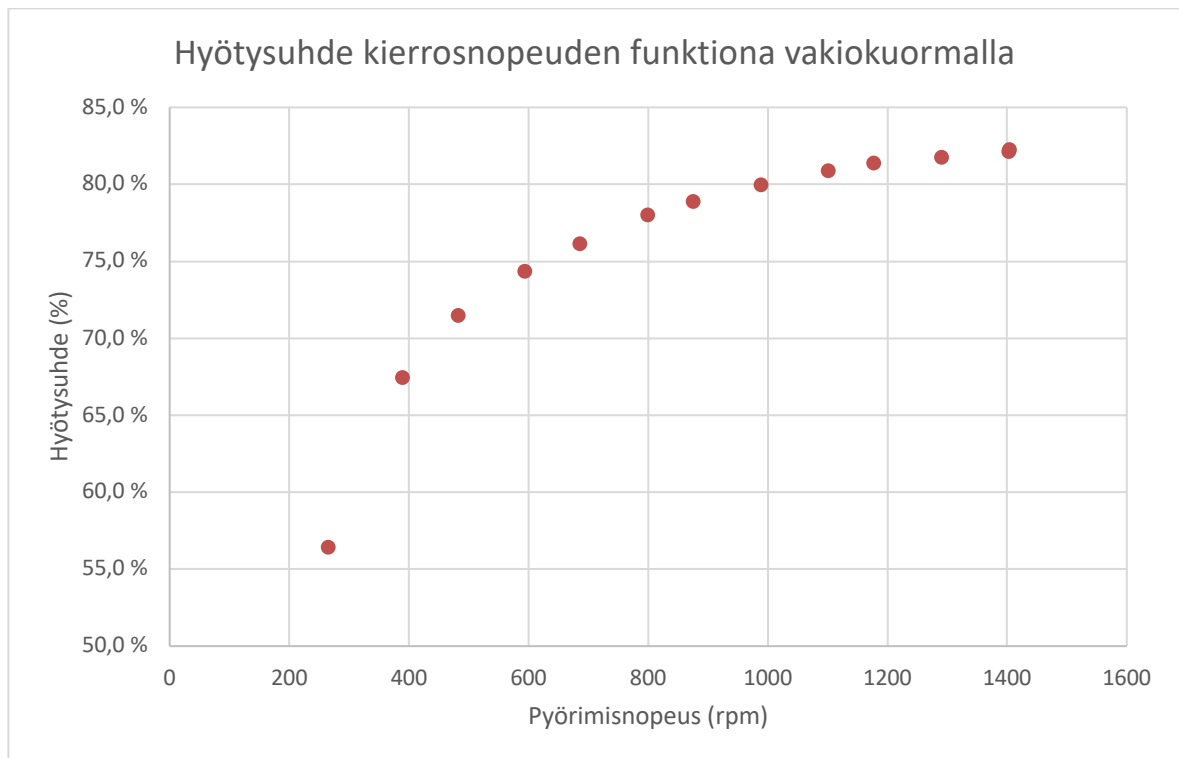
Vastaavasti 1 100 rpm kierrosnopeudella hyötysuhdekäyrä on hyvin samankaltainen, joskin hyötysuhde on koko kuormitusalueella parempi kuin pienemmällä kierrosnopeudella. Paras

hyötysuhde saavutetaan hieman suuremmalla kuormamomentilla, noin 25 Nm, hyötysuhteen ylittäessä tällöin 81 % rajan. Huonoimmillaankin, maksimaalisella kuormamomentilla, hyötysuhde on yli 79 %. Kahden hyötysuhdekäyrän perusteella voidaan jo havaita, että pyörimisnopeudella on kuormitusmomenttia suurempi vaikutus voimalinjan hyötysuhteeseen. Hyötysuhde kuormamomentin funktiona 1 100 rpm kierrosnopeudella on esitetty kuvaajassa 3.



Kuvaaja 3. Hyötysuhde kuormamomentin funktiona, 1 100 rpm, *Normal*-tila

Huomataan, että hyötysuhde paranee kierrosnopeuden funktiona, mikä on erityisesti potkurin mitoittamisen kannalta olennainen tieto. Kuvaajasta 4. nähdään, että kierrosnopeutta kasvatettaessa hyötysuhde paranee ensin rajusti ja 1 000 rpm kierrosnopeuden jälkeen kasvu on likimain lineaarista. Hyötysuhteen kannalta matkanopeus kannattaisikin sovittaa siten, että kierrosnopeus olisi vähintään 600 rpm tai jopa kahdeksastasadasta tuhanteen kierrosta minuutissa.



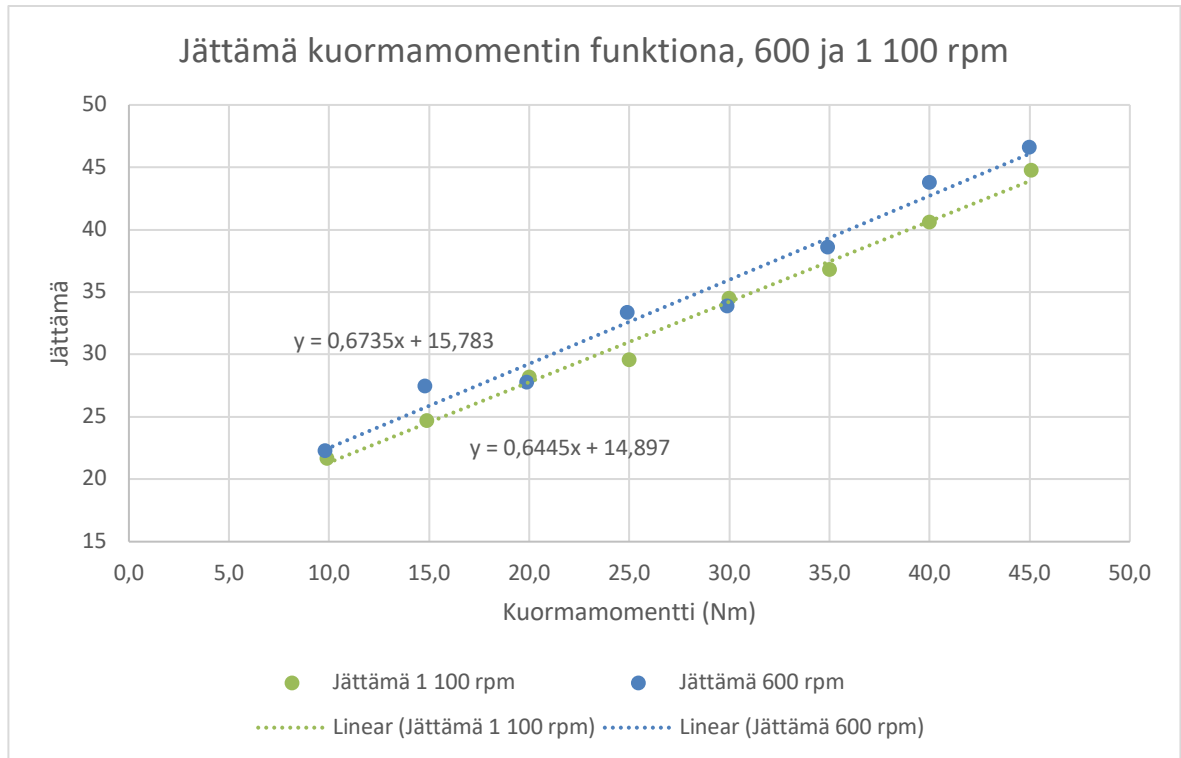
Kuvaaja 4. Hyötysuhde kierrosnopeuden funktiona vakiokuormalla, *Normal*-tila

Jokaisessa mittauksessa mitattiin kahta eri pyörimisnopeussuuretta. Toinen pyörimisnopeus mitattiin suoraan akselilta, eli kyseessä on akselin ja samalla myös sähkökoneen roottorin mekaaninen pyörimisnopeus, jota on käytetty propulsioon todellisena pyörimisnopeutena. Toinen mitattu pyörimisnopeus on voimalinjan logiikan ilmoittama sähköinen pyörimisnopeus. Kun oikosulkumoottoria kuormitetaan, sähköisen ja mekaanisen pyörimisnopeuden välille syntyy ero. Tätä erotusta kutsutaan jättämäksi.

Kuvaajassa 5. jättämä kahdella kierrosnopeusalueella, 600 ja 1 100 rpm, on piirretty samaan kuvaajaan. Pistejoukkoihin on sitten sovitettu suorat. Tästä huomataan, että jättämä kasvaa likimain lineaarisesti kuormamomentin funktiona. Voimalinjassa itsessään ei ole kuormamomentin mittausta, eikä myöskään mekaanisen pyörimisnopeuden mittausta. Nämä tiedot eivät siten ole saatavilla propulsioon logiikasta.

Vääntömomentin suora mittaaminen propulsioon lopullisessa asennuksessa olisi vaikea toteuttaa ja se vaatisi ylimääräisten komponenttien lisäämisen järjestelmään. Mekaaninen pyörimisnopeus olisi kuitenkin helppo anturoida ja mitata, minkä jälkeen koneen tuottama vääntömomentti olisi laskettavissa karkeasti jättämän avulla. Näin päästäisiin myös valmiissa

asennuksessa käsiksi propulsioon akselitehoon ja hyötysuhteeseen. Jos laskelmaa vielä korjattaisiin jollain lämpötilakertoimella, saattaisi laskennallinen arvo olla täysin käyttökelpoinen.



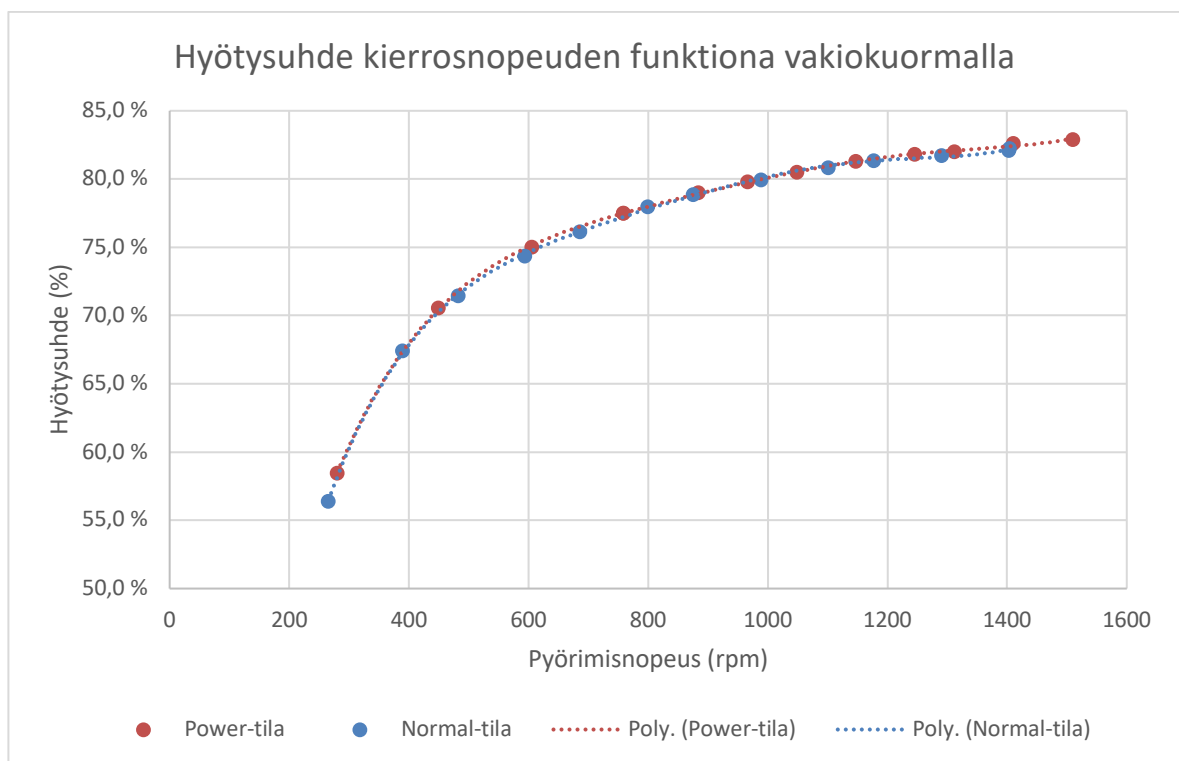
Kuvaaja 5. Jättämä kuormamomentin funktiona, 600 ja 1 100 rpm, *Normal*-tila

5.3 Toinen mittaussarja – suorituskyky *Power*-tilassa

Toimintatila: Power, teholähde: vakiojännite 50 VDC

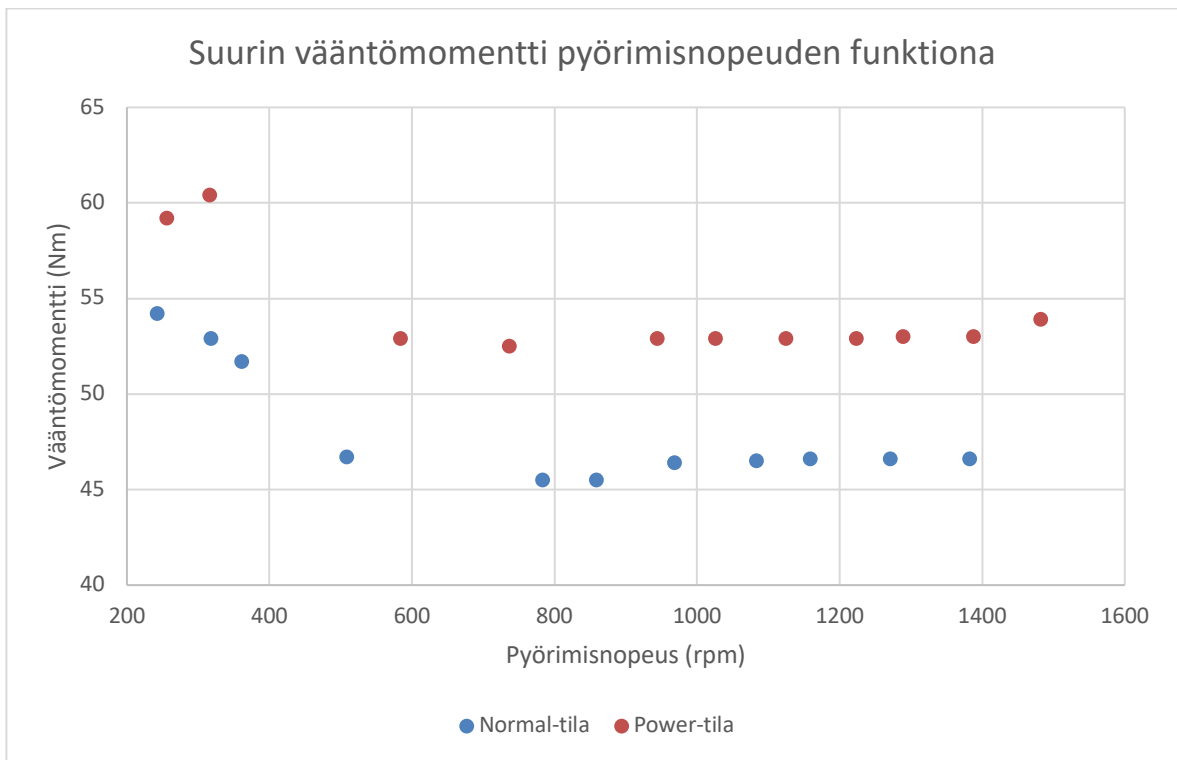
Toisessa varsinaisessa mittaussarjassa toistettiin ensimmäisen sarjan mittaukset, mutta voimalinjan toimintatilaksi vaihdettiin oletustilan *Normal* sijaan *Power*-tila (PWR). Hallintalaitteen manuaalin mukaan tehotila antaa käyttöön voimalinjan sähköisen huipputehon ja toiminto kytkeytyy pois päältä muutaman minuutin kuluttua ollen sitten väliaikaisesti pois käytettävistä [28]. Toimintatila kasvattaa suurinta mahdollista kierrosnopeutta ja sama nopeusvalitsimen asento tuottaa *Power*-tilassa hieman suuremman pyörimisnopeuden. Tämä käy selkeimmin ilmi, jos toimintatilan vaihtaa kesken ajon, jolloin vaikutus on sama kuin lisättäessä nopeutta paakia kääntämällä.

Power-tilassa määritettiin propulsiohyötysuhde samalla tavalla kuin edellisessä mittaus- sarjassa *Normal*-tilassa. Seuraavasta kuvaajasta nähdään, ettei *Power*-toimintatilalla ole vaikutusta voimalinjan hyötysuhteeseen. *Power*-tilassa on mahdollista saavuttaa suurempi pyörimisnopeus ja tällöin noin 20 Nm:n vakiokuormituksella myös parempi hyötysuhde, silti hyötysuhde riippuu vakiokuormalla ainoastaan pyörimisnopeudesta. Jos pyörimisnopeus on vakio, toimintatilalla ei ole vaikutusta hyötysuhteeseen. Kuvaajassa 6. molempien toimintatilojen hyötysuhdekäyrät on esitetty päällekkäin.



Kuvaaja 6. Hyötysuhde kierrosnopeuden funktiona vakiokuormalla

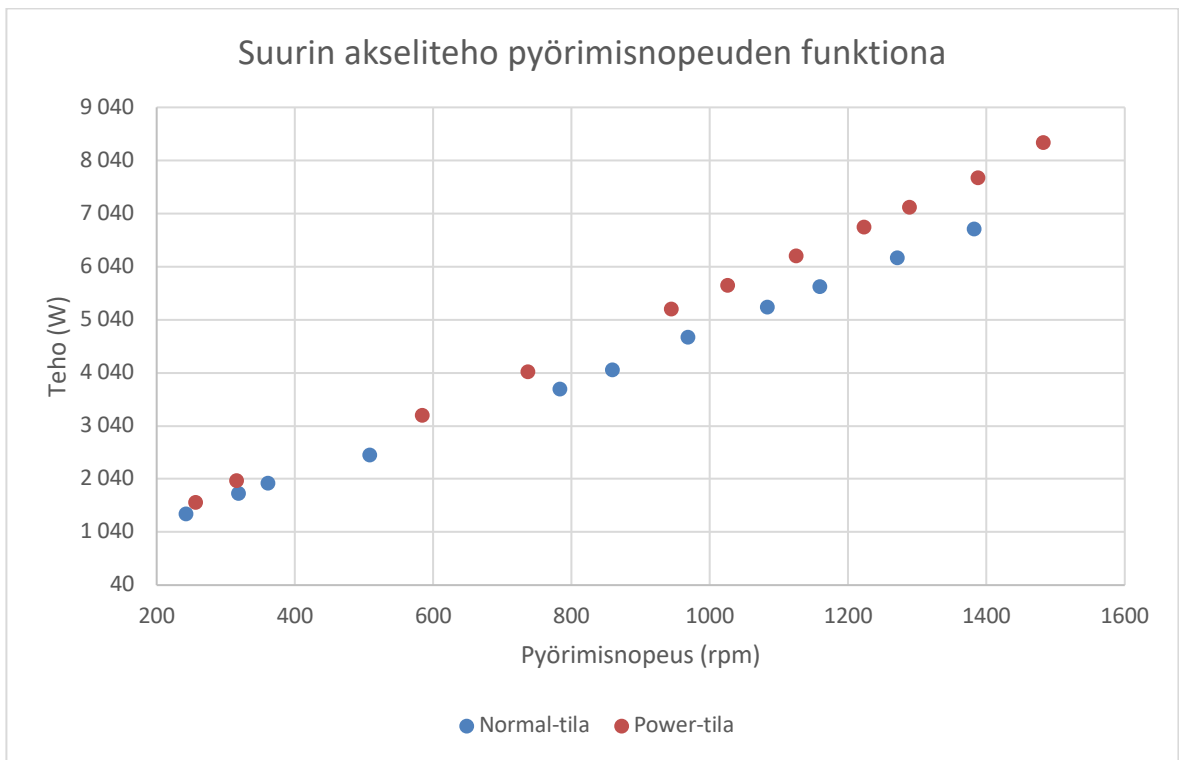
Hyötysuhteen sijaan mielenkiintoista *Power*-toimintatilassa on koneen tuottama maksimi- vääntömomentti. Propulsio tuottaa koko kierrosnopeusalueella suuremman vääntömomentin tilaa käytettäessä. Myös teknisissä tiedoissa luvattu 60 Nm:n vääntömomentti saavutetaan. Suurin vääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona sekä *Normal*-, että *Power*-toimintati- loissa on esitetty kuvaajassa 7.



Kuvaaja 7. Suurin vääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona

On kuitenkin oleellista huomata, että kuvaajassa 2. esitetty hyötysuhde kuormamomentin funktiona paljastaa todennäköisen syyn erillisen *Power*-tilan luomiselle: hyötysuhde enimmäiskuormalla on huono ja toisaalta hyötysuhde paranee kierrosnopeuden kasvaessa. Tästä on helppo päätellä, että potkuri tulisi mitoittaa suhteellisen loivaksi mahdollistaen koneen kierrosalueen taloudellisen yläpään hyödyntämisen.

Power-toimintatilan mahdollistaessa koko kierrosalueella suuremman enimmäisvääntömomentin ja lisäksi suuremman enimmäiskierrosnopeuden on ilmeistä, että myös järjestelmän maksimiteho saavutetaan nimenomaan *Power*-tilassa. Kuvaajassa 8. on esitetty suurin mitattu akseliteho pyörimisnopeuden funktiona sekä *Normal*-, että *Power* -toimintatiloissa.



Kuvaaja 8. Suurin akseliteho pyörimisnopeuden funktiona

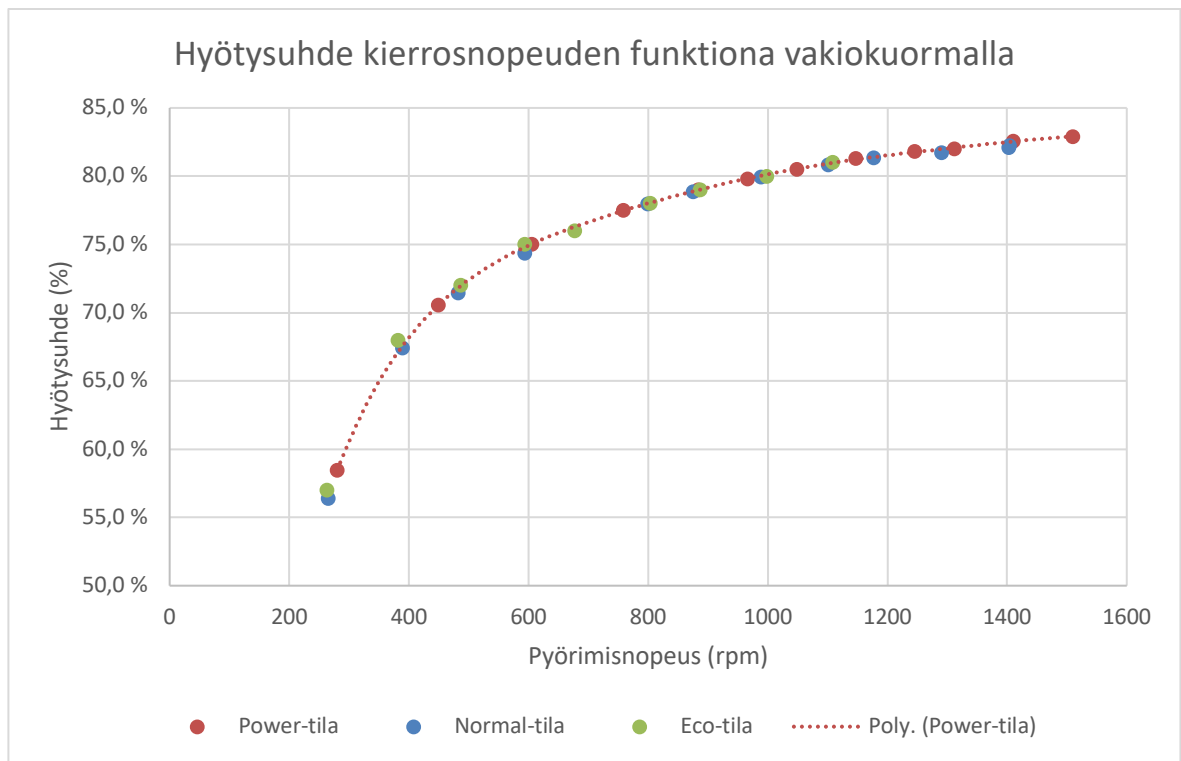
5.4 Kolmas mittaussarja – suorituskyky Eco-tilassa

Toimintatila: Eco, teholähde: vakiojännite 50 VDC

Kolmannessa mittaussarjassa toistettiin taas ensimmäisen ja toisen sarjan mittaukset, mutta tällä kertaa toimintatilana oli *Eco* (ECO). Hallintalaitteen manuaalin mukaan *Eco*-tila rajoittaa moottorin huipputehoa. Tilan toiminnasta ei kerrota muuta. Olisikin erikoista, jos toimintatila kykenisi tuottamaan paremman hyötysuhteen.

Ensimmäisenä mittaussarjasta tarkasteltiin juuri hyötysuhdetta ja hyvin nopeasti kävi selväksi, ettei tälläkään toimintatilalla ole vaikutusta voimalinjan hyötysuhteeseen, kun pyörimisnopeus ja kuormamomentti vakioidaan. Myös *Eco*-tilasta piirrettiin hyötysuhdekäyrä kierrosnopeuden funktiona noin 20 Nm:n kuormalla. Kaikkien kolmen toimintatilan hyötysuhdekäyrät on esitetty yhdessä kuvaajassa 9. Huomataan, ettei toimintatila itsessään vaikuta voimalinjan hyötysuhteeseen.

Mittausten aikana havaittiin, ettei voimalinja saavuta *Eco*-toimintatilassa edes *Normal*-toimintatilan 1 400 rpm -kierrosnopeutta, vaan huippukierrosnopeus jää reilut 1 100 rpm -tasolle. Muun muassa näin *Eco*-tila rajoittaa huipputehoa, kuten manuaalissa luvattiin.

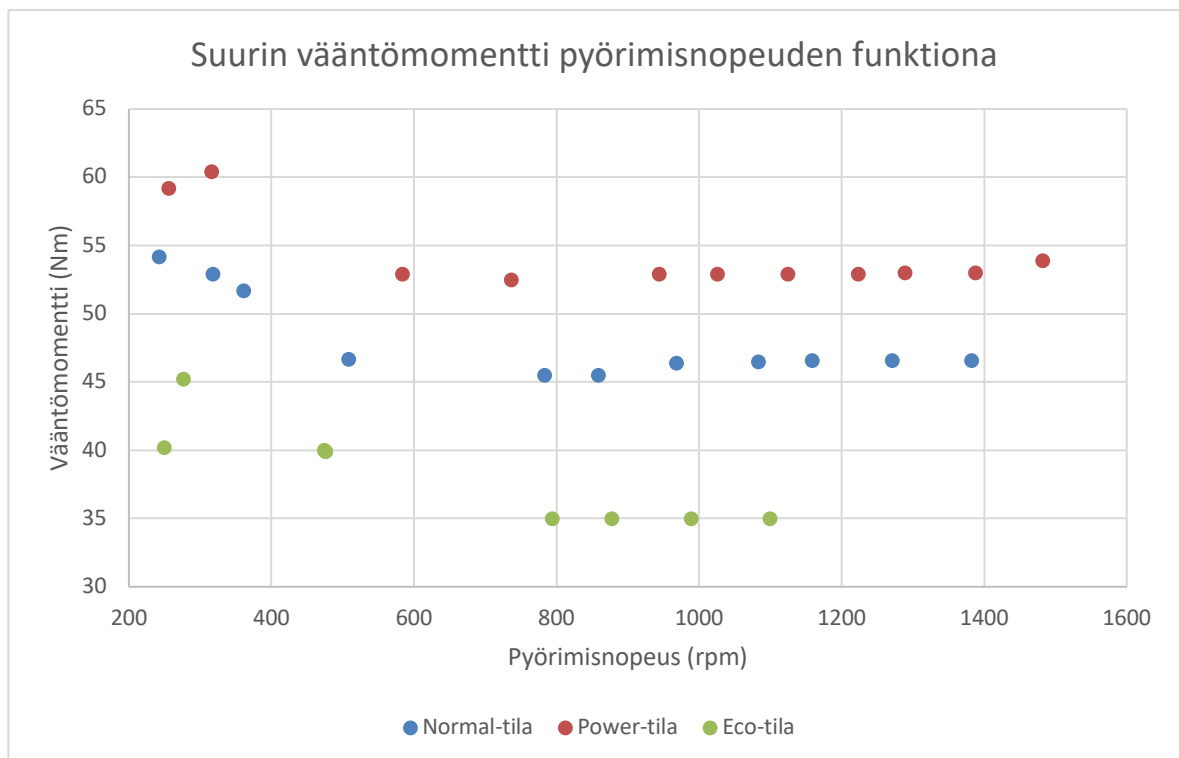


Kuvaaja 9. Hyötysuhde kierrosnopeuden funktiona vakiokuormalla

Mielenkiintoista on, toimiiko *Eco*-tila vain kierrosnopeusrajoittimena vai rajoitetaanko myös maksimivääntömomenttia läpi kierrosalueen. Tätä mitattiin kuten muillakin toimintatiloilla, eli pyrittiin hakemaan jokaisella mitatulla kierrosnopeudella suurin vääntömomentti, jolla propulsiokone jaksoi ylläpitää tasaista pyörimisnopeutta.

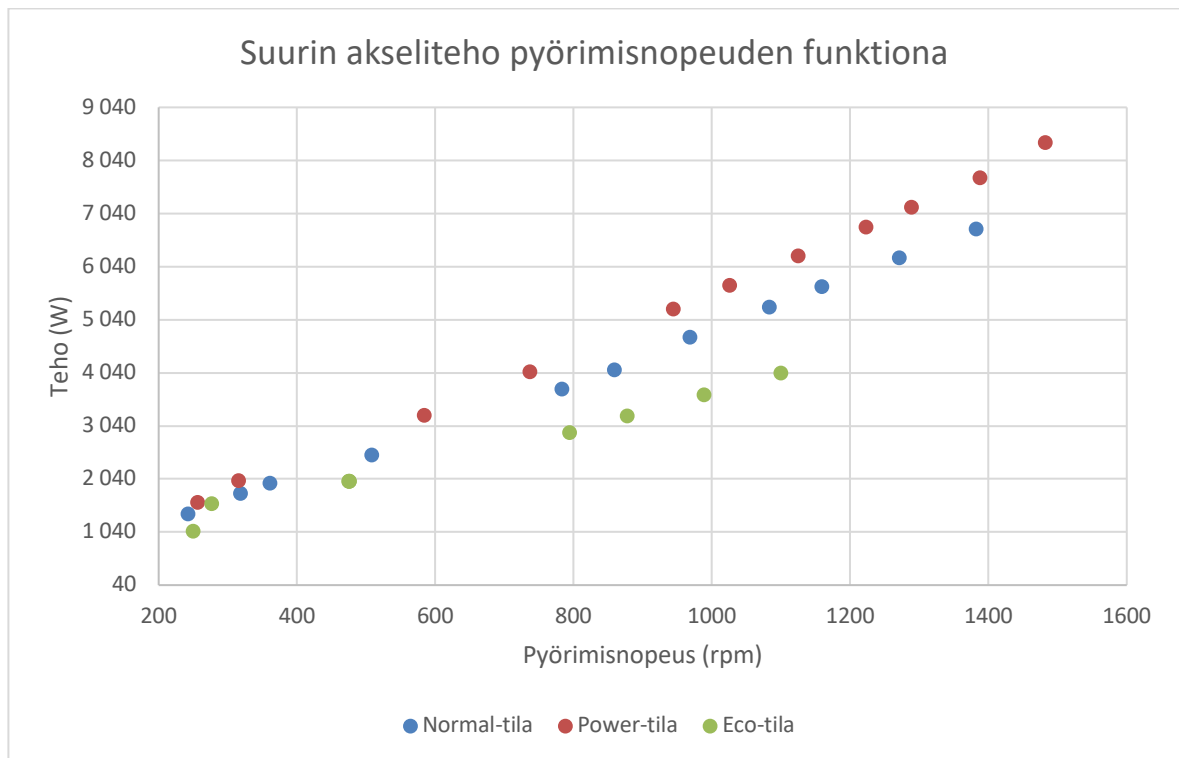
Vaikuttaa siltä, että maksimivääntömomenttia on *Eco*-tilassa rajoitettu koko kierrosalueella. Koska voimalinja ei mittaa vääntömomenttia suoraan, on rajoituksen perustuttava johonkin muuhun parametriin. Yksi mahdollisuus on, että taajuusmuuttajalta koneelle syötettävä vaihevirta on rajoitettu 200 ampeerin, sillä vääntömomenttirajoitus saavutetaan 800–1 100 rpm-kierrosalueella hyvin lähellä tätä 200 ampeerin virtarajaa. Tätä pienemmällä kierrosnopeudella virtaraja tosin ylittyy kymmenestä kahteenkymmeneen ampeeria.

Kuvaajassa 10. on esitetty suurin vääntömometti pyörimisnopeuden funktiona kaikissa kolmessa toimintatilassa. Huomataan, että *Eco*-toimintatilassa vääntömomenttia on selvästi rajoitettu koko kierrosalueella. Suurin vääntömometti 45 Nm saavutetaan vajaalla 300 rpm pyörimisnopeudella ja 800–1 100 rpm suurin vääntömometti on luonnottoman tasainen 35 Nm.



Kuvaaja 10. Suurin vääntömometti pyörimisnopeuden funktiona

Propulsion huipputeho *Eco*-tilassa saavutetaan 1 100 rpm kierrosnopeudella ja 35 Nm:n vääntömomentilla ollen lähes tasan neljä kilowattia, eli alle puolet nimellisestä ja suurimmasta akselitehosta *Power*-toimintatilassa. Kuvaajasta 11. nähdään, että *Eco*-toimintatila rajoittaa voimalinjan tehoa koko kierrosalueella, mutta erityisesti suuremmilla pyörimisnopeuksilla. Kyseessä on siis tehonrajoitin, joka rajoittaa sekä kierrosnopeutta että vääntömomenttia.



Kuvaaja 11. Suurin akseliteho pyörimisnopeuden funktiona

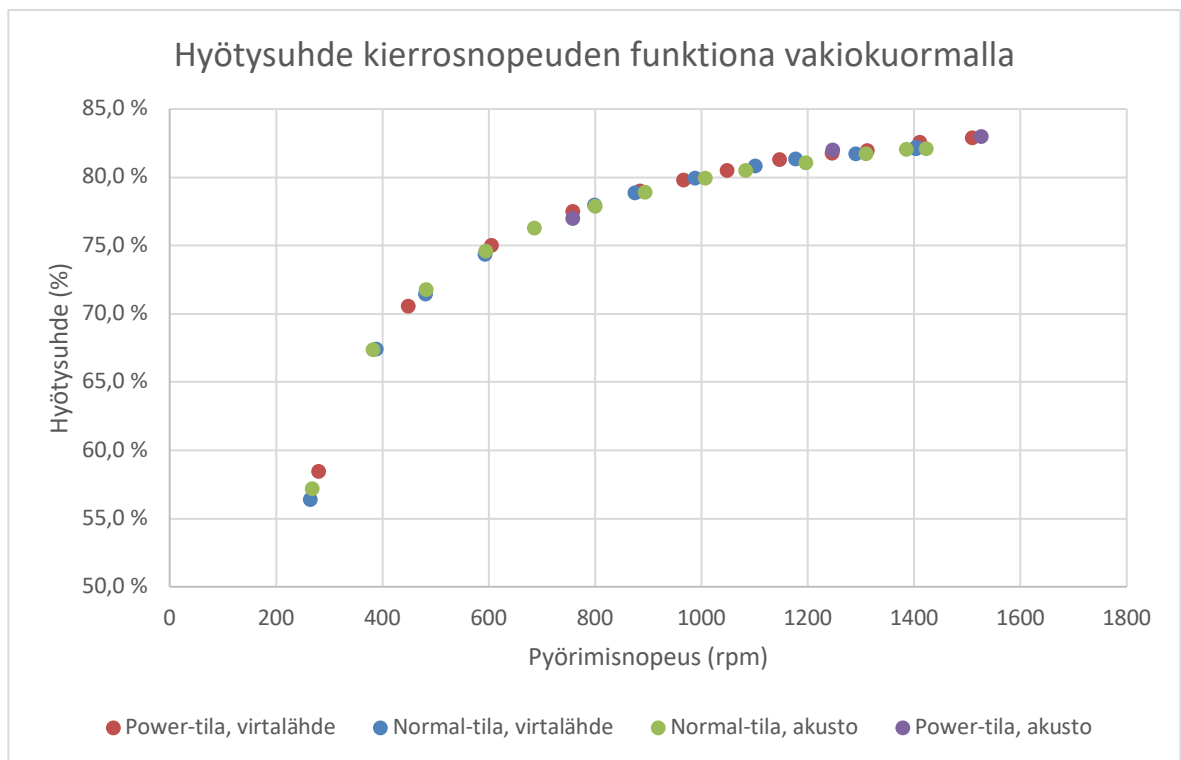
5.5 Mittaussarjat neljä ja viisi – teholähteenä akusto

Toimintatila: Normal ja Power, teholähde: akusto, täysi lataus aloitettaessa

Neljännessä mittaussarjassa toistettiin jälleen kerran ensimmäisen sarjan mittaukset, mutta tehoa syötettiin DC-virtalähteen sijaan AGM-akustosta. Käytännön erona olosuhteissa on virtalähteen erilainen impedanssi, akuston lähdejännite laskee aina kuormituksen kasvaessa ja akuston luovuttaessa energiaa. Esimerkiksi mitattaessa suurinta vääntömomenttia DC-jännite voimalinjalta mitattuna oli virtalähteen kanssa 50,5 voltia, kun se samalla 1 200 rpm pyörimisnopeudella akuston kanssa oli vain 46,88 V.

DC-virtalähde pyrkii pitämään jännitteen vakiona, mutta toisaalta akuston kyky reagoida nopeisiin tehomuutoksiin on parempi. Akuston kanssa on kuitenkin selvää, että jännite laskee aina kuormituksen kasvaessa ja akuston jäljellä olevan kapasiteetin pienentyessä. Näissä mittauksissa ei ole myöskään tarkasteltu varsinaisia muutostiloja, vaan systeemin toimintaa mittausparametrien stabiloiduttua jokaisen muutoksen jälkeen. Staattisen tilan suorituskyky on myös sovelluskohteen kannalta olennaisinta, sillä tyypillisesti veneellä ajetaan pitkiä aikoja likimain vakionopeudella ja vakiokuormituksella.

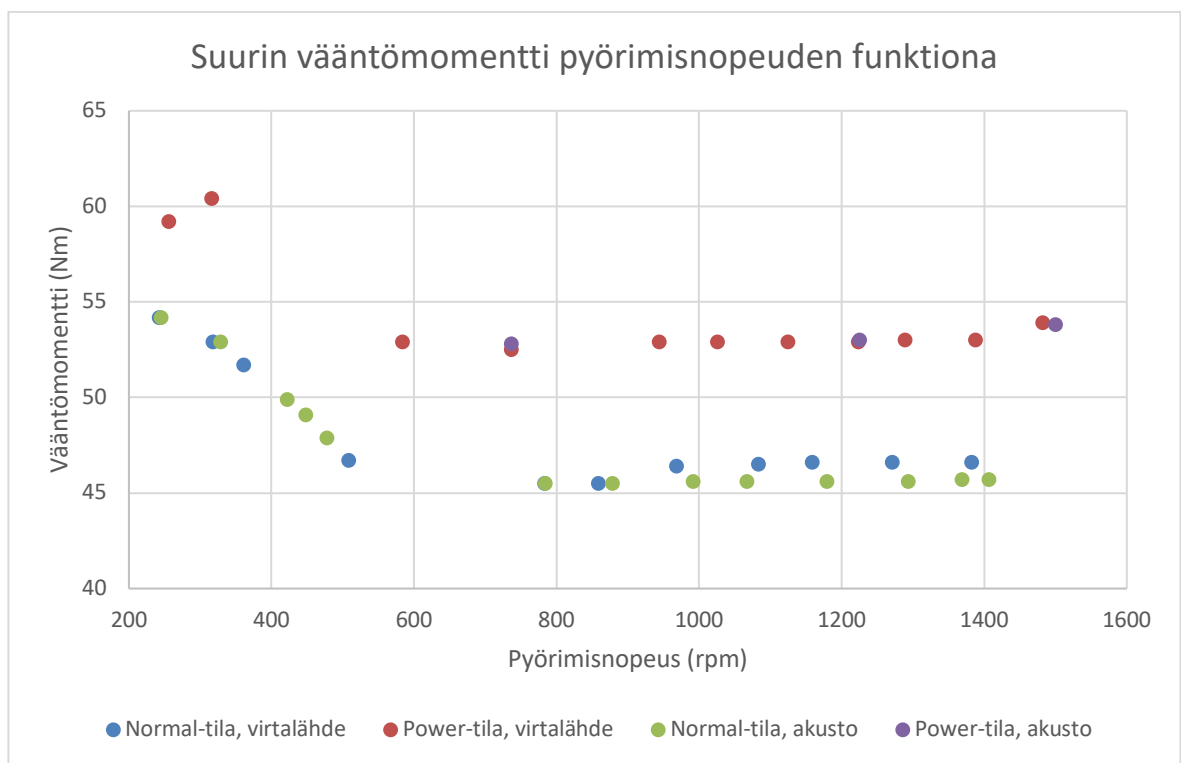
Voimalinjan hyötysuhteen kannalta ei vaikuta olevan havaittavaa merkitystä, käytetäänkö teholähteenä DC-virtalähdettä vai akustoa. Jos konetta ajettaisiin sähköverkon ulottuvilla, olisi kokonaishyötysuhde toki parempi ilman välissä olevaa akustoa, jonka toimintaan liittyy aina energiahäviöitä. Erityisesti lyijyakuston hyötysuhde on täyteen saakka ladattaessa lämpötilasta ja lataustehosta riippuen melko heikko [29]. Akuston sisäisiä häviöitä ei kuitenkaan huomioida tässä hyötysuhdetarkastelussa. Kuvaajassa 12. akustolla ajettut mittaukset on piirretty aiempien mittaussarjojen kanssa samaan koordinaatistoon ja havaitaan, ettei merkittävää eroa synny.



Kuvaaja 12. Hyötysuhde kierrosnopeuden funktiona vakiokuormalla, teholähteenä akusto

Myöskään suurimman vääntömomentin mittauksessa ei pääasiassa ole havaittavaa eroa eri virtalähteiden välillä. *Normal*-toimintatilassa yli 900 rpm kierrosnopeusalueella havaitaan noin yhden newtonmetrin ero huippuvääntömomentissa, DC-virtalähteen eduksi. Tämä selittyy kuitenkin mittausteknisellä seikalla, sillä suurinta vääntömomenttia ei haettu yhtä tarkasti, kuin DC-virtalähteellä tehdyissä mittauksissa. Näin ollen suurinta vääntömomenttia on pidettävä mittaustarkkuuden rajoissa samana, virtalähteestä riippumatta.

Power-tilan mittausten välillä eroa ei käytännössä ole. *Power*-tila mitattiin akustolla vain kolmella pyörimisnopeudella, mutta mittauspisteet sattuvat samalle käyrälle virtalähteellä mitattujen kanssa. Akustolla tehdyt mittaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman lyhyinä, jotta akuston tyhjenemisen aiheuttama vääristymä minimoitaisiin. Akuston lataaminen täyteen ennen jokaista mittausta ei olisi ollut käytännössä mahdollista. Suurin vääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona vertailuna akuston ja virtalähteen välillä on esitetty kuvaajassa 13.



Kuvaaja 13. Suurin vääntömomentti pyörimisnopeuden funktiona, akusto

Vääntömomentin mittauksen aikana *Power*-toimintatilassa ja akustoa virtalähteenä käyttäen DC-jännitteiksi mitattiin taulukkoon 6. listatut arvot. Kun konetta ajetaan täydellä teholla, laskee akuston syöttämä jännite jo lähes kolme voltia alle nimellisen, vaikka akuston varustila olisikin lähes täysi. Vastaavasti sarjan ensimmäisessä mittauksessa ajettaessa konetta noin 300 rpm kierrosnopeudella ja 10 Nm:n kuormitusmomentilla oli akuston propulsiolle syöttämä jännite peräti 52 voltia, eli neljä voltia yli akuston nimellisen 48 voltin jännitteen.

Taulukko 6. DC-syöttöjännite, Power-toimintatila, täysi akusto

Kierrosnopeus (rpm)	DC-syöttöjännite (V)	Akseliteho (W)
737,2	47,73	4 076
1225,2	46,29	6 800
1500,0	45,33	8 451

Mahdollinen jännitteen vaihteluväli lyijyakuston kanssa on enimmillään jopa 20 volttia. Tyypillisen yksittäisen 12-voltin AGM-akun jännite voi nimittäin vaihdella hurjimmillaan 10 ja 15 voltin välillä. Kun akkuja on neljä sarjassa, voi jännite vaihdella tällöin jopa 40:n ja 60:n voltin välillä. Kun pitkälle purettua akustoa kuormitetaan voimakkaasti, on jännite alimmillaan ja vastaavasti, kun lähes täyttä akusta ladataan, on jännite korkeimmillaan. Viimeisessä mittaussarjassa selvitetäänkin propulSION käyttäytymistä erityisesti matalammilla jännitteillä.

5.6 Kuudes mittaussarja – tunnin mittainen ajo akustolla

Toimintatila: Normal, teholähde: akusto, täysi lataus aloitettaessa

Kuudennessa mittaussarjassa pyrittiin suorittamaan tunnin mittainen, veneelle tyypillistä matka-ajoa vastaava, testiajo AGM-akustoa virtalähteenä käyttäen. Akusto ladattiin täyteen ennen ajosuoritusta. On huomioitava, että uusi akusto on yhä niin sanotussa sisäänajovaiheessa (formatting), eli paras suorituskyky ei ole välttämättä käytettävissä [7, s. 428]. Toisaalta parhaan suorituskyvyn saavuttamisen jälkeen akuston suorituskyky alkaa jo heikentyä akuston ikääntymisen myötä, vaikkakin alkuun hitaasti.

Ajo suoritettiin tasaisella noin 1200 rpm -kierrosnopeudella ja 40 Nm:n kuormituksella, joiden arvioitiin olevan lähellä käytännössä mielekästä matkanopeutta oikein sovitetulla potkurilla. Mittausohjelmisto viritettiin tallentamaan korkealla näytteenottotaajuudella aina sadan sekunnin välein, jotta muutoksia voidaan tarkastella yksityiskohtaisesti, mutta samalla tallenteen tiedostokoko pysyy kohtuullisena pidemmästä mittauksen kestosta huolimatta. Saadusta mittaustallenteesta poimittiin datapisteet jokaiselta korkean näytteenottotaajuuden pätkältä ja ne vietiin ulos ohjelmistosta CSV-tiedostona, joka tuotiin suoraan *Excel*-taulukkolaskentaohjelmistoon.

5.6.1 Akuston kapasiteetti

Akustoa purettiin kokeen ajan lähes 6,1 kW:n teholla ja akustosta otettiin voimalinjalle energiaa noin 5,3 kWh. Akkujen valmistaja ilmoittaa yhden akun kapasiteetiksi 153,5 Ah, kun loppujännite on 10,5 V ja akku puretaan yhdessä tunnissa [8]. Akun pitäisi siis pystyä 25 °C lämpötilassa antamaan tunnin ajan 153,5 A:n virtaa ennen kuin jännite laskee 10,5 volttiin. Kokeen aikana koko akuston syöttämä jännite oli keskimäärin 45,5 voltia ja 10,5 voltin akkukohtaisen jännitteen raja alitettiin noin 51 minuutin kohdalla kokonaisjännitteen ollessa noin 42,0 V. Noin minuuttia myöhemmin voimalinja pysähtyi alijännitteen takia.

Kokeen aikana akustoa purettiin keskimäärin 134,5 A:n virralla ja suurimmillaankin vain 147 ampeerilla, mutta tunnin tavoiteajasta jäätin noin kahdeksan minuuttia, vaikka laskennallisesti aikatavoitteen olisi pitänyt ylittyä. Jännitteen mittausta oli taajuusmuuttajan päässä, joten akkukaapeleiden häviöitä ei ole huomioitu jännitteessä eikä siten myöskään tehossa ja energiassa. Myös lämpötila oli hieman alhaisempi kuin datalehden ilmoittamissa testiolosuhteissa sähkökonehallin normaalin lämpötilan ollessa noin 20 °C.

Kyseisten akkujen datalehdessä on taulukko myös jatkuvalle teholle eri kuormitusajoilla ja loppujännitteillä. Samalle 10,5:n voltin akkukohtaiselle jännitteelle, eli 1,75:n voltin kennojännitteelle, ilmoitetaan tunnin kuormitusajalla WPC-arvo 301 wattia. Lyhenne WPC tulee sanoista Watts Per Cell, eli wattia per kenno [30]. Yhdessä akussa on kuusi kennoa, joten yhdestä akusta voidaan ottaa tehoa 1 806 W ja neljästä akusta yhteensä 7 224 W, eli noin 7,2 kW. Kun tätä vakiotehoa otetaan tunnin ajan, saadaan energiaksi 7,2 kWh.

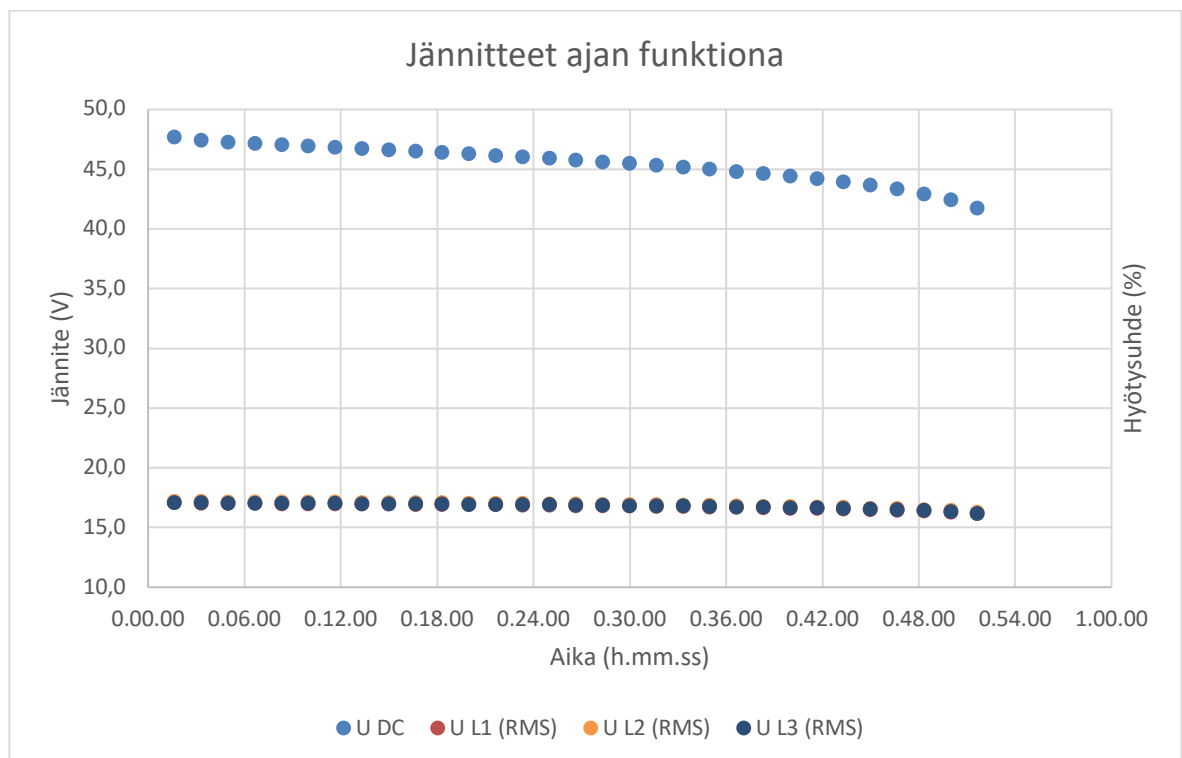
Mittausdataa karkeasti integroimalla akustosta voimalinjalle saatiin energiaa vain noin 5,3 kWh. Koeajossa mitattu akkukapasiteetti on siten vain noin kolme neljännessä datalehdessä ilmoitetusta. Tulos on akkukeston osalta pettymys. Edes akkukaapeleissa tapahtuvat häviöt, akkujen sisäänajovaihe ja sähkökonehallin noin viisi astetta alhaisempi lämpötila eivät yksin selitä kapasiteettieroja.

Yksi mahdollinen virhelähde on kuitenkin myös mahdollinen ero käytetyssä latausjännitteessä ja absorptioajassa. Olisikin mielenkiintoista tutkia, miten hyvin suljettujen lyijyakkujen kapasiteetista datalehdissä annetut ilmoitukset yleensä pätevät ja kuinka suurta hajonta akkuyksilöiden välillä on.

5.6.2 Voimalinjan toiminta

Voimalinjan tuottama akseliteho laski kokeen aikana vain noin yhden prosentin, eli voimalinjaa ajettiin vakiovirran sijaan likimain vakioteholla. On loppukäyttäjän kannalta miellyttävää havaita, että voimalinjan tuottama teho pysyy tietyllä kaukohallintalaitteen asennolla likimain vakiona, vaikka akuston jännite laskee. Eihän myöskään polttoainetankissa olevan polttoaineen määrällä ole vaikutusta polttomoottorin tehoon, vaikka kaukaa haettuna tankki hiljalleen keveneekin ja parantaa siten hieman kulkuneuvon suorituskykyä.

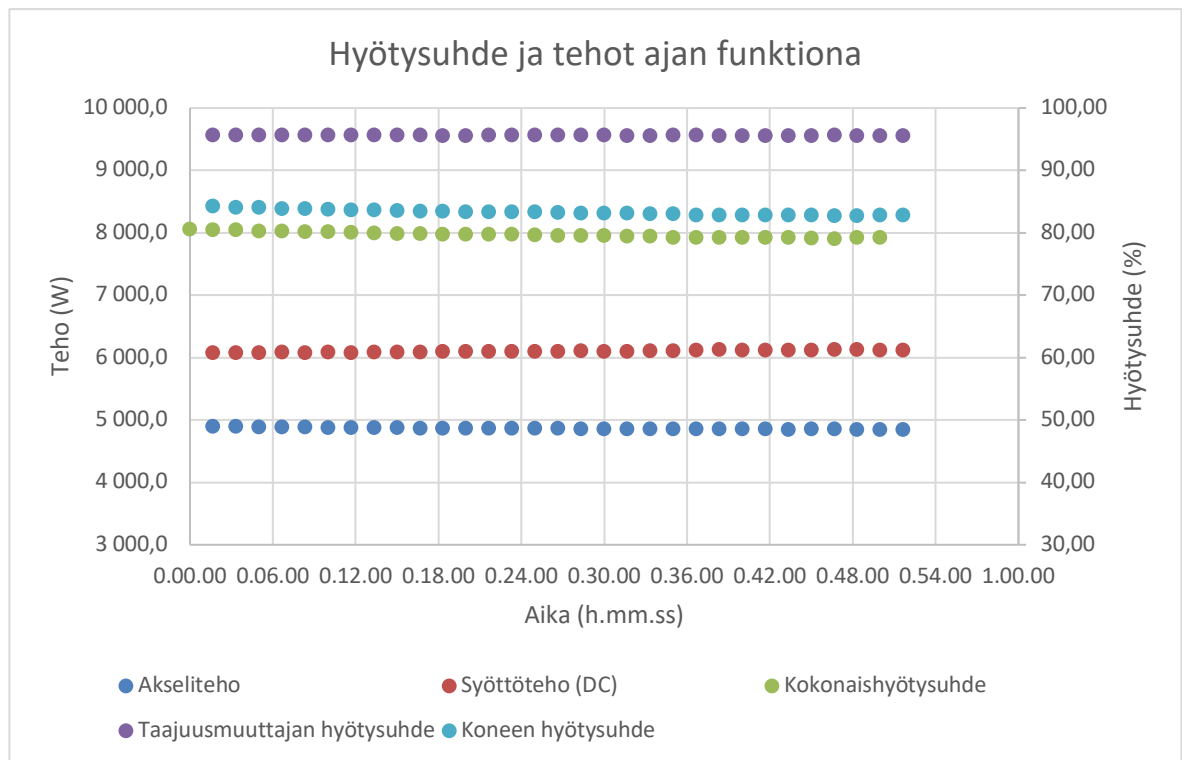
Kuvaajaan 14. on piirretty koeajon aikana mitatut jännitteet. Kuvaajasta nähdään akuston jännitekäyrä, joka on jyrkimmillään ääripäistään ja keskialueella taas lähes lineaarinen. Jännite pienenee ensimmäisen mittauspisteen 47,7 voltista aina 41,7 volttiin, eli kaikkiaan noin 13 %. Samalla huomataan, että taajuusmuuttajan sähkökoneelle syöttämä jännite ei laske samassa suhteessa, vaan pysyy lähes vakiona laskien ajon aikana vain noin 90 mV, eli noin puoli prosenttia. Näin koneen tuottama akseliteho saadaan pidettyä likimain vakiona.



Kuvaaja 14. Jännitteet ajan funktiona, tunnin ajo akustolla

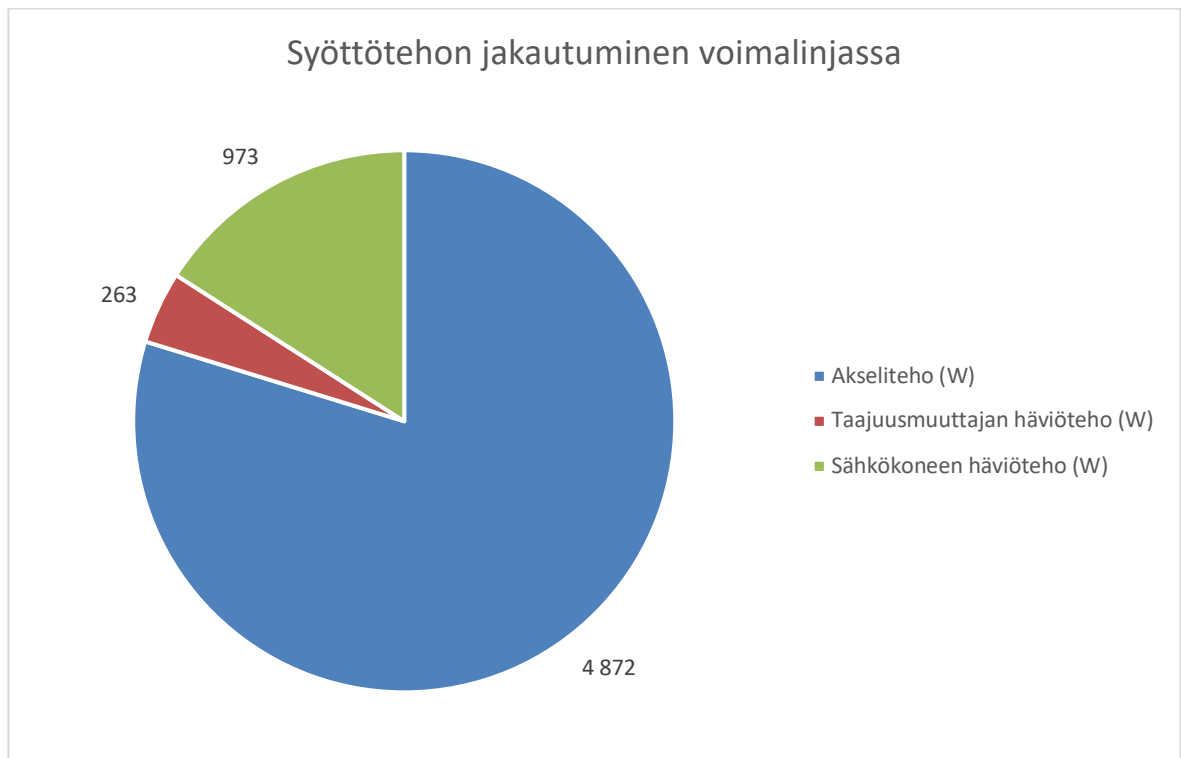
5.6.3 Hyötysuhde

Muutokset voimalinjan hyötysuhteessa ovat vähäisiä. Hyötysuhde heikkenee ajon aikana hieman, todennäköisesti sekä jännitteen alenemisen että mahdollisen lämpenemän seurauksena. Kuvaajasta 15. nähdään, että muutos tapahtuu erityisesti itse sähkökoneen hyötysuhteessa, eikä taajuusmuuttajan hyötysuhde käytännössä muutu. Samaan kuvaajaan piirretyistä tehokäyristä havaitaan, että akseliteho hieman pienenee ja ottoteho akustolta hieman kasvaa heikomman hyötysuhteen myötä. Vaikutus näkyy selvemmin akselitehossa, mutta muutokset ovat pieniä ja käytännössä merkityksettömiä, vain vajaan prosentin luokkaa.



Kuvaaja 15. Hyötysuhde ja tehot, tunnin ajo akustolla

Kuvaajassa 16. on esitetty voimalinjalle syötetyn sähkötehon jakautuminen häviöihin taajuusmuuttajassa sekä itse sähkökoneessa ja hyödylliseksi akselitehoksi. Arvot ovat koko testiajon kaikkien mittauspisteiden keskiarvoja. Kuvaajasta on helppo nähdä voimalinjan kohtuullisen hyvän kokonaishyötysuhteen sekä taajuusmuuttajan selvästi sähkökonetta parempi hyötysuhde.



Kuvaaja 16. Syöttötehon jakautuminen voimalinjassa

5.7 Mittaus 7 – tunnin mittainen ajo laturilla tuetulla akustolla

Toimintatila: Normal, teholähde: akusto ja laturi, täysi lataus aloitettaessa

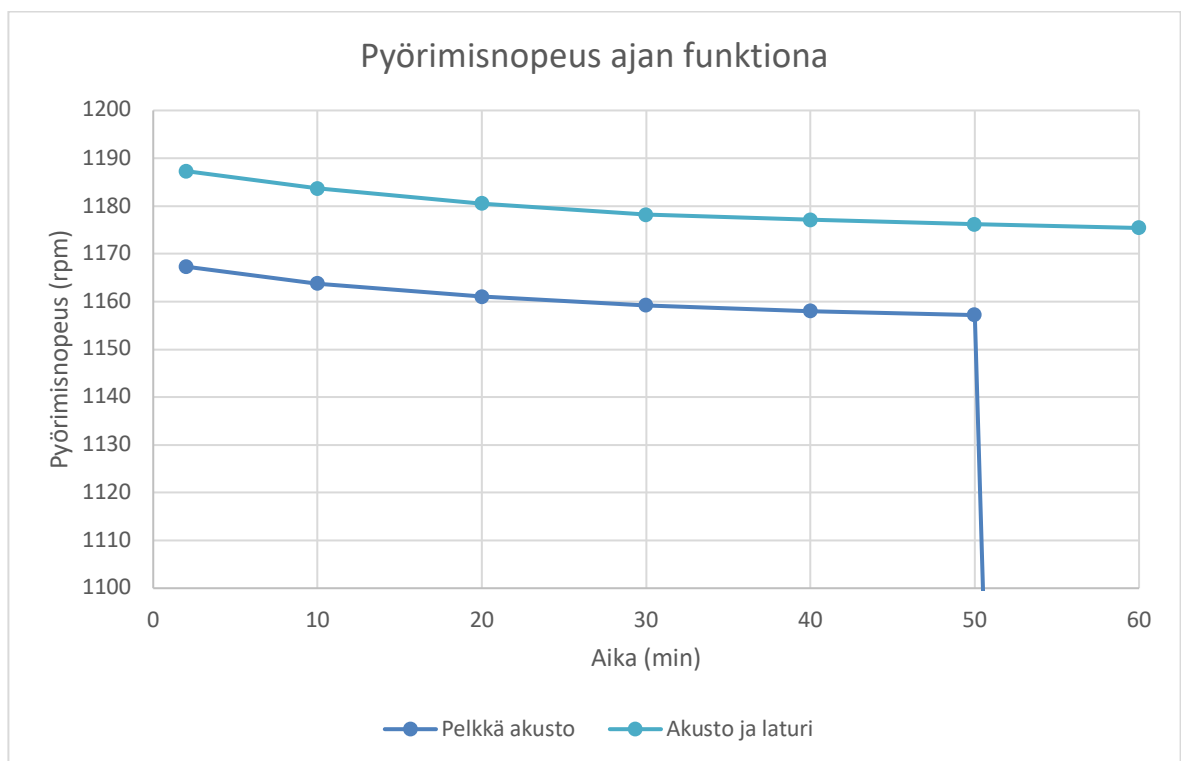
Seitsemännessä mittaussarjassa kuudennen mittauksen tunnin kestävä ajosuorite toistettiin käyttäen akuston rinnalla lopulliseen sovelluskohteeseen mitoitettua *Victron Skylla TG 48 V 50 A* -akkulaturia lataamaan akustoa ajonaikaisesti. Käytännössä tällä pyrittiin simuloimaan tilannetta, jossa akustoa tuetaan ajon aikana erillisellä polttomoottorigeneraattorilla ja maasähkölaturilla lataamalla. Lähtötilanteessa akusto oli taas täyteen ladattu.

5.7.1 Toiminta-aika

Pelkällä akustolla suoritetusta koeajosta poiketen tunnin tavoiteaika saavutettiin tällä kertaa helposti. Koeajon alkuvaiheessa laturi avusti voimalinjaa 49,1 voltin jännitteellä ja 50,2 A:n teholla, eli noin 2,5 kW:n teholla. Laturin nimellisvirran ollessa 50 ampeeria latausteho vaikuttaa lupaavalta. Koeajon loppuvaiheessa tasan tunnin kuluttua aloituksesta lataus tapahtui yhä 47,9 voltin jännitteellä ja 49,9 ampeerin virralla, eli noin 2,4 kW:n teholla.

Voimalinjan DC-jännitteeksi mitattiin tunnin ajon jälkeen yhä samalla kuormituksella 47,7 voltia. Tämä jännite alitettiin pelkällä akulla ajettaessa jo noin kahden minuutin ajon jälkeen. Jännitteen perusteella ajoa olisi voinut jatkaa vielä pitkään ennen voimalinjan pysähtymistä. Energiaa voimalinjalle oli tunnin kohdalla syötetty yhteensä 6,2 kWh ja tästä reilu kolmannes, eli noin 2,4 kWh syötettiin laturilla.

Kuvaajasta 17. nähdään, että pyörimisnopeus hidastuu ajan, käytännössä akuston laskevan jännitteen, funktiona samassa suhteessa riippumatta siitä, tuetaanko voimalinjaa laturilla. Tunnin aikana saatu ero pyörimisnopeudessa on käytännön kannalta merkityksetön noin 10 rpm. Noin 20 rpm ero pyörimisnopeudessa johtuu sekin jännite-erosta: laturilla tuetun akuston syöttämä jännite oli koko ajon ajan noin neljä voltia korkeampi.

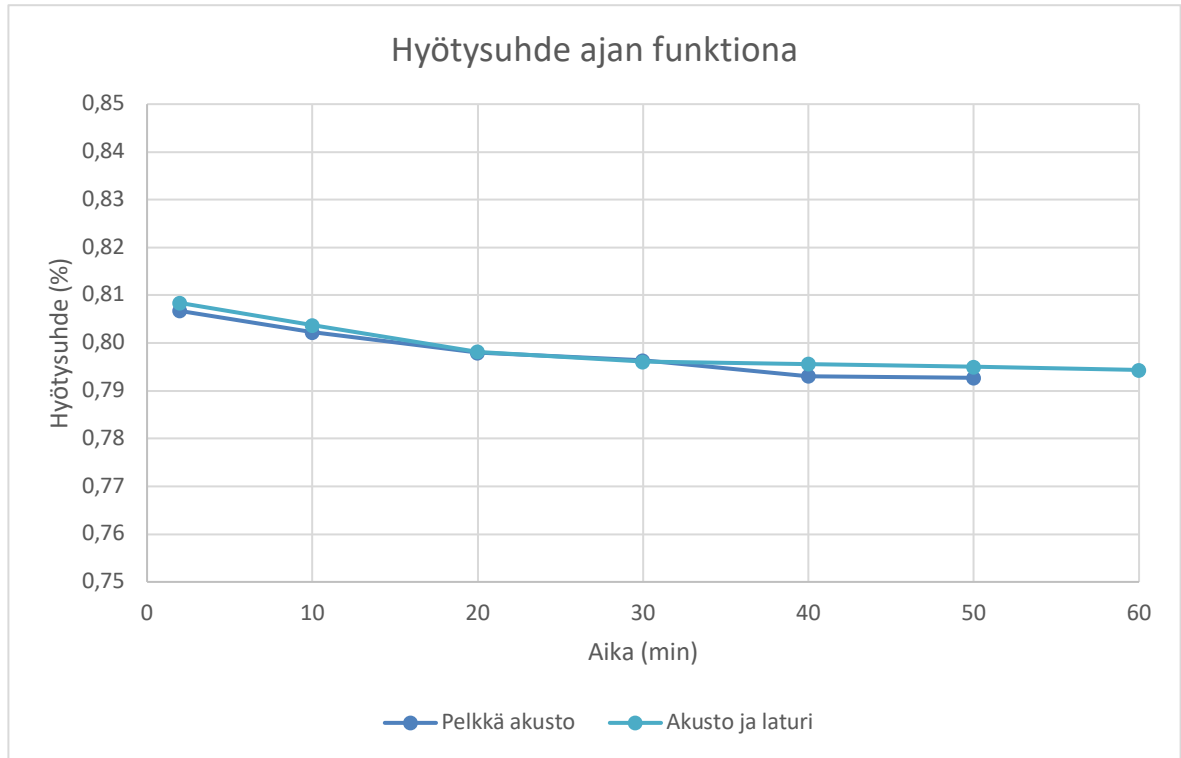


Kuvaaja 17. Pyörimisnopeus ajan funktiona, tunnin ajo akustolla sekä akustolla ja laturilla

5.7.2 Hyötysuhde

Hyötysuhteen kannalta ei ole käytännön merkitystä, ajetaanko voimalinjaa laturilla tuettuna vai pelkällä akustolla. Laturin vaikutus näkyy voimalinjalle ainoastaan hieman korkeampana

jännitteenä, joka teoriassa pienentää virtaa ja sitä kautta resistiivisiä häviöitä. Kuvaajasta 18. kuitenkin nähdään, että laturin vaikutus voimalinjan hyötysuhteeseen on vain prosenttiyksikön kymmenyksiä, joten käytännön merkitystä sillä ei ole. Polttomoottorigeneraattorin hyötysuhde on joka tapauksessa itse sähkövoimalinjaan verrattuna erittäin huono.



Kuvaaja 18 - Hyötysuhde ajan funktiona, tunnin ajo akustolla sekä akustolla ja laturilla

5.8 Mittaus 8 – vajaa akusto

Toimintatila: Power, teholähde: akusto, vajaa lataus

Kahdeksas mittaussarja suoritettiin tilassa, johon järjestelmä jäi seitsemännen mittaussarjan jälkeen. Propulsiokonetta kuormitettiin *Power*-toimintatilassa kolmella tavoitekierronosnopeusalueella: 600, 1 100 sekä 1 500 rpm, joista jälkimmäinen täydellä teholla, eli nopeusvälitsin ääriasennossa. Akusto oli siis tunnin ajon jäljiltä vajaa sekä lämmin ja mittauksella pyrittiinkin mallintamaan suorituskykyä todellisissa olosuhteissa.

Tuloksia verrattiin DC-virtalähteellä ajettuihin vastaaviin toimintapisteisiin, eikä mittausten toistettavuuden ja tarkkuuden rajoissa voida vetää johtopäätöksiä eroista. Saavutettava vääntömomentti ja hyötysuhde ovat linjassa aiemmin saatujen tulosten kanssa. Ero syöttöjännitteessä on suurin sarjan viimeisessä mittauksessa, kun haetaan maksimitehoa. Tällöin DC-jännite on 44,4 voltia ja voimalinja tuottaa 8,3 kW:n akselitehon. Vajaa akusto näkyy pienempänä jännitteenä, minkä vaikutuksia on analysoitu tarkemmin mittauksessa 12.

5.9 Mittaus 9 – käynnistymismomentti Normal-tilassa

Toimintatila: Normal, teholähde: akusto, vajaa lataus

Mittauksia jatkettiin vajaalla akustolla. Yhdeksännessä mittaussarjassa määritettiin niin sanottu käynnistymismomentti, eli suurin kuormamomentti, jolla propulsiokone jaksoi lähteä liikkeelle nollanopeudesta, eli paikoiltaan. Toimintatilana käytettiin *Normal*-tilaa. Suurin kuormaohje, jolla propulsiokone jaksoi käynnistyä, oli 33 %, yhden prosenttiyksikön tarkkuudella. Koneen saavutettua stabiili nopeus vääntömomentiksi mitattiin 42,1 Nm. Tästä voidaan karkeasti päätellä, että propulsiokoneen käynnistymismomentti on samaa suuruusluokkaa kuin koneen suurin vääntömomentti työkiirroksilla.

Ero käynnistymismomentissa verrattuna vastaavaan polttomoottoriin on merkittävä, joskaan käytännön merkitys ei ilmene normaaleissa käyttötilanteissa ja toisaalta polttomoottorin kanssa propulsiojärjestelmässä on lähes aina jonkinlainen kytkin. Nollanopeuden vääntömomentilla voi kuitenkin olla merkitystä tilanteessa, jossa potkuriin on takertunut vierasesine tai potkuria ympäröi esimerkiksi jäälohkareita. Suuri käynnistymismomentti voi olla myös riski. Huolto- ja korjaustöissä on huomioitava, että esimerkiksi jumiutuneeseen akseliin voi edelleen kohdistua vääntömomentti, joka saa akselin pyörimään, kun este poistetaan.

5.10 Mittaus 10 – käynnistymismomentti Power-tilassa

Toimintatila: Power, teholähde: akusto, vajaa lataus

Kymmenennessä mittaussarjassa toistettiin yhdeksännessä mittaussarjan mittaukset, mutta toimintatilana käytettiin *Power*-tilaa. Kone käynnistyi nyt 32 % kuormaohjeella, eli prosenttiyksikön pienemmällä kuormalla kuin edellisessä mittaussarjassa. Ero selittynee sillä, ettei

akustoa ladattu välissä, vaan akusto oli taas edellistä mittausta vajaampi. Vaikuttaisi siltä, ettei *Power*-tila vaikuta propulsiokoneen käynnistymismomenttiin.

5.11 Mittaus 11 – tunnin mittainen ajo toistettuna

Toimintatila: Normal, teholähde: akusto ja laturi, täysi lataus aloitettaessa

Yhdessätoista mittaussarjassa toistettiin kuudennen mittaussarjan tunnin ajo. Tällä kertaa ajo myös videoitiin propulsiokoneen käyttöpaneelin ilmoitusten tallentamiseksi. Jo heti ajon alussa DC-jännitteen ollessa noin 47,8 V akkumittarissa paloi enää yksi kolmesta vihreästä valosta. Lisäksi paloi vihreä potkurin pyörimisestä kertova valo. Akustoa purettiin tässä vaiheessa noin 6,1 kW:n teholla.

Punainen tyhjästä akusta varoittava merkkivalo alkoi vilkkua ensimmäisen kerran jo noin 16 minuutin ajon jälkeen. Samalla myös akkumittarin vihreä palkki muuttui keltaiseksi. Akuston syöttämä jännite oli tällöin 47,38 V. Seuraava muutos merkkivaloissa tapahtui vasta noin 48 minuutin ajon jälkeen. Voimalinjan toimintatila pysyi käytännössä vakiona tämän noin puolentunnin ajon aikana. Nyt DC-jännite oli enää 44,8 V.

Lähes tasan tunnin ajon jälkeen syttyi punainen vikatilasta kertova merkkivalo, jännitteen ollessa noin 42,9 V. Tällä kertaa akustosta saatiin purettua energiaa noin 6,4 kWh ennen akkukohtaisen jännitteen laskemista 10,5 volttiin, mikä on noin 1,1 kWh enemmän kuin mitauksessa kuusi, jossa tunnin ajoa yritettiin ensimmäisen kerran. Tämä selittynee ainoastaan akuston sisäänajon edistymisellä sekä tällä kertaa varmasti täysin loppuun saakka ehtineellä latauksella. On hyvä muistaa, että lyijypohjaisten akkujen aivan täyteen lataaminen vaatii aina vähintään 14 tuntia latausaikaa [29].

Voimalinja pysähtyi alijännitteeseen yhden tunnin ja kolmen minuutin ajon jälkeen. DC-syöttöjännite juuri ennen voimalinjan pysähtymistä oli noin 41,3 volttia. Parannusta edelliseen yritykseen tuli noin 11 minuuttia. Akuston datalehden arvoista jäätin kapasiteetin osalta enää noin 800 Wh, mikä on reilut kymmenen prosenttia nimellisestä kapasiteetista. Tässä lukemassa on myös akkukaapeleiden häviöt, joiden suuruudeksi voidaan approksimoida noin 35 watin häviöteho, kun jännitteenaleneman akuston ja taajuusmuuttajan välillä tiedetään olevan noin 0,25 volttia DC-virran ollessa noin 140 ampeeria. Häviöiden huomioiden jälkeen on todettava, että noin 10 % akuston kapasiteetista jää yhä saavuttamatta.

5.12 Mittaus 12 – voimalinjan ääri- ja rajatilanteet

Toimintatila: Power tai Normal, teholähde: DC-virtalähde

Kahdennessatoista ja viimeisessä mittaussarjassa kokeiltiin koneen ääri rajoja säätämällä DC-teholähteen jännitettä sekä mittaamalla koneen huipputeho ja simuloimalla niin sanottua crash-stop-tilannetta, jossa tehovalitsin käännetään kerralla edestä taakse.

5.12.1 Ensimmäinen mittaus, jänniterajojen hakeminen

Sarjan ensimmäisessä mittauksessa propulsiokone asetettiin pyörimään tasaisella 600 rpm tavoitenopeudella ja 10 Nm:n kuormalla. Alkutilanteen mitatut arvot olivat vastaavasti 605,1 rpm sekä 9,8 Nm. Propulsiolle syötettiin DC-teholähteellä systeemin nimellisjännitettä 48 V ja jännitteeksi mitattiin taajuusmuuttajan päässä 48,7 V. Tällä jännitteellä merkkivalopaneelin kolmesta palkista vain yhdessä paloi vihreä valo. Ohjekirjan mukaan tämä tarkoittaa $\pm 50\text{--}60\%$ jännitettä [31]. Ilmaus on jokseenkin epämääräinen.

Jännitettä pudotettiin seuraavaksi yhdellä voltilla mitattuun arvoon 47,7 V, eikä tällä ollut vaikutusta propulsio merkkivaloihin tai toimintaan. Havaittiin, että taajuusmuuttaja kompensoi laskeneen jännitteen ottamalla vastaavasti isomman DC-virran. Virta kasvoi mitattusta 17,5 ampeerista 17,8 ampeeriin.

Jännitettä laskettiin jälleen, nyt mitattuun 46,7 volttiin. Virta kasvoi 18,2 ampeeriin, mutta muuta vaikutusta ei mittauskäyristä ole nähtävissä. Sen sijaan merkkivalopaneelin vihreä akkupalkki vaihtoi värinsä oranssiksi ja erillinen tankkauspistoolin kuvakkeella varustettu merkkivalo syttyi punaisena. Ohjekirjan mukaan tämä tarkoittaisi $\pm 40\text{--}50\%$ jännitettä [31]. Merkkivalopaneelin näkymä tässä vaiheessa on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Merkkivalopaneeli, kun jännite ohjekirjan mukaan $\pm 40\text{--}50\%$

Tämän jälkeen jännitettä lähdettiin taas nostamaan portaittain, jotta kaikki akun varausta kuvaavat merkkivalot saatiin palamaan. Nyt viimeistään huomataan, että akun varauksesta kertova mittari kertoo todellisuudessa vain propulsiolle syötetystä jännitteestä. Kun jännite laskee alle 43,7 voltin, propulsio sammuu. Taulukossa 7. on esitetty karkeasti jänniterajat eri merkkivalokombinaatioille.

Taulukko 7. Merkkivalot ja jännitealueet

Akkumittari	"Tankkivalo"	Vikavalo	Jännite U [V]
3/3 vihreänä	-	-	> 50,8
2/3 vihreänä	-	-	> 49,2
1/3 vihreänä	-	-	> 47,2
1/3 oranssina	Palaa punaisena	-	> 44,8
1/3 punaisena	Palaa punaisena	-	> 43,7
1/3 punaisena	Palaa punaisena	Palaa punaisena	

5.12.2 Toinen mittaus, jänniterajojen hakeminen jatkuu

Sarjan toisessa mittauksessa toistettiin akun tyhjenemistä simuloiva ajo, jossa jännitettä pudotettiin vaiheittain. Nyt pyörimisnopeudeksi oli valittu 1 100 rpm samalla 10 Nm kuormalla, mitatut arvot olivat vastaavasti 1 112 rpm ja 10,0 Nm. Testi aloitettiin 44,7 voltin jännitteellä, jolloin mittaripaneelissa paloi potkurin pyörimistä indikoiva vihreä valo ja tankkivalo sekä yksi kolmesta akkupalkista vilkkuivat punaisina.

Myös vikavalo paloi punaisena koko mittauksen ajan, mikä valvontapaneelin ohjekirjan perusteella voi tarkoittaa sitä, ettei akuston jäljellä olevaa kapasiteettia voida arvioida jännitteen perusteella korkean kuormitusvirran takia tai sitä, että akuston varaus on jännitteen perusteella alle $\pm 30\%$. Kyse oli tässä vaiheessa todennäköisesti suuresta kuormitusvirrasta, koska voimalinja ei vielä pysähtynyt, vaikka ohjekirjan mukaan annettu jännitetasoilmoitus tarkoittaisi samalla myös sitä, ettei voimalinja toimi. [31]

Jännitettä pudotettiin, kunnes kone pysähtyi. Pysähtyminen tapahtui jännitteen ollessa 43,3 V, mikä on hieman vähemmän kuin pienemmällä pyörimisnopeudella saatu tulos. Herää epäily, olisiko logiikassa kuitenkin joku kuormitusvirran aiheuttaman jännitteenaleneman kompensointi. Ohjekirjassa kuitenkin mainitaan, että kyse on nimenomaan jännitteeseen perustuvasta indikoinnista ja erillinen akunvalvontajärjestelmä tarvitaan tarkemman datan saamiseksi [31].

5.12.3 Kolmas mittaus, jänniterajojen hakeminen jatkuu, suurempi teho

Sarjan kolmannessa mittauksessa propulsiota ajetaan taas kovempaa, tavoitteena 1 200 rpm sekä 40 Nm ja mittaukset vastaavasti 1 167,3 rpm ja 40,1 Nm. Lähtötilanteessa propulsiolle syötettävä jännite on 50,5 V, virta 120,6 A. Näin ollen propulsiolle syötetään noin 6,1 kW sähkötehoa ja akselitehoa saadaan noin 4,9 kW, voimalinja toimii tällöin noin 81 % hyötysuhteella. Merkkivaloista palavat kaukohallintalaitteen sininen virtavalo sekä merkkivalopaneelin vihreä pyörivän potkurin merkkivalo. Akkumittarissa palaa kaksi kolmesta palkista vihreänä.

Jännitettä lasketaan aluksi noin yhden voltin portaisissa. Jännitteen pudotessa 49,5 voltista 48,5 volttiin sammuu toinen akkumittarin kolmesta vihreästä palkista. Voimalinjan toiminnassa ei tapahdu mittauksetarkkuuden rajoissa huomattavaa muutosta. Kuormitusvirta on toki kasvanut viidellä ampeerilla, jotta likimain sama teho saadaan tuotettua pienemmällä jännitteellä. Teoriassa virran kasvamisen myötä myös häviöt kasvavat, mutta vaikutus ei ole käytännössä nähtävissä.

Kun jännite lasketaan 47,5 voltista 46,5 volttiin, syttyy niin sanottu tankkivalo ja viimeinen akun varauksesta kertova palkki muuttuu oranssiksi. Edelleen voimalinja toimii samalla tavalla, vaikka kuormitusvirta jatkaa kasvamistaan sen ollessa jo 130,9 A. Seuraava muutos

havaitaan 45 voltin kohdalla, jonka jälkeen akkumittarin viimeinen palkki vaihtaa väriään oranssista punaiseksi.

Seuraava muutos havaitaan 43,3 voltin kohdalla, kun vikavalo syttyy ensimmäisen kerran. Jännite kuvastaa joko akuston varauksen olevan alle 30 % tai kuormitusvirta estää kapasiteetin päättelyn jännitteen avulla. Ohjekirjan maininta siitä, ettei systeemi toimisi enää 30 %:n varauksella antaa olettaa, että valo indigoisi ennemmin kuormitusvirran vaikutusta akuston lataustason päättelyyn [31]. Vesillä kannattaisi kuitenkin viimeistään tässä vaiheessa hidastaa vauhtia.

Vielä 42 voltin jännitteellä voimalinja toimii odotetusti kokonaishyötysuhteen ollessa 80 %. Kuormitusvirta on kivunnut jo 145 ampeeriin. Noin 41,3 voltin kohdalla propulsio pysähtyy, pyörivän potkurin merkkivalo sammuu ja punaiset valot jäävät vilkkumaan. Lisäksi kauko-ohjaintalaitteen merkkivalo vilkkuu vuoroin punaista ja oranssia valoa. Kolmas mittaus toistettiin kokonaisuudessaan mahdollisimman identtisenä, eroja propulsioon toiminnassa mitausten välillä ei havaittu.

5.12.4 Neljäs mittaus, jänniterajojen tarkastaminen

Sarjan neljännessä varsinaisessa mittauksessa jo aiemmin todettuja jänniterajoja pyrittiin määrittämään vielä hieman tarkemmin. Propulsioon käytös oli jo tässä vaiheessa jokseenkin tuttua, mikä helpotti lähempää tarkastelua. Tarkastelun tuloksena löydetty jänniterajat täsmäivät taulukossa seitsemän jo esitettyihin. Voidaan todeta, että merkkivalot perustuvat ainoastaan mitattuun jännitteeseen, eikä kuormitusvirran vaikutusta jännitteeseen huomioida akun varaustilaa esitettäessä.

5.12.5 Viides mittaus, propulsioon huipputeho

Sarjan viidennessä mittauksessa ääri rajojen hakemista jatkettiin pyrkimällä mitaamaan propulsioon huipputeho. DC-teholähteen jännitteeksi asetettiin voimalinjan 48 voltin nimellijännite, käyttöön kytkettiin voimalinjan *Power*-toimintatila ja kauko-ohjaintalaitteen kahva käännettiin ääriasentoonsa. Tämän jälkeen kuormitusmomenttia kasvatettiin niin kauan kuin akseliteho saatiin kasvamaan. Aiempien mittausten perusteella oli jo tiedossa, että huipputeho saavutettaisiin maksimaalisella kierrosnopeudella.

Huipputeho saavutettiin akselin pyörimisnopeuden ollessa tasan 1 500 rpm ja kuormitusmomentin 53,5 Nm. Tällöin akselitehoksi saavutettiin 8,4 kW syöttötehon ollessa 10,3 kW. Kokonaishyötysuhde oli 81 % itse koneen toimiessa 85:n ja taajuusmuuttajan 96 %:n hyötysuhteella. Tämä vastaa melko hyvin valmistajan ilmoitusta 8,5 kW:n huipputehosta ja 10,2 kW:n hetkellisestä ottotehosta. Myös koneelle ilmoitettu suurin pyörimisnopeus 1 500 rpm saavutettiin.

5.12.6 Kuudes mittaus, aluksen pysäyttäminen

Sarjan kuudennessa ja viimeisessä mittauksessa simuloitiin niin sanottua crash-stop-tilannetta, jossa alus pyritään pysäyttämään mahdollisimman tehokkaasti. Aluksen pysäyttäminen voisi olla tarpeen esim. yhteentörmäyksen välttämiseksi. Myös Vetuksen markkinointimateriaalissa luvataan *E-Line*-voimalinjan pysäyttävän alus tehokkaasti vain yhden veneen mitan matkalle, joten koetta voitiin pitää siinäkin suhteessa perusteltuna.

Todellista crash-stop-tilannetta on erittäin vaikea simuloida testipenkissä, joten kuormitusmomentti päädyttiin oletamaan vakioksi. Oletus tarkoittaa käytännössä sitä, että potkurin hydrodynaaminen vastus oletetaan vakioksi ja suunnaltaan pyörimissuunnan vastaiseksi, eikä voimalinjan inertiaa huomioida lukuun ottamatta mekaanisen mittausasettelun inertiaa, joka on kokeessa luonnostaan läsnä. Todellisessa tilanteessa mittausasetteluun verrattuna pidemmän potkuriakselin ja itse potkurin massalla sekä potkurin ja aluksen rungon geometrialla ja niistä seuraavalla hydrodynamiikalla olisi tuloksiin suuri vaikutus.

Journal of Marine Engineering & Technology -julkaisun eräässä artikkelissa vuodelta 2014 käsitellään rahtilaivan crash-stop manööverin optimointia. Artikkelissa todetaan, ettei tilannetta voida tutkia testipenkissä, koska potkurin toimintaa vedessä ei voida simuloida sähköisillä eikä veden vastukseen perustuvilla kuormilla tai jarruilla. Toisaalta kiinteälapaisen potkurin tuottaman työntövoiman on soveliaista olettaa muuttuvan pääasiassa moottorin pyörimisnopeuden funktiona. [32] Nyt haluttiinkin lähinnä nähdä, miten kone suoriutuu suunnanvaihdosta ja tuottaisiko se esimerkiksi jonkin propulsioon logiikan virhetilan.

Aluksen liike-energia saadaan sen massan ja nopeuden neliön tulona, joten ne määräävät aluksen pysäyttämiseksi tarvittavan työn. Työtä aluksen pysäyttämiseksi tekevät propulsioon tuottaman työntövoiman lisäksi luonnolliset ilman ja veden aiheuttamat kulkuvastukset.

$$E = m * v^2 \quad (4)$$

Aluksen liike-energia, missä E on aluksen liike-energia jouleina (J), m massa kilogrammoina (kg) ja v nopeus metreinä sekunnissa (m/s).

Jos oletetaan Jopin massaksi 2 500 kg ja nopeudeksi 11 km/h (3,1 m/s), saadaan Jopin liike-energiaksi noin 24 kJ (24 kW/s). Näin voidaan karkeasti haarukoida suuruusluokkaa sille, kuinka kauan voimalinjan täyttä propulsiotehoa tulisi käyttää aluksen pysäyttämiseksi. Jos potkuri olisi ideaalinen ja välittäisi kaiken akselitehon työntövoimaksi, pitäisi aluksen pysähtyä noin kolmessa sekunnissa siitä, kun täysi propulsioteho taakse on saavutettu. Potkurin häviöt ja erittäin epäedullinen toimintapiste jarrutettaessa antavat olettaa todellisuuden olevan selvästi heikompi.

Crash-stop-manööveria käsittelevässä artikkelissa prosessi aluksen pysäyttämiseksi jaetaan kahteen osaan: niin sanottuun liukuvaiheeseen (coasting) ja propulsioon avulla tapahtuvaan jarrutukseen. Näistä erityisesti pysähtymismatkan kannalta liukuvaihe on merkittävämpi, koska tällöin aluksen nopeus on vielä suuri ja hidastuminen pientä. [32] Tehty mittaustaakin oikeastaan tämän liukuvaiheen kestoa. Erona laivakoneeseen on, että voimalinjan suunta voidaan vaihtaa suhteellisen nopeasti, eikä koneen pyörimisnopeuden hidastumista tarvitse odottaa artikkelin konttilaivaa kuvaavan esimerkin mukaista 300 sekuntia (5 min).

Koe suoritettiin voimalinjan *Normal*-toimintatilassa. Kokeen alussa pyörimisnopeudeksi oli asetettu 1 425 rpm, eli normaalin toimintatilan täysi kierrosnopeus ja kuormitusmomentiksi 13,9 Nm, eli 10 %:n momenttiohje kuormakoneelle. Kun kone oli saavuttanut stabiilin toimintatilan, kaukohallintalaitteen kahva vedettiin rauhallisesti ääriasennosta toiseen. Suurimmillaan akselilta mitattiin 34 Nm:n jarrutusmomentti ja suunnanvaihto kesti kaikkiaan noin seitsemän sekuntia.

Seitsemän sekunnin päälle on lisättävä vielä edellä haarukoitu varsinainen jarrutusaika, joskin aluksen nopeus ehtii hieman laskea jo liukuvaiheen aikana. Jos koko crash-stop manööveri kestäisi kymmenen sekuntia ja hidastuminen olisi lineaarista, pysähtyisi Jopi noin kahden veneenmitan matkalla, mikä olisi sekin hyvä tulos.

Vesijettipropulsiolla jarruttaminen voi olla tätä tehokkaampaa, mutta muutoin polttomoottorikäyttöisellä voimalinjalla ei voitaisi saavuttaa vastaavaa. Jotta merivaihte kestää suunnanvaihdon, on moottorin kierrosluku perinteisessä akselivetoisessa aluksessa laskettava ensin lähelle tyhjäkäyntinopeutta, vaihdettava pyörimissuunta ja sitten kiihdytettävä uudelleen haluttuun kierrosnopeuteen. Lisäksi olisi hyvä odottaa myös akselin pyörimisliikkeen pysähtyvän ennen suunnanvaihdosta. Vanhemmissa laivoissa suunnanvaihto tehdään pysäyttämällä pääkone ja käynnistämällä se sitten uudelleen toiseen suuntaan. Vaikka kaksitahtidiesel tämän mahdollistaakin, on prosessi sähkövoimalinjaan nähden hidas.

Crash-stop-koe toistettiin muutamia kertoja ja havaittiin, että voimalinja pystyy tuottamaan akselille halutun suuntaisen vääntömomentin riippumatta akselin pyörimissuunnasta. Tulos on odotettu, koska tämä on tyypillinen ominaisuus mitatun kaltaiselle taajuusmuuttajakäytölle. Yllättävää sen sijaan oli voimalinjan käytös tilanteessa, jossa suuntaa vaihdettiin aggressiivisemmin: voimalinja meni tuntemattomaan vikatilaan, jossa se meni ikään kuin virrattomaksi ja vain akkumittarin merkkivalo jäi palamaan. Käytön jatkaminen edellytti voimalinjan resetoimisen käyttämällä se kokonaan virrattomana.

Vikatilan taustalla saattaa olla äkillinen jännitteenousu, sillä vaihdettaessa suuntaa erittäin nopeasti voimalinja tuottaa hetken tehoa vastakkaiseen, eli tehölähteen, suuntaan. Akun kanssa tämä ei olisi ongelma, mutta käytettyä DC-teholähdettä ei ole suunniteltu vastaanottamaan tehoa. Virhetilanne saatiin toistettua myös siten, että kaukohallintalaitteen kahva tuotiin nopeasti ääriasennosta keskelle, niin sanottuun vapaa-asentoon. Suuntaa ei siten tarvinnut edes vaihtaa, vaan yksistään liian nopea kierrosten pudottaminen tuotti saman virhetilanteen. Koe on toistettava vesillä, kunhan voimalinja saadaan asennettua Jopiin. Mahdollisuutta toistaa koetta testipenkissä akuston kanssa ei valitettavasti enää ollut.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Eri pyörimisnopeusalueilla ja kuormamomenteilla tehtyjen ajojen perusteella saatiin määritettyä hyötysuhdekäyrät, karkeat vääntömomenttikäyrät sekä voimalinjan kussakin toimintapisteessä tuottama teho. Lisäksi saatiin selville useita yksittäisiä loppukäyttäjän kannalta vähemmän merkityksellisiä suureita, kuten taajuusmuuttajan sähkökoneelle syöttämät virrat ja jännitteet. Käyttäjän kannalta erityisen hyödyllisiä selvinneitä tietoja ovat voimalinjan käyttäytymiseen ääri- ja erityistilanteissa sekä akuston jännitteen laskiessa liittyvät yksityiskohdat.

6.1 Potkurin mitoittamiseen tarvittavat tiedot

Sovelluskohteen kannalta merkittävimpiä tietoja ovat potkurin mitoittamisen kannalta oleelliset parametrit. Mittaustulosten perusteella tiedetään, että voimalinjan hyötysuhde on sitä parempi, mitä suuremmalla kierrosnopeudella ja mitä pienemmällä kuormamomentilla konetta ajetaan. Tällöin pelkästään voimalinjan hyötysuhteen näkökulmasta potkurin tulisi olla mahdollisimman pieni ja loivanousuinen.

Koska alennusvaihdetta ei ole, on potkuriakselin pyörimisnopeus suuri suhteessa alukselle tavoiteltuun nopeuteen. Propulsion suurimmalla pyörimisnopeudella 1 500 rpm ehtii akseli pyöriä 90 000 kierrosta tunnissa. Jos potkuri etenisi ilman luistoa 10 tuumaa, eli noin 0,25 metriä kierroksella, saataisiin aluksen teoreettiseksi nopeudeksi 22,5 km/h. Nousultaan sopiva potkuri sijoittuisi täten arviolta johonkin kuuden ja kymmenen tuuman väliin ollen erittäin loivanousuinen.

Saadut vääntömomenttikäyrät määritettiin kuormamomenttia vaiheittain kasvattamalla, kunnes mitattava kone ei pystynyt saavuttamaan stabiilia tilaa, vaan sen pyörimisnopeus alkoi hidastua kohti nolaa. Kyseisen kierrosalueen maksimivääntömomentiksi merkittiin suurin kuormamomentti, jolla stabiili tila saavutettiin. Kuormaa ei ollut mahdollista kasvattaa täysin portaattomasti ja vakioidusti, mistä voi aiheutua pientä epätarkkuutta, käytännössä mitattu arvo voi olla hieman todellista pienempi. Saatu vääntökäyrä antaa kuitenkin ehdottoman maksimin potkurin normaaliolosuhteissa tuottamalle kuormamomentille.

Maksimivääntömomentilla ei todennäköisesti ole käytännön merkitystä potkurin mitoittamisen kannalta, sillä jo pelkästään hyötysuhteen näkökulmasta sen tavoittelemisen ei ole mielekäästä. Maksimivääntömomentti voi kuitenkin tulla kyseeseen esimerkiksi tilanteessa, jossa potkuriin päätyy vierasesine: köysi, kivi, kalaverkko tai jäälohkare. Vääntökäyrä kertoo myös, että voimalinjan huipputeho saavutetaan maksimaalisella kierrosnopeudella.

6.2 Toiminta-aika ja akusto

Voimalinjalle tehtiin tunnin mittaiset toiminta-aikakokeet, ensin pelkällä akustolla, minkä jälkeen täyteen ladatulla akustolla ja sen rinnalle kytketyllä laturilla. Myöhemmin pelkällä akustolla suoritettu koe vielä toistettiin. Pelkällä akustolla tehty koe osoittautui akkukapasiteetin osalta pettymykseksi, sillä voimalinja pysähtyi ensimmäisessä kokeessa jo noin 52 minuutin kuluttua alijännitteeseen, vaikka teoriassa akuston varauksen olisi pitänyt riittää tunnin mittaiseen ajoon. Toisella kerralla tunti saavutettiin, mutta jännitteen perusteella oli taas aivan rajoilla.

Sovelluskohteeseen valittu akusto tyydyttäne Jopille asetetut tavoitteet, muttei ole lähelläkään tyypilliseen huviveneeseen soveltuvaa, saati mielekäästä mitoitus. Lähes mihin tahansa muuhun käyttötarkoitukseen akkukapasiteetti pitäisi vähintään kaksinkertaistaa, jolloin myös spesifiseltä energialtaan paremmat akut alkaisivat olla tarpeen. Energiavaraston mitoitus vaikuttaa myös aluksen muu varustelu. Jopissa muuta kulutusta varten on oma 12-voltin akusto, joten sitä ei tarvitse huomioida, mutta puhtaasti huviveneessä voisi tulla kyseeseen ajoakuston käyttö myös esimerkiksi valaistuksen ja lieden energianlähteenä.

Käytännössä akkusähköinen matkavene vaatisi vielä tässä vaiheessa tuekseen jonkinlaisen generaattorin. Matkan tekeminen lähes olemattoman latausverkoston piirissä vaatisi muutoin vaihtoehtoisia ratkaisuja esimerkiksi rungon kulkuvastuksen optimoinnin ja matkanopeuden osalta. Veneilyn ollessa kyseessä on muistettava myös varakapasiteetin merkitys: lähimpään suojasatamaan olisi aina syytä päästä.

6.3 Käyttäytyminen ääritilanteissa

Koneelle mitattiin käynnistymismomentti nollanopeudesta. Tällöin huomattiin koneen tuottavan likimain maksimivääntömomenttinsa myös nollanopeudesta. Tämä on hyvä huomioida merkittävänä erona polttomoottorivoimalinjaan, joka ei kykene tuottamaan vääntömomenttia moottorin nollanopeudella. Toinen merkittävä havainto on koneen kyky suhteellisen nopeaan suunnanvaihdokseen ja sitä myötä tehokkaaseen jarrutukseen.

Koneen käyttäytyminen jänniterajoilla, eli ajettaessa akusto liki tyhjäksi sekä jännitteen äkillisessä nousussa crash-stop-kokeessa jättää hieman toivottavaa, vaikka voimalinja toipuikin tilanteista erinäisten uudelleenkäynnistysten jälkeen. Viimeistään voimalinjan yllättävä pysähtyminen alijännitteeseen osoittaa erillisen akunvalvontajärjestelmän merkityksen. Aluksen päällikön on tiedettävä jäljellä oleva kapasiteetti mahdollisimman tarkasti, mihin itse voimalinja merkkivaloineen ei tarjoa riittäviä välineitä.

6.4 Yhteenveto

Työssä keskityttiin sähköveneen käyttämisen kannalta olennaisimpiin voimalinjan ominaisuuksiin ja pyrittiin myös taustoittamaan näitä lähtökohtia. Mittaustulosten analysoinnissa energiavarasto sai lopulta osakseen jokseenkin paljon huomiota, mikä selittynee itse voimalinjan lopulta varsin yllätyksettömällä toiminnalla. Energiavarastona toiminut akusto ei vastannut täysin odotuksia saatavilla olevan energian jäätyä datalehtien perusteella ennakoitua hieman pienemmäksi.

Oikosulkukone yhdistettynä taajuusmuuttajaan on konseptina hyväksi ja luotettavaksi todettu, millaiseksi se osoittautui myös tässä työssä. Hyvä suorituskyky sekä hyötysuhde kohtuulliseen hintaan ja kompaktissa paketissa oli odotettavaa. Sähköpropulsio ei lopulta eroa kovinkaan merkittävästi mistä tahansa muusta vastaavan tehoisesta sähkökäytöstä. Teholuokkaan nähden nestejäähdytys ja alhainen jännitetaso poikkeavat tyypillisestä. Myös hallintalaitteet poikkeavat teollisuudessa sekä autoissa käytetyistä, vaikka taustalla toimiikin hyvin yleinen väyläteknologia.

Esimerkin kaltaiset voimalinjat ovat tähän mennessä vallanneet jalansijaansa lähinnä purjeveneiden apumooottoreina sekä erilaisissa erikoissovelluksissa ja varhaisten omaksujien

moottoriveneissä. Itse voimalinjatekniikka ei aseta esteitä sähköveneidän yleistymiselle, vaan katseet kääntyvät energiavarastoon. Monipuoliseen käyttöön riittävän energiavaraston hankintakustannus on edelleen korkea. Jopiiin hankittu akusto mahdollistaa noin tunnin yhtämittaisen ajon reippaalla matkanopeudella, kun taas polttomoottorilla varustettuna myös esimerkin aluksella pystyi ajamaan noin vuorokauden eikä sitä käytännössä tarvinnut tankata kuin kerran kesässä.

Sähköautoteollisuuden sekä uusiutuvan energian varastointitarpeen paineessa kehittyvät uudet akkuteknologiat valaisevat kuitenkin myös sähköveneidän tulevaisuutta. Alati halpenevat litiumioniakut ovat jo tällä hetkellä moneen käyttöön järkevin ratkaisu. Tulevaisuudessa, tällä hetkellä tuloaan sähköautoihin tekevät, natriumioniakut mahdollistanevat entistä edullisemmat ja myös litiumvaroista riippumattomat energiavarastot sähköveneisiin.

Uppoumarunkoisissa aluksissa akkujen vaatima tila ja paino eivät kuitenkaan yleensä ole esteenä. Iso energiavarasto mahdollistaa myös muiden mukavuuksien, kuten sähköisten kodinkoneiden ja lämmityksen sekä ilmastoinnin tuomisen yhä pienempiin aluksiin. Mikä tärkeintä, päästöt pienenevät ja hiljainen sähkökäyttö mahdollistaa entistä miellyttävämmän sekä vastuullisemman vesiluonnosta nauttimisen yhä useammalle veneilijälle.

Lähteet

- [1] ”About Us - VETUS”. Viitattu: 22. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://vetus.com/about-us/>
- [2] ”V-CAN - Vetus”. Viitattu: 28. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://webshop.vetus.com/en/products/v-can>
- [3] ”Why Tesla’s move to 48-volt electrical architecture is an industry game changer”. Viitattu: 18. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://thedriven.io/2023/03/20/why-teslas-move-to-48-volt-electrical-architecture-is-an-industry-game-changer/>
- [4] ”E-LINE - VETUS”. Viitattu: 2. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://vetus.com/news/e-line/>
- [5] ”E-LINE 8kW Inboard Electric Propulsion Motor - Vetus”. Viitattu: 28. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://webshop.vetus.com/en/product/e-line-8kw-inboard-electric-propulsion-motoreline080#specifications>
- [6] ”Moottoriveneiden runkomuodot: Runko on veneen selkäranka - Venelehti.fi”. Viitattu: 14. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://veneletti.fi/moottoriveneiden-runkomuodot-runko-on-vene-en-selkaranka/>
- [7] Buchmann, Isidor, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Fourth Edition*. Cadex Electronics Inc., 2016. Viitattu: 15. lokakuuta 2020. [Verkossa]. Saatavissa: www.batteryuniversity.com
- [8] ”Data_sheet-GB12-250_battery.pdf”. Viitattu: 3. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/2/21322-GB12-250_1216e117d2021d1b2b8215bf5d74c154.pdf
- [9] ”European Union Moves to Ban Lead With Key Panel Recommendation”. Viitattu: 21. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/european-union-moves-to-ban-lead-with-key-panel-recommendation>
- [10] ”Dynamic model development for lead acid storage battery - Scientific Figure on ResearchGate”. Viitattu: 14. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Lead-acid-battery-construction_fig1_337293302
- [11] ”Diesel-electric propulsion”. Viitattu: 2. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/diesel-electric-propulsion>

- [12] ”Electric propulsion systems, electric drive systems”. Viitattu: 2. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/electric-propulsion-systems-electric-drive-systems>
- [13] ”60 vuotta sitten valmistui Suomen suurin yli 84-metrinen jäänmurtaja, joka myytiin myöhemmin ulkomaille | Tekniikka&Talous”. Viitattu: 27. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/60-vuotta-sitten-valmistui-suomen-suurin-yli-84-metrinen-jaanmurtaja-joka-myytiin-myohemmin-ulkomaille/aa542241-b9ff-45cd-846b-cbd3c9bd924b>
- [14] ”Electrifying Boats and Cars in Norway - Kempower”. Viitattu: 27. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://kempower.com/worlds-first-electric-boat-hpc-charger-in-norway-is-designed-manufactured-by-kempower/>
- [15] ”Sähköajoneuvojen lataussuositus - Sesko ry”. Viitattu: 27. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://sesko.fi/standardointi/sahkoautot-ja-latausjarjestelmat/lataussuositus/>
- [16] *Sähkö ja vene*, 5. STEK ry, 2022.
- [17] ”BU-205: Types of Lithium-ion - Battery University”. Viitattu: 14. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [18] ”Opas veneen sähköjärjestelmästä päivittyi erityisesti akkujen osalta | STEK ry - Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistämiskeskus”. Viitattu: 11. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.stinfo.fi/tiedote/69934079/opas-veneensahkojarjestelmasta-paivittyi-erityisesti-akkujen-osalta?publisherId=69818278>
- [19] ”Vesikulkuneuvon moottorin vaihtaminen | Traficom”. Viitattu: 27. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/veneily/vesikulkuneuvon-moottorin-vaihtaminen>
- [20] Partainen ja Pyyppönen, ”Koneenhoitaja-kurssin luentomateriaalit”. EKAMI, 2023.
- [21] S. Virtanen, ”Uudenlaiset potkurin lavat vähensivät ainakin 14 % Tallinkin laivan polttoaineen kulutusta – Tältä ne näyttävät | Tekniikka&Talous”. Viitattu: 13. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/uudenlaiset-potkurin-lavat-vahensivat-ainakin-14-tallinkin-laivan-polttoaineen-kulutusta-talta-nenayttavat/a8c4146e-3862-450b-be91-0831864b88ae>
- [22] D. Gerr, *Propeller Handbook*. Camden, Maine: International Marine, 2001.
- [23] L. Aura ja A. J. Tonteri, *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. WSOY, 1996.

- [24] ”Shaft drive - Oceanvolt”. Viitattu: 6. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://oceanvolt.com/solutions/systems/shaft-drive/>
- [25] ”Charged EVs | Candela Seven electric boat’s hydrofoils reduce energy consumption by 80% - Charged EVs”. Viitattu: 6. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://chargedevs.com/newswire/candela-seven-electric-boats-hydrofoils-reduce-energy-consumption-by-80/>
- [26] ”dewesoft-power-solutions-manual-en.pdf”. Viitattu: 19. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://downloads.dewesoft.com/manuals/dewesoft-power-solutions-manual-en.pdf?_ga=2.1274481.1997227225.1705666025-1778383218.1705666025
- [27] ”tm200manual.pdf”. Viitattu: 15. joulukuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/tm200manual.pdf>
- [28] ”User-manual-E-Drive-motor-control-lever-ELPS_ELPSR_ELCS.pdf”.
- [29] ”BU-403: Charging Lead Acid - Battery University”. Viitattu: 5. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>
- [30] ”Battery Terms and Definitions”. Viitattu: 3. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.oraclebattery.com/Technical-Resources/Battery-Terms-and-Definitions#:~:text=Watts%20per%20cell%20\(WPC\)%3A,the%20started%20time%20and%20temperature.](https://www.oraclebattery.com/Technical-Resources/Battery-Terms-and-Definitions#:~:text=Watts%20per%20cell%20(WPC)%3A,the%20started%20time%20and%20temperature.)
- [31] ”User-manual-E-Drive-monitoring-panel-MPE1MB.pdf”.
- [32] D.-I. F. Wirz, ”Optimisation of the crash-stop manoeuvre of vessels employing slow-speed two-stroke engines and fixe”, *J. Mar. Eng. Technol.*, vsk. 11, nro 1, 2012.