



Loppuraportti: Uuden sukupolven uiton apulaiva Vuoksen vesistöalueelle

Tiivistelmä

Raportissa tarkastellaan vähäpäästöisen uiton apualuksen toteutusvaihtoehtoja sekä arvioidaan niiden teknistä ja taloudellista soveltuvuutta Vuoksen vesistöalueen toimintaympäristöön. Tutkimuksessa vertaillaan eri voimalähteitä, hybridivoimalinjoja, keskeisiä komponentteja, automaattioratkaisuja ja latausinfrastruktuuria. Lisäksi arvioidaan aluksen energiankulutusta mittausten ja simulointien perusteella sekä tarkastellaan hybridisoinnin vaikutuksia käyttökustannuksiin ja päästöihin. Tutkimus perustuu kirjallisuuskatsaukseen, kenttämittauksiin ja simulaatiomallinnukseen.

Voimalähteiden vertailun perusteella biodieselin ja litiumioniakun muodostama hybridiratkaisu on lähitulevaisuudessa teknisesti toteuttamiskelpoisiin ja kokonaistaloudellisesti perustelluin vaihtoehto. Vaikka vety ja polttokennot tarjoavat merkittävää päästövähennyspotentiaalia pitkällä aikavälillä, niiden käyttöönottoa rajoittavat tällä hetkellä korkeat investointikustannukset, infrastruktuurin kehittymättömyys ja teknologian rajallinen saatavuus. Myös e-polttoaineiden hyödyntämismahdollisuudet ovat toistaiseksi rajalliset niiden korkean hinnan ja vähäisen saatavuuden vuoksi.

Työssä vertaillaan sarja- ja rinnakkaishybridiratkaisuja sekä niille soveltuvia säätöstrategioita. Simulaatiot osoittavat, että molemmilla ratkaisuilla voidaan vähentää polttoaineenkulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Tulosten perusteella sarjahybridiratkaisu soveltuu kuitenkin paremmin uiton apualuksen tyypilliseen käyttöprofiiliin, jossa keskitehontarve on suhteellisen pieni ja suurimmat kuormitukset muodostuvat lyhytaikaisista tehopiikeistä esimerkiksi tukkien siirtämisen yhteydessä. Akusto toimii tällöin tehokkaasti energiavarastona ja kuormitushuippujen tasaajana, mikä parantaa koko järjestelmän energiatehokkuutta.

Raportissa esitetään lisäksi hybridiapualuksen automaatiokonsepti sekä arvioidaan latausinfrastruktuurin nykytilaa ja kehittämistarpeita. Vaikka täyssähköinen alus olisi energiatehokkuuden näkökulmasta houkutteleva vaihtoehto, sen käyttöönottoa rajoittavat nykyisin akustojen korkeat kustannukset, rajallinen energiatiheys sekä latausinfrastruktuurin puutteet. Hybridialuksella arvioidaan olevan lisäksi



käyttömahdollisuuksia myös muissa sisävesiliikenteen tehtävissä, kuten viranomais-, pelastus- ja huoltotoiminnassa.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että uusiutuvaa biodieseliä hyödyntävä sarjahybridivoimalinja, jossa akusto toimii energian varastona ja tehon tasaajana, tarjoaa nykYTEknologialla tasapainoisen ratkaisun ympäristövaikutusten, energiatehokkuuden ja kustannusten näkökulmasta. Tulokset tukevat vähäpäästöisten työalusten kehittämistä ja tarjoavat lähtökohdan vastaavien sisävesialusten sähköistämiselle ja hybridisoinnille tulevaisuudessa.



Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
1 Johdanto.....	7
2 Voimanlähteiden kartoitus	10
2.1 Biopolttoaineet	10
2.2 E-polttoaineet.....	11
2.3 Vety.....	11
2.3.1 Polttokenno	12
2.4 Akku.....	14
2.4.1 Akkukemiat.....	16
2.5 Energialähteiden saatavuus	17
3 Hybridi- ja sähkövoimalinjan komponenttivalinnat	21
3.1 Sarjahybriditopologia	21
3.2 Rinnakkaishybriditopologia	23
3.3 Sarja- ja rinnakkaishybridin ominaisuuksista	25
3.4 Polttomoottorivaihtoehdot.....	28
3.4.1 Vetykäyttöiset polttomoottorit.....	29
3.5 Hybridivoimalinjakomponentit	30
3.5.1 Sähkömoottorityyppien vertailua.....	30
3.5.2 Perinteisen dieselgeneraattorin kytkentä sarjahybridivoimalinjaan.....	34
3.6 Propulsioratkaisut ja niiden mitoittaminen	35
3.7 Sähkömoottorin mitoitus potkurikäyrien perusteella.....	36
3.8 Komponenttien hinta-arviot	39
3.9 Yhteenveto	40
4 Simulaatiomallit ja säätöratkaisut.....	42



4.1	Mitoituksessa ja säädön testauksessa käytetyt simulointimallit.....	42
4.2	Sarjahybridin säätöstrategiat.....	44
4.2.1	Termostaattisäätö	44
4.2.2	Diesel seuraa kuormitusta -säätö	45
4.2.3	SOC-pohjainen säätöstrategia SBCS	46
4.3	Rinnakkaishybridin säätöstrategia	47
5	Apualuksen mittaukset	49
6	Hybridisoidun apualuksen simulaatiotulokset	54
6.1	Sarjahybridisimulaation tulokset	55
6.1.1	TCS säädön tulokset.....	56
6.1.2	PFCS säädön tulokset.....	57
6.1.3	SBCS säädön tulokset	57
6.2	Rinnakkaishybridin simulaation tulokset.....	58
6.3	Hybriditopologioiden vertailu	59
6.4	Täyssähköisen voimalinjan simulaation tulokset.....	60
6.5	Aluksen käyttökustannukset	62
6.5.1	Kokonaisvuosikulutus.....	64
6.5.2	Excel laskentatyökalu	64
7	Automaatiokonsepti hybridiapualukselle.....	66
7.1	Ohjelman rakenne	73
8	Latausinfrastruktuuri	85
9	Ehdotukset aluksen hybriditopologian toteutukseksi.....	90
10	Monikäyttömahdollisuudet.....	95
11	Johtopäätökset.....	98
	Lähdeluettelo	100



Euroopan unionin
osarahoittama



1 Johdanto

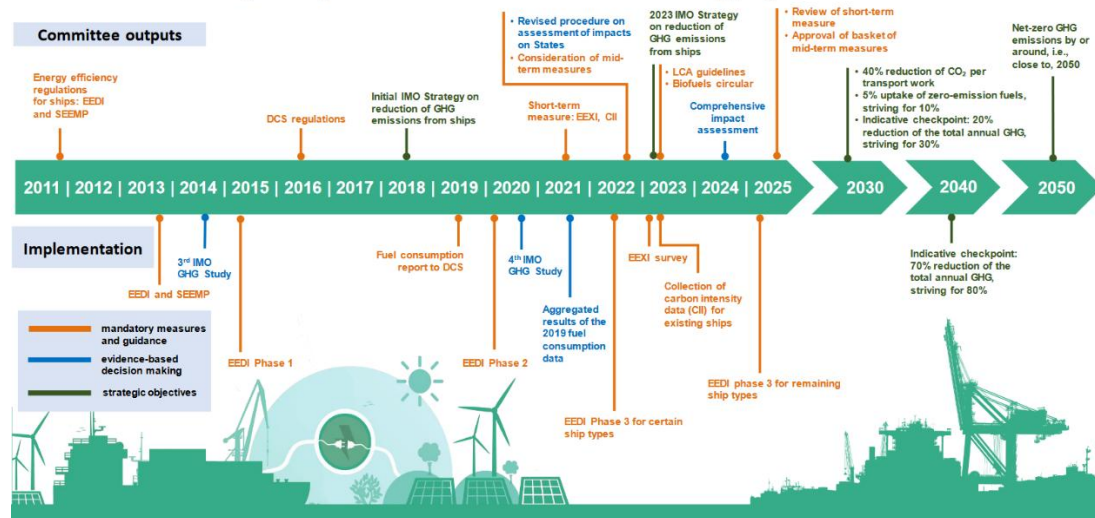
Meriliikenne on yksi Euroopan unionin (EU) talouden tärkeimmistä kuljetustehtävistä sen energiatehokkuuden vuoksi. Erityisesti Suomessa tukkien uittamisella on merkittävä vaikutus puuteollisuuteen, varsinkin sen jälkeen, kun Venäjän hyökkäyssota Ukrainaa vastaan pysäytti Saimaan kanavaliikenteen. Vuonna 2022 Vuoksen vesistöissä kuljetettiin noin 1,2 miljoonaa tonnia puuta, josta 0,5 miljoonaa tonnia kuljetettiin tukkeja uittamalla (Järvi-Suomen Uittoyhdistys 2023).

Vaikka meriliikenne on energiatehokkaampaa kuin maantieliikenne, se on yksi vaikutusvaltaisimmista ja kasvavista kasvihuonekaasupäästöjen lähteistä. Maailmanlaajuiset meriliikenteen päästöt olivat yli 1 000 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä, mikä oli noin 2,9 % maailman kokonaispäästöistä. Ennusteiden mukaan, jos fossiilisia polttoaineita käytetään meriteollisuudessa, päästöt voisivat kasvaa 130 % verrattuna vuoden 2008 kokonaispäästöihin, jolloin Pariisin sopimuksen tavoitteisiin ei päästäisi (Euroopan komissio 2024).

Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on sitoutunut vähentämään kaikkien merikuljetusten aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Vuoteen 2030 mennessä hiilidioksidipäästöt olisivat vähentyneet 40 % ja kaikista maailman merikuljetusaluksista 5–10 % käyttäisi päästöttömiä polttoaineita. Vuoteen 2050 mennessä merikuljetukset olisivat hiilineutraaleja. Kuva 1 esittää IMO:n säätämän tavoitekartan päästöjen vähentämiseksi merenkulkualalla vuoteen 2050 asti.

Addressing climate change

Over a decade of **regulatory action** to cut GHG emissions from shipping



Kuva 1. IMO:n tavoitekartta päästöjen vähentämiseksi merenkulkualalla (International Maritime Organization 2017).

Näiden määräysten vuoksi uittoalusten hybridisointi on herättänyt kiinnostusta. Varsinkin kun useimmat näistä aluksista käyttävät fossiilisia polttoaineita pääasiallisena energianlähteenään ja käyttävät erittäin vanhoja moottoreita, jotka ovat siten epätehokkaita ja aiheuttavat enemmän päästöjä kuin niiden pitäisi.

Raportin tavoitteena on kartoittaa tekninen ratkaisumalli uuden sukupolven uiton apualukselle. Raportti antaa vastauksen kysymykseen siitä, millainen on lähitulevaisuuden konsepti vähänpäästöiselle uiton apualukselle. Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksella, mittauksilla ja simulaatioilla. Tarkemmat tutkimuskysymykset ovat:

- Millaisia voimalähteitä voidaan käyttää lähitulevaisuudessa käyttöönotettavaan hybridialukseen?
- Millaisia hybriditopologioita voidaan käyttää ja kuinka hyvin ne soveltuvat aluksen toimintaan? Mitä komponentteja tarvitaan näihin topologioihin? Onko täyssähköinen alus mahdollinen?
- Minkälaista työtä alus tekee päivittäin? Mikä on aluksen keskiteho ja kuinka paljon energiaa kuluu työsykleissä?
- Minkälaisia tuloksia saadaan simuloituilla hybriditopologioilla? Ovatko hybriditopologiat kannattavia investointi- ja operointikustannusten mukaan?



- Millainen laitteisto vaaditaan aluksen automaation toteutukseen? Kuinka aluksen automaatio ja ohjaus toimii yleistasolla?
- Minkälainen latausinfrastruktuuuri on tällä hetkellä saatavilla uittoreiteillä, ja kuinka sitä voidaan kehittää? Olisiko täyssähköinen alus kannattava?
- Mihin muihin käyttötarkoituksiin voidaan hybridisoitua alusta käyttää?



2 Voimanlähteiden kartoitus

Päästöjen vähentämiseksi ja hiilineutraaliuden saavuttamiseksi käytetään energialähteitä, joilla vähennetään päästöjä ja tuotetaan tarpeeksi energiaa aluksen kulutuksen kattamiseksi. Kappaleessa tutkitaan neljää eri voimanlähdettä, jolla voidaan korvata perinteiset fossiiliset polttoaineet uiton apualuksessa.

2.1 Biopolttoaineet

Biopolttoaineet ovat joko nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita, jotka valmistetaan biomassasta. Biopolttoaineita käytetään perinteisen dieselpolttoaineen korvikkeena, jolloin saavutetaan asetetut kestävyyskriteerit. Yleisimpiä biopolttoaineita ovat bioetanoli ja biodiesel.

Bioetanoli on uusiutuva polttoainetyyppi, jota tuotetaan käymisen avulla erilaisista biomassoista kuten sokerista. Sitä käytetään yleisesti bensiinin kanssa seoksena alhaisemman oktaaniluvun takia (Furch ym. 2022), jolloin vähennetään hiilidioksidipäästöjä öljypolttoaineisiin verrattuna.

Biodiesel on uusiutuva polttoainetyyppi, jota prosessoidaan erilaisista biomassaoöljyistä, kuten ruokaöljyistä tai eläinrasvasta. Biodieseliä käytetään perinteisissä dieselmootoreissa perinteisen dieselpolttoaineen korvikkeena. Biodieselillä on samat ominaisuuden kuin perinteisellä dieselpolttoaineella, mutta se vähentää ilmaan vapautuvia päästöjä ja myrkyllisiä epäpuhtauksia. Biodieselissä on suurempi energiasisältö massaa kohden verrattuna bioetanolin, jolloin palamisessa saadaan enemmän energiaa kilogrammaa kohden. Yleisimpiä biodieseleitä ovat vetykäsitelty kasviöljy (HVO), rasvahappometyyliesteri (FAME) ja nesteytetty biokaasu (LGB).

Biopolttoaineita voidaan käyttää ”drop-in” polttoaineena, sillä ne ovat suoria korvikkeita öljypolttoaineille. Tämä tarkoittaa sitä, että biopolttoaineet ovat helppo ja halpa tapa integroida uuteen apualukseen.

Tulevaisuuden kannalta, biopolttoaineet itsessään nähdään lyhyen aikavälin ratkaisuna päästöjen vähennyksessä. Tämän takia aluksen hybridisointi on kannattavaa energianlähteellä, jolla voidaan saavuttaa hiilineutraalisuus.

2.2 E-polttoaineet

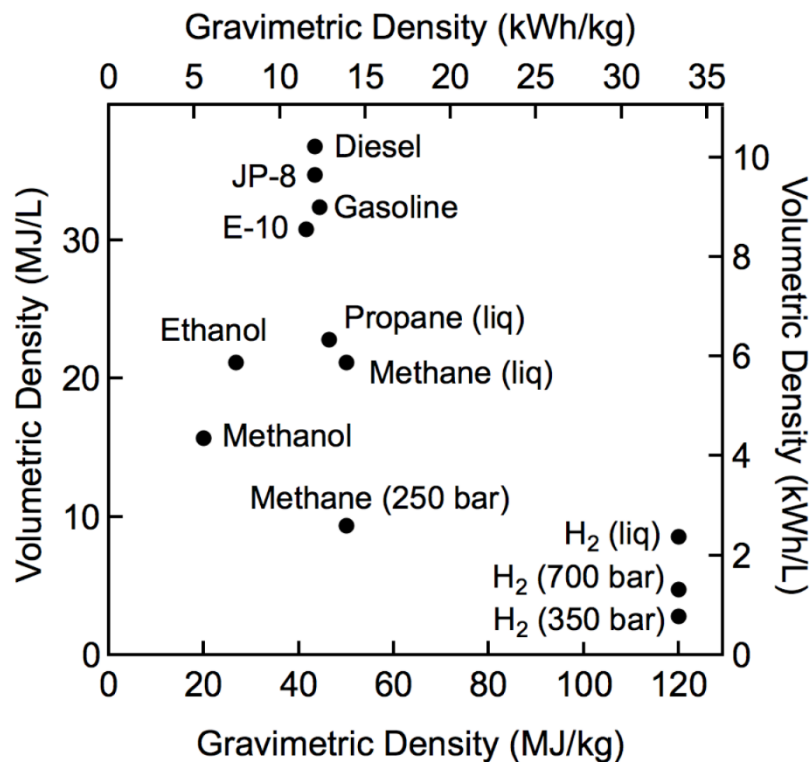
Sähköpolttoaineet (toisena nimenä e-polttoaine) ovat hiilipohjaisia polttoaineita, jotka valmistetaan vedystä. Vety tuotetaan vedestä elektrolyysireaktion avulla, jossa sähköllä erotetaan vesi hapeksi ja vedyksi. Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan, tai se voidaan sekoittaa hiilidioksidin kanssa synteessin avulla. Näitä polttoaineita voidaan käyttää suoraan öljypolttoaineiden korvikkeena.

Lupaavin sähköpolttoaine tällä hetkellä on e-metanoli, joka on kerännyt paljon huomiota merenkulkuteollisuudessa viimeisen vuosikymmenen aikana. Syy tähän on se, että e-metanolin oktaaniluku on korkeampi kuin muiden meridieselpolttoaineiden (Wang and Wright 2021). Hiilineutraalisuuden saavuttamiseksi e-metanolin valmistuksessa käytettävän sähköön tulisi olla tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Vaikka e-metanolin palamisessa ei synny rikki- tai typenoksideja, vapautuu siinä edelleen hiilidioksidia, jolloin se ei ole hiilivapaa ratkaisu.

2.3 Vety

Vetyä pidetään yksinkertaisimpana ja ympäristöystävällisimpänä vaihtoehtona merenkulkupolttoaineille sen hyvän ominaisenergian, saatavuuden ja päästöjen vähennyksen takia (Akal ym. 2020). Vety on myös yksi maailman yleisimmistä alkuaineista, ja sitä voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä, esimerkiksi elektrolyysin avulla voidaan vetyä tuottaa vedestä.

Verrattuna öljypolttoaineisiin ja dieselpolttoaineisiin, vedyllä on pienempi energiamäärä tilavuutta kohden kuin mainituilla polttoaineilla. Tämä tarkoittaa sitä, että massaa kohden vedyssä on enemmän energiaa, mutta tilavuutta kohden vedyssä on huomattavasti vähemmän energiaa. Vedyn varastoinnissa esiintyy haasteita, sillä vetytankkien täytyy olla suurikokoisia tilavuudeltaan. Kuva 2 esittää erilaisten polttoaineiden energiatihedyydet, josta nähdään vedyn sisältävän tilavuuden mukaan vähiten energiaa.

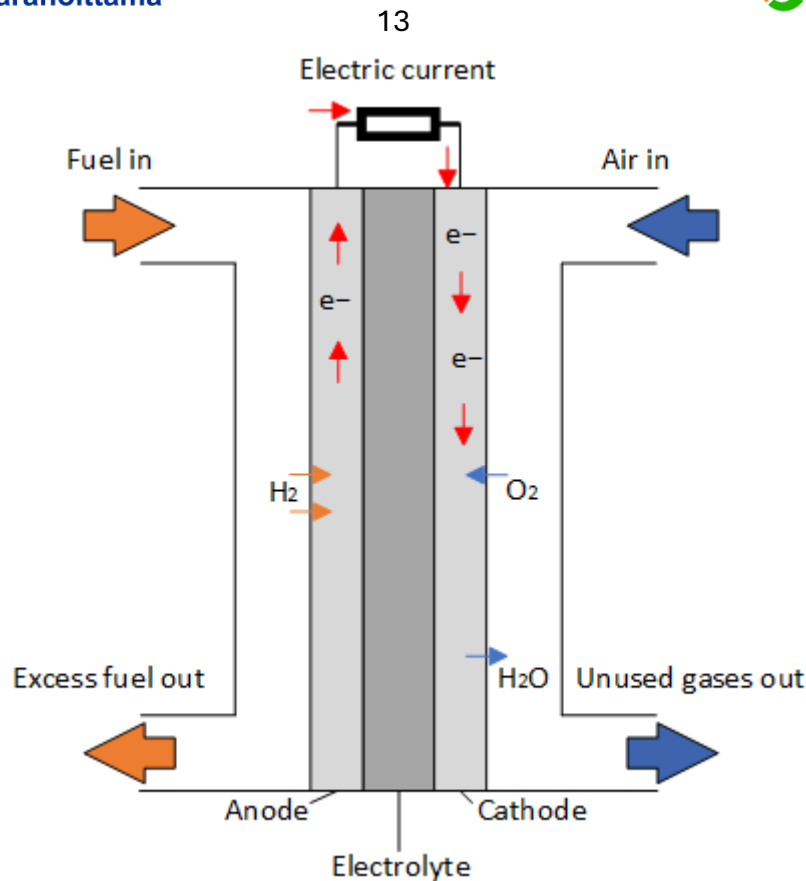


Kuva 2. Eri polttoaineiden energiatiheydet (U.S Department of energy n.d.a).

2.3.1 Polttokenno

Polttokenno on laite, jossa sähkökemiallisella reaktiolla muutetaan kemiallinen energia vedystä sähköksi, vedeksi ja lämmöksi. Tämä saavutetaan katalyyttisillä reaktioilla elektrodeissa, jossa vety syötetään anodipuolelle, ja hapettava aine katodipuolelle. Vedyn elektronien siirtyessä katodiselle puolelle, vedyn varastoima kemiallinen energia muunnetaan sähköenergiaksi (Moldrik ja Chvalek 2011). Reaktion sivutuotteena on vesihöyry, jolloin reaktio on hiilineutraali.

Polttokennoissa voidaan käyttää muitakin kaasuja, kuten metaania. Mutta vetyä pidetään tehokkaimpana polttoaineena polttokennossa sen suuren sähkökemiallisen reaktiivisuuden ja energiasisällön takia. Kuva 3 esittää polttokennon toiminnan.



Kuva 3 Polttokennon toiminnan visualisaatio.

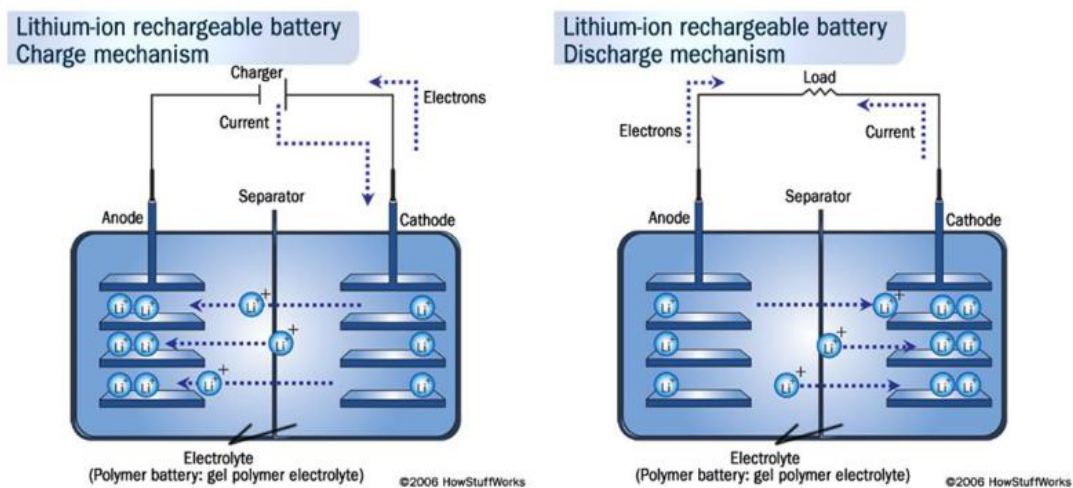
Polttokennot ovat energiatehokkaampia polttomoottoreihin verrattuna, sillä reaktiossa noin 40 – 60 % vedyn kemiallisesta energiasta voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Yleisimpänä polttokennotyyppinä on protoninvaihtokalvopolttokenno (PEMFC). Tämän operointilämpötila on noin 70 – 90 celsiusastetta. On olemassa myös korkean lämpötilan protoninvaihtokalvopolttokenno (HT-PEMFC), joka voi operoida jopa 200 celsiusasteessa. Tämän polttokennotyyppin tehokkuutta voidaan myös lisätä hukkalämmön talteenottojärjestelmällä, tosin tätä polttokennoa ei voi kylmäkäynnistää. On olemassa myös kiinteäoksidipolttokenno, jolla on suurin tehokkuus polttokennotyypeistä. Sitä ollaan vasta kehittämässä merenkulkualuksiin, ja sen tulevaisuuden saatavuus on tietämätön.

Vaikka vetyä käyttävät polttokennot eivät ole päästönlähteitä, polttokennot ovat alttiita hajoamiselle ilman epäpuhtauksien, kuten rikkioksidin tai typpioksidin vuoksi. Tämä aiheuttaa jännitteenalenemaa, jolloin polttokennon teho laskee. Tämä tarkoittaa sitä, että hybridialuksessa polttokennojen pitäisi olla eristettynä, jotta dieselmoottorin

päästöt eivät vahingoita polttokennoja. Myös vaihtelevissa kuormitusolosuhteissa vedyn syöttöä polttokennojärjestelmälle on ohjattava, jotta vältetään tehopiikkien aiheuttamat ongelmat (Rosli ym. 2012). Vedyn täytyy olla myös erittäin puhdasta, jotta sitä voidaan käyttää polttokennoissa.

2.4 Akku

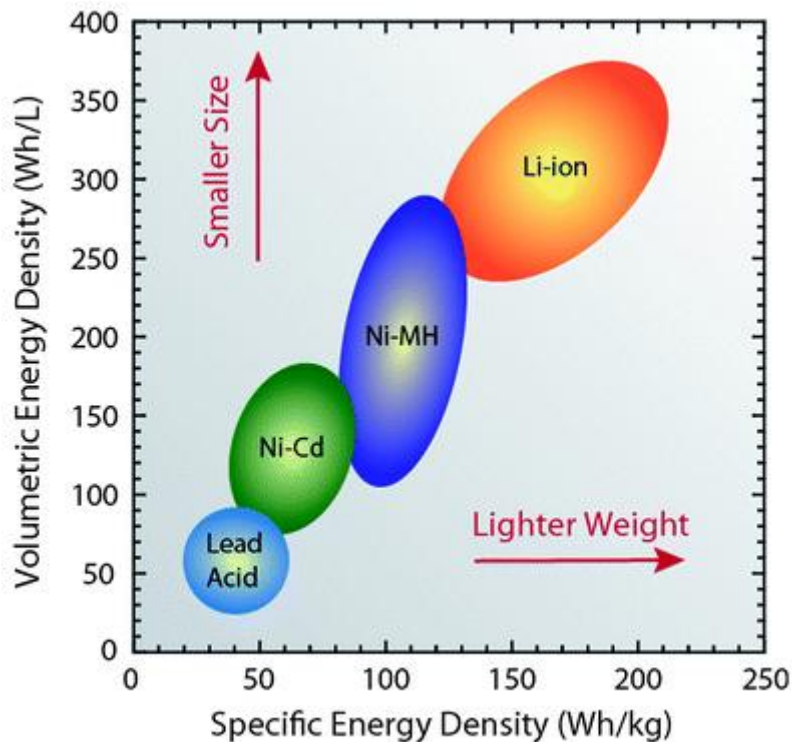
Akku on laite, joka varastoi sähköenergiaa. Ladatessa akkua positiivisesti ladatut ionit siirtyvät positiiviselta elektrodilta (anodi) negatiivisesti ladatulle (katodi) (DNV 2016). Kuva 4 esittää akun toimintaperiaatteen.



Kuva 4. Akun toimintaperiaate (DNV 2016).

Akun tehtävänä on tasata tehovaihteluita hybridialuksessa, sekä kattaa tarvittavan energian propulsiolle ja hotellikuormalle (aluksen muu energiankulutus) täyssähköisessä aluksessa. Akkua voidaan ladata joko rannassa latureilla, tai aluksella olevalla dieselgeneraattorilla (hybriditopologiassa).

Akkujen merkittävin haaste nestemäisiin polttoaineisiin verrattuna on niiden alhainen energiatiheys. Tämä koskee myös litiumioniakkuja, vaikka niiden energiatiheys on suurin käytettävissä olevista akkukemioista. Tilavuuteen suhteutettuna dieselkäyttöisen aluksen energiavaraston energiatiheys voi olla jopa 13-kertainen litiumioniakuilla toimivaan aluksen energiavastoon verrattuna, ja massa suhteutettuna vastaava ero on noin 12-kertainen (Haiyang ym. 2015). Kuva 5 esittää eri akkukemioiden energiatheyden massan ja tilavuuden mukaan.



Kuva 5. Akkukemioiden energiatihedyydet massan ja tilavuuden mukaan (Epec Engineered Technologies n.d.).

Jatkuva lataus ja purkaus myös kuluttaa akkua nopeammin. Akkua ei voida myös ladata täyteen tai tyhjentää kokonaan, jos halutaan maksimoida akun elinikä (DNV 2016). Tämä tarkoittaa sitä, että akun ominaiskapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin oikea kapasiteetti. Akkujen C-arvo on myös tärkeää ottaa huomioon akkua valitessa. Akun lataus-/purkuvirta voidaan ilmoittaa suhteessa akun kapasiteettiin ns. C-arvona. Akun suurin sallittu lataus- ja purkuvirta ilmoitetaan usein C-arvona. Tämä on skaalattu akun kapasiteettiin, ja lasketaan yhtälöllä:

$$C_{max} = \frac{P_{max}}{E},$$

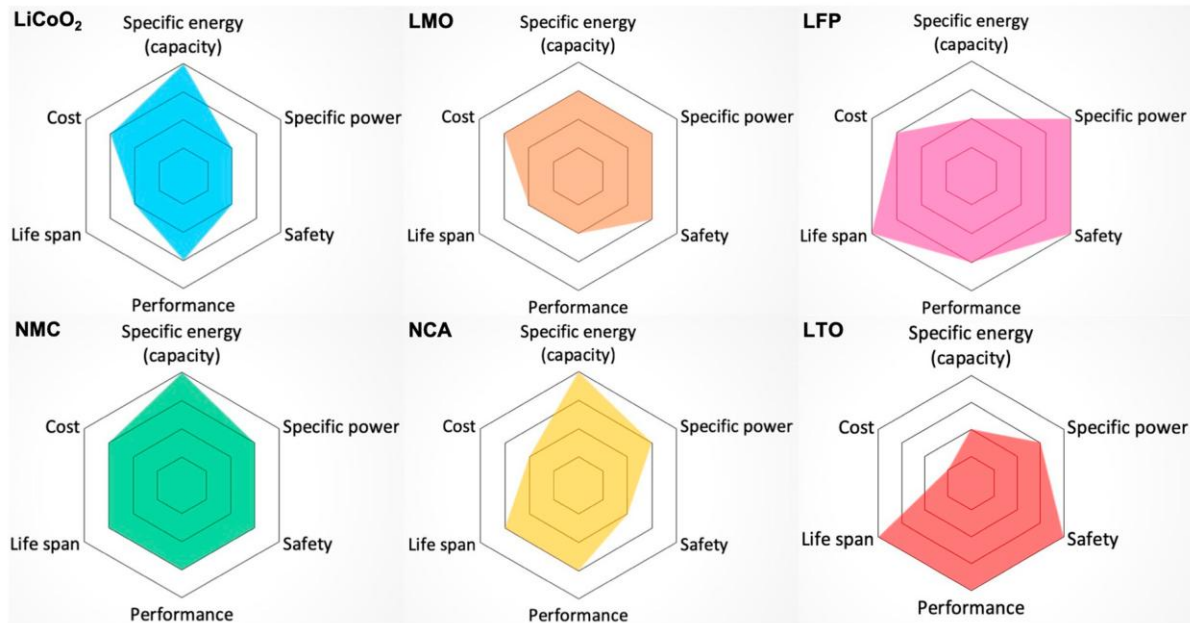
jossa C_{max} on akun suurin sallittu C-arvo, P_{max} on suurin sallittu kuormituksen tai latauksen teho (kW) ja E on akun nimelliskapasiteetti (kWh)

Mitä suurempia lataus-/purkuvirtoja (suurempia C-arvoja) käytetään, sitä nopeammin akku ikääntyy. C-arvo on rajoitettu suurtehoisissa akuissa 3:een, jotta niiden elinikää voidaan pidentää.

2.4.1 Akkukemiat

Erilaisilla akkukemioilla on erilaiset ominaisuudet, joten akkukemian valinta perustuu käyttökohteen vaatimuksiin. Litiumioniakut on käytetyin akkutyyppi sähköajoneuvomarkkinoilla niiden tehokkuuden, energiatiheyden ja eliniän takia. Litiumrautafosfaatti (LFP) on käytetyin akkutyyppi sähköajoneuvoissa hinnan, saatavuuden ja eliniän perusteella. Tosin niiden energiatiheys on suhteellisen pieni verrattuna muihin litiumionipohjaisiin akkukemioihin. Tämä tarkoittaa sitä, että akusto painaa enemmän. LFP akut ovat vähemmän alttiita lämpöryntäykselle kuin monet muut litiumioniakut. Lisäksi ne soveltuvat käyttöön laajalla lämpötila-alueella, tyypillisesti noin $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Miao ym. 2019).

Muita tyyppejä ovat litiumkobolttioksidi (LCO), litiummangaanioksidi (LMO), litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC) ja litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA). LCO:ta käytetään yleisesti pienissä elektroniikkalaitteissa, kuten puhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa. Mutta koska koboltti on kallista ja sen lämpöstabiilisuus on heikkoa (Miao ym. 2019), se ei sovellu merikäyttöön. LMO:lla on alhaisempi sisäinen kennon vastus, joka mahdollistaa suuren purkausvirran. LMO-kemialla on hyvä lämpöstabiilisuus, mikä parantaa sen turvallisuutta ja soveltuvuutta suuritehoisiin sovelluksiin. Sen kapasiteetti ja käyttöikä ovat kuitenkin lyhyemmät kuin LCO:lla. NMC tarjoaa suuren tehon, suuren tiheyden ja alhaisen sisäisen resistanssin ainutlaatuisen nikkelin ja mangaanin yhdistelmän ansiosta. NMC:llä on suuri kysyntä sähköautosovelluksissa sen korkean ominaisenergian ja alhaisen sisäisen resistanssin vuoksi, mikä aiheuttaa minimaalista itsekuumenemista. Myös NCA:lla on nämä ominaisuudet, mutta sillä on tällä hetkellä pieni markkinaosuus (Hannan ym. 2018). Kuva 6 esittää karkean vertailun eri litiumioniakkujen ominaisuuksista.



Kuva 6. Eri litiumioniakkujen ominaisuuksien vertailu (Miao ym. 2019).

2.5 Energialähteiden saatavuus

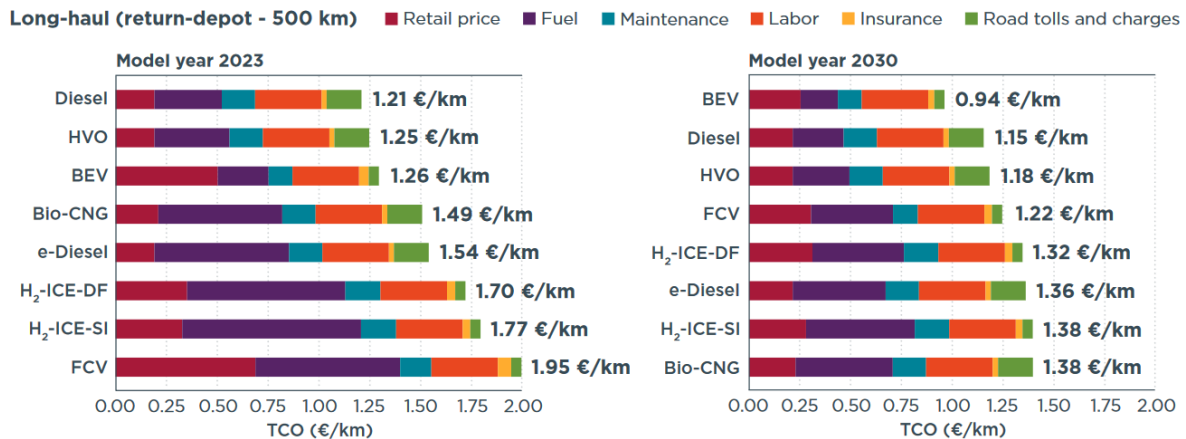
Energialähteiden tulevaisuuden saatavuuden ja kustannusten arviointi on tärkeää aluksen hybridisoinnin kannattavuuden kannalta. Jos energialähde on tulevaisuudessa kallis tai sen saatavuus on heikko, sen käyttöönotto apualuksessa ei ole kannattavaa.

Biopolttoaineiden saatavuutta on vaikea arvioida, koska ne ovat riippuvaisia kestävästä biomassaraaka-aineesta. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) mukaan maailmanlaajuisen biopolttoaineiden kysynnän odotetaan kuitenkin kasvavan 38 miljardilla litralla vuosina 2023–2028 (IEA 2023b). Sama lähde arvioi, että biopolttoaineiden kokonaiskysyntä nousee noin 200 miljardiin litraan vuoteen 2028 mennessä. Biopolttoaineita ei tällä hetkellä tuoteta massatuotantona kuten perinteisiä öljypohjaisia polttoaineita, ja niiden tuotantokustannukset ovat korkeammat (DNV GL 2019). Biopolttoaineiden hinnat ovat yleensä noin 2 – 3 €/l riippuen siitä, kuinka paljon öljypohjaista polttoainetta sekoitetaan. Eräissä Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että etanolipohjaisen biopolttoaineen tuotanto maksoi 4 dollaria gallonia kohden bensiiniekvivalenttia (GGE) ja rasvahapoista valmistetun biodieselin noin 3,7 dollaria (Witcover ja Williams 2020). Tämä tarkoittaa sitä, että biopolttoaineiden tuottaminen saman energiamäärän saamiseksi on lähes neljä kertaa kalliimpaa kuin bensiinin tuottaminen.



Sähköisten polttoaineiden kysyntä liikenteessä kasvaa, koska sähköisten polttoaineiden tuotanto voi olla hiilineutraalia, jos se tuotetaan uusiutuvalla energialla. Sähköisten polttoaineiden kokonaiskapasiteetin arvioidaan olevan noin 63 TWh vuodessa vuoteen 2030 asti (Müller ym. 2024) ja kustannusten arvioidaan olevan noin 2,8 – 3,4 €/l, mikä riippuu synteessissä käytetyistä energialähteistä (D’Adamo ym. 2024). Hinta riippuu myös hiilidioksidin talteenottokustannuksista, jotka voivat olla noin 20 – 950 € per tonni teollisissa lähteissä (Millinger ym. 2022). Sähköisiä polttoaineita ei kuitenkaan pidetä tällä hetkellä kannattavana vaihtoehtona korkeiden kustannusten ja saatavuuden niukkuuden vuoksi. Ne voitaisiin kuitenkin ottaa käyttöön kaukaisemmassa tulevaisuudessa vähäpäästöisempien polttoaineiden osalta ilman suuria investointikustannuksia koko hybridijärjestelmään.

Globaali vedyn käyttö ylitti 95 miljoonaa tonnia vuonna 2022, ja sen arvioidaan nousevan yli 150 miljoonaan tonniin vuoteen 2030 mennessä (IEA 2023a). Vedyn hinta riippuu pitkälti siitä, miten se hankitaan. Verkkosähkön tuotannon hinnan Euroopassa arvioitiin olevan noin 4,06 – 17,36 €/kg. Ja uusiutuvaa energiaa käyttävän veden elektrolyysin hinnan arvioitiin olevan noin 4,13 – 9,30 €/kg vuonna 2023 (European Hydrogen Observatory 2023). Erään lähteen mukaan vedyn hinta on noin 10 €/kg vuonna 2023 ja laskee noin 7,8 €/kg vuoteen 2030 mennessä (Basma ja Rodríguez 2023). Vaikka vihreästi tuotettu vety vaikuttaa hyvältä vaihtoehdolta PEMFC:n kanssa, sen implementoiminen on tällä hetkellä erittäin kallista. PEMFC:n investointikustannusten arvioidaan olevan noin 397–955 €/kWh vuoteen 2030 mennessä (Saba ym. 2018). Puhtaan vedyn tuotanto on huomattavasti alhaisempi kuin vedyn kokonaistuotanto, noin 0,7 % vuonna 2022. Puhtaan vedyn tuotannon odotetaan kuitenkin kolminkertaistuvan tulevina vuosina. Eräessä tutkimuksessa arvioitiin, että polttokennopohjaisten raskaiden ajoneuvojen omistamisen kokonaiskustannukset (TCO) saavuttaisivat saman verran kuin dieselkäyttöisten raskaiden ajoneuvojen vuoteen 2030 mennessä (Basma ja Rodríguez 2023). Kuva 7 esittää raskaan hybridiajoneuvon omistamisen kokonaiskustannukset eri energialähteillä.



Kuva 7. Raskaan hybridiajoneuvon omistamisen kokonaiskustannukset (Basma ja Rodríguez 2023).

Litiumioniakkujen hankintakustannukset ovat laskeneet noin 85 % viimeisen vuosikymmenen aikana, ja niiden hinnan arvioidaan laskevan noin 75 \$/kWh vuoteen 2030 mennessä (Orangi ym. 2024). Nykyään hinta on noin 120 \$/kWh. Tätä on melko vaikea arvioida, koska se riippuu materiaalien saatavuudesta ja hinnasta sekä tuotantomäärästä. On myös arvioitu, että kokonaiskapasiteetti kasvaa noin 3,5 – 4,1 TWh vuoteen 2030 mennessä. Tämä johtuu akkujen valmistuksen jatkuvasta kysynnästä ja teknologian kehityksestä. Akkujärjestelmää asennettaessa laivaan on otettava huomioon turvallisuus. Litiumioniakkujen jännitteitä, virtaa, varaustasoa (SOC), kuntoa (SOH) ja lämpötilaa on seurattava turvallisen käytön varmistamiseksi. Akunhallintajärjestelmä (BMS) valvoo tyypillisesti näitä asioita. Muita asioita ovat: ilmanvaihto, siltä varalta, että litiumioniakku pettää, koska se voi vapauttaa myrkyllisiä kaasuja, ja palosuojaus akun syttyessä tuleen. Nämä on tietenkin otettava huomioon akkujärjestelmää budjetoitaessa. Tästä syystä laivojen akkujärjestelmien hintaluokka on yleensä noin 650 – 750 €/kWh (Sustainable ships 2024).

Seuraavalla sivulla on esitetty taulukko 1, jossa on koottu yhteen vaihtoehtoisten energialähteiden hyödyt ja haitat. Taulukosta 1 ja aiemmin käsitellystä materiaalista voidaan päätellä, että biodieselin käyttö polttomoottorin pääasiallisena polttoaineena yhdessä akkujen kanssa vaihtoehtoisena energialähteenä on järkevin vaihtoehto lähitulevaisuuden apualusten sovelluksissa biopolttoaineiden korkean palamistehokkuuden ja edullisen hinnan, akkujen latauskyvyn sekä sähkön hinnan



vuoksi. Akkujen yksikköhinta voi olla korkea, koska akkujärjestelmien on oltava merikäyttöön soveltuvia.

Taulukko 1. Vertailutaulukko energialähteistä.

	Biopolttoaine	E-polttoaine	Vety	Akku
Hyödyt	• Uusiutuva, kestävä ja biohajoava. • Korkea palamistehokkuus • Helppo integroida olemassa olevaan laitteistoon • Lisääntynyt saatavuus tulevaisuudessa	• Voidaan käyttää "drop-in" polttoaineena • Korkea oktaaniluku verrattuna meridieselpolttoaineisiin • Ei vapauta rikkioksidia tai typpioksidia	• Laajasti saatavilla • Voidaan hankkia ja prosessoida uusiutuvalla energialla • Voidaan käyttää polttomootorissa tai polttokennojen kanssa • Ei päästä rikkioksidia	• Potentiaali olla päästötön. • Voidaan ladata generaattorilla. • Saatavilla laajasti erilaisilla akkuyhdistelmillä • Suhteellisen halpa riippuen akkujärjestelmästä ja kapasiteetista
Haitat	• Vaikuttaa ruoantuotantoon ja on riippuvainen elävästä raaka-aineesta • Hiilineutraali vain, jos tuotantocykli tehdään uusiutuvalla energialla • Päästää enemmän typpioksidia kuin perinteinen dieselpolttoaine • Kaksinkertainen hinta verrattuna öljypohjaisiin polttoaineisiin	• Tulevaisuuden saatavuus niukkaa tai epävarmaa • Kallista ja hinta riippuu CO₂:n talteenottokustannuksista • Hiilineutraali vain, jos tuotantocykli tehdään uusiutuvalla energialla	• Alhainen energiamäärä tilavuutta kohden, mikä tekee varastoinnin vaikeaksi • Saastuttaa rikkioksidia poltettaessa • Kallis, ja kustannukset riippuvat tuotantocyklistä • Puhtaan vedyn tuotanto on merkittävästi alhaisempaa • Polttokennot ovat erittäin kalliita	• Alhainen energiatiheys • Alti heikkenemiselle lataus- ja pulssisyklien aikana • Tarvitsee oman hallintajärjestelmän ja tehoelektroniikan, mikä lisää investointikustannuksia

3 Hybridi- ja sähkövoimalinjan komponenttivalinnat

Hybridialuksien etuna on se, että niissä on kaksi tai useampia eri voimanlähteitä, jotka voivat toimia itsenäisesti tai yhdessä aluksen tehotarpeen kattamiseksi. Hybriditopologioissa akustoa käytetään tyypillisesti yhdessä perinteisen dieselgeneraattorin kanssa, jolloin polttomoottorin aiheuttamia päästöjä voidaan vähentää. Hybriditopologian avulla voidaan parantaa aluksen energiatehokkuutta, sekä vähentää operointikustannuksia (Koričan ym. 2023). Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää jopa 50 % hybridisaation avulla.

Aluksen komponenttivalinnoilla on merkittävä vaikutus päästöjen vähentämiseen. Komponentit on mitoitettava siten, että järjestelmä kykenee tuottamaan riittävästi tehoa ja energiaa työsyklin vaatimukseen nähden. Käytettävän topologian mukaan aluksissa hyödynnetään polttomoottoreita, sähkömoottoreita tai niiden yhdistelmiä. Sarjahybridijärjestelmässä potkuria pyörittää pelkkä sähkömoottori, kun taas rinnakkaishybridijärjestelmässä sekä polttomoottori että sähkömoottori pyörittävät potkuria. Lisäksi rinnakkaishybridijärjestelmässä sähkömoottoria voi käyttää generaattorina ja näin ladata akkua.

Kappaleessa tarkastellaan hybriditopologiavaihtoehtoja, sekä komponenttivalintoja näille topologioille perusteellisesti.

3.1 Sarjahybriditopologia

Sarjahybriditopologiassa aluksen propulsio toteutetaan sähkömoottorilla, ja eri energialähteet on kytketty sähköisesti toisiinsa DC-välipiiriin (DC-jakeluverkko) kautta. Tyypillisessä ratkaisussa dieselmoottori pyörittää generaattoria, jonka tuottama sähköenergia muunnetaan tehoelektroniikan avulla DC-välipiiriin. Myös akusto on kytketty DC-välipiiriin, ja invertteri syöttää sähkömoottoria, joka pyörittää potkuria. Näin dieselmoottori ja akusto voivat yhdessä tuottaa sähkömoottorin tarvitseman tehon.

Sarjahybridissä generaattori voidaan mitoittaa aluksen työsyklin keskimääräisen tai tyypillisen tehontarpeen perusteella. Akusto toimii tällöin energiavarastona ja tehon tasaajana, joka kattaa lyhytaikaiset tehontarpeen vaihtelut ja suuremmat tehopiikit.

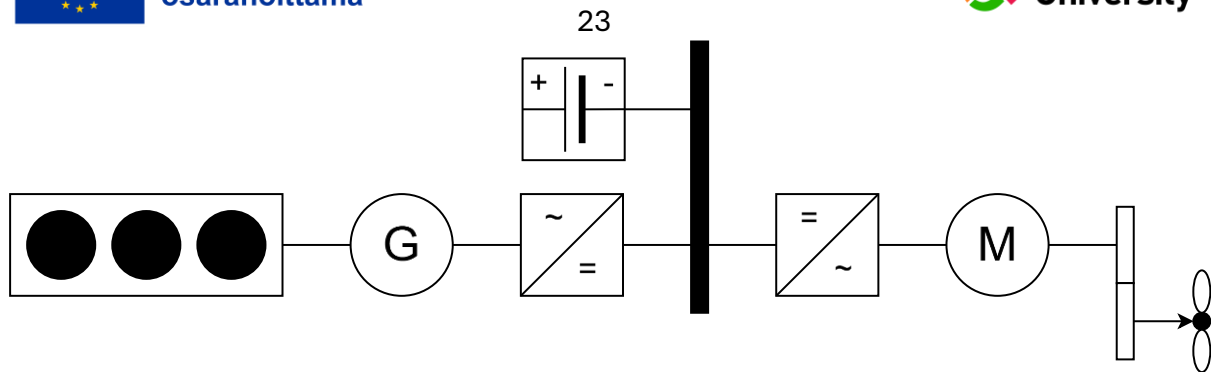


Vastaavasti pienellä kuormituksella generaattorin ylimääräistä tehoa voidaan käyttää akuston lataamiseen. Ratkaisulla voidaan siten käyttää dieselgeneraattoria mahdollisimman usein sen polttoainetalouden kannalta edullisella kuormitusalueella ja vähentää tarvetta mitoittaa generaattoria lyhytaikaisten huipputehojen perusteella.

Sarjahybridissä sähkömoottori mitoitetaan aluksen propulsioon tarpeiden mukaisesti. Dieselgeneraattorin tehtävänä on tuottaa sähköenergiaa, eikä se ole mekaanisesti yhteydessä potkuriakseliin. Tämän vuoksi sähkömoottorin mitoituksessa on huomioitava potkurin vaatima vääntömomentti sekä mahdollinen mekaaninen välitys sähkömoottorin ja potkurin välillä.

Kuva 8 esittää sarjahybridijärjestelmän lohkokaaavion. Kuvassa esitetyssä ratkaisussa sähkömoottori on kytketty potkuriin vaihteiston välityksellä. Tällöin vaihteiston välityssuhde vaikuttaa suoraan sähkömoottorilta vaadittavaan vääntömomenttiin ja pyörimisnopeuteen. Mikäli sähkömoottori kytketään potkuriin ilman vaihteistoa, moottorilta vaaditaan vastaavasti suurempi vääntömomentti ja potkurin kanssa yhteensopiva alhaisempi pyörimisnopeus.

Sarjahybridissä erillinen merivaihte ei siten ole välttämätön, mikäli sähkömoottorin pyörimisnopeus ja vääntömomentti voidaan mitoittaa suoraan potkurin käyttövaatimusten mukaisesti. Vaihteiston käyttö mahdollistaa sähkömoottorin pienemmän vääntömomentin ja suuremman pyörimisnopeuden, mutta lisää samalla voimansiirron häviöitä, kustannuksia ja komponenttien määrää. Merivaihteen poisjättäminen mahdollistaa nopean suunnanvaihdon, mutta kasvattaa merkittävästi sähkömoottorin kokoa.



Kuva 8. Sarjahybriditopologian lohkokkaavio.

3.2 Rinnakkaishybriditopologia

Rinnakkaishybriditopologiassa dieselmoottori ja sähkömoottori tuottavat propulsiotehoa mekaanisesti samaan voimansiirtoon. Sähkömoottori toimii joko moottorina tai generaattorina purkaen tai ladaten akustoa. Moottorit kytketään yhteiseen potkuriakseliin merivaihteen välityksellä. Rinnakkaishybridin tavoitteena on vähentää polttoaineenkulutusta ja päästöjä hyödyntämällä diesel- ja sähkömoottoria yhdessä aluksen eri käyttötilanteissa.

Sähkömoottorin avulla dieselmoottorin kuormitusta voidaan kasvattaa tilanteissa, joissa aluksen tehontarve on suuri. Tällöin sähkömoottori tuottaa osan tarvittavasta propulsiotehosta ja dieselmoottori voidaan pitää hyötysuhteeltaan edullisemmalla kuormitusalueella. Toisaalta sähkömoottoria voidaan käyttää pienillä tehovaatimuksilla ainoana propulsiovoiman lähteenä, jolloin dieselmoottoria ei tarvitse käyttää pienellä kuormituksella, jossa sen hyötysuhde on yleensä heikompi. Pelkkää sähkömoottorikäyttöä varten dieselmoottori on kuitenkin voitava erottaa mekaanisesti potkuriakselista esimerkiksi kytkimen avulla. Muussa tapauksessa sähkömoottori joutuisi pyörittämään myös dieselmoottoria, mikä aiheuttaisi tarpeettomia mekaanisia häviöitä.

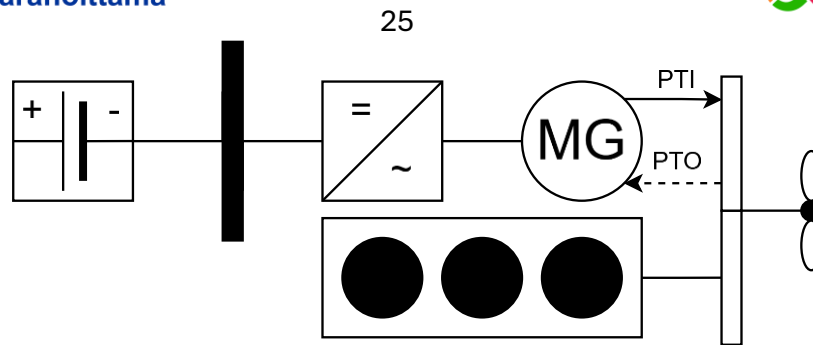
Sähkömoottoria voidaan käyttää myös generaattorina dieselmoottorin tuottamalla mekaanisella teholla. Tällöin sähkömoottori toimii PTO-tilassa (Power Take-Off) ja sen tuottamalla sähköenergialla voidaan ladata akustoa tai syöttää muita aluksen sähkökuormia. Vastaavasti PTI-tilassa (Power Take-In) sähkömoottori toimii moottorina ja tuottaa propulsiotehoa yhdessä dieselmoottorin kanssa. PTI-tilaa voidaan hyödyntää



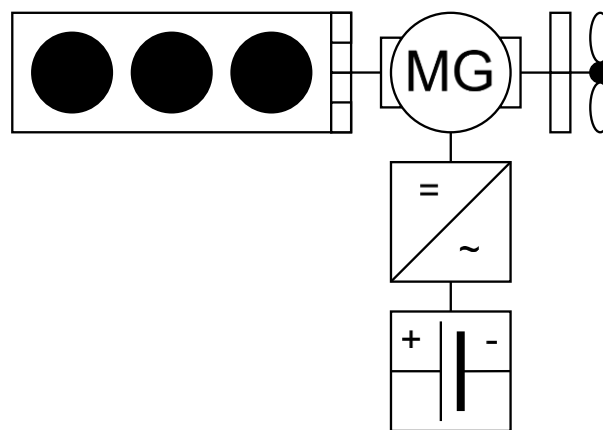
erityisesti suurilla tehontarpeilla, esimerkiksi suurilla nopeuksilla tai ulkoisen kuorman kasvaessa (MAN Energy Solutions 2021).

Kuva 9a esittää rinnakkaishybridijärjestelmän lohkokaaavion, jossa on PTI/PTO-toiminnallisuudella varustettu vaihteisto. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kuvan 9b mukaisesti, jolloin dieselmoottorin vauhtipyörä kytketään läpiakselisen sähkömoottoriin ja edelleen merivaihteeseen. Tällöin ei tarvita PTI/PTO vaihteistoa ja tämä ratkaisu sopii erinomaisesti apualuksen kokoluokan aluksiin.

Lisäksi on huomioitava PTI/PTO-vaihteistojen saatavuus tämän työn kohteena olevan aluksen kokoluokassa. Markkinoilla olevat PTI/PTO-ratkaisut on suunniteltu pääasiassa suurempiin aluksiin, joissa propulsiotehot ovat huomattavasti suurempia ja voivat olla useita megawatteja. Tämän vuoksi sopivien kaupallisten ratkaisujen saatavuus 100–200 kW teholuokassa on rajallinen. Tässä teholuokassa läpiakselilla varustettu sähkömoottori voi siten olla käytännöllisempi ja helpommin toteutettava vaihtoehto rinnakkaishybridin sähköiseksi voimantuottajaksi.



a)



b)

Kuva 9. Rinnakkaishybriditopologian lohkokkaavio a) PTI/PTO vaihdelaatikolla varustettu malli. Vaihteiston yhteydessä on merivaihte b) Sähkömoottori läpivientiakselilla, joka on kytketty merivaihteen välityksellä potkuripropulsioon.

3.3 Sarja- ja rinnakkaishybridin ominaisuuksista

Sarja- ja rinnakkaishybridien merkittävimmät erot liittyvät komponenttien mitoitukseen, voimansiirron häviöihin ja järjestelmän rakenteelliseen monimutkaisuuteen. Sarjahybridissä sähköisen ajomoottorin on tuotettava koko potkurin vaatima propulsioteho ja -vääntömomentti. Mahdollinen merivaihteen välityssuhde huomioidaan sähkömoottorin mitoituksessa. Rinnakkaishybridissä dieselmoottori ja sähkömoottori voivat puolestaan tuottaa propulsiotehoa samanaikaisesti, jolloin sähkömoottorin ei tarvitse välttämättä kattaa koko aluksen huipputehoa.

Sarjahybridissä tarvitaan vähintään kaksi sähkökonetta: generaattori ja propulsiomoottori sekä näille omat tehoelektroniikkansa. Lisäksi propulsiomoottorin ja sen invertterin on oltava mitoitettu aluksen suurimman propulsiotehon mukaan. Rinnakkaishybridissä sähkömoottori voidaan mitoittaa pienemmäksi, koska



dieselmoottori tuottaa osan propulsiotehosta. Myös akuston teho- ja energiakapasiteetti voi tällöin olla pienempi. Komponenttien pienempi koko voi olla erityisen merkittävä etu pienessä, 100–200 kW:n teholuokassa toimivassa aluksessa, jossa tilankäyttö, massa ja kustannukset ovat merkittäviä suunnittelukriteerejä.

Sarjahybridin etuna on kuitenkin mahdollisuus mitoittaa dieselgeneraattori työsyklin keskimääräisen tehontarpeen perusteella. Mikäli aluksen keskiteho on pieni suhteessa hetkelliseen huipputehoon, akusto voi kattaa lyhytaikaiset suuret tehopiikit. Dieselgeneraattori voidaan tällöin pitää suuremman osan käyttöajasta hyötysuhteeltaan edullisella kuormitusalueella. Tämä mahdollisuus on erityisen kiinnostava tämän työn kohteena olevassa apualuksessa, jonka mitattu keskiteho on huomattavasti huipputehoa pienempi.

Sarjahybridin haittana on useiden peräkkäisten energiamuunnosten aiheuttama häviö. Esimerkiksi generaattorin hyötysuhteen ollessa 95 %, generaattorin ja propulsiomoottorin välisen tehoelektroniikan kokonaishyötysuhteen 97 %, sähkömoottorin hyötysuhteen 96 % ja merivaihteen hyötysuhteen 97 % sarjahybridin dieselgeneraattorilta potkurille ulottuvan voimansiirtoketjun hyötysuhteeksi saadaan noin 86 %. Tällöin noin 14 % generaattorin tuottamasta mekaanisesta tehosta menetetään ennen potkuria. Vertailun vuoksi suorassa dieselmekaanisessa voimansiirrosta, jossa merivaihteen hyötysuhteeksi oletetaan 97 %, vastaava hyötysuhde on noin 97 %. Rinnakkaishybridissä dieselmoottorin tuottama pääosa propulsiotehosta voidaan välittää vastaavasti mekaanisesti ilman generaattorin ja sähköisen voimansiirron häviöitä.

Sarjahybridin heikompaa voimansiirron hyötysuhdetta voidaan kuitenkin kompensoida dieselmoottorin paremmalla kuormitusasteella. Jos dieselmoottori voidaan mitoittaa pienemmäksi ja käyttää sitä pääasiassa lähellä optimaalista hyötysuhdepistettä, polttoaineenkulutus voi olla pienempi energiamuunnosten suuremmista häviöistä huolimatta. Näin ollen hybridivoimalinjan kokonaishyötysuhdetta ei voida arvioida pelkästään voimansiirtoketjun nimellishyötysuhteiden perusteella, vaan huomioon on otettava myös dieselmoottorin todellinen käyttöprofiili.



Rinnakkaishybridissä sähköisen voimansiirron häviöt ovat tyypillisesti pienemmät kuin sarjahybridissä, koska sähköistä tehoa ei tarvitse välittää koko propulsiotehon osalta. Toisaalta dieselmoottorin käyttöä ei voida sarjahybridin tavoin täysin irrottaa potkurin hetkellisestä tehontarpeesta. Tämän vuoksi dieselmoottori voi joutua toimimaan useammin pienellä kuormituksella, mikä heikentää sen hyötysuhdetta.

Rinnakkaishybridissä akusto voidaan yleensä mitoittaa pienemmäksi kuin sarjahybridissä, koska dieselmoottori tuottaa suuren osan propulsiotehosta myös suurten tehontarpeiden aikana. Akustolta vaadittava hetkellinen teho on siten pienempi. Tämä voi pienentää sekä akuston kapasiteetti- että tehovaatimuksia.

Luotettavuuden kannalta sarja- ja rinnakkaishybrideillä on erilaiset vahvuudet. Sarjahybridissä dieselmoottorin vikaantuminen ei välttämättä estä aluksen liikkumista välittömästi, mikäli akustossa on riittävästi energiaa sähköiseen propulsioon. Rinnakkaishybridissä puolestaan sähköisen voimansiirron vikaantuessa dieselmoottori voi jatkaa propulsiotehon tuottamista, mikä mahdollistaa operoinnin alentuneella suorituskyvyllä. Molemmissa ratkaisuissa järjestelmän vikasietoisuus riippuu kuitenkin käytetystä topologiasta, kytkimistä, ohjauksesta ja tarvittavista varajärjestelmistä.

Taulukko 2. Sarja- ja rinnakkaishybridin ominaisuustaulukko.

Ominaisuus	Sarjahybrid	Rinnakkaishybrid
Dieselmoottorin mitoitus	Keskitehon mukaan	Lähempänä huipputehoa
Ajomoottorin mitoitus	Koko propulsioteho	Osa propulsiotehosta
Sähkökoneiden määrä	Vähintään 2	Tyypillisesti 1
Sähköisen voimansiirron koko	Suurempi	Pienempi
Akuston C-arvo	Suurempi	Pienempi
Mekaaninen voimansiirto	Yksinkertaisempi	Monimutkaisempi
Diesel → potkuri -hyötysuhde	Heikompi	Parempi
Dieselmoottorin kuormituksen optimointi	Erittäin hyvä	Hyvä, mutta rajallisempi
Dynaaminen suorituskyky	Erittäin hyvä ja nopea	Hyvä, mutta rajallisempi
Pelkkä sähköajo	Helppo toteuttaa	Jos diesel irrotettavissa

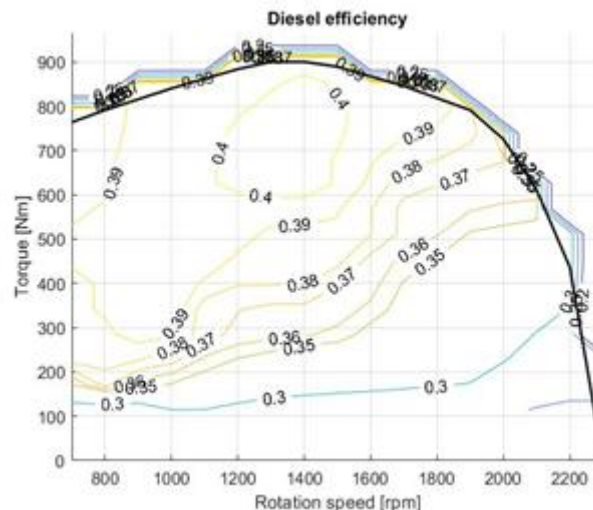


Komponenttien saatavuus 100–200 kW	Sähkökomponenttien saatavuus on hyvä	Hyvä, jos ei käytetä PTI/PTO vaihteistoa
Vikasietoisuus	Käytettävissä dieselin vikaantuessa	Käytettävissä sähkövoimalinjan vikaantuessa
Soveltuvuus apualukselle	Hyvä	Hyvä

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että sarja- ja rinnakkaishybridin paremmuutta ei voida määrittää pelkästään voimansiirron nimellishyötysuhteiden tai komponenttien lukumäärän perusteella. Sarjahybridin etuna on mahdollisuus mitoittaa dieselgeneraattori aluksen keskimääräisen tehontarpeen perusteella ja hyödyntää akustoa lyhytaikaisten tehopiikkien kattamiseen. Rinnakkaishybridissä sähköisen voimansiirron komponentit voidaan puolestaan mitoittaa pienemmiksi ja dieselmoottorin mekaanisen voimansiirron häviöt ovat pienemmät. Tässä työssä mitattu aluksen käyttöprofiili mahdollistaa näiden vaikutusten tarkemman vertailun myöhemmässä simulointi- ja mitoitusosuudessa.

3.4 Polttomoottorivaihtoehdot

Dieselmoottoreiden polttoainekulutus on parhaimmillaan noin 175–180 g/kWh kaksitahtimoottoreissa ja 190–195 g/kWh nelitahtimoottoreissa (Sagin ym. 2024). Nämä arvot ovat parhaan hyötysuhdealueen arvoja. Kuten kuvasta (Kuva 10) käy ilmi, hyvän hyötysuhteen alue on hyvin rajallinen sekä pyörimisnopeuden, että vääntömomentin suhteen. Pienin ominaisenergian kulutus 100–200 kW aluksissa käytettävissä moottoreissa on yleensä noin puolessa välissä pyörimisnopeusaluetta, väännön ollessa noin 70–85 % maksimiväännöstä. Tämä asettaa hybridisaatiolle tärkeän reunaehdon. Moottorin tulisi käydä mahdollisimman paljon tällä alueella. Tämä on toteutettavissa sarjahybridin tapauksessa, mutta on rajallisempi rinnakkaishybridin tapauksessa.



Kuva 10. Erään Dieselmootorin hyötysuhdekartta vääntömomentin ja pyörimisnopeuden funktiona.

3.4.1 Vetykäyttöiset polttomoottorit

Kuten aiemmin todettiin, vetyä voidaan käyttää polttomootoreissa. Tämä on herättänyt jonkin verran huomiota liikennetoimialalla, koska se tarjoaa pätevän ratkaisun päästöjen vähentämiseen ilman erikoislaitteita. Vetyä voidaan käyttää "drop-in"-polttoaineena jo olemassa olevissa nykYTEknologian polttomootoreissa (Onorati ym. 2022). Tämä tarkoittaa, että vetykäyttöisen polttomootorin käyttö on sekä kustannustehokasta että laajalti saatavilla. Vedyn ei myöskään tarvitse olla niin puhdasta kuin polttokennoissa, jotta sitä voidaan käyttää polttomootorissa. Vety syttyy myös herkästi, mikä lisää tehokkuutta (Menon ja Siew Hwa 2022).

Vedyn polttaminen kuitenkin vapauttaa typpioksidikaasuja. Ja nestemäinen vety vie enemmän säiliötilaa kuin diesel tai bensiini, koska vety on vähemmän energiatiheä. Puristetun vedyn varastointi vie yli seitsemän kertaa enemmän tilaa kuin biodieselin (Menon ja Siew Hwa 2022). Koska vety on erittäin helposti syttyvää, se aiheuttaa myös räjähdysvaaran. Tällä hetkellä markkinoille on tulossa vetykäyttöisiä polttomootoreita, ja valmistajat, kuten Volvo, ovat kehittäneet vety-diesel-hybridipolttomootorin "Volvo Penta D-13", jota voidaan käyttää pelkästään vedyllä (Volvo Penta 2023).

Vetymoottorit (H_2 ICE) ovat prototyyppi- ja pilotointivaiheessa, eikä niitä ole välttämättä saatavissa lähivuosina. Vedyn kuljettaminen ajoneuvossa vaatii suuren paineen ja vedyn kompressoitukustannukset ovat suuret. Noin 700 baarin vetysäiliö aluksessa voi maksaa



noin 9 – 14 \$/l (Sheikh ym. 2026), ja paineistetun vedyn hinta jakeluasemilla on noin 11-13€/kg.

3.5 Hybridivoimalinjakomponentit

Aluksen hybridisointiin sähkömoottorin tyypin valinta on tärkeää niiden eri investointikustannusten sekä eriävien ominaisuuksien takia. Sähkömoottorin lisäksi tarvitaan tarkoitukseen soveltuva energiavarasto, kuten akku ja/tai dieselgeneraattori ja dieseltankki.

3.5.1 Sähkömoottorityyppien vertailua

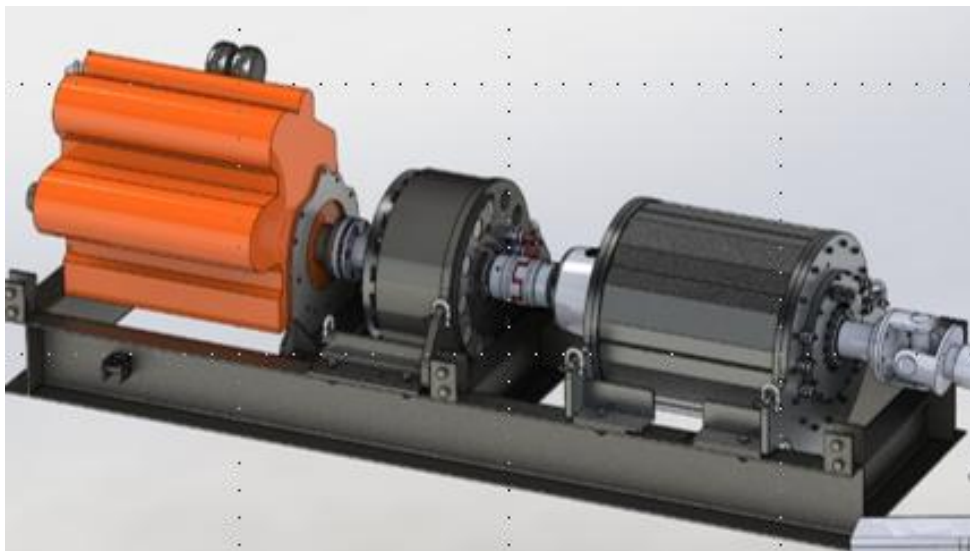
Oikosulkumoottorit (IM) ovat yleisin moottorityyppi teollisissa sovelluksissa niiden halvan hinnan takia. Taajuusmuuttajakäytössä oikosulkumoottorit ovat alan hallitseva sähkömoottorityyppi, vaikka ne eivät olekaan yhtä hyötysuhteeltaan tahtimoottoreiden veroisia roottorihäviöiden vuoksi. Niillä on myös kohtuullinen vääntömomenttitiheys, mikä tarkoittaa, että ne voivat tuottaa paljon vääntömomenttia viemättä paljon tilaa. Oikosulkumoottorit vaativat myös vähemmän huoltoa.

Kestomagneettitahtimoottorit (PMSM) ovat myös vaihtovirtamoottoreita, mutta toisin kuin oikosulkumoottoreissa, roottorin magnetointi hoidetaan kestopagneeteilla. Tästä syystä roottorin virtalämpö- ja rautahäviöt ovat pienemmät kuin oikosulkumoottoreilla ja moottorin hyötysuhde on suurempi. Lisäksi PM-koneiden tehotehiheys on yleensä myös suuri (Pyrhönen ym. 2016).

Synkronireluktanssimoottorit (SynRM) ovat vaihtovirtamoottorityyppiä, joka toimii magneettisen reluktanssimomentin avulla. Ne ovat edullisia yksinkertaisen rakenteensa ansiosta. Niillä on kuitenkin suuri vääntömomentin väreily, värinä ja melu (Pyrhönen ym. 2016). Niillä on myös alhainen tehokerroin, mikä tarkoittaa, että sähköjärjestelmää on ylimitoitettava. SynRM:n vääntömomenttia ja alhaista tehokerrointa voidaan parantaa lisäämällä kestopagneetteja roottorin vuonjohtimiin (Bianchi ym. 2016). Tätä kutsutaan kestopagneettiavusteiseksi synkroniseksi reluktanssimoottoriksi (PMA-SynRM), ja se on lupaava valinta hybridiajoneuvoihin korkean hyötysuhteensa ja tuottamansa vääntömomentin ansiosta. Kuvassa (Kuva 12) on esitetty Danfossin PMA-SynRM-

moottori. Näitä moottoreita on saatavilla teholuokassa, joka soveltuu hyvin uiton apualuksiin.

Kuvan (Kuva 9 b) mukaisessa rinnakkaishybridiratkaisussa läpiakselinen sähkömoottori/generaattori on sijoitettu suoraan dieselin kampiakselille/vauhtipyörälle ja toisesta päästä merivaihteeseen. Tällöin sähkömoottorin tulisi olla malliltaan sellainen, että akselin toisen pään, esim, DE-pään laippa ja akseli sopii suoraan DIN-, tai SAE-standardin mukaiseen dieselmoottori vauhtipyörään kiinnitettäväksi ja NDE-pää vastaavasti vaihteeseen. Näitäkin moottoreita on saatavissa rinnakkaishybridiratkaisulle erityisesti suunniteltuina. Laipallisten sähkökoneiden sijaan voidaan tietysti käyttää myös jalallisia koneita. Tällöin voimalinjan komponentit liitetään yleensä joustavilla kytkimillä 'letkaan'. Kuvassa (Kuva 11) on hahmoteltu sarja-rinnakkaishybridi, jossa voimalinjakomponentit on kytkimillä erotettu toisistaan. Rakenne voi kuvata myös rinnakkaishybridiä: vasemmalla dieselmoottori, kytkettynä moottorigeneraattoriin, joka on kytketty merivaihteeseen ja edelleen potkuriakseliin.



Kuva 11. Kytkimillä erotetut voimalinjakomponentit.



Kuva 12. Danfoss EM-PMI375-T800 (85–251 kW). Halkaisija: 450mm, pituus: 428mm.

Taulukossa (Taulukko 3) on esitetty tyypillisiä, kirjallisuudessa esitettyjä suoritusarvoja ja ominaisuuksia eri konetyypeille.

Taulukko 3. Eri sähkömoottorityyppien vertailutaulukko.

	IM	SynRM	PMA-SynRM	PMSM
Huippuhyötysuhde (%)	94–96	95–96	96–97	96–98
Osakuormahyötysuhde (kuorma 25–50 %)	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	erittäin hyvä
Tehotiheys (kW/kg)	0.7–1.2	0.8–1.3	0.8–1.8	1.2–2.0
Vääntömomenttitiheys (Nm/kg)	4–8	5–8	7–12	8–14
Tehokerroin	0.8–0.88	0.65–0.8	0.90–0.95	0.95–0.99
Roottorihäviöt	suuret	hyvin pienet	pienet	hyvin pienet
Kestomagneetteja	ei	ei	jonkin verran	paljon
Kentänheikennys	hyvä	kohtalainen	hyvä	hyvä

Ottaen huomioon luvussa 3.6 esitetyn potkurikäyrän sekä tehtyjen mittausten perusteella voidaan tehdä huomioita, jotka vaikuttavat moottorityypin valintaan. Tärkeitä



huomioitavia seikkoja ovat: a) potkurin vääntömomentti kasvaa likimain neliöllisesti nopeuden funktiona, b) maksiminopeus on noin 7 solmua, c) käyttö tapahtuu suurelta osin suhteellisen pienellä nopeusalueella, c) työsyklissä esiintyy lyhyitä suuria vääntöpiikkejä tukkien työntämisen aikana. Tästä voidaan tehdä muutamia johtopäätöksiä: Uiton apualuksen käyttöprofiilin perusteella sähkömoottorin tärkeimmät ominaisuudet ovat korkea hyötysuhde osakuormalla, suuri vääntömomentti alhaisilla pyörimisnopeuksilla sekä hyvä ylikuormitettavuus. Nimellinopeuden yläpuolista toimintaa ei käytännössä voida käyttää, eikä kentänheikennysalueesta siten saavuteta hyötyä, hyötysuhde osakuormalla on tärkeämpi kuin erittäin suuri huippunopeus. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 4) on esitetty yhteenveto ja perustelut moottorityypin valinnalle. Kestomagneettiaivusteinen synkronireluktanssimoottori (PMA-SynRM) tai kestopagneettitahtimoottori (PMSM) muodostavat teknisesti houkuttelevimmat vaihtoehdot. Mikäli investointikustannuksia halutaan minimoida ja korostaa yksinkertaista rakennetta, myös oikosulkumoottori on perusteltu vaihtoehto.

Taulukko 4. Eri sähkömoottorityyppien soveltuvuustaulukko uiton apualukseen.

Moottorityyppi	Soveltuvuus uiton apualukseen
Oikosulkumoottori (IM)	Hyvä. Edullinen, erittäin luotettava ja huoltovapaa. Soveltuu hyvin käyttökohteeseen, mutta hyötysuhde ja tehotehiys jäävät hieman PMSM:ää pienemmiksi.
PMSM	Erittäin hyvä. Korkea hyötysuhde erityisesti osakuormalla, suuri vääntömomenttitehiys ja kompakti koko. Haittana kestopagneettien korkea hinta ja harvinaiset maametallit. Pieni tilan tarve.
SynRM	Kohtalainen. Edullinen rakenne, mutta suuri momenttivärähtely voi heikentää käyttömukavuutta sekä lisätä mekaanista rasitusta potkurilinjassa. Edullinen rakenne, mutta suuri momenttivärähtely voi heikentää käyttömukavuutta sekä lisätä mekaanista rasitusta potkurilinjassa.

PMA-SynRM	Todennäköisesti paras kompromissi. Yhdistää SynRM:n yksinkertaisen rakenteen ja PMSM:n korkean hyötysuhteen sekä suuren momenttitiheyden. Pieni tilan tarve.
-----------	--

3.5.2 Perinteisen dieselgeneraattorin kytkentä sarjahybridivoimalinjaan.

Valmistajat, kuten AGCO Power ja Solé toimittavat dieselgeneraattoreita, joita voidaan hyödyntää sovelluksessa, jossa alukseen muodostetaan vaihtovirtaverkko suurten dieselsähköisten laivojen tapaan. Kuvassa (Kuva 13) näkyy Solé Diesel GT/GTC malliston meridieselgeneraattori, jota on saatavilla monissa eri kokoluokissa. Tällaisessa ratkaisussa ajomoottorin invertterissä tulee olla diodi- tai AFE-tasasuuntaus. Hybridisoinnissa akku voidaan liittää vaihtosähköverkkoon AFE-suuntaajalla tai DC-DC-suuntaajalla ajomoottori-invertterin välipiiriin. Suorakin kytkentä välipiiriin on mahdollista, mutta vaatii dieselgeneraattorin säätimen muokkaamista (Lana ym. 2012).



Kuva 13. Solé Diesel GT/GTC malliston meridieselgeneraattori.



3.6 Propulsioratkaisut ja niiden mitoittaminen

Potkurin mitoituksilla on suuri vaikutus tehokkuuteen ja ohjattavuuteen. Potkurin suorituskykyyn vaikuttavia ominaisuuksia ovat halkaisija, lapojen lukumäärä, pyörimisnopeus ja nousu. Tutkitaan kahdenlaisia mahdollisia potkureita.

Kiinteälapaiset potkurit tunnetaan yksinkertaisimpana potkuriratkaisuna, koska lapojen kulma on kiinteä eikä niitä voida kääntää. Tämä tarkoittaa, että voiman suunta ja suuruus muuttuvat vain potkurin pyörimisnopeudesta ja -suunnasta. Yksinkertaisen rakenteensa ansiosta ne ovat halpoja, luotettavia ja vaativat vain vähän huoltoa, sekä ovat käyttäjäystävällisiä. Optimaaliseen potkurin nousuun vaikuttavat halkaisija ja pyörimisnopeus. Suurempi nousu mahdollistaa suuremman maksiminopeuden, mutta pienemmän kiihtyvyyden. Pienempi nousu tarkoittaa suurempaa kiihtyvyyttä, mutta pienempää maksiminopeutta. Potkurin lapoja ei kuitenkaan voida säätää suorituskyvyn parantamiseksi suurella kuormituksella. Tämä tarkoittaa sitä, että potkurin tehokkuutta ei voida optimoida kuormituksen mukaan.

Säädettävälapaisten potkurien lapakulmaa voidaan säätää hydraulikkapiirillä. Tämä mahdollistaa lapakulman säätämisen toimintaympäristön ja kuormituksen mukaan, mikä lisää hyötysuhdetta (SIEMENS 2024). Säätolapainen potkuri lisää aluksen käsiteltävyyttä ahtaissa olosuhteissa (saVRee n.d.). Tällaiset potkurit kuitenkin vaativat huoltoa ja ovat alttiimpia vikaantumiselle liikkuvien osien vuoksi.

Apualusten ohjattavuus voisi parantua kääntyvällä trusteri- eli ruoripotkurijärjestelmällä, mutta operointi matalassa vedessä saattaa rajoittaa näiden käyttöä. Tällainen ratkaisu lisää myös propulsion hankintakustannuksia. Muutoin ahtaissa väylissä ja sulutuksessa ruoripotkuri olisi erinomainen ratkaisu. Sarjahybridin tapauksessa sähkömoottorilla operoitavia potkureita voisi asentaa kaksi kappaletta, jolloin myös aluksen sivuttaisliike tulisi mahdolliseksi. Ohjailtavuus paranisi erityisesti pienillä nopeuksilla, joissa peräsimen toiminta heikkenee. Rinnakkaishybridiratkaisussa voitaisiin toisaalta välttää erillisen vaihteiston käyttö, mikä pienentäisi osaltaan hankintakustannusvaikutusta. Operointikustannusten pitäisi ainakin periaatteessa parantaa hyötysuhdetta potkurin tuottaessa voimaa suoraan haluttuun suuntaan.

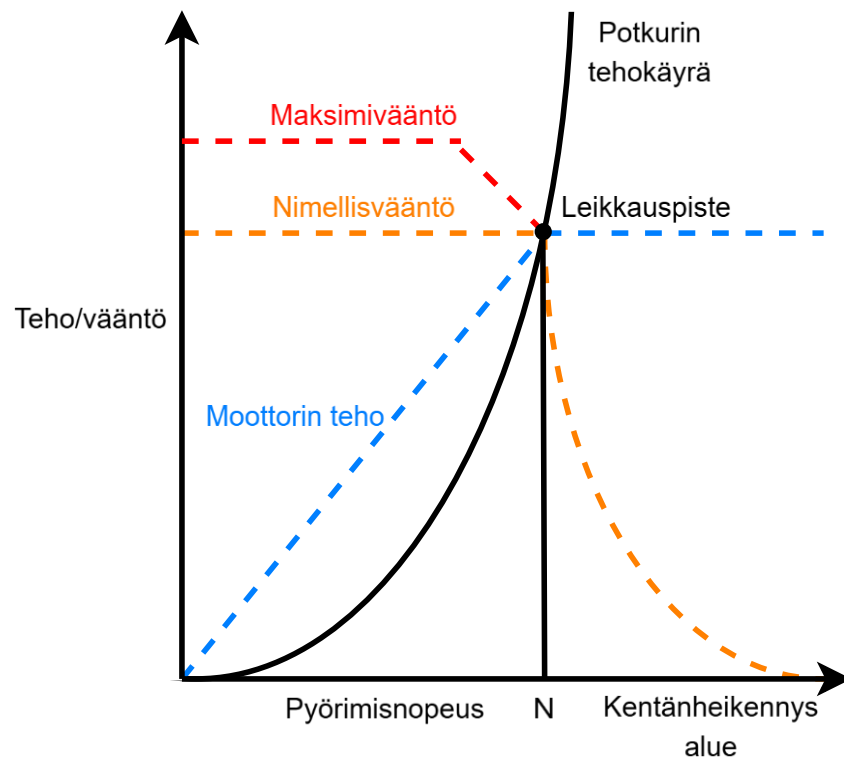


3.7 Sähkömoottorin mitoitus potkurikäyrien perusteella

Tässä kappaleessa käsitellään sarjahybridin tai täyssähköisen aluksen ajomoottorin mitoitusta. Kappaleen lopussa on lyhyt maininta rinnakkaishybridin mitoituksesta.

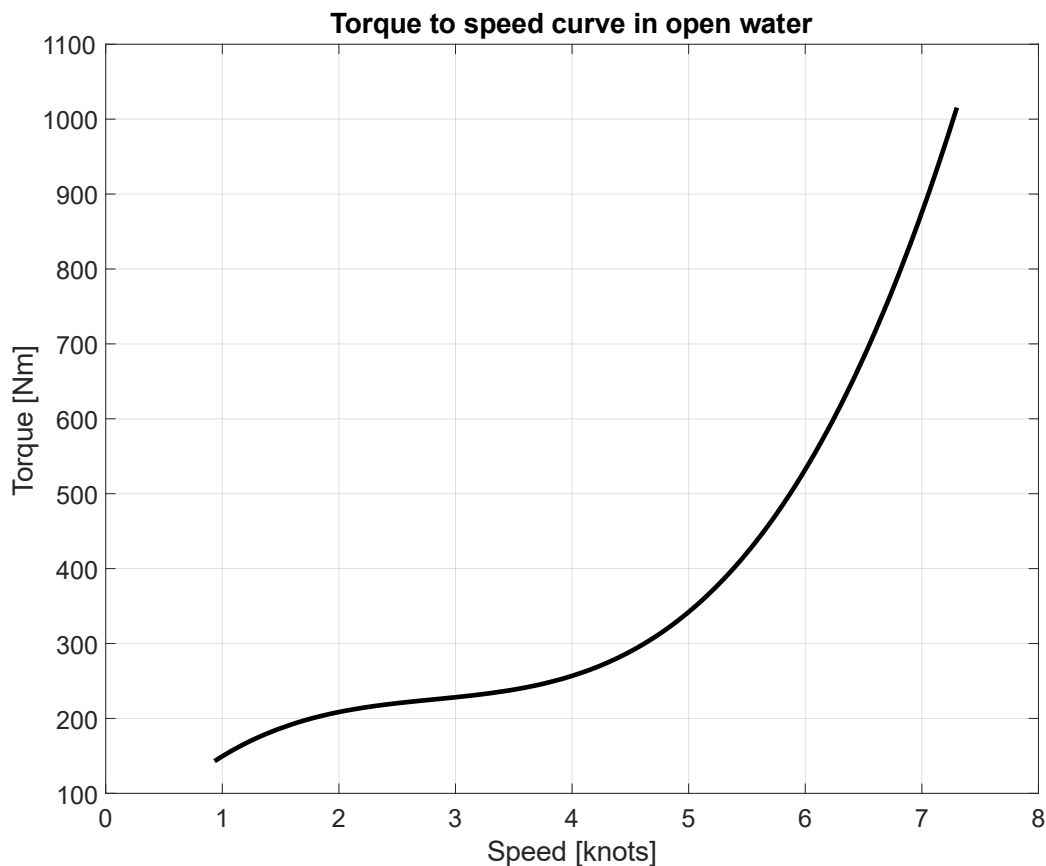
Sähkömoottori voidaan valita mitattujen tai laskennallisten potkurikäyrien avulla. Käyrät kertovat tehotarpeen ja vääntömomenttitarpeen aluksen nopeuden funktiona. Sähkömoottorin tehon on ylitettävä potkurin tehokäyrän arvot koko toiminta-alueella. Moottorin väännön redusoituna alennusvaihteen yli on ylitettävä potkurin vääntökäyrä koko toiminta-alueella. Uiton apualuksen tapauksessa pienen pyörimisalueen vääntöreservistä on hyötyä tukkinippujen siirtelyssä ja ohjaamisessa. Sähkömoottori tuottaa jatkuva-aikaisesti nimellisen vääntömomenttinsa aina nimellispyörimisnopeudelle saakka ja mahdollistaa lyhytaikaisesti myös ylikuormituksen maksimivääntömomentilla. Nämä arvot löytyvät valmistajien datasivuilta. Mitoituksessa on otettava huomioon myös voimansiirron hyötysuhteet.

Potkurin tehokäyrä kuvaa potkurin tehontarpeen pyörimisnopeuden funktiona. Kuva 14 esittää potkurikäyrän sekä moottorin tuottaman tehon pyörimisnopeuden funktiona. Kuvasta havaitaan, että alhaisilla potkurin pyörimisnopeuksilla (ennen käyrien leikkauspistettä) moottorin käytettävissä oleva maksimiteho on suurempi kuin potkurin vaatima teho. Käyrien leikkauspiste vastaa toimintapistettä, jossa potkuri vaatii moottorin maksimitehon. Tässä pisteessä saavutetaan maksiminopeus millä voidaan kulkea avoimella vedellä. Suuremmilla potkurin nopeuksilla moottori ei yksinään riitä tuottamaan tarvittavaa propulsiotehoa.



Kuva 14. Esimerkki potkurikäyrästä, jossa näkyy moottorin teho- ja vääntökäyrät pyörimisnopeuden funktiona.

Kuva 15 esittää mitatun aluksen potkurikäyrää avoimen veden liikkumisessa. Kuva esittää väännön etenemisnopeuden funktiona. Huomataan, että vääntömomentti nousee kvadraattisesti. Matalilla nopeuksilla (2 – 3 solmua), kun alus seuraa päähinaajaa niin vääntömomentin tarve on 200 – 250 Nm luokkaa. Kun taas maksiminopeusalueella (7 solmua) vääntömomentin tarve on noin 900 Nm. Vääntö on laskettu moottorista mitatun väännön mukaan, sekä alennusvaihteiston suhteen mukaan. Tällöin maksiminopeudella avoimella vedellä moottorin vääntö on noin kolmasosa nimellisväännöstä.



Kuva 15. Mittauksista laskettu aluksen potkurikäyrä avoimen veden liikkumisessa.

Toisin kuin tieajoneuvoissa, joissa käyttönopeusalue on laaja, uiton apualuksen potkurikäyrä määrittää enimmäispyörimisnopeuden varsin tarkasti. Tämän vuoksi sähkömoottori voidaan mitoittaa siten, että suurin jatkuva käyttö tapahtuu nimellinopeudella. Ratkaisu mahdollistaa koko normaalin käyttöalueen toiminnan vakiomomenttialueella, jolloin moottorin hyötysuhde säilyy korkeana eikä kentänheikennysalueen käyttöä tarvita. Lyhytaikaiset tehon- ja momentinhuiput voidaan kattaa akuston avulla, jolloin sähkömoottoria ei tarvitse ylittää pelkästään hetkellisten kuormitusten vuoksi.

Rinnakkaishybridin sähkömoottorigeneraattorin mitoitus riippuu säätöperiaatteesta ja dieselmoottorin mitoituksesta. Esimerkiksi tavoitteena voi olla, että dieselmoottori käy optimaalisen hyötysuhteen vääntökäyrällä pyörimisnopeuden funktiona. Kuvassa (Kuva 10) esitetyn laisesta moottorikohtaisesta simpukkakäyrästä etsitään kullakin pyörimisnopeudella hyötysuhteeltaan paras vääntömomentti ja moottorigeneraattorilla



pyritään tämän väännön ja vaaditun, kuljettajan antaman propulsioreferenssin ero lataamaan tai purkamaan akusta. Sääntötapoja on tarkemmin esitetty kappaleessa 4.

3.8 Komponenttien hinta-arviot

Eri komponenttien hinnat vaihtelevat muun muassa markkinatilanteen, mutta varsinkin raaka-ainekustannusten sekä komponenttien teho- ja kapasiteettiarvojen mukaan. Tästä syystä komponenttien tarkkaa hintaa on vaikea arvioida. Aiemmin käsiteltyjen lähteiden ja valmistajilta saatavilla olevan avoimen hintatiedon perusteella komponenttien kustannuksista voidaan kuitenkin muodostaa suuntaa-antavia arvioita. Taulukossa 5 on esitetty eri lähteistä koottuja hinta-arvioita tässä työssä tarkasteltavien hybriditopologioiden pääkomponenteille. Taulukon hinnat on esitetty suhteessa tehoon tai energiaan eivätkä ne suoraan kerro sähkö- tai hybridialuksen komponenttien kustannusjakamaa. Taulukossa esitettyjä yksikköhintoja voidaan hyödyntää komponenttien kustannusten arvioinnissa sen jälkeen, kun komponenttien teho- ja energiavaatimukset on määritetty esimerkiksi mittausten perusteella, kuten tässä työssä. Vaihtoehtoisesti esimerkiksi hankkeessa kehitettyä laskentatyökalua, voidaan käyttää komponenttien kokoluokkien alustavaan arviointiin. Joidenkin ratkaisujen kustannuksista voidaan tehdä suuntaa-antavia johtopäätöksiä jo ennen tarkempaa mitoitusta. Polttokennoratkaisu edellyttää vetyvaraston, polttokennon oheisjärjestelmineen sekä sähköisen voimansiirron ja siihen liittyvän akkuvaraston. Yksikköhintojen perusteella polttokennoratkaisun hankintakustannukset muodostuvat tässä sovelluksessa korkeiksi verrattuna vastaavan kokoluokan sähköhybridijärjestelmään. Tarkastelu ei tässä vaiheessa huomioi komponenttien käyttöikää tai elinkaarikustannuksia. Lisäksi vedyn varastointi on tässä sovelluksessa tilankäytön näkökulmasta epäedullista. Näiden tekijöiden perusteella polttokennoratkaisu rajataan tämän työn kustannus- ja mitoitustarkastelun ulkopuolelle.

On kuitenkin huomioitava, että merikäyttöön tarkoitetut komponentit ovat yleensä kalliimpia kuin vastaavat maakäyttöön tarkoitetut komponentit. Merikäyttöön tarkoitetuille komponenteille asetetaan maakäyttöön verrattuna tiukempia turvallisuus-, ympäristö- ja luotettavuusvaatimuksia, mikä voi nostaa niiden hankintakustannuksia. Elektronisten laitteiden osalta vaatimukset voivat koskea muun muassa



kotelointiluokkaa (esim. IP65), korroosionkestävyyttä, värinän- ja iskunkestävyyttä sekä sähkömagneettista yhteensopivuutta. Nämä vaatimukset voivat nostaa erityisesti akkujärjestelmien kustannuksia. Taulukon 5 komponenttihinnat on esitetty erityisesti meriliikenteeseen sopiville komponenteille. Pienessä apualuksessa voidaan kuitenkin joissakin tapauksissa tarkastella myös maa-ajoneuvoissa käytettäviä akkukomponentteja, mikäli niiden tekniset ominaisuudet, turvallisuusvaatimukset ja hyväksynnät soveltuvat merikäyttöön. Tällöin komponenttien hankintahinta voi poiketa taulukossa esitetystä merikäyttöön tarkoitettujen akkujen hintatasosta.

Taulukko 5. Komponenttien hinta-arviot.

Komponentti	Hinta-arvio	Yksikkö	Lähde
Dieselmoottori	240	€/kW	(Hüllein ja Utne 2024)
Dieselgeneraattori	360	€/kW	(Hüllein ja Utne 2024)
Sähkömoottori	120	€/kW	(Kanchiralla ym. 2023)
Invertteri	26	€/kW	(Skeleton Technologies 2025)
Vaihdelaatikko	85	€/kW	(Kanchiralla ym. 2023)
Akku	650 – 750	€/kWh	(Sustainable ships 2024)
Polttokenno	397 – 955	€/kWh	(Saba ym. 2018)
Vetytankki	27	€/kWh	(Hüllein ja Utne 2024)

3.9 Yhteenveto

Edellä esitetyn perusteella molemmilla hybriditopologioilla on potentiaalia uiton apualuksen voimalinjaksi. Sarjahybridin etuna on mahdollisuus mitoittaa dieselgeneraattori työsyklin keskimääräisen tehontarpeen perusteella ja kattaa lyhytaikaiset tehopiikit akustolla. Rinnakkaishybridissä sähköisen voimansiirron komponentit voidaan puolestaan mitoittaa pienemmiksi ja dieselmoottorin tuottama teho voidaan välittää potkurille pääosin mekaanisesti, jolloin voimansiirron sähköiset häviöt jäävät pienemmiksi. Sarjahybridissä tarvittavien sähköisten komponenttien



suurempi teholuokka ja rinnakkaishybridissä tarvittavan mekaanisen voimansiirron monimutkaisuus muodostavat vastaavasti kummankin ratkaisun haasteita.

Hybriditopologian soveltuvuutta ei siten voida arvioida pelkästään yksittäisten komponenttien nimellishyötysuhteiden tai kustannusten perusteella. Erityisesti tämän aluksen voimakkaasti vaihteleva tehontarve vaikuttaa dieselmoottorin ja akuston mitoittamiseen sekä niiden käyttöasteeseen. Tästä syystä sarja- ja rinnakkaishybridien energiankulutusta ja komponenttien mitoittamista tarkastellaan seuraavaksi simulaatioiden avulla mitatun työsyklin perusteella.

4 Simulaatiomallit ja säätöratkaisut

Tutkimuksessa käytetään apuna simulaatiotyökalua, jonka avulla mitoitetaan voimalinjan komponentit hybridialukseen. Simulaatioissa testataan erilaisia säätöstrategioita, jolla maksimoidaan energiatehokkuus ja vähennetään polttoaineen kulutusta.

4.1 Mitoituksessa ja säädön testauksessa käytetty simulointimalli

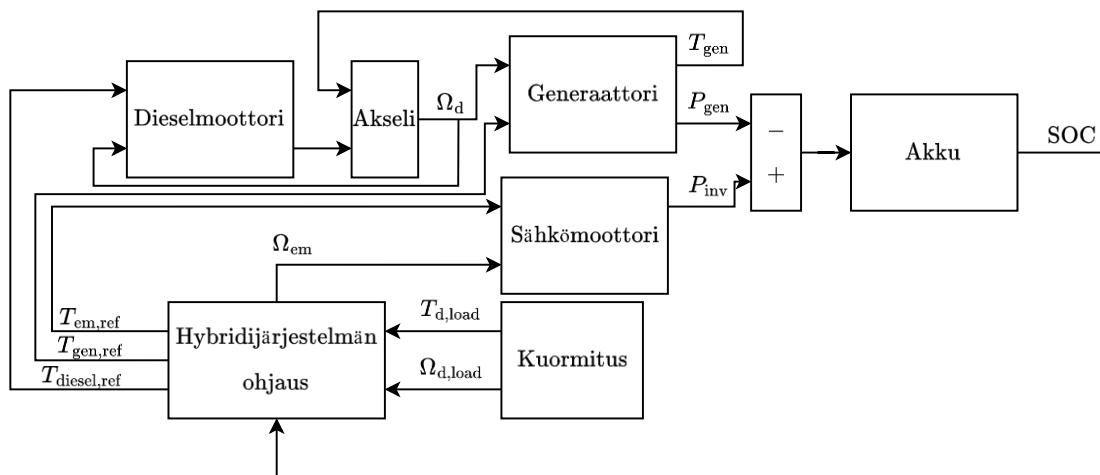
Kuva 16 esittää sarjahybridisimulaatiomallin lohkokaavion. Tämä simulointitapa on kuvattu tarkemmin julkaisussa (Tupitsina ym. 2021), jossa käsitellään komponenttien dynamiikan mallinnusta. Työkalu on erityisesti suunniteltu mitoittamaan hybridityökoneen voimansiirtoa erilaisilla säätöstrategioilla. Malli on skaalautuva, mikä helpottaa eri komponenttikokoonpanojen simulointia. Mallin toimintaperiaate on, että ohjain antaa dieselgeneraattorille ja sähkömoottorille ohjeavot, jotka määräytyvät kuormituksen mukaan. Tämä voi olla joko simuloituja arvoja tai mitattuja aikasarjoja aluksen kuormituksesta. Ohjeavoina annetaan moottorin kulmanopeus, sekä moottorin vääntömomentti. Dieselgeneraattorin lähtötehoa ja sähkömoottorin lähtötehoa verrataan energiavaraston tehovirran laskemiseksi. Jos dieselgeneraattori pystyy yksinään tuottamaan riittävästi tehoa, ylimääräistä tehoa käytetään energiavaraston lataamiseen. Suuren tehontarpeen aikana, kun dieselgeneraattorin teho ei riitä, akkua käytetään puskurina, jotta sähkömoottorille saadaan riittävästi tehoa.

Taulukkoon (Taulukko 6) on kerätty kappaleessa 4 esiintyvät simulointimallien ja säätöstrategioiden muuttujat ja parametrit.

Taulukko 6. Säätöstrategioissa käytetyt muuttujat ja parametrit.

Parametri	Selitys
SOC	Akun varaustila
SOC_{upp}	Akun varaustilan yläraja
SOC_{low}	Akun varaustilan alaraja
SOC_{med}	Varaustilan keskiarvo ylä- ja alarajan mukaan
P_d, T_d	Tehon/vääntömomentin tarve tai referenssi

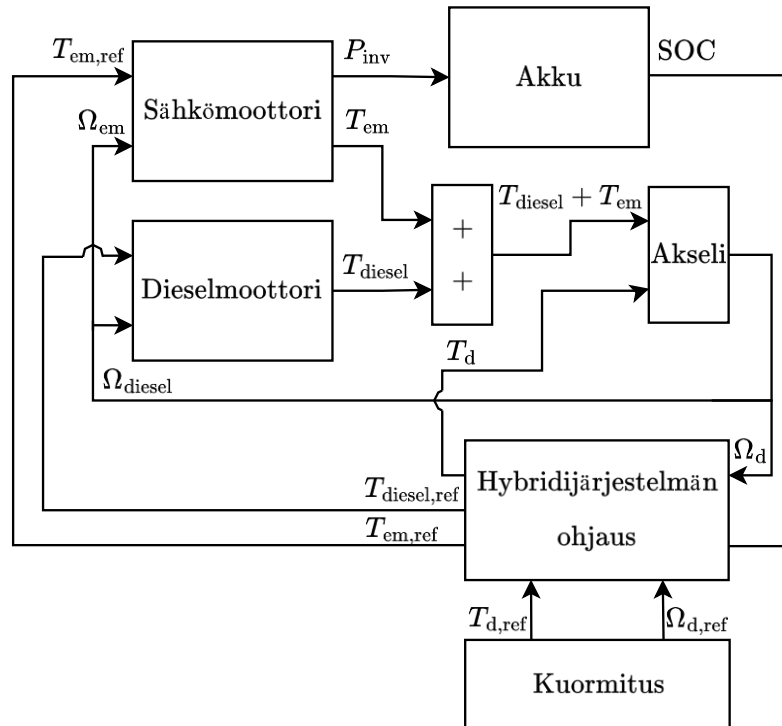
P_{diesel}	Dieselgeneraattorin teho
$P_{diesel,idle}$	Dieselgeneraattorin tyhjäkäyntiteho
$P_{diesel,max}$	Dieselgeneraattorin maksimiteho
$P_{diesel,min}, T_{diesel,min}$	Dieselgeneraattorin minimiteho/-vääntömomentti
P_{mid}	Aluksen laskettu keskiteho
P_{stor}	Maksimiteho, minkä akku voi tuottaa yksinään
P_{opt}	Dieselgeneraattorin optimaaliteho
P_{ch}, T_{ch}	Akun varaustilan ylläpitoparametri
$T_{diesel,idle}$	Dieselmoottori tyhjäkäynnillä. Tämä voi olla muuttuva kierrosluvun mukaan, mutta pienempi kuin $T_{diesel,min}$
ω_{shaft}	Akselin pyörimisnopeus
ω_{min}	Akselin minimi pyörimisnopeus
s	Tilamuuttuja



Kuva 16. Sarjahybridin simulaatiomallin lohkokkaavio.

Kuva 17 esittää rinnakkaishybridin simulaatiomallin. Simulaatiomalli toimii samoilla mallinnetuilla skaalattavilla komponenteilla kuin sarjahybridimalli. Rinnakkaishybridissä sähkömoottori ja dieselmoottori toimivat yhdessä kytkettynä samaan akseliin. Mallin toimintaperiaatteena on antaa dieselmoottorille ja sähkömoottorille vääntöohjeet

kuormituksen ja säätöstrategian mukaan. Ohjearvoina ovat samat parametrit kuin sarjahybridissä.



Kuva 17. Rinnakkaishybridin simulaatiomallin lohkokkaavio.

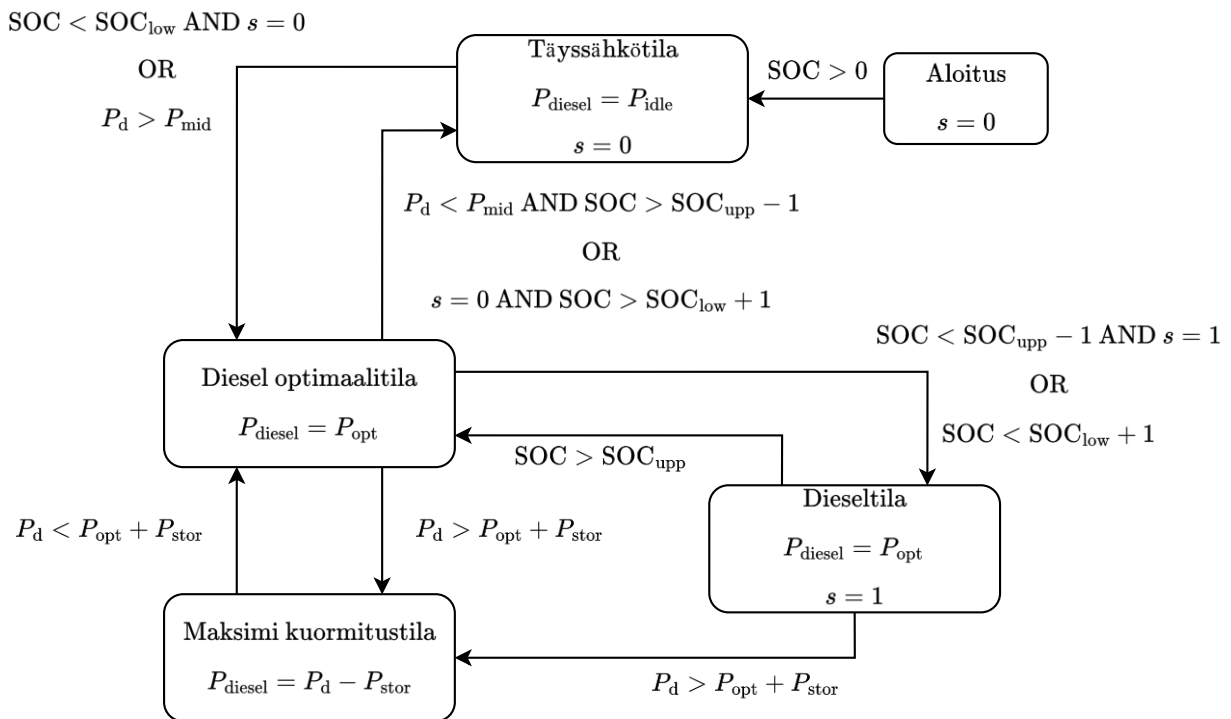
4.2 Sarjahybridin säätöstrategiat

Hybridivoimalinjan säädöllä on merkittävä vaikutus polttoaineenkulutukseen, mekaanisiin häviöihin, järjestelmän stabiiliuteen ja kokonaissuorituskykyyn. Automaattista säätöä tarvitaan polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi. Tämä tehdään automaatiojärjestelmässä olevalla ohjaimella, jolla vääntömomentti- tai tehopyyntö välitetään ajomoottorin invertterille. Dieselgeneraattorin tehoa säädetään sen mukaan, halutaanko akkua ladata vai purkaa ja akun kuormitusta hallitaan dieselin ja akun vaaditun kuormituksen perusteella. Säätöstrategiat riippuvat pitkälti aluksen työsykleistä.

4.2.1 Termostaattisäätö

Termostaattisäätö eli "Thermostat control strategy" (TCS) on säätöstrategia, jota käytetään sen yksinkertaisuuden ja hyvän polttoainetalouden vuoksi (Shabbir ja Evangelou 2016). Perusperiaatteena on käyttää dieselgeneraattoria sen optimaalisessa

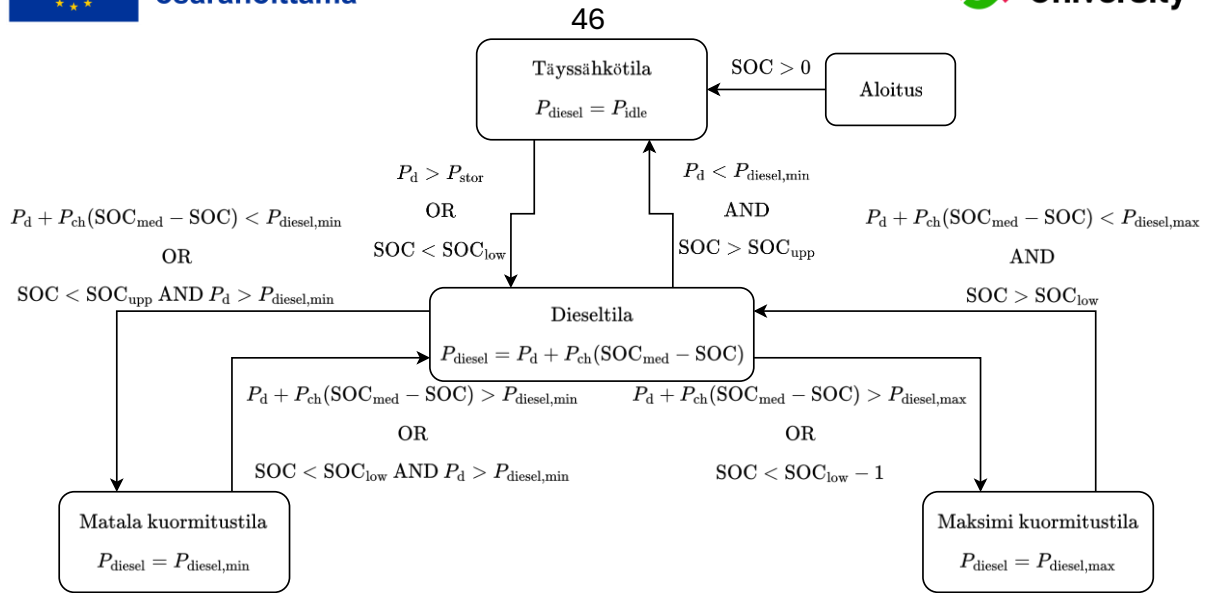
toimintapisteessä ja käyttää akkua puskurina riittävän tehon tarjoamiseksi suurella kuormituksella. tehontarpeen ollessa alhainen, voidaan ajaa täyssähköisessä tilassa. Tilasiirtymät määräytyvät sekä akun varaustilan että kuormituksen mukaan. Säästöstrategiassa käytetään lisäksi alipäästösuodatinta simulaatioissa, jolloin ehkäistään äkilliset tilasiirtymät lyhyissä tehopiikeissä. Kuva 18 esittää TCS säästöstrategian lohkokaavion.



Kuva 18. TCS lohkokaavio.

4.2.2 Diesel seuraa kuormitusta -säättö

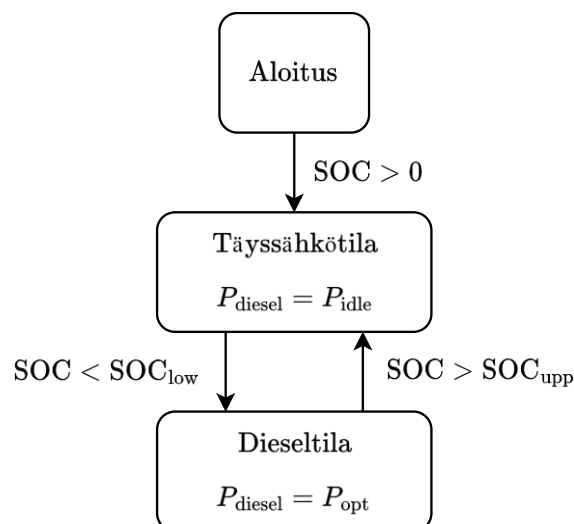
Diesel seuraa kuormitusta -säättö eli "Power Flow Control Strategy" (PFCS) on myös yleinen sarjahybridisäättöstrategia. Dieselmoottori seuraa kuormituspyyntiä, kunnes tehontarve ylittää dieselmoottorin maksimitehon tai sitä lähelle määritetyn tehon. Lopputeho otetaan akusta. Tämänkin säästöstrategian tilanvaihtoihin vaikuttaa kulloinkin akun varaus ja kuorman tehoreferenssi eli -pyyntö. Kun kuormitus on alhainen ja akun varaustila on korkea, käytetään sähkömoottoria. Kuormituksen kasvaessa tai akun varaustilan laskiessa dieselä käytetään syöttämään tehoa moottoriin. Kuva 19 esittää PFCS säästöstrategian lohkokaavion.



Kuva 19. PFCS lohkokaavio.

4.2.3 SOC-pohjainen säätöstrategia SBCS

SOC-pohjainen säätöstrategia eli ”SOC Based Control Strategy” (SBCS) on yksinkertainen säätöstrategia, jossa ainoa muuttuja, joka vaikuttaa tilanvaihtoon on akun varaustila. Jos akun varaustila laskee liian alas, dieselgeneraattori siirtyy lepotilasta polttoaineen kulutuksen suhteen optimaaliseen tehopisteeseen, kunnes akun varauksen yläarvo saavutetaan. Kuormituksella ei ole vaikutusta dieselgeneraattorin ohjaukseen. Kuva 20 esittää SBCS säätöstrategian lohkokaaavion.



Kuva 20. SBCS lohkokaavio.

4.3 Rinnakkaishybridin säätöstrategia

Rinnakkaishybridissä käytetään ”Electric assist control strategy” säätöstrategiaa (EACS). Tässä säätöstrategiassa dieselmoottori toimii pääsääntöisenä voimalähteenä, ja sähkömoottori avustaa suurilla tehovaatimuksilla. Toisin sanoen, dieselmoottori seuraa työsykliä ja sähkömoottori reagoi äkillisiin muutoksiin tai avustaa dieselmoottoria suurella kuormituksella. Matalalla akun varaustilalla dieselmoottorilla ladataan akkua, kun kuormitus on matala. Matalalla kuormalla ja akselin pyörimisnopeudella voidaan ajaa täyssähköisesti. Kuva 21 esittää EACS säätöstrategian lohkokaaavion, jossa nähdään ehdot tilasiirtymille.

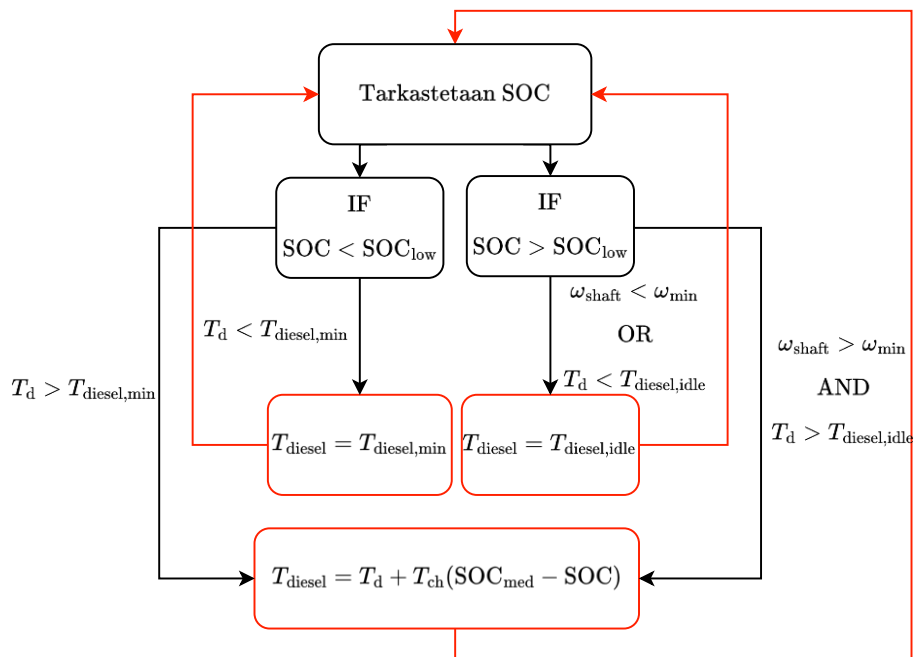
Säätöstrategiassa tarkastetaan akun varaustila, ja riippuen vaaditusta tehosta siirrytään täyssähköiseen tai sähkömoottoriavustukseen. Akun varaustilaa tarkastetaan asetetulla syklijalla, jonka mukaan siirrytään dieselmoottorin eri tiloihin. Jos akun varaustila on alle varaustilan alarajan ($SOC < SOC_{low}$) tarkastetaan seuraavaksi käyttäjän vääntöpyyntö T_d . Vääntöpyynnön ollessa pienempi kuin asetettu väännön minimiarvo $T_{diesel,min}$, ajetaan dieseliä vääntöreferenssillä $T_{diesel} = T_{diesel,min}$, muulloin vääntöreferenssiksi asetetaan käyttäjän vääntöpyynnön ja akkua lataavan lisäväännön summa. Lisävääntö skaalataan akun varaustilan mukaan. Jos akun varaustila on alle varaustilan alarajan ($SOC > SOC_{low}$), noudatetaan samanlaista logiikkaa, mutta lisäehdoksi vääntöpyynnön ohelle tarkastetaan dieselmoottorin pyörimisnopeus. Jos pyörimisnopeus tai vääntöpyyntö ovat minimiarvojaan pienempiä ($T_{diesel} < T_{diesel,idle}$), ($\omega_{diesel} < \omega_{min}$), dieselmoottorin vääntö asetetaan tyhjäkäynnille, jolla dieselmoottorin kitkat voitetaan. Jos vääntö ja pyörimisnopeus ovat minimiarvojaan suurempia, dieselmoottorin vääntöpyyntö asetetaan käyttäjän vääntöpyynnön ja akkua lataavan lisäväännön summaksi. Seuraava ohjelmakuvaus toteuttaa säädön ajatuksen.

```
if SOC<low
    if Td<T_diesel_min
        T_diesel=T_diesel_min; % Dieselmoottorille asetettava vääntöreferenssi
        k=1; % tila1
    else
```

```

T_diesel= T_d+T_ch*(SOCmed-SOC);
k=2; % tila2
end
else
if (w_shaft<w_min)|| (Td<T_diesel_idle)
k=3; % tila3
T_diesel =T_diesel_idle;
else
T_diesel =Td+T_ch*(SOCmed-SOC);
k=4; % tila4
end
end
end

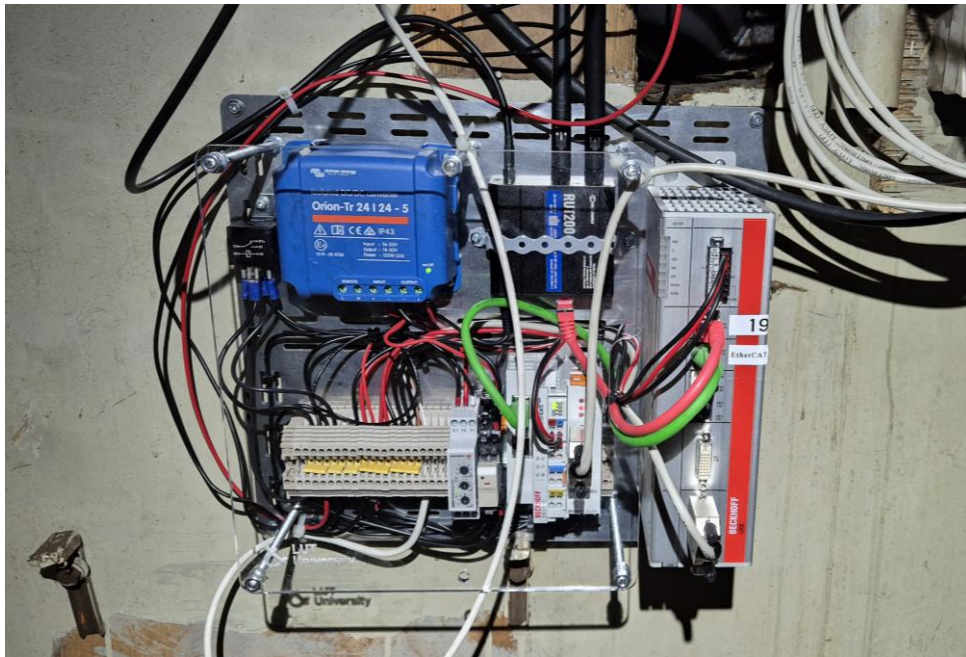
```



Kuva 21. EACS lohkokaavio dieselmoottorille. Punaisella piirretyt kolme lohkoa ovat hybridijärjestelmän säädön tilat, joita järjestelmä käyttää säädön ollessa toiminnassa.

5 Apualuksen mittaukset

Aluksen työsyklin mittaus aloitettiin heinäkuussa 2025, jolloin tiedonkeruujärjestelmä asennettiin apualus Karvioon 3.7.2025. Järjestelmä tallensi sekunnin välein dataa, kun alus oli käynnissä. Data oli luettavissa etäyhteyden avulla. Kerättyä dataa oli mm. kellonaika, GPS-koordinaatit, aluksen nopeus sekä moottorin pyörimisnopeus, kuormitusprosentti ja polttoainekulutus. Uittokausi jatkui joulukuuhun saakka, jolloin dataa oli kerätty yhteensä yli 1200 tunnin edestä. Data on jaoteltu päiväkohtaisesti, jolloin voidaan tarkastella tiettyjen päivien toimintaa. Aluksessa käytetty moottori on ”AGCO Power 66 CTIM—4V”, jonka datalehti löytyy liitteistä. Datalehteä käytettiin laskemaan moottorin vääntömomentti sekä moottorin teho mitatuista arvoista.



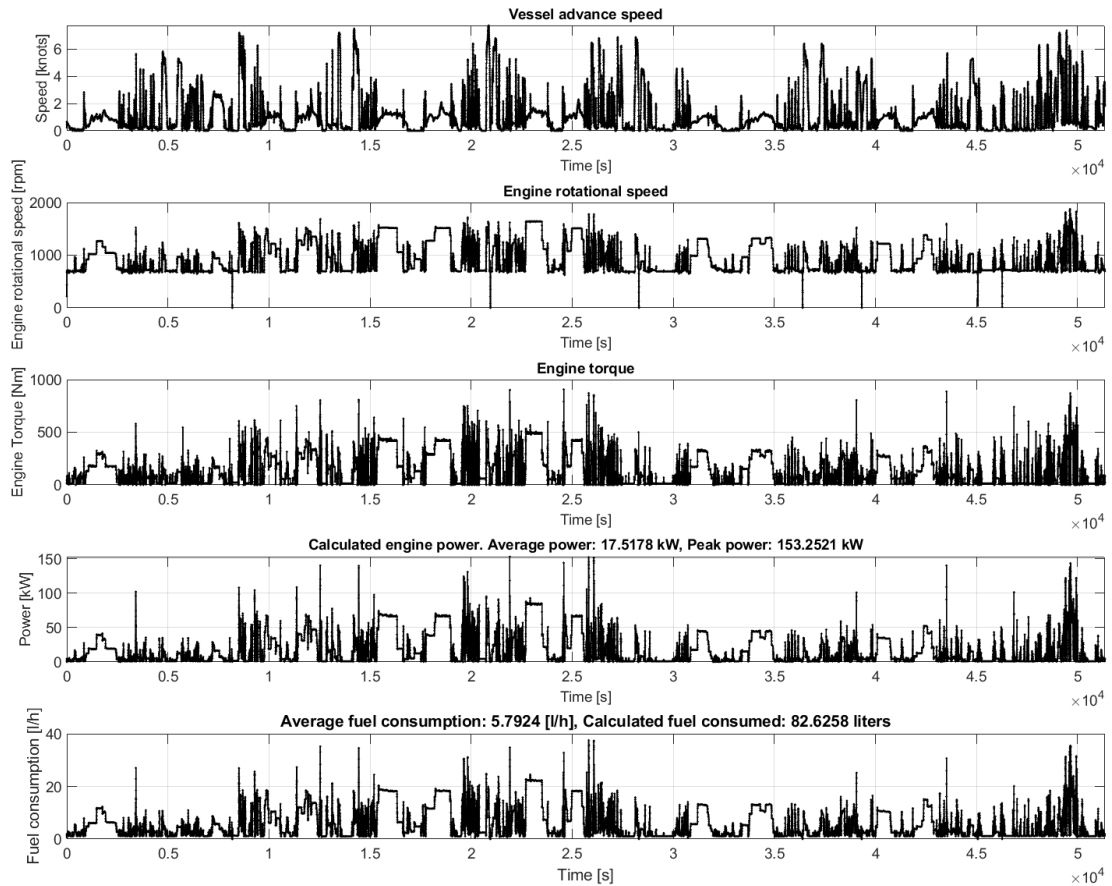
Kuva 22. Tiedonkeruujärjestelmä asennettuna apualukseen (Kuva: Jan-Henri Montonen).

Tässä raportissa esitetään simulaatiotuloksia päivältä, jolloin alus oli suluttamassa Taipaleen kanavalla Varkaudessa, jonka tarkempi reitti nähdään kuvassa (Kuva 23). Tarkemmin tarkastellaan sulutusta, jota tehtiin noin 15 tuntia.



Kuva 23. Aluksen reitti sulutuspäivänä

Kuvassa (Kuva 24) on esitetty aluksen työsykli sulutuksessa. Kuvasta voidaan havainnollistaa, että alus vetää tukkeja sulun läpi, jolloin esiintyy tehopiikkejä. Suuremmat tehopiikit ovat siitä, kun alus työntää tukkeja. Teho on pieni, kun alus liikkuu matalalla nopeudella. Laskettu keskiteho on noin 17,52 kW, kun taas maksimiteho on 153,25 kW. 7 solmun avoimen veden etenemisellä maksimiteho on noin 50 kW. Koko päivän polttoainekulutus oli 102,64 litraa, josta 82,63 kulutettiin suluttaessa.



Kuva 24. Aluksen työsykli Taipaleen kanavassa Varkaudessa.

Aluksen energiakulutus kilowattitunneissa lasketaan yhtälöllä:

$$E = \frac{FC_{moottori} \rho_{polttoaine} E_j t}{3.6} \eta_{moottori},$$

jossa E on aluksen energiakulutus (kWh), $FC_{moottori}$ on moottorin polttoainekulutus (l/h), $\rho_{polttoaine}$ on polttoaineen tiheys (kg/l), E_j on polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg) ja t on aika (h). Dieselpolttoaineen tiheys on noin 0,85 kg/l. Moottorin arvioitu tehokkuus voidaan laskea yhtälöllä:

$$\eta_{moottori} = \frac{E_{polttoaine} + E_{häviö}}{E_{polttoaine}},$$

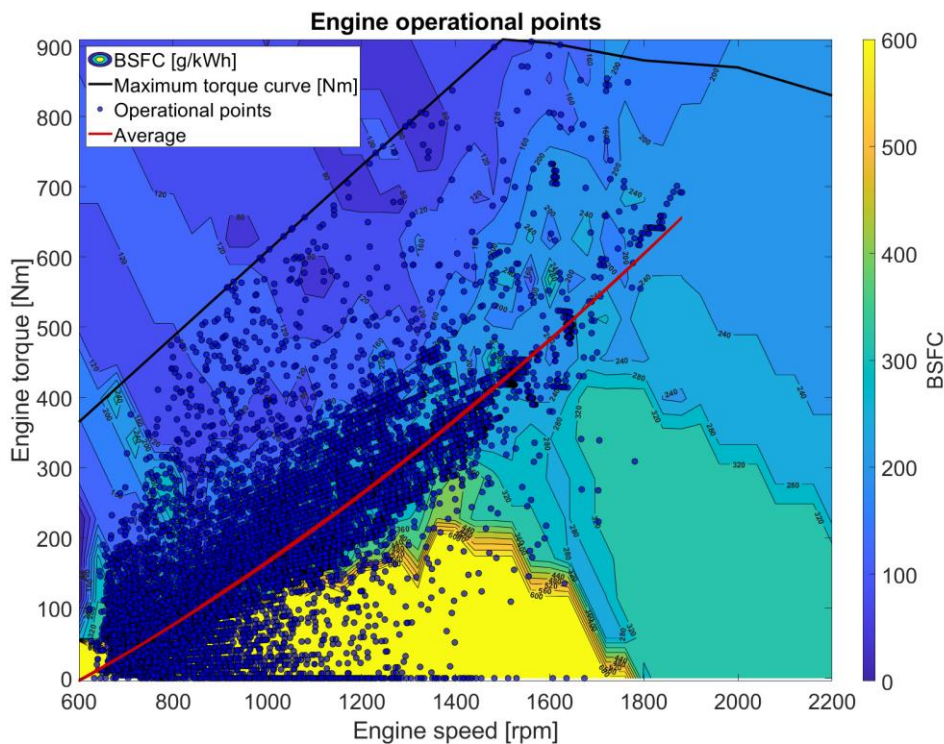
jossa $\eta_{moottori}$ on moottorin hyötysuhde, $E_{polttoaine}$ on polttoaineen avulla tuotettu käytettävä energia (MJ) ja $E_{häviö}$ on häviöenergia (MJ). Koska tätä ei ole voitu mitata,

arvioidaan että 50 % kulutetusta polttoaineesta muuntuu propulsiotehoksi Tällöin koko päivänä työhön käytetty energia on 520 kWh, josta 417 kWh käytettiin sulutuksessa.

Moottorin ominaiskulutuskartta nähdään kuvassa (Kuva 25), johon on myös piirretty moottorin operointipisteet sulutuksessa. Moottorin ominaiskulutus (BSFC) laskettiin yhtälöllä:

$$BSFC = \frac{FC_{moottori} \rho_{polttoaine}}{P_{moottori}},$$

jossa $BSFC$ on moottorin ominaiskulutus (g/kWh) ja $P_{moottori}$ on laskettu moottorin teho (kW). Kuvasta nähdään, että moottori käy epätehokkailla alueilla suurimman osan ajasta, jolloin hyötysuhde on huono. Tämä johtuu siitä, että aluksen keskiteho on pieni, jolloin absoluuttinen kulutuskin on pieni.



Kuva 25. Moottorin ominaiskulutuskartta sulutuksessa.

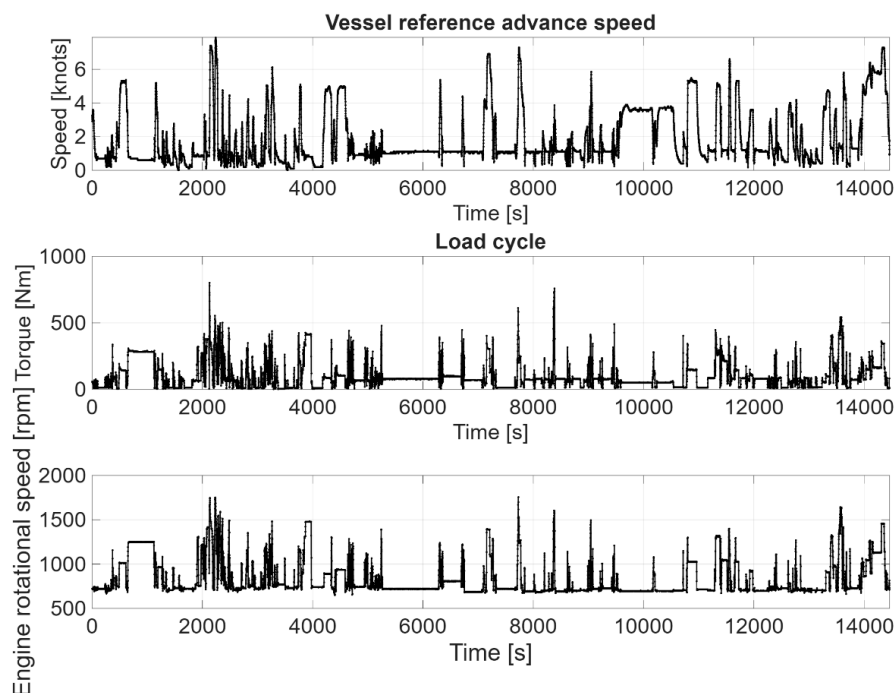
Mittausten avulla selvitettiin aluksen maksimikuormitus, maksiminopeus ja maksiminopeuden kuormitus. Mittauksista ilmeni, että aluksen operointiprofiilissa on paljon vaihtelua, mutta keskiteho on suhteellisen alhainen. Alus toimii matalalla teholla pääsääntöisesti seurattaessa hinaajaa, mutta lyhyitä suuria tehopiikkejä ilmenee



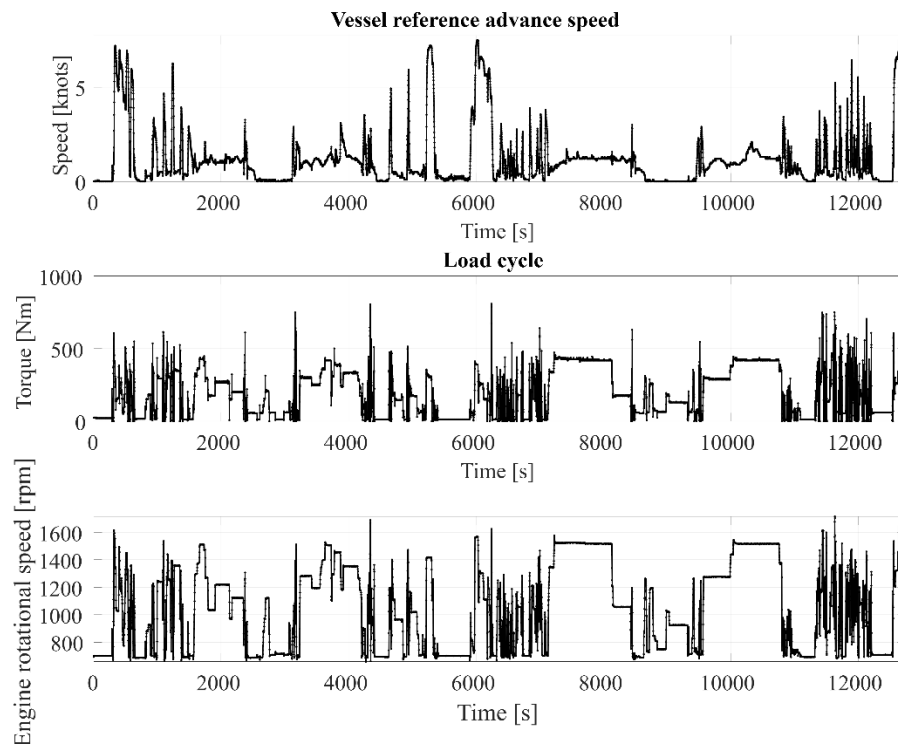
sulutuksessa ja tukkeja työntäessä. Laskettiin aluksen keskiteho, jonka avulla pystytään mitoittamaan sarjahybridiin tarvittava dieselgeneraattorin koko. Polttoainekulutuksen avulla laskettiin energiakulutus, jonka avulla pystytään mitoittamaan täyssähköisen aluksen akuston koko.

6 Hybridisoidun apualuksen simulaatiotulokset

Simulaatioissa suoritetaan sarja- sekä rinnakkaishybriditopologioille simulaatiot, joiden tarkoituksena on laskea, kuinka paljon voidaan laskea polttoainekulutusta erilaisilla hybriditopologioilla. Kaksi erilaista työsykliä simuloidaan, jotka on esitetty kuvassa (Kuva 26). Työsykleissä on myös esitetty aluksen etenemisnopeus ”Vessel reference advance speed”. Ensimmäinen työsykli koostuu pääasiassa avovedessä liikkumisesta ja satunnaisesta työntämisestä ja tukkien ”paimentamisesta”. Kokonaisuudessaan energiankulutus on alhainen tämän työsyklin aikana. Toinen työsykli edustaa jatkuvaa työskentelyä sulussa 3,5 tuntia ennen taukoa, mikä esittää kulutusta korkeammalla keskiteholla ennen ja pidemmällä suuren tehotarpeen ajanjaksoilla.



a)



b)

Kuva 26. Simulaatioissa käytetyt työsyklit: a) avovedellä liikkuminen b) sulutus

6.1 Sarjahybridisimulaation tulokset

Sarjahybridin valittujen komponenttien tehoarvot riippuvat suuresti aluksen käyttöprofiilista. Aluksen ei tarvitse toimia täydellä teholla koko ajan, kuten mittaustiedoista nähtiin. Kuten aiemmin mainittiin, sarjahybridissä dieselgeneraattori voidaan alimitoitaa kuormitusjakson keskimääräiseen tehoon nähden. Tämä tarkoittaa sitä, että akku voidaan mitoitaa kompensoimaan tarvittavaa maksimitehoa. Jos käytetään "pienikapasiteettista" akkua, sen C-arvon tulisi olla korkea, jotta se pystyy tarjoamaan riittävästi tehoa propulsiolle. Aluksen alkuperäisen dieselmoottorin maksimiteho oli 192 kW, joten sarjahybridissä käytetään 190 kW:n sähkömoottoria. Alennusvaihteisto mitoitetaan samaan tehoarvoon. Sarjahybridin dieselgeneraattori on hieman ylimitoitettu kuormitusjakson keskimääräiseen tehoon nähden. Tämä tarkoittaa, että akun kapasiteetti on mitoitettu pieneksi, koska se toimii enimmäkseen puskurina ja suuret tehopiikit ovat yleensä suhteellisen lyhyitä ja ne voidaan ladata kuormitusjakson aikana. Akku on mitoitettu siten, että alus voi työskennellä tavanomaisissa 3–4 tunnin



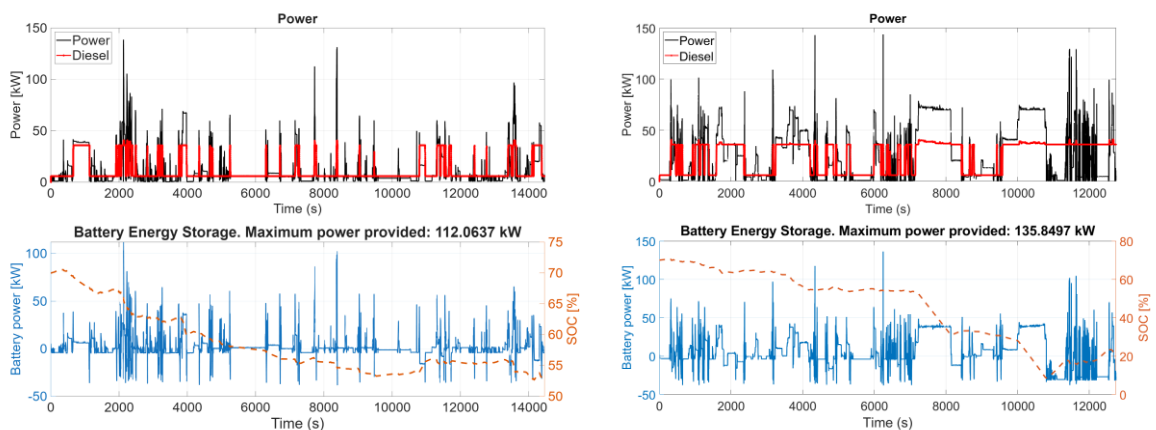
vuoroissaan kuluttamatta akkua tyhjäksi. Sarjahybridisimulaatiossa käytetään seuraavia komponenttiarvoja.

Taulukko 7. Sarjahybridisimulaation komponenttiarvot.

Dieselgeneraattorin teho [kW]	45
Sähkömoottorin teho [kW]	190
Sähkömoottorin nimellisvääntö [Nm]	927
Akun kapasiteetti [kWh]	45

6.1.1 TCS säädön tulokset

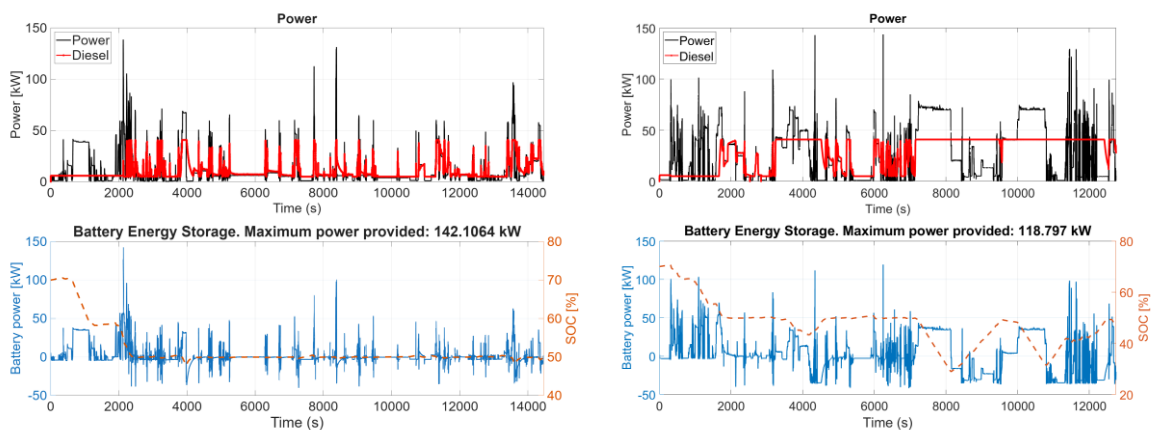
TCS:n käyttö avoimen veden ja sulutuksen aikana näkyy kuvassa (Kuva 27). Dieselgeneraattori käynnistyy, kun tehontarve on 30 kW tai suurempi. Tämän alapuolella dieselgeneraattori on tyhjäkäynnillä ja akku tuottaa tehoa matalalla tehontarpeella. Akun suurin tuottama teho on 135,85 kW, mikä tarkoittaa, että akun C-arvovaatimus on minimissään 3,08. Dieselgeneraattori vaihtaa myös usein tyhjäkäynnistä optimaaliseen tilaan, jopa lisättyä suodatusta käytettäessä, mikä aiheuttaa enemmän mekaanista kulumista. Sulutuksen työsyklisimulaatiossa akun varaustila laskee minimissään noin 10 %:iin.



Kuva 27. Dieselgeneraattorin ja akun tuottama teho TCS säätöstrategialla.

6.1.2 PFCS säädön tulokset

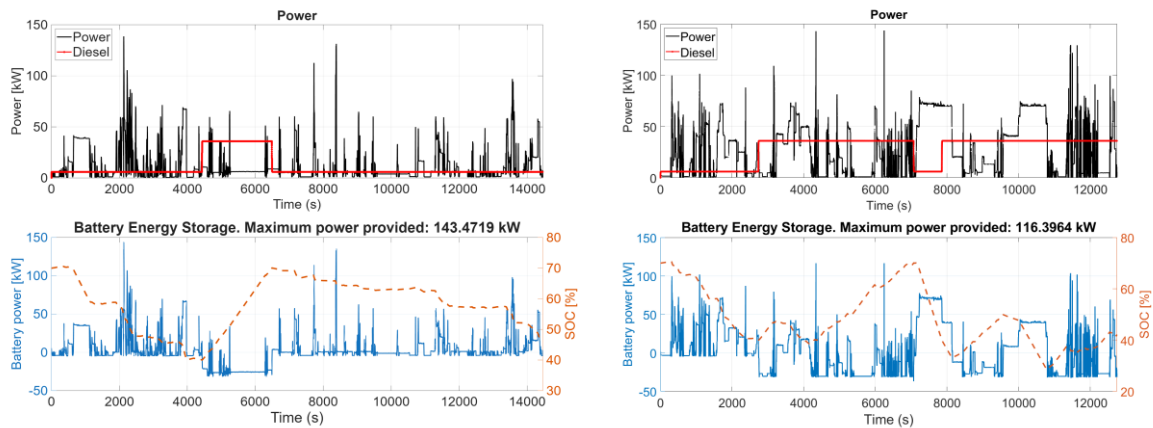
PFCS:n käyttö avoimen veden ja sulutuksen kuormitus syklin aikana on esitetty kuvassa (Kuva 28). PFCS:ssä dieselgeneraattorin operointipisteet vaihtelevat kuormitus syklin mukaan, mikä johtaa sen toimintaan vähemmän tehokkaissa pisteissä. Keskiarvallisesti operointipisteiden hyötysuhde on hyvä, sama kuin TCS:llä. Mutta koska dieselgeneraattori seuraa työsykliä tietyllä varaustilalla, se toimii myös alhaisemmalla tehoalueella, jossa hyötysuhde on huonompi. Dieselgeneraattori alkaa seurata työsykliä 50 %:n varaustilalla ja ylläpitää tätä varausta koko syklin ajan. Suuren tehon työsyklissä, pitkäaikaisilla suurilla tehovaatimuksilla, varaustila laskee noin 38 %:iin. Matalan tehon työsyklin aikana varaustila pysyy jatkuvasti 50 %:ssa. Akun C-arvovaatimus on 3,16, joka on korkeampi kuin TCS:llä.



Kuva 28. Dieselgeneraattorin ja akun tuottama teho PFCS säätöstrategialla.

6.1.3 SBCS säädön tulokset

Kuvassa (Kuva 29) on esitetty SBCS:n säätöstrategian käyttö avoimen veden ja sulutuksen kuormitus syklien aikana. Voidaan nähdä selkeämmin, että dieselgeneraattori toimii optimaalisessa pisteessä, kun matala akun varaustila saavutetaan. Dieselgeneraattori siirtyy takaisin tyhjäkäynnille, kun akun varaustilan yläarvo saavutetaan. Koska dieselgeneraattori toimii yhdessä tehokkaassa toimintapisteessä sekä tyhjäkäynnillä, polttoaineen kokonaiskulutus riippuu siitä, kuinka kauan dieselgeneraattori käy kyseisen työsyklin aikana. Akun C-arvovaatimus on minimissään 3,19.



Kuva 29. Dieselgeneraattorin ja akun tuottama teho SBCS säästöstrategialla.

6.2 Rinnakkaishybridin simulaation tulokset

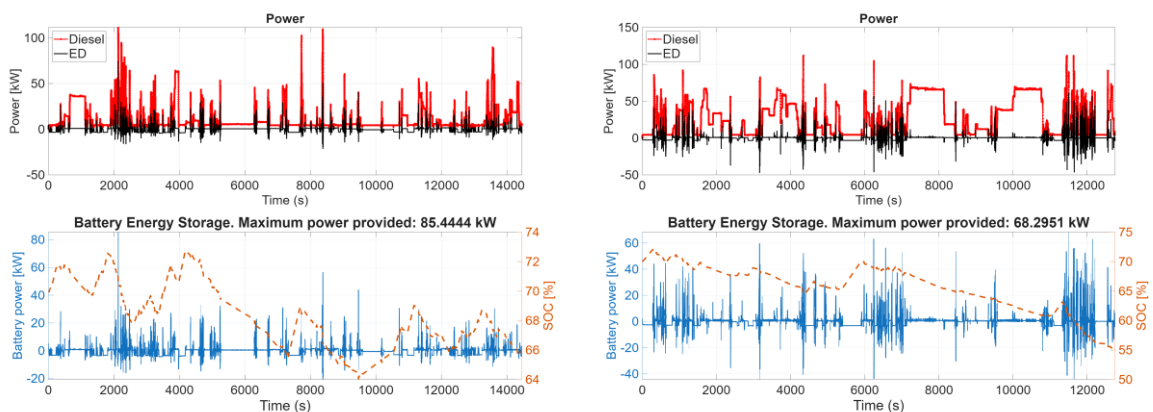
Rinnakkaishybridin mitoitus suoritettiin saatavilla olevien PTI/PTO-vaihteistojen teknisten tietojen avulla sekä saatavilla olevien dieselmoottorien tehojen mukaan. PTI/PTO-vaihteistojen saatavuus on niukkaa, ja tarkempia hintatietoja ei ole saatavilla aluksen teholuokassa. Dieselmoottorin tehoksi määriteltiin 133 kW ja sähkömoottorin 70 kW. Dieselmoottorin ja sähkömoottorin mitoitukset on määritelty kaupallisesti saatavilla olevien PTI/PTO-vaihdelaatikkojen mukaan, joita oli niukasti saatavilla. Akun kapasiteetti pidettiin pienenä, jolloin investointikustannukset pienenevät. Akulta vaaditaan tehoa pääsääntöisesti lyhytaikaisesti, jolloin akkua käytetään tehopiikkien ja suurien tehovaatimusten aikana.

Taulukko 8. Rinnakkaishybridisimulaation komponenttiarvot.

Dieselmoottorin teho [kW]	133
Dieselmoottorin nimellisvääntö [Nm]	731
Sähkömoottorin teho [kW]	70
Sähkömoottorin nimellisvääntö [Nm]	341

Akun [kWh]	kapasiteetti	9,62
---------------	--------------	------

Kuvassa (Kuva 30) nähdään EACS säätöstrategian käyttö avoimen veden ja sulutuksen kuormitusyösklien aikana. Kuten aikaisemmin mainittiin, sähkömoottori toimii pääsääntöisesti puskurina auttaakseen dieselmoottoria suurilla tehovaatimuksilla.



Kuva 30. Dieselmoottorin ja akun tuottama teho EACS säätöstrategialla.

6.3 Hybriditopologioiden vertailu

Taulukossa (Taulukko 9) on esitetty mitatun nykyisen hybridisoimattoman aluksen ja simuloidun rinnakkaishybridin polttoaineenkulutus eri säätöstrategioilla. Mitattu arvo on nykyisestä hybridisoimattomasta dieselkäyttöisestä aluksesta. Akun lataukseen kulutettava polttoainemäärä määritetään kokonaisvaraushäviöstä. Sarjahybridissä kaikilla säätöstrategioilla dieselgeneraattori toimii hyvällä hyötysuhteella, noin 38–39 %. Simulaatioissa käytettyä hyötysuhdekarttaa ei voitu jakaa salassapitosopimuksen vuoksi. TCS:llä on suurin polttoaineenkulutus matalan tehon työsyklin aikana, kun taas PFCS:llä ja SBCS:llä on marginaalisesti sama. Sulutuksen työsyklin aikana TCS:llä on pienin polttoaineenkulutus ja PFCS:llä suurin. TCS:llä on myös pienin varaushäviö korkean tehon kuormitusyösklien aikana, mikä tarkoittaa, että akku on ladattava useammin, mikä lisää polttoaineen kokonaiskulutusta ja käyttökustannuksia. Koska akun kapasiteetti on mitoitettu pieneksi, tulisi harkita suuritehoista akkua, koska kaikissa säätöstrategioissa suurin C-arvo on yli 2,5. Tässä tapauksessa LTO-akku olisi sopiva vaihtoehto.



Rinnakkaishybridin simulaatioissa polttoainetta kului enemmän avoimen veden ajossa, mutta akun varaustila laski vähemmän, jolloin lataukseen kulunut polttoaine oli pienempi. Rinnakkaishybridi suoriutuu sulutuksessa hyvin, sillä polttoainekulutusta laskettiin lähes 17%:lla. Näillä komponenttivalinnoilla akun täytyy olla suuritehoinen, jolloin C-arvo pitäisi olla noin 9. Arvo on erittäin suuri, mutta akun kapasiteettia kasvattamalla akun minimi C-arvovaatimus pienenee. Esimerkiksi 25 kWh:n akustolla saavutetaan noin 3 C:n C-arvovaatimus. Tämä kapasiteetin muutos ei vaikuta rinnakkaishybridin simulaatitulosiin, mutta vaikuttaa akun kokonaiskustannuksiin.

Taulukko 9. Hybridisoinnin simulaatioiden tulokset eri säätöstrategioilla.

Parametri	Mitattu	TCS	PFCS	SBCS	EACS
Polttoainekulutus [l/h]	4,13 / 8.12	2,75 / 6,32	2,62 / 7,33	2,63 / 7,08	2,83 / 6,65
Polttoainetta kulunut [l]	16,58 / 28,76	11,04 / 22,37	10,52 / 25,96	10,26 / 25,09	11,38 / 23,54
Akun lataukseen kuluva polttoaine [l]	-	1,93 / 5,42	2,35 / 2,45	2,66 / 3,22	0.10 / 0,36
Polttoaineen kulutuksen vähennys [%]	-	21,77 / 3,37	22,38 / 1,22	22,07 / 1,56	30.76 / 16.90
Akun maksimi C- arvo	-	2,50 / 3,08	3,16 / 2,64	3,19 / 2,59	8,82 / 7,09

6.4 Täyssähköisen voimalinjan simulaation tulokset

Täyssähköisen voimalinjan simulaatio on yksinkertainen toteuttaa, sillä malli ei tarvitse säätöratkaisua. Akku täytyy siis mitoittaa siten, että se kestää vaaditun työjakson ajan lataamatta.

Taulukko 10. Täyssähköisen simulaation komponenttiarvot.

Sähkömoottorin teho [kW]	190
Sähkömoottorin nimellisvääntö [Nm]	927
Akun kapasiteetti [kWh]	178

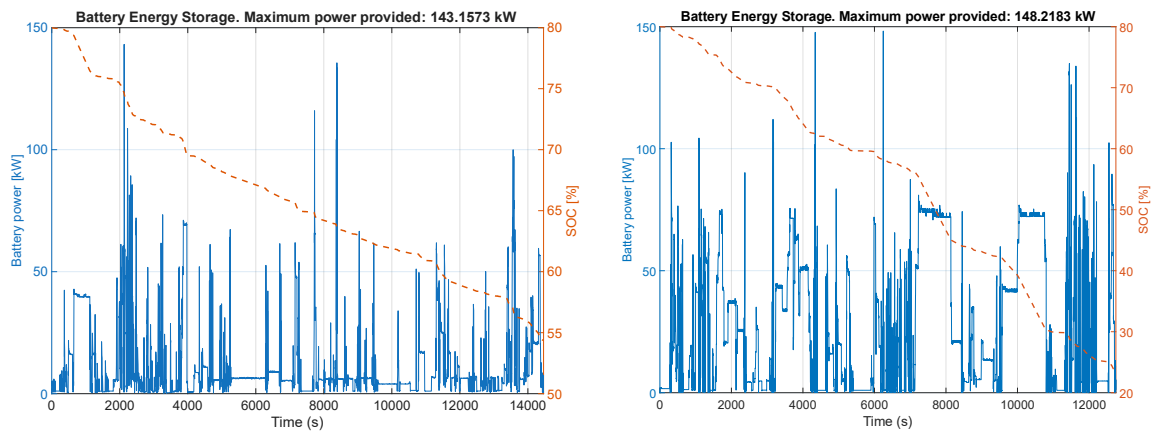
Täyssähköisten simulaatioiden akun alkuvaraustila oli 80 %. Kuvassa (Kuva 31) voidaan nähdä akun teho ja varaustila täyssähköisten simulaatioiden aikana. Kunkin syklin aikana kokonaisenergiankulutus oli huomattavasti pienempi. Alhaisen tehon kuormitus sykli kulutti noin 45,96 kWh, kun taas korkean tehon kuormitus sykli kulutti 100,27 kWh, ja kokonaisenergiankulutus oli 65–73 % pienempi kuin mitattu arvo ja 58–60 % pienempi kuin sarjahybridissä. Arvot on laskettu yhtälöllä:

$$E_{\text{vähennys}\%} = \frac{E_{\text{simuloitu}}}{E_{\text{mitattu}}} 100\%,$$

jossa $E_{\text{vähennys}\%}$ on kokonaisenergiakulutuksen vähennys (%), $E_{\text{simuloitu}}$ on simuloidun sähköisen aluksen kokonaisenergiakulutus (kWh) ja E_{mitattu} on mitatun hybridisoimattoman aluksen kokonaisenergiakulutus (kWh). E_{mitattu} laskettiin yhtälöllä:

$$E_{\text{mitattu}} = \frac{FC_{\text{diesel}} \rho_{\text{diesel}} E_j t}{3.6},$$

jossa FC_{diesel} on dieselmoottorin polttoainekulutus (l/h), ρ_{diesel} on dieselpolttoaineen tiheys (kg/l), E_j on polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg) ja t on aika (h). Suurin C-arvo on 0,83, mikä tarkoittaa, että sarjahybridissä vaadittavan tehokkaamman akun sijaan voitaisiin käyttää pienempitehoista akkua, esimerkiksi LFP:tä, mutta se lisää aluksen kokonaismassaa huomattavasti akkukemian alhaisen energiatiheuden takia.



Kuva 31. Täyssähköisen simulaation akun tuottama teho.

Taulukossa (Taulukko 11) nähdään arvioidut investointikustannukset aluksen eri voimalinjatopologioille. Rinnakkaishybridissä vertailussa käytetään 25 kWh akustoa. Huomataan, että rinnakkaishybridillä on pienimmät investointikustannukset, ja täyssähköisellä on suurimmat. Tämä johtuu siitä, että akkupakettien koko vaikuttaa merkittävästi kokonaiskustannuksiin. Täyssähköisessä aluksessa akun hinta on yli kaksi kolmasosaa kokonaiskustannuksista, kun taas rinnakkaishybridissä tämä on noin kymmenesosa.

Taulukko 11. Simuloitujen topologioiden hinta-arviot.

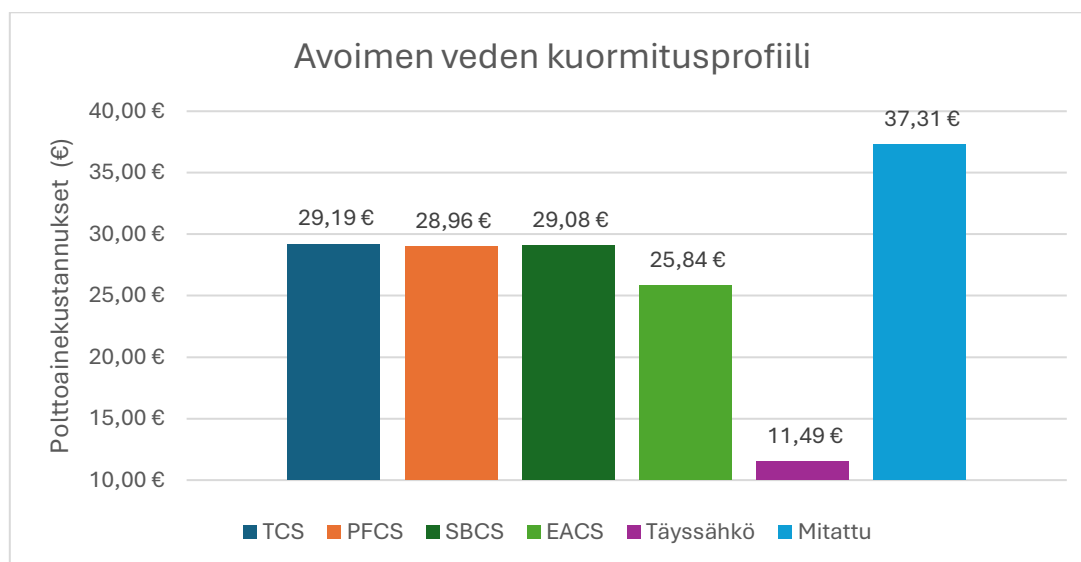
Komponentti	Hinta (sarja) [€]	Hinta (rinnakkais) [€]	Hinta (täyssähkö) [€]
Dieselgeneraattori	16 200	-	-
Dieselmoottori	-	31 920	-
Sähkömoottori	22 800	8 400	22 800
Invertteri	4 750	1 750	4 750
Vaihdelaatikko	16 150	17 255	16 150
Akkupaketti	29 250	16 250	115 700
Yhteishinta [€]	89 150	75 575	159 400

6.5 Aluksen käyttökustannukset

Käyttökustannukset lasketaan aluksen mitattujen ja simuloitujen hybridialusten polttoaineenkulutuksen arvojen sekä täyssähköisen aluksen sähkönkulutuksen

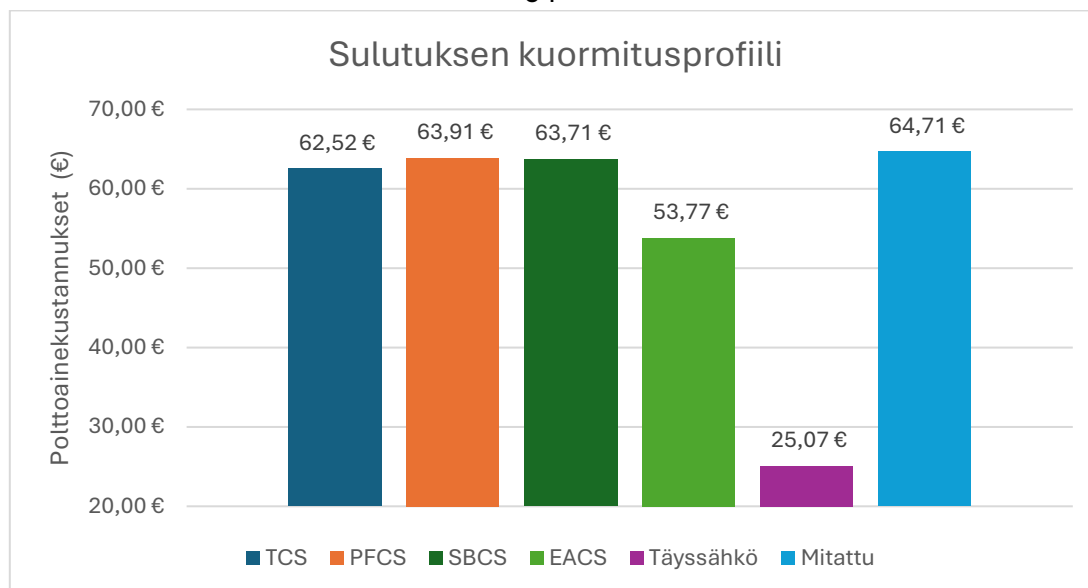
perusteella. Hybrideissä akkua ladataan dieselgeneraattorilla tai dieselmoottorilla, joten akun energiahäviö otetaan huomioon laskettaessa polttoaineen kokonaiskulutusta. Akun hyötysuhde on simulointimallissa 98 %. Käytetään biodieseliä, ja sen litrahinnaksi arvioidaan 2,25 €/l. Sähkön hinnaksi arvioidaan 0,25 €/kWh.

Kuvassa (Kuva 32) voidaan nähdä, että avoimen veden kuormitusprofiilillä käyttökustannuksia voidaan vähentää 22 % sarjahybridillä, rinnakkaishybridillä 30 % ja täyssähköisellä 69 %. Eri sarjahybridin säätöstrategioilla on minimaaliset kustannuserot, mutta PFCS:llä on pienin ero johtuen pienimmästä akun varauksen alenemasta. Tämä kuormitusprofiili edustaa aluksen yleistä toimintaa mittausten aikana.



Kuva 32. Avoimen veden arvioidut operointikustannukset eri topologioilla.

Kuvassa (Kuva 33) voidaan nähdä, että sarjahybridillä on vähäinen vaikutus käyttökustannuksiin sulutuksessa. Kokonaiskustannukset laskivat 3 %:lla, ja TCS suoriutui parhaiten. Toisaalta PFCS:llä oli korkeimmat käyttökustannukset. Rinnakkaishybridillä on merkittävämpi ero sulutuksessa, ja käyttökustannuksia laskettiin 17 %:lla. Täyssähköisellä toiminnalla käyttökustannukset laskivat 61 %:lla. On huomattava, että sulutusta ei tehdä kovin usein. Mitattujen tietojen perusteella vain yksi päivä koostui sulutuksesta ja tietoja kerättiin puolen vuoden ajan, joten se ei edusta aluksen yleistä toimintaa. Käyttökustannuksia voidaan kuitenkin silti leikata sulutuksessa, vaikka ero on minimaalinen hybridikäytössä.



Kuva 33. Sulutuksen arvioidut operointikustannukset eri topologioilla.

6.5.1 Kokonaisvuosikulutus

Aluksen polttoaineen kokonaiskulutus mittausajalta oli 3 843,6 litraa, joka tarkoittaa noin 8 648,10 €:n käyttökustannuksia. Kuten aikaisemmin mainittiin, alus ei suluttanut kuin kerran koko vuonna, jolloin käytetään matalan tehon operointiprofiilin tuloksia arvioitujen kokonaisvuosikulujen laskemiseen eri topologioilla.

Taulukko 12. Vuosikulutuksen vähennys eri topologioilla.

	Mitattu	Sarjahybridi	Rinnakkaishybridi	Täyssähkö
Laskettu vuosikulutus [€]	8 640,10	6 739,30	5 982,40	4 843,90
Säästö [€]	-	1 900,80	2 657,70	3 796,20

Huomataan, että täyssähköisellä aluksella on suurin säästöpotentiaali operointikustannuksissa. Tämä pääsääntöisesti johtuu topologian energiatehokkuudesta, ja sähkön alhaisesta hinnasta. Myös rinnakkais- ja sarjahybridillä voidaan tehdä merkittävä säästö.

6.5.2 Excel laskentatyökalu

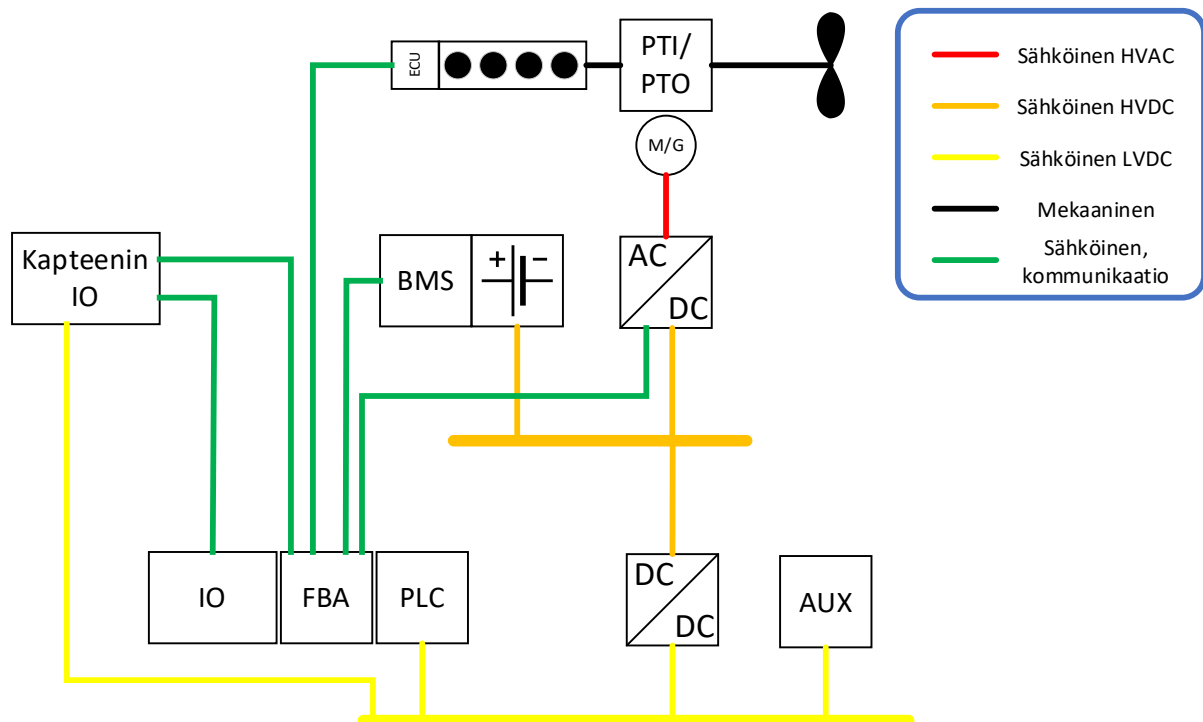
Työpaketissa 3 luotiin Excel-pohjainen laskentatyökalu hybridisoidun ja sähköisen apualuksen mitoitukseen. Laskentatyökalun tavoitteena on toimia alustavana ja suuntaa antavana työkaluna, jonka avulla voidaan mitoittaa eri hybriditopologioille komponentit



työsyklin avulla. Tiedettäessä vaaditun maksimitehon voi käyttäjä luoda yksinkertaisia työsyklejä, joita käytetään laskemaan arvioidun polttoainekulutuksen, energialähteiden koon ja operointikustannukset jokaiselle topologialle. Työkalulla lasketaan myös mahdolliset investointikustannukset eri topologioille. Työkalu on saatavilla pyydettäessä LUT-yliopistolta tutkimuksen projektiryhmältä.

7 Automaatiokonsepti hybridiapualukselle

Kappaleessa esitetään työpaketin 4 automaatiokonsepti edellä suunnitelluille hybriditopologioille. Konsepti ei kata itse säätöjen toteutusta vaan ottaa kantaa tarvittavaan laitteistoon, kommunikaatioon laitteiden välillä sekä esittää ohjelman toiminnallisuuden ylätasolla. Kuva 34 esittää rinnanhybriditoteutuksen pääpiirikaavion, johon on lisätty automaatiojärjestelmän pääkomponentit yleisellä tasolla.



Kuva 34. Rinnanhybriditoteutuksen pääpiirikaavio sisältäen myös automaatiojärjestelmän laitteet

Rinnanhybriditoteutuksessa polttomoottorista on mekaaninen yhteys potkurille. Sähkömoottori/generaattori liitetään samalle akselille PTI/PTO -vaihteiston avulla. Tai vaihtoehtoisesti sähkömoottori/generaattori voidaan liittää potkuriakselille niin että akseli kulkee sähkömoottorin/generaattorin läpi. Sähkömoottorin/generaattorin NDE-pää (Non-Drive End) tulisi kiinni laippakiinnityksellä dieselmoottorin vauhtipyörään ja DE-pää (Drive End) potkuriakseliin. Tämä mahdollistaa polttomoottorin avustamisen sähkömoottorilla, eli ns. PTI-moodi ja toisaalta myös sähkömoottoria voidaan käyttää generaattorina, jolloin polttomoottorilla ladataan akkua, eli ns. PTO-moodi. Sähkömoottoria/generaattoria ajetaan invertterillä, joka on liitetty korkeajännitteisen ajoakun kanssa samaan DC-linkkiin.



Kuvassa punaiset HVAC-yhteydet kuvastavat sähköisiä korkeajännitteisiä AC-yhteyksiä. Korkeajännitteisellä tarkoitetaan tässä tapauksessa ajoakun jännitetasoa eli noin 300-700 V. Oranssit (HVDC) kuvastavat korkeajännitteisiä DC-yhteyksiä. Keltaiset (LVDC) kuvastavat matalajännitteisiä DC-yhteyksiä, käytännössä näiden jännitetaso on 24 V, joka toimii esimerkiksi kuorma-autoissa ja veneissä/laivoissa käyttöjännitteenä monille apulaitteille, valoille, yms.

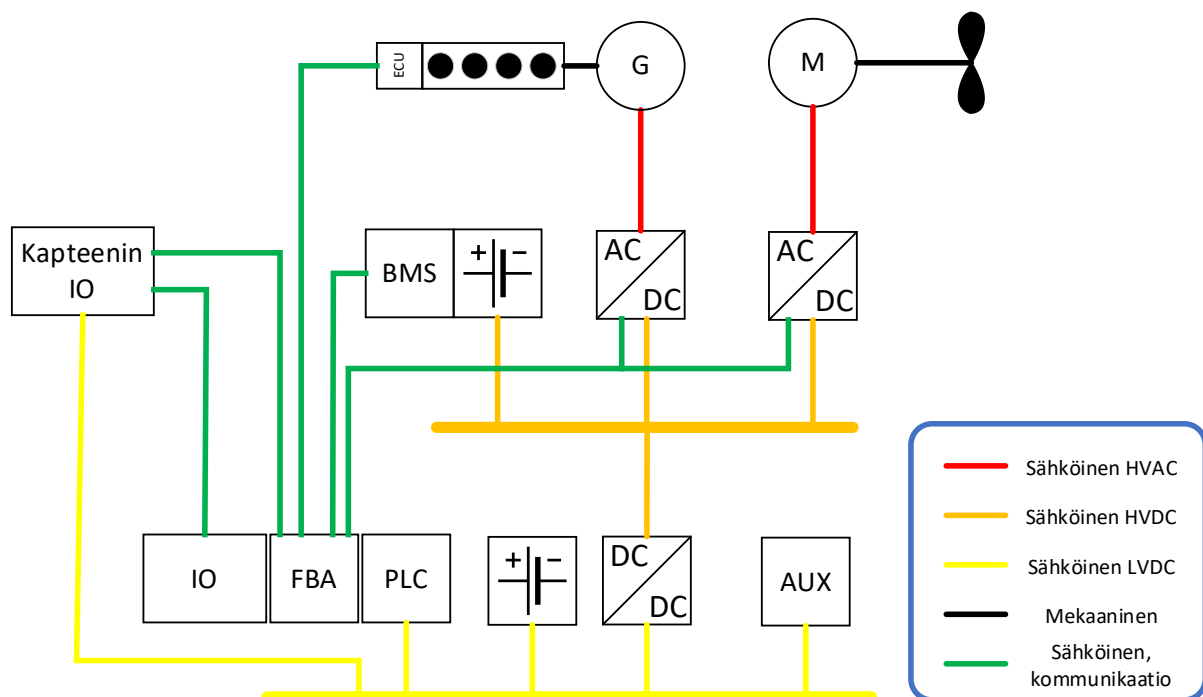
Kuvassa kapteenin IO:lla tarkoitetaan kaikkea sitä IO:ta (input-output) mitä kapteeni tarvitsee hybridijärjestelmän hallitsemiseen. Tämä sisältää tyypillisesti kahvan, jolla valitaan työntövoiman suunta ja suuruus. Lisäksi voi olla näyttöpohjainen HMI (human machine interface), jonka kautta voidaan asettaa hybridijärjestelmään liittyviä parametreja, tai jokin yksinkertainen muutamiin kytkimiin, nappeihin ja indikaattorivaloihin perustuva (häätä)käyttöliittymä.

Kuvassa oleva PLC (programmable logic controller, ohjelmoitava logiikka) toimii hybridijärjestelmän ohjauslaitteena. PLC voi olla perinteinen PLC tai teollisuustietokoneeseen (IPC) perustuva PLC. IPC perustaisella PLC:llä on etuna helpompi liitettävyyys, etäyhteydet ja datan tallennus. Mutta koska kyseellä on tietokone pakattuna teollisuusympäristöön sopiviin kuoriin, niin haittoina voi olla suurempi vikaherkkyys ja kalliimpi hinta.

PLC:n on liitetty kenttäväyläadapteri FBA (fieldbus adapter) ja IO-moduuli. FBA hoitaa kenttäväyläkommunikaation sitä käyttävien laitteiden kanssa. Tyypillinen työkoneissa käytettävä kenttäväylä on SAE J1939 -väylä, muita tyypillisiä kenttäväyliä ovat CAN ja CanOpen. PLC:n yhteydessä voi olla useampi kenttäväyläadapteri eri laitekokonaisuuksia varten. Esim. polttomoottorin ECU:n (engine control unit) kanssa kommunikointiin oma kenttäväylä, sähkömoottorien invertterien kanssa kommunikointiin oma kenttäväylä ja akuston BMS:n (battery management system) kanssa kommunikointiin oma kenttäväylä. Kun käytössä on useampi kenttäväyläadapteri, niin aluksessa voi olla useampia eri kenttäväyliä käytössä. Esimerkiksi moottorin ja PLC:n välillä voi olla SAE J1938, invertterin ja PLC:n välillä CanOpen ja BMS:n ja PLC:n välillä CAN.

IO-moduulit voivat olla tyypiltään analogisia tai digitaalisia, sisääntuloja tai lähtöjä. Analogiset sisääntulot voivat lukea jännitteen tai virran signaalijohdosta joltain tietyltä skaalalta ja muuntaa arvon digitaalseksi numeroarvoksi PLC-ohjelmaan. Analogisilla lähdöillä voidaan taas kirjoittaa tietty jännitteen tai virran arvo PLC-ohjelmasta jollekin laitteelle menevään signaalijohtoon. Digitaalisilla tuloilla ja lähdöillä voidaan vastaavasti vain lukea, onko johdossa tietyn jännitteen ylittävä jännite (eli käytännössä onko johdon jännite 24 V vai 0 V) ja digitaalisilla lähdöillä voidaan asettaa signaalijohtoon joko 0 V tai 24 V jännite.

Kuvassa on lisäksi DC/DC -muunnin joka muuntaa ajoakun korkean jännitetason matalammaksi (24 V). Aluksen 24 V akustoa voidaan ladata tätä kautta, vaikka polttomoottori ei olisikaan käynnissä, tämän tarpeellisuus korostuu erityisesti sarjahybriditapauksessa (Kuva 35), sillä sarjahybridi mahdollistaa myös täyssähköisen liikkumisen. Dieselmoottori ei tällöin lataa 24 V akustoa.



Kuva 35. Sarjahybridiratkaisun pääpiirikaavio johon on lisätty automaatiojärjestelmän laitteet

Kuvan (Kuva 35) mukaan hybriditopologialla ei ole juurikaan vaikutusta automaatiolaitteiston määrään. Lähinnä muutos tulee toisen invertterin tarpeesta. Usein kuitenkin molemmat invertterit (moottori- ja generaattori-invertteri) kytketään samaan kenttäväylään, jolloin ei tarvita muuta kuin hieman lisää kenttäväyläkaapelia.



Laite-esimerkkejä ohjelmoitavista logiikoista

Ohjelmoitavia logiikoita löytyy eri tarkoituksiin eri valmistajilta kuten Beckhoff, ABB, Omron ja Siemens. Beckhoffilta löytyy IPC-pohjaisia ratkaisuja, kuten C6920 -sarjan laite, jota käytettiin hankkeessa datan tallennukseen aluksesta. Kyseisestä laitteesta löytyy Ethernet-portteja, jotka voi konfiguroida EtherCAT-porteiksi ja liittää niihin EtherCAT-yhteensopivia laitteita, kuten EK1100 EtherCAT coupler. Tähän voidaan taas liittää CAN-master -kortteja (kuten EL6751) ja tarvittavia IO-kortteja kuten EL1008 (digitaalisääntulo), EL2008 (digitaalilähtö), EL3022 (analoginen virtatulo), EL3072 (analoginen jännitetulo ± 10 V). Ks. Kuva 36.

IPC-pohjaisen ratkaisun etuna on joustavuus ja muokattavuus. Koska kyseessä on Windows-käyttöjärjestelmää ajava tietokone, voidaan se liittää verkkoon kuin mikä tahansa tietokone ja siihen voidaan ottaa etäyhteys. Tietoturva täytyy olla kunnossa, jotta vältetään ei-toivotuilta käyttäjiltä. Verkkoon liitetyn järjestelmän tilaa ja kuntoa voisi valvoa, vaikka aluksen ollessa vesillä. IPC:n omaa kiintolevytilaa voidaan myös käyttää järjestelmän suorituskäytön tallennukseen. Windowsissa PLC-ohjelman rinnalla voidaan ajaa normaaleja Windows-sovelluksia. Esimerkiksi graafinen HMI voidaan toteuttaa suoraan IPC:lle asennetulla sovelluksella ja IPC:hen kytketyllä näytöllä. Erillistä HMI-laitetta ei tarvita. PLC-ohjelma voidaan eristää yhteen prosessoriytimeen, jolloin IPC:n Windows-käyttöjärjestelmä voi käyttää jäljellä olevia ytimiä vaikuttamatta PLC-ohjelman suoritusaikaväliin. IPC:ssä kuin tavallisessakin PLC:ssä ohjelma toteutetaan IEC 61131-3 -standardin määrittelemillä kielillä.

IPC-pohjaisen ratkaisun heikkoutena on taas se, että kyseessä on Windows-käyttöjärjestelmää ajava tietokone. Eli järjestelmän voi olla vikaherkempi kuin perinteinen PLC-laite. Esimerkiksi järjestelmää sammutettaessa on huolehdittava, että IPC:lle annetaan aikaa sammuttaa itse itsensä. IPC ei myöskään käynnisty aivan yhtä nopeasti kuin erillinen PLC-laite.



Kuva 36. Vasemmalta oikealle: Beckhoff C6920-0050 IPC, EK1100 EtherCAT-coupler, EL6751 CANOpen module, EL1008 Digital input module, kuvat ei mittakaavassa (Kuvat: Beckhoff)

IPC:n sijaan tavallinen ohjelmoitava logiikka (PLC) riittäisi hoitamaan hybridijärjestelmän ohjausta. Esimerkkinä tällaisesta ABB:n AC500 -sarjan PLC:t. PLC:hen voi liittää kenttäväyläadaptereita esimerkiksi CAN-pohjaisille kenttäväylille (CAN, CANOpen, SAE J1939) sekä digitaali- ja analogi-IO:ta. CAN-kenttäväylää varten tarvitaan CM578-moduuli. Analogi- ja digitaali-IO voidaan toteuttaa jopa vain yhdellä moduulilla riippuen IO-kanavien määrästä, sillä monet moduulit sisältävät digitaalisia ja analogisia sisääntuloja ja lähtöjä. Esimerkiksi ABB DA501 sisältää 16 digitaalista sisääntuloa, 4 analogista sisääntuloa ja 8 digitaalista tuloa/lähtöä (konfiguroitavissa).

Etuna tämänlaisessa ohjelmoitavassa logiikassa on IPC:hen nähden se, että se on suunniteltu toimimaan tämänkaltaisessa teollisessa ympäristössä. Se käynnistyy nopeasti ja sitä ei haittaa virtojen katkaisu yllättäen. IPC:tä käytettäessä on varmistettava laitteen hallittu sammutus esimerkiksi UPS:n (Uninterruptible Power Supply) avulla. ABB:n PLC-laitteista on usein myös saatavilla erilliset XC-versiot, joiden toimintalämpötilahaarukka on laajempi.

Haittapuolena on se, että tämä ratkaisu on IPC:tä enemmän fokusoitunut yhden asian hoitamiseen, eli hybridijärjestelmän ohjaamiseen (mikä on toisaalta myös etu). Perinteisessä PLC-laitteessa ei voi suorittaa muuta kuin PLC-ohjelmaa, eli esimerkiksi graafinen HMI olisi toteutettava jollain muulla laitteella ja näiden laitteiden välille olisi muodostettava jokin kommunikaatio, esimerkiksi Ethernet UDP/IP. Kuvassa (Kuva 37) on esitetty ABB:n AC500 -sarjan PLC ja siihen liittyvät CAN-kenttäväyläadapteri sekä IO-

moduuli, joilla voidaan toteuttaa hybridijärjestelmän ohjaus sekä kommunikoida siihen liittyvien laitteiden kanssa. Kuvassa näkyvien laitteiden lisäksi tarvitaan pohjalevy johon laitteet kiinnittyvät, pohjalevyssä on myös jousiterminaalit IO-kanavien johdoille. Pohjalevy puolestaan kiinnitetään DIN-kiskoon.



Kuva 37. ABB AC500 -sarjan laitteita vasemmalta oikealle: ohjelmoitava logiikka AC500 PM592, CAN-kenttäväyläadapteri CM578 ja IO-moduuli DA501, kuvat ei mittakaavassa (Kuvat: ABB)

Beckhoffin IPC:n ja ABB AC500 PLC:n suojausluokka on IP20, joten ne täytyy koteloida suojaan lialta ja kosteudelta. IPC:n tapauksessa kannattaa huomioida myös se että kyseessä on tietokone, joka tuottaa hieman lämpöä, tällöin sähkökaapin (johon automaatiolaitteet on sijoitettu) ilmanvaihto tuli järjestää niin että se kykenee pitämään IPC:n lämpötilan riittävän alhaisena. Jos automaatiokaappi sijaitsee aluksen konehuoneessa, niin on otettava huomioon, että kesällä konehuoneen lämpötila saattaa olla jopa n. 70 astetta. Beckhoffin IPC:n käyttölämpötila-alueeksi on mainittu 0 ... 50 °C. ABB AC500 sarjan XC-merkityn (extreme conditions) PLC:n käyttölämpötila-alue on -30 ... +70 °C.

Laite-esimerkkejä inverttereistä

Aluskäytössä invertteriltä vaaditaan hyvää suojausta ulkoisia tekijöitä vastaan, sillä invertteri halutaan sijoittaa aluksen konehuoneeseen lähelle sähkömoottoria/generaattoria. Mobiilikäyttöön tarkoitetut invertterit sopivat usein myös aluskäyttöön. Mobiilikäyttöön tarkoitetut invertterit ovat nestejäähdytteisiä korkean suojausluokan vuoksi, mutta aluksessa tämä ei ole ongelma sillä viileää jäähdytysvettä on tarjolla runsaasti. Mobiilikäyttöön suunnitelluissa inverttereissä on yleensä jokin kenttäväyläliityntä jo valmiiksi integroituna invertteriin, ei siis tarvita erillisiä lisäkortteja.

Danfossilta löytyy mobiili-inverttereistä esimerkiksi EC-C1200-450 (Kuva 38), joka on ajoneuvo ja aluskäyttöön hyväksytty nestejäähdytteinen mobiili-invertteri. Invertterissä on kaksi erotettua kenttäväyläporttia, joiden kautta voidaan kommunikoida CAN, CANOpen tai SAE J1939 -protokollia käyttäen. Invertterin suojausluokitus on IP6K9K. Sen DC-linkin jännitealue on 0...850 V ja suurin teho on 300 kW. Invertteri on kompakti tehoonsa nähden, sillä se painaa vain 14 kg.



Kuva 38. Danfoss EC-C1200-450 mobiili-invertteri (Kuva: Danfoss)

Vastaavasti ABB:ltä löytyy HES (Harsh Environment Standard) invertterit (Kuva 39), jotka on suunniteltu ankariin olosuhteisiin. Inverttereitä on saatavilla 350 A, 600 A ja 900 A virroille. 850 V DC-jännitteellä tämä tarkoittaa karkeasti 297 kW, 510 kW ja 765 kW tehoja. HES880-invertterissä on CAN-portit (CAN-IN ja CAN-OUT), joiden kautta invertteri voidaan ketjuttaa osaksi kenttäväylää. Portti tukee CAN-, CANOpen- ja SAE J1939-protokollia. HES880 on nestejäähdytteinen ja suunniteltu toimimaan kovissa

olosuhteissa työskentelevissä työkoneissa kuten dumppereissa ja kaivinkoneissa sekä meriliikennesovelluksissa.



Kuva 39. ABB HES880-104 -mobili-inverteri (Kuva: ABB)

7.1 Ohjelman rakenne

Rinnakkaishybridi

Rinnanhybridiratkaisussa (Kuva 34) dieselmoottori on kytketty potkuriin mekaanisesti ja se tuottaa pääosan tarvittavasta propulsiotehosta. Sähkömoottori/generaattori on kytketty potkuriakseliin PTI/PTO-vaihteiston avulla tai niin että potkuriakseli kulkee sähkömoottorin/generaattorin läpi. Tarvittaessa sähkömoottori avustaa dieselmoottoria (PTI-moodi) tai pääakun tarvitessa latausta sähkömoottoria voidaan ajaa generaattorina (PTO-moodi) ja ”jarruttaa” sillä dieselmoottoria ja näin generoida varausta akkuun. Ehtoina PTI- ja PTO-tiloihin siirtymiselle on vääntömomentin tarve ja pääakun varaustila. Rinnakkaishybridin säädöt ja ehdot tilasiirtymien välillä on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.3. Näitä säätörakenteita on käytetty aluksen voimalinjan simuloinnissa. Tässä kappaleessa sekä taulukossa (Taulukko 13) on esitetty esimerkin omaisesti rinnakkaishybridin säätö tiloina ja ehtoina tilasiirtymille, ilman tarkempia rajoja.

Jos PTI/PTO-vaihteisto on varustettu kytkimellä, jolla voidaan erottaa dieselmoottori sähkömoottorista ja potkuriakselista, aluksella voidaan ajaa täyssähköisessä moodissa. Muuten tämä ei ole järkevää, sillä sähkömoottori joutuisi pyörittämään dieselmoottoria. Häätätilanteeseen (dieselmoottorin vikaantuminen) tämäkin voisi olla ratkaisu, kunhan sähkömoottorissa on tarpeeksi tehoa ja vääntöä. Täyssähkötilaan siirryttäisiin todennäköisesti aluksen kapteenin pyynnöstä, ei automaattisesti. Täyssähkötilassa

Taulukko 13 esittää edellisen kuvan tilasiirtymien ehdot.



Taulukko 13. Ehdot tilasiirtymien välillä rinnakkaishybriditoteutuksen vuokaaviossa. Kaikkien ehtojen tulee toteutua, jotta tilaa vaihdetaan. Vikatilaan riittää kuitenkin vain yksi ehdoista.

Tilasiirtymä	Ehdot
Älä tee mitään -> PTI-moodi	Akussa riittävä SOC Vaihde valittu (potkuriakseli pyörii) Vääntömomenttitarve yli raja-arvon
PTI-moodi -> Älä tee mitään	Vääntömomenttitarve alle raja-arvon Vaihde vapaalla Akun SOC alle raja-arvon
Älä tee mitään -> PTO-moodi	Vaihde valittu (potkuriakseli pyörii) Akun SOC alle raja-arvon Potkuriakselin kierrosnopeus riittävä
PTO-moodi -> Älä tee mitään	Vaihde vapaalla Akun SOC riittävä Potkuriakselin kierrosnopeus liian matala
Älä tee mitään -> Täyssähkötila	Kapteeni pyytää Akussa riittävä SOC
Täyssähkötila -> Älä tee mitään	Kapteeni pyytää tilasta poistumista Akun SOC riittämätön
Vikatila	Sähkömoottori/generaattori-invertterin vikatila TAI Akun vikatila

Taulukko 14 esittää rinnakkaishybriditoteutuksen tilojen kuvaukset ja kuinka sähkömoottori/generaattori-invertterin vääntömomenttiohje muodostetaan. $T_{ref,mg}$ on sähkömoottori/generaattori-invertterin vääntömomenttiohje.

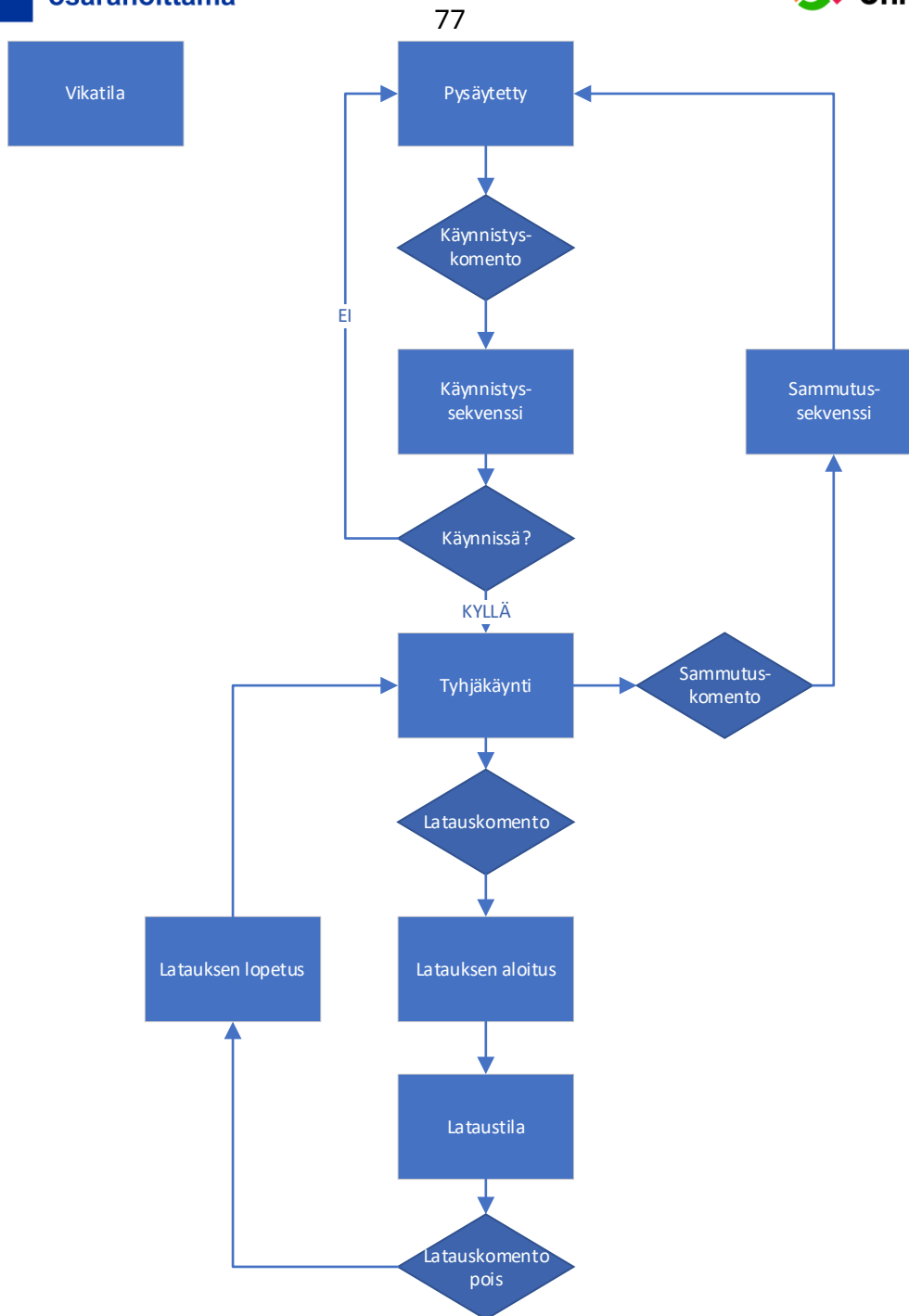
Taulukko 14. Rinnakkaishybriditoteutuksen tilojen kuvaukset

Älä tee mitään	$T_{ref,mg} = 0$
PTI-moodi	$T_{ref,mg}$ käyrästäältä kahvan asennon funktiona
PTO-moodi	$T_{ref,mg}$ käyrästäältä potkuriakselin pyörimisnopeuden funktiona
Täyssähkömoodi	$T_{ref,mg}$ kahvalta tai kapteenin IO:n kautta
Vikatila	Sähkömoottori/generaattori-invertteri stop-tilaan. Jos akun vika, niin akku avaa pääkontaktorit.



Sarjahybridi

Sarjahybridiratkaisussa (Kuva 35) dieselmoottori on kytketty generaattoriin ja erillinen sähkömoottori pyörittää potkuria. Tällöin kapteenin vaihdekahva vaikuttaa vain sähkömoottorin vääntömomentti- tai pyörimisnopeusohjeeseen (ja kahvan täytyy olla sähköinen sekä olla kytketty automaatiojärjestelmään). Dieselmoottoria ja generaattoria käytetään ennalta määrätyn latausstrategian mukaan, joka voidaan ohjelmoida automaatiojärjestelmään. Kuva 41 esittää generaattoriohjelman päätason vuokaavion. Ohjelman tilat on merkitty suorakaitein ja niiden välillä olevat ehdot on merkitty suunnikkain.



Kuva 41. Sarjahybridiratkaisun generaattorin pääohjelmataason vuokaavio

Taulukko 15 esittää edellisen kuvan pääohjelmakaavion tilojen selitykset. Tilasiirtymät tapahtuvat automaation lataussäädön ohjeiden mukaan. Eri latausstrategiat sarjahybridille on kuvattu kappaleissa 4.2.1, 4.2.2 ja 4.2.3. Vikatilaan siirrytään kaikista tiloista, kun yksikin vikatilan ehto täyttyy. Ehtoja ovat mm. generaattori-invertterin vikatila, akun vikatila, tai dieselmoottorin vikatila.



Taulukko 15. Sarjahybridiratkaisun tilojen kuvaukset

Pysäytetty	- Dieselmoottori pysäytetty - Generaattori-invertteri stop-tilassa
Käynnistyssekvenssi	- Kytetään dieselmoottorin ECUun virta päälle ja odotetaan hetki sen käynnistymistä. - Kytetään starttimoottorin rele päälle ja odotetaan hetki - Kytetään starttimoottorin rele pois päältä ja tarkistetaan pienen viiveen kuluttua ECU:n tiedoista onko moottori käynnissä (moottorin pyörimisnopeus >0), jos on, mennään tyhjäkäynti-tilaan. Jos ei ole, yritetään käynnistää uudelleen. Jos ei useasta käynnistysyrityksestä huolimatta käynnisty, mennään vikatilaan.
Tyhjäkäynti	- Dieselmoottori tyhjäkäynnillä - Generaattori-invertteri stop-tilassa
Latauksen aloitus	- Asetetaan generaattori-invertteri vääntö/pyörimisnopeus/teho-ohjeelle ja aloitetaan modulointi (run-tila) - Annetaan dieselmoottorille ennalta määrätty vääntöohje
Lataustila	- Dieselmoottori käynnissä, vääntömomenttiohje automaatiolta - Generaattori-invertteri modului, vääntömomentti/pyörimisnopeus/teho-ohje automaatiolta
Latauksen lopetus	- Generaattori-invertteri stop-tilaan ja ohjearvo nolleen - Dieselmoottorin vääntöohje nolleen, kone tyhjäkäynnille
Sammutussekvenssi	- Diesel moottorin ECU:ta virta pois
Vikatila	- Dieselmoottori pysäytetty - Generaattori-invertteri stop-tila - Jos akku ilmoittaa vian niin myös akun pääkontaktorit auki

Seuraavissa tekstilaatikoissa on esitetty IEC61131-3 standardin määrittelemällä ST-kielellä toteutettu PLC-ohjelma kuvassa (Kuva 41) ja taulukossa (Taulukko 15) kuvatun sarjahybridin generaattorin ohjauksen toteuttamiseksi. Oletetaan että meillä on seuraavan tekstilaatikon mukaiset IO-muuttujat dieselmoottorille, generaattori-invertterille ja akulle sekä näihin liittyville laitteille. Muuttujat liittyvät digitaalisiin IO-



kanaviin tai jonkin kenttäväylän kautta saataviin arvoihin. Useimpien dieselmoottorien tapauksessa kyseessä on SAE J1939-väylä.

```
VAR_GLOBAL

    ECU_On : BOOL;           // ECU:n releen ohjaus, TRUE=ECUssa virrat
    ECU_MotorRPM : INT;      // ECU:n ilmoittama moottorin pyörimisnopeus
    ECU_MotorTorq : INT;     // ECU:n ilmoittama moottorin vääntömomentti
    ECU_Fault : BOOL;        // TRUE kun ECU ilmoittaa vikakoodin
    ECU_TRef : INT;          // Vääntömomenttiohje dieselmoottorille
    Starter_EN : BOOL;       // Dieselmoottorin käynnistysmoottorin releen ohjaus,
                             // TRUE=käynnistin pyörii

    GenINV_RUN : BOOL;       // Invertterin käyntikomento
    GenINV_ControlMode : INT; // Invertterin ohjaustila (vääntö/nopeus/teho/jännite)
    GenINV_Ref : INT;         // Invertterin ohje arvo (riippuen edellisestä:
                             // vääntö/nopeus/teho/jännite)
    GenINV_Fault : BOOL;     // TRUE kun invertteri ilmoittaa vikakoodin

    BMS_Fault : BOOL;        // TRUE kun akun BMS ilmoittaa vikakoodin
    BMS_Contactor : BOOL;    // Akun pääkontaktorien ohjaus, TRUE=kontaktori kiinni

END_VAR
```

Pääohjelman deklaraatio-osa määrittelee seuraavat muuttujat ja funktiolohkot. Tilamuuttujia (state ja starting_state) käytetään tilakoneen tilojen hallinnassa, request-muuttujilla ylemmän tason ohjaus pyytää käynnistämään/sammuttamaan dieselmoottorin sekä pyytää aloittamaan/lopettamaan latauksen. Timer1-nimistä TON-funktiolohkon instanssia käytetään ajastimena tilasiirtymien välissä. Lisäksi koodissa on muuttuja epäonnistuneita käynnistysyrityksiä varten, kun laskuri saavuttaa tietyn arvon tilakone menee vikatilaan ja jää sinne odottamaan käyttäjän puuttumista asiaan. charge_start_acc_value on arvo, joka annetaan dieselmoottorille ohjeeksi kun siirrytään lataustilaan, jotta sillä on valmiiksi vääntöä (ja ahtopainetta) kun generaattori alkaa kuormittaa sitä. Lisäksi meillä on seuraavan kaltainen enumerointi tilamuuttujan arvoille.



```
{attribute 'strict'}
{attribute 'to_string'}
TYPE DUT :
(
    STOPPED,
    STARTING,
    IDLE,
    CHARGE_START,
    CHARGE,
    CHARGE_END,
    STOPPING,
    FAULT
);
END_TYPE
```

Pääohjelman deklaratio-osa:

```
PROGRAM MAIN
VAR

    // Tilakoneen tilamuuttujat
    state : INT;
    starting_state : INT;

    // Ohjausmuuttujat, ylempi ohjaus pyytää näillä käynnistämään/sammuttamaan dieselin
    // ja lataamaan akkua
    RunRequest : BOOL; // Pyydetään dieselmoottorin käynnistystä/sammutusta
    ChargeRequest : BOOL; // Pyydetään latausta

    // Apumuuttujat
    timer1 : TON; // Ajastinlohko
    failed_starts : INT; // Laskuri epäonnistuneille käynnistyksille
    charge_start_acc_value : INT := 200; // ECUlle annettava vääntöarvo latauksen
    //aloituksessa

END_VAR
```



Pääohjelman implementaatio-osa (jatkuu seuraavilla 3 sivulla)

```
CASE state OF

    (*****)

    STOPPED:

    // Varmistetaan että tässä tilassa on diesel ja invertteri pysäytettynä

    ECU_On := FALSE;

    GenINV_Run := FALSE;

    // Kun pyydetään käynnistystä niin siirrytään STARTING tilaan

    IF RunRequest THEN

        state := STARTING;

        starting_state := 0;

    END_IF

    (*****)

    STARTING:

    // Tilassa on oma tilakone käynnistyssekvenssin toteuttamiseksi

    CASE starting_state OF

        0:

            // Käynnistetään ECU ja odotetaan 1 s sen käynnistymistä

            ECU_On := TRUE;

            timer1(IN:=TRUE, PT:=T#1S);

            IF timer1.Q THEN

                starting_state := 1;

                timer1(IN:=FALSE);

            END_IF

        1:

            // Pyöritetään moottoria 1 s ja siirrytään seuraavaan tilaan

            Starter_EN := TRUE;

            timer1(IN:=TRUE, PT:=T#1S);

            IF timer1.Q THEN

                starting_state := 2;

                timer1(IN:=FALSE);

                Starter_EN := FALSE;

            END_IF

    END_CASE

END_CASE
```

```
2:
// Kun moottoria on pyöritetty 1 s, odotetaan 5 s ja katsotaan ECU:n
// ilmoittamasta moottorin pyörimisnopeudesta onko
// moottori käynnissä. Jos pyörimisnopeus on yli asetetun rajan niin
// todetaan että kone on käynnissä ja siirrytään
// IDLE-tilaan. Jos nopeus on alle rajan, todetaan että moottori ei
// ole käynnissä ja yritetään käynnistystä uudelleen
// Moottoria yritetään käynnistää 3 kertaa,
// jos ei onnistuta niin siirrytään FAULT-tilaan

timer1(IN:=TRUE, PT:=T#5S);
IF timer1.Q THEN
    timer1(IN:=FALSE);
    IF ECU_MotorRPM > 0 THEN
        state := IDLE;
        failed_starts := 0;
    ELSE
        state := STOPPED;
        failed_starts := failed_starts + 1;
        IF failed_starts >= 3 THEN
            state := FAULT;
        END_IF
    END_IF
END_IF

END_CASE

(*****)

IDLE:
// Tyhjäkäyntitila, ei tehdä varsinaisesti mitään muuta kuin odotetaan siirtymistä
// joko lataustilaan (CHARGE)
// tai pysäytetty-tilaan (STOPPED)
IF NOT RunRequest THEN
    state := STOPPING;
END_IF

IF ChargeRequest THEN
    state := CHARGE_START;
END_IF
```

```
(*****)  
  
CHARGE_START:  
  
// Latauksen aloitus, asetetaan jokin ennalta määrätty ohjearvo  
// dieselmoottorille, jolla kiihdytetään moottoria  
// ja valmistellaan se ottamaan generaattorin kuorma. Pysytään tilassa 1 s, jonka  
// jälkeen annetaan käyntikomento invertterille ja mennään lataustilaan  
  
ECU_Tref := charge_start_acc_value;  
timer1(IN:=TRUE, PT:=T#1S);  
  
IF timer1.Q THEN  
    timer1(IN:=FALSE);  
    GenINV_Run := TRUE;  
    state := CHARGE;  
  
END_IF  
  
(*****)  
  
CHARGE:  
  
// Lataustila, tässä ajetaan dieselmoottoria ja generaattoria ohjaavaa  
//lataussäätöä  
//ChargeController();  
  
IF NOT ChargeRequest OR NOT RunRequest THEN  
    state := CHARGE_END;  
  
END_IF  
  
(*****)  
  
CHARGE_END:  
  
// Latauksen lopetus, asetetaan dieselin ohje nollaksi (tyhjäkäynti) ja  
// pysäytetään invertteri  
// 2 s kuluttua siirrytään automaattisesti tyhjäkäyntitilaan (IDLE)  
  
ECU_Tref := 0;  
GenINV_Run := FALSE;  
timer1(IN:=TRUE, PT:=T#2S);  
  
IF timer1.Q THEN  
    timer1(IN:=FALSE);  
    state := IDLE;  
  
END_IF  
  
.....
```



```
(*****)  
  
// Sammutetaan moottori kytkemällä ECU:n virrat pois  
  
STOPPING:  
  
ECU_On := FALSE;  
  
state := STOPPED;  
  
(*****)  
  
// Vikatila: asetetaan järjestelmä turvalliseen tilaan  
// Sammutetaan dieselmoottori, pysäytetään invertteri, ajetaan akun akun  
// pääkontaktorit auki jos akkuvika  
  
FAULT:  
  
ECU_On := FALSE;  
  
GenINV_Run := FALSE;  
  
IF BMS_Fault THEN  
    BMS_Contactor := FALSE;  
  
END_IF  
  
END_CASE  
  
// Geneerinen tilasiirtymäehto, jolla siirrytään vikatilaan milloin tahansa kun jokin  
komponentti ilmoittaa viasta  
  
IF ECU_Fault OR GenINV_Fault OR BMS_Fault THEN  
    state := FAULT;  
  
END IF
```

8 Latausinfrastrukturi

Työpaketissa 5 laadittiin suunnitelma hybridisoidun apualuksen tarvitsemasta latausinfrastruktuurista sekä mahdollisesta puhtaan polttoaineen jakelujärjestelmästä Vuoksen vesistöalueella. Suunnittelun lähtökohtana olivat uiton operatiiviset tarpeet: aluksen on kyettävä latautumaan tai tankkaamaan riittävän usein, jotta energiavarastot pysyvät operointiprofiilin edellyttämällä tasolla koko hinaustoimeksiannon ajan.

Suunnittelutyön ensimmäisessä vaiheessa kartoitettiin vesistöalueen nykyiset satamat, laiturit ja muut potentiaaliset tukikohdat, joihin lataus- tai tankkausinfraa olisi perusteltua sijoittaa. Vuoksen vesistö on Suomen laajin yhtenäinen sisävesijärjestelmä, ja sen varrella on useita satamia ja teollisuuslaitoksia, joihin on jo olemassa olevia sähköliittymiä. Näiden hyödyntäminen latauspisteverkostossa voi merkittävästi alentaa infrastruktuurin rakentamiskustannuksia. Uiton operaatioiden kannalta erityisen relevantteja sijainteja ovat puutavaran pudotuspaikat, joissa alus joka tapauksessa viipyy lastauksen tai odotuksen aikana — nämä pisteet tarjoavat luontevan mahdollisuuden väli- tai täydennyslataukseen ilman ylimääräisiä aikaviiveitä operaatioihin.

Avoimen veden työsyklin mukaan aluksen keskinopeus on noin 1.86 solmua ja energiakulutus noin 46 kWh. Sykli kestää 4 tuntia. Muutetaan solmut kilometriä tunnissa:

$$v_{km/h} = 1.852 \cdot v_{solmu} \approx 3.45 \text{ km/h}.$$

Lasketaan kuinka monta kertaa alus jaksaa suorittaa syklin akun koon mukaan ottaen huomioon akun varaustilan ylä- ja alarajan:

$$x = \frac{E_{akku}}{E_{sykli}} = \frac{178 \text{ kWh} \cdot 80\%}{46 \text{ kWh}} \approx 3.09.$$

Eli aluksella voidaan suorittaa sykli noin 3 kertaa, joka kääntyy noin 12 tunniksi ajoa. Tällöin voidaan ajaa:

$$s = v_{km/h} \cdot t = 3.45 \text{ km/h} \cdot 12 \text{ h} = 41.4 \text{ km}.$$

Eli oletetusti tällä syklillä, joka on aluksen perus työsykli, voidaan täyssähköisellä aluksella ajaa noin 41.4 km ennen kuin täytyy ladata.

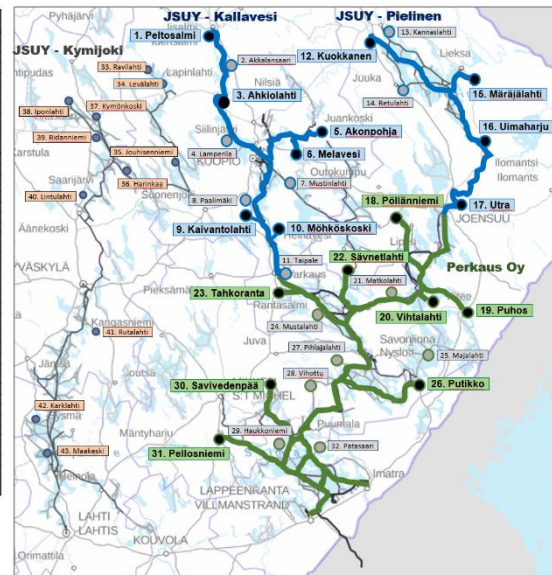


Kuva 42 esittää uiton pudotuspaikat, johon on merkitty alueet, jossa on mahdollista ladata hybridisoitua/täyssähköistettyä alusta. Kartan on toimittanut Järvi-Suomen Uittoyhdistys. Tarkempia lataustietoja ei ollut saatavilla, mutta oletuksena on, että paikoissa on tarjolla kolmivaiheisia latauspisteitä, joiden maksimi latausteho on noin 11 kW tai 22 kW (eli 3x16 A tai 3x32 A, 400 V). Täyssähköisellä aluksella latausajat olisivat erittäin pitkät, jopa 14 tuntia, joka on ongelma sillä alukset eivät pysähdy pitkiksi ajoiksi. Tämä rajoittaa täyssähköisen aluksen kannattavuutta. Mahdollista olisi myös ladata täyssähköistä alusta päähinaajasta, jossa voidaan myös säilöä ja ladata vaihtoakkuja. Akkujen paino on suuri, jolloin näitä täytyisi siirtää nosturilla apualukseen. Tämä nostaisi invenstointikustannuksia merkittävästi.

Uittoinfra 2026

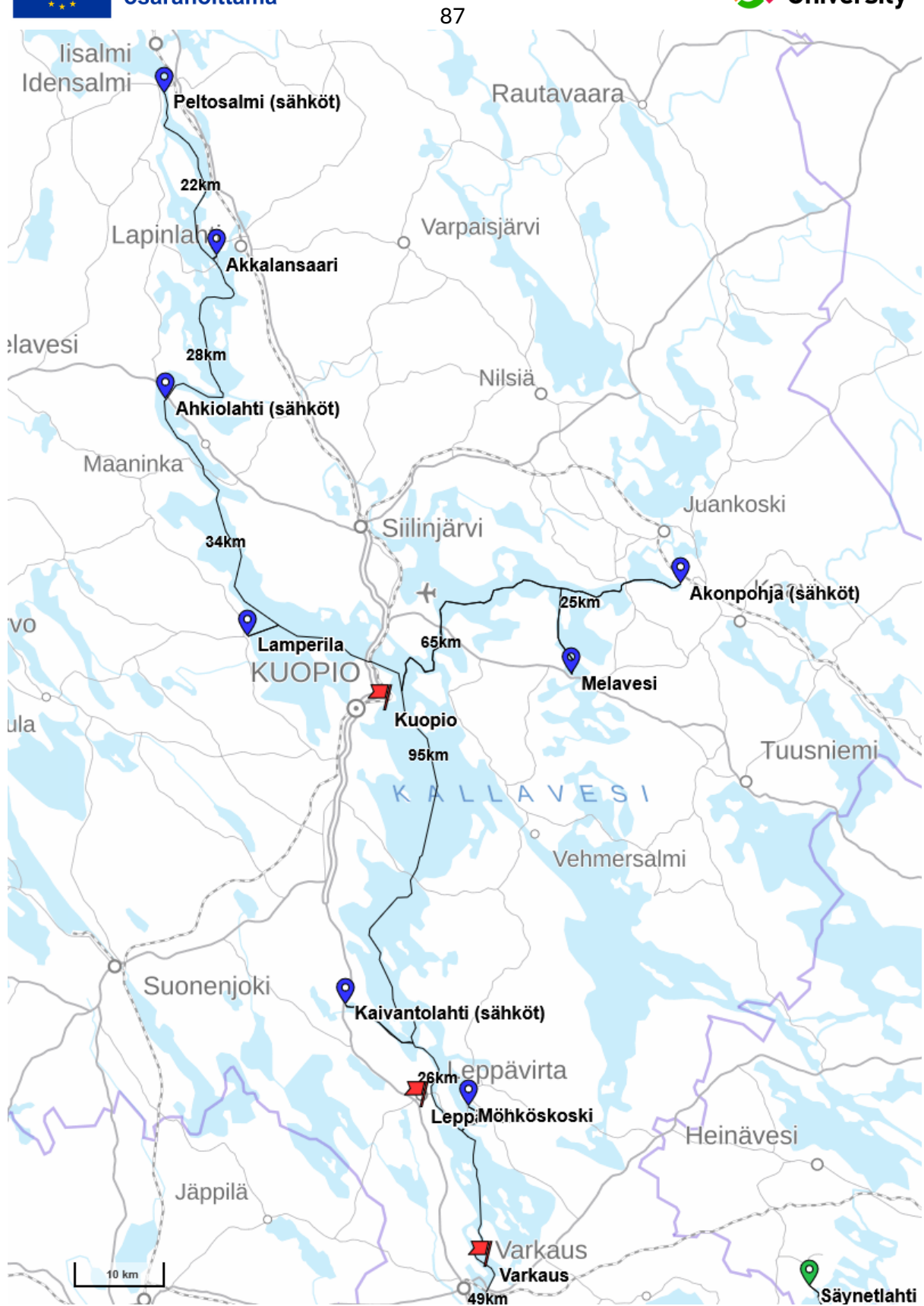


Nro	Kylä	Alue	Pöytä	Osoite	Uittopöytä	Prosessipöytä	Välikä	Tenniskapasiteetti	Vesitaso	Säätö	Rajitukset
1	JSUY	Kallavesi	Peltosaari	Kallavesi 10, Saari	X	X		7 000	15 000	X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22
2			Akkalansaari	Saarensaari 200, Lapinlahti	X	X		2 000		X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22
3			Akkalansaari	Lumme 27, Kuopio	X			28 000	49 000	X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma - pe klo 06-22 ja la 05 - 15
4			Lampela	Kuusela 30, Kuopio	X	X				X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
5			Akonpohja	Hyönteysentie 578, Kuopio	X			7 000	13 000	X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma - pe klo 06-22 ja la 05 - 15
6			Meilavesi	Akkalansaari 34, Kuopio	X	X		12 000	19 000	X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma - pe klo 06-22 ja la 05 - 15
7			Murtojärvi	Murtojärvenkatu 21, Kuopio		X				X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
8			Kallavesi	Vuorokatu 3045, Lappeenranta	X			10 000	18 000	X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma - pe klo 06-22 ja la 05 - 15
9			Paalimäki	Heikkiläntie 1, Lappeenranta				10 000	12 000	X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
10			Mohikallio	Heikkiläntie 871, Lappeenranta	X			8 000	12 000	X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
11			Talvite	Heikkiläntie 82, Varkaus	X	X				X	
12	JSUY	Pielinen	Kuokkanen	Kuokkanenkatu 15, Turku	X			15 000	20 000	X	Tonnissa saatu alkuun klo 07-18
13			Kuusela	Kuusela 4, Turku	X			10 000		X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma-pe klo 06-22. Tyhjennetään kuukausittain harjoitusta 15.6. mennessä
14			Reinlahti	Ympäriä 17, Lappeenranta	X			15 000		X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu alkuun klo 06-22
15			Mäntylä	Ympäriä 1207, Joroinen	X	X		8 000		X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
16			Uimaharju	Kuokkanenkatu 15, Turku	X			15 000	16 000	X	Tonnissa saatu alkuun klo 06-22
17			Utra	Kuokkanenkatu 15, Turku	X	X		20 000	25 000	X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
18	Pöy	Saimaa	Pöllänselä	Pöllänselä 37, Liperi	X	X		2 000	25 000	X	Tonnissa saatu ma - la klo 06-22 (JSUY:n alus)
19			Puolka	Kuusela 30, Kuopio	X			15 000	21 000	X	
20			Vähälahti	Oivonkatu 714, Savonlinna	X			9 000		X	
21			Markkola	Heikkiläntie 145, Enontekiö	X			1 000			
22			Savonlahti	Savonlahti 25, Mänttä	X			14 400			
23			Tahkoranta	Tahkoranta 71, Joroinen	X	X		12 000		X	15.6 - 31.8. välisenä aikana toiminta saatu ma - pe klo 06-22 ja la 05 - 15
24			Murtojärvi	Kuusela 4, Turku	X			3 000			
25			Mäntylä	Heikkiläntie 871, Lappeenranta	X			6 000	15 000		
26			Puolka	Kuusela 30, Kuopio	X			1 000			
27			Pihajärvi	Kuusela 30, Kuopio	X			1 000			
28			Vähälahti	Oivonkatu 714, Savonlinna	X			2 000	10 000		
29			Haikkola	Heikkiläntie 157, Puumala	X	X		2 000	10 000		
30			Savonlahti	Savonlahti 25, Mänttä	X			2 000	10 000		
31	JSUY	Kymijoki	Peltosaari	Kallavesi 10, Saari	X			7 000	15 000	X	Saatu alkuun 07-18. Toiminta alkuun 07-18. Toiminta alkuun 07-18. Toiminta alkuun 07-18.
32			Levulahti	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
33			Jouhelahti	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
34			Häikkola	Heikkiläntie 871, Lappeenranta	X			10 000			
35			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
36			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
37			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
38			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
39			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
40			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
41			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
42			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
43			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
44			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
45			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
46			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
47			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
48			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
49			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
50			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
51			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
52			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
53			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
54			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
55			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
56			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
57			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
58			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
59			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
60			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
61			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
62			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
63			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
64			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
65			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
66			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
67			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
68			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
69			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
70			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
71			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
72			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
73			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
74			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
75			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
76			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
77			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
78			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
79			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
80			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
81			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
82			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
83			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
84			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
85			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
86			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
87			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
88			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
89			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
90			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
91			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
92			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
93			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
94			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
95			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
96			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
97			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
98			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
99			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			
100			Kuusela	Kuusela 30, Kuopio	X			10 000			



Kuva 42. Uiton pudotuspaikat, jossa on merkitty mahdolliset latauspaikat.

Kuva 43 esittää Kallaveden alueen uittoreitin tarkemmin, johon on lisätty mahdolliset latauspisteet. Kallaveden alueella uittoalukset voivat joutua liikkumaan jopa 100 km uittopaikkojen välillä. Ylimääräisiä latauspaikkoja löytyy kuitenkin Kuopiosta, Leppävirralta ja Varkaudesta, kun jatketaan Tahkorantaan päin. Nämä ylimääräiset latauspaikat ovat merkitty karttaan punaisella lipulla.



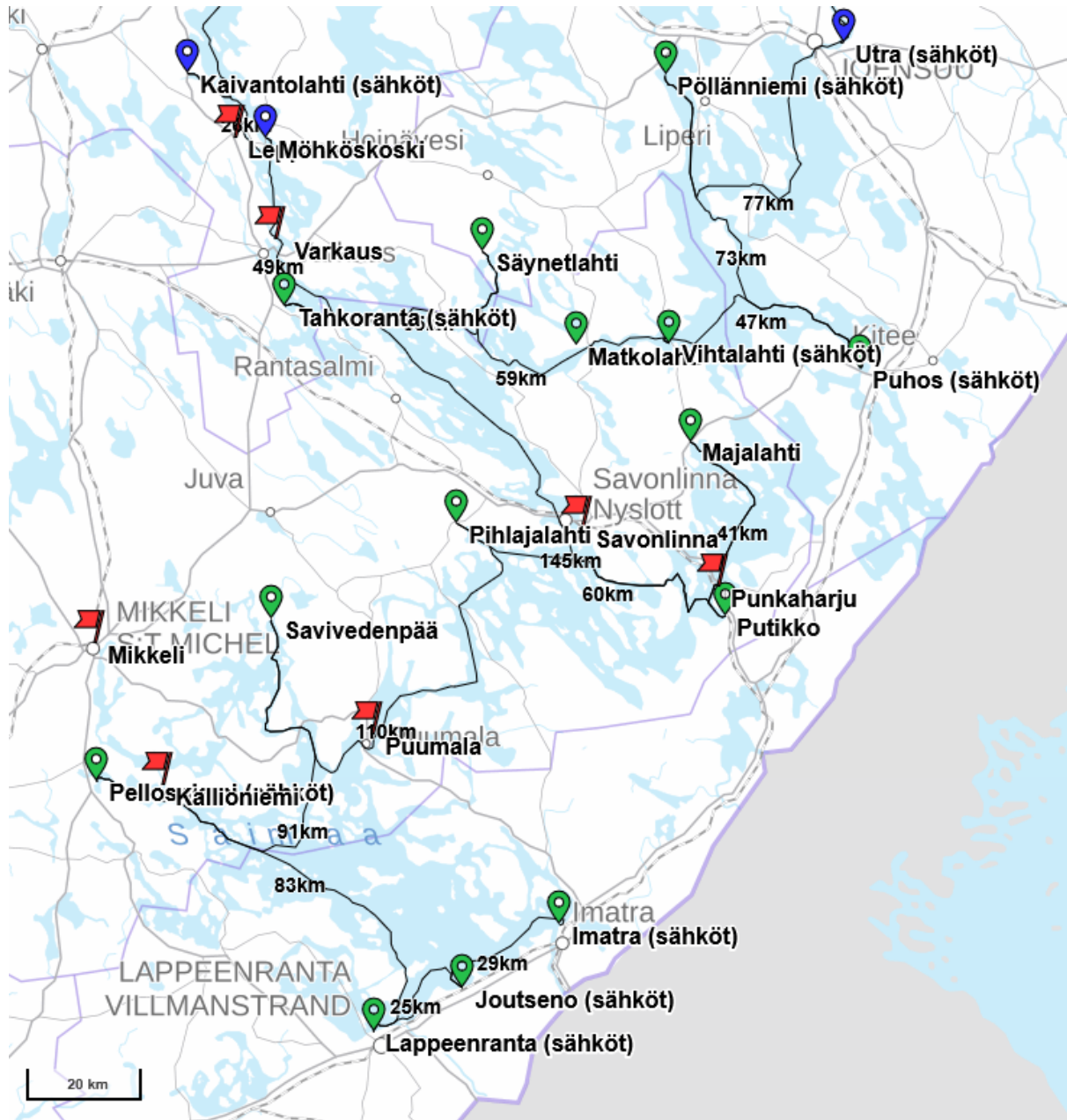
Kuva 43. Kallaveden alueen uittoreitti.

Kuva 44 esittää Pielisen alueen uittoreitin tarkemmin, johon on lisätty mahdolliset latauspisteet. Pielisen alueella maksimietäisyydet latauspisteiden välillä on noin samat. Tällä reitillä ei löydy muita latausvaihtoehtoja, kuin uittoinfrassa ilmoitetut paikat.



Kuva 44. Pielisen alueen uittoreitti.

Kuva 45 esittää Tasavesi-Saimaa alueen uittoreitin tarkemmin, johon on lisätty mahdolliset latauspisteet. Saimaan alueella uittoetäisyydet ovat pitkät, mutta latausvaihtoehtoja löytyy matkan varrelta. Esimerkiksi Savonlinnasta, Punkaharjulta ja Puumalasta. Myös Mikkelissä on saatavilla CCS2-pikalaturit, jossa latausteho vaihtelee noin 60 - 180 kW välillä.



Kuva 45. Tasavesi-Saimaa alueen uittoreitti.



9 Ehdotukset aluksen hybriditopologian toteutukseksi

Kappaleessa käydään läpi aluksen hybriditopologian toteutus listaamalla saatavilla olevat komponenttikoot, sekä mallintamalla aluksen konehuone, johon nämä komponentit lisätään topologian mukaisesti. Tarkoituksena on ottaa huomioon aluksen fyysinen koko osana suunnittelua, jolloin saadaan suuntaa antava hahmotelma hybridisoidun aluksen konehuoneesta.

Taulukossa (Taulukko 16) on esitetty eri topologioiden pääkomponenttivalinnat, sekä niiden pääominaisuudet. Sarjahybridissä ehdotetaan kahta erilaista sähkömoottoria, jossa toisessa on pienempi pyörimisnopeus ja suurempi vääntö. Tällöin nopeutta alentavaa vaihdelaatikkoa ei tarvita. Samaa sähkömoottoria ehdotetaan täyssähköiseen alukseen. Akun volumetriseksi energiatiheudeksi on arvioitu 300 Wh/L ja ominaisenergiatiheydeksi 140 Wh/kg.

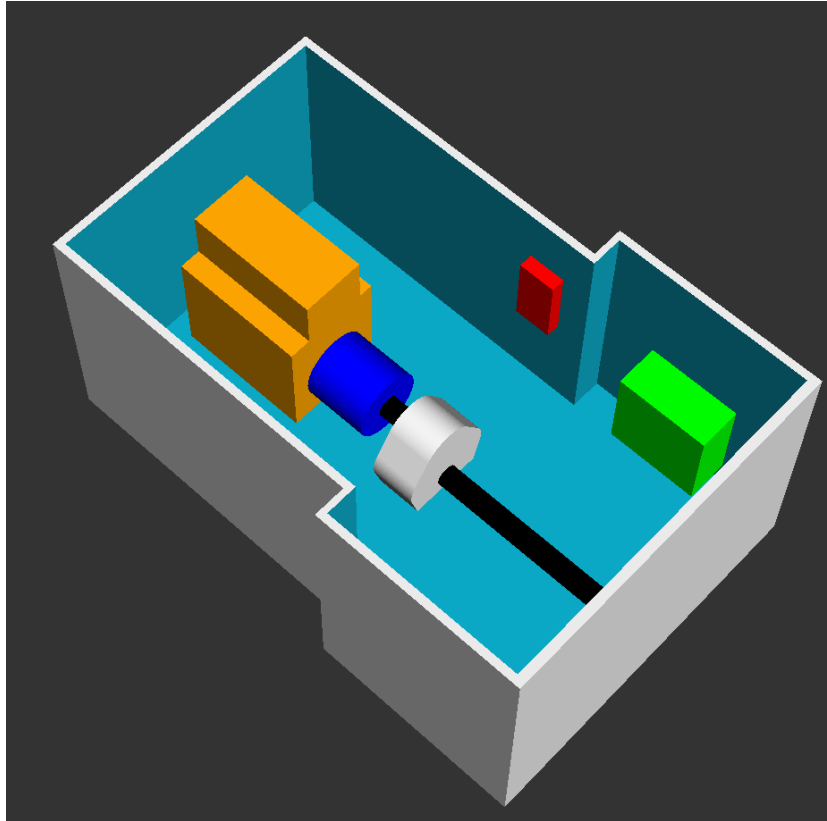
Taulukko 16. Topologioiden pääkomponenttivalinnat.

	Diesel	Sarja 1	Sarja 2 (hitaampi SM)	Rinnakkais	Täyssähkö (hitaampi SM)
Dieselmoottorin malli	AGCO POWER CTIM 66-4V	Solé SK-60	Solé SK-60	AGCO POWER 49HD	-
Dieselmoottorin nimellisteho (kW)	192	44	44	133	-
Dieselmoottorin nimellisvääntö (Nm)	910	160	160	675	-
Dieselmoottorin nimellisnopeus (rpm)	2200	1800	1800	1500	-
Dieselmoottorin mitat (L x W x H (mm))	1510 x 700 x 960	939 x 575 x 653	939 x 575 x 653	895 x 656 x 1100	-
Sähkömoottorin malli	-	Danfoss EM- PMI375-T800- 1900	Danfoss EM- PMI540- T2000-700	Danfoss EM- PMI375-T800- 900	Danfoss EM- PMI540- T2000-700
Sähkömoottorin nimellisteho (kW)	-	187	199	86	199



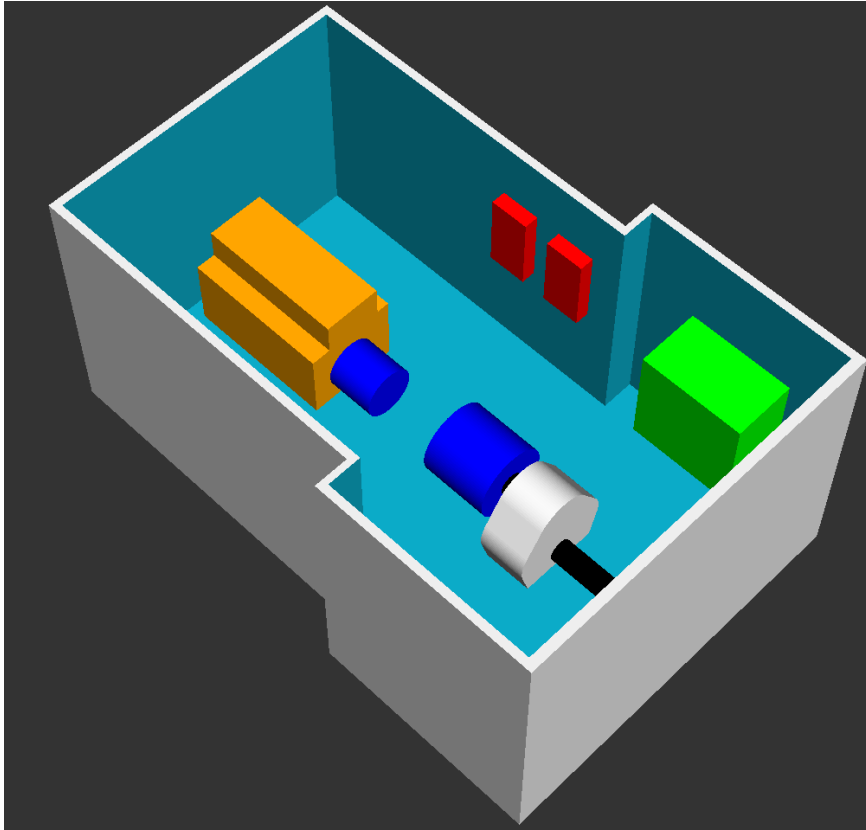
Sähkömoottorin nimellistäntö (Nm)	-	938	2716	895	2716
Sähkömoottorin nimellisaopeus (rpm)	-	1900	700	1800	700
Sähkömoottorin mitat (D x W (mm))	-	450 x 428	648 x 598	450 x 428	648 x 598
Generaattorin malli	-	Danfoss EM- PMI240-T180- 2200	Danfoss EM- PMI240- T180-2200	-	-
Generaattorin nimellisteho (kW)	-	48	48	-	-
Generaattorin nimellistäntö (Nm)	-	210	210	-	-
Generaattorin nimellisaopeus (rpm)	-	2200	2200	-	-
Generaattorin mitat (D x W (mm))	-	317 x 305	317 x 305	-	-
Akun tyyppi	-	LFP	LFP	LFP	LFP
Akun kapasiteetti (kWh)	-	50	50	30	178
Akun paino (kg)	-	357	357	214	1214
Akun tilavuus (L)	-	167	167	100	593

Kuvassa (Kuva 46) on esitetty rinnakkaishybridivoimalinjan toteutus aluksen konehuoneeseen. Dieselmoottoriin (oranssi) on kytketty läpiakselinen sähkömoottori/-generaattori (sininen), joka on sitten kytketty merivaihteeseen (valkoinen). Invertteri (punainen) on asetettu seinälle lähelle sähkömoottori/generaattoria, jolloin moottorikaapelit pysyvät mahdollisimman lyhyinä. Akkupaketti (vihreä) on sijoitettu invertterin lähelle aluksen oikealle laidalle. Jos dieselmoottorin polttoainetankki on vasemmalla laidalla, akuston kallistusvaikutus kompensoituu.

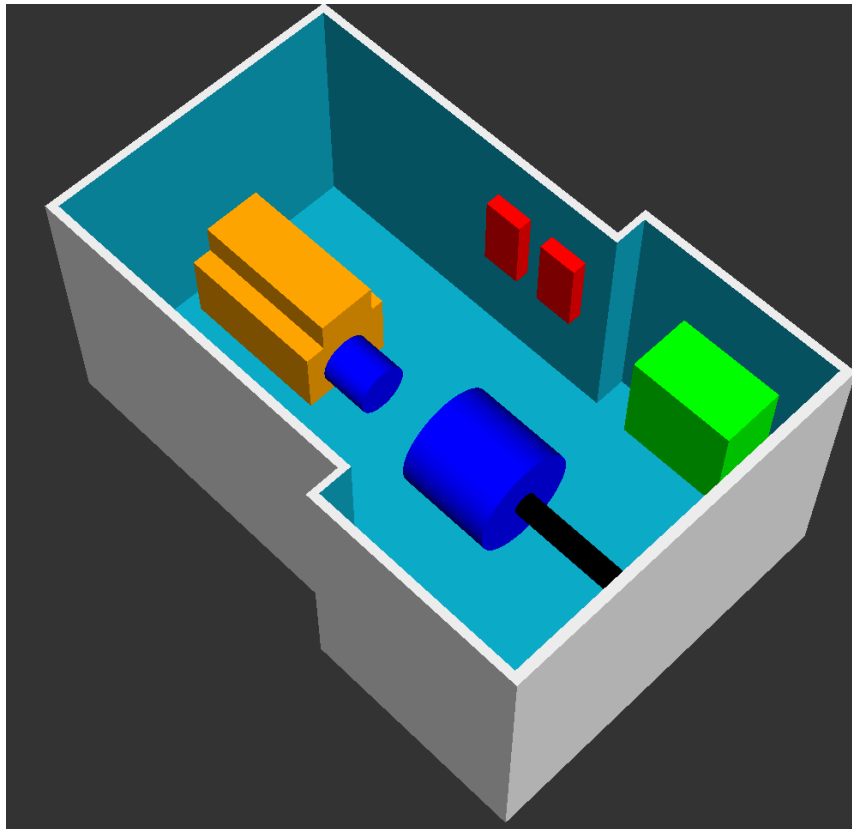


Kuva 46. Rinnakkaishybridin hahmotelma aluksen konehuoneeseen läpiakselitoteutuksella.

Seuraavissa kahdessa kuvassa (Kuva 47) ja (Kuva 48) on esitetty sarjahybridin toteutus aluksen konehuoneeseen. Ensimmäinen kuva (Kuva 47) kuvastaa vaihtoehtoa, jossa pidetään alennusvaihte. Dieselmoottori on kytketty generaattoriin ja siitä ei ole mekaanista yhteyttä potkuriakseliin. Sähkämoottorin akseli kytkeytyy merivaihteeseen, jonka kautta se pyörittää potkuria. Sarjahybridiratkaisussa dieselmoottori voi olla pienempitehoinen kuin rinnakkaishybridissä, jolloin se vie vähemmän tilaa, mutta taas akkupaketti ja toinen invertteri vievät enemmän tilaa. Toinen kuva (Kuva 48) kuvastaa vaihtoehtoa, jossa on hitaampi sähkämoottori, jolloin merivaihdetta ei tarvita. Rakenne on muuten identtinen. Tällöin sähkämoottorin on kyettävä tuottamaan enemmän vääntömomenttia, jolloin se on kooltaan suurempi kuin vähemmän vääntömomenttia tuottava vaihteistoon liitetty versio.

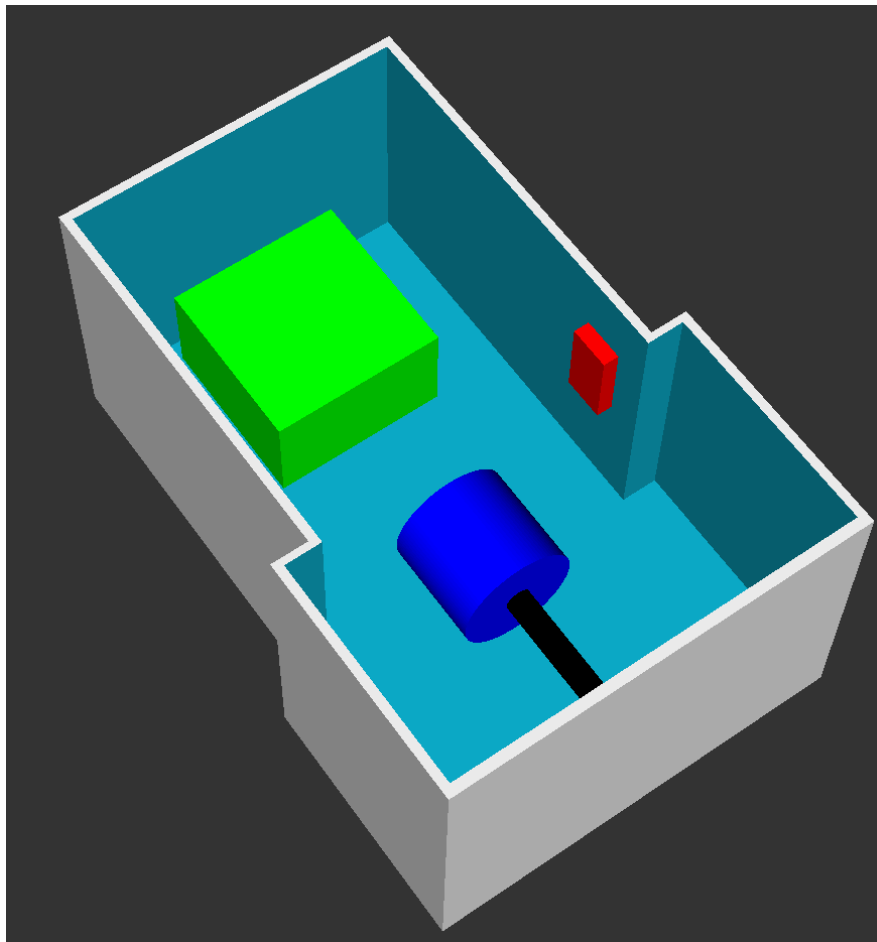


Kuva 47. Sarjahybridin hahmotelma aluksen konehuoneeseen.



Kuva 48. Sarjahybridin hahmotelma aluksen konehuoneeseen hitaammalla sähkömoottorilla.

Kuvassa (Kuva 49) on esitetty täyssähköisen aluksen hahmotelma aluksen konehuoneeseen. Akkupaketti on sijoitettu konehuoneen etuosaan, jolloin se on aluksen keskellä ja pitää aluksen painopisteen mahdollisimman keskellä. Kuvasta huomataan, että akkupaketti on erittäin suuri. Tosin tämä ratkaisu on hiljaisin vaihtoehto, joka lisää käyttömukavuutta.



Kuva 49. Täyssähköisen aluksen hahmotelma aluksen konehuoneeseen.

Yhteenvetona kuvista voidaan todeta, että hybridisoidun aluksen komponentit esitetyillä konfiguraatioilla mahtuvat hyvin konehuoneeseen. Rinnakkaishybridi läpiakselisella sähkömoottorilla on tilankäytön kannalta optimaalisin ratkaisu. Täyssähköisen aluksen komponentit vaativat eniten tilaa ja ovat massaltaan suurempia kuin hybridivaihtoehtojen. Tämä johtuu pääsääntöisesti hitaan sähkökoneen suuresta koosta, sekä akkupaketin kapasiteetista.

10 Monikäyttömahdollisuudet

Kappaleessa käydään läpi työpaketin 6 sisältö, eli uiton apualuksen monikäyttömahdollisuudet. Vaikka hybridisoitu/täyssähköistetty apualus on suunniteltu pääsääntöisesti avustamaan hinaajaa tukkilautan kuljetuksessa, voidaan sitä potentiaalisesti hyödyntää muissa sovelluksissa.

Hybridisoitu apualus on mitoitettu uiton operointiprofiilien mukaan, ja se toimii pääsääntöisesti matalilla tehoilla ja pystyy toimimaan suurilla tehovaatimuksilla useita minuutteja. Fyysisesti alus on noin 12 metriä pitkä, noin 3 metriä leveä ja syväystä on noin 2 metriä. Runko on rakennettu kestäväksi, ja aluksen potkuri on suojattu häkillä ja tunnelilla, jolloin aluksella voi toimia matalassakin vedessä ilman suurempaa huolta potkurin ja peräsimen vahingoittumisesta. Aluksen huippunopeus on noin 7 solmua.

Koska hybridisoitu apualus on mitoitettu pääsääntöisesti sulutuksen operointiprofiilin mukaan suuren energiatarpeen takia, voidaan alusta käyttää erilaisiin hinaustarpeisiin.



Kuva 50. Kuva tutkimuksessa käytetystä uiton apualuksesta "Karviosta" (Kuva: Jan-Henri Montonen).

Hybridisoidun apualuksen tekniset ominaisuudet — kestävä runko, suojattu potkuri, matala syväys ja riittävä hinausteho — tekevät siitä potentiaalisesti arvokkaan alustan myös viranomaiskäyttöön normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa.



Pelastuslaitos ja meripelastus

Apualuksen matalasyväyksisyys ja potkurisuojaus mahdollistavat toiminnan vesistöjen matalissa ja vaikeakulkuisissa osissa, joihin kaikki pelastusalukset eivät pääse. Hinauskyky soveltuu ajelehtivien veneiden, lauttojen tai muiden kelluvien rakenteiden siirtelyyn.

Meripelastuksen kannalta alus soveltuu parhaiten sisävesille. Sen huippunopeus, noin seitsemän solmua, rajoittaa käytettävyyttä laajoilla järviolueilla. Alus ei voi toimia nopeaa vastetta tarvitsevissa tehtävissä, mutta sen sijaan alus voi toimia ei-kiireellisissä tehtävissä avustavana aluksena. Tällaisia ovat mm. muiden alusten hinaustehtävät, proomun työntö, kokoisekseen suuren paaluvetokykynsä ja suojatun potkurin ansiosta alus soveltuu myös hyvin karille ajaneiden alusten irrottamiseen.

Puolustusvoimat

Puolustusvoimien näkökulmasta sisävesien logistinen kapasiteetti on strategisesti merkittävä tekijä, joka usein aliarvioidaan. Laajan turvallisuuskriisin tai sotatilan skenaariossa vesistöinfrastruktuurin merkitys korostuu erityisesti tilanteissa, joissa maantieverkko on kuormittunut, vaurioitunut tai vihollisen vaikutuksen alainen. Sisävesireitit tarjoavat vaihtoehtoisia huoltolinjoja, ja pienehköt monitoimialukset soveltuvat näihin yhteyksiin suuria aluksia paremmin. Hybridisoidulla apualuksella olisi potentiaalia tukea joukkojen tai materiaalin siirtoa vesistöreiteillä, jotka muuten ovat vaikeasti saavutettavissa. Aluksella voisi työntää pientä proomua ja käyttää sitä kuljettamaan kalustoa tai henkilöstöä vesireittejä myöten. Aluksen kyky toimia matalassa vedessä laajentaa sen käyttökelpoista toiminta-aluetta huomattavasti verrattuna syvemmän syväyksen aluksiin.

Kiinnostavaa on myös aluksen hybridivoimajärjestelmän tuoma operatiivinen hiljaisuus: sähkötoiminnassa alus tuottaa huomattavasti vähemmän akustista ja lämpösignaalia kuin perinteinen dieselkäyttöinen alus. Tämä on relevantti ominaisuus tilanteissa, joissa tiedustelualtistusta halutaan rajoittaa. Lisäksi täyssähköisen aluksen polttoaineriippumattomuus voi olla etu huoltovarmuutta ajatellen häiriötilanteiden aikana, kun polttoainelogistiikka saattaa olla katkonaista.



Hybridijärjestelmä lisää resilienssiä: jos akkujärjestelmä tai polttomoottorikoneisto vaurioituu, alus voi toimia vähintään rajoitetusti jäljellä olevalla voimajärjestelmällä, hybriditopologiasta riippuen.

Kokonaisuutena, hybridisoidulla apualuksella on jonkin verran kaksikäyttöpotentiaalia. Uiton tarpeisiin mitoitettu alus pystyy tukemaan useiden viranomaisten omia aluksia sisävesillä. Normaalitilanteessa viranomaisilla on varmasti tarvittava kalusto eri tehtäviä ja ympäristöjä varten, mutta sodan tai muun laajamittaisemman kriisin tapauksessa tarvitaan lisää aluksia tukemaan puolustusvoimien operatiivista toimintaa sisävesialueilla.

11 Johtopäätökset

Tämän tutkimusraportin tavoitteena oli laatia tekninen ratkaisumalli vähäpäästöiselle tulevaisuuden uiton apualukselle. Tutkimusraportissa käytyjen tulosten pohjalta voidaan päätyä johtopäätökseen, että uiton apualuksen hybridisointi sarjahybriditopologialla käyttäen dieselgeneraattoria biodieselillä ja akustoa voimalähteenä on lähitulevaisuuden kannalta kannattavin ratkaisu. Tätä väitettä vahvistavat energialähteiden kartoitukset, komponenttien saatavuudet sekä mittaus- ja simulaatiotulokset.

Energialähteiden kartoituksesta saatiin selville, että uusiutuva biodiesel ja litium - pohjainen akusto on tulevaisuuden kannalta halvin ja helpoin tapa vähentää päästöjä apualuksessa. Tämä tosin nähdään väliaikaisena ratkaisuna etenkin biodieselin osalta. Vetyä voitaisiin käyttää polttokennon kanssa, mutta polttokennojen tehokkuus, vedyn hinta mukaan lukien vedyn säiliöiden hinnat ja puutteellinen infrastruktuuri ei tehnyt siitä kestävä ratkaisua. E-polttoaineita on myös niukasti saatavilla, eikä tulevaisuuden saatavuudesta ole varmuutta.

Komponenttien saatavuudesta saatiin selville, että sarjahybridiin dieselgeneraattoreita on saatavilla apualuksen keskitehon kokoluokkaan hyvin. Rinnakkaishybridiin PTI/PTO vaihdelaatikkoja ei ollut kaupallisesti saatavilla, joka rajoitti rinnakkaishybridisoidun apualuksen kannattavuutta. Komponenttien hintoja nostavat viralliset meristandardit, joka tekee esimerkiksi akustojen hinnoista huomattavasti suuremmat.

Mittauksista saatiin selville, että aluksen keskiteho on pieni. Tämä johtuu siitä, että alus pääsääntöisesti seuraa hinaajaa matalalla nopeudella. Tehopiikkejä esiintyy nopeuden noustessa tai lautan työnnössä. Simulaatiotuloksissa saatiin selville, että hybridisoitu apualus vähentää päästöjä avoimen veden liikkumisella huomattavasti, jolloin teho pysyi suhteellisen matalana. Tällöin operointikustannukset laskivat myös huomattavasti, jopa 22% sarjahybridissä ja 30% rinnakkaishybridissä. Mutta sulutuksessa tämä päästöjen vähennys oli minimaalinen sarjahybridissä, jossa vähennys oli 3%, kun taas rinnakkaishybridissä se oli merkittävämpi jossa vähennys oli 17%. Toisaalta tämä apualus sulutti harvoin, jolloin sen vaikutus koko vuoden polttoainekulutukseen on pieni.



Sähköisellä aluksella voidaan tehdä huomattavasti energiatehokkaampi ratkaisu, joka olisi jopa 69% energiatehokkaampi, mutta täyssähköisen aluksen investointikustannukset ovat suuret pääsääntöisesti akuston koon takia.

Työssä esitettiin automaatiokonsepti, jolla voidaan toteuttaa työssä esitettyjen sarja- ja rinnakkaishybridivoimalinjojen ohjaus. Konsepti koostuu tarvittavasta laitteistosta, niiden välisistä yhteyksistä ja ohjelmaesimerkistä. Järjestelmän pääohjainlaitteena toimivassa ohjelmoitavassa logiikassa voidaan suorittaa työssä esitettyjä hybridijärjestelmän säätöstrategioita. Tämän lisäksi ohjelmoitava logiikka kommunikoi aluksen laitteiden kanssa sekä välittää tietoa aluksen kapteenille ja lukee tietoa kapteenin IO:sta.

Latausinfrastruktuurissa todettiin puutteellisuutta, jolloin täyssähköisen aluksen kannattavuus laski. Lisäksi aluksen pitkien latausaikojen, akuston hintojen ja uittoalusten vähäisten pysähdysaikojen takia täyssähköinen alus koettiin ei kannattavaksi lähitulevaisuudessa. Ratkaisuna olisi nostaa akun kapasiteettia merkittävästi tai varustaa päähinaaja apualuksen vaihtoakuilla, mutta tällöin kokonaiskustannukset nousevat ja akun latausajat pidentyisivät.

Työssä tarkasteltiin myös uiton hybridisoidun tai täyssähköisen apualuksen monikäyttömahdollisuuksia. Vaikka alus on suunniteltu ensisijaisesti tukkilauttojen uiton avustamiseen, sen tekniset ominaisuudet – kestävä runko, matala syväys, suojattu potkuri ja hyvä hinausteho – mahdollistavat käytön myös muissa tehtävissä. Alus soveltuu erityisesti sisävesien hinaustehtäviin, pelastus- ja meripelastustoiminnan avustamiseen sekä viranomaisten käyttöön häiriö- ja poikkeusoloissa. Puolustusvoimille alus voisi tarjota lisäkapasiteettia joukkojen ja materiaalin kuljetuksiin matalissa vesistöissä sekä hyötyä hybridivoimajärjestelmän hiljaisuudesta, pienemmästä polttoaineriippuvuudesta ja toimintavarmuudesta. Vaikka alus ei korvaa viranomaisten varsinaista kalustoa, sillä on merkittävää kaksikäyttöpotentiaalia erityisesti laajamittaisissa kriisitilanteissa ja sisävesien logistisen tuen vahvistamisessa.

Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää suunniteltaessa uusia uiton apualuksia. Tutkimuksen tuloksia voivat hyödyntää uiton eri toimijat. Työn tulokset ovat sovellettavissa myös muihin samaa kokoluokkaa oleviin aluksiin.

Lähdeluettelo

Akal, D., Öztuna, S. and Büyükakın, M. K. (2020), 'A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-lpg-diesel) from combustion performance aspect', *International Journal of Hydrogen Energy* 45(60), 35257–35268. 4th International HYDROGEN TECHNOLOGIES Congress.

Altosole, M., Balsamo, F., Bove, A., Campora, U., Ianniello, N. and Vitiello, L. (2023), Progress in marine hybrid propulsion drive systems, in '2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)', pp. 1–6.

Basma, H. and Rodríguez, F. (2023), 'A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe', *INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION*.

Bianchi, N., Bolognani, S., Carraro, E., Castiello, M. and Fornasiero, E. (2016), 'Electric vehicle traction based on synchronous reluctance motors', *IEEE Transactions on Industry Applications* 52(6), 4762–4769.

N. Bianchi, E. Fornasiero, M. Ferrari and M. Castiello, "Experimental Comparison of PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 163-171, Jan.-Feb. 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2466623.

D'Adamo, I., Gastaldi, M., Giannini, M. and Nizami, A.-S. (2024), 'Environmental implications and levelized cost analysis of e-fuel production under photovoltaic energy, direct aircapture, and hydrogen', *Environmental Research* 246, 118163.

DNV (2016), *DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems* [online], saatavilla: https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/DNV-GL_2016-Handbook-maritime-offshore-battery-systems-report.pdf.

DNV GL (2019), *Comparison of Alternative Marine Fuels* [online]. available: https://sealng.org/wp-content/uploads/2019/09/19-09-16_Alternative-Marine-Fuels-Study-final-report.pdf.



Epec Engineered Technologies (n.d.), Battery Cell Comparison [online], saatavilla: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>.

European Hydrogen Observatory (2023), Cost of hydrogen production [online], saatavilla: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production>.

Furch, J., Krobot, Z., Konečný, V. and Stodola, J. (2022), Advantages and disadvantages of common used fuels for passenger cars, in '2022 International Conference on Electrical Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)', pp. 1–6.

Haiyang Zhang, Maydison, Heejin Kang, Yun-Ho Kim, Jaewon Jang, Zhiqiang Han, Daekyun Oh, Effective energy density in small vessels: a comparative study of diesel engines and battery electric propulsion systems, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 17, 2025, 100681, ISSN 2092-6782, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100681>.

Hüllein, A. S. and Utne, I. B. (2024), Total cost of ownership of decarbonized power and propulsion systems for coastal fishing vessels, in 'OCEANS 2024 - Halifax', pp. 1–7.

IEA (2023a), Global hydrogen review 2023 [online], saatavilla: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>.

IEA (2023b), IEA, Renewables 2023 [online], saatavilla: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.

International Maritime Organization (2017), Imo's work to cut ghg emissions from ships [online], saatavilla: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>.

Järvi-Suomen Uittoyhdistys (2023), Mitä uitto on? [online], saatavilla: <https://uittoyhdistys.fi/>.

Koričan, M., Vladimir, N., Haramina, T., Vučković, K. and Alujević, N. (2023), Applicability of hybrid power systems for fishing vessels, in '2023 IEEE International Conference on



Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)', pp. 1–6.

Lana, A., Tikkanen, K., Lindh, T., Partanen, J., Control of directly connected energy storage in diesel electric vessel drives, Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, 2012.

MAN Energy Solutions (2021), Shaft generators for low speed main engines [online], saatavilla: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_14.

Menon, N. V. and Siew Hwa, C. (2022), Hydrogen as a source of green energy for marine applications, in '2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)', pp. 22–26.

Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A. and Yokochi, A. (2019), 'Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements', Energies 12(6).

Millinger, M., Tafarte, P., Jordan, M., Meisel, K. and Thrän, D. (2022), Electrofuels from excess renewable electricity: costs, emissions, carbon use, in '2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM)', pp. 1–6.

Moldrik, P. and Chvalek, R. (2011), PEM fuel cells — the basic characteristics, in '2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering', pp. 1–4.

Müller, V. P., Riemer, M. and Eckstein, J. (2024), Are carbon-based e-fuels a viable path to decarbonization? - a critical comparison of global supply and demand, in '2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)', pp. 1–7.

Onorati, A., Payri, R., Vaglieco, B., Agarwal, A., Bae, C., Bruneaux, G., Canakci, M., Gavaises, M., Günther, M., Hasse, C., Kokjohn, S., Kong, S.-C., Moriyoshi, Y., Novella, R., Pesyridis, A., Reitz, R., Ryan, T., Wagner, R. and Zhao, H. (2022), 'The role of hydrogen for future internal combustion engines', International Journal of Engine Research 23(4), 529–540.



Orangi, S., Manjong, N., Clos, D. P., Usai, L., Burheim, O. S. and Strømman, A. H. (2024), 'Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective', *Journal of Energy Storage* 76, 109800.

Pyrhönen, J., Hrabovcová, V., & Semken, R. S. (2016). *Electrical machine drives control : an introduction*. John Wiley & Sons, Inc.

Rosli, R., Majlan, E., Wan Daud, W. and Hamid, S. (2012), Hydrogen rate manipulation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack using feedback control system, in '2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)', pp. 553–557.

Saba, S. M., Müller, M., Robinius, M. and Stolten, D. (2018), 'The investment costs of electrolysis – a comparison of cost studies from the past 30 years', *International Journal of Hydrogen Energy* 43(3), 1209–1223.

Sagin, S. V., Sagin, S. S., Fomin, O., Gaichenia, O., Zablotskyi, Y., Píštěk, V. and Kučera, P. (2024), 'Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport', *Renewable Energy* 224, 120221.

saVRee (n.d.), Controllable Pitch Propeller (CPP) [online], saatavilla: <https://www.savree.com/en/encyclopedia/controllable-pitch-propeller-cpp>.

Shabbir, W. and Evangelou, S. A. (2016), 'Exclusive operation strategy for the supervisory control of series hybrid electric vehicles', *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 24(6), 2190–2198.

Sheikh Aamir Farooq, Syed Haris Iftikhar, Jafar Albinmousa, A comprehensive review of hydrogen storage pressure vessels: Materials, fabrication, performance, testing procedures, and modelling approaches, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 224, 2026, 154376, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.154376>.

SIEMENS (2024), How does a controllable pitch propeller (CPP) work? [online], saatavilla: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/controllable-pitch-propeller-works/>.

Skeleton Technologies (2025), yksityinen keskustelu 1.4.2025.



Sustainable ships (2024), Cost overview - batteries [online], saatavilla:
<https://www.sustainable-ships.org/key-insights/costs-batteries>.

Tupitsina, A., Montonen, J.-H., Alho, J., Immonen, P., Lauren, M., Lindh, P. and Lindh, T. (2021), Simulation tool for dimensioning power train of hybrid working machine, in 'Modeling, Identification and Control', p. 143–158.

U.S Department of energy (n.d.a), Hydrogen Storage [online], available:
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.

Verhelst, S., Wallner, T., Eichlseder, H., Naganuma, K., Gerbig, F., Boyer, B. and Tanno, S. (2012), 'Electricity powering combustion: Hydrogen engines', Proceedings of the IEEE 100(2), 427–439.

Volvo Penta (2023), Volvo Penta powers hydrogen ferry [online], saatavilla:
<https://www.volvopenta.com/about-us/news-page/2023/jun/volvo-penta-and-cmb-tech-collaborate-to-power-the-worlds-first-hydrogen-fueled-commercial-ferry/>.

Witcover, J. and Williams, R. B. (2020), 'Comparison of "advanced" biofuel cost estimates: Trends during rollout of low carbon fuel policies', Transportation Research Part D: Transport and Environment 79, 102211.