



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Iiro Murto-Koivisto

# **Akseligeneraattorin soveltuvuus eräissä dieselmekaanisissa alustyypeissä**

Kestomagneettiakseligeneraattorin lisäedut

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Kandidaatin tutkinto  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	liro Murto-Koivisto		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Akseligenaattorin soveltuvuus eräissä dieselmekaanisissa alustyypeissä; Kestomagneettiakseligenaattorin lisäedut		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikka		
<b>Opintosuunta:</b>	Sähkötekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Teemu Ovaska		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	30

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan akseligenaattorin toimintaa ja soveltuvuutta alustyyppien ja käyttöprofiilien kannalta. Lisäksi tarkastellaan kestomagneettiakseligenaattorin tuomia etuja ja soveltuvuutta verrattuna perinteisiin akseligenaattoreihin. Perinteisillä akseligenaattoreilla tarkoitetaan tässä työssä sähköisesti herätettyjä synkronigenaattoreita ja induktiogenaattoreita. Tarkastelu kohdistuu eräille alustyypeille, joiden propulsio yleensä perustuu dieselmekaaniseen järjestelmään.

Motivaatio aihetta kohtaan syntyi meriteollisuudessa jatkuvasti energiatehokkuudeltaan parempiin ratkaisuihin pyrkivistä säännöstelyistä ja tavoitteista. Merenkulun päästövähennystavoitteiden saavuttaminen edellyttää vähäpäästöisempien teknologioiden käyttöönottoa.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Lähdeaineistona käytetään tutkimuskirjallisuutta ja valmistajien teknisiä julkaisuja. Tarkastelun perusteella akseligenaattori soveltuu parhaiten alustyypeille, joiden käyttö pitää sisällään paljon tasaista meriajoa ja joiden sähkönkulutus meriajossa on suuri. Tämän perusteella konttialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit osoittautuvat tarkastelussa soveltuvimmiksi. Irtoalaluksilla soveltuvuuden arvioidaan olevan keskitasoa ja ro-ro-rahtialuksilla muita heikompi.

Kestomagneettiakseligenaattorin keskeisiksi lisäeduiksi todetaan parempi hyötysuhde varsinkin osakuormilla ja matalilla kierrosluvuilla. Lisäksi rakenteellinen yksinkertaisuus ja vähäisempi huollon tarve arvioidaan yleisiksi eduiksi.

Olennessa tutkielmassa tehty johtopäätös on, että perinteisen akseligenaattorin ja kestomagneettiakseligenaattorin soveltuvuus perustuu pääasiassa käyttöprofiiliin eikä pelkästään alustyyppiin. Tulokset ovat yleistasoisia, koska työ perustuu kirjallisuuskatsaukseen eikä yksittäisten alusten mittausdataan.

---

**AVAINSANAT:** Kestomagneettigenaattori, akseligenaattori, hyötysuhde, käyttöprofiili, alustyyppi

## Sisällys

1	Johdanto	5
2	Laivojen sähköntuotanto ja akseligeneraattori	7
2.1	Laivojen sähköntuotannon peruseriaatteet	7
2.2	Akseligeneraattorin toimintaperiaate	8
2.2.1	Akseligeneraattorin toimintatilat	9
3	Kestomagneettiakseligeneraattori	11
3.1	Keskeiset edut verrattuna perinteisiin akseligeneraattoriratkaisuihin	12
3.2	Keskeiset haasteet ja rajoittavat tekijät	13
4	Alustyyppien käyttöprofiilit ja soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät	15
4.1	Tarkasteluun valitut alustyyppit ja valintaperusteet	15
4.2	Akseligeneraattorin soveltuvuuden arviointikriteerit	16
4.2.1	Konttialukset	17
4.2.2	Ro-ro-rahtialukset	18
4.2.3	Irtolastialukset	19
4.2.4	Öljy- ja kemikaalitankkerit	19
5	Akseligeneraattorin soveltuvuuden arviointi	21
5.1	Akseligeneraattorin yleinen soveltuvuus alustyypeittäin	21
5.2	Tulosten tarkastelu	22
5.3	Kestomagneettiakseligeneraattorin lisäedun arviointi	22
5.3.1	Kestomagneettiakseligeneraattorin etu aluskohtaisesti	24
6	Johtopäätökset	26
	Lähteet	28

## Kuvat

Kuva 1. Laivan sähköverkon osa-alueet (Kumar & Zare, 2019, s. 9).	7
Kuva 2. Esimerkki akseligenaattorijärjestelmästä PTO-tilassa (MAN Energy Solutions, 2021).	10
Kuva 3. Esimerkki akseligenaattorijärjestelmästä PTI-tilassa (MAN Energy Solutions, 2021).	10
Kuva 4. Kestomagneettiakseligenaattori ilman akselia (Dziuba, 2022).	12
Kuva 5. Laivatyyppit ja niiden alaluokat (Rautiainen, 2024).	15
Kuva 6. Akseligenaattoriratkaisuiden hyötysuhteita (ABB, 2022).	24

## Taulukot

Taulukko 1. Eri alustyyppien tehoalueet (mukaiillen Kesonen, 2024).	17
Taulukko 2. Alustyyppien satamakäynnit vuonna 2023 (mukaiillen UNCTAD, 2024).	17
Taulukko 3. Akseligenaattorin yleinen soveltuvuus	22

## Lyhenteet

PTO	Voiman ulosotto (Power take off)
PTI	Voiman sisäänotto (Power take in)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)

## 1 Johdanto

Vihreään ja vähäpäästöiseen energiaan pyrkivä siirtymä ohjaa teknologian eri toimialoilla kohti kestävämpiä ja energiatehokkaampia ratkaisuja. Myös meriteollisuudessa pyritään jatkuvasti vähentämään polttoaineenkulutusta ja päästöjä, kuitenkin tinkimättä alusten käytettävyydestä, luotettavuudesta tai turvallisuudesta. Samalla järjestelmiltä edellytetään pitkää käyttöikää, hyvää hyötysuhdetta ja kykyä toimia useissa käyttötilanteissa.

Merenkulun rooli kansainvälisessä taloudessa on erityisen merkittävä. Tästä syystä merenkulkuun liittyvillä energiaratkaisuilla on tärkeä rooli myös isossa mittakaavassa globaalien ilmastotavoitteiden kannalta. Merenkulun energiakulutus on noin 3 % maailman kokonaisenergiakulutuksesta ja noin 10 % liikennesektorin energiakulutuksesta (International Renewable Energy Agency, n.d.). Viime vuosien aikana painetta muutokselle on antanut varsinkin ilmastotavoitteiden kiristyminen ja niihin liittyvä säätely. Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) vuonna 2023 päivitetty kasvihuonekaasustrategia asettaa tavoitteeksi kansainvälisen merenkulun hiili-intensiteetin vähentämisen vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon. Lisäksi strategian mukaan nolla- tai lähes nollapäästöisten teknologioiden, polttoaineiden ja energialähteiden osuuden tulisi olla vähintään 5 % merenkulun käyttämästä energiasta vuoteen 2030 mennessä. Pitkän aikavälin tavoitteena on saavuttaa nettonollapäästöt vuoteen 2050 mennessä tai sen tienoilla (IMO, 2023).

MAN Energy Solutionsin (2021) mukaan akseligeneraattori on yksi keino parantaa alusten energiatehokkuutta. Siinä osa pääkoneen tuottamasta mekaanisesta tehosta muunnetaan sähköksi. Akseligeneraattorin toteutustapa vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti sähköntuotanto toimii muuttuvilla akselinopeuksilla ja kuormituksilla. Sähkönkulutuksen taso ja vaihtelu riippuvat aluksen käyttötavasta ja käyttötilanteista.

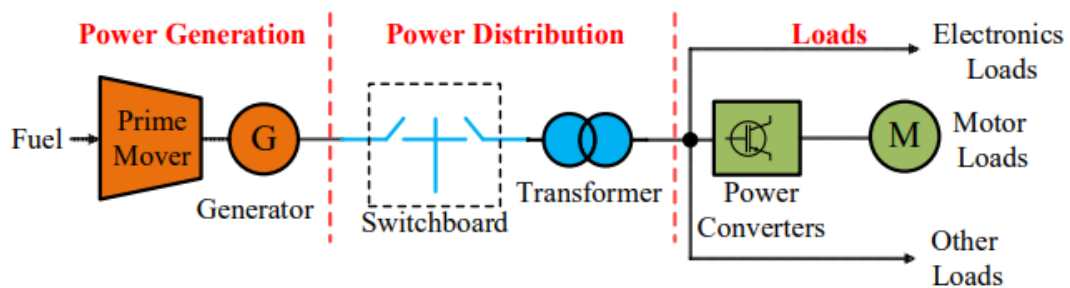
Tässä työssä tarkastellaan akseligeneraattoreita ja erityisesti perehdytään kestonagnetointiin perustuvaan akseligeneraattoriin. Työn tavoitteena on selvittää,

mille tarkastelluille alustyypeille akseligenaattori soveltuu parhaiten. Lisäksi työssä pyritään tunnistamaan ne tärkeimmät erot, jotka voivat tehdä kestmagneettiakseligenaattorista paremman vaihtoehdon verrattuna perinteisiin akseligenaattorijärjestelmiin. Perinteisillä akseligenaattoreilla tarkoitetaan tässä työssä sähköisesti herätettyjä synkronigenaattoreita ja induktiogenaattoreita. Työssä kiinnitetään erityisesti huomiota niihin dieselmekaanisiin propulsiojärjestelmiin, joissa kestmagneettiakseligenaattori on relevantti ratkaisu. Koska laivatyyppit ja niiden käyttöprofiilit eroavat toisistaan, teknologian soveltuvuus ei ole välttämättä sama kaikissa tapauksissa (Trivyza ja muut, 2016). Tästä syystä on perusteltua arvioida soveltuvuutta käyttöprofiilien kautta.

Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Ensiksi esitetään tarvittavat taustatiedot laivojen sähköntuotannosta ja akseligenaattoreista. Tämän jälkeen tarkastellaan millaisille alustyypeille ja käyttöprofiileille akseligenaattori soveltuu parhaiten ja milloin kestmagneettiakseligenaattori antaa suurimman lisäedun. Arviointi toteutetaan yleisellä tasolla, eikä työn tarkoituksena ole antaa tarkkoja lukuja tai rakentaa järjestystä valittujen alustyyppien välille. Tarkoituksena on tutkia ja vertailla soveltuvuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä yleisellä tasolla.

## 2 Laivojen sähköntuotanto ja akseligeneraattori

Juuret laivojen sähköntuotannolle ulottuvat 1800-luvulle saakka. Vuonna 1880 sähkövalaistus tuli laivoihin ja siitä lähtien tehontarve on noussut nopeasti. Nykyään laivat tarvitsevat megawattiluokan sähköntuotantoa propulsioon ja useisiin muihin kuormiin (Rautiainen, 2024, s. 14). Saukon (2020, s. 3) mukaan laivojen yhteydessä propulsiolla tarkoitetaan potkurien aikaansaamaa työntövoimaa, joka voi laivan koosta ja muista kuormista riippuen olla jopa yli puolet kokonaiskuormituksesta. Hotellikuormalla tarkoitetaan kaikkea sitä kuormaa, joka ei liity propulsioon tai sen apujärjestelmiin. Laivojen sähköverkko voidaan jakaa kolmeen osaan kuvan 1 mukaisesti. Sähköntuotanto, sähkönjakelu ja kuormat (Saukko, 2020, s. 3).



**Kuva 1.** Laivan sähköverkon osa-alueet (Kumar & Zare, 2019, s. 9).

### 2.1 Laivojen sähköntuotannon peruseriaatteet

Sähköntuotannon tehtävä on tuottaa tarvittava määrä sähköä kattamaan kuormitus (Saukko, 2020, s. 4). Tuotannon tulee olla turvallista ja tehokasta samaan aikaan. Tyypillisesti laivojen sähköntuotanto toteutetaan tahtigeneraattoreilla, jotka toimivat polttomoottoreilla. Voimakoneet ja generaattorit ovat sijoitettu laivan konehuoneeseen, ja kokonaisuus mitoitetaan tehontarpeen perusteella. Yleensä tällaisia generaattorivoimakoneyhdistelmiä on useampia. Tyypillinen esimerkki on neljän generaattorin malli, jossa on kaksi identtistä suuritehoista ja pienitehoista generaattoria (Saukko, 2020, s. 4).

Vaihtosähköverkossa voimakoneen nopeus tulisi pitää tasaisena, koska tahtigeneraattorin tuottaman sähköän taajuus kytkeytyy suoraan roottorin pyörimisnopeuteen. Kun kuorma kasvaa niin generaattorin magneettinen vastamomentti kasvaa. Tämä tarkoittaa, että voimakoneelta vaaditaan enemmän vääntömomenttia. Tankkereilla ja rahtilaivoilla käytetään tyypillisesti hitaammin pyöriviä generaattoreita (noin 55–250 r/min), kun taas risteilijöissä ja autolautoissa käytetään usein korkeampia kierroslukuja (noin 300–750 r/min) (Saukko, 2020, s. 5–6).

## **2.2 Akseligeneraattorin toimintaperiaate**

Cummins Generator Technologiesin (2019, s. 1) mukaan akseligeneraattori on vaihtovirtageneraattori, jota pyörittää pääkone potkuriakselin kautta. Laivan pääkoneen ja propellin välissä on akseli. Akseli pyörittää generaattorin roottoria ja generaattori muuttaa akselin mekaanisen energian sähköksi. Pääkoneen ja sitä kautta myös potkuriakselin on käytävä vakiokierrosluvulla, joka on sopiva akseligeneraattorin tuottaman jännitteen ja taajuuden kannalta. Vasta sitten voidaan akseligeneraattoria käyttää sähkönsyöttöön (Cummins Generator Technologies, 2019, s. 1).

Useimmat laivat käyttävät 450 V, 60 Hz järjestelmää. Tämä tarkoittaa, että akseligeneraattoria voidaan yleensä käyttää sähkönsyöttöön vain silloin, kun alus on merellä ja kulkee tasaisella matkanopeudella. Tällaisissa olosuhteissa pääkoneessa on usein tehoreserviä, jolloin akseligeneraattorin avulla voidaan vähentää dieselkäyttöisten apugeneraattoreiden tarvetta (Cummins Generator Technologies, 2019, s. 1). Lisäksi tästä syystä akseligeneraattorijärjestelmä ei yksin riitä kattamaan aluksen sähkötarvetta esimerkiksi satamassa. Tämä rajoittaa akseligeneraattorin käyttöä verrattuna dieselkäyttöisiin apugeneraattoreihin, joita voidaan käyttää riippumatta aluksen liiketilasta (Rautiainen, 2024, s. 48).

Rakenteeltaan akseligeneraattori on jatkuvasti pyörivä kone. Se voi pyöriä pitkiäkin aikoja ilman magnetointia, vaikka pyörimisnopeus ei olisi sopiva sähköntuotantoon (Cummins Generator Technologies, 2019, s. 1–2).

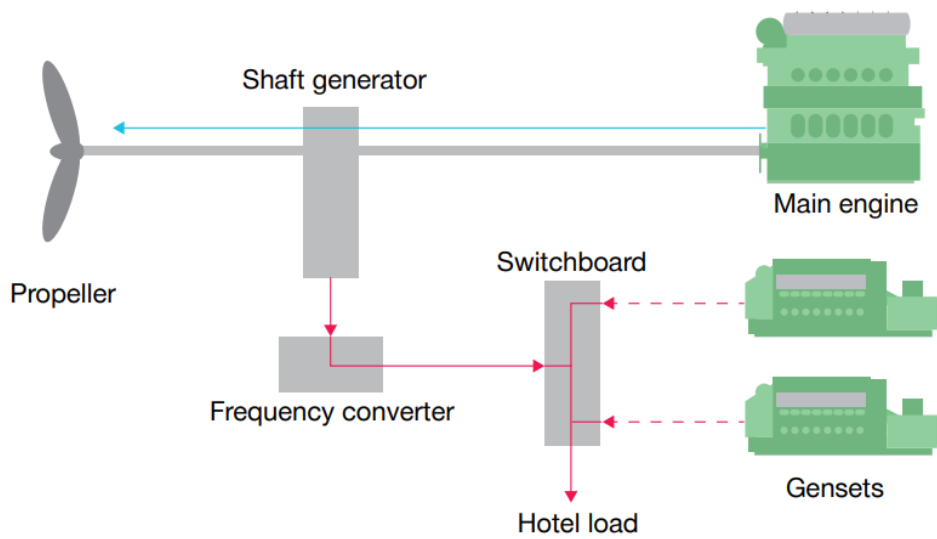
Taajuusmuuttajien ja kehittyneiden vaihteistoratkaisujen yleistymisen on parantanut akseligeneraattorien hyödynnettävyyttä huomattavasti. Taajuusmuuttajan avulla generaattorin tuottama sähkö voidaan sovittaa laivaverkkoon myös silloin, kun pääkoneen ja potkuriakselin pyörimisnopeus vaihtelee (Saukko, 2020, s. 10).

Vaikka sähköverkon rakenteet ovat ajan myötä monipuolistuneet, niin perusratkaisu, jossa pääkone pyörittää potkuria ja akseligeneraattoria on säilynyt käytössä tietyillä aluksilla. Dieselkoneen ja mekaanisen propulsioyhdistelmän energiatehokas silloin, kun alus kulkee merellä tasaisella nopeudella. Matalilla nopeuksilla mekaanisen ratkaisun hyötysuhde heikkenee ja esimerkiksi sähkömoottoripropulsio voi muodostua tehokkaammaksi vaihtoehdoksi (Saukko, 2020, s. 10). Juuri näistä syistä hyötysuhdetta on tarkasteltava laivojen käyttöprofiilien perusteella.

### **2.2.1 Akseligeneraattorin toimintatilat**

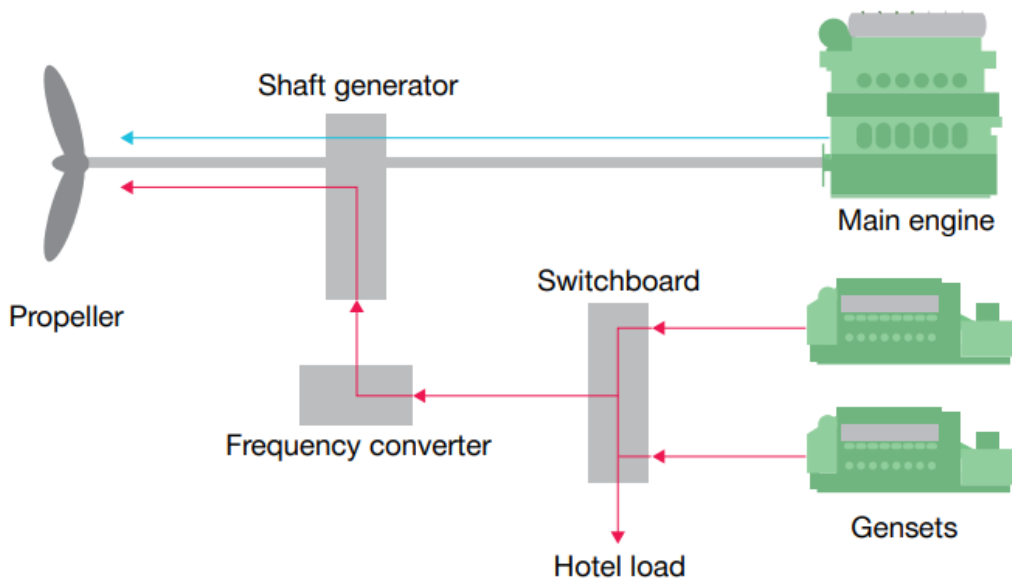
Akseligeneraattorijärjestelmä voi toimia eri toimintatiloissa käyttötarpeen mukaan. Akseligeneraattoria voidaan käyttää esimerkiksi voiman ulosotto (PTO) tilassa sekä voiman sisäänotto (PTI) tilassa. Näissä toimintatiloissa energian kulkusuunta akselilinjan ja sähköverkon välillä on erilainen (MAN Energy Solutions, 2021, s. 6). Työn kannalta olennaisempi näistä on PTO-tila, koska tutkimuksen kohteena on akseligeneraattorin käyttö sähköntuotannossa.

PTO-tilassa akseligeneraattori toimii generaattorina, eli se tuottaa sähköä verkkoon. Tämä on akseligeneraattorin tyypillinen käyttötapa. PTO-tilassa akseligeneraattori kattaa osan aluksen sähköntarpeesta yhdessä apugeneraattoreiden kanssa. Etuna on mahdollisuus hyödyntää pääkonetta sähköntuotantoon, eikä kaikkia hotellikuormia tarvitse kattaa apugeneraattoreilla. Satamamanöövereissä ja alhaisilla kierrosluvuilla PTO-toimintoa ei kuitenkaan yleensä käytetä, vaan hotellikuorma katetaan apugeneraattoreilla. Vasta aluksen saavutettua avomerellä riittävän nopeuden sähköntuotanto voidaan siirtää akseligeneraattorille (MAN Energy Solutions, 2021, s. 7).



**Kuva 2.** Esimerkki akseligenaattorijärjestelmästä PTO-tilassa (MAN Energy Solutions, 2021).

PTI-tilassa akseligenaattori toimii moottorina. Tällöin sähköverkosta saatavaa tehoa käytetään propulsioon. PTI-tilaa käytetään esimerkiksi jään rikkomiseen tai silloin kun alus matkaa vasten voimakasta vastatuulta (Dziuba, 2022). Tässä toimintatilassa apugeneraattorit tuottavat sähköä samalla aluksen hotellikuormalle ja propulsiolle (MAN Energy Solutions, 2021, s. 7).

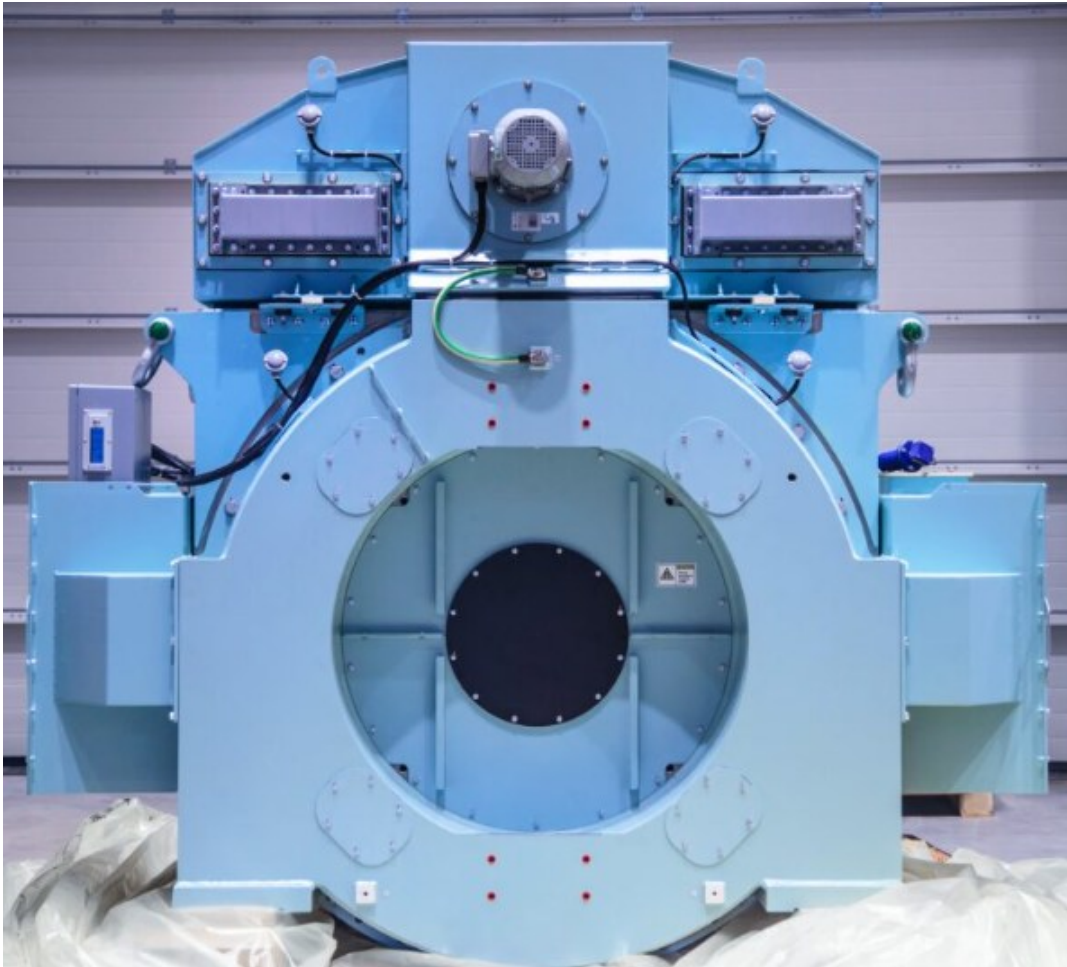


**Kuva 3.** Esimerkki akseligenaattorijärjestelmästä PTI-tilassa (MAN Energy Solutions, 2021).

### 3 Kestomagneettiakseligeneraattori

Kestomagneettigeneraattoria voidaan käyttää vaihtoehtona perinteiselle herätteiselle synkronigeneraattorille. Kestomagneettigeneraattorin toimintaperiaate on oikeastaan hyvin yksinkertainen. Roottoriin on kiinnitetty vahvat kestopagneetit. Kun roottoria pyöritetään dieselmoottorilla, magneettivuon muutos indusoi staattoriin jännitteen ja virran Faradyn induktiolain mukaisesti (Dziuba, 2022).

Kestomagneettigeneraattorit ovat yleistyneet viimeisen vuosikymmenen aikana. Tekniikka on laajasti käytössä etenkin suuritehoisissa, hitailla ja keskitason pyörimisnopeuksilla toimivissa kohteissa, koska niiden hyötysuhde on tyypillisesti parempi kuin sähköisesti magnetoitujen generaattoreiden. Kestomagnetoitujen generaattoreiden rakenne on myös yksinkertainen ja mekaanisesti kestävä. Tuulivoimaloissa kestopagneettigeneraattoreista on muodostunut jo standardi ratkaisu. Myös muiden teollisuudenalojen kehitys on suuntautumassa kestopagneettitekniikkaan kasvavan energiakysynnän ja ilmastonäkökulmien vuoksi (Eriksson, 2019).



**Kuva 4.** Kestomagneettiakseligeneraattori ilman akselia (Dziuba, 2022).

### **3.1 Keskeiset edut verrattuna perinteisiin akseligeneraattoriratkaisuihin**

Kestomagneettiakseligeneraattorin hyödyt liittyvät parempaan hyötysuhteeseen osakuormilla, pienempään huoltotarpeeseen, rakenteelliseen yksinkertaisuuteen ja parempaan soveltuvuuteen matalilla pyörimisnopeuksilla.

Hitaiden kierroslukujen kestopagneettiakseligeneraattorit omaavat korkean hyötysuhteen etenkin osakuormilla ja osanopeuksilla (Rautiainen, 2024, s. 47). Myöhemmin, kun tarkastellaan etuja alustyyppikohtaisesti, niin voidaan hyvää hyötysuhdetta osakuormilla pitää tärkeimpänä aluskohtaiseen soveltuvuuteen vaikuttavana tekijänä.

Kestomagneetteihin perustuvat ratkaisut eivät tarvitse roottorin magnetointiin erillistä herätejärjestelmää. Tämä vähentää sähköisesti magnetoiduille synkronigeneraattoreille tyypillisiä herätehäviöitä ja niihin liittyviä komponentteja. Herätevirran syöttäminen ei ole yksinkertaista. Siihen tarvitsee harjattoman herättimen tai liukurengasjärjestelmän, joka vaatii jatkuvaa huoltoa. Sähköisesti magnetoitu synkronikone tarvitsee lisäksi automaattisen jännitteen säätimen, joka ohjaa roottorin herätevirtaa. Jännitteen säädin aiheuttaa omat häviönsä. Lisäksi se maksaa ja vie tilaa alukselta (Dziuba, 2022). Kestomagneetteja ei tarvitse tyypillisesti vaihtaa koko aluksen käyttöiän aikana, joten niistä ei seuraa lisäkustannuksia (Puranen, 2025).

Vaihteellisissa sovelluksissa, joissa generaattorin pyörimisnopeus on tyypillisesti noin 1000–1500 r/min, ovat induktiokoneet hyvä ratkaisu, koska ne ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia ja hyötysuhteeltaan hyviä. Sen sijaan suorakytkentäisissä akseligenaattoreissa induktiokoneet eivät ole lähelläkään optimaalista ratkaisua. Tämä johtuu siitä, että ne eivät sovellu hyvin matalanopeuksisiin sovelluksiin sähkömagneettisista syistä. Hitaiden induktiokoneiden haittoja ovat noin 4–6 % heikompi hyötysuhde ja suurempi virta. Virta voi olla noin 25 % suurempi kuin kestomagneetikoneella samalla teholla ja jännitteellä. Lisäksi hitaat induktiokoneet ovat fyysisesti hyvin suuria ja raskaita (Dziuba, 2022).

### **3.2 Keskeiset haasteet ja rajoittavat tekijät**

Kestomagneettiakseligenaattoreihin liittyy myös joitain haasteita. Haasteet liittyvät erityisesti pysyvään magnetointiin, magneettimateriaaleihin ja suunnitteluun.

Erikssonin (2019, s. 57) mukaan eräs keskeinen rajoittava tekijä kestomagneettigenaattoreissa on se, että magnetointia ei voi säätää. Toisin kuin sähköisesti magnetoidussa synkronigeneraattorissa, roottorin magneettikenttä on vakio. Tämän seurauksena magneettikenttää ei myöskään voida kytkeä pois vikatilanteessa,

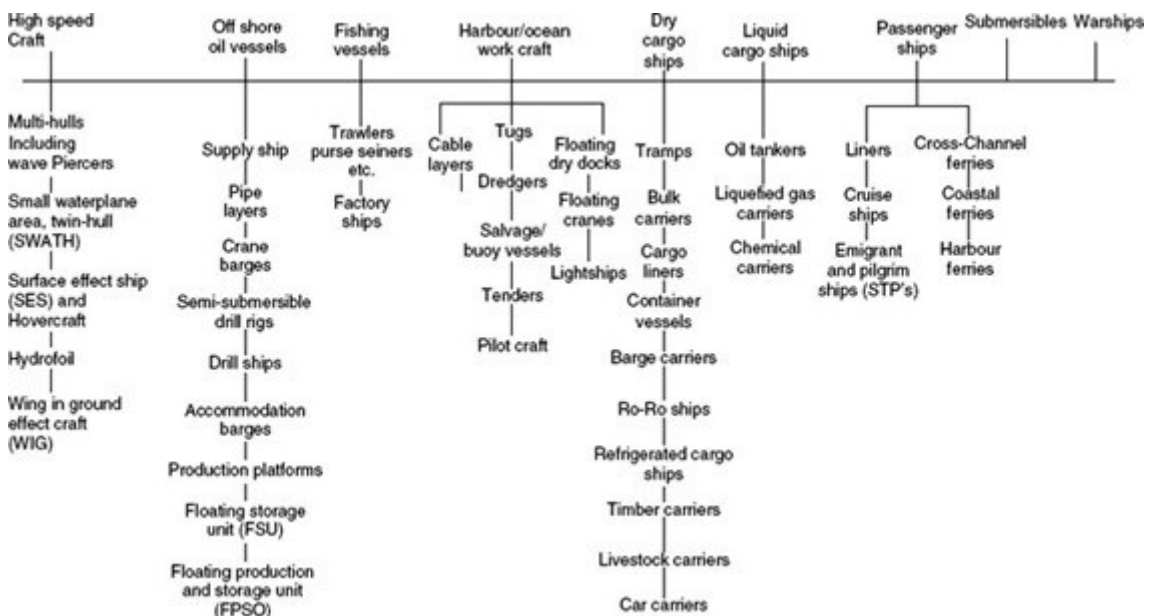
joka voi tehdä vikojen hallinnasta haastavampaa. Haittaa voidaan kuitenkin lieventää tarkoituksenmukaisilla suunnitteluratkaisuilla (Puranen, 2025).

Kestomagneettigeneraattoreihin liittyy myös materiaalien saatavuuteen ja kustannuksiin liittyviä haasteita. Harvinaisia maametalleja ei haluta käyttää enää yhtä paljoa kuin aiemmin. Lisäksi lähes kaikissa kestopagneettigeneraattoreissa käytetään NdFeB-pohjaisia kalliista materiaalista valmistettuja magneetteja (Eriksson, 2019, s. 62).

Erikssonin (2019) mukaan kestopagneettikoneisiin liittyy myös demagnetisoitumisriski, joka kuuluu niiden keskeisiin suunnitteluhaasteisiin. Rautiaisen (2024, s. 48) mukaan riski voidaan kuitenkin minimoida huolellisella mitoituksella ja oikeilla käyttöolosuhteilla. Lisäksi kestopagneettigeneraattorissa roottorin ja staattorin mahdollinen epäkeskisyys voi aiheuttaa epätasapainoista magneettista vetovoimaa. Tämä on otettava huomioon koneen mekaanisessa suunnittelussa (Dziuba, 2022).

## 4 Alustyyppien käyttöprofiilit ja soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät

Laiva on kuljetusjärjestelmä, jonka tarkoitus on kulkea vedessä nostevoiman kannattelemana. Eri käyttötarkoituksiin on omat laivatyyppinsä ja siksi laivojen sähköjärjestelmiä suunniteltaessa onkin erityisen tärkeää, että suunnittelu toteutetaan käyttötarkoituksen mukaisesti. Luokitteluun vaikuttavat, mitä laiva kuljettaa ja missä se liikkuu (Kesonen, 2024, s. 22). Kuva 5 havainnollistaa laivatyyppien pääryhmät ja niiden alaluokat.



Kuva 5. Laivatyytit ja niiden alaluokat (Rautiainen, 2024).

### 4.1 Tarkasteluun valitut alustyytit ja valintaperusteet

Aluksia voidaan ryhmitellä niiden voimansiirto- ja käyttöjärjestelmän perusteella neljään pääluokkaan: dieselmekaaninen, dieselsähköinen, integroitu sähköjärjestelmä ja täysin sähköinen järjestelmä (Rautiainen, 2024, s. 14). Tämän tutkielman tarkastelu rajataan dieselmekaanisiin alustyyppisiin, koska akseligeneraattori ja sitä hyödyntävät kestopagneettiratkaisut kytkeytyvät luonnollisesti dieselmekaaniseen järjestelmään.

Dieselsähköisissä ja integroiduissa sähköjärjestelmissä propulsio tapahtuu yleensä sähkökoneilla, ja siksi akseligeneraattorille ei ole tarvetta. Heinosen (2023, s. 10) raportissa hän määrittelee dieselmekaanisen järjestelmän ratkaisuksi, jossa pääkone tai pääkoneet on kytketty potkuriakseliin joko suoraan tai vaihteiston välityksellä.

Vertailuun valitut laivatyyppit ovat valtameriliikenteen yleisiä dieselmekaanisia kuljetusaluksia, joissa käyttöprofiili muodostuu yleensä pitkistä merimatkoista. Tarkasteluun otetaan ro-ro-rahtialukset, konttialukset, irtolastialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit. Nämä alustyyppit ovat kuljetustehtävältään ja käyttöprofiililtaan riittävän erilaisia, että akseligeneraattoriratkaisujen soveltuvuutta voidaan vertailla.

## **4.2 Akseligeneraattorin soveltuvuuden arviointikriteerit**

Seuraavassa alaluvussa tutkitaan akseligeneraattorin soveltuvuutta yleisesti valituille alustyypeille. Ennen kuin perehdytään valittuihin alustyyppihin tarkemmin, täytyy määrittää arviointikriteerit.

Lähtökohtaisesti PTO-tilassa akseligeneraattori tuottaa sähköä meriajossa. Satamamanövereissä ja alhaisilla kierrosnopeuksilla hotellikuorma tuotetaan yleensä apugeneraattoreilla, ja vasta avomerellä aluksen hotellikuormien vaativa sähkönkulutus voidaan tuottaa akseligeneraattorilla (MAN Energy Solutions, 2021, s. 7). Tästä saadaan ensimmäiseksi arviointikriteeriksi aluksen meriajan määrä.

Toiseksi arviointikriteeriksi valitaan meriajan sähkönkulutuksen määrä, koska akseligeneraattorin soveltuvuus paranee, kun meriajan sähkönkulutus nousee. Tämä johtuu siitä, että kun aluksella on paljon sähkökuormaa meriajossa, voidaan sähkökuormaa siirtää apugeneraattoreilta pääkoneen pyörittämälle akseligeneraattorille (MAN Energy Solutions, 2021, s. 7). Meriajan sähkönkulutus voi koostua esimerkiksi hotellikuormasta, jäähdytyksestä tai pumppauksesta. Taulukko 1 kuvaa eri alustyyppien tehoalueita. Suurempi tehoalue voi viitata suurempaan sähköntarpeeseen, mutta se ei yksin osoita meriajan todellista sähkönkulutusta.

**Taulukko 1.** Eri alustyyppien tehoalueet (mukaillen Kesonen, 2024).

Laivatyyppi	Tehoalueet (kW)
Konttialus	1000–15000
Ro-ro	800–3500
Irtolastialus	1100–3000
Öljy- ja kemikaalitankkerit	800–5300

Taulukko 2 osoittaa, että tutkittavien alustyyppien satama-ajoissa on huomattavia eroja. Irtolastialuksilla satama-aika on pidempi kuin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Ro-ro-rahtialusten satama-aikoja ei ole raportoitu.

**Taulukko 2.** Alustyyppien satamakäynnit vuonna 2023 (mukaillen UNCTAD, 2024).

Laivatyyppi	Keskimääräinen satama-aika (päivää)
Konttialus	0,71
Ro-ro	-
Irtolastialus	2,13
Öljy- ja kemikaalitankkeri	0,99

#### 4.2.1 Konttialukset

Konttialukset on suunniteltu konttikuljetuksiin, joissa lasti on standardoiduissa konteissa. Niiden propulsio perustuu usein dieselmekaaniseen akselilinjaan, mikä tekee niistä olennaisia akseligeneraattorijärjestelmien tarkasteluun (Kesonen, 2024).

Etenkin suuremman kokoluokan konttialuksille on tyypillisiä pitkät matkaetäisyydet ja ajat (Tran & Haasis, 2018). Lisäksi Taulukko 2 osoittaa, että satama-ajat ovat lyhyitä, minkä vuoksi meriaikaa on enemmän. Tämän perusteella käyttöprofiilin katsotaan sisältävän paljon meriajoa. Konttialukset tarvitsevat paljon sähköä meriajossa perinteisten hotellikuormien lisäksi lämpösäädelyihin kylmäkontteihin, joita kutsutaan

reefer-konteiksi (Nicewicz, 2009, s. 1). Nicewiczin mukaan reefer-kontit voivat muodostaa aluksen suurimman sähkökuorman, kun tarkastelu kohdistuu nimenomaan merimatkan aikaiseen käyttöön. Lisäksi Taulukosta 1 nähdään, että suurien konttialusten tehoalue voi olla jopa nelinkertainen verrattuna ro-ro-rahtialuksiin ja irtolastialuksiin. Tämä tukee väitettä konttialusten suuresta tehon tarpeesta.

#### **4.2.2 Ro-ro-rahtialukset**

Ro-ro-rahtialukset eroavat muista rahtialuksista siten, että lasti tuodaan alukseen rullaamalla vaakasuunnassa. Lastaus tehdään tyypillisesti perän tai sivun rampin kautta. Lastina voi olla esimerkiksi ajoneuvoja tai pyörillä kulkevia perävaunuja. Suurissa ro-ro-rahtialuksissa lasti voi olla myös konttilastia, joka siirretään sisään esimerkiksi trukilla (Kesonen, 2024).

Euroopan parlamentin (2015) tutkimuksen mukaan ro-ro-kuljetus on yleensä tiekuljetuksen ja merikuljetuksen yhdistelmä. Meriosuus kuljetaan poikkeuksia lukuun ottamatta lyhyillä etäisyyksillä. Tästä syystä se luokitellaan lähimerenkulkuun (European Parliament, 2015, s. 8). Euroopan parlamentin tutkimus kohdistuu nimenomaan Euroopan satamiin kulkeutuvaa liikennettä. Se ei huomioi muiden mannerten välistä liikennettä. Ro-ro-rahtialusten käyttöprofiiliin voidaan siis arvioida eroavan muista tarkasteltavista alustyypeistä merkittävästi matkojen pituuksissa ja täten myös meriajan määrässä.

Taulukon 1 perusteella ro-ro-rahtialusten tehoalue on 800–3500 kW, joka on selvästi alhaisempi kuin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Ro-ro-rahtialuksilla ei yleensä ole reefer-konttien tai lastijärjestelmien kaltaista jatkuvaa meriajan sähkökuormaa lisäävää tekijää. Näistä syistä meriajan sähkökuorman arvioidaan painottuvan hotellikuormaan ja jäävän pienemmäksi kuin konttialuksilla tai öljy- ja kemikaalitankkereilla.

### 4.2.3 Irtolastialukset

Irtolastialukset kuljettavat kiinteää irtolastia. Lastaus voidaan tehdä esimerkiksi sataman nostureilla. Tyypillisiä lasteja ovat esimerkiksi malmit ja mineraalit, viljat, hiili, lannoitteet, sementti ja hake (Kesonen, 2024).

Konttialukset, irtolastialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit voivat kaikki toimia pitkillä merireiteillä. Alustyyppi ei yksin määritä meriajan määrää. Meriaikaan vaikuttavat myös aluksen koko satama-aika ja liikennöintialue. Irtolastialusten kohdalla meriaikaa tulee Taulukon 2 perusteella suhteessa vähemmän verrattuna konttialuksiin sekä öljy- ja kemikaalitankkereihin. Kuitenkin Euroopan parlamentin (2015, s. 26–27) mukaan irtolastialukset ovat tarkastelluista alustyypeistä ne, joilla valtamerenkulun osuus on korkein. Raportissa tämä liitetään kaukaisista satamista tuleviin raaka-aineisiin. Tämä tukee sitä ajatusta, että irtolastialusten käyttöprofiili sisältää paljon meriajoa.

Taulukon 1 mukaan irtolastialusten tehoalue on 1100–3000 kW välillä, joka on selkeästi vähemmän kuin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Tätä selittää se, että irtolastialuksilla ei näyttäisi olevan ro-ro-rahtialusten tapaan mitään erityistä sähkökuormaa lisäävää tekijää.

### 4.2.4 Öljy- ja kemikaalitankkerit

Öljy- ja kemikaalitankkerit kuljettavat nestemäisiä lasteja kansainvälisissä valtamerikuljetuksissa. Ne ovat tärkeä osa maailman energian ja teollisuuden raaka-aineiden toimitusketjua. Öljytankkerit kuljettavat raakaöljyä ja öljytuotteita tuotantoalueilta jalostamoihin ja markkinoille, kun taas kemikaalitankkerit kuljettavat teollisuuskemikaaleja ja usein myös puhtaita öljytuotteita (International Chamber of Shipping, n.d.). Lisäksi Taulukon 2 perusteella satama-ajat ovat noin päivän pituisia. Meriaikaa on siis suhteessa enemmän kuin irtolastialuksilla. Öljy- ja kemikaalitankkereiden käyttöprofiiliin voi tämän perusteella arvioida sisältävän pitkiä matkoja ja paljon meriaikaa.

Lastin ominaisuudet kuten tiheys, kiehumispiste, jäähdytystarve, viskositeetti sekä turvallisuusriskit vaikuttavat voimakkaasti aluksen toteutukseen ja operointiin (Kesonen, 2024). DNV:n (2024) nettisivujen mukaan öljy- ja kemikaalitankkereilla sähköä ja muuta apuenergiaa tarvitaan hotellikuorman lisäksi lastijärjestelmiin, kuten pumppuihin ja lastin lämmitykseen. Tämä kasvattaa aluksen kokonaisenergian tarvetta. Taulukossa 1 öljy- ja kemikaalitankkereiden tehoalue on 800–5300 kW. Taulukko 1 on rakennettu niin, että erikseen ilmoitetut öljytankkereiden tehoalue ja kemikaalitankkereiden tehoalue on yhdistetty yhdeksi tehoalueeksi. Sähkönkulutus voi siis suurilla aluksilla olla huomattavasti suurempi kuin irtolastialuksilla ja ro-ro-rahtialuksilla, mutta paljon pienempi kuin suurilla konttialuksilla.

## 5 Akseligeneraattorin soveltuvuuden arviointi

Akseligeneraattorin soveltuvuutta arvioidaan luvussa 4 esitettyjen alustyyppien käyttöprofiilien perusteella. Arviointi on suuntaa antava, eikä sen tavoitteena ole esittää tarkkoja numeerisia arvoja, vaan muodostaa yleistasoinen vertailu valittujen laivatyyppien välillä. Soveltuvuutta tarkastellaan matala–keskitaso–korkea-asteikolla, jotta eri alustyyppien väliset erot voidaan esittää selkeästi. Asteikko perustuu vain tarkasteltujen alustyyppien välisiin eroihin. Esimerkiksi se, että ro-ro-rahtialusten soveltuvuus arvioidaan matalaksi, ei tarkoita sitä, etteivät ne soveltuisi akseligeneraattori käyttöön vaan sitä, että ne soveltuvat heikommin kuin muut alustyyppit.

### 5.1 Akseligeneraattorin yleinen soveltuvuus alustyypeittäin

Taulukossa 3 on esitetty akseligeneraattorin yleinen arvio soveltuvuudelle valituille laivatyypeille. Taulukon 3 arviot on tehty luvussa 4 kuvattujen käyttöprofiilien perusteella. Tarkastelun perusteella konttialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit näyttävät soveltuvan akseligeneraattorille hyvin. Näillä alustyypeillä käyttöprofiiliin kuuluu runsaasti tasaista meriajoa, ja meriajan sähkökuorma on merkittävä. Konttialuksilla sähkönkulutusta lisäävät reefer-kontit, ja öljy- ja kemikaalitankkereilla sähköä tarvitaan hotellikuorman lisäksi lastiin liittyviin järjestelmiin. Konttialusten soveltuvuus arvioidaan korkeaksi, ja öljy- ja kemikaalitankkereiden keskitason ja korkean väliin. Irtolastialusten kohdalla akseligeneraattorin yleistä soveltuvuutta voidaan pitää keskitasoisena. Vaikka irtolastialuksilla on usein paljon meriaikaa, niiden meriajan sähkökuorma jää tyypillisesti pienemmäksi kuin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Lisäksi irtolastialukset viettävät keskimäärin enemmän aikaa satamassa kuin konttialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit. Näistä syistä akseligeneraattoriratkaisun yleinen hyöty ei korostu yhtä voimakkaasti irtolastialuksilla. Ro-ro-rahtialuksilla akseligeneraattorin soveltuvuus arvioidaan vertailun heikoimmaksi. Niiden käyttöprofiili sisältää tyypillisesti muita tarkasteltuja alustyyppisiä lyhyempiä merimatkoja ja enemmän satamakäyntejä. Lisäksi meriajan sähkökuorma muodostuu pääasiassa hotellikuormasta.

**Taulukko 3.** Akseligeneraattorin yleinen soveltuvuus

<b>Laivatyyppi</b>	<b>Tasaisen meriajon määrä</b>	<b>Meriajan sähkökuorma</b>	<b>Yleinen soveltuvuus</b>
Konttialus	Korkea	Korkea	Korkea
Ro-ro-rahtialus	Matala	Matala	Matala
Irtolastialus	Korkea	Matala	Keskitaso
Öljy- ja kemikaalitankkeri	Korkea	Keskitaso	Keskitaso/Korkea

## 5.2 Tulosten tarkastelu

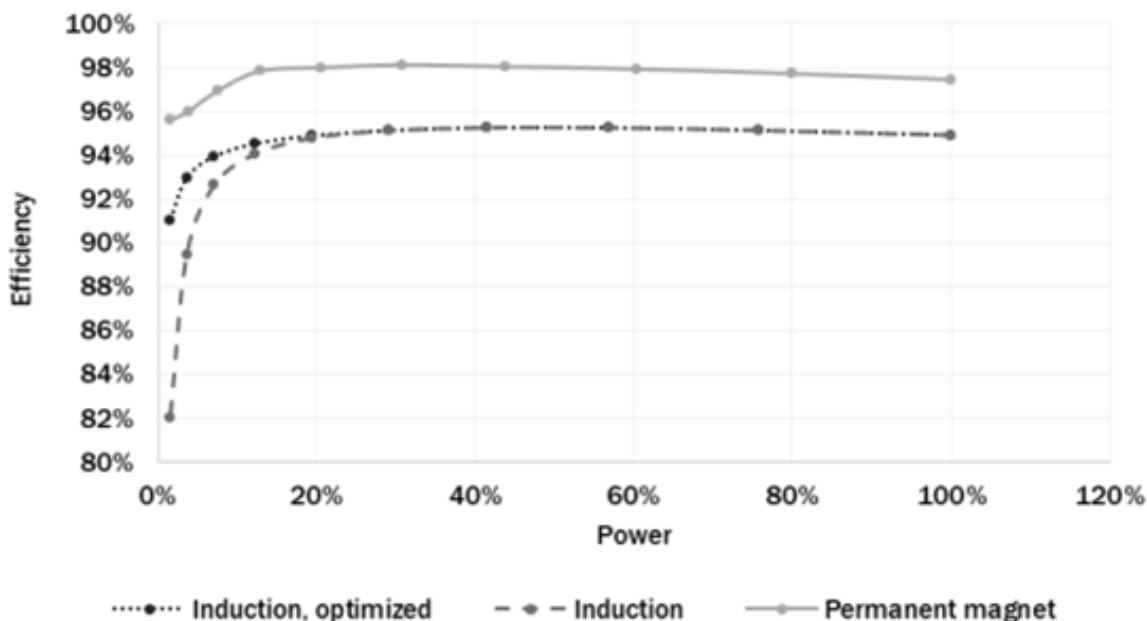
Eryteisesti konttialusten kohdalla on huomattava, että reefer-konteista aiheutuva suuri sähkökuorma ei koske kaikkia aluksia yhtä voimakkaasti, vaan vaihtelee aluksen koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Myös tankkereiden kohdalla alatyypit poikkeavat toisistaan. Öljytankkereiden ja kemikaalitankkereiden käyttöprofiilit sekä sähkönkulutuksen muodostuminen voivat vaihdella paljon. Tämä näkyy esimerkiksi Taulukon 1 laajassa tehoalueessa. Näistä rajoittavista tekijöistä huolimatta tarkastelu antaa riittävän perustan akseligeneraattorin yleisen soveltuvuuden vertailemiseen valittujen laivatyyppien välillä.

## 5.3 Kestomagneettiakseligeneraattorin lisäedun arviointi

Kestomagneettiakseligeneraattorin lisäedun arviointi perustuu kappaleessa 3 esitettyihin kestomagneettigeneraattorin ominaisuuksiin. Rakenteellinen yksinkertaisuus ja pienempi huollon tarve tukevat ratkaisun käyttöä laivasovelluksissa yleisesti.

Keskeisin aluskohtaisesti vertailukelpoinen tekijä kestopagneettiakseligeneraattorin antaman edun kannalta on parempi hyötysuhde osakuormilla ja matalilla kierrosluvuilla. Kestomagneettiakseligeneraattorin hyötysuhde on induktio- ja synkronigeneraattoreita parempi jo täydellä kuormalla, mutta ero korostuu erityisesti osakuormilla (ABB, 2022). ABB:n (2022) esittämässä kuvaajassa (Kuva 6) kestopagneettigeneraattorin hyötysuhde säilyy koko tarkastelualueella korkeampana kuin perinteisillä akseligeneraattoriratkaisuilla. Parempi hyötysuhde korostuu siirryttäessä matalammille kierrosluvuille. Tämä tekee kestopagneettiakseligeneraattorista erityisen kiinnostavan sellaisissa laivasovelluksissa, joissa käyttö ei painotu jatkuvasti nimelliskuormaan ja vakio kierrosluvulle (ABB, 2022). On huomioitava, että ABB:n (2022) esittämä kuvaaja (Kuva 6) perustuu valmistajan omaan raporttiin, jossa kuvaajan taustalla olevaa tutkimusasetelmaa tai tarkasteltuja aluksia ei kuvata yksityiskohtaisesti.

Kuvaa 6 tukee Rautiainen (2024, s. 47) esittämät tiedot, joiden mukaan hitaiden kierroslukujen kestopagneettiakseligeneraattorit saavuttavat optimaalisen hyötysuhteensa noin 30–60 % tehokuormalla, ja niiden hyötysuhde ylittää 90 % jollakuormasta lähtien. Sama pätee myös osanopeuksiin. Kestomagneettiakseligeneraattori toimii erittäin hyvällä hyötysuhteella jo käynnistyksestä alkaen ja parhaiten 30–60 % nimellinopeudesta, kun taas perinteiset generaattorit saavuttavat optimaalisen toimintansa lähempänä nimellinopeutta (Rautiainen, 2024, s. 47).



Kuva 6. Akseligenaattoriratkaisuiden hyötysuhteita (ABB, 2022).

### 5.3.1 Kestomagneettiakseligenaattorin etu aluskohtaisesti

Osakuormakäytön lisäksi kestopagneettiakseligenaattorin etu korostuu erityisesti niissä aluksissa, joissa aluksen sähkönkulutus on suuri. Tällöin hyötysuhteen paraneminen ei jää vain suhteelliseksi eduksi, vaan näkyy myös suurempana energiansäästönä. Rutherfordin ja muiden (2020) tutkimuksessa tarkasteltiin konttialusten, öljytankkereiden ja irtolastialusten operointitietoja. Tutkimuksesta tuli ilmi, että kyseisillä alustyypeillä operoitiin keskimäärin noin 11–14 solmun nopeuksilla, mikä vastasi noin 38–50 % pääkoneen suurimmasta jatkuvasta tehosta. Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan vielä, että konttialuksia, öljytankkereita ja irtolastialuksia käytettiin selvästi niiden enimmäisnopeuksia ja enimmäistehoja alemmilla tasoilla (Rutherford ja muut, 2020, s. 1, 11, 15). ABB:n (2022) esittämän hyötysuhdekuvaajan ja Rutherfordin ja muiden (2020) operointitietojen perusteella voidaan arvioida, että konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit toimivat usein hyötysuhteen kannalta lähellä optimaalista nopeus- ja kuormitusalueita kestopagneettiakseligenaattorille.

Rutherfordin ja muiden (2020) tutkimuksen perusteella konttialuksilla osakuormakäyttö on erittäin yleistä. Luvun 4 tarkastelun perusteella myös niiden meriajan sähkökuorma on merkittävän suuri. Taulukon 1 perusteella tehontarve voi olla jopa moninkertainen muihin vertailtaviin alustyyppeihin nähden. Voidaan arvioida, että kestomagneettiakseligeneraattorista olisi merkittävä etu konttialuksille. Öljy- ja kemikaalitankkereilla lisäetu on todennäköisesti kohtalaisen suuri. Rutherfordin ja muiden (2020) tutkimuksen tulokset tukevat öljytankkereiden osalta osakuormakäytön merkitystä, ja luvun 4 perusteella myös meriajan sähkökuorma voi öljy- ja kemikaalitankkereilla olla suhteellisen suurin verrattuna irtolastialuksiin ja ro-ro-rahtialuksiin.

Irtolastialuksilla edun voidaan arvioida jäävän pienemmäksi kuin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Rutherfordin ja muiden (2020) tutkimuksen perusteella myös irtolastialuksilla esiintyy runsaasti hidasaajasta aiheutuvaa osakuormakäyttöä. Luvussa 4 irtolastialusten meriajan sähkökuorma arvioitiin kuitenkin muita tarkasteltuja valtamerialuksia vähäisemmäksi, ja täten saatava hyöty jää pienemmäksi. Ro-ro-rahtialuksilla tilanne on hieman erilainen, sillä luvun 4 perusteella niiden reitit ovat yleensä lyhyempiä ja satamakäyntejä on enemmän kuin muilla tarkastelluilla alustyypeillä. Tästä syystä kuormituksen vaihtelu on yleistä. Tämä kytkeytyy osakuormakäyttöön ja parempaan hyötysuhteeseen. Ro-ro-rahtialuksien kohdalla voidaan arvioida kestomagneettiakseligeneraattorista olevan etua verrattuna perinteisiin akseligeneraattoreihin.

## 6 Johtopäätökset

Tämän tutkielman tavoite oli arvioida, millaisille alustyypeille akseligenaattori soveltuu parhaiten ja lisäksi selvittää millaisille alustyypeille kestromagneettiakseligenaattori on erityisen perusteltu ratkaisu. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena ja tavoitteena ei ollut esittää tarkkoja numeerisia suoritusarvoja, vaan muodostaa yleistason arvio alustyyppien ominaisuuksien vaikutuksesta akseligenaattorin soveltuvuuteen.

Tutkielman perusteella voidaan päätellä, että akseligenaattori soveltuu parhaiten alustyypeille, joiden käyttöön kuuluu paljon tasaista meriajoa ja joilla sähkönkulutus on korkea meriajossa. Tarkastelun perusteella parhaiten soveltuviksi alustyypeiksi nousevat konttialukset sekä öljy- ja kemikaalitankkerit. Konttialuksilla soveltuvuutta parantaa erityisesti reefer-konteista aiheutuva suuri sähkökuorma, kun taas öljy- ja kemikaalitankkereilla sähköä tarvitaan hotellikuorman lisäksi lastiin liittyviin järjestelmiin. Näillä alustyypeillä akseligenaattorin käyttö voi vähentää apugeneraattoreiden tarvetta, mikä parantaa järjestelmän energiatehokkuutta.

Irtolastialuksilla akseligenaattorin soveltuvuus arvioitiin keskitasoiseksi. Tähän vaikutti sähkökuorman vähäinen määrä meriajossa. Vaikka meriaika ei eroa öljy- ja kemikaalitankkereista tai konttialuksista merkittävästi, niin silti akseligenaattorin soveltuvuutta ei voida arvioida niiden kanssa samalle tasolle. Ro-ro-rahtialuksilla soveltuvuus jäi tarkastelun heikoimmaksi, koska niiden käyttöprofiili sisältää keskimäärin enemmän satamakäyntejä, lyhyempiä merijaksoja ja vähemmän jatkuvaa vakionopeudella tapahtuvaa käyttöä. On kuitenkin tärkeää huomata, että kyse on alustyyppien yleispiirteisiin perustuvasta arvioinnista. Yksittäisen aluksen todellinen soveltuvuus voi poiketa tästä esimerkiksi reitin, kokoluokan tai lastin vuoksi. Tästä syystä työn tuloksia ei tule tulkita ehdottomana alustyyppikohtaisena järjestyksenä, vaan käyttöprofiiliin perustuvina yleisinä johtopäätöksinä.

Työn perusteella kestromagneettiakseligenaattorin osalta voidaan todeta sen suurimman edun tulevan paremmasta hyötysuhteesta osakuormilla ja matalilla

kierrosluvuilla. Myös rakenteellinen yksinkertaisuus ja herätejärjestelmän puuttuminen ovat tärkeitä hyötyjä. Niitä ei kuitenkaan tässä työssä pystytty arvioimaan aluskohtaisesti. Lisäedut tulevat esiin varsinkin konttialuksilla sekä öljy- ja kemikaalitankkereilla. Irtolastialuksilla hyöty voi jäädä suhteessa pienemmäksi, koska niillä sähkökuormaa on meriajossa yleensä vähemmän. Ro-ro-rahtialuksilla kestopagneettiratkaisun teknisiä etuja voi esiintyä hieman eri syistä. Vaikka akseligeneraattorin yleinen etu arvioitiin matalaksi, niin juuri kestopagneettiakseligeneraattorin etu taas korostuu verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Tämä johtuu siitä, että niiden käyttöprofiiliin kuuluu paljon osakuormakäyttöä satamakäyntien ja lyhyempien reittien seurauksena.

Tuloksia täytyy tarkastella huomioiden työn rajaukset. Tutkielmassa ei hyödynnetty yksittäisten alusten mittausdataa tai taloudellisia laskelmia. Myös alustyyppien sisäiset erot jätettiin huomioimatta. Näistä syistä johtopäätökset ovat yleistasoisia eivätkä suoraan kuvaa yksittäisten alusten tilannetta. Jatkotutkimuksen kannalta olisi hyödyllistä tarkastella eri alustyyppien alaluokkia erikseen. Tällainen tarkastelu syventäisi muodostunutta johtopäätöstä siitä, että akseligeneraattorin ja erityisesti kestopagneettiakseligeneraattorin soveltuvuus määrittyy pitkälti käyttöprofiiliin eikä pelkästään alustyyppien perusteella.

## Lähteet

- ABB. (2022, 28. helmikuuta). *Towards an energy efficient future for shipping: High efficiency ABB permanent magnet shaft generator solutions*. Noudettu 20.3.2026 osoitteesta [https://library.e.abb.com/public/6b2689427faf4257bba58f09b74abe74/PM%20shaft%20generators\\_Marketing%20White%20Paper.pdf](https://library.e.abb.com/public/6b2689427faf4257bba58f09b74abe74/PM%20shaft%20generators_Marketing%20White%20Paper.pdf)
- Cummins Generator Technologies. (2019). *AGN 039 - Marine Shaft Generators*. STAMFORD. Noudettu 28.2.2026 osoitteesta [https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/AGNs/AGN-039\\_C-Marine-Shaft-Generators.pdf](https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/AGNs/AGN-039_C-Marine-Shaft-Generators.pdf)
- DNV. (2024, 20. toukokuuta). *Maximizing energy efficiency in the tanker segment*. Noudettu 20.3.2026 osoitteesta <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/maximizing-energy-efficiency-in-the-tanker-segment/>
- Dziuba, M. (2022, 14. marraskuuta). *Permanent Magnet Synchronous Generators in marine applications - Interview with expert: Dr. Jussi Puranen*. Vessel Automation. Noudettu 6.1.2026 osoitteesta <https://vesselautomation.com/permanent-magnet-synchronous-generators-in-marine-applications-interview-with-expert-dr-jussi-puranen/>
- European Parliament. (2015). *Modal share of freight transport to and from EU ports*. European Union. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540350/IPOL\\_STU\(2015\)540350\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540350/IPOL_STU(2015)540350_EN.pdf)
- Eriksson, S. (2019). *Permanent Magnet Synchronous Machines*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03921-351-1>
- Heinonen, T. (2023). *Research on merchant vessel's ability to provide sufficient thrust at low icebreaking speeds*. Winter Navigation Research Board Report No. 127. <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/WNRB%20no%20127%20STILS.pdf>
- International Chamber of Shipping. (n.d.). *Tankers*. Noudettu 20.3.2026 osoitteesta <https://www.ics-shipping.org/explaining/ships-ops/tankers/>

- International Maritime Organization. (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. Noudettu 6.1.2026 osoitteesta <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>
- International Renewable Energy Agency. (n.d.). *Shipping*. Noudettu 6.1.2026 osoitteesta <https://www.irena.org/Decarbonising-hard-to-abate-sectors-with-renewables-Enablers-and-recommendations/Transport-sector/Shipping>
- Kesonen, M. (2024). *Applications of Permanent Magnet Shaft Generator in Marine Industry* [Ylempi AMK -opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu]. *Theseus*. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202404227160>
- Kumar, D., & Zare, F. (2019). *A comprehensive review of maritime microgrids: System architectures, energy efficiency, power quality, and regulations*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917082>
- MAN Energy Solutions. (2021). *Shaft generators for low-speed main engines*. Noudettu 5.3.2026 osoitteesta <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf>
- Nicewicz, G. (2009). Relation between the number of reefer containers and the load of the marine electric power systems. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPG8-0014-0028>
- Puranen, J. (2025). *20 questions about The Switch permanent magnet machines*. Noudettu 10.2.2026 osoitteesta <https://theswitch.com/2025/05/19/20-questions-about-the-switch-permanent-magnet-machines/>
- Rautiainen, E. (2024). *Fuel savings and emission reduction in large ocean-going vessels by using permanent magnet shaft generators* [Diplomityö, Vaasan yliopisto]. *Osuva*. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024060848106>
- Rutherford, D., Mao, X., & Comer, B. (2020). *Potential CO<sub>2</sub> reductions under the energy efficiency existing ship index*. Noudettu 1.4.2026 osoitteesta

<https://theicct.org/publication/potential-co2-reductions-under-the-energy-efficiency-existing-ship-index/>

Saukko, O.-P. J. (2020). *Laivan sähköjakelu ja datan käsittely* [Diplomityö, Tampereen yliopisto]. *Trepo*. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202005125197>

Tran, N. K., & Haasis, H.-D. (2018). A research on operational patterns in container liner shipping. *Transport*, 33(3), 619–632. <https://doi.org/10.3846/transport.2018.1571>

Trivyza, N. L., Rentizelas, A., & Theotokatos, G. (2016). *The influence of ship operational profiles on the sustainability of ship energy systems*. [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/82362690/Trivyza\\_etal\\_ICMSO\\_2016\\_The\\_influence\\_of\\_ship\\_operational\\_profile\\_in\\_the\\_sustainability.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/82362690/Trivyza_etal_ICMSO_2016_The_influence_of_ship_operational_profile_in_the_sustainability.pdf)

UNCTAD. (2024). *Port call and performance statistics: Number of port calls, annual (analytical)*. UNCTADstat Data Centre. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.PortCalls>