

Rasmus Kujala

Tehokapasiteetin kartoitus laivasähkö- verkossa

Opinnäytetyö

Merenkulun ammattikorkeakoulututkinto
Merenkulun koulutus, sähkövoimatekniikka

2025



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

| | |
|-----------------|---|
| Tutkintonimike | Insinööri (AMK) |
| Tekijä/Tekijät | Rasmus Kujala |
| Työn nimi | Tehokapasiteetin kartoitus laivasähköverkossa |
| Toimeksiantaja | Nimetön yritys |
| Vuosi | 2025 |
| Sivut | 63 sivua |
| Työn ohjaaja(t) | Matti Hänninen |

TIIVISTELMÄ

Työn tavoitteena oli koota ja tuottaa yleiskatsaus laivan sähköjärjestelmiin, ja luoda vankka pohja myöhemmälle tapaustutkimukselle. Tutkimuksen alkuosa muodostaa teoreettisen viitekehityksen, jossa esitellään laivan sähköverkon rakenne, sähköntuotantomenetelmät, erilaiset verkon kuormitustyyppit sekä sähköjärjestelmien ohjaus- ja hallintajärjestelmät.

Tapaustutkimuksessa selvitetään toimeksiantajan laivan sähköverkon sähköbilanssin muodostumista ja akseligeneraattorijärjestelmän tehokapasiteetin rajoitteita, joiden syitä ei tiedetä. Tämän pohjalta esitetään ratkaisuja sähköntuotannon riittävyyden varmistamiseksi. Lisäksi työssä mitoitetaan olemassa olevaan tekniikkaan rinnastettava hybridiakkujärjestelmä, jonka ensisijaisena tavoitteena on sähköntuotannon riittävyys tulevaisuuden kuormitustarpeisiin.

Lähteinä tutkimukselle on käytetty alan kirjallisuutta ja julkaisuja, aiempia tutkimuksia sekä toimeksiantajan järjestelmiä kuvaavia materiaaleja. Toimeksiantaja eli varustamo on kieltänyt nimensä ja kyseessä olevan laivan nimen käyttämisen työssä, joten ne on jätetty pois tutkimuksesta yksityisyyden varmistamiseksi.

Tutkimuksessa tunnistettiin sähköntuotannon pullonkaulaksi akseligeneraattorijärjestelmän verkkovaihtosuuntaajan parametrisointi, joka ei vastannut sähköverkon nykyistä kuormitusprofiilia. Ratkaisuksi esitettiin parametrien päivittämistä. Jatkotutkimuksena järjestelmäpäivitykset tulee simuloida ja arvioida niiden vaikutus sekä yhteensopivuus laivan muiden järjestelmien kanssa. Tämä varmistaa, että ratkaisu toimii odotetusti eikä aiheuta ennakoimattomia ongelmia sähköverkossa.

Työ ei sisällä ratkaisujen taloudellista arviointia, kuten investointikustannuksia, takaisinmaksuaikaa tai vaikutuksia operatiivisiin kustannuksiin. Jatkossa olisi tärkeää tarkastella myös näitä näkökulmia, jotta voidaan varmistaa ratkaisun kannattavuus ja tehokkuus käytännössä. Työ toimii viitekehityksenä samankaltaisia projekteja työstäville yrityksille ja aiheesta kiinnostuneille.

Asiasanat: laivasähkö, kuormitus, optimointi

| | |
|------------------|--|
| Degree title | Bachelor of Engineering |
| Author (authors) | Rasmus Kujala |
| Thesis title | A Survey of Power Generation Capacity in a Ship's Electrical Network |
| Commissioned by | Undisclosed |
| Time | 2025 |
| Pages | 63 pages |
| Supervisor | Matti Hänninen |

ABSTRACT

The objective of the thesis was to compile and produce an overview of ship electrical systems, building a solid foundation for a later case study. The initial part of this thesis constructed a theoretical framework by presenting the structure of a ship's electrical network, power generation methods, various types of network loads, and the control and management systems of electrical systems.

The case study investigates the formation of the ship's electrical power balance and the power capacity limitations of the shaft generator system. The causes of the limitations are unknown. Based on this analysis, solutions are proposed to ensure sufficient power generation. Furthermore, the thesis included the dimensioning of a hybrid battery system comparable to the existing technology, with the primary objective of ensuring power generation for future load demands.

The study was based on literature and publications in the field, previous studies, and materials provided by the commissioner. The commissioner, i.e., the ship owner, has prohibited the use of its name and the vessel's name in this thesis. Therefore, all identifying information has been omitted to ensure privacy.

The study identified a bottleneck in power generation caused by the parameterization of the shaft generator system's grid converter, which did not correspond to the current load profile of the ship's electrical network. Updating these parameters was proposed as the solution.

As further research, the system updates should be simulated and their impact and compatibility with the ship's other systems evaluated. This ensures that the solution functions as expected and does not cause unforeseen issues in the electrical network.

The thesis does not include a financial evaluation of the solutions, such as investment costs, payback time, or impacts on operational costs. In the future, it would be important to examine these aspects to ensure the suitability and cost-effectiveness of the solution in practice. This thesis serves as a framework for companies working on similar projects or those interested in the topic.

Keywords: marine electrical systems, electric load, optimization

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT | 7 |
| 2.1 | Tutkimusmenetelmät | 7 |
| 2.2 | Työn rajaus ja rakenne | 8 |
| 3 | LAIVAN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ | 8 |
| 4 | LUOKITUSLAITOKSET | 9 |
| 4.1 | Sähköasennusten vaatimukset..... | 10 |
| 5 | SÄHKÖVERKKO LAIVALLA..... | 13 |
| 5.1 | IT-jakelujärjestelmä..... | 14 |
| 5.2 | Sähköverkon rakenne | 17 |
| 6 | SÄHKÖN TUOTANTO | 19 |
| 6.1 | Dieselgeneraattorit..... | 19 |
| 6.2 | Harjaton magnetointi..... | 21 |
| 6.3 | Generaattorin kuormitus | 22 |
| 6.3.1 | Induktiivinen kuormitus | 22 |
| 6.3.2 | Kapasitiivinen kuormitus | 23 |
| 6.3.3 | Resistiivinen kuormitus | 25 |
| 7 | AVR JA NOPEUDEN SÄÄDIN..... | 27 |
| 7.1 | AVR | 27 |
| 7.2 | Speed Governor | 28 |
| 8 | POWER MANAGEMENT SYSTEM..... | 29 |
| 9 | AKSELIGENERAATTORI JA PTO/PTI-TEKNOLOGIA | 30 |
| 9.1 | Yleiskuvaus | 30 |
| 9.2 | Teknologian edut | 30 |
| 10 | SÄHKÖBILANSSI | 32 |
| 10.1 | Primääriset järjestelmät | 34 |
| 10.2 | Sekundääriset järjestelmät | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| 10.3 | Hotellikuorma..... | 35 |
| 11 | TAPAUSTUTKIMUS..... | 35 |
| 12 | TAPAUSTUTKIMUKSEN JÄRJESTELMIEN TARKASTELU..... | 36 |
| 12.1 | Pääkone ja vaihteisto..... | 36 |
| 12.2 | Akseligeneraattori..... | 37 |
| 12.3 | Sähköbilanssin analysointi..... | 37 |
| 12.4 | Alkuperäinen bilanssilaskenta..... | 38 |
| 12.5 | Sähköbilanssi verkkovaihtosuuntaajalla..... | 40 |
| 12.6 | Sähköbilanssin päivittäminen..... | 42 |
| 12.7 | Verkkovaihtosuuntaaja..... | 43 |
| 12.8 | LCL-suodatin..... | 46 |
| 12.9 | Päto- ja loistehon säätö Micro Grid tilassa..... | 47 |
| 12.10 | Parametrit..... | 50 |
| 12.11 | Tehokapasiteetti..... | 50 |
| 12.12 | Optimointi..... | 53 |
| 13 | MUUT TUOTANTOMUODOT..... | 55 |
| 13.1 | Hybridiakkujärjestelmä..... | 55 |
| 13.2 | Jänniteikkuna ja mitoitus..... | 55 |
| 13.3 | Jännitteen vaihtelu..... | 56 |
| 13.4 | Galvaaninen erotus..... | 56 |
| 13.5 | Akun hallinta..... | 56 |
| 13.6 | Ohjausjärjestelmät..... | 57 |
| 13.7 | Direct to DC Mikro Grid -tilassa..... | 57 |
| 13.8 | Mitoitus..... | 58 |
| 14 | JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 62 |
| 15 | LÄHTEET..... | 63 |

1 JOHDANTO

Merenkulku on merkittävien haasteiden edessä pyrkiessään vähentämään ympäristövaikutuksiaan. Kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n asettamat yhä tiukemmat säädökset, kuten energiatehokkaan suunnittelun indeksi EEDI (Energy Efficiency Design Index) ja energiatehokkuuden hallintasuunnitelma SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan), ohjaavat voimakkaasti kohti energiatehokkaampia ratkaisuja niin uusissa kuin olemassa olevissa laivoissa. EEDI:n konkreettiset tavoitteet uusille aluksille oli 20 %:n energiatehokkuuden parantaminen vuoteen 2020 mennessä ja 30 % vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteiden saavuttaminen vaati ja vaatii yhä innovatiivisia lähestymistapoja laivojen suunnitteluun ja operointiin. (Danfoss 2016b.)

Yksi keskeinen strategia energiatehokkuuden saavuttamiseksi on laivojen sähköjärjestelmien optimointi. Akseligeneraattoreita käytetään sähköenergian tuottamiseen laivan pääkoneen avulla ja se on osoittautunut tehokkaaksi ratkaisuksi. Tyypillisesti akseligeneraattorin käyttö johtaa alhaisempaan polttoainekulutukseen ja siten pienempiin päästöihin. Akseligeneraattorien hyödyntäminen voi merkittävästi alentaa laivan EEDI-arvoa ja tarjota kustannustehokkaan vaihtoehdon muihin energiatehokkuutta parantaviin toimenpiteisiin verrattuna. Aluksi pääasiassa vakionopeudella operoivissa suurissa aluksissa käytetyt akseligeneraattorit ovat tehoelektroniikan kehityksen myötä yleistyneet myös monipuolisemmissa laivatyypeissä ja ajoprofiileissa. (MAN Energy Solutions 2021.)

Tapaustutkimuksen laivassa on havaittu ongelma, jossa nykyinen sähköntuotanto ei riitä kattamaan laivan sähköverkon kuormitusta merellä seilatessa. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, pystytäänkö sähköntuotantoa lisäämään vai edellyttääkö tilanne sähkökuormien vähentämistä. Tämän selvittämiseksi tutkimuksessa tarkastellaan erityisesti laivan sähköbilanssia ja akseligeneraattorijärjestelmän kapasiteettia. Tutkimus rajautuu käsittelemään tapaustutkimuksen laivan teknisiä ominaisuuksia. Taloudellisia vaikutuksia, kuten investointikustannuksia ei tarkastella. Samoin tutkimuksen ulkopuolelle jäävät ympäristövaikutuksiin, kuten päästöjen minimointiin liittyvät näkökulmat.

2 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT

Merenkulun siirtyessä kohti energiatehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä ratkaisuja, laivojen sähköntuotanto- ja jakelujärjestelmien optimointi on noussut keskeiseksi kehityskohteeksi. Kansainväliset säädökset kuten IMO:n EEDI- ja SEEMP-vaatimukset ohjaavat varustamoja etsimään uusia teknologioita, joilla polttoaineen kulutusta ja päästöjä voidaan vähentää.

Tämän opinnäytetyön taustalla on havainto tapaustutkimuksen kohteena olevan aluksen sähköntuotannon riittämättömyys laivan seilatessa merellä. Erityisesti akseligeneraattorijärjestelmän kapasiteetti on osoittautunut rajalliseksi tilanteissa, joissa sähköverkon kuormitus on noussut tavallista korkeammaksi. Tämä herättää tarpeen arvioida laivan sähköjärjestelmän toimivuutta ja mahdollisia kehityskohteita.

Työtä voidaan pitää teoreettisena tutkimuksena, jossa tapaustutkimuksen kohteena olevasta laivasta pyritään hahmottamaan saatavilla olevien dokumenttien ja aiemman kirjallisuuden avulla selityksiä nykyiseen tilanteeseen ja esittää kirjallisuuden perusteella mahdollisia ratkaisuja. Ydintehtävänä on vastata kolmeen tutkimuskysymykseen:

- 1. Miten akseligeneraattorijärjestelmän kapasiteetti ja sähköverkon kuormitus kohtaavat nykyisellä järjestelmäkonfiguraatiolla?*
- 2. Voidaanko järjestelmää optimoida ilman laajamittaisia investointeja?*
- 3. Tarvitseeko sähkökuormaa vähentää merellä seilatessa?*

Toimeksiantaja on pyytänyt selvittämään, voidaanko akseligeneraattorijärjestelmää tehostaa nykyisiä komponentteja hyödyntäen vai edellyttääkö tilanne sähkönkulutuksen rajoittamista tai kuluttajien energiatehokkuuden optimointia.

2.1 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyössä hyödynnetään tapaustutkimukseen perustuvaa lähestymistapaa, jossa tarkastellaan yksityiskohtaisesti tapaustutkimuksen laivan sähköntuotantojärjestelmää. Empiirinen aineisto koostuu toimeksiantajalta saaduista

teknisistä dokumenteista. Teoreettista pohjaa tukevat aiheeseen liittyvä kirjallisuus, tekniset julkaisut, standardit sekä aiemmat tutkimukset laivojen sähköjärjestelmistä. Käytettyjä analyysimenetelmiä ovat bilanssilaskenta ja sähkötekniset laskelmat tapaustutkimusta tehdessä.

2.2 Työn rajausta ja rakenne

Työn teoreettinen osuus, eli luvut 3–9 rakentuvat alusten sähköjärjestelmien toimintaperiaatteisiin yleisellä tasolla. Tarkastelun kohteena ovat sähköverkon jakelutavat (esim. IT-järjestelmä), generaattoreiden kuormitustyypit (induktiivinen, kapasitiivinen, resistiivinen), sähköntuotantoteknologiat sekä ohjaus- ja säätöjärjestelmät (AVR, nopeudensäädin, PMS). Tarkastelu syventyy erityisesti sähköbilanssiin, ja loistehon hallintaan. Teoreettisen osuuden tarkoituksena on tarjota lukijalle riittävä perusymmärrys tapaustutkimuksessa käsiteltävistä aiheista.

Työ rajautuu vain tapaustutkimuksen kaltaisen laivan sähköjärjestelmien tekniiseen tarkasteluun. Työssä ei käsitellä taloudellisia tai ympäristöön liittyviä vaihtokuituksia. Opinnäytetyön rakenne on seuraava:

- Luvut 3-6 esittelevät laivan sähköjärjestelmien komponentit ja toimintaperiaatteet
- Luku 7-10 syventyy ohjausjärjestelmiin, akseligenaattoriteknoologiaan ja sähköbilanssiin
- Luvut 11-14 muodostavat tapaustutkimukset, jossa selitetään tutkitavan osa-alueen toiminta ja tehdään havaintoja, laskelmia ja suosituksia sähköntuotannon optimoimiseksi

3 LAIVAN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Laivan sähköjärjestelmän rakenne on verrattavissa maavoimalaitosten varavoimalaitoksiin. Se on yksittäinen generaattorilaitos, joka sisältää useita generaattoreita, jotka voidaan kytkeä rinnakkain laivan päätauluun. Päätaulu syöttää laivan sähkön käyttäjiä eli kuormaa. Laivan sähköjärjestelmä koostuu kolmesta osa-alueesta: sähkön tuotannosta generaattoreilla, sähkön jakelusta valitun verkkorakenteen kautta ja sähkön kuluttajista. (Giufriida 2013, 12.)

Nykyisissä laivoissa generaattorit kytketään vaatimusten mukaisilla katkaisijoilla päätaulun kiskoon. PMS eli tehonhallintajärjestelmä (engl. Power Management System) vastaa generaattoreiden kytkemisestä ja katkaisusta laivan sähköverkkoon automaattisesti mittaamalla kullakin hetkellä verkon kokonaistehon kysyntää. Tämä mahdollistaa generaattoreita pyörittävien voimakoneiden optimaalisen hyötysuhteen. (Giufriada 2013, 12-13.)

Sähköjärjestelmän rakenteen ja laitteiston määrittävät laivan käyttötarkoitukseen parhaiten sopiva malli suhteessa potkurikoneistoon. Laivat vaativat mekaanista energiaa sekä propulsioon, että sähköntuotantoon. Mekaanisten ja sähköisten järjestelmien perusteella laivoihin valitaan toinen kahdesta propulsioratkaisusta. (Patel 2012, 35.)

- Mekaaninen propulsio
- Sähköinen propulsio

Tässä opinnäytetyössä perehdytään tarkemmin tutkimuskohteen sähköverkkoon, jossa on perinteinen mekaaninen potkurikoneisto, ja sitä tukeva sähköjärjestelmä.

4 LUOKITUSLAITOKSET

Luokituslaitokset ovat yksityisiä organisaatioita, jotka toimivat merenkulualalla. Niiden tehtävänä on tuottaa luokituslaitoskohtaisesti kriteerit laivojen tarkastamiseen, jotka pohjautuvat yleisesti alaa koskeviin standardeihin, lainsäädäntöön ja luokituslaitosten omaan tutkimukseen. Luokituslaitoksen tehtävänä on varmistaa laivan teknisten ominaisuuksien ja turvallisuusvaatimusten täyttyminen. Luokituslaitoksen asiantuntijat tarkistavat ja hyväksyvät kullekin laivalle asetettujen vaatimusten täytymisen, jonka jälkeen myöntävät laivalle luokituksen. Saavutettu luokitus kategorisoidaan tiettyyn luokkaan, joka kuvastaa kyseisen laivan ominaisuuksia. Luokka merkitään luokitustodistukseen ja rekisteriin. Kunkin laivan luokitus kertoo tietoja laivan turvallisuudesta ja teknikasta eri sidosryhmille, kuten varustajille, laitetoimittajille, lippuvaltioille ja vakuutusyhtiöille. (Stähle 2015, 11.)

Kun varustaja hankkii uuden laivan, hän valitsee laivalle luokituslaitoksen, joka vastaa laivan teknisten rakenteiden luokituksesta ja pakollisten sertifiointien suorittamisesta. Uudisrakennusten tapauksessa luokituslaitos valitaan jo suunnitteluvaiheessa, ja se osallistuu laivan tarkistuksiin aina rakennusvaiheesta laivan elinkaaren loppuun asti. Rakentamisen aikana voimassa olleet luokitusvaatimukset pysyvät yleensä voimassa koko laivan käyttöajan. (Stähle 2015, 11.)

Keskeisiä kansainvälisiä sopimuksia, joita luokituslaitokset valvovat, ovat IMO (International Maritime Organization) säännökset, kuten SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea), MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), ICLL (International Convention on Load Lines), ISM-koodi (International Safety Management Code) ja ISPS-koodi (International Ship and Port Facility Security Code). Näiden määräysten noudattaminen on välttämätöntä kaupalliselle merenkululle. (Stähle 2015, 11.)

Suomen liikenne ja viestintävirasto Traficom on tehnyt sopimuksen laivojen katsastamisesta seuraavien luokituslaitosten kanssa:

- American Bureau of Shipping
- Bureau Veritas
- Lloyd's Register
- RINA Services S.p.A.
- Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)
- DNV

Nämä valtuutetut luokituslaitokset voivat tarkastaa suomalaisen aluksen SOLAS-, MARPOL- ja lastiviivayleissopimusten mukaisesti ja myöntää tarvittavat turvakirjat näiden tarkastusten perusteella. Lisäksi luokituslaitos voi hyväksyä kaikki alukseen liittyvät dokumentit, jotka edellyttävät hyväksyntää, sekä suorittaa ISM- ja ISPS-auditoinnit. (Traficom 2022.)

4.1 Sähköasennusten vaatimukset

Luokituslaitokset ja maailmanlaajuiset standardien julkaisuorganisaatiot laativat suosituksia koskien laivan sähköasennuksia. Standardien noudattaminen ei ole pakollista, ellei niitä ole erikseen määritetty pakollisiksi luokituslaitoksen

toimesta. Standardien noudattamista pidetään kuitenkin yleisesti hyvänä käytäntönä, koska ne varmistavat laivan toiminnallisen tehokkuuden niin turvallisuuden, kuin teknisen luotettavuuden kannalta. Suurin osa sähkötekniikan suosituksista on johdettu IEC:n (International Electrotechnical Commission) standardista IEC 60092. (Patel 2012, 317.) Kuva 1 havainnollistaa eri organisaatioiden vaikutuksen lopullisiin ratkaisuihin koskien laivan sähköjärjestelmiä.

SOLAS-yleissopimuksen luku II-1 käsittelee laivan rakennetta, vakautta, koneita ja sähköasennuksia. Luvun D-osio käsittelee sääntöjä ja vaatimuksia, joista Traficom linjaa tiivistetysti seuraavasti:

- Laivan sähköasennusten ja sähkölaitteiden olla IEC 60092 -standardin mukaisia tuotannon, valmistuksen ja kunnossapidon osalta. Koko laivan sähköjärjestelmä tulee toteuttaa yhtenäisesti vastaamaan standardin vaatimuksia.
- Sähkön tuotantojärjestelmien ja valaistusjärjestelmien tulee olla hyväksytty Traficin toimesta
- Hätäsähkölähteen sijainti matkustaja- ja rahtialuksissa on suunniteltava siten, että ne eivät sijaitse laivan rakenteessa pystysuorassa vyöhykkeessä kuin päävirtalähteet ja pääkytkintaulut. Trafi voi sallia rahtilaitteille poikkeuksia näihin sääntöihin
- Hätäkoneen käynnistystä varten on kylmillä alueilla oltava lämmityslaitteet nopeaa käynnistämistä varten. Käynnistystoimintojen tulee oltava esillä dokumentoituna.
- Siirrettävät sähkölaitteet, joissa on suuri johtavuusriski, ja ovat sijoitettuna suljettuun tai märkään tilaan sovelletaan seuraavaa:
 1. Laitteita tulee syöttää SELV-piiriin kautta
 2. Laitetta syötetään suojaerotusmuuntajan kautta vain yhden laitteen ollessa kytkettynä yhteen toisiopiiriin.
 3. Yli 50V AC/DC paljaat jännitteiset osat ei ole sallittu ja saman jännitetaso laitteistojen tulee olla vähintään IP2X luokan kotelosuojattuja.
- Kaapelit tulee olla IEC 60331 ja IEC 60332 -standardien mukaisia. Muut järjestelyt on hyväksyttävä Traficin toimesta.
- Akkujärjestelmät, joiden latausteho on alle 0,2 kW ja jotka eivät vapauta syttyviä tai vaarallisia kaasuja ladattaessa voidaan sijoittaa majoitus- ja työskentelytiloihin, jos ne on suojattu huolellisesti. IEC 60092-502 määritellyillä vaarallisilla alueilla asennusten osalta on tehtävä riskinarviointi ja toimitettava se Trafille. (Traficom s.a.)

Toiminnalliset vaatimukset ottavat kantaa enemmän laivan operatiiviseen toimintavalmiuteen. Jatkuvan sähkönsyötön tarpeellisuuden vuoksi laivassa on oltava kaksi toisistaan riippumatonta sähköjärjestelmää:

- Pääsähköjärjestelmä
- Hätäsähköjärjestelmä

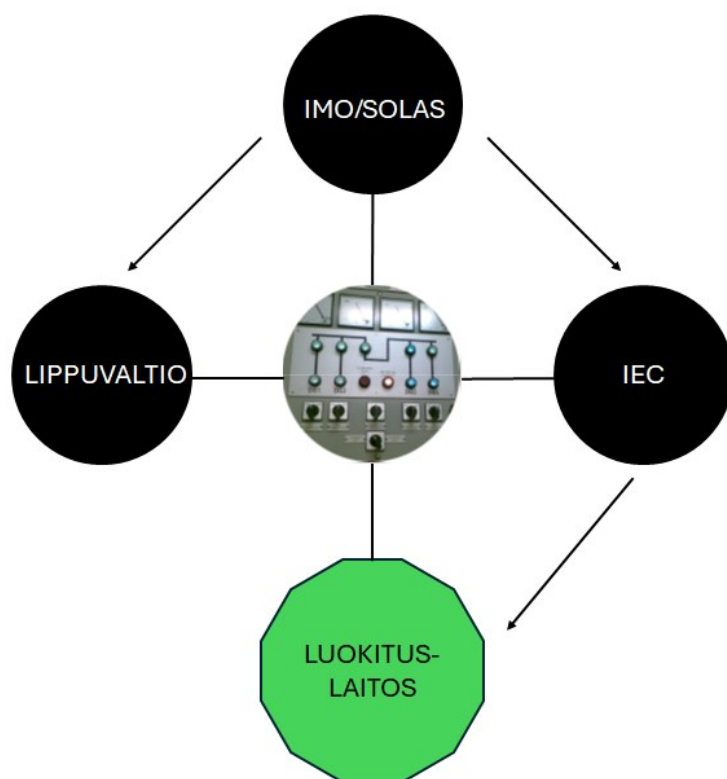
Normaalissa tilanteessa käytettäessä pääsähköjärjestelmää tulee päätaulun kautta syötetyn kuorman olla katettavissa ilman hätäsähköjärjestelmää. Tämä tarkoittaa toimintoja, jotka tarvitaan laivan normaaliin operointiin. Hätätilanteessa sähkönsyöttö erikseen määritellylle kuormalle tulee olla toteutettavissa pääsähköjärjestelmästä riippumattomalla hätäsähköjärjestelmällä. Normaali-tilanne implikoi käyttöolosuhdetta, johon ei sisälly keula- ja peräpotkurit, vinssit ja vintturit, lastipumput ja muut lastinkäsittelylaitteet sekä ilmastointikoneikon jäähdytyspiiri. (IMO 2017.)

Generaattoreille sähköntuotantomenetelmänä asetetaan seuraavat toimintaolosuhteet: Laivan generaattorit hyväksytään osaksi laivan pääsähköjärjestelmää, jos ne pystyvät toimimaan kaikissa sääolosuhteissa ja laivan ollessa pysähdyksissä IEC 60092-301 ja IACS UR E5 standardien määrittelemien jännitteen ja taajuuden puitteissa. Generaattoreiden näennäistehon tuotto tulee olla suojattu edellä mainitussa normaalitilanteessa ja kokonaistuotantokapasiteetin tulee riittää normaalitilanteen toimintoihin, vaikka joku generaattoreista pettäisi. (IMO 2017.)

Generaattorin/generaattoreiden oikosulkuvirran tulee olla riittävä laukaisemaan generaattorikatkaisija huomioon ottaen suojauslaitteiden selektiivisyyden. Generaattoreilla tulee olla oma oikosulkusuojaus päätaulussa tapahtuvan oikosulun varalta, ja generaattorijärjestelmän tulee olla toimintakykyinen vian poistamisen jälkeen. Vikatilanteessa kokonaistuotantokapasiteetin tulee säilyä riittävänä normaalitilanteen toimintoihin käynnistämällä stand-by-generaattoreita tuotannon varmistamiseksi. (IMO 2017.)

Generaattoreiden rinnakkaiskäytössä ja kuormitetussa verkossa turvallisen operoinnin kannalta on äärimmäisen tärkeää, että operoinnin kannalta välttämättömien laitteiden syöttö on turvattu toissijaisten kuormien automaattisella poiskytkennällä. Tällä varmistetaan, ettei generaattorit ylikuormitu. (IMO 2017.)

Mikäli verkkoa syötetään vain yhdellä generaattorilla, tulee stand-by generaattoreiden olla automaattisesti käynnistettävissä ja kytkettävissä päätauluun black-out-tilanteessa. Stand-by-generaattoreiden kapasiteetin on katettava olennaisten apulaitteiden automaattinen uudelleenkäynnistys ja generaattorin on käynnistytävä ja kytkeydyttävä päätauluun 30 sekunnin kuluessa sähkökatkoksesta. (IMO 2017.)



Kuva 1. Standardien ja lainsäädännön yhteenveto (ABB 2019)

5 SÄHKÖVERKKO LAIVALLA

Laivan sähköverkko on useimmiten toteutettu kolmivaihejärjestelmällä taajuusalueen ollessa 50 Hz tai 60 Hz. Pienjänniteverkossa liikutaan 120 V-690 V jännitealueella keskijänniteverkkojen ollessa 3 kV ja 11 kV välillä. Taulukossa 1 on esitelty laivan jännitetasot taajuuden suhteen. Apulaitteistot kuten ohjausjärjestelmät, automatiikka, UPS-laitteet ja akut vaihtelevat jännitetasoltaan ja ne käyttävät vaihto- tai tasavirtaa. (Giufriida 2013, 15.)

Taulukko 1. Laivan jännitetasot taajuuden suhteen (Hyytiä 2012)

| | | Jännite (V) | | | | | | | |
|-------------|-------|-------------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| Taajuus (f) | 50 Hz | X | 230 | 400 | 690 | 1000 | 3000 | 6000 | 10500 |
| | 60 Hz | 110 | X | 440 | 690 | 1100 | 3300 | 6600 | 11000 |

5.1 IT-jakelujärjestelmä

Laivaverkoissa käytetään IT-järjestelmää, jossa sähköverkon maadoitus voidaan toteuttaa kahdella tavalla:

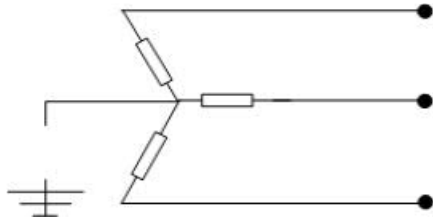
- Maasta erotettu järjestelmä
- Maadoitettu järjestelmä suuren impedanssin kautta laivan runkoon
- Maadoitettu järjestelmä pienjännitelaitteistoille

Käytännössä tämä toteutuu laivan sähköjärjestelmissä eri maadoitustekniikoilla. Keskijänniteverkko, jolla tässä tapauksessa tarkoitetaan generaattoreita, päätaulua ja suuria kuluttajia laivan todellisesta jännitetasosta riippumatta, maadoitetaan yleensä suuriohmisella vastuksella generaattoreiden staattorikäämien nollapisteestä. Toinen vaihtoehto on kytkeä päätaulun kiskoon maadoitusmuuntaja, jonka suuri impedanssi rajoittaa maasulkuvirtoja. Pienjänniteverkko sen sijaan saatetaan jättää täysin kelluvaksi suojaerotusmuuntajien avulla. (Hyytiä 2012, 14.)

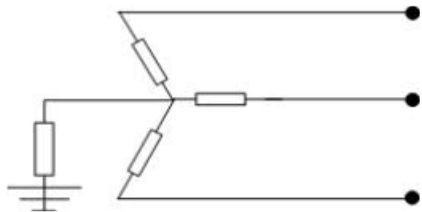
Maasta erotetussa verkossa mitään jännitteistä osaa ei ole yhdistetty suoraan maahan, jolloin yksivaiheinen maasulku ei aiheuta käyttöä katkaisevaa vikavirtaa. Vikavirran suuruus on riippuvainen kahden muun vaiheen maakapasitanssin arvosta rajoittaen vikavirran niin pieneksi, ettei asennukseen synny vaarallista kosketusjännitettä. Riippumatta nollapisteen maadoittamattomuudesta tässä asennustavassa laitteiden rungot ovat aina maadoitettu henkilöturvallisuuden vuoksi. (Patel 2012, 193.)

Impedanssin avulla maadoitetun tähtipisteen ja yhden vaiheen välinen vikavirran suuruus määräytyy impedanssin arvon mukaan. Impedanssin arvon tulee mahdollistaa havaittava vikavirta. Tämä tarkoittaa sitä, että vikapaikan ja tähtipisteeseen kytketyn impedanssin välillä oleva maasulkuvirta on yhtä suuri kuin maakapasitanssin kapasitiivinen virta. Impedanssin Z arvo mitoitetaan 5-6-

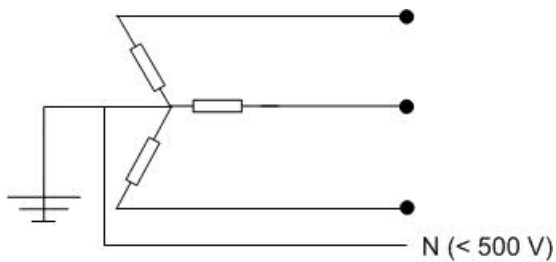
kertaiseksi vaihejännitteeseen nähden. Impedanssin eli komponenttina maadoitusvastuksen mitoittamiseen vaikuttaa sen kyky rajoittaa vikavirtaa, mutta myös estää suojareleiden virheellinen toiminta. (Hietalahti 2013, 127.) Seuraavissa kuvissa esitetään 3-vaiheverkon maadoitustyyppit (ABB 2019.)



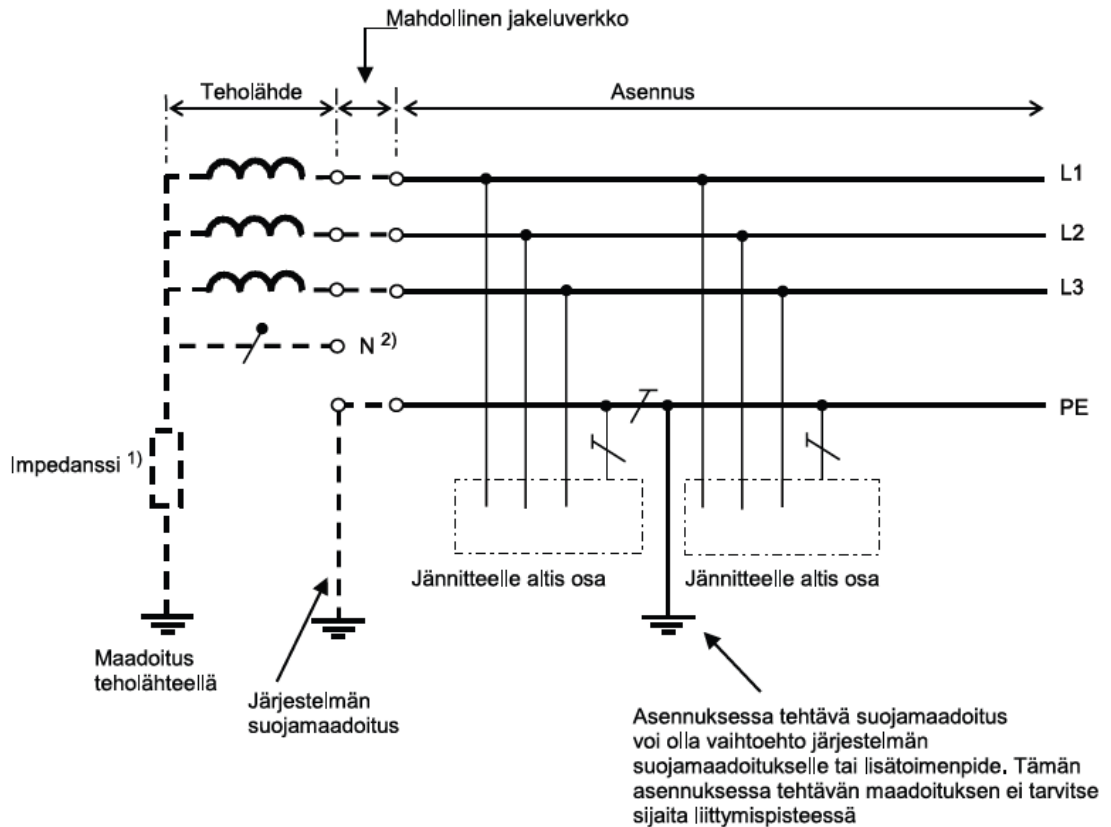
Kuva 2. Maasta erotettu järjestelmä (IT), pienjänniteverkot < 1 kV (ABB 2019)



Kuva 3. Suuren impedanssin avulla maadoitettu järjestelmä > 1 kV (ABB 2019)



Kuva 4. Pienjänniteverkot yleisesti vain konehuoneen ulkopuolella < 500 V (ABB 2019)



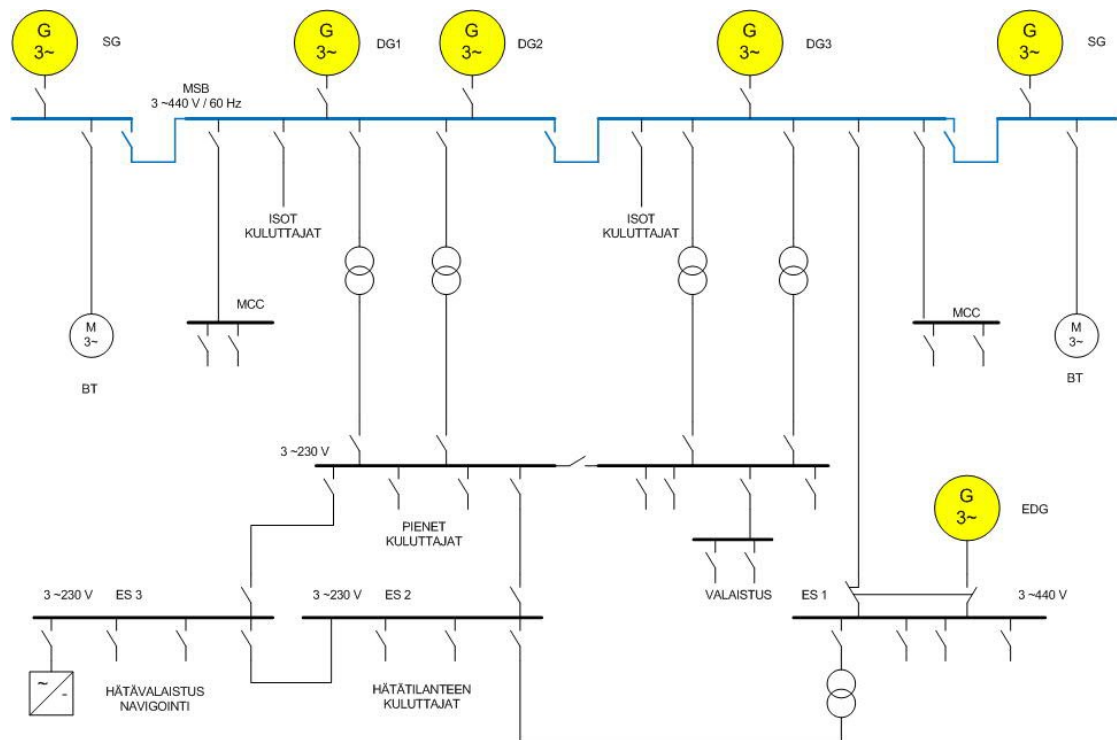
Kuva 5. IT-järjestelmä, jossa jännitteelle alttiit osat on yhdistetty samalla suojamaadoitusjohtimella. (SFS 6000-1:2020, 55)

Kuvan 5 IT-järjestelmän potentiaalintasauksen tehtävänä on luoda mahdollisimman pieni-impedanssinen reitti vikakohteesta asennuksessa käytettäville suojalaitteille. Laivalla tämä joissain tapauksissa tarkoittaa maadoituksen osalta sitä, että päätaulun kisko on yhdistetty ryhmäkeskuksia syöttävien syöttöjohtimien PE-johtimien ja kuormalaitteita syöttävien johtimien PE-johtimen avulla samaan potentiaaliin, ja siten myös jännitelähteen tähtipisteeseen. Potentiaalintasaustuksella huolehditaan siitä, että kosketusjännite ei nouse vikatilanteessa vaaralliselle tasolle, ja vika voidaan havaita maavuodon valvontareleillä aina sähköjakelujärjestelmän alkupäässä. (Savolainen 2018, 24.)

IT-sähköjärjestelmän selvä etu on se, ettei yksivaiheinen maasulku aiheita käyttökatkosta. Kaksoismaasulussa kosketusjännite voi nousta aina täyden vaihejännitteen tasolle vikavirtojen ollessa kahden vaiheen välisen oikosulkuvirran suuruisia. Maavuotoja valvotaan hyödyntämällä jännitemittamuuntajia ja virtamittamuuntajia. Niiden yhteyteen kytketyt valvontareleet havaitsevat järjestelmän virran ja jännitteen epätasapainoa, jotta mahdolliset vikatilanteet saadaan paikannettua ja korjattua mahdollisimman nopeasti. (Hietalahti 2013, 125.)

5.2 Sähköverkon rakenne

Laivan sähkönjakelujärjestelmässä hyödynnetään säteittäistä tai silmukoitua jakelua. Kuorma on jaettu päätaulun ja muuntajien kautta syötettyjen aputaulujen kesken. Järjestelmä auttaa rajoittamaan oikosulkuvirtoja aputauluissa, jolloin syöttöjen oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa sulakkeilla. Aputaulut jaotellaan kuormalähtöjen perusteella, ja ne sijoitetaan lähemmäs kuormalaitteita kaapelipituuksien optimoimiseksi. Varmuuden lisäämiseksi päätaulu voi olla varustettu kaksoiskiskolla ja tärkeille kuluttajille on rakennettu kaksinkertainen syöttö. (Hietalahti 2013, 123 – 126.)



Kuva 6. Tyypillisen Ro-Pax aluksen single-line. (ABB 2019)

Tyypillisen Ro-Pax aluksen sähköverkon rakenne perustuu sähköntuotannon ja jakelun osalta seuraavasti:

1. Sähköntuotanto

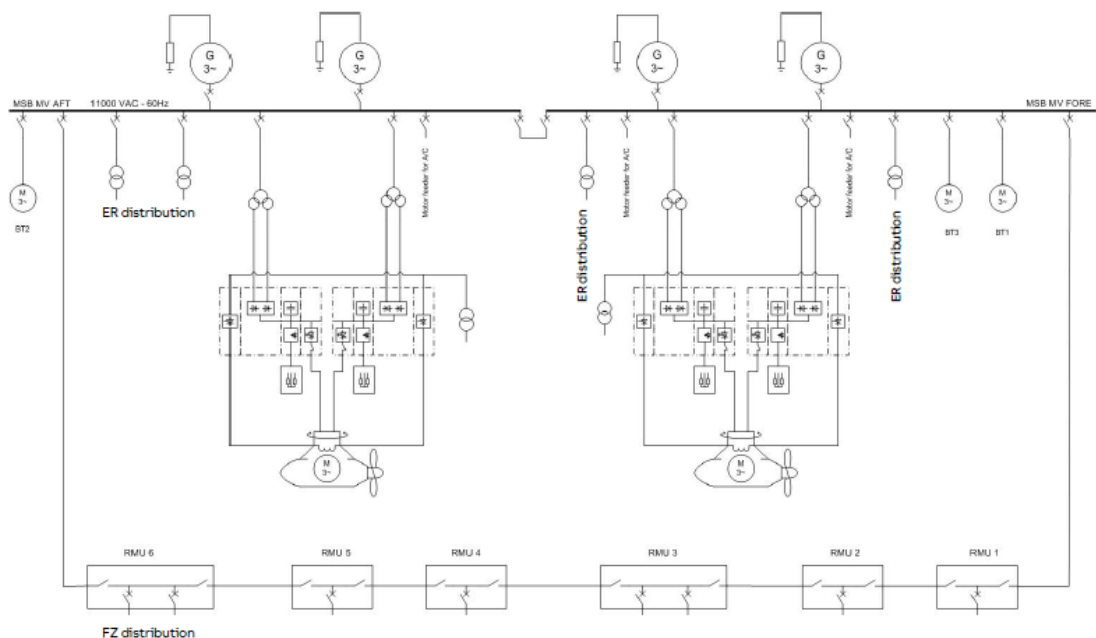
- Apukoneita (DG) käytetään lähtökohtaisesti satamassa ja manööverauksen aikana
- Akseligeneraattoreita käytetään ainoana tuotantomenetelmänä merellä, ja manööverauksessa tukemaan thrustereita

2. Jakeluverkko

- Kiskokatkaisijat keskusten ja generaattoreiden välillä
- Suuret kuluttajat kytketty 400V päätauluun
- Pienet kuluttajat ja valaistus kytketty 230V tauluun
- Hätätaulut on jaettu 400V ja 230V osiksi
- Hätägeneraattori syöttää hätätauluja hätätilanteessa (ABB 2019.)

Sähköpropulsiota hyödyntävien alusten sähköverkko eroaa hieman perinteisestä rakenteesta. Siinä propulsioteho tuotetaan samalla sähköntuotantojärjestelmällä kuin muu sähkökuorma. Järjestelmän tyypilliset ominaisuudet ovat seuraavanlaisia:

- Sähköntuotanto ja propulsiolaitteisto on erotettu pienjänniteverkosta
- Tuotanto on jaettu kahden eri vesitiiviin ja palo-osastoidun vyöhykkeen välille
- Propulsiolaitteiden moottorit ovat kytketty suurjännitetaulun kiskoon (HV-bus)
- Konehuoneen pienjänniteverkkoa syötetään muuntajien kautta. Syöttö on rakennettu redundanttiseksi
- Joka palo-osastolla on oma aputaulu, jota syötetään päätaulun ja aputaulujen muodostaman rengasverkkorakenteen avulla (HV-ring-net) (ABB 2019.)



Kuva 7. Tyypillisen sähköpropulsiojärjestelmää hyödyntävän risteilylaivan single-line. (ABB 2019)

Nykyisin laivoissa yleistyy myös tasasähköverkon hyödyntäminen, jonka osaltaan yleistynyt sähköisen propulsioon käyttö on tehnyt tarpeelliseksi. Tasasähköverkko eliminoi häviöt keskuksilla ja muuntajilla, ja mahdollistaa generaattoreiden ja dieselmootoreiden optimaalisen polttoainetehokkuuden suhteessa tarvittavaan propulsiotehoon. (Borstlap ym. 2011, 43.)

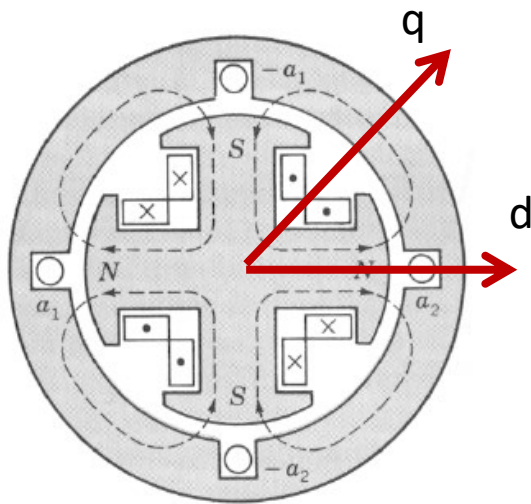
6 SÄHKÖN TUOTANTO

6.1 Dieselgeneraattorit

Laivan sähköntuotanto perustuu generaattoreihin ja niitä pyörittäviin voimakoneisiin. Laivageneraattorit ovat useimmiten avonapaisia harjattomasti magneetoituja tahtigeneraattoreita. Generaattoreiden valintaan vaikuttaa oleellisesti seuraavat parametrit: (Giufriada 2013, 15.)

- Laivan päätaulun jännite
- Sähköverkon kokonaiskulutus ja yhden generaattorin syöttökapasiteetti
- Generaattorin pitkittäisreaktanssi ($X''d$)
- Tehokerroin ($\cos\phi$)

Kuvassa 8 esitelty avonapageneraattorin roottorin rakenne poikkeaa umpinapageneraattorista sen epäsymmetrisellä rakenteellaan. Roottorissa on avonavat, joiden ympärille on käämitty magnetointikäimitys. Tällöin roottori on myös magneettisesti epäsymmetrinen, mikä johtaa siihen, että roottori hakeutuu magneettivuon kulun kannalta edullisimpaan asentoon. Tyypillisessä laivalla käytettävässä avonapageneraattorissa on 4–10 napaa, mikä mahdollistaa erilaisia pyörimisnopeuksia. (Balashov, 2011, 15.)



Kuva 8. Avonaparoottori. Navan suunta (d-akseli) johtaa hyvin magneettivuota. Napaväli (q-akseli) johtaa huonosti magneettivuota. (Suoniemi 2018)

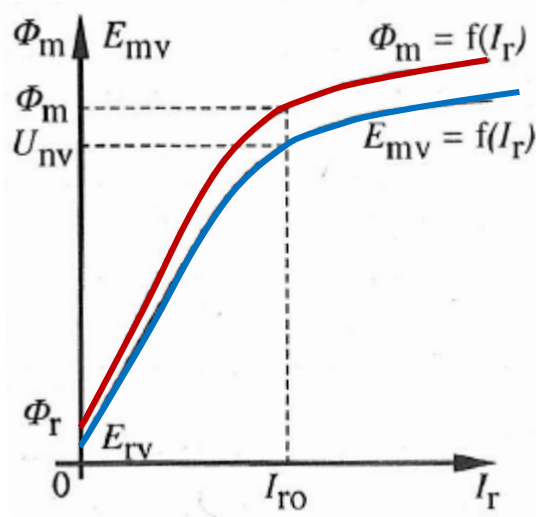
Vierasmagnetoiduissa tahtigeneraattoreissa voimakoneen pyörittämää roottoria magnetoidaan johtamalla tasavirtaa roottorin magneetomiskäämeihin. Tämä tasavirtainen magneetomismvirta synnyttää magneettivuon, joka roottorin pyöriessä leikkaa staattorin käämisauvoja indusoiden staattorikäämeihin lähdejännitteen. Lähdejännite on sinimuotoinen ja se vaihtelee käämijohtimien suhteen sinimuotoisesti kaavan 1 mukaan. (Hietalahti 2013, 47.)

$$E_{mv} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f k f N \varphi_m \quad (1)$$

Indusoituvan jännitteen taajuus on riippuvainen roottorin pyörimisnopeudesta ja koneen napapariluvusta kaavan 2 mukaisesti. (Hietalahti 2013, 48.)

$$n = \frac{60 * f / \text{Hz}}{p} \frac{r}{\text{min}} \quad (2)$$

Pyörimisnopeuden ollessa vakio indusoituneen jännitteen tasoa voidaan säätää muuttamalla koneen magneettivuon suuruutta. Kuvassa 9 esitetään lähdejännitteen muodostumista magneetomismvirran funktiona. (Hietalahti 2013, 48.)



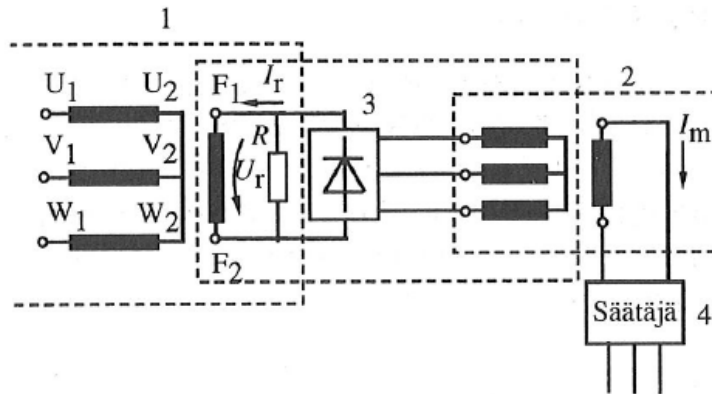
Kuva 9. Lähdejännite magnetoimisvirran funktiona (Suoniemi 2018)

- Magnetoimisvirran ollessa nolla, roottorin remanenssi vuosta syntyy pieni lähdejännite E_{rv} .
- Magnetointia kasvattaessa lähdejännite kasvaa lineaarisesti magnetoimisvirran kanssa.
- Magneetti piiriin kyllästyessä lähdejännitteen kasvu hidastuu (Hietalahti 2013, 48.)

6.2 Harjaton magnetointi

Roottorin magnetointikäymykseen syötettävällä säädettävällä magnetoimisvirralla pystytään suoraan säätämään generaattorin staattorin liitinjännitettä, sekä pätö-loistehosuhdetta. Roottorin magnetointi tapahtuu harjattomasti magnetointikoneen avulla. Magnetointikone on sijoitettu samalle akselille generaattorin kanssa ja sen toiminta voidaan jakaa (Hietalahti 2013, 49) mukaan kolmeen vaiheeseen:

1. Magnetointikoneen staattoriin syötetään tasavirtaa, jolloin staattoriin syntyy staattinen tasavuo. Päägeneraattorin kanssa samalle akselille sijoitettu pyörivä magneettikoneen roottori näkee tämän pyörivänä magneettivuona.
2. Roottori pyörii tämän magneettikentän sisällä, jolloin roottoriin indusoituu vaihtovirta ilman hiiliharjoja tai liukurenkaita.
3. Roottoriin indusoitunut vaihtovirta tasasuunnataan, jotta saadaan tasavirtaa päägeneraattorin roottorin magnetointiin. Tasasuunnauksen avulla saadaan jatkuvaa tasavirtaa, joka ylläpitää päägeneraattorin roottorin magneettivuota ja siten tasaista jännitteen tuottamista.



Kuva 10. Tasavirtaa syötetään generaattorin staattorin magnetointipiiriin, jossa tasavirta indusoituu roottorin magnetointikämmitykseen. (Aura 1996, 219)

6.3 Generaattorin kuormitus

Tutkitaan avonapaisen tahtigeneraattorin toimintaa, kun generaattoria kuormitetaan induktiivisesti, kapasitiivisesti ja resistiivisesti.

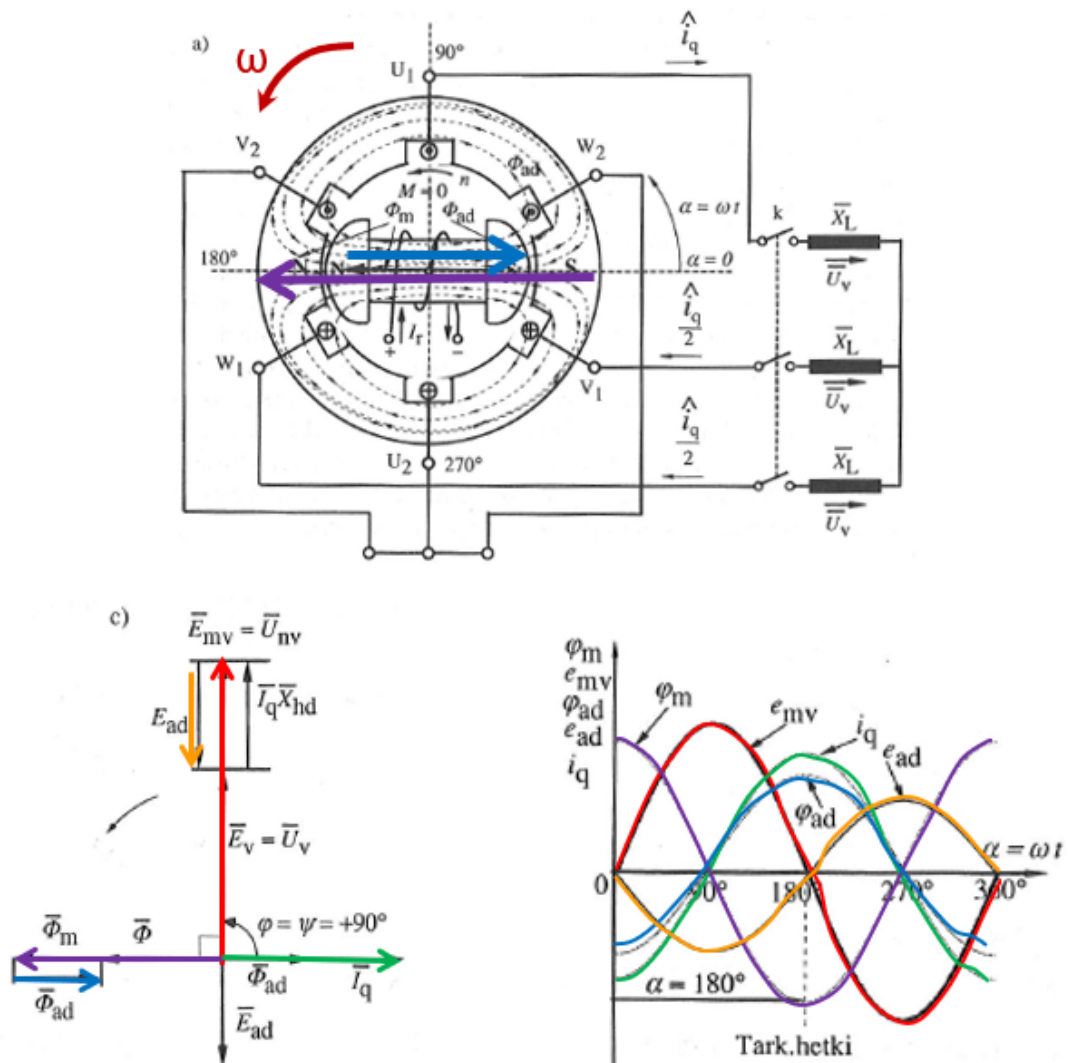
6.3.1 Induktiivinen kuormitus

Kun generaattoriin kytketään induktiivinen kuorma, syntyy staattorivirta, joka on induktiivista loisvirtaa. Tämä loisvirta I_q on 90° jäljessä päälähdejännitettä E_{mv}

Staattorivirta tuottaa staattorivuon φ_a , joka on samanvaiheinen staattorivirran kanssa ja muodostaa pyörivän ankkurikentän. Tämä ankkurikenttä pyörii samaan tahtiin generaattorin napakäämin magnetoimisvirran synnyttämän pääkentän φ_m kanssa.

Induktiivinen loisvirta aiheuttaa pitkittäisen vastakentän φ_{ad} , joka on vastakkainen päävuolle φ_m . Tämän seurauksena ankkurivuo φ_{ad} indusoi staattorin vaihekäämeihin päälähdejännitteelle vastakkaissuuntaisen jännitteen E_{ad} , mikä pienentää staattorin liitinjännitettä. Tätä ilmiötä kutsutaan jännitteen alenemiseksi.

Jännitteen alenemaa voidaan kompensoida ylimagnetoimalla generaattoria eli kasvattamalla napakäämin magnetoimisvirtaa yli perusmagnetoinnin. Näin voidaan varmistaa, että generaattorin ulostulojännite pysyy nimellisarvossaan, vaikka kuormitus olisi induktiivista. Induktiivinen loisvirta ei tuota sähköistä vääntömomenttia. (Aura 1996, 220.)



Kuva 11. Induktiivinen kuormitus. (Aura 1996, 220)

6.3.2 Kapasitiivinen kuormitus

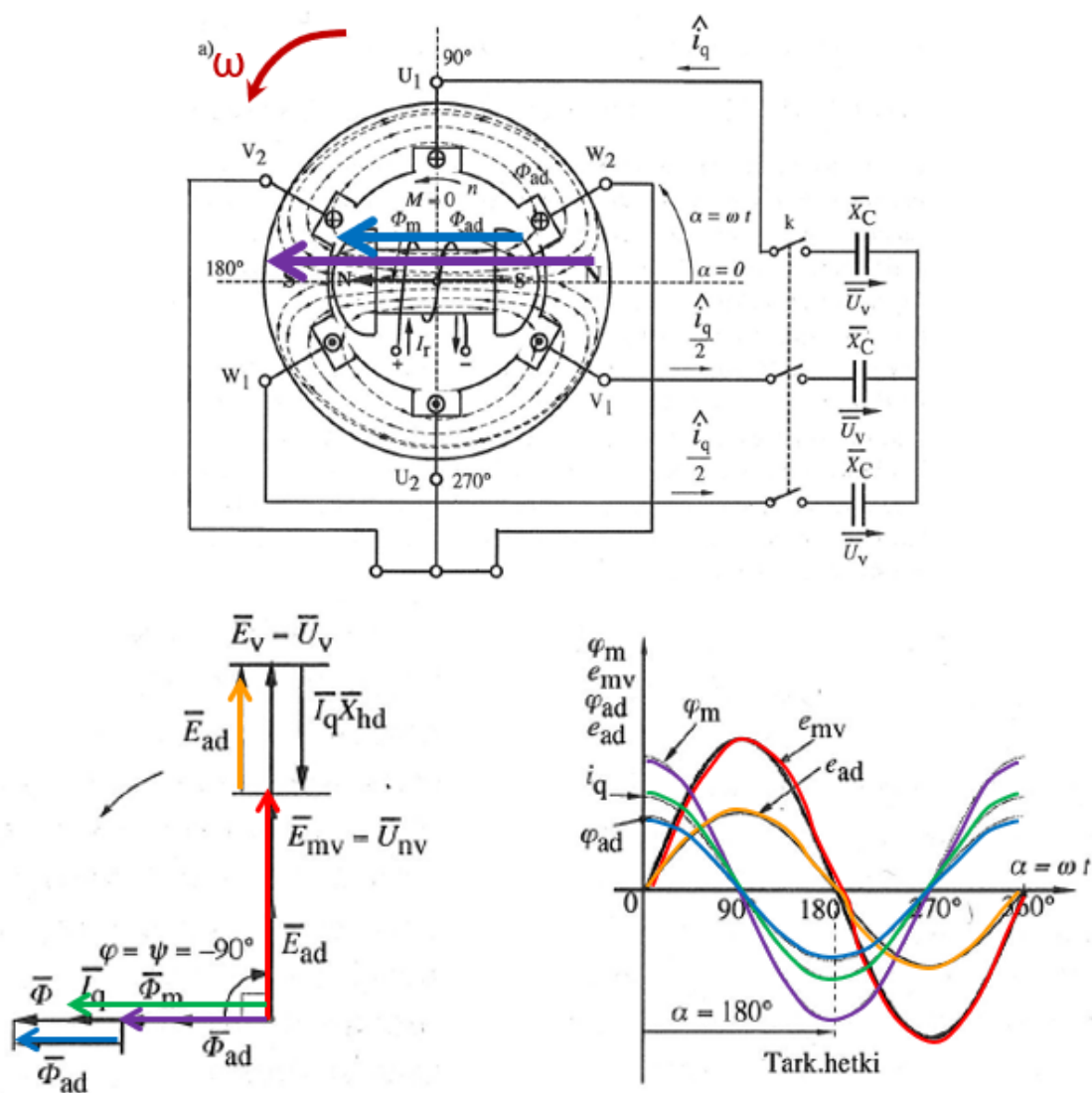
Kun generaattoriin kytketään kapasitiivinen kuorma, syntyy staattorivirta, joka on kokonaan kapasitiivista loisvirtaa. Tämä loisvirta i_q on 90° edellä päälähdejännitettä E_{mv} .

Staattorivirta tuottaa staattorivuon ϕ_a , joka on samanvaiheinen staattorivirran kanssa, muodostaen pyörivän ankkurikentän. Tämä ankkurikenttä pyörii samaan tahtiin generaattorin napakäämin magnetoimisvirran synnyttämän pääkentän ϕ_m kanssa.

Kapasitiivinen loisvirta aiheuttaa pitkittäisen myötäkentän ϕ_{ad} , joka on samansuuntainen päävuolle ϕ_m . Tästä seuraa, että pyörivä ankkurivuo ϕ_{ad} indusoi

staattorin vaihekäämeihin päälähdejännitteen kanssa samansuuntaisen jännitteen E_{ad} mikä suurentaa staattorin liitinjännitettä. Tätä ilmiötä kutsutaan jännitteen suurenemiseksi.

Jännitteen suurenemaa voidaan kompensoida alimagnetoimalla generaattoria, eli pienentämällä napakäämin magnetoimisvirtaa alle perusmagnetoinnin. Näin voidaan varmistaa, että generaattorin ulostulojännite pysyy nimellisarvossaan, vaikka kuormitus olisi kapasitiivista. Kapasitiivinen loisvirta ei tuota sähköistä vääntömomenttia. (Aura 1996, 223.)



Kuva 12. Kapasitiivinen kuorma. (Aura 1996, 223)

6.3.3 Resistiivinen kuormitus

Kun tahtigeneraattoriin kytketään resistiivinen kuorma, päälähdejännitteen E_{mv} ja kuormitusvirran i_p välille ei muodostu vaihesiirtoa, vaan ne pysyvät samassa vaiheessa. Koska generaattorilla on sisäistä induktanssia, resistiivisen kuorman kanssa täytyy käyttää sarjakapasitanssia, joka kompensoi tätä vaikutusta ja mahdollistaa jännitteen ja virran pysymisen samassa vaiheessa.

Staattorivirta luo ankkurivuon φ_{aq} joka on samanvaiheinen kuormavirran kanssa mutta jäljessä päävuota φ_m 90° . Tällöin generaattoriin muodostuu kaksi pyörivää magneettikenttää:

1. Pääkenttä φ_m , joka syntyy napakäämin magnetoimisvirrasta.
2. Ankkurikenttä φ_a joka syntyy staattorin kuormitusvirrasta.

Molemmat kentät pyörivät tahdissa, mutta resistiivinen kuormitusvirta synnyttää napapyörään nähden poikittaisen ankkurivuon φ_{aq} , joka on päävuon suhteen 90° jäljessä. Tämä poikittainen ankkurikenttä aiheuttaa voimavaikutuksia napojen välille, mikä synnyttää sähköisen vääntömomentin generaattorin ilmapäliin.

- Kun generaattoriin kytketään kuorma, staattorin kuormitusvirta kasvaa, mikä voimistaa ankkurikenttää φ_a . Poikittainen ankkurivuo φ_{aq} vaikuttaa voimakkaammin sähköiseen vääntömomenttiin, koska se on pääkenttää φ_m 90° jäljessä.
- Poikittainen ankkurivuo pyrkii vetämään pääkenttää φ_m samaan suuntaan, mutta koska roottori on mekaanisesti pyörivä komponentti, syntyy kulmaero δ pääkentän ja ankkurikentän φ_a välille. (Aura 1996, 225.)

Mitä suurempi kuormitusvirta, sitä suurempi on ankkurikenttä φ_{aq} , mikä kasvattaa kulmaa δ . Tätä kulmaa kutsutaan napakulmaksi.

Avonapaisen tahtigeneraattorin pätöteho P on suoraan riippuvainen napakulmasta δ . Koneen antama pätöteho kasvaa kaavan 3 mukaisesti.

$$P = 3 \left[\frac{U_s U_f}{X_d} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] \quad (3)$$

Jossa

$$\frac{U_s U_f}{X_d} \sin \delta$$

on magnetoidulla roottorilla saatavaa
tehoa

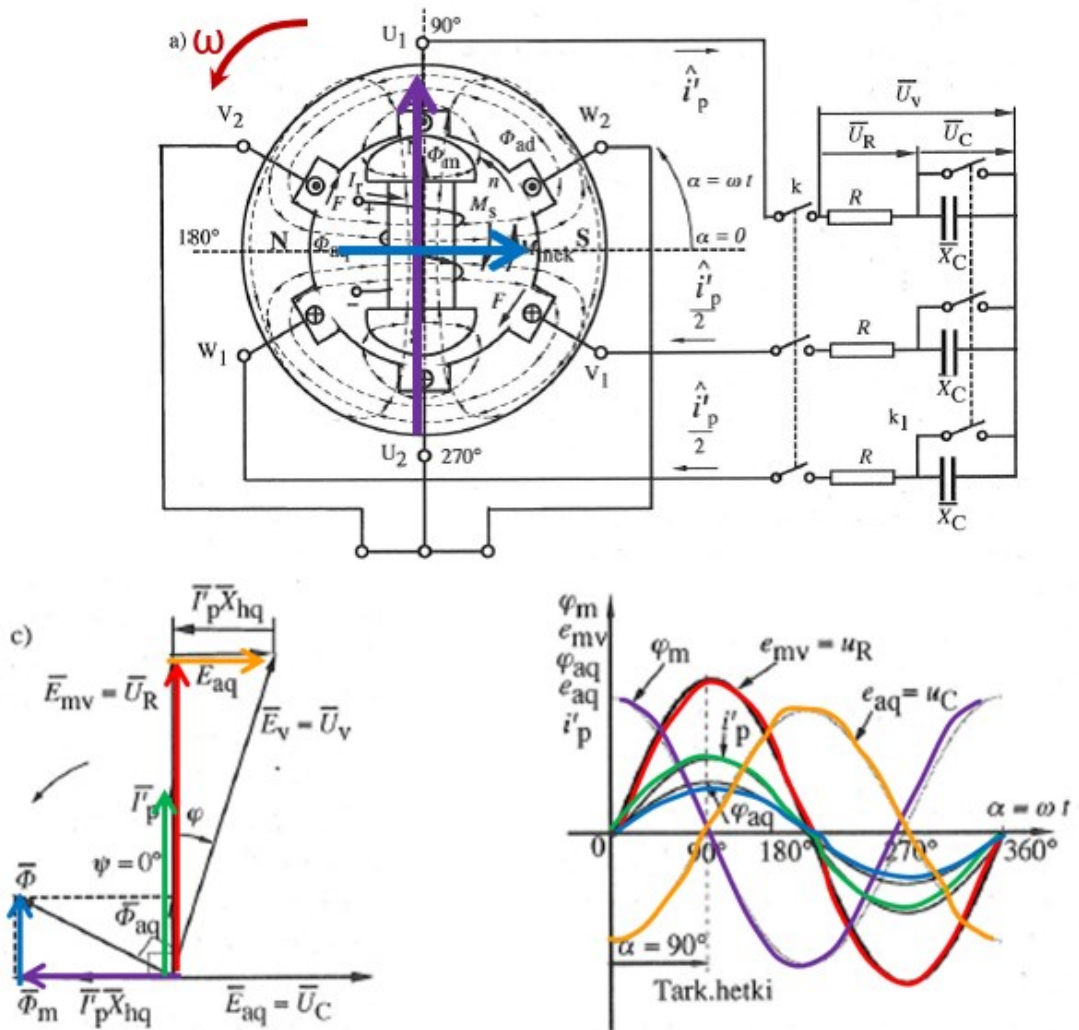
$$\frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

on roottorin epäsymmetriasta saatavaa
tehoa

Maksiteho saavutetaan, kun napakulma on lähellä 90 astetta. Nimellisillä arvoilla kuormitetussa generaattorissa napakulma on noin 20-30 astetta.

Kun kuormitusvirta kasvaa, myös sähköinen vääntömomentti kasvaa napakulman kasvun myötä, mikä edellyttää voimakoneen mekaanisen vääntömomentin lisäämistä, jotta pyörimisnopeus pysyy vakiona. Koska resistiivinen kuormitus ei itsessään aiheuta merkittävää jännitteen muutosta, magnetoimisvirran säätötarve on vähäinen. Jännitteen pitämiseksi nimellisarvossaan tarvitaan kuitenkin lisämagnetointia, jonka suuruus riippuu kuormitusvirran voimakkuudesta.

Todellisessa generaattorissa on huomioitava myös vaihekäämin resistanssin ja hajareaktanssin aiheuttamat jännitehäviöt, jotka täytyy kompensoida. Tätä varten käytetään jännitekompensointia, jossa kuorman kanssa sarjaan kytketty kapasitiivinen reaktanssi kumoaa generaattorin sisäisen reaktanssin vaikutuksen pitäen staattorijännitteen tasapainossa. (Aura 1996, 225.)



Kuva 13. Resistiivinen kuorma (Aura 1996, 225)

7 AVR JA NOPEUDEN SÄÄDIN

Automaattinen Jännitteen- ja Nopeudensäätö: AVR ja Speed Governor

Generaattorin toimintaa ohjaavat keskeisesti automaattinen jännitteen säädin AVR (Automatic Voltage Regulator) ja nopeussäädin (Speed Governor), jotka yhdessä takaavat luotettavan sähköntuotannon kuormitustilanteiden vaihdella. Näiden säätimien yhteistoiminta mahdollistaa generaattorin tuottaman sähkön jännitteen ja taajuuden vakauttamisen niin, että sähköverkon kokonaisuus pysyy tasapainossa.

7.1 AVR

AVR:n päätehtävänä on säätää generaattorin napajännite halutulle tasolle riippumatta kuormitustilanteesta. Tämä saavutetaan seuraavasti:

- AVR vertailee generaattorin liitinjännitettä haluttuun ohjearvoon.
- PID-säätimen avulla AVR säätää generaattorin magnetointivirtaa, jolloin jännite pysyy vakiona ja loistehon tasapaino säilyy.

Kun generaattorilla on induktiivisia kuormia (esim. sähkömoottorit), jotka kuluttavat loistehoa, AVR lisää magnetointivirtaa kompensoidakseen kuormituksen aiheuttamaa jännitealenemää. Vastaavasti kapasitiivisten kuormien (esim. kondensaattoriparistot) tapauksessa, jotka voivat nostaa jännitettä, AVR vähentää magnetointivirtaa. (Giufriada 2013, 57 – 62.)

AVR noudattaa droop-säätöperiaatetta, jossa jännite laskee noin 2–4 % kuormituksen kasvaessa täydestä kuormittamattomaan tilaan. Tämä ominaisuus mahdollistaa useiden generaattoreiden rinnankäytön, sillä droop-säädöllä jännite voidaan jakaa tasaisesti eri generaattoreiden kesken. (Giufriada 2013, 57 – 62.)

7.2 Speed Governor

Nopeussäätimen tehtävä on hallita generaattorin pyörittävän voimakoneen, kuten dieselmoottorin, nopeutta. Pyörimisnopeus määrittää generaattorin tuottaman sähkön taajuuden, joten nopeussäätimen rooli on kriittinen erityisesti silloin, kun kuormitus muuttuu.

- Kuorman kasvaessa resistiivinen kuormitusvirta lisää generaattorin sähköistä vääntömomenttia. Tämä kasvattaa generaattorin akselia pyörittävän voimakoneen mekaanista kuormitusta, mikä pyrkii hidastamaan pyörimisnopeutta.
- Nopeussäädin mittaa voimakoneen pyörimisnopeutta reaaliaikaisesti ja kasvattaa polttoaineen syöttöä, lisäten tehoa akselille. Näin se kompensoi momenttivaatimuksen ja säilyttää pyörimisnopeuden ja siten taajuuden vakiona.

Kuorman pienentyessä nopeussäädin vähentää polttoaineensyöttöä estääkseen pyörimisnopeuden nousun, joka voisi nostaa sähkön taajuuden yli sallitun rajan. (Giufriada 2013, 62 – 65.)

Nopeussäädin noudattaa myös droop-säätöperiaatetta, jossa nopeus laskee kuormituksen kasvaessa. Tällöin useiden generaattoreiden rinnankäyttö helpottuu, koska droop-asetuksen avulla kuorma jakautuu tasaisesti eri voimako-
neiden kesken. (Giufriada 2013, 62 – 65.)

8 POWER MANAGEMENT SYSTEM

Power Management System (PMS) eli tehonhallintajärjestelmä toimii koko aluksen sähköjärjestelmän valvojana ja ohjaajana optimoiden energiantuotannon, jakelun ja kuormituksen hallinnan. Järjestelmän päätehtävänä on varmistaa sähkönsyöttö aluksen eri järjestelmille. PMS-järjestelmän keskeiset toiminnot ovat seuraavat:

- Kuorman jakaminen: PMS optimoi sekä aktiivisen (pätöteho) että reaktiivisen (loisteho) tehon jaon rinnankäyvien generaattoreiden välillä. Tämä toteutetaan hyödyntämällä (AVR) statiikkaominaisuuksia. Järjestelmä varmistaa, että generaattorit toimivat tasapainoisesti, välttämällä tilanteita, joissa yksittäinen generaattori joutuu ylikuormitukselle muiden jäädessä vajaateholle.
- Blackout-suojaus: PMS valvoo sähköverkon kuormitustilaa ja reagoi kuormituksen muutoksiin kytkemällä tarvittaessa lisää generaattoreita päälle. Tämä ehkäisee sähkökatkoksia tilanteissa, joissa kuormitus uhkaa ylittää käytettävissä olevan kapasiteetin. Samalla järjestelmä vähentää turhan generaattorikapasiteetin käyttöä, mikä optimoi polttoaineenkulutusta ja vähentää päästöjä.
- Kuormituksen priorisointi: häiriö- tai vikatilanteissa PMS voi priorisoida tärkeimmät järjestelmät, kuten navigointi-, viestintä- ja turvallisuusjärjestelmät, ja tarvittaessa rajoittaa toissijaisten järjestelmien sähkönsyöttöä. Tämä varmistaa aluksen toimintakyvyn myös kriittisissä tilanteissa.
- Integraatio generaattoreiden ohjaukseen: PMS säätelee generaattoreiden määrää ja niiden tehonsyöttöä reaaliaikaisen kysynnän perusteella. Järjestelmä optimoi generaattoreiden tehonjaon ottaen huomioon sekä yksittäisten generaattoreiden että koko verkon kuormitustilanteen.
- Energiatohokkuus ja huoltokustannusten vähentäminen: PMS optimoi polttoaineenkulutuksen vähentämällä tarpeettomien generaattorien käyttöä ja suojaa laitteita ylikuormitukselta sekä muilta toimintahäiriöiltä. Tämä vähentää kulumista ja huoltotarvetta, mikä alentaa aluksen ylläpitokustannuksia. (Radan 2008, 17.)

9 AKSELIGENERAATTORI JA PTO/PTI-TEKNOLOGIA

PTO/PTI-akseligeneraattorijärjestelmät edustavat edistynyttä taajuusmuuttajateknologiaa, joka on erityisesti suunniteltu kestromagneettikoneiden ja tahtigeneraattoreiden hallintaan. Järjestelmää hyödynnetään laivoissa, joissa pääkone pyörittää potkuriakselia ja pääasiallista propulsiolaitteistoa. (Danfoss 2023.)

9.1 Yleiskuvaus

Akseligeneraattorijärjestelmä voi toimia kaksisuuntaisesti mahdollistaen sen käytön kahdella tavalla: (Danfoss 2023.)

1. Power Take-Off (PTO): Mekaanisen energian ottaminen potkuriakselilta ja sen muuntaminen sähköenergiaksi laivan sähköverkkoon
2. Power Take-In (PTI): Sähköenergian syöttäminen generaattoriin, joka toimii tällöin moottorina ja tuottaa lisävoimaa propulsioakselille

9.2 Teknologian edut

Perinteinen akseligeneraattorijärjestelmä, jossa ei ole säätömahdollisuutta tuotetun sähkön suhteen vaatii synkronisen nopeuden tuottaakseen sähköä AC-verkkoon. Tämä pakottaa pääkoneen pyörimään epäoptimaalisella kierrosluvulla, mikä lisää polttoaineen kulutusta. Taajuusmuuttajakäyttöinen akseligeneraattorijärjestelmä sen sijaan mahdollistaa seuraavat edut: (Danfoss 2023.)

- Alhaisella tehontarpeella pääkone voi toimia pienemmällä kierrosluvuilla, mikä säästää polttoainetta
- Generaattori tuottaa edelleen vakiotaajuista (50 Hz) ja vakiojännitteistä sähköä riippumatta pääkoneen kierrosluvusta.

Sähköverkon vakiotaajuuden (50 Hz) säilyttämiseksi käytetään akseligeneraattoreissa kolmea eri järjestelmärakennetta:

1. PTO Gear Constant Ratio (GCR)

Tässä järjestelmässä käytetään kiinteänopeuksisia potkureita, joissa propulsiotehoa säädetään muuttamalla potkurin lapakulmaa. Järjestelmän toiminnan kannalta on keskeistä, että akseliin integroidun generaattorin roottori pyörii tietyllä vakionopeudella, mikä varmistaa sähköverkon vakaan taajuuden. Vakionopeus määräytyy generaattorin napaluvun sekä pyörimisnopeuden ja taajuuden välisen suhteen perusteella. Tämä järjestelmä on yksinkertainen ja tehokas kiinteänopeuksisissa sovelluksissa, mutta sen käyttömahdollisuudet ovat rajalliset vaihtelevissa kuormitusilanteissa. (Giufriada 2013, 69.)

2. PTO RENK Constant Frequency

Tätä järjestelmää käytetään säädettävänopeuksisilla ja -kulmaisilla potkureilla. Järjestelmässä vaihteiston avulla voidaan ylläpitää generaattorin vakio nopeutta, vaikka pääkoneen kierrosluku vaihtelee. Tämä tekee järjestelmästä joustavamman kuin GCR-tekniikka ja mahdollistaa energiatehokkaan toiminnan erilaisissa kuormitus- ja nopeustilanteissa. RENK-järjestelmät soveltuvat hyvin aluksiin, joissa nopeus ja kuormitus vaihtelevat, kuten matkustaja-aluksiin ja offshore-huoltoaluksiin. (Giufriada 2013, 69.)

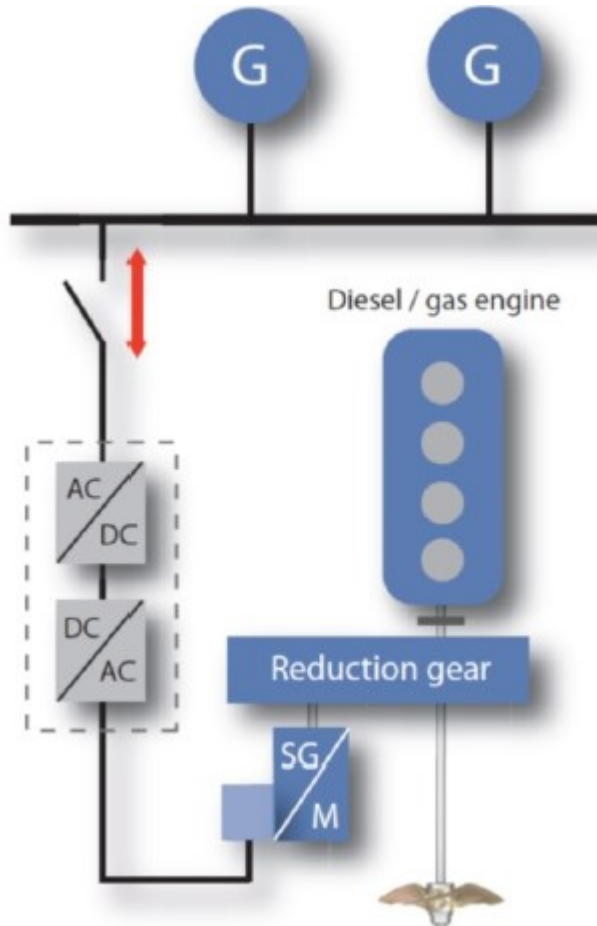
3. PTO Constant Frequency Electric (CFE)

CFE-järjestelmä on suunniteltu säädettävänopeuksisille ja -kulmaisille potkureille. Tässä järjestelmässä akseligenaattorin ja aluksen sähköverkon väliin asennetaan taajuusmuuttaja, joka varmistaa sähköverkon vakiotajuuden generaattorin tuottamasta vaihtelevasta taajuudesta riippumatta. CFE-tekniikan edistyneet ominaisuudet perustuvat moderniin PWM- (Pulse Width Modulation) taajuusmuuttajateknologiaan ja IGBT-komponentteihin (Insulated Gate Bipolar Transistor). (Giufriada 2013, 69.)

CFE on nykyisin yleisimmin käytetty akseligenaattoriratkaisu sen joustavuuden ja tehokkuuden vuoksi. Järjestelmä mahdollistaa:

- Integraation aluksen sähköverkon kanssa: CFE voidaan liittää saumattomasti osaksi PMS-järjestelmää, joka optimoi energian käyttöä aluksella.

- Rinnakkainkäytön: Akseligeneraattori voi toimia rinnakkain apukoneiden kanssa sähköverkon kuormitustilanteen mukaan.
- Energia- ja polttoainetehokkuuden: Järjestelmä hyödyntää pääkoneen mekaanista energiaa optimaalisesti, mikä vähentää apugeneraattorien käyttöä ja siten polttoaineen kulutusta sekä päästöjä.
- Verkon häiriöt: PWM-taajuusmuuttajat ja IGBT-teknologia mahdollistavat alhaiset harmoniset häiriöt ja vakaan jännitteen. (Giufriada 2013, 70.)



Kuva 14. Tyypillinen CFE-teknologiaa hyödyntävä akseligeneraattorijärjestelmä. (Giufriada 2013, 70)

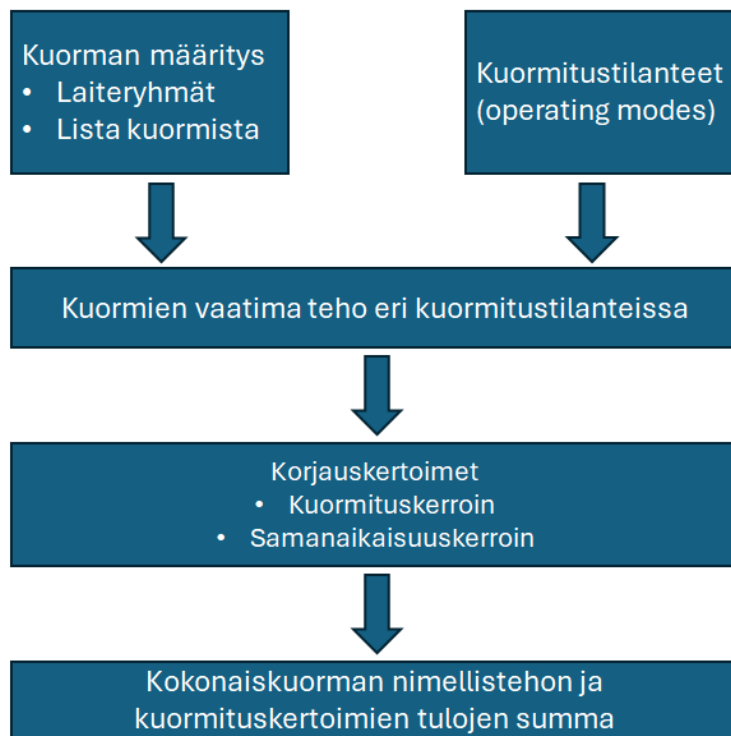
10 SÄHKÖBILANSSI

Sähköbilanssi on keskeinen työkalu aluksen sähköjärjestelmien suunnittelussa. Se kuvaa yksityiskohtaisesti aluksen kaikki sähkökuluttajat ja näiden tehovaatimukset eri toimintatilanteissa. Sähköbilanssin laatiminen alkaa laivan suunnittelun alkuvaiheessa, jolloin alustavat laskelmat määrittävät tarvittavan dieselgeneraattoreiden määrän ja kapasiteetin.

Sähköbilanssin avulla voidaan arvioida aluksen sähkönkulutusta normaalissa käytössä, kuormitushuippujen aikana ja hätätilanteissa. Se perustuu mekaanisten järjestelmien suunnittelutietoihin ja sisältää kaikki sähköä käyttävät laitteet, kuten pumput, valaistuksen, navigointijärjestelmät ja hotellipalvelut. Näiden laitteiden kuormitustiedot kerätään, ja niihin sovelletaan korjauskertoimia, jotta saadaan realistinen arvio sähkönkulutuksesta eri olosuhteissa. (Borstlap 2011, 16.)

Käytetyt kertoimet ovat yleensä:

1. Kuormituskerroin
 - Laitteen keskimääräinen käyttö verrattuna huippukapasiteettiin
2. Samanaikaisuuskerroin
 - Yhdistää useiden laitteiden tehonkulutuksen huomioiden, etteivät ne toimi täydellä teholla yhtä aikaa.



Kuva 15. Bilanssilaskennan periaate (ABB 2019)

SOLAS-yleissopimuksen luvun II-1/41 asetus luokittelee, mitkä laitteet ja järjestelmät ovat ensisijaisen tärkeitä laivan toiminnalle ja mitkä ovat toissijaisia laitteistoja liittyen miehistön ja matkustajien mukavuuteen. Luokittelu antaa sa-

malla käsityksen siitä, millaiset laitteet muodostavat laivan sähköverkon kuorimituksen. Järjestelmät jaetaan (IMO 2017.) mukaan primääriseen-, sekundääriseen- ja hotellikuorimitukseen seuraavanlaisesti:

10.1 Primääriset järjestelmät

Primääriset järjestelmät ovat aluksen toiminnan kannalta kriittisiä ja sisältävät esimerkiksi:

- Peräsinkoneikot
- Säätolapapotkurien pumpput
- Pää- ja apukoneiden voitelu-, jäähdytys- ja polttoaineen syöttöpumput
- Höyrykattiloiden puhallin ja pumppujärjestelmät
- Sähköiset propulsiojärjestelmät mukaan lukien niiden voitelu ja jäähdytysjärjestelmät
- Generaattorit ja muu sähkölaiteisto yllä mainituille järjestelmille
- Hydraulipumput, jotka tukevat muita järjestelmiä
- Booster-koneikot
- Primääristen järjestelmien valvonta- ja ohjausjärjestelmät
- Palopumput ja muut sammutusjärjestelmät
- Navigointijärjestelmät
- Laivan sisäiset turvallisuusviestintävälineet
- Valaistusjärjestelmät

Primääriset järjestelmät toimivat täydellä kuormalla, ja niiden tehontarve laskeaan laitteen nimellistehon mukaan.

10.2 Sekundääriset järjestelmät

Sekundääriset järjestelmät tukevat aluksen toimintaa, mutta niiden toiminta ei vaadi jatkuvasti laitteen nimellistehoja. Näitä ovat esimerkiksi:

- Vinssit ja vintturit
- Polttoaineen siirto- ja käsittelypumput
- Voiteluöljyn siirto- ja käsittelypumput
- Esilämmittimet
- Käynnistysilma- ja instrumentti-ilmakompressorit
- Pilssipumput ja painolastipumput
- Konehuoneiden ilmastointijärjestelmä
- Järjestelmät, jotka takaavat vaarallisten tilojen turvallisuuden
- Paloilmajärjestelmät
- Sähköjärjestelmät vesitiiviiden ovien sulkemiseen
- Rahdin valvonta- ja ohjausjärjestelmät
- Järjestelmät sekundääristen järjestelmien valvontaan ja ohjaukseen

Näiden laitteiden kuorma arvioidaan käyttöprofiilin mukaan, esimerkiksi 30 % - 80 % nimellistehosta. (IMO 2017.)

10.3 Hotellikuorma

- Keittiölaitteet
- Lämmityslaitteet
- Provianttikompressorit
- HVAC
- Vesi- ja saniteettijärjestelmät

Hotellikuorman laskennassa arvioidaan vaihtelevat käyttöolosuhteet. Esimerkiksi lämmitys- ja ilmastointilaitteiden kuormitus vaihtelee pelkästään vuodenajan mukaan. Kuorma arvioidaan 50-100 % väliin nimellistehosta. (Borstlap 2011, 33.)

Sähköbilanssin laatiminen perustuu standardiarvoihin ja suunnittelijoiden kokemuksiin ja yleisiin käytäntöihin bilanssilaskennasta. Ensimmäisiin bilanssilaskelmiin voi liittyä aluksi huomattava määrä oletuksia, jotka tarkentuvat myöhemmin. Suunnitteluprojektin edetessä ja myöhemmin laivan elinkaaren mukana on bilanssilaskelmaa päivitettävä vastaamaan todellisuutta. (Borstlap 2011, 33.)

11 TAPAUSTUTKIMUS

Tutkimuksen tarkastelun kohteena on laivan sähköverkko, jossa ilmenee sähkön tuotannon vaje normaalissa meriajossa, kun käytetään akseligeneraattorijärjestelmää PTO-tilassa. Lähtöasetelmana on tilanne, jossa akseligeneraattorin nimellisteho (1800 kW) riittää kattamaan sähköverkkoon kytketyn kuormituksen, mutta järjestelmän verkkovaihtosuuntaaja rajoittaa merkittävästi tuotantokapasiteettia **570** kilowattiin, joka jää alle verkon kokonaiskuormituksen laivan seilattaessa merellä. Tämä estää vähemmän kriittisten kuluttajien, kuten pumppujen ja lämmitysjärjestelmien samanaikaisen käytön tärkeimpien kuluttajien kanssa ilman, että tehonhallintajärjestelmä käynnistää apukoneen rinnalle vastaamaan kasvavaan kuormitukseen. (Varustamo s.a.)

Apukoneen käynnistäminen aiheuttaa suuremman polttoaineenkulutuksen, korkeammat käyttö- ja huoltokustannukset sekä lisääntyneet päästöt. Tämä ongelma korostuu erityisesti talvikuukausina, jolloin mm. sähkölämmityksen tarve on suurempi. Järjestelmän ideana on toimia siten, että akseligeneraattorijärjestelmä kykenee vastaamaan verkon kuormaan ilman muita tuotantomenetelmiä. (Varustamo s.a.)

Tutkimuksessa syvennyttään tarkastelun kohteena olevaan järjestelmään ja sen nykyisiin ominaisuuksiin, joiden avulla pyritään optimoimaan järjestelmän toimintaa ja pääsemään haluttuun lopputulokseen. Sen lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan hybridiakkujärjestelmää vaihtoehtoisena ratkaisuna lisätä sähköntuotantoa, mikäli verkon kokonaiskuormitus kasvaa tulevaisuudessa optimoidun järjestelmän tuotantokapasiteetin yli.

12 TAPAUSTUTKIMUKSEN JÄRJESTELMIEN TARKASTELU

12.1 Pääkone ja vaihteisto

Sähköntuotannon näkökulmasta pääkone on suoraan verrannollinen akseligeneraattorikäytössä generaattorin roottorin pyörimisnopeuteen. Pääkoneen kierrosluvun on samanaikaisesti oltava optimaalinen pääkoneen polttoaineenkulutuksen näkökulmasta, mutta samalla myös riittävä pyörittämään generaattorin roottoria riittävän tasaisen taajuuden ylläpitämiseksi. Pääkoneen SFOC (Specific Fuel Oil Consumption) kertoo, kuinka tehokkaasti se tuottaa tehoa suhteessa kulutettuun polttoaineeseen. Taulukossa 2 on esitelty tapaustutkimuksen pääkoneen suorituskyky. SFOC saavuttaa parhaan arvonsa, kun moottoria käytetään 85 % CMCR (Contract Maximum Continuous Rating) -teholla. 85 % CMCR-teholla pääkoneen kierrosluku on 117 rpm. Pääkoneen akseli pyörittää vaihdelaatikkoa, joka muuntaa pääkoneen akselin kierrosluvun PTO-akselille kierroslukuun 1513.7 rpm, joka on kytketty akseligeneraattoriin. (Varustamo s.a.)

Taulukko 2. Pääkoneen suorituskyky. (Varustamo s.a.)

| Power % CMCR | Power [KW] | Speed rpm | mps m/s | mep bar | BSFC g/kWh | BSEF kg/kWh | tEaT °C |
|-----------------|---------------|--------------|------------|------------|---------------|----------------|------------|
| 110.0 | 10692.0 | 128.0 | 8.7 | 20.8 | 179.0 | 7.44 | 307.1 |
| 100.0 | 9720.0 | 124.0 | 8.5 | 19.5 | 177.0 | 7.75 | 297.1 |
| 95.0 | 9234.0 | 121.9 | 8.3 | 18.8 | 173.6 | 7.81 | 292.1 |
| 90.0 | 8748.0 | 199.7 | 8.2 | 18.2 | 170.6 | 7.82 | 287.4 |
| 85.0 | 8262.0 | 117.5 | 8.0 | 17.5 | 169.7 | 7.84 | 284.1 |
| 80.0 | 7776.0 | 115.1 | 7.9 | 16.8 | 169.3 | 7.90 | 282.2 |
| 75.0 | 7290.0 | 112.7 | 7.7 | 16.1 | 169.1 | 7.96 | 282.1 |
| 70.0 | 6804.0 | 110.1 | 7.5 | 15.4 | 169.0 | 8.01 | 284.6 |
| 60.0 | 5832.0 | 104.6 | 7.1 | 13.9 | 169.5 | 8.05 | 294.8 |
| 50.0 | 4860.0 | 98.4 | 6.7 | 12.3 | 171.0 | 8.06 | 312.1 |

12.2 Akseligeneraattori

Akseligeneraattori on 4 napainen tahtigeneraattori, jonka nimellisarvot ovat seuraavat.

- Pätöteho (P) 1800 kW
- Näennäisteho (S) 2250 kVa
- Jännite 400 V
- Cos φ 0.8

Akseligeneraattori yhdessä pääkoneen ja vaihteiston kanssa riittää vastaamaan sähköverkon kuormitukseen jopa 1800 kW teholla. Tämä tarkoittaa, että vaikka generaattorilla on kyky tuottaa enemmän tehoa, verkkovaihtosuuntaajan käyttäminen estää suuremman tehon hyödyntämisen sähköverkossa riippumatta akseligeneraattorin tai pääkoneen suorituskyvystä. (Varustamo s.a.)

12.3 Sähköbilanssin analysointi

Sähköntuotannossa käytettävä järjestelmä vaihtelee sen mukaan, missä tiilassa laiva kullakin hetkellä on. Merellä ja satamassa on omat tehotarpeensa, jotka määrittyvät toimintaprioriteetin mukaisesti. Merellä suurimmat sähkönkuluttajat ovat turvalliseen ajoon liittyvät apulaitteistot ja hotellikuorma, kun taas satamakäytössä korostuu näiden lisäksi lastinkäsittelylaitteiden ja painolasti-järjestelmään liittyvät kuormat. (Varustamo s.a.) Vertaamalla tehojakautumia merellä seilattaessa (Sea Mode) pyritään tunnistamaan energiankulutuksen eroja ja löytämään kohteita, joita optimoida energiatehokkaammiksi.

12.4 Alkuperäinen bilanssilaskenta

Kuorman laskeminen tapahtuu sähköbilanssilaskelmalla. Esimerkiksi pilssi-pumpun 15 kW sähkömoottorin bilanssilaskenta näyttää seuraavanlaiselta merellä Sea Mode-tilassa. (Borstlap 2011, 34; Varustamo s.a.)

Kuormituskerroin = 0.8

Samanaikaisuuskerroin = 0.3

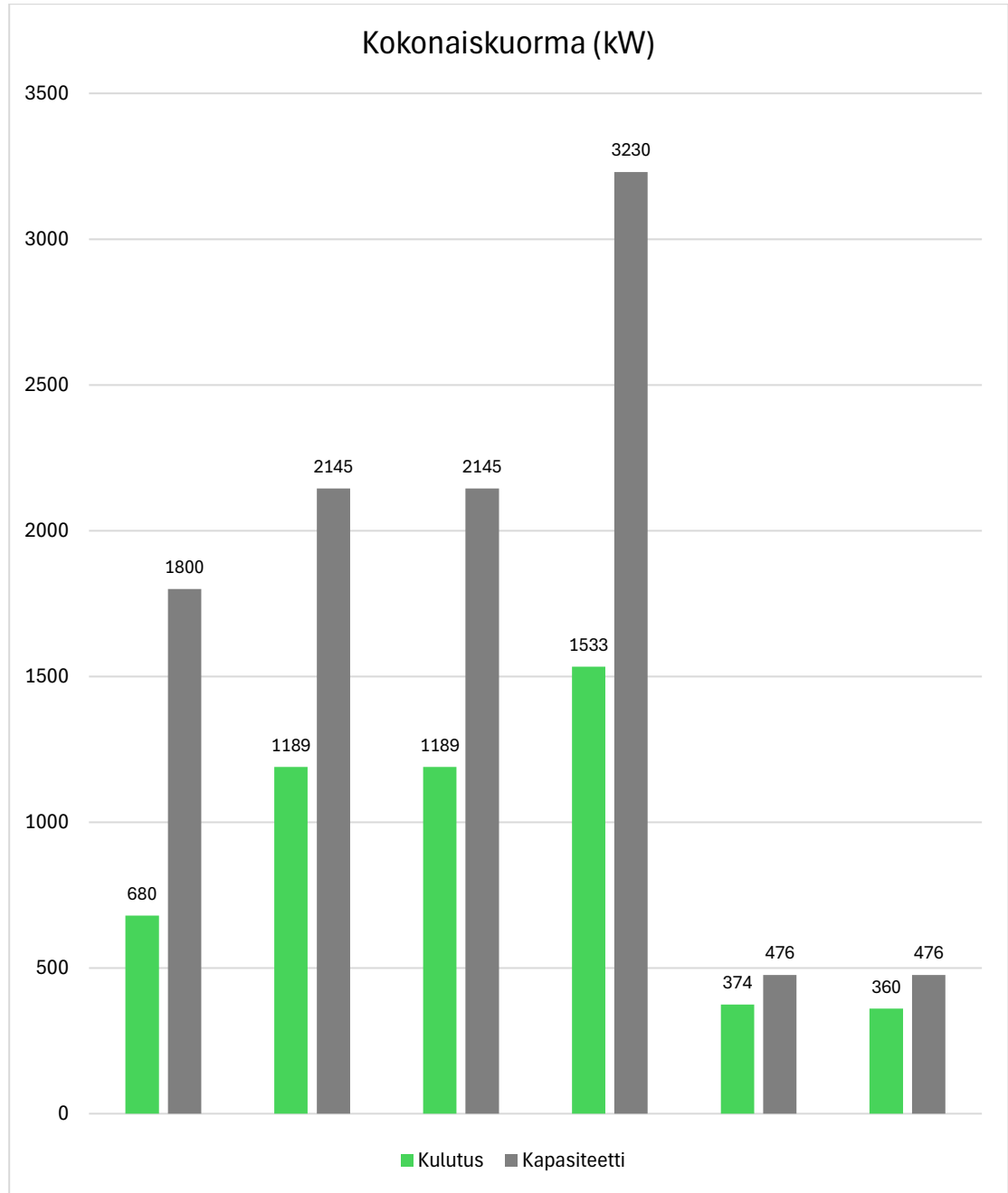
$$Prated = 15.0 \text{ kW}$$

$$Pload = 15.0 \text{ kW} * 0.8 * 0.3 = 3.6 \text{ kW}$$

Listamalla laivan sähkönjakelujärjestelmän kokonaiskuormitukset, saadaan selville koko järjestelmän sähkökuorma kussakin kuormitustilanteessa. Taulukossa 3 esitetyt luvut kuvaavat eri kuormitustilanteissa tuotettua ja kulutettua tehoa. Kapasiteetti sisältää akseligeneraattorin tai apukoneen -koneiden tuottaman kokonaistehon joko yhdessä tai erikseen tilanteen mukaan. Kulutus käsittää kaikki tehoa kuluttavat järjestelmät kuten esimerkiksi propulsio, pumput, lastinkäsittelylaitteet ja hotellikuorman. Käyttötilat (Mode) erittelevät kulutuksen ja kapasiteetin toimintaprioriteetin mukaan. (Varustamo s.a.)

- Sea mode: Lastattu alus avomerellä, Akseligeneraattori ainoana sähköntuottajana 38 % kuormituksella akseligeneraattorin nimellistehosta.
- Cargo discharging/Ballast load: Lastaus/purku on tila, jossa alus on satamassa lastaamassa tai purkamassa rahtia. Tällöin sähkö tuotetaan apukoneilla, jolloin kuorma jakautuu tasaisesti kolmen apukoneen kesken kuormittaen jokaista apukonetta 55 % apukoneen nimellistehosta.
- Harbour manoeuvring: Manööveraus satamassa on tila, jossa aluksen ohjaamiseen käytetään keula- ja peräthrustereita. Suurten kuluttajien takia on käynnistettävä apukoneita akseligeneraattorin rinnalle tasamaan kuormitusta.
- Harbour resting: Alus on käyttämättömänä satamassa, esimerkiksi odottamassa lastia. Tällöin käytetään "satamageneraattoria" jonka kuormana on vain hotellikuorma ja pääkoneen pumput sekä tarvittavat konehuoneen apulaitteet mm. kattila jne.
- Hätägeneraattori syöttää esimerkiksi mahdollisessa blackout tilanteessa hätätauluun kytkettyä kuormaa. (Varustamo s.a.)

Taulukko 3. Alkuperäinen bilanssilaskenta (Varustamo s.a.)

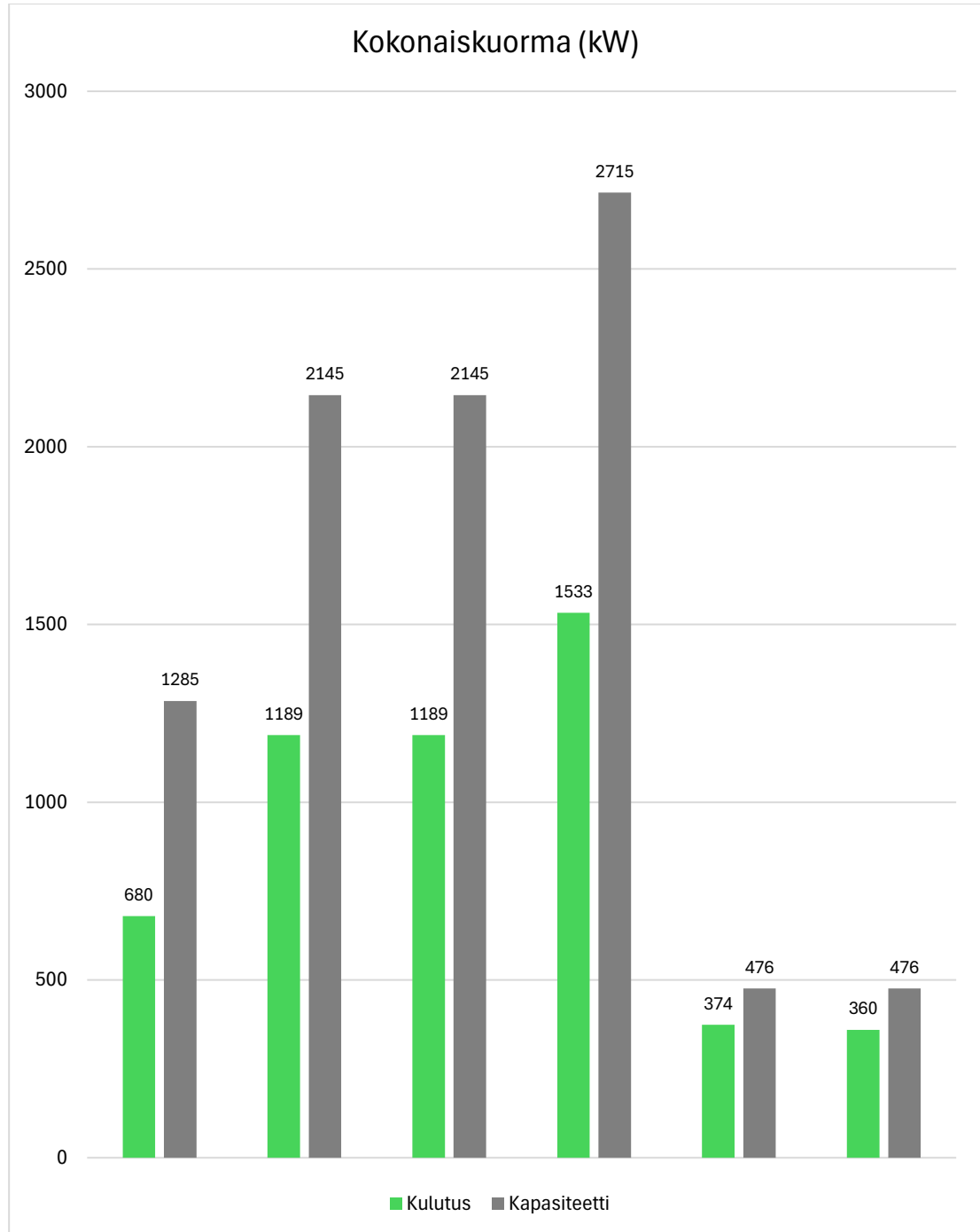


| | Sea Mode | Cargo Disch/Bal- last load | Cargo Load/Bal- last Disch | Harbour Manoeuvr. | Harbour Resting | Emergency |
|-----|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| DG1 | 0 % | 55 % | 55 % | 71 % | 0 % | 0 % |
| DG2 | 0 % | 55 % | 55 % | 71 % | 0 % | 0 % |
| DG3 | 0 % | 55 % | 55 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| SG | 38 % | 0 % | 0 % | 85 % | 0 % | 0 % |
| EG | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 79 % | 76 % |

12.5 Sähköbilanssi verkkovaihtosuuntaajalla

Analysoidessa sähköbilanssia tulee ottaa huomioon akseligeneraattorijärjestelmään integroidun taajuusmuuttajan rajoitteet. Taajuusmuuttajan verkkoon syöttämä 570 kW teho muuttaa kokonaiskuormituksen jakautumista taulukon 4 mukaisesti alkuperäistä sähköbilanssilaskelmaa hyödyntäen.

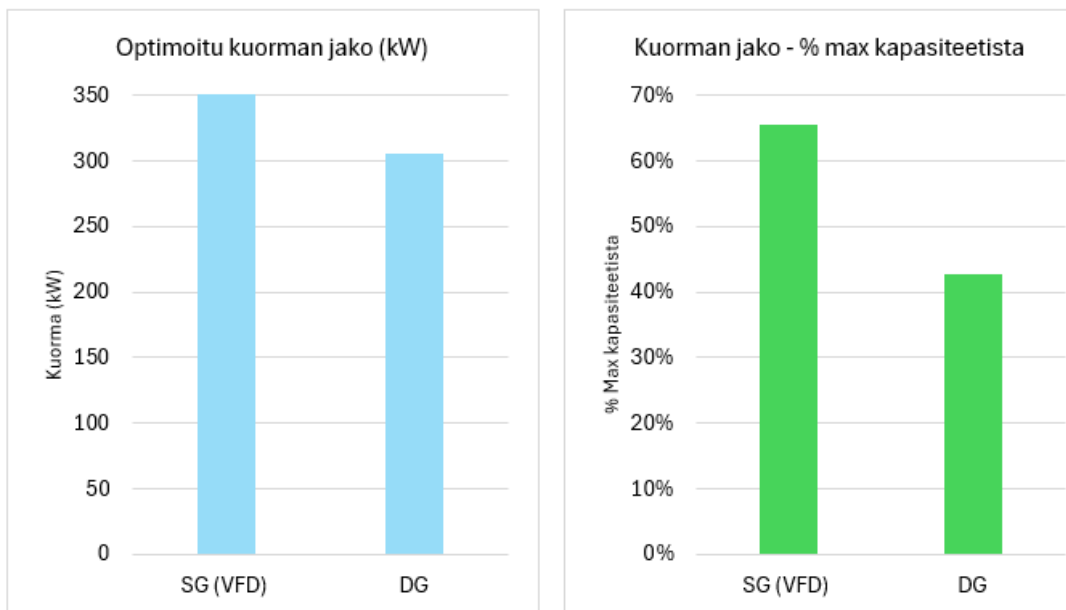
Taulukko 4. Sähköbilanssi verkkovaihtosuuntaajalla (Varustamo s.a.)



| | Sea Mode | Cargo Disch/Bal- last load | Cargo Load/Bal- last Disch | Harbour Manoeuvr. | Harbour Resting | Emergency |
|-----|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| DG1 | 43 % | 55 % | 55 % | 77 % | 0 % | 0 % |
| DG2 | 0 % | 55 % | 55 % | 77 % | 0 % | 0 % |
| DG3 | 0 % | 55 % | 55 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| SG | 66 % | 0 % | 0 % | 77 % | 0 % | 0 % |
| EG | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 79 % | 76 % |

Bilanssilaskennan kokonaiskuormitus edustaa laskennallista ja siten teoreettista arvoa Sea Mode -käytössä. Se kuitenkin ilmaisee teoriassa PTO-järjestelmän tehonsyötön riittämättömyyden. Prosenttiosuudet akseligenaattorijärjestelmän ja apukoneen kuormituksesta saadaan optimoimalla kuorman jakautumista akseligenaattorijärjestelmän ja apukoneen kesken taulukon 5 mukaisesti. PMS-järjestelmä tekee todellisuudessa kuormanjaon automaattisesti asetettujen parametrien mukaisesti. Kuorma voidaan jakaa täysin teoreettisesti järjestelmien hyötysuhteen näkökulmasta siten, että akseligenaattorijärjestelmän taajuusmuuttaja operoi kohtuullisella prosentilla kapasiteetistaan. Apukone toimii myös tehokkaammin, kun sitä kuormitetaan riittävästi. Tällä jaolla kyetään hyödyntämään taajuusmuuttajan joustavuutta ottaen huomioon, että apukone toimii suhteellisen hyvällä hyötysuhteella. (Varustamo s.a.)

Taulukko 5. Sähköbilanssin mukaan arvioitu kokonaiskulutus Sea Mode tilassa akseligenaattorijärjestelmälle ja apukoneelle jaettuna. (Varustamo s.a.)



12.6 Sähköbilanssin päivittäminen

Alkuperäinen bilanssilaskelma ottaa huomioon Sea Moden kokonaiskulutukseen esimerkiksi paljon tehoa vievän palonsammutusjärjestelmän, joka käsittelee 148.0 kW kuorman.

Bilanssilaskelmassa järjestelmälle on käytetty seuraavia korjauskertoimia:

Kuormituskerroin = 0,8

Samanaikaisuuskerroin = 1

$$Prated = 148 \text{ kW}$$

$$Pload = 148 \text{ kW} * 0,8 * 1 = 118 \text{ kW}$$

Järjestelmä on äärimmäisen tärkeä laivan turvallisuuden kannalta mutta se vääristää Sea Mode -tilan kokonaiskuormaa. Järjestelmä voidaan jättää pois laskelmista, koska järjestelmä on ensisijaisesti hätätilanteeseen tarkoitettu kuluttaja, mikä käy ilmi niiden sisällyttämisestä hätätaulun kuormituslaskelmaan. Kuormitustasapainon optimointi epäsäännöllisesti toimivia järjestelmiä koskien on sallittu käytäntö, ja kriittiset hätäjärjestelmät on suunniteltu toimimaan hätätilanteessa myös hätägeneraattorin avulla. (Borstlap 2011, 31; Varustamo s.a.)

Sea Mode -bilanssilaskelmasta voidaan poistaa myös muita epäsäännöllisesti toimivia järjestelmiä, jotta pystytään määrittämään järjestelmän todellinen kokonaiskulutus. Tämä optimointi auttaa hahmottamaan, miltä kulutus näyttää suurimman osan ajasta normaalin operoinnin aikana, jolloin kaikki järjestelmät eivät ole jatkuvassa käytössä. Näin kuormitustasapaino kuvastaa paremmin aluksen käyttötilanteiden keskimääräistä sähkökuormaa, eikä se sisällä tarpeettomia varauksia epätodennäköisesti samanaikaisesti käytettäville kuluttajille. (Borstlap 2011, 31.)

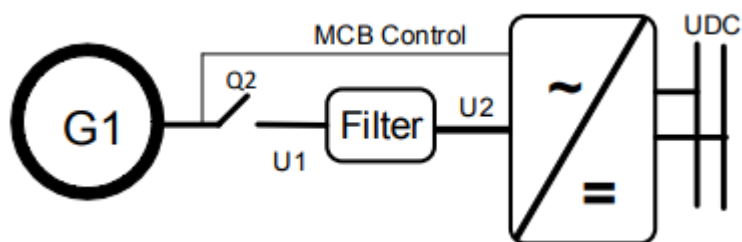
570 kW tehontuotanto akseligenaattorin taajuusmuuttajalla ei kuitenkaan riitä epäsäännöllisten järjestelmien käyttöön, jolloin PMS – järjestelmä joutuu kulutushuippujen kohdalla käynnistämään apukoneen akseligenaattorijärjestelmän rinnalle. Kulutuksen kasvaminen johtuu mm. käyttötilanteista, joissa yhtä aikaa sähköverkkoon on kytketty jälkiasennettuja lämmityslaitteita, keittiölaitteita ja satunnaisesti käytössä olevia pumppuja. (Varustamo s.a.)

12.7 Verkkovaihtosuuntaaja

Tässä osassa tarkastellaan tutkimuksessa käytettävää verkkovaihtosuuntaajaa osana laivan sähköntuotantoa. Tekniikaltaan kyseinen taajuusmuuttajakonaisuus muistuttaa ominaisuuksiltaan kappaleessa 8.2 esiteltyä CFE akseligenaattorijärjestelmää. Havainnollistamiseksi käytetään Vacon NXP Grid Converter mallia.

Grid Converter -akseligenaattoriratkaisu on suunniteltu kattamaan laivan sähköverkon koko kuorma laivan ollessa merellä. Järjestelmä mahdollistaa laivan nopeuden säädön vaikuttamatta sähköverkon jännitteeseen ja taajuuteen. Lähtökohtaisesti teknologia tukee kahta toimintatilaa: PTO ja PTI. Tässä opinäytetyössä keskitytään PTO-tilan toimintaan. (Danfoss 2023.)

Grid Convertera ohjataan tyypillisesti I/O liitännöjen kautta, ja laivan PMS järjestelmä vastaa laitteiston hallinnasta ja synkronoinnista laivan muiden laitteiden kanssa. Grid Converter teknologiaa voidaan hyödyntää kolmella eri tavalla. (Danfoss 2023.)

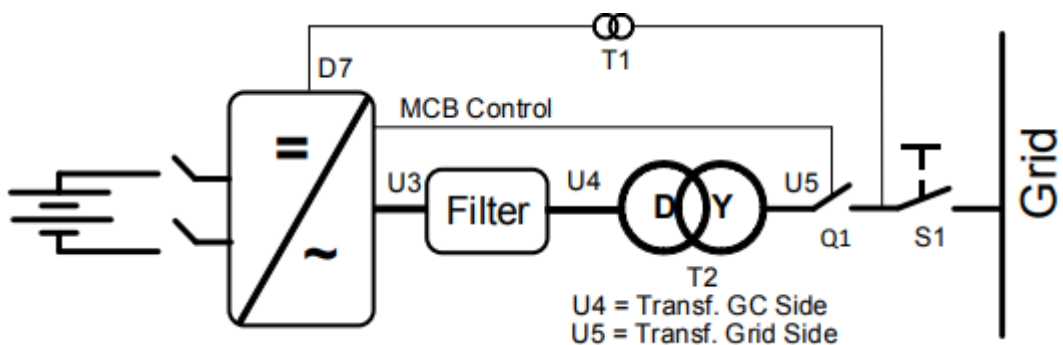


Kuva 16. Active Front End. (Danfoss 2023)

AFE (Active Front End): Kuvan 16 aktiivinen etuaste on taajuusmuuttajamalli, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen tehonsiirron vaihtosähköverkon, esimerkiksi generaattorin, ja DC-välipiirin välillä. AFE-tilassa oleva taajuusmuuttaja pitää DC-välipiirin jännitteen vakiona aktiivisesti tasasuuntaamalla tehoa. AFE käyttö vaatii olemassa olevan verkon taajuus- ja jännitereferenssin toimiakseen.

Toimii AFE kumpaankin suuntaan tahansa eli generaattorilta välipiiriin tai sähköverkosta välipiiriin kautta kuluttajille, on sen keskeisin tehtävä pitää DC-välipiirin jännite vakaana. Välipiirin jännitteensäätö tapahtuu parametreilla Nominal DC Voltage, DC Voltage Reference ja Final DC Voltage Reference. Mikäli useampi AFE taajuusmuuttaja toimii samassa DC välipiirissä eli syöttävät laivan sähköjärjestelmän DC-kiskoa rinnakkain, kuorman jako tapahtuu DC-droop säädöllä. Loistehon säätö tapahtuu Reactive Current Reference parametrin avulla, joka mahdollistaa mm. tehokertoimen säädön ja loistehon kompensoinnin. Parametrin arvo annetaan prosentteina laitteen nimellisvirrasta, joka voi saada joko negatiivisia tai positiivisia arvoja.

- Positiivinen arvo = induktiivista virtaa (kompensoi kapasitiivista kuormaa)
- Negatiivinen arvo = kapasitiivista virtaa (kompensoi induktiivista kuormaa) (Danfoss 2023.)



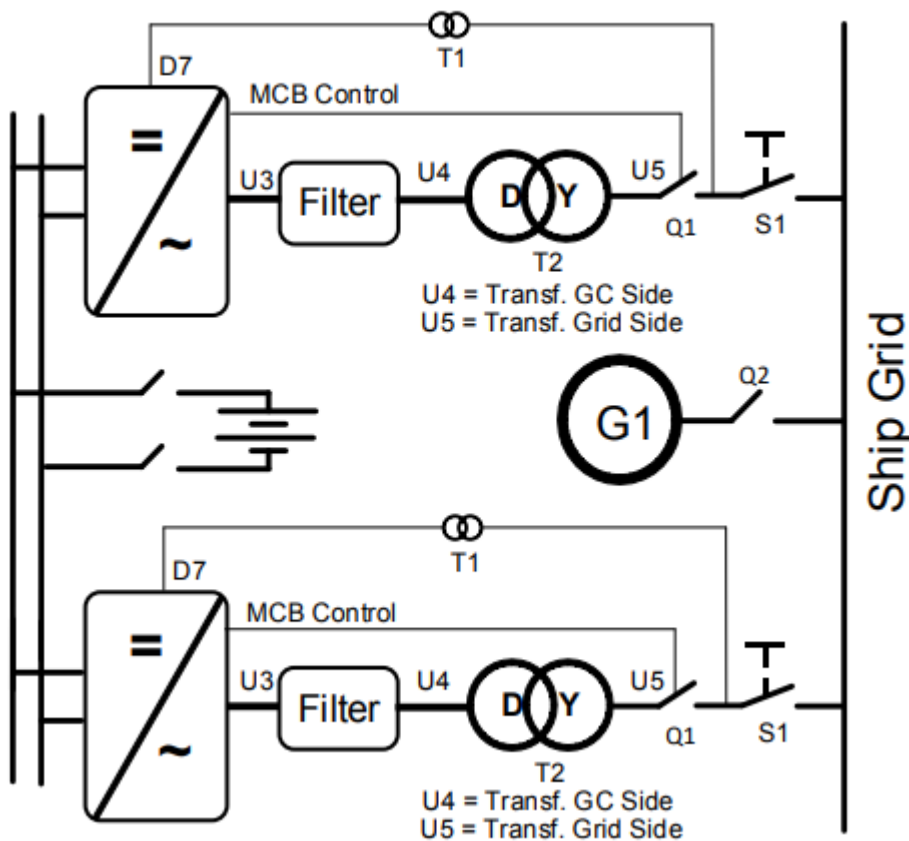
Kuva 17. Saarekekäyttö. (Danfoss 2023)

Island Mode: Kuvan 17 saarekekäytössä taajuusmuuttaja luo itsenäisen sähköverkon ennalta määritellyillä jännite ja taajuusarvoilla. Saarekekäytössä taajuusmuuttaja toimii ainoana tehonlähteenä sähköjärjestelmässä, eikä rinnakkainen käyttö muiden tehontuotantoyksiköiden kanssa onnistu, koska taajuus-

muuttaja ei tässä tilassa kykene päto- ja loistehon säätöön. Myös saarekekäytössä DC-välipiirin jännite on pysyttävä vakiona, jotta verkkoon syötetty AC jännite pysyy oikealla tasolla. Kuormitustilanteissa on kompensoitava LCL suodattimen ja kuvan 17 T2 muuntajan aiheuttamat jännitehäviöt, jotta ulostulojännite U5 on oikealla tasolla. AC jännite ja taajuus määrittyy seuraavien parametrien avulla:

- Grid Nominal Frequency = Verkon taajuus esim. 50 Hz
- Grid Nominal Voltage = Verkon jännite esim. 400 V AC
- System Rated Power (kW) = pätoehon kapasiteetti
- System Rated Apparent Power (kVA) = taajuusmuuttajan näennäisteho
- System Cos Phi = Päto- loistehon suhde

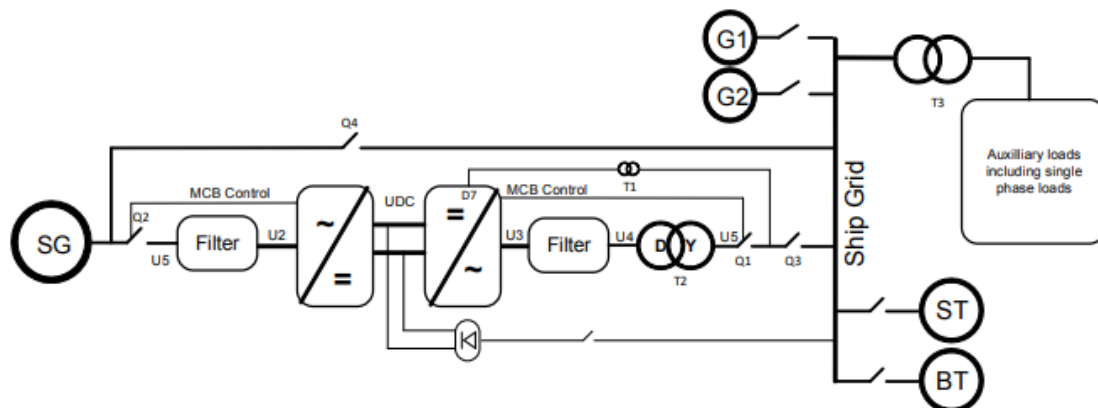
Saarekekäytössä taajuusmuuttaja ylläpitää parametrien asetusarvot, joiden sisällä sähköverkon kuorma ottaa tarvitsemansa päto- ja loistehon, jolloin taajuusmuuttaja vastaa koko verkon tehotasapainosta. (Danfoss 2023.)



Kuva 18. Micro Grid -tila. (Danfoss 2023)

Micro Grid Mode: Kuvan 18 mikroverkko-tila mahdollistaa verkon luomisen ja tahdistamisen olemassa olevaan verkkoon ja mahdollistaa muiden teholähteiden rinnakkaisen käytön. Tässä tilassa yksiköllä on generaattoria vastaavat

statiikkaominaisuudet ja droop-parametreilla voidaan hallita pätö- ja loisteho kuormaa. Micro Grid -tilassa voidaan käyttää kahta erilaista säätötapaa: Droop Speed Control ja Isochronous Speed Control. (Danfoss 2023.)



Kuva 19. Akseligenaattorijärjestelmä. (Danfoss 2023)

Akseligenaattorijärjestelmä: Teho kulkee kuvassa 19 havainnollistettujen taajuusmuuttajien kautta: Yksi taajuusmuuttaja muuntaa generaattorin tuottaman tehon DC-kiskoon. Toinen taajuusmuuttaja luo aluksen sähköverkon, jolloin generaattori ei ole suoraan yhteydessä päätauluun. Laitteisto toimii (Danfoss 2023.) mukaan seuraavasti:

1. PMS antaa käynnistyskomennon generaattoripuolen taajuusmuuttajalle
2. Generaattoripuolen AFE käynnistyy ja nostaa DC-jännitteen oikealle tasolle.
3. Sähköverkon Micro Grid tilassa oleva taajuusmuuttaja käynnistyy ja tahdistuu laivan sähköverkkoon

12.8 LCL-suodatin

LCL-suodatin on keskeinen osa Grid Converter -järjestelmää, sillä se vastaa harmonisten virtojen suodattamisesta, jännitetason hallinnasta ja tehonlaadun parantamisesta sekä vaihtosuuntaustilanteessa että verkosta syötettäessä. Se koostuu kahdesta sarjaan kytketystä induktanssista (L) ja niiden välissä olevasta kondensaattorista (C), jotka yhdessä muodostavat suodatinrakenteen, jolla on korkea impedanssi suurille taajuuskomponenteille. Tämä mahdollistaa kokonaissärön (THD) tehokkaasti vähentämisen, jolloin THDi voi olla jopa alle 5 %. LCL-suodattimen toiminta perustuu resonanssitaajuuteen, joka asetetaan suunnitteluvaiheessa halutulle tasolle. Tämän taajuuden perusteella lasketaan suodattimen komponenttiarvot, kuten induktanssin ja kapasitanssin suuruus.

Suodattimen rakenne mahdollistaa kaksisuuntaisen tehonsiirron, joten sen suodatustehokkuus säilyy riippumatta siitä, siirretäänkö tehoa suuntaajasta verkkoon vai päinvastoin. Vaihtosuuntaustilanteessa (esimerkiksi Micro Grid -tilassa) LCL-suodatin vähentää vaihtosuuntauksen aiheuttamaa virran kokonaissäröä ja vakauttaa järjestelmän toimintaa, jolloin Grid Converter pystyy syöttämään AC-verkkoon laadukasta sähköä ilman merkittäviä häiriöitä. Samalla AFE (Active Front End) hyödyntää LCL-suodatinta nostaakseen välipiirin jännitettä, mikä on välttämätöntä tehokkaan tehonsiirron varmistamiseksi. AC verkkoon syöttäessä, suodatin aiheuttaa jännitehäviötä lähtöjännitteeseen, joka tarvitsee kompensoida parametrien avulla. (Danfoss 2023.)

12.9 Pätö- ja loistehon säätö Micro Grid tilassa

1. Droop Speed Control

Droop Speed Control on PMS järjestelmän ohjaustila, jossa taajuuden ja jännitteen droop asetukset säätelee rinnakkaisten generaattoreiden kuormitusta. Pätötehokuorman kasvaessa taajuus laskee, jolloin PMS nostaa taajuutta takaisin nimellisarvoonsa. Vastaavasti, kun kuorma pienenee, generaattoreiden taajuus nousee. Micro Grid tilassa taajuusmuuttaja toimii täsmälleen samoilla periaatteilla kuin verkon generaattorit. Drooping perustuu siis suhteelliseen säätöön, joka riippuu kuormituksesta. Pätötehon muutokset vaikuttavat taajuuteen, kun taas loistehon muutokset vaikuttavat jännitteeseen. Droop speed controllin toiminta voidaan ilmaista kaavalla 4. (Danfoss 2023.)

$$FreqOut = GridNomFreq + FreqOffset + \frac{ActiveCurrent}{SystemRatedCurrent} * (-FrequencyDroop) \quad (4)$$

Jossa:

GridNomFreq on verkon nimellistaajuus esim. 50 Hz

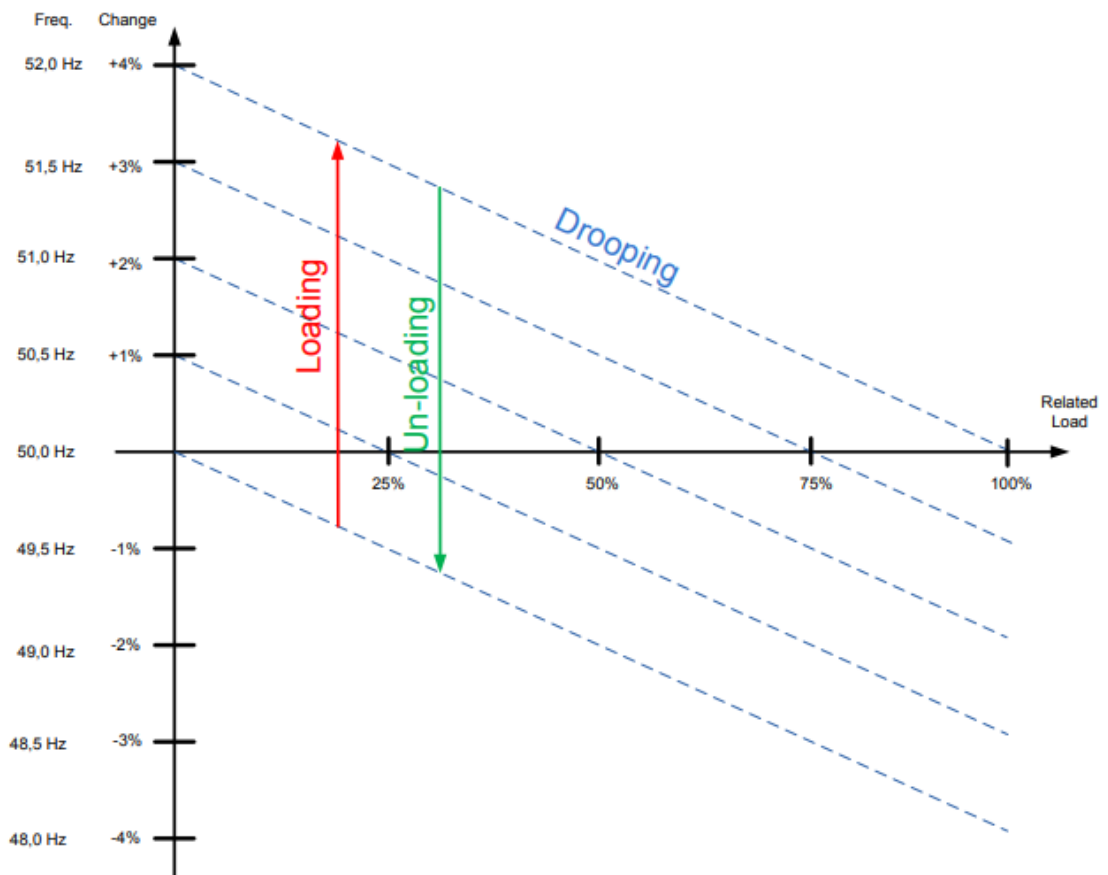
FreqOffset on taajuuden säätöparametri, jota käytetään kompensoimaan taajuuden droop vaikutuksia.

ActiveCurrent on mitattu pätovirta

SystemRatedCurrent on järjestelmän nimellisvirta

FrequencyDroop on taajuuden droop arvo, joka ilmaisee, kuinka paljon taajuus muuttuu kuorman mukaan.

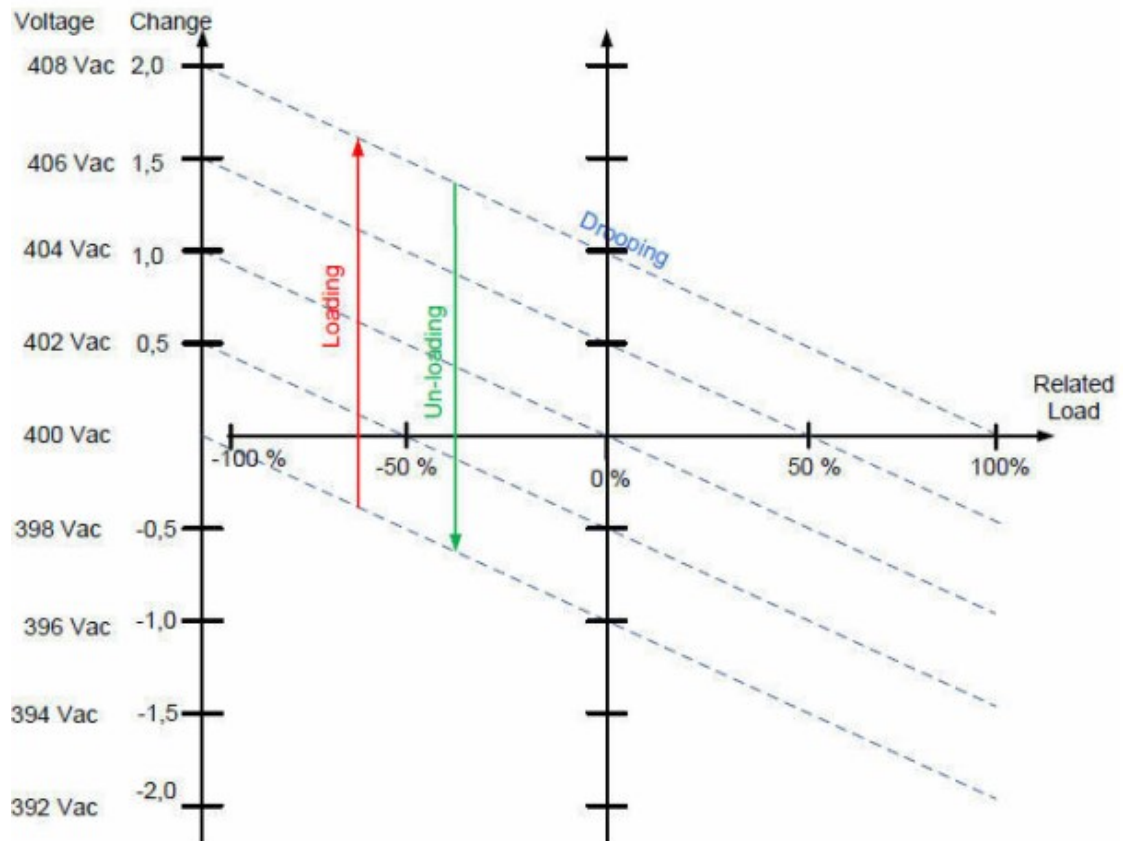
Kuvassa 20. on esimerkki taajuuden droop säädöstä ja PMS järjestelmän toteuttama kompensointi. Jos 100 % pätöteho kuorma (laitteen nimellisvirtaa vastaava kuorma) lisätään, verkon taajuus laskee 50 Hertzistä 48 Hertziin. Tämän jälkeen PMS järjestelmä nostaa taajuusohjetta vastaamaan kuormaa, jotta taajuus pysyy verkon nimellisarvossa 50 Hz. Tällöin laitteen uusi taajuusohje 100 % kuormalla on 52 Hz. (Aflecht 2014, 32.)



Kuva 20. Taajuuden droop-säätö (Danfoss 2023)

Jännitteen drooping liittyy loistehokuormituksen tasapainotukseen. PMS sää-
tää jännitteen droop kompensointia tarpeen mukaan. Kuvassa 24 esitetään
jännitteen drooping ja PMS järjestelmän kompensointi, jossa y-akselin vases-
malla puolella on kapasitiivinen kuorma ja induktiivinen kuorma oikealla.
Esimerkkinä voidaan tarkastella tilannetta, jossa lisätään 100 % induktiivista
kuormitusta ja jännitteen ohjearvo on alun perin 400 V. Tässä tapauksessa

taajuusmuuttajan lähtöjännite pienenee ensin 8 voltia eli 2 % Tämän jälkeen PMS nostaa jänniteohjetta. Tällöin uusi jänniteohje 100 % induktiivisella kuormalla on 408 V ja lähtöjännite palautuu 400 V:iin. Jos kapasitiivinen kuorma lisääntyy 50 %, lähtöjännite nousee ensin 406 V:iin, jonka jälkeen PMS laskee jänniteohjeen 394 V:iin, ja lähtöjännite palautuu jälleen 400 V:iin. (Aflecht 2014, 33.)



Kuva 21. Jännitteen droop-säätö (Danfoss 2023)

2. Isochronous speed control

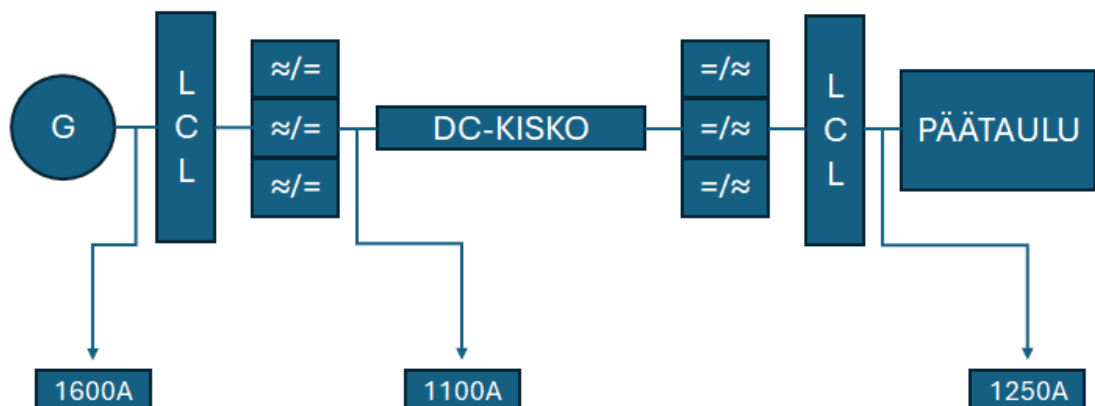
Isochronous speed control on ohjaustila, jossa Micro Grid -tilassa taajuusohje pidetään sama kuin mitattu sähköverkon taajuus. PTO käytössä verkkoon syötetty teho määritetään ainoastaan Base Current Reference parametrilla, eikä verkon taajuuden vaihtelu vaikuta tehonsyöttöön. Toisin sanoen taajuus ei muutu kuorman perusteella. Ohjaustila sopii tilanteisiin, joissa laitteet toimivat jäykässä verkossa, jossa taajuuden ei haluta vaihtelevan kuorman vaihte- luiden mukaan. (Aflecht 2014, 34.)

12.10 Parametrit

Laitteen toiminta perustuu useisiin keskeisiin parametreihin, joilla varmistetaan optimaalinen tehonhallinta ja verkon kuormanjako. Grid Converter Rated Current (P2.1.3) on kriittisin arvo, sillä se määrittää yksikön maksimivirran, jonka perusteella muut tehoa ohjaavat parametrit, kuten Base Current Reference, ilmaistaan prosentteina. Base Current Reference säätelee suoraan laitteen tehonsyöttöä niin, että esimerkiksi 100 % vastaa täyttä esiasetettua laitteen nimellisvirtaa. Lisäksi System Rated kW ja System Rated kVA ovat tärkeitä viitearvoja, joihin laite pyrkii syöttäessään AC-verkkoon; ne määrittävät pätötehon ja näennäistehon, joita ohjausjärjestelmä käyttää verkon pätö- ja loisteho-kuorman hallinnassa. Tasajännitteen osalta Nominal DC Voltage ja DC Voltage Reference yhdessä muodostavat ohjeen, jolla välipiirin tasajännite pidetään vakiona, varmistaen siten laitteen vakauden ja oikean toimintatason. Lisäksi Reactive Current Reference määrittää suoraan loistehon ohjauksen, mahdollistaen induktiivisen tai kapasitiivisen virran kompensointitarpeen mukaan. Näistä parametreista tärkeimpiä ovat siis Rated Current ja Base Current Reference, joiden avulla laitteen teho ohjataan ja varmistetaan, että AC-verkkoon syötettävä teho vastaa suunniteltua kapasiteettia. (Danfoss 2023.)

12.11 Tehokapasiteetti

Nykyinen 570 kW maksimiteho on ollut perusteltua tilanteessa, jossa kulutuksen on katsottu jäävän alle järjestelmän kapasiteetin. Laivan eliniän myöhemmässä vaiheessa sähköverkon kuorma on kasvanut erilaisten apulaitteiden myötä, jonka takia on tutkittava järjestelmän riittävyys nykyhetkessä. (Varustamo s.a.)



Kuva 22. Taajuusmuuttajan yksinkertaistettu rakenne ja suojalaitteiden virtojen nimellisarvot (Varustamo s.a.)

PMS-järjestelmän mittausdatan avulla on alun perin määritelty taajuusmuuttajan taulukossa 6 esitelty kokoluokka, parametrisointi ja taajuusmuuttajayksikön sisäisten suojalaitteiden mitoitus. (Varustamo s.a.) Tarkastellaan seuraavaksi parametrien vaikutusta laitteiston kykyyn tuottaa enemmän tehoa laivan sähköverkkoon.

Taulukko 6. Taajuusmuuttajan nimellisarvot (Danfoss 2023.)

| | |
|---------------------------------|---|
| AC-input (U_{in}) | 380-500 V AC |
| Taajuus (f) | 48-63 Hz |
| Käynnistysviive | 5 s |
| DC – Output Voltage | $1.35 * U_{in} * 1.1$ (+DC-link boosting 110%) (Oletusarvo) |
| DC – Output Current | <ul style="list-style-type: none"> • High Overload (IH) = Ympäristön lämpötila +40 °C, ylikuormitettavuus $1.5 \times IH$ (1 min./10 min.) • Low Overload (IL) = Ympäristön lämpötila +40 °C, ylikuormitettavuus $1.1 \times IL$ (1 min./10 min.) |
| Low Overload (IL) | <ul style="list-style-type: none"> • Jatkuva input AC-virta 1300 A • 1 min ylikuormitusvirta 1430 A |
| High Overload (IH) | <ul style="list-style-type: none"> • Jatkuva input AC-virta 1150 A • 1 min ylikuormitusvirta 1725 A |
| DC – teho (jatkuva) 400V verkko | 874 kW |
| Nimellisvirta | 1300 A |
| LCL-filtteri | |
| Jännite (U) | 380-500 V AC |
| Nimellisvirta (I) | 1300 A |

DC – Output Current ilmaisee, miten laitteisto kykenee hetkellisesti käsittelemään suurempia virtoja, kuin sen suunniteltu jatkuva virran arvo mutta tämä voi johtaa laitteiston ylikuumenemiseen ja vaurioitumiseen. (Danfoss, 2023.)

- Low overload I_L : Laitteen jatkuva input virta on 1300 A
- 1 min ylikuormitusvirta: Sallitaan 110 % jatkuvasta virrasta eli 1430A virta mutta vain minuutin ajan, joka kymmenes minuutti
- Minuutin jälkeen on palattava 98 % arvoon jatkuvasta virrasta, eli enintään 1274A, jotta laite ei kuormitu.

Kun taulukossa 6 mainitut arvot hyödynnetään akseligenaattorijärjestelmän parametrisoinnissa, voidaan laskea todelliset arvot ja järjestelmän rajoitteet. Akseligenaattorin 400V AC-syöttöjännite määrittää VFD-yksikön DC-kiskon tasajännitteen. Tämä voidaan laskea kaavalla 5. (Danfoss, 2023.)

$$U_{DC} = 1.35 * U_{IN} * VR \quad (5)$$

| | | | |
|-------|-----------------|------------------|-----|
| Jossa | $1.35 * U_{IN}$ | nimellisjännite | [V] |
| | VR | VoltageReference | [%] |

$$U_{DC} = 1.35 * U_{IN} * 1.1$$

$$U_{DC} = 1.35 * 400V * 1.1 = 594V$$

Kaavassa 2 kerroin 1.1 on DC-link boosting referenssiluku, jota voidaan säätää yksikön parametrilla. Oletusarvo on 110 %. Manipuloimalla referenssilukua, voidaan DC-kiskon nimellisjännitettä U_{DC} nostaa halutulle DC-kiskon jännitealueelle. Järjestelmä mittaa jatkuvasti generaattorin syöttöjännitettä ja säätää referenssilukua, jotta DC-kiskon jännite pysyy samana. DC-kiskon U_{DC} maksimiarvo voi olla 380-500V taajuusmuuttajassa 797V DC. (Danfoss, 2023.)

Yksikön nimellisvirraksi on määritelty 1239A jatkuvassa PTO-tilassa. (Varustamo s.a.) Teoreettinen syöttökapasiteetti määräytyy komponenttien virrankestävyyden optimiolosuhteissa. Tehokerroin $\cos \varphi$ ottaa huomioon verkon reaktiiviset komponentit. (Danfoss 2023.) Teho voidaan laskea kaavalla 6. (Hietalahti 2013, 229).

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (6)$$

| | | | |
|-------|----------------|-------------|-----|
| Jossa | P | pätöteho | [W] |
| | U | jännite | [V] |
| | I | virta | [A] |
| | $\cos \varphi$ | tehokerroin | |

$$P = \sqrt{3} * 400V * 1239A * 0.85$$

$$P = 729.6 kW$$

DC-kisko "näkee" vain verkon pätötehon, joten sen virta määrittyy DC-kiskon jännitteen ja pätötehon välillä. Käytetään U_{dc} lukuna yksikön nykyisen DC-link boosting referenssiluvun parametriä 118 %. (Varustamo s.a.) Virta voidaan laskea kaavan 7 Ohmin lain mukaisesti. (Hietalahti 2013, 11).

$$P = U * I \quad (7)$$

| | | | |
|-------|-----|----------|-----|
| Jossa | P | pätöteho | [W] |
| | U | jännite | [V] |
| | I | virta | [A] |

$$I = \frac{729.6 kW}{1.35 * 400 V * 1.18}$$

$$I = 1145 A$$

Huomataan, että DC-kiskon virta nousee U_{DC} referenssiluvun myötä suhteetoman korkeaksi, ja se ylittää kuvassa 22 havainnollistettujen DC-kiskon kahvasulakkeiden nimellisarvon. Nostamalla DC-kiskon jännitettä korkeammaksi muuttamalla DC-link referenssilukua, pystytään tuottamaan enemmän tehoa pienemmällä virralla, eikä suojalaitteet muodostu järjestelmän pullonkauloiksi. Lasketaan virta kaavan 7 avulla.

$$I = \frac{729.6 kW}{1.35 * 400 V * 1.4}$$

$$I = 965 A$$

12.12 Optimointi

Mikro Grid -tilassa taajuusmuuttajan syöttökapasiteetti määritellään Base Current Reference -parametrin ja nimellisvirran avulla. Base Current Reference toimii pätötehon säädön viitteenä eli ilmaistuina prosentteina laitteen Grid

Converter Rated Current -parametrissa. Tämä tarkoittaa, että kun Base Current Reference asetetaan 100 %:iin, laite syöttää nimellisvirran (Rated Current) mukaisen maksimitehon. (Danfoss, 2023.)

Rated Current parametri on asetettu laitteiston verkkoa syöttävän taajuusmuuttajan parametreissa arvoon 1083 A. (Varustamo s.a.) Lasketaan kaavan 6 avulla kuinka Base Current Reference vaikuttaa teoreettiseen tehonsyöttöön.

$$P = \sqrt{3} * 400V * 1083A * 0.85$$

$$P = 637.7 kW$$

Lasketaan potentiaalinen maksimiteho kaavan 6 avulla, kun virran arvona käytetään taulukossa 6 mainittua High Overload (IH) jatkuvaa AC input arvoa 1150 A.

$$P = \sqrt{3} * 400V * 1150A * 0.85$$

$$P = 677.2 kW$$

Parametrisoimalla laitteisto uudelleen lähemmäksi taulukon 6 arvoja saavutetaan merkittävästi lisää joustavuutta. Jo 650 kW kokonaiskapasiteetti verrattuna 570 kW:iin estäisi käytännössä apukoneiden tarpeettoman käynnistämisen verkon pienten kuormamuutosten takia. Taulukossa 7 on esitelty ehdotus päivitettäville parametreille ja niiden lukuarvoille.

Taulukko 7. Päivitetyt parametrit

| Parametri | Selite | Arvo | Yksikkö |
|-----------|----------------------|------|---------|
| P.2.1.3 | SystemRated-Current | 1150 | A |
| P.2.1.4 | SystemRatedPower | 658 | kW |
| P.2.2.1 | DC Voltage Reference | 130 | % |

Suorituskykyyn liittyvien parametrien lisäksi on muokattava ohjaukseen liittyviä parametreja esimerkiksi raja-arvojen osalta, joilla PMS ohjaa apukonetta käynnistymään taajuusmuuttajan saavuttaessa 95 % kuormituskapasiteetiaan. Uusia raja-arvoja johdattelee päivityksen kautta saatava kapasiteetin kasvu.

13 MUUT TUOTANTOMUODOT

13.1 Hybridiakkujärjestelmä

Hybridi DC-järjestelmissä akusto tarjoaa keinon lieventää tilapäisiä kuormanvaihteluita ja akuston avulla voidaan optimoida esimerkiksi akseligeneraattori-järjestelmän toimintaa tasaamalla kulutushuippuja (Peak Shaving). Kulutushuippujen tasaaminen käytännössä tarkoittaa sitä, että akkua käytetään tasaamaan äkillistä kuormankasvua laivan sähköverkossa, mikä parantaa generaattoreiden hyötysuhdetta. Kokonaan rinnakkaisella tehonsyöttöjärjestelmällä, joka hyödyntää vain akkutehoa, voidaan estää apukoneen tarpeeton käynnistys. (Danfoss 2016a.)

13.2 Jänniteikkuna ja mitoitus

Akkujärjestelmän hyödyntäminen kulutushuippujen tasaamisessa edellyttää järjestelmän tarkastelua. Ensimmäiseksi on analysoitava laivan sähköverkon kuormitusprofiili, ja tunnistettava kulutushuippujen suuruus ja kesto. Aikaisemmin mainittujen arvojen ja bilanssilaskennan avulla voidaan tehdä teoreettisia laskelmia akkujärjestelmän mitoitukseksi. Mitoituksen on oltava optimaalinen sekä kapasiteetin (Ah), että purku ja latausnopeuden suhteen (C-rate). (Danfoss 2016a.)

Akun kemiallinen koostumus vaikuttaa jännitteen käyttäytymiseen latauksen ja purkauksen aikana. Jänniteikkuna (Voltage Window) on keskeinen tekijä järjestelmän tehokkuuden ja vakauden kannalta. Eri akkutyypeillä täyden ja tyhjän akun jännitteiden suhde voi olla esimerkiksi 1.2-2-0, mikä vaikuttaa DC/DC tasasuuntauksen ja verkkoinvertterin suunnitteluun. Järjestelmän kannalta on tärkeää, että DC-kiskon minimijännite on riittävä verkkojännitteen hallintaan ja että maksimijännite pysyy laitteiston suunnittelukriteerien sisällä. Jännitteen

vaihtelu vaikuttaa akun varaustilan (State Of Charge, SOC) hallintaan ja vaatii dynaamista säätöä. (Danfoss 2016a.)

13.3 Jännitteen vaihtelu

Akun jännitteen vaihtelua voidaan mallintaa C-arvon mukaan. Korkea C-rate (lataus-/purkausnopeus) johtaa suurempiin jännitevaihteluihin.

- Nopea purkausnopeus tarkoittaa sitä, jos akun jännite laskee 30 sekunnin aikana 1000V → 700V eli 300V, jännitteen muutosnopeus on 10V/s.
- Hidas purku tarkoittaa sitä, jos sama 300V lasku tapahtuu 30 minuutissa, niin jännitteen muutosnopeus on 0,2V/s.

Rinnakkaisten akkupakettien lisääminen pienentää jännitevaihtelua, mikä parantaa järjestelmän hallintaa ja energiankäytön tehokkuutta. (Danfoss 2016a.)

13.4 Galvaaninen erotus

Taajuusmuuttajayksikön pulssinleveysmodulaatio synnyttää epäsymmetristä jännitevaihtelua (Common Mode Voltage), joka aiheuttaa DC-kiskon jännitteen vaihteluita mitattuna maihin. Jos DC-kiskon jännite on esimerkiksi 1025V DC, voi jännitepiikit johtuen pulssinleveysmodulaatiosta olla jopa 1,5kV, mikä on haitallista akustolle. Syöttöjärjestelmän DC puoli on suojattava joko tekemällä galvaaninen erotus muuntajalla, jonka tähtipistettä ei ole maadoitettu ja AC-puolelle tarvitaan LC tai LCL filteri. Jos muuntajan impedanssi on riittävä, voidaan käyttää LC-suodatinta LCL suodattimen sijaan, mikä vähentää jännitehäviötä. (Danfoss 2016a.)

13.5 Akun hallinta

Järjestelmän turvallisen ja tehokkaan toiminnan varmistamiseksi SOC:n laskennan on oltava tarkka. Tätä varten järjestelmään tarvitaan akunhallintajärjestelmä (Battery Management System, BMS), joka seuraa akun varaustilaa ja estää lataamasta akkua liikaa, tai purkamasta liikaa. Yksittäisten akkukennojen eri varaustasot ja impedanssit voivat kuitenkin aiheuttaa epätasapainoa, jolloin tasapainolataus on tarpeellista. (Danfoss 2016a.)

- Aika-ajoin BMS-järjestelmän on nollattava akkujen SOC, jotta monitorointi pysyy luotettavana. Tämä edellyttää ylläpitolatausta, jossa kaikki akkukennot latautuvat täyteen

- Ylilataamisen välttämiseksi tasapainolataus tulee suorittaa hitaasti (0,01C), jotta kaikki kennot saavuttavat täyden varauksen yhtä aikaa
- Passiivisella tasapainotuksella akkukennojen varaustasot tasapainottuvat luonnollisesti mutta hitaasti, joka voi vaatia lisälatauslaitteiston.

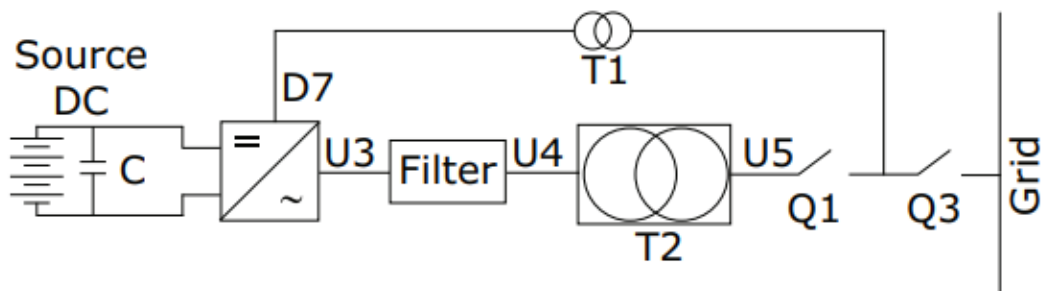
13.6 Ohjausjärjestelmät

Akkujärjestelmä vaatii järjestelmäkomponenttien lisäksi useita ohjausjärjestelmiä toimiakseen laivan muun sähköverkon kanssa. (Danfoss 2016a.)

- ESS → priorisoi sähköntuotantotavat
- PMS → hallitsee eri sähköntuotantomenetelmien tehotasapainoa (kuormanjako)
- PCS (Power Conversion System) → tehonhallinta akun ja verkon välillä eli DC/AC laitteisto.
- BMS → Monitoroi akkujen kuntoa, SOC hallinta.

13.7 Direct to DC Mikro Grid -tilassa

Laivan sähköverkkoon voidaan suunnitella Direct to DC akkujärjestelmä, joka perustuu samoihin periaatteisiin, kuin aiemmin selitetty akseligenaattori Mikro Grid -tilassa. Järjestelmä eroaa merkittävästi vain sen osalta, että DC-kiskon jännitelähteenä on generaattorin sijasta akku. Järjestelmä on ideaalinen kuormitushuppujen tasaamiseen tai kuorman jakoon verkon generaattoreiden kanssa. (Danfoss 2016a.)



Kuva 23: Direct to DC akkujärjestelmä (Danfoss 2016a)

Micro Grid -tilassa taajuusmuuttajan teho perustuu yksikön nimellisvirrasta johdettuihin parametreihin. Vaihtosuuntaaja mahdollistaa tehonsäädön täsmälleen samoilla droop asetuksilla, kuin laivan generaattoreissa, joka mahdollistaa loistehon säädön. Perinteisiin generaattoreihin verrattuna laite reagoi huomattavasti nopeammin kuorman muutoksiin. Micro Grid -tilassa, kun akku-

järjestelmä toimii rinnakkain muiden generaattoreiden kanssa, PMS ohjaa järjestelmän tehonhallintaa. Saareketilassa laite toimii kuin itsenäinen generaattori, jolloin verkon taajuutta säädetään kuormituksen muutosten mukaisesti. Tämä lisää laivan turvallisuutta esimerkiksi black out tilanteessa, jossa sähköverkko voidaan muodostaa pelkästään akkujärjestelmän avulla uudelleen. (Danfoss 2016a.)

13.8 Mitoitus

Kuvan 23 mukaisen järjestelmän suunnittelu alkaa akun jänniteominaisuuksien analysoinnilla. Akun toimittaja määrittelee yleensä varaustilojen jännitetasot. Käytetään esimerkkimitoituksessa seuraavanlaista akkupakettia:

- 100 % SOC → 810 V
- 0 % SOC → 600 V
- 600 kWh

Jänniteikkuna määrittelee sen, kykeneekö valittu taajuusmuuttaja käsittelemään DC input jännitteen tällä jännitealueella. Laitteen tulee siis kyetä toimimaan esimerkiksi 550 V – 820 V jännitteellä, jättäen pienen marginaalin. (Danfoss 2016.)

Seuraavaksi on määritettävä taajuusmuuttajan AC puolen IGBT-sillan jälkeinen jännite, mikä määrittelee muuntajan mitoituksen. Kriittisin tekijä tämän jännitteen mitoituksessa on hallitsematon virran kulku laivan verkosta akkuun, joka voi aiheuttaa akun vioittumisen ja ylikuumenemisen. Ilmiö voi tapahtua, jos AC puolen jännite ylittää tasajännitteen arvon, ja virta pääsee kulkemaan tasasuuntauksen flyback -dioiden läpi. Tämän estämiseksi on säädettävä jännitetasot niin, että diodit eivät mahdollista akkujen hallitsematonta latausta. (Danfoss 2016a.)

Jos verkkojännite ylittää tasajännitteen tason, virta voi kulkea suoraan akkuun. Vaihtojännitteen ja tasajännitteen välinen suhde voidaan laskea yksinkertaistettuna kaavan 8 avulla.

$$U_{DC} = U_{AC} = \sqrt{2} * 1.1 \quad (8)$$

| | | | |
|-------|----------|---------------|-----|
| Jossa | U_{DC} | tasajännite | [V] |
| | U_{AC} | vaihtojännite | [V] |

$$U_{DC} = U_{AC} * 1.56$$

Tämä antaa suhdeluvuksi noin 1.56. Akkupaketin SOC 100 % jännitteellä 810 V DC vaihtojännite on:

$$U_{AC} = \frac{810 \text{ V}}{1.56} = 519.2 \text{ V}$$

Akkupaketin SOC 0 % jännitteellä 600 V DC vaihtojännite on:

$$U_{AC} = \frac{600 \text{ V}}{1.56} = 384.6 \text{ V}$$

Jotta vältetään akun hallitsematon lataus, AC output puolen jännitteen on pysyttävä alle 384 V ja turvallisen marginaalin vuoksi voidaan arvoksi asettaa 350 V. (Danfoss 2016.)

Muuntajan valintaan vaikuttaa laivan sähköverkon jännite 400V AC. Muuntajan ensiöpuolen jännite on oltava siis 350 V ja toisiopuolen 400 V. Suodattimien, kuristimien ja muuntajan aiheuttamat jännitehäviöt on otettava huomioon. Tyypilliset jännitehäviöt ovat noin 5-7 % luokkaa, jotka vastaavat noin 50 V jännitealenemaa täydellä kuormalla. (Danfoss 2016a.)

Akkua ladattaessa virta kulkee vastakkaiseen suuntaan, mikä alentaa taajuusmuuttajan input jännitettä. Taajuusmuuttajan AFE teknologia kompensoi jännitealenemaa syöttämällä loisvirtaa LCL-suodattimeen, jolloin jännite vahvistuu ja DC-kiskon jännite pysyy riittävänä. Koska yksikön pitää kyetä käsittelemään verkon kuormaa esimerkiksi tasaamalla kulutushuippuja tai syöttämällä tehoa verkkoon rinnakkain generaattoreiden kanssa, virrat voivat nousta tuhansiin

ampeereihin. Siksi kaikki järjestelmän komponentit on mitoitettava kestämaan hetkellisiä kuormia vakaasti. (Danfoss 2016a.)

Arvioidaan, että järjestelmän on pystyttävä käsittelemään 1000 A sekä lataus, että purkuvaiheessa. Koska akun kapasiteetti on 600 kWh, maksimiteho saadaan laskettua kaavan 7 avulla.

$$P = V * I$$
$$810 \text{ V} * 1000 \text{ A} = 810 \text{ kW}$$

Taajuusmuuttajat mitoitetaan virrankeston perusteella. Valitun taajuusmuuttajan on kyettävä käsittelemään suurimmat mahdolliset virrat, jotka syntyvät akun matalilla jännitetasoilla. Kolmivaihejärjestelmän virta voidaan laskea kaavalla 6.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi}$$
$$I = \frac{810 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 350 * 0.95}$$
$$I = 1406 \text{ A}$$

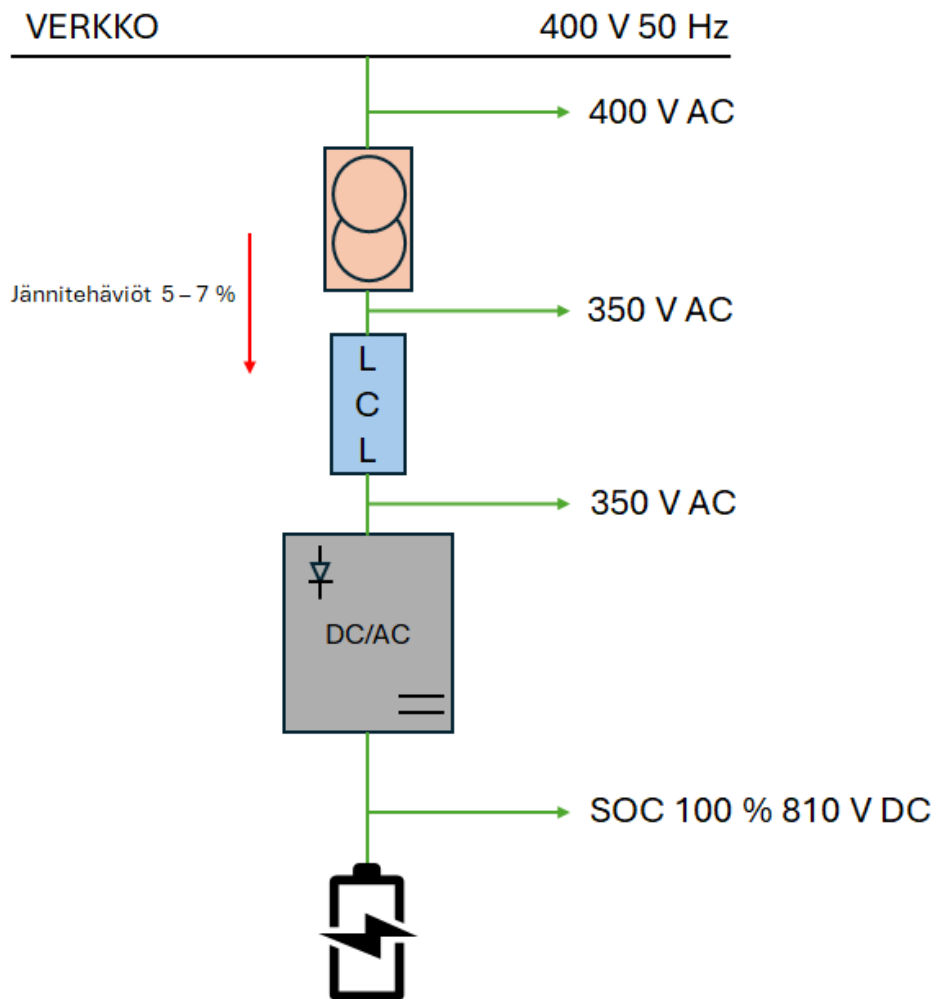
Muuntajan on tuettava 350 V jännitettä ja 1406 A virtaa. Muuntajan teho voidaan laskea kaavalla 9. (Danfoss 2023.)

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \tag{9}$$

| | | | |
|-------|---------------|--------------|-------|
| Jossa | S | näennäisteho | [kVA] |
| | P | pätöteho | [W] |
| | Cos φ | tehokerroin | |

$$S = \frac{810 \text{ kW}}{0.95}$$
$$S = 852.6 \text{ kVA}$$

Loisvirran minimoimiseksi jännitteen säätö on toteutettava tarkasti. Kuvan 23 mukaisesti järjestelmään asennetaan mittauspiiri muuntajan T1 avulla, jolla mitataan verkon jännite ja taajuus. Arvojen avulla PMS yhdessä taajuusmuuttajan ohjauskortin kanssa säätää taajuusmuuttajan lähdejännitettä. Ohjauksen PID-säädin kompensoi suodattimien aiheuttamat jännitehäviöt, jotta verkon jännite pysyy halutulla tasolla. (Danfoss 2016a.)



Kuva 24: Mitoitettu Direct to DC järjestelmä

Laskelmien pohjalta voidaan luoda järjestelmän lopullinen kokoonpano, johon tarvitaan seuraavat komponentit kappaleen 12.6 mainittujen ohjausjärjestelmien lisäksi:

- Taajuusmuuttaja 1450 A nimellisvirralla
- Jännitteenmittauskortti ohjaukseen
- 850 kVa muuntaja
- 1450 A LCL suodatin

14 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ennen taajuusmuuttajan tehon optimointiin tähtäävien muutosten toteutusta on välttämätöntä simuloida järjestelmää uusilla ehdotetuilla parametreilla. Tämä simulointivaihe on kriittinen, sillä sen avulla voidaan ennakolta arvioida muutosten vaikutukset järjestelmän toimintaan ja varmistaa niiden saumaton yhteensopivuus laivan muiden sähköjärjestelmien kanssa. Lisäksi simuloineilla voidaan tutkia, miten Base Current Reference -parametrin muuttaminen vaikuttaa todelliseen tehonsyöttöön ja varmistaa, että tavoiteltu 650 kW:n kapasiteetti on saavutettavissa ilman riskejä.

On merkittävää, että löytämällä tämä potentiaali olemassa olevasta taajuusmuuttajayksikössä parametrisoinnin avulla, varustamo voi mahdollisesti välttää välittömät suuret investoinnit uusiin sähköntuotantoratkaisuihin, kuten hybridiakkujärjestelmiin, eikä ole tarpeen muuttaa sähkönkulutustapoja. Sen sijaan nykyistä kulutusta voidaan paikata lisäämällä tehoa jo olemassa olevasta akseligeneraattorijärjestelmästä, mikä tuo merkittäviä säästöjä investointikustannuksiin, koska uusia laitteita ei tarvitse hankkia.

Laajemmin tarkasteltuna nämä havainnot korostavat sähköjärjestelmien uudelleenarvioinnin ja optimoinnin tärkeyttä olemassa olevissa laivoissa. Alkuperäiset suunnitteluparametrit eivät välttämättä vastaa nykyisiä tai tulevia tarpeita, ja järjestelmien potentiaalia voidaan hyödyntää paremmin huolellisella analyysillä ja säädöillä. Erityisesti siirryttäessä kohti hybridiratkaisuja, kuten tässäkin tutkimuksessa sivuttiin hybridiakkujärjestelmien osalta, olemassa olevien tehontuotantojärjestelmien joustavuus ja optimointimahdollisuudet nousevat avainasemaan.

Tulevaisuudessa on olennaista jatkaa järjestelmän simulointia uusilla parametreilla ennen varsinaista käyttöönottoa ja tutkia, mitä tehon hallintaan liittyviä asioita pitää muuttaa samanaikaisesti. Lisäksi taloudellisen arvioinnin sisällyttäminen jatkotutkimuksiin antaisi kattavamman kuvan optimointitoimenpiteiden kokonaisvaikutuksista.

15 LÄHTEET

Aflecht, S. 2014. Taajuusmuuttajan generaattorikäyttö Vacon NXP Grid Converter. Vaasan ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201501151322> [viitattu 25.3.2025]

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Balashov, S. 2011. Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems. LUT-yliopisto. Sähkötekniikan tiedekunta. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201105271629> [viitattu 10.10.2024].

Borstlap, R. & Katen, H.T. 2011. Ships electrical systems. Enkhuizen: Dokmar.

Danfoss. 2016a. Design guide hybridization. Danfoss dokumentit. Vaasa: Vacon Ltd. Saatavissa: <AJ361178777743en-000101.pdf> [viitattu 21.3.2025]

Danfoss. 2016b. Grid Converter – puhtaampaa ja meluttomampaa tekniikkaa satamiin ja merenkulkuun. Tuote-esitys. Saatavissa: files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB914A120_NXP_Grid_Converter_LR.pdf [viitattu 25.3.2025]

Danfoss. 2023. Grid converter application manual. Danfoss dokumentit. Vaasa: Vacon Ltd. Saatavissa: <AB380750471792en-000701.pdf> [viitattu 20.3.2025]

Giuffrida, M. 2013. Electrical Plants and Electric Propulsion on Ships. 1. Painos. Switzerland. ISBN 978-1-291-56076-3

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1. Painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hyytiä, K. 2012. Laivan sähköverkon simulointi. Aalto yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201209213144> [viitattu 16.9.2024].

IMO. 2017. Unified interpretations of SOLAS chapters II-1 and XII, of the technical provisions for means of access for inspections (Resolution MSC.158(78)) and of the performance standards for water level detectors on bulk carriers and single hold cargo ships other than bulk carriers (Resolution MSC.188(79)). Lontoo: International Maritime Organization. Saatavissa: [28718-MSC 1-Circ 1572 - UI Means of Access, Water detect SOLAS Ch II-1 And XII .pdf](#) [viitattu 15.9.2024].

Man Energy Solutions. 2021. Shaft generators for low speed engines. Technical papers. Denmark: Man Energy Solutions. Saatavissa: [man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_12](https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_12) [viitattu 15.9.2024].

Patel, M.R. 2012. Shipboard electrical power systems. Boca Raton. FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Piiroinen, A. 2019. Electric Distribution systems in ships. ABB Marine and Ports. Luentosarja. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Radan, D. 2008. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Engineering Science & Technology. Thesis for the degree of philosophiae doctor. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/11250/231176> [viitattu 10.10.2024].

Savolainen, J. 2018. Lääkintätilojen IT-verkon vikakysymykset. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018052710448> [viitattu 20.9.2024].

SFS 6000-1:2022. 2022. Pienjännitesähköasennukset. 5. Painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Stähle, O. 2016. Laivan sähköverkon yliaaltojen tarkastelu Neplan-ohjelmiston avulla. Tampereen teknillinen yliopisto. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201512141826> [viitattu 15.9.2024].

Suoniemi, K. 2018. Tahtikoneet. Luentosarja. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Traficom. 2022. Luokituslaitokset. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: [Luokituslaitokset | Traficom](#) [viitattu 10.9.2024].

Traficom. s.a. Chapter II - 1 Construction – Structure, subdivision and stability, machinery and electrical installations. Saatavissa: [17381-SOLAS Chapter II-1.pdf](#) [viitattu 10.9.2024].

Varustamo. s.a. Tiedot eivät ole saatavilla