

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Engineering Science
Sähkötekniikka

Joel Ekholm

RISTEILYALUKSEN MVDC SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ

Diplomityö

Tarkastajat:

Professori Pasi Peltoniemi
Diplomi-insinööri Sami Tohmola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Joel Ekholm

Risteilyaluksen MVDC Sähköjakelujärjestelmä

Diplomityö

2021

85 sivua, 33 kuvaa, 24 taulukkoa ja 1 liitettä

Tarkastajat: Professori Pasi Peltoniemi ja Diplomi-insinööri Sami Tohmola.

Hakusanat:

Keywords: Risteilyalus, Laiva, MVDC, MVAC, LVDC, LVAC, Sähköjakelu, Keskijännite

Tässä työssä selvitetään mitä tekijöitä MVDC:llä toimivan risteilyaluksen sähköjakeluverkon suunnittelussa tulee huomioida sekä mitkä ovat kyseisen järjestelmän hyötyjä ja haasteita. Vertailtavana on MVAC- ja MVDC-järjestelmien kustannusten muodostuminen ja niiden eroavaisuus keskenään. Työssä ehdotetaan millainen MVDC-sähköjakeluverkon rakenne voisi olla, kunhan tarvittavat teknologiat tulevat kaupallisesti saataville. Polttoaineenkulutusta, sähköjakelujärjestelmän hyötysuhdetta sekä päästöjä vertaillaan perinteisen MVAC- ja tutkittavan MVDC-järjestelmän välillä. Selvittävänä on laivojen MVDC-teknologioiden nykytilanne ja mitkä ovat tarpeelliset kehityskohteet jotta MVDC-järjestelmiä voidaan ottaa käyttöön risteilyaluksissa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Electrical Engineering

Joel Ekholm

MVDC Electrical Distribution System For A Cruise Ship

Master's thesis

2021

85 pages, 33 figures, 24 tables and 1 appendices

Examiners: Professor Pasi Peltoniemi and M.Sc. (Tech.) Sami Tohmola.

Keywords: Cruise ship, Vessel, MVDC, MVAC, LVDC, LVAC, Electrical distribution, Medium voltage

The aim of this M.Sc. thesis is to analyze what are the factors to be evaluated in the design phase of electrical distribution system for a MVDC cruise ship and what are the benefits and challenges for such system. System structures of MVAC and MVDC are compared, and the total cost level formation is evaluated. In this work is proposed a topology for cruise ship MVDC electrical distribution system, once the required technology is commercially available. Fuel consumption, electrical distribution system efficiency and emissions are compared between traditional MVAC and studied MVDC system. It is examined what is the current state of ships MVDC technology and what are the necessary fields for improvement in order to start implementing MVDC in cruise ships.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty työnantajani Meyer Turku Oy:n sähkösuunnitteluosaston toimeksiantona maaliskuun 2021 ja syyskuun 2021 välisenä aikana. Haluan kiittää yritystä mielenkiintoisen diplomityön mahdollistamisesta. Kiitos LUT-yliopiston professori Pasi Peltoniemelle ja Meyer Turku Oy:n diplomi-insinööri Sami Tohmolalle työn ohjauksesta sekä uusien näkökulmien esittämisestä diplomityöprosessin aikana. Lisäksi haluan kiittää läheisiä joiden tuki on ollut tärkeää opintojen ajan.

Turussa 06.09.2021

Joel Ekholm

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	3
1.1	Työn tausta.....	4
1.2	Meyer Turku Oy	7
1.3	AC- ja DC-sähköverkkojen kehitysvaiheet.....	8
1.4	Laivan LVDC sähköjakelujärjestelmä	9
1.5	MVDC sovellukset.....	11
2	Laivan MVDC sähköjakelujärjestelmä	14
2.1	Sähköjakeluverkon rakenne	17
2.2	Jännitetaso.....	19
2.2.1	LVDC	20
2.2.2	MVDC	20
2.3	Tasasuuntaajat	21
2.3.1	Dioditasasuuntaaja	21
2.3.2	Tyristoritasasuuntaaja.....	23
2.3.3	Aktiivinen tasasuuntaaja	23
2.3.4	Modulaarinen monitasoinen konvertteri	24
2.4	Maadoitukset.....	25
2.4.1	Bipolaarinen järjestelmä ilman maadoitusta	25
2.4.2	Bipolaarinen järjestelmä jossa maadoitus resistanssin kautta	26
2.4.3	Bipolaarinen järjestelmä kiinteästi maadoitetulla tähtipisteellä.....	26
2.4.4	Unipolaarinen järjestelmä	27
2.5	Vikavirtasuojaus	27
2.6	Galvaaninen erotus.....	29
2.7	Kaapelit.....	30

2.8	Hyödyt.....	31
2.8.1	Moottorin hyötysuhde	31
2.8.2	Generaattorien toiminta tehokertoimella 1.....	34
2.8.3	Siirtohäviöt.....	34
2.8.4	Järjestelmän koko ja paino	35
2.8.5	Akkujärjestelmien integrointi.....	35
2.9	Haasteet.....	36
2.9.1	Korkeat oikosulkuvirrat.....	36
2.9.2	MVDC suojausjärjestelmän toteuttaminen	37
2.9.3	Kaupalliset sovellukset.....	38
3	Järjestelmävertailu MVAC-MVDC	40
3.1	Voimalaitos	40
3.2	Primäärivoimanlähteet	40
3.3	Päätaulut ja propulsio.....	42
3.4	Keskijännitejakelu.....	44
3.5	Pienjännitejakelu.....	45
3.6	MVDC kustannusvaikutukset	46
3.7	Yhteenveto	49
4	Tapaus.....	50
4.1	Järjestelmän ja komponenttien valinnat.....	51
4.1.1	Sähkönjakeluverkon rakenne	52
4.1.2	MVDC jännitetaso.....	52
4.1.3	LVDC jännitetaso.....	52
4.1.4	Tasasuuntaaja ja kytkentä.....	53
4.1.5	Maadoitus	57
4.1.6	Vikavirtasuojaus.....	58

4.1.7	Galvaaninen erotus.....	58
4.1.8	Kaapelit	58
4.2	Sähkönjakelujärjestelmien hyötysuhdevertailu MVAC-MVDC	58
4.2.1	Satamassa	62
4.2.2	Kesällä 16 solmun nopeudella.....	66
4.2.3	Kesällä täydellä nopeudella.....	69
4.2.4	Yhteenveto	72
4.3	Polttoaineenkulutus.....	72
4.4	Päästöt	77
5	Johtopäätökset.....	80
6	Yhteenveto	82
	Lähteet	86

Liite 1. Polttoaineenkulutuksen vertailulaskelma

KÄYTETYT LYHENTEET

AC	Alternating current: vaihtovirta
ARU	Active rectifier unit: aktiivinen tasasuuntausyksikkö
AVR	Automatic voltage regulator: automaattinen jännitteensäätäjä
CB	Circuit breaker: katkaisija
CHB	Cascaded h-bridge: kaskadi h-silta
CSC	Current source converter: virtalähdekonvertteri
DAB	Dual active bridge: kaksisuuntainen DC-DC konvertteri
DC	Direct current: tasavirta
DP	Dynamic positioning: dynaaminen paikannus
DRU	Diode rectifier unit: dioditasasuuntaajayksikkö
FC	Flying capacitor: konvertterin kytkentätyyppi
HF	High frequency: korkeataajuinen
HFO	Heavy fuel oil: raskaspolttoöljy
HVDC	High voltage direct current: Suurjännitteinen DC-siirtojärjestelmä
IFEP	Integrated full electric propulsion: sähköinen propulsiojärjestelmä
IGBT	Insulated gate bipolar transistor: suuritehoinen bipolaaritransistori
IGCT	Integrated gate commutated thyristor: hilakommutoitu tyristori
KV	Kilo volt: kilovoltti
LNG	liquefied natural gas: nesteytetty maakaasu
LV	Low voltage: pienjännite
LVAC	Low voltage alternating current: pienjännitteinen vaihtovirta
LVDC	Low voltage direct current: pienjännitteinen tasavirta
MF	Medium frequency: keskitaajuinen
MMC	Modular multilevel converter: modulaarinen monitasoinen konvertteri
MPG	Multi-phase generator: usean käämisetin sisältävä generaattori
MSB	Main switch board: päätaulu
MV	Medium voltage: keskijännite
MVAC	Medium voltage alternating current: keskijännitteinen vaihtovirta
MVDC	Medium voltage direct current: keskijännitteinen tasavirta
NPC	Neutral point clamped: neutraalipisteestä kytketty konvertteri

PMS	Power Management System: sähköjärjestelmän hallintaohjelma
PMSG	Permanent magnet synchronous generator: kestopagneettisynkronigeneraattori
RFO	Residual fuel oil: yleinen kuvaus raskasöljyille
SFOC	Specific fuel oil consumption: polttomoottorin polttoainetehokkuus
SM	Sub-modules: alimoduulit
SST	Solid state transformer: puolijohdemuuntaja
TRU	Thyristor rectifier unit: tyristöihin perustuva tasasuuntaajayksikkö
VSC	Voltage source converter: jännitelähdekonvertteri
ZVS	Zero voltage switching: nollajännitteinen kytkentä

1 JOHDANTO

Työssä keskitytään tutkimaan MVAC- (engl. Medium Voltage Alternating Current) ja MVDC-järjestelmien (engl. Medium Voltage Direct Current) merkittävimpiä eroavaisuuksia ja miten nämä tulisi huomioida laivojen sähköjakeluverkon suunnittelussa Meyer Turku Oy:n telakalla. AC-järjestelmiin (engl. Alternating Current) verrattuna DC:llä (engl. Direct Current) on joitakin yleisesti tunnettuja hyötyjä ja haasteita, näiden todettujen tekijöiden vaikutusta tutkitaan risteilyaluksen sähköjakeluverkon toteuttamisessa. Meyer Turku Oy:n telakalla ei ole rakennettu laivoja DC-tekniikalla joten referenssin puuttuessa aihe vaatii tarkempaa selvitystä. Työn tulosten myötä MVDC-järjestelmän kokonaiskustannuksia ja teknistä toteutettavuutta pystytään arvioimaan paremmin jo projektin tarjousvaiheessa. Nykyaikaisten risteilyalusten sähköjakelujärjestelmät on toteutettu pääasiassa kolmivaiheisena (MVAC) keskijännitesähköjakeluna. Risteilyalusten sähköjärjestelmät syöttävät jopa yli 60 MW kuormia joten MVDC-järjestelmään liittyvät hyödyt voivat olla taloudellisesti ja ympäristöllisesti merkittäviä. Mielenkiinto MVDC-järjestelmiä kohtaan on kasvanut viime vuosina ja ne nähdään mahdollisena korvaajana nykyisille MVAC-järjestelmille laivojen sähköjakelussa. Lisääntynyt primäärivoimanlähteiden polttoainetehokkuus, järjestelmän pienempi koko ja paino, suurikokoisten matalataajuisten muuntajien eliminointi, järjestelmän fyysinen hajautettavuus ja energian varastointijärjestelmien helpompi integrointi tekee MVDC-järjestelmästä houkuttelevan vaihtoehdon.

DC-tekniikan kehityksen myötä on syntynyt tarve tehdä vertailevaa arviointia MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä ja demonstroida eri teknologioiden soveltuvuutta MVDC-järjestelmän toteuttamiseen. Tässä työssä käydään läpi hyötyjä ja haasteita MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä, käyttäen Meyer Turku Oy:n telakalta toimitetun risteilyaluksen MVAC-järjestelmää vertailun lähtökohtana. Suunniteltaessa MVDC-järjestelmiä, mahdollisia eri teknologioita voidaan harkita ja niiden vaikutuksia tutkia risteilyaluksen toiminnan kannalta. Tässä työssä käydään läpi eri teknologioita koskien primäärivoimanlähteet, generaattorit, tasasuuntaajat, maadoitukset, akkujärjestelmät, suojausmenetelmät, galvaaninen erotus ja kaapelit. Eri järjestelmien toteutettavuutta voidaan selvittää näiden tekijöiden kautta: luotettavuus, sähköjakelujärjestelmän hyötysuhde, kaupallinen saatavuus ja hinta,

turvallisuus, sähkön laatu, laivan tehon tarpeisiin vastaaminen, polttoaineen kulutus ja päästöt sekä tila- ja painovaatimukset.

1.1 Työn tausta

Tehoelektroniikan kehittyminen ja halpeneminen viime vuosina on johtanut laivoissa hybridi AC-DC- ja kokonaisten DC-järjestelmien yleistymiseen. Modernien laivojen sähkökuormat kasvavat jatkuvasti. Propulsiojärjestelmät, DP (engl. Dynamic Positioning) ja risteilyalusten matkustajien mukavuuteen liittyvät toiminnot, kuten hotelli- ja ylläpitokuormat vaativat sähkötehoa kasvavassa määrin. Sähköjärjestelmän pitää pystyä nopeasti vastaamaan kaikkiin laivan operointitilanteisiin. Laivan sähköverkolta vaaditaan suurta luotettavuutta ja selviytymiskykyä ongelmatilanteissa. Energiavarastojen rooli, uusiutuvien energialähteiden sisällyttäminen ja päästötön operointi ovat erittäin tärkeitä tekijöitä modernien laivojen sähköjakeluverkkojen suunnittelussa. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 84)

Viime vuosikymmenen alusta asti tutkijat ja teollisuus ovat tutkineet DC-järjestelmien mahdollisuuksia laivojen sähköjakelussa. Tämän myötä kehitettiin ABB:n toimesta (1kV) LVDC-sähköjakelujärjestelmä (engl. Low Voltage Direct Current) offshore-tukialukselle, jonka huipputeho on 20 MW ja polttoainesäästöksi saadaan 20% (J. F. Hansen et al., 2011). Myös Siemensin toimesta on toteutettu LVDC-järjestelmä *BlueDrive PlusC*. Nämä järjestelmät kuvaavat DC-järjestelmän hyötyjä kuten alhaisempaa polttoaineen kulutusta, järjestelmän energiatiheiden kasvua, laitteiston pienempiä tila- ja painovaatimuksia ja järjestelmän toteutuksen joustavuutta. Risteilyaluksissa tehot ovat tyypillisesti suurempia (yli 20 MW), jolloin käytössä on MVAC-järjestelmät ja tämän myötä myös risteilyaluksen DC-järjestelmä tulee toteuttaa keskijännitteisenä MVDC:nä jotta DC-järjestelmän hyödyt säilyvät myös suuremmassa teholuokassa.

Viime vuosien kehitys kuljetusteollisuudessa on usein syntynyt tehoelektroniikan sovellusten myötä (esim. sähköautot ja magneettiseen levitaatioon perustuvat junat). Nämä innovaatiot hyödyntävät DC-tehoa ja vaativat AC-DC konvertoinnin verkon nykyinfrastruktuurilla. Vauhdilla kehittyvät mikroverkot jotka koostuvat hajautetusta tuotannosta (kuten aurinkopaneelijärjestelmät ja akkujärjestelmät) hyödyntävät ja/tai tuottavat ominaisesti DC-

tehoa. Tehoelektroniikka on energiatehokas, isoihin teholuokkiin kykenevä ja luotettava ratkaisu uusiutuvan energiatuotannon liittämiseksi sähköjakeluverkkoon. Tehoelektroniikan kehitys sisältäen puolijohdekomponentit ja materiaalit, on avannut uusia mahdollisuuksia suuren tehon, nopean kytkentätaajuuden ja pienen muuntohäviön omaavien konvertertien valmistamiseen. Käytännössä kaikki jännite- ja virtatasot on mahdollista saavuttaa hyödyntämällä puolijohdekomponenttien sarjaan ja rinnankytkentöjen yhdistelmiä. Kaikki nämä tekijät yhdessä mahdollistavat DC-järjestelmien kehittämisen ja käyttöönoton kaikilla sähköjakeluverkon teho- ja jännitetasoilla. (Reed et al., 2012, s. 70-71)

Viimeaikainen kehitys keskijännitteisten nopean kytkentätaajuuden puolijohteissa on mahdollistanut DC-järjestelmien vahvuuksien hyödyntämisen verrattuna AC-järjestelmiin:

- Erikokoisten generaattorien ja varastointijärjestelmien helpompi kytkentä ja pois kytkentä.
- Kytkinlaitteiden koon ja sähköisten suureiden pieneneminen.
- Suurikokoisten pienitaajuisten (50 Hz tai 60 Hz) muuntajien eliminointi joka johtaa alhaisempiin kustannuksiin pienemmän tilankäytön ja vähentyneen asennustyön takia.
- Vikavirtojen rajoitus ja hallinta sekä palautuminen viasta.
- Reaktiivisen jännitekuopan eliminointi.
- Tehon kulku molempiin suuntiin.
- Voimalaitosjärjestelmän painon pieneneminen hyödyntämällä suuren pyörimisnopeuden generaattoreita.
- Kaapelipoikkipinnan parempi hyödyntäminen virranahtoilmion puuttuessa (skin effect).
- Tehon virtauksen parempi hallinta, erityisesti muutos- ja hätätilanteissa.
- Polttoaineen kulutuksen pieneneminen sallimalla moottorien vaihteleva pyörimisnopeus.
- Parantunut hyötysuhde kun järjestelmään liitetään varastointijärjestelmiä, aurinkopaneeleita ja polttokennoja.
- Generaattoreita ei ole tarpeellista tahdistaa verkkoon.
- Järjestelmän alhaisemmat asennus- ja operointikustannukset.
- Moottoreiden vähentynyt huoltotarve.

- Pienentynyt ääni ja värinä.

DC-järjestelmän merkittävä hyöty on laivan primäärivoimanlähteen kuten dieselmootoreiden, kaasun- tai höyryturbiinien energiatehokkaampi käyttö joka johtaa polttoainekustannusten pienentymiseen. DC-järjestelmä on painoltaan kevyempi toteuttaa, vaatii vähemmän tilaa, siirtohäviöt on pienemmät, generaattoreita ei tarvitse tahdistaa verkkoon jolloin kytkentä on nopeampaa ja yksinkertaisempaa sekä energiavarastojen kytkeminen on helpompaa. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 83)

DC-järjestelmän haasteita ovat korkeat oikosulkuvirrat ja DC-järjestelmän suojauksen toteuttaminen on hankalampaa. Ilman tapauskohtaista analysointia DC-järjestelmään kytkettävien energiavarastojen hankinta saattaa osoittautua taloudellisesti kannattamattomaksi. DC-järjestelmien kehityksen myötä sähkönlaatuun liittyviä ongelmia pitää osata hallita myös DC-järjestelmän toteutuksessa: tehon ja jännitteen stabiilisuuden heikkeneminen, harmoniset yliaallot ja tehon laadun ongelmat. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 83)

Vaikka kirjallisuudessa on kuvailtu monia edistysaskeleita laivojen MVDC-järjestelmien kehittämisessä niin silti on olemassa selkeä puute kaupallisista sovelluksista joita tarvitaan jotta MVDC-järjestelmiä voidaan rakentaa käytännössä. Tässä työssä selvitetään merkittävimpiä teknisiä haasteita jotka liittyvät MVDC-järjestelmien käyttöönottoon risteilyaluksissa. Haasteita selvitetään esimerkin kautta joten referenssinä käytetään Meyer Turun telakalta vuonna 2018 luovutettua Mein Schiff 1 risteilyalusta. Risteilyaluksen MVDC-järjestelmän yleisestä rakenteesta tehdään ehdotus niiltä osin kuin se on mahdollista, lisäksi selvitetään mahdollisten tulevaisuuden teknologioiden hyödyntämistä MVDC-järjestelmissä. MVDC-järjestelmän tarkempi suunnittelu vaatii edelleen monien teknologioiden kaupallistumista, mutta työssä tarkastellaan diplomityön kirjoitushetkellä olemassa olevia kaupallisia sovelluksia ja mielenkiintoisimpia tutkimuskohteita. Telakalla on tarpeellista saada tietoa MVDC-tekniikan nykytilanteesta joten tämän lisäksi tehdään katsaus suuri- ja keskijännitteisiä DC-tekniikoita hyödynnetään laivanrakennusteollisuuden ulkopuolella. MVDC-järjestelmiin liittyy edelleen paljon avoimia kysymyksiä, mutta Meyer Turun telakalla aiheesta on tarpeellista saada lisää tietoa jotta mahdollisten tulevaisuuden MVDC-risteilyalusprojektien toteutus sujuu mahdollisimman tehokkaasti.

1.2 Meyer Turku Oy

Meyer Turku Oy on yksi Euroopan johtavista laivanrakennusyhtiöistä. Yhtiö tarjoaa huipputeknologisia ratkaisuja, kehittyneitä rakennusprosesseja sekä merkittäviä innovaatioita risteilyvarustamoille ja muille laivanomistajille. Meyer Turun erikoisalaa on risteilyalukset, matkustaja-autolautat ja erikoisalukset. Toimintahistoriansa aikana telakka on rakentanut yli 1300 uutta alusta asiakkaille ympäri maailmaa. (Meyer Turku 2021)



Kuva 1. Meyer Turku Oy:n telakka Turun Pernossa.

Meyer Turun tytäryhtiöitä ovat Piikkiössä sijaitseva hyttitehdas Piikkio Works Oy, Shipbuilding Completion Oy, joka tarjoaa ratkaisuja laivojen yleisiin tiloihin sekä laivanrakennus- ja offshore-alan suunnitteluyritys ENG'nD Oy. ”MEYER TURUN telakalla on nykyisin yli 2000 työntekijää ja se on tärkeä työllistäjä Lounais-Suomen alueella, mutta meriklusterin kautta myös eri puolilla Suomea. On merkillepantavaa, että kun kaikki toiminnot lasketaan yhteen, suomalaisen meriklusterin palveluksessa on yhteensä yli 30 000 ihmistä. Klusteriin kuuluvat kaikki merialan ja merenkulun ympärille muodostuneen verkoston piirissä

toimivat teknologitoimittajat, koulutusorganisaatiot ja valmistava teollisuus”. (Meyer Turku 2021)

1.3 AC- ja DC-sähköverkkojen kehitysvaiheet

AC- ja DC-virran kilpailu ”War of the currents”, kuten se tunnetaan, alkoi 1880-luvun loppupuolella kun Thomas Edison ja Nikola Tesla promotoivat kahta kilpailevaa teknologiaa, DC ja AC –virtoja käytettäväksi sähköntuotantoon ja jakeluun. DC:n tuotannon ja jakelun käyttöönotosta vastasi Edison yhteistyössä General Electricin kanssa. Edison tuli tunnetuksi toimittaessaan sähköä rakennuksiin ja katuvalaistukseen. DC-verkon heikkoutena oli puuttuvat teknologiat jännitetasojen kasvattamiseen ja pienentämiseen ja tällöin se synnytti suuria lämpöhäviöitä kun sähköä siirrettiin pidempiä matkoja. Nikola Tesla yhteistyössä George Westinghousen kanssa väitti, että AC-teknologia on edullisempi vaihtoehto DC-järjestelmään verrattuna sähköntuotannossa ja siirrossa. Keksinnöt kuten AC-sähkökoneet, generaattorit ja muuntajat sekä Teslan ja Westinghousen onnistunut esitys Chicagon messuilla johti AC-teknologian valitsemiseen Niagara Falls Power Company:lla joka toimitti sähköä Buffalon kaupungille. Tästä ajanhetkestä eteenpäin DC-teknologia laitettiin sivuun ja sitä käytettiin vain erityiskohteissa kuten puhelinvaihteissa jne., AC-teknologiaa sen sijaan kehitettiin ja siitä tuli päämenetelmä sähköntuotantoon, siirtoon ja jakeluun. (U.S Department of energy, 2021)

Elohopeatasasuuntaajien käyttöönotto vuonna 1914 aiheutti sen, että joitakin sähkönsiirtoprojekteja alettiin toteuttamaan DC:llä. Näissä projekteissa käytettiin LCC-konverttereita (engl. Line Commutated Converter) sähkönsiirron AC-DC-muunnoksissa. Tämä konsepti sai lisää huomiota puolijohteisten tyristoriventtiilien keksimisen myötä ja johti useisiin pitkän matkan (yli 500 km) DC-sähkönsiirtoprojekteihin. Lisäksi nämä projektit hyötyivät AC-lähteiden tahdistustarpeen poistumisesta ja AC-verkolle tyypillisen virranahtoilmion puuttumisesta, johtaen suuremman energiatiheyden omaavien sähkönsiirtojohtojen rakentamiseen. Lopulta vähentäen tarpeellista laitteistoa verrattuna vastaaviin AC-siirtojohtoihin, ja näin pienentäen projektien toteuttamiseen liittyviä kustannuksia. (U.S Department of energy, 2021)

Ensimmäiset DC-sähkönjakeluverkot tullaan näkemään luultavasti teollisuuden jakeluverkoissa. Näissä sovelluksissa keskijännitteiseen MVAC-verkkoon (1-36 kV) on kytkettynä yleensä suuritehoisia taajuusmuuttajia esim. ACS6000. Näiden suuritehoisten taajuusmuuttajien valmistajat voivat tehdä myös erillisiä kaupallisia sovelluksia tasa- ja vaihtosuuntaajille kun niitä tarvitaan DC-järjestelmien käyttöönottoa varten. Yleisimmin suuritehoisia taajuusmuuttajia käytetään metallin valssaamoissa, louhinnassa ja jalostamoilla jne. Louhintaoperaatioissa useampia taajuusmuuttajia voidaan käyttää rinnakkain, näiden prosessien vaatima teho voi olla helposti yli 250 MW jolloin suurin osa sähkötehosta käytetään keskijännitteisissä taajuusmuuttajissa. (U.S Department of energy, 2021)

1.4 Laivan LVDC sähkönjakelujärjestelmä

Eri valmistajat kuten ABB, Siemens ja Rolls Royce ovat esitelleet pienjännitteiseen DC:hen perustuvia laivoja. Nämä sähkönjakelujärjestelmät korostavat DC-järjestelmiin liittyviä hyötyjä ja ne on kehitetty hyödyntämällä olemassa olevia pienjännitettä hyödyntäviä teknologioita kuten tasasuuntaajat, invertterit, katkaisijat, akkujärjestelmät jne., samalla poistaen AC-päätaulut ja muuntaajat (ABB, 2011). Lisäksi tasasuuntaajien sulakkeita, erottimia ja tehoelektronisia kytkimiä on käytetty vikojen erottamiseen ja vikavirtojen blokkaukseen (ABB, 2011).

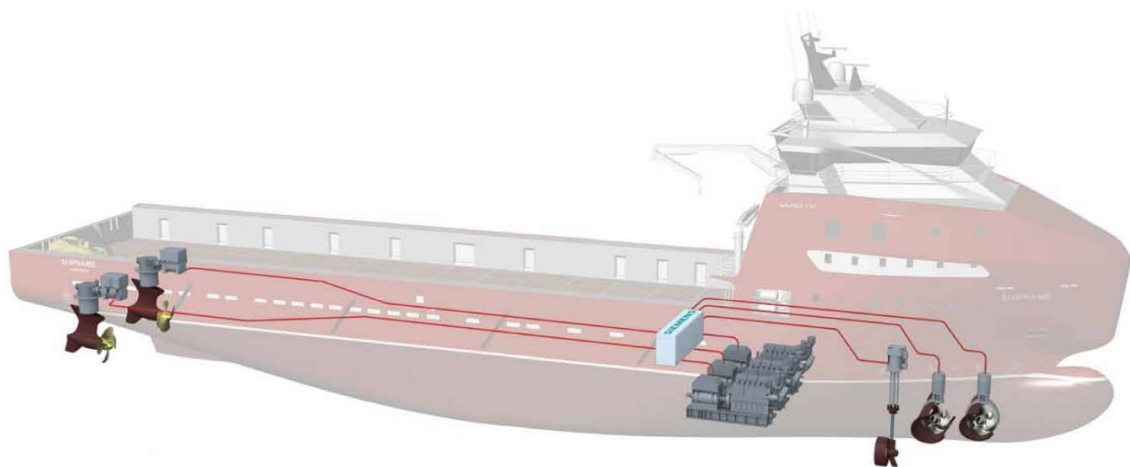
ABB:n kehittämä 1 kV LVDC-järjestelmä toimii pääasiassa 20 MW teholuokkiin saakka ja se on otettu käyttöön esim. *Dina Star* erikoisaluksessa (Kuva 2). Tämä pilottiprojekti on havainnollistanut, että DC-järjestelmä on 20% energiatehokkaampi ja asennetun laitteiston paino on 30 % kevyempi ja vähemmän tilaa vaativa verrattuna vastaavaan AC-järjestelmään (ABB, 2011). Lisäksi tässä sähkönjakelujärjestelmässä konvertterit on sijoitettu niihin liittyvien teholähteiden ja kuormien läheisyyteen, esim. tasasuuntaajat on sijoitettu lähelle generaattoreita. Lautoille vastaavan järjestelmän on kehittänyt Rolls Royce, missä osa laitteista toimii täysin akkujen varassa (Rolls Royce, 2021).

Siemensin kehittämä *BlueDrive PlusC* järjestelmä (Kuva 3) on hieman erilainen muihin järjestelmiin verrattuna, koska se on keskitetty järjestelmä. Tässä järjestelmässä kaikki päätaulut, tasasuuntaajat ja invertterit on sijoitettu keskitetysti yhteen paikkaan ja AC-

kaapeleilla on kytketty generaattorit, sähkökoneet ja muut kuormat *BlueDrive PlusC* järjestelmään. Seurauksena vaihtelevan pyörimisnopeuden generaattoreiden käytöstä, kasvihuonekaasupäästöt ovat vähentyneet 25 % ja saman aikaisesti NOx päästöt ovat vähentyneet 83 %. (Siemens, 2021)



Kuva 2. LVDC-sähköjärjestelmä toteutettu *Dina Starissa* ABB:n toimesta (ABB, 2021).



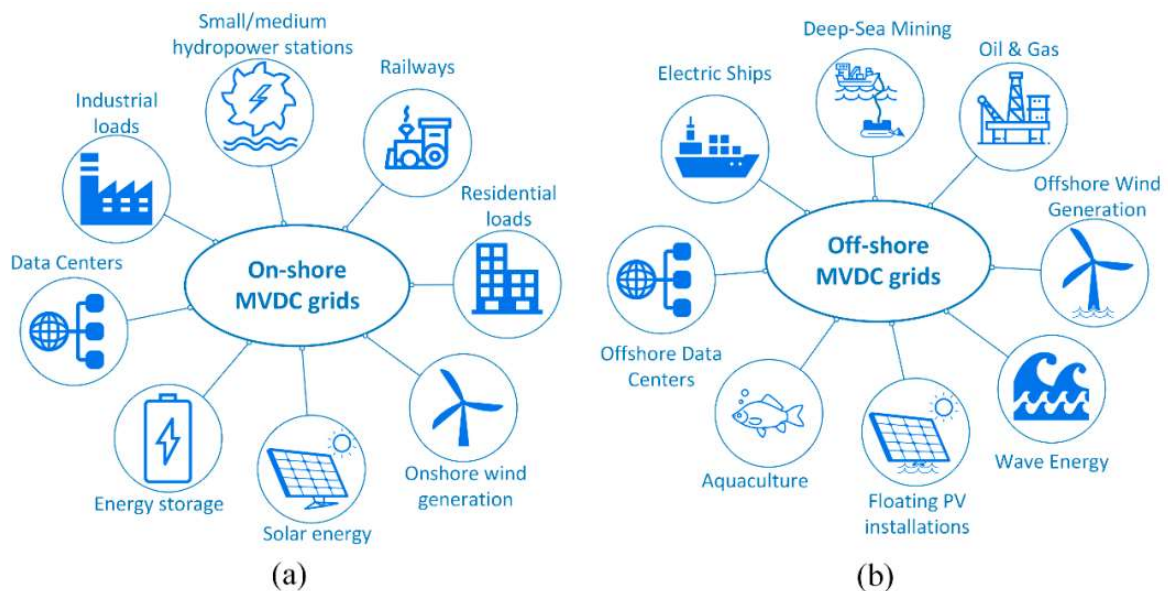
Kuva 3. Siemensin kehittämä *Blue Drive PlusC* -järjestelmä (Siemens, 2021).

1.5 MVDC sovellukset

Vaikka nykypäivänä sähkötehoa siirretään joko suurijännitteisellä AC:lla tai suurjännitteisellä DC:llä (Pierri et al., 2016), niin ainoastaan keskijännitteistä AC-sähköverkkoa hyödynnetään sähköjakelussa. Päällimmäinen syy tähän on helppo jännitetasojen muuttaminen useille eri tasoille siirto- ja jakeluverkkojen välillä, koska muuntaja on energiatehokas ja luotettava ratkaisu (Shen et al., 2015). Voimalaitoksissa sähköntuotanto perustuu pyöriin sähkömoottoreihin ja suuri osa sähkötehosta kulutetaan sähkömoottoreissa joten tehon konvertointia DC:ksi ei ole katsottu järkeväksi. Kuitenkin viimeisten viiden vuosikymmenen aikana tapahtunut kehitys suurijännitteisissä ja suurivirtaisissa tehopuolihteissa on johtanut kehittyneiden suuritehoisten konvertterien suunnitteluun jotka kykenevät suorittamaan DC-jännitetaso muunnoksia korkealla hyötysuhteella (Pierri et al., 2016). Tämän seurauksena, ei pelkästään DC-siirtoverkot, mutta myös DC-jakeluverkot ovat nykypäivänä toteutuskelpoisempia ja edullisempia verrattuna aikaisempiin vuosikymmeniin (IEEE, 2010). Näiden lisäksi sähkömarkkinoiden kehitys ja toimintatapojen muutokset kannustavat MVDC-tekniikan kehittämiseen vaikka järjestelmään liittyy edelleen tiettyjä haasteita jotka täytyy ratkaista (IEEE, 2010). Hajautettu sähköntuotanto ja uusiutuvien energianlähteiden sisällyttäminen sähköverkkoon on tehokasta toteuttaa hyödyntämällä DC-tekniikkaa. MVDC-järjestelmä on innovatiivinen infrastruktuuri joka tähtää useiden eri sovellusten mahdollistamiseen joten sen tarkoitus ei ole olla pelkästään pienemmälle jännitetasolle skaalattu järjestelmä verrattuna HVDC-verrokkeihin (engl. High Voltage Direct Current) (Reed et al., 2012).

DC-sähköjakeluverkoissa suurin hyöty verrattuna AC-järjestelmiin on tehon siirron parempi hyötysuhde sähköjakelussa samoilla jännitetasoilla (Shen et al., 2015). Tämän lisäksi taajuuden synkronisointi ei ole tarpeellista ja myöskään loistehoa ei tarvitse kompensoida (Satpathi, Ukil & Pou, 2018). Kuten aikaisemmin mainittua, niin uusiutuvien energianlähteiden integrointi on helpompaa DC-järjestelmissä. DC-verkkojen haittapuolia ovat konverttereiden suuremmat investointi- ja asennuskustannukset verrattuna matalataajuisiin muuntajiin ja monimutkaisemmat oikosulkujen suojausmenetelmät verrattuna AC-järjestelmiin (Reed et al., 2012, s. 73).

Kirjallisuudessa on mainittu useita potentiaalisia sovelluksia MVDC-verkoille. Nämä voidaan kategorisoida maapuolen (Kuva 4a) ja offshore (Kuva 4b) sovelluksiin. Riippumatta siitä onko kyseessä maapuolen vai offshore-järjestelmä, niin MVDC-verkko vaatii useiden eri teknologioiden hyödyntämistä. Näihin lukeutuvat tehoelektroniset konvertterit, kuten aktiiviset ja passiiviset tasasuuntaajat, DC/DC konvertterit, invertterit, suojausmenetelmät ja energiatehokkaat ohjausjärjestelmät. Kaikkien edellä mainittujen teknologioiden tulee toimia luotettavasti ja olla kustannuksiltaan riittävän edullisia jotta MVDC-järjestelmät voivat yleistyä. (Giannakis, Pefitsis, 2018)



Kuva 4. Mahdollisia (a) maapuolen ja (b) off-shore MVDC sovelluksia. (Giannakis, Pefitsis, 2018)

Tällä hetkellä MVDC-verkkojen kehitystä jarruttaa järjestelmäkohtaisten standardien puuttuminen liittyen niiden operointiin, suorituskykyyn ja turvallisuuteen (Reed et al., 2012). Tämän lisäksi turvallisuussäännöt, tarvittavat DC-järjestelmien kestävyystestit (esim. kaapelit) ja sallitut jännitetoleranssit täytyy olla viranomaisten hyväksymiä (Reed et al., 2012). Näiden lisäksi merkittävä MVDC-verkkojen yleistymistä rajoittava haaste on tarve kehittää korkean hyötysuhteen omaavia ja suorituskykyisiä DC-katkaisijoita (Shen et al., 2015).

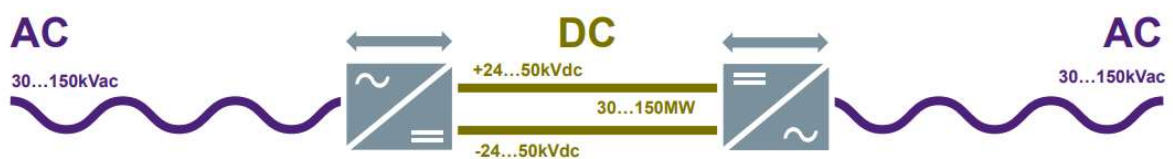
Tällä hetkellä MVDC-verkot ovat edelleen kehitysasteensa alussa. Kuitenkin ensimmäinen kaupallisesti saataville tuotu MVDC-konvertteri *Siemens MVDC PLUS* (Kuva 5) toimii

suunnannäyttäjänä joka mahdollistaa MVDC-verkkoratkaisujen tuomisen kaupalliseen käyttöön.



Kuva 5. Siemensin MVDC-PLUS järjestelmään kuuluva IGBT-konvertteritorni

Siemens MVDC-PLUS perustuu jo toimivaksi todettuun HVDC-tekniikkaan ja se on toteutettu modulaarisena monitasoisena konvertterina (engl. Modular Multi-Level Converter), topologialtaan se on jännitelähdekonvertteri (engl. Voltage Source Converter). Alimoduulien lukumäärä määritetään käytettävän DC-jännitetason mukaisesti. Tällä hetkellä *MVDC-PLUS* kaupallinen ratkaisu on saatavilla ± 24 -50 kV DC-jännitetasoilla ja se kykenee 30-150 MW teholuokkiin (Kuva 6). (Siemens, 2021)



Kuva 6. Siemens *MVDC-PLUS* sähkönsiirtojärjestelmässä. (Siemens, 2021)

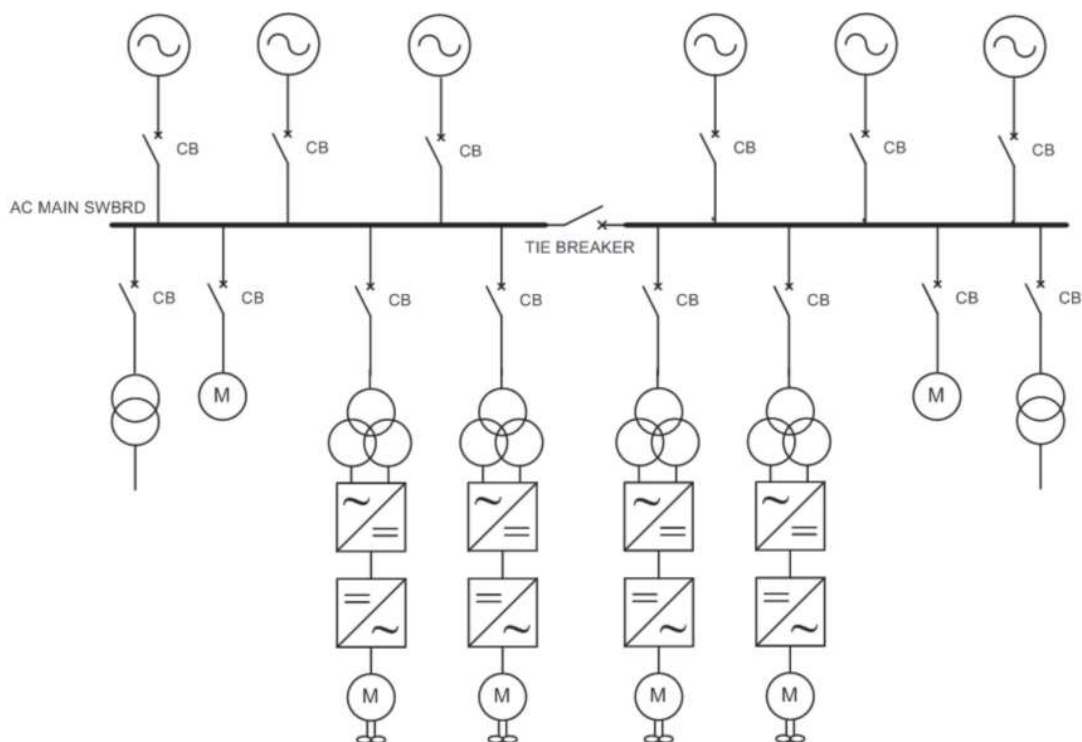
2 LAIVAN MVDC SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ

Tulevaisuudessa MVDC-sähköjakelujärjestelmässä tullaan hyödyntämään tuttuja MVAC- ja LVDC-järjestelmien teknologioita. Tietyt laitteet kuten vaihdelaatikot ja suuret muuntajat tullaan poistamaan MVDC-järjestelmässä jolloin saavutetaan lisää joustavuutta järjestelmän sijoitteluun sekä tila- ja painovaatimukset pienenevät (Zahedi, Norum & Ludvigsen, 2014). Toki vaihdelaatikoista on pyritty eroon myös MVAC-järjestelmissä joten tämä seikka ei ole pelkästään MVDC-järjestelmän ominainen hyöty.

Laivan DC-verkkoa voidaan tarkastella yhtenäisenä osana joka koostuu useista DC-linkkeistä, jotka ovat olennainen osa sähköisen propulsioon ja thrustereiden sähkökäyttöjen taajuusmuuttajissa. Nämä sähkökäytöt vastaavat parhaimmillaan yli 80% sähkön kulutuksesta sähköisen propulsioon laivoissa. DC-järjestelmässä kaikki erilliset DC-linkit voidaan yhdistää yhteiseen DC-kiskoon. Tässä toteutustavassa säilyy edelleen perinteiset komponentit kuten AC-generaattorit, AC-moottorit, invertterit, jne., mutta AC-päätaulu ja propulsiomuuntajat jäävät pois. (ABB, 2011)

AC-järjestelmässä taajuusmuuttajaa joka sisältää tasasuuntaajan ja invertterin käytetään nopeuden ohjaamiseen induktio- ja synkronimoottoreilla. AC-jännite muunnetaan ensin DC:ksi tasasuuntaajalla ja sen jälkeen muunnetaan takaisin AC:ksi. DC-järjestelmän tapauksessa ainoastaan moottorin puolella vaaditaan invertteri, koska tasasuuntaus tehdään jo synkronigeneraattorin ulostulossa. Tämä tarkoittaa, että riippumatta jakelujärjestelmän toteutuksesta (AC vai DC), molemmat tehoelektronikkalaitteet tarvitaan, mutta tasasuuntaajien sijainti muuttuu DC-järjestelmässä. Vaikka propulsiomuuntajat jäävät pois niin paloaluekohtaiset MV/LV-muuntajat voidaan säilyttää pienjänniteverkkoa varten jolloin niitä syötetään inverttereillä DC-kiskosta. Toinen vaihtoehto LVAC:n tekemiseen on suuritehoinen alaspäin askeltava (engl. Step-Down) DC-DC-konvertteri jonka perässä on invertteri. Tilanteessa jossa myös pienjännitejakelu tehdään DC:llä, invertteri jätetään pois DC-DC-konvertterin perästä. Tällä hetkellä tiettyjen teknologioiden puuttuminen tekee tämän suunnittelun vaikeaksi, erityisesti huomioiden keskijännitteen muuntaminen pienjännitteeksi jolloin perinteistä muuntajaa tarvitaan edelleen galvaanista erotusta varten. (Prenc, Cuculic & Baumgartner., 2016, s. 84-85)

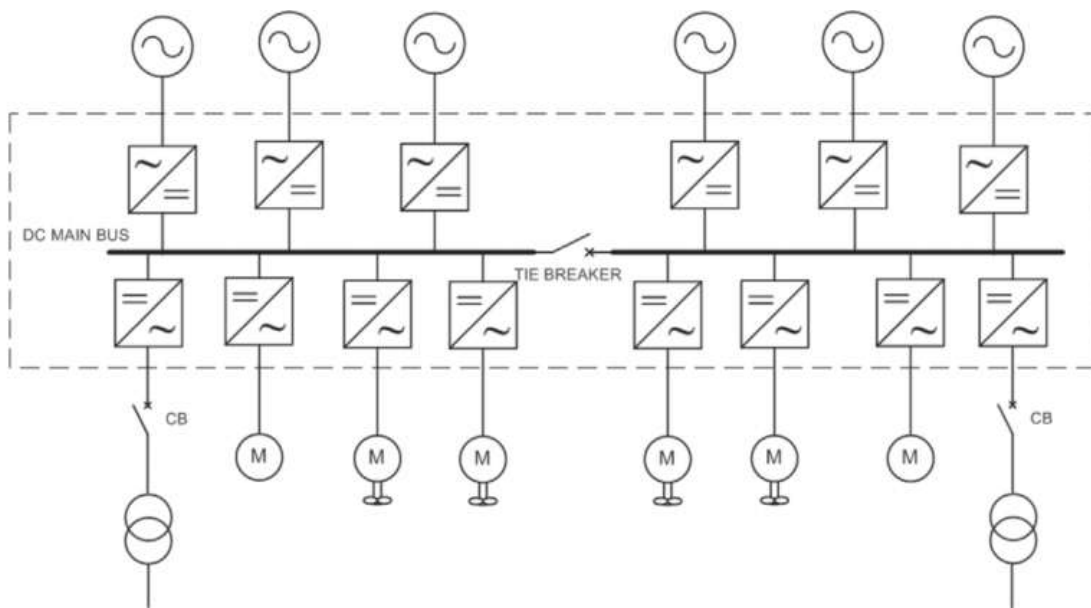
Kuvassa 7 on esitetty tyypillinen AC IFEP (engl. Integrated Full Electric Propulsion) järjestelmä, jossa generaattorit kytketään keskijännitteiseen päätauluun josta sähkö jaetaan MV/LV muuntajien kautta pienjännitekuluttajille. Sähköisen propulsioon moottoreita syötetään propulsiomuuntajien ja taajuusmuuttajien kautta. AC-järjestelmässä kaikki johtolähdöt on suojattu erillisellä katkaisijalla (engl. Circuit Breaker). (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 85)



Kuva 7. Tyypillinen AC IFEP rakenne (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 85).

DC-järjestelmän konseptissa on kaksi toteutustapaa, ensimmäinen ratkaisu perustuu komponenttien keskitettyyn (Kuva 8) ja toinen hajautettuun järjestelmään (Kuva 9) (ABB, 2011). Keskitetyssä järjestelmässä kaikki konvertterit sijaitsevat samassa tilassa joka on aikaisemmin ollut varattu AC-päätaululle (engl. AC Main Switchboard). Käytännössä tämä tarkoittaa, että fyysisesti kaapelit generaattorilta DC-kiskon tasasuuntaajalle kuljettavat AC-virtaa ja vastaavasti myös DC-kiskon invertteriltä AC-kuluttajille (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 85). DC-kiskojen välillä on AC-järjestelmän tapaan katkaisija (engl. Tie Breaker) joka suljetussa asennossa sallii tehon kulun kiskojen välillä.

Hajautetussa järjestelmässä jokainen konvertteri sijoitetaan mahdollisimman lähelle teholähdettä tai kuormaa. Tällöin jokaiseen tehonlähteeseen on mahdollista integroida tasasuuntaaja suoraan yksikköön kiinni tai lähistölle erilliseen kaappiin. Kaapelit kuljettavat DC-virtaa generaattoreilta DC-kiskoon. Myös invertterit sijaitsevat lähellä AC-kuormia (integroituna tai erillisessä kaapissa lähistöllä) jolloin kaapelit kuljettavat DC-virtaa pääkiskolta AC-kuluttajien inverttereille.

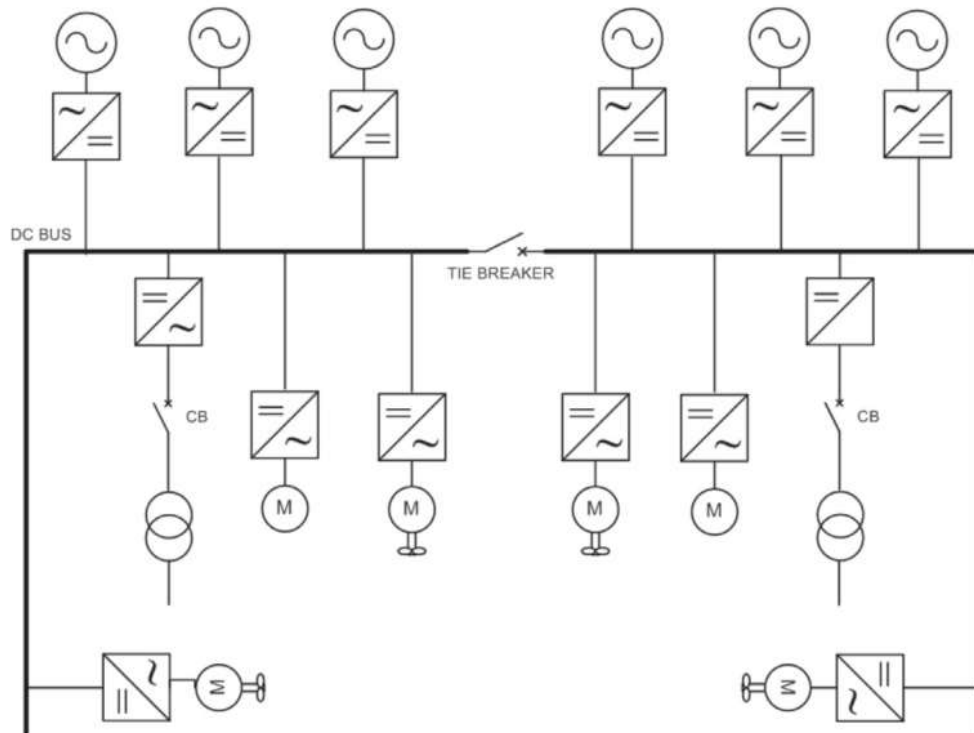


Kuva 8. DC-sähköjakaiverkko: keskitetty järjestelmä. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 86)

Kuten todettua, DC-järjestelmässä laitteet kuten AC-päätaulut ja propulsiomuuntajat jäävät pois käytöstä. Sen sijaan generaattorien tuottama jännite ja virta tasasuunnataan ja teho ohjataan yhteiseen DC-kiskoon. DC-kiskon kautta sähköteho jaetaan pääkuluttajille joita syöttävät erilliset invertterit. Seurauksena päätauluhuoneeseen asennettavien komponenttien volyymi pienenee merkittävästi sillä AC-katkaisijat ja näiden suojarieleet puuttuvat. DC-järjestelmän rakenne mahdollistaa energiavarastojen ja uusiutuvien energialähteiden (kuten aurinkopaneelit) yksinkertaisen lisäämisen suoraan verkkoon tai DC/DC konvertterin kautta. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 87)

DC-järjestelmän sijoittelun kannalta päähyödyt ovat tilan ja painon säästö sekä järjestelmän sähkölaitteiden sijoittelun joustavuus. Tämän myötä vapautuu huomattavasti lisää tilaa muille tuottaville toiminnoille ja risteilyaluksen järjestelystä saadaan käytettävämpi kun

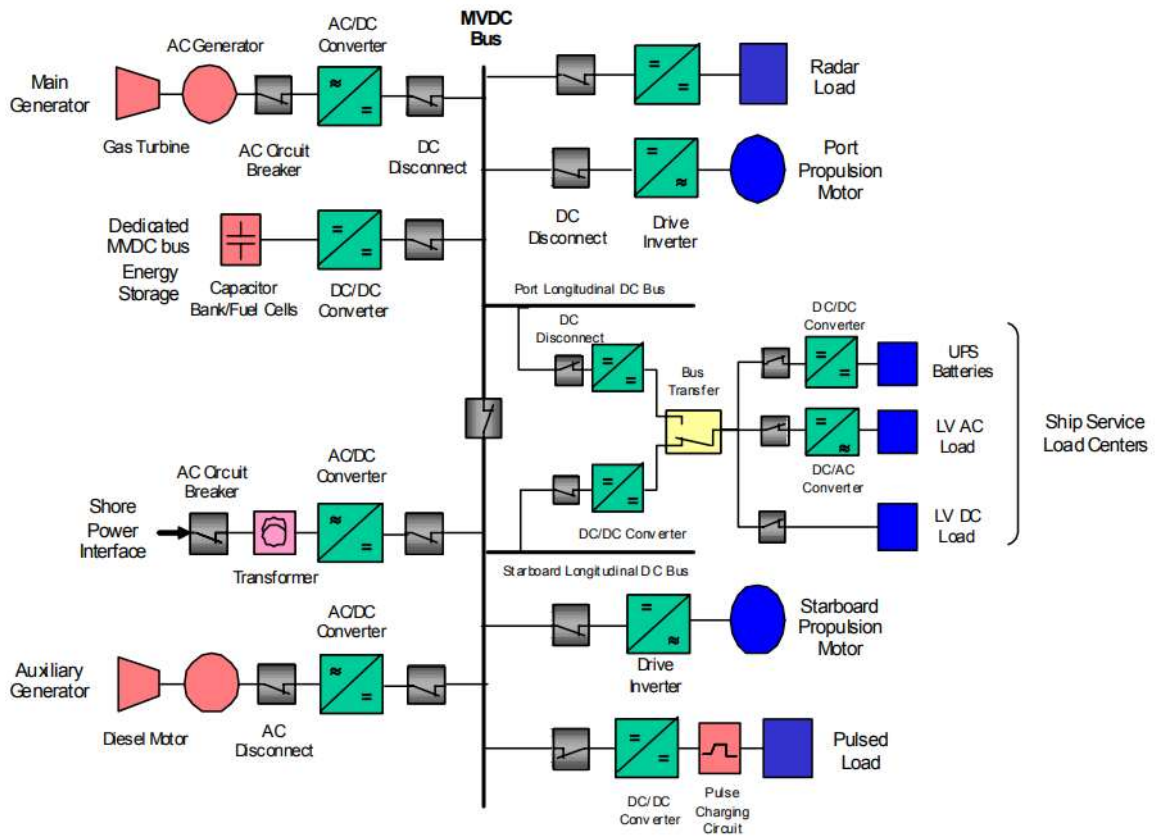
sähkölaitteistot rakennetaan aluksen toimintojen ympärille eikä päinvastoin. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 87)



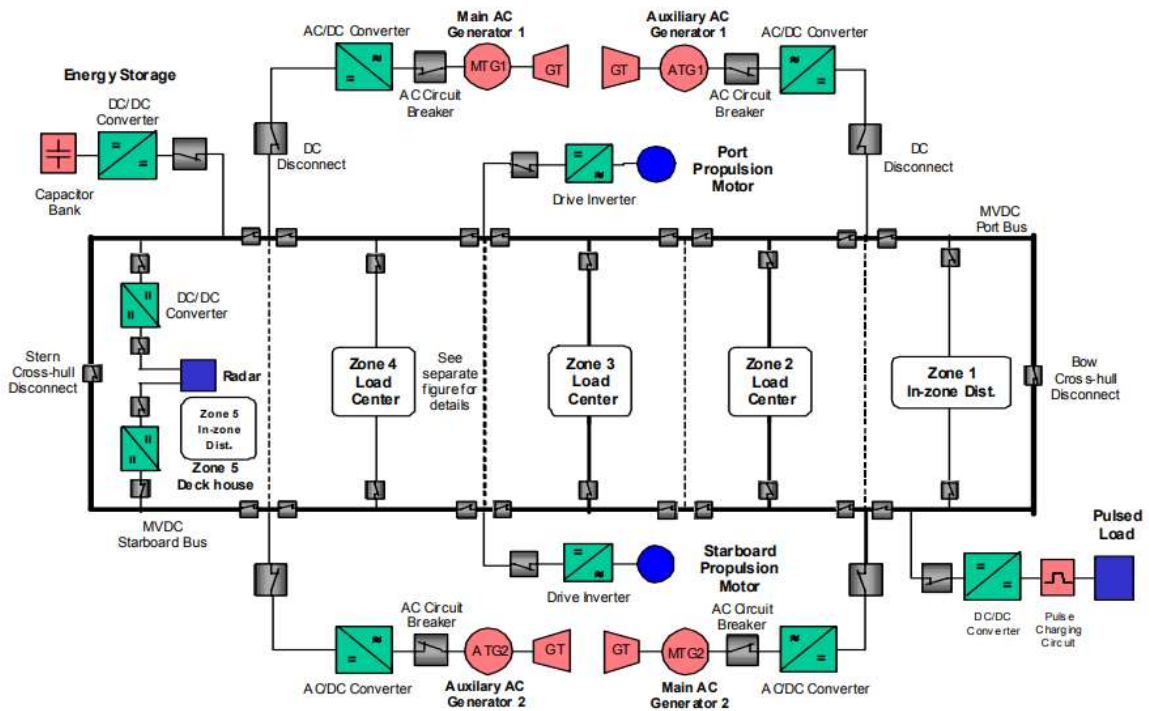
Kuva 9. DC-sähkönjakeluverkko: hajautettu järjestelmä. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 86)

2.1 Sähkönjakeluverkon rakenne

DC-järjestelmän rakenteelle kun jännitetaso on yli 3 kV ei ole standardoituja järjestelmää (IEEE, 2010). MVDC-järjestelmän toteuttamiseksi ei ole vastaavaa standardia kuin MVAC-järjestelmälle. MVDC-järjestelmän toteutusta varten on suosituksia IEEE Std. 1709 ohjeistuksessa. Jokainen vaihtoehto täytyy siis tutkia erikseen jotta löydetään parhaiten sopiva vaihtoehto. Kaikki MVDC-järjestelmään kytketyt kuormat täytyy toimia joko DC-jännitteellä tai niitä täytyy syöttää invertterin kautta. MVDC jakelu voidaan IEEE Std. 1709 (IEEE, 2010) mukaan toteuttaa kahdella eri päätopologialla: säteittäinen jakelujärjestelmä (Kuva 10) jonka etuja ovat yksinkertaisuus ja kustannustehokkuus, ja vyöhykejakelujärjestelmä (Kuva 11) jonka etuja ovat keskeytymätön toiminta vaikeissakin olosuhteissa.



Kuva 10. MVDC jakelujärjestelmä: säteittäinen. (IEEE, 2010)



Kuva 11. MVDC jakelujärjestelmä: vyöhykejako. (IEEE, 2010)

Toisin kuin MVDC-järjestelmä, MVAC-järjestelmä on hyvin standardoitu joten suunnittelussa voidaan noudattaa määriteltyjä säädöksiä. Jännitetasot, maadoitukset, jakelu ja kuormat on MVAC-järjestelmässä standardoitu kullekin kohteelle. MVDC-järjestelmä voidaan taas toteuttaa lukuisilla eri tavoilla, riippuen napojen määrästä (positiivinen-negatiivinen, positiivinen-nolla-negatiivinen) ja riippuen järjestelmän maadoitustavasta (kiinteästi maadoitettu, resistanssin kautta maadoitettu, maadoittamaton) ja syötettävistä kuormista. IEEE-standardit jotka liittyvät suoraan laivojen tehoelektroniikkaan ja DC-sähkönjakelujärjestelmiin ovat:

- IEEE Stf. 1662-2008 ”*Guide for the Design and Application of Power Electronics (PE) in Electrical Power Systems on Ships*”.
- IEEE Std. 1709-2010 “*Recommended Practice for 1 to 35 kV Medium Voltage DC Power Systems on Ships*”.

2.2 Jännitetaso

Taulukko 1. Jännitetasot MVAC-järjestelmän eri tehotasoilla. (A. K. Adnanes, 2003)

Jänniteluokka	Tehotaso
11 kV	> 20 MW
6.6 kV	4 - 20 MW
690 V	< 4 MW
400/230V	hotellikuormat

Risteilyalusten suurten tehokuormien takia ainut varteenotettava vaihtoehto on käyttää 1 kV:n tason ylittäviä jännitteitä sähkönjakelun toteuttamiseksi, pienjännitteellä syötetään kuitenkin edelleen hotellikuormia ja muita pienjännitteellä toimivia laitteita. MVAC-järjestelmän tyypilliset jännitetasot eri tehoalueilla käytettäväksi on esitetty taulukossa 1. LVDC-järjestelmän käyttö koko risteilyaluksen sähkönjakelussa vaatisi erittäin suurta virran siirtokykyä, mikä ei olisi teknisesti toteutettava ratkaisu termisen, eristävyiden ja mekaanisten rajoitusten takia. Vaikka DC-järjestelmässä johdinten poikkipinnat ovat pienemmät niin risteilyalusten teholuokissa (> 40 MW) on selkeästi järkevää tähdätä edelleen 10 kV jänniteluokkaan (Taulukko 1), jotta MVDC-luokassa voidaan edelleen hyödyntää DC-

järjestelmiin liittyviä etuja. MVDC-järjestelmien odotetaan kykenevän käsittelemään suuria tehoja jotta ne voivat korvata MVAC-järjestelmät.

2.2.1 LVDC

IEC-standardin mukaisesti pienjännite on AC:lla maksimissaan 1000 V ja DC:llä 1500 V. Pienjänniteverkko voidaan rakentaa unipolaarisesti 1500 V tai bipolaarisesti (± 750 V) jolloin kaikki asennukset voidaan toteuttaa pienjännitestandardin mukaisesti (Kaipia, 2007). Pienjännitejakelussa käytettävät LVAC:n korvaavat LVDC-jännitetasot ovat eriteltyinä taulukossa 2. Bipolaarinen 375 VDC jännitetaso maadoitetulla keskijohtimella mahdollistaa vastaavan suojaustason verrattuna 230 VAC-jännitteeseen. Valittaessa korkeampi jännitetaso, suojaustasoa ei pystytä määrittämään riittävän korkeaksi koska järjestelmässä on suurempia jänniteheilahteluita. 375 V jännitettä ei ole käytössä AC-järjestelmissä joten tämä vähentää sekaannuksen mahdollisuutta ja parantaa täten sähköturvallisuutta. Lisäksi ± 375 V käyttö sisältää mahdollisuuden 750 V hyödyntämiseen 400/690 VAC korvaajina. Myös 1500 V (± 750 V) jännitteen käyttöä voidaan harkita 690 V korvaajana jolloin on mahdollista saavuttaa täysi tehonsiirtokapasiteetti pienjännitestandardin puitteissa.

Taulukko 2. Pienjännitejakelun jännitetasot LVAC- ja LVDC-jakelussa.

U (LVAC)	U (LVDC)
230 V	375 V
400 V	750 V (± 375 V)
690 V	750 V (± 375 V) tai 1500 V (± 750 V)

2.2.2 MVDC

Jänniteluokkia käytetään kategorisoimaan jännitesietoisuutta MVDC-järjestelmään liittyvien komponenttien osalta. Valitulla jännitetasolla tulee käyttää vain sille kategorisoituja tai suurempaan jänniteluokkaan kykeneviä laitteita ja komponentteja. Taulukossa 3 on esitetty

MVDC-järjestelmien suositeltavat jännitetasot. Huomioiden risteilyaluksen teholuokka, on edelleen järkevää tähdätä yli 10 kV:n sähköjakelun jännitetasoihin.

Taulukko 3. Suositellut jänniteluokat MVDC-järjestelmälle. (IEEE, 2010, s. 10)

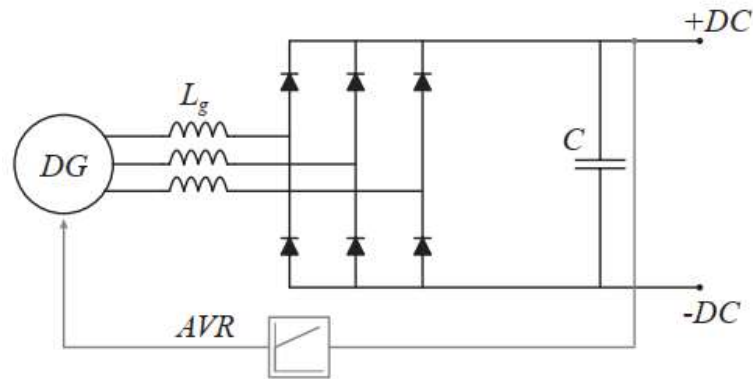
	MVDC Luokka kV	Nimellisjännite (kV)	Suurin mahdollinen nimellisjännite (kV)
Saavutettu	1.5	1.5 ± 0.75	2 ± 1
	3	3 ± 1.5	5 ± 2.5
Tulevaisuudessa	6	6 ± 3	10 ± 5
	12	12 ± 6	16 ± 8
	18	18 ± 9	22 ± 11
	24	24 ± 12	28 ± 14
	30	30 ± 15	34 ± 17

2.3 Tasasuuntaajat

Yksittäisenä laitteena tasasuuntaajat eivät ole merkittävin osa MVAC-järjestelmää, mutta niiden olemassaolo on tärkeää MVDC-järjestelmässä. Tällä hetkellä MVAC-järjestelmissä käytettävät taajuusmuuttajat sisältävät tasasuuntaajan integroituna. Sähkötehon takaisin syöttöä ei ole usein vaadittu joten ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia dioditasasuuntaajia. Tulevissa järjestelmissä jotka hyödyntävät MVDC-jakelua tasasuuntaajista tulee olennainen osa koska ne on kytketty suoraan generaattorin perään ja vaikuttavat näin suoraan MVDC-syötön laatuun. Useita eri tasasuuntaajien topologioita voidaan harkita risteilyaluksen ja niiden soveltuvuutta tulee arvioida koko systeemin tasolla. Laivasovelluksiin voidaan harkita neljää mahdollista eri tyyppistä tasasuuntaajaa kuten diodi, tyristori, aktiivinen (2-tasoinen/monitasoiset) tai MMC (engl. Modular Multilevel Converter) (Javaid, 2018).

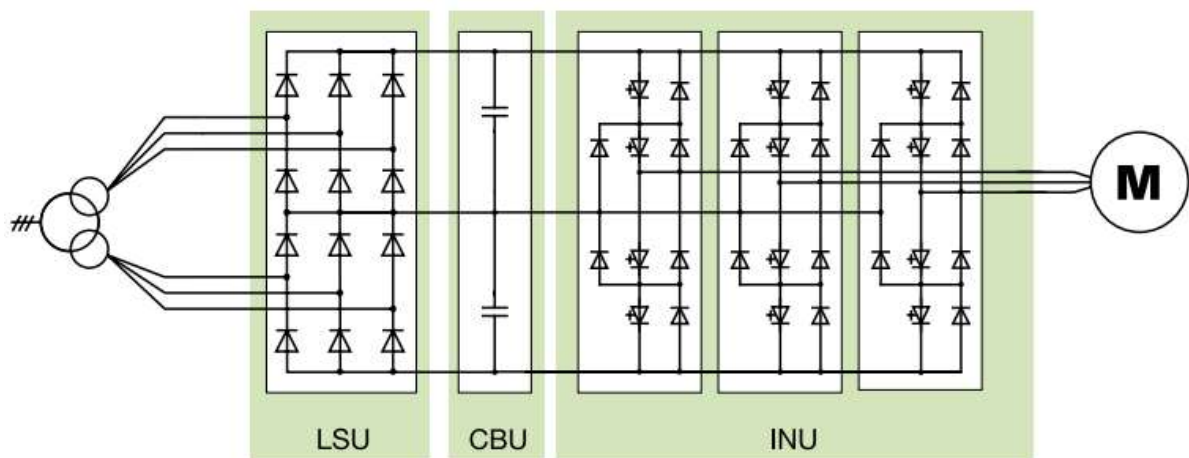
2.3.1 Dioditasasuuntaaja

Piirikaavio DRU:lle (engl. Diode Rectifier Unit) joka on varustettu kapasitiivisella suodattimella on esitetty kuvassa 12. Kyseessä on täysin passiivisista komponenteista tehty laite joten sillä ei ole mahdollista säätää DC-puolen jännitettä tai AC-puolen virtaa, mutta sen rakenne on yksinkertaisin ja edullisin verrattuna muihin topologioihin.



Kuva 12. Dioditasasuuntaaja kapasitiivisella suodattimella. (Javaid, 2018, s. 21)

DRU:t ovat käytössä nykyisissä sähkökäyttöteknologioissa (Dujic et al., 2014), erityisesti laivasovelluksissa missä sähköenergian takaisin syöttö ei ole mahdollista. DRU:t ovat usein kytkettynä muuntaajaan jossa on useampia toisiopiirejä (multi-secondary transformer) 12, 18 tai 24 pulssisena, sekä ne ovat käytössä LVDC:tä hyödyntävissä laivoissa (Siemens, 2016).



Kuva 13. ABB ACS6000 MV taajuusmuuttajan piirikaavio sisältäen 12-pulssisen DRU:n (ABB, 2010).

Kuvissa 13 ja 14 on ABB:n MVAC-järjestelmissä käyttämä DRU:ta hyödyntävä keskijännitteinen taajuusmuuttaja. DC-puolen jännitteen säätämiseksi ne ovat riippuvaisia synkronigeneraattorin AVR:stä jonka toiminta on yleensä hidasta kaistanleveyden ollessa noin 1 Hz. DRU:n ollessa tuttu teknologia laivojen MVAC-järjestelmissä, ne on helppo säilyttää käytössä myös MVDC-järjestelmissä etenkin kun käytössä on monivaiheiset generaattorit (Javaid, 2018).



Kuva 14. ABB ACS6000 MV taajuusmuuttaja maapuolen ja offshore sovelluksiin (ABB, 2010).

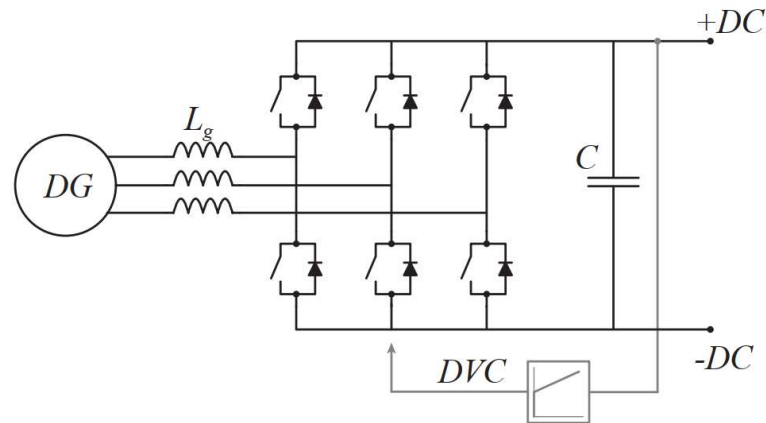
2.3.2 Tyristoritasasuuntaaja

Toinen mahdollinen tasasuuntaajan tyyppi jota voidaan harkita MVDC-järjestelmään on TRU (engl. Thyristor Rectifier Unit). TRU:lla on mahdollista säätää DC-puolen jännitettä pienellä alueella, joten niitä on alettu harkitsemaan mahdollisena vaihtoehtona MVDC-syötön puolen konverttereina (Dong et al., 2017). TRU:t ovat käytössä LVDC-järjestelmissä syötön puolen konverttereina (Hansen et al., 2011), vaikka niitä käytetään normaalitilanteessa kuten dioditasasuuntaajaa. TRU:n rakenne on monimutkaisempi ja kalliimpi kuin DRU:lla. Kuitenkin LVDC-järjestelmissä TRU:lla on mahdollista pienentää vikavirran suuruutta käänteisen DC-jännitteen avulla (Hansen et al., 2011). Näistä syistä johtuen TRU:n käyttöä voidaan myös harkita MVDC-järjestelmään.

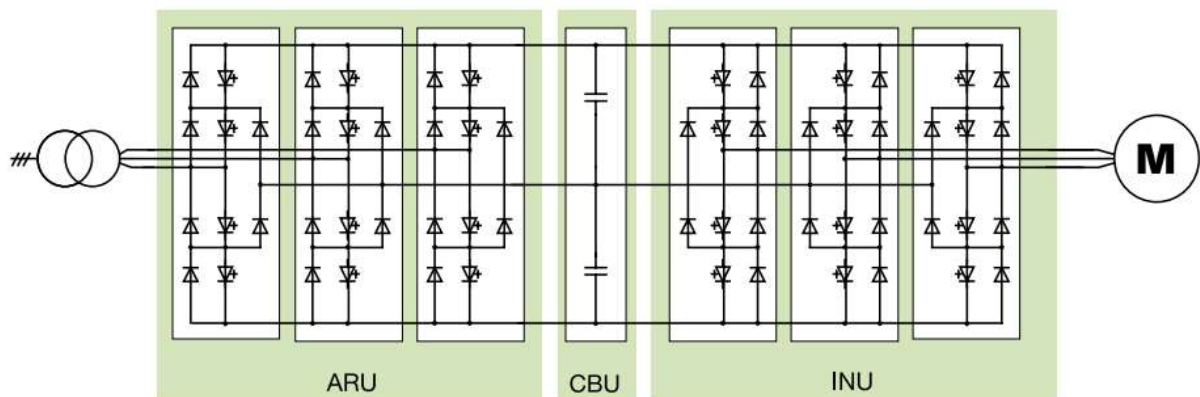
2.3.3 Aktiivinen tasasuuntaaja

Aktiivinen tasasuuntaaja (engl. Active Rectifier Unit) kapasitiivisella suodattimella on esitetty kuvassa 15, ja se on kaikista edistynein konvertteriratkaisu esitellyistä vaihtoehdoista (Wahlstroem et al., 2014). ARU:t ovat suhteellisen kalliita verrattuna DRU:hun ja TRU:hun ja niiden kyky tehon molempisuuntaiseen kulkemiseen on rajoitetussa käytössä siitä syystä, että tehon takaisinsyöttö ei yleensä ole mahdollista. Lisäksi ARU:t eivät pysty hallitsemaan vikavirtojen suuruutta (Chaudhuri et al., 2014), tällöin niiden soveltaminen laivakäyttöön ei tuo juurikaan hyötyä (pois lukien kyky säädellä MVDC-kiskon jännitettä) systeemin kannalta.

Kuvassa 16 on esitetty kaupallinen ABB:n ACS6000 MW taajuusmuuttaja ARU-topologialla toteutettuna, joka hyödyntää IGCT-kytkimiä (engl. Integrated Gate Commutated Thyristor).



Kuva 15. Aktiivinen tasasuuntaaja. (Javaid, 2018, s. 21)

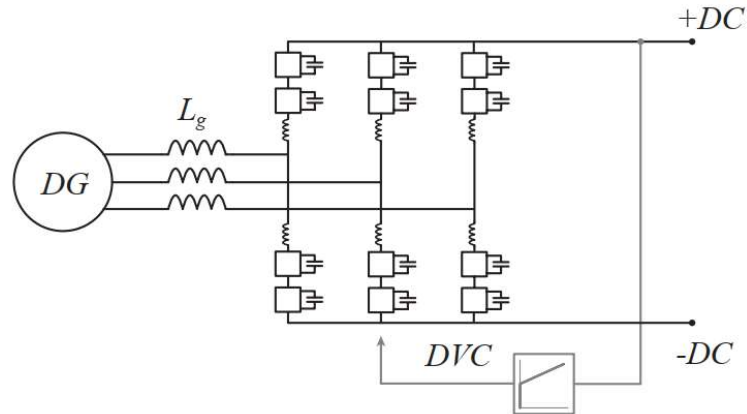


Kuva 16. ABB ACS6000 MV drive piirikaavio sisältäen 6-pulssisen ARU:n (Active rectifier unit) (ABB, 2010).

2.3.4 Modulaarinen monitasoinen konvertteri

Modulaarinen monitasoinen konvertteri (engl. Modular Multilevel Converter) on esitetty kuvassa 17, ne hyödyntävät kytkiminä usein IGBT:tä. MMC on myös yksi vaihtoehto harkittavaksi laivojen MVDC-järjestelmiin, koska sillä on tiettyjä vahvuuksia: korkeampi hyötysuhde pienemmän kytkentätaajuuden ansiosta, modulaarinen rakenne, hyvä jännitteen skaalautuvuus ja pienempi suodatustarve alimoduulien (sub-modules) myötä (Christe, Dujic., 2016). Konvertterin bipolaariset alimoduulit rajoittavat myös DC-puolen vikavirtoja. MMC

vaikuttaa rakenteeltaan kuitenkin monimutkaisemmalta mitä risteilyaluksissa todellisuudessa tarvitaan sekä ne ovat kooltaan ja painoltaan suurempia kuin kaupalliset ARU:t jotka hyödyntävät monitasoisia topologioita.

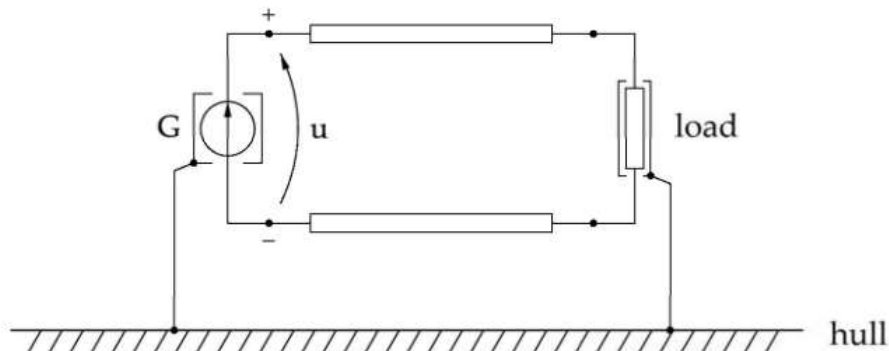


Kuva 17. Modulaarinen monitasoinen konvertteri. (Javaid, 2018, s. 21)

2.4 Maadoitukset

2.4.1 Bipolaarinen järjestelmä ilman maadoitusta

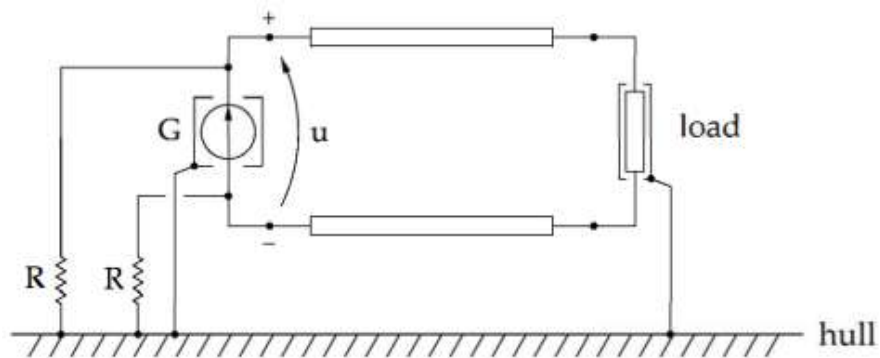
Ensimmäinen vaihtoehto MVDC-järjestelmän maadoittamiseen on bipolaarinen järjestelmä ilman maadoitusta (Kuva 18) jolloin molemmat navat on erotettu kokonaan maasta. Maadoitus rajoittuu ainoastaan metallisiin rakenteisiin (kaapelit ja niiden suojavaipat, laitekaapit jne.) jotta sähköturvallisuusvaatimukset täyttyvät. Kelluvan MVDC-puolen takia korroosion aiheuttamat ongelmat ovat mitättömiä ja rajoittuvat ainoastaan ohi meneviin tilanteisiin joissa johtojen eristys pettää. (IEEE, 2010, s. 13)



Kuva 18. Bipolaarinen järjestelmä ilman maadoitusta. (Bosich & Sulligoi, 2013, s. 2)

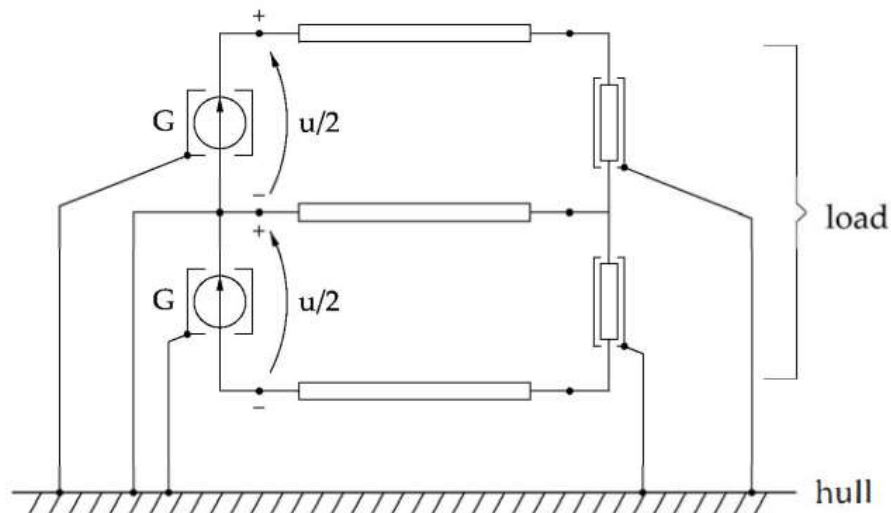
2.4.2 Bipolaarinen järjestelmä jossa maadoitus resistanssin kautta

Toinen maadoitusvaihtoehto on bipolaarinen järjestelmä jossa MVDC-kisko on maadoitettu ison resistanssin kautta (Kuva 19). Tällöin järjestelmä ei ole kiinteästi maadoitettu jolloin kummankin navan täytyy kestää epästabiilien tilanteiden DC-jännite kunnes jännite tasoittuu tai navalla oleva vika poistetaan. Tarvittaessa järjestelmällä voi olla mahdollista jatkaa käyttöä yksittäisen vian sattuessa MVDC kiskoon. (IEEE, 2010, s. 14)



Kuva 19. Bipolaarinen järjestelmä jossa maadoitus resistanssin kautta. (Bosich & Sulligoi, 2013, s. 2)

2.4.3 Bipolaarinen järjestelmä kiinteästi maadoitetulla tähtipisteellä

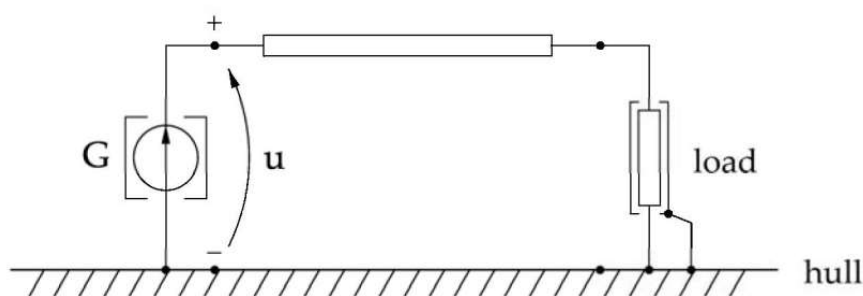


Kuva 20. Bipolaarinen järjestelmä jossa kiinteä maadoitus. (Bosich & Sulligoi, 2013, s. 2)

Kolmas maadoitusvaihtoehto on bipolaarinen järjestelmä jossa on kiinteästi maadoitettu tähtipiste (Kuva 20). Menetelmän hyötyjä ovat, että laitteistot vaativat puolikkaan jännitteen suuruisen eristystason maahan nähden, ja tarvittaessa järjestelmä voi toimia hätätilanteessa puolikkaalla teholla toisen navoista ollessa poissa käytöstä. (IEEE, 2010, s. 14)

2.4.4 Unipolaarinen järjestelmä

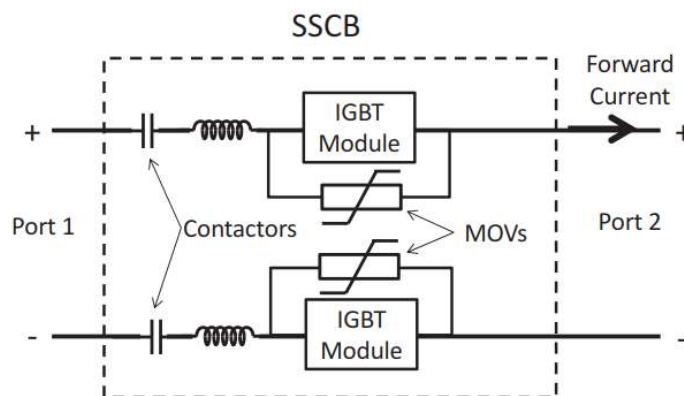
Neljäs maadoitusvaihtoehto (Kuva 21) on unipolaarinen järjestelmä jossa laivan runkoa käytetään virran paluureittinä. Tämä vaihtoehto vaatii erillisiä menetelmiä korroosion ehkäisemiseksi ja on sähköturvallisuuden kannalta haastava. Tätä menetelmää ei suositella käytettäväksi. (IEEE, 2010, s. 14)



Kuva 21. Unipolaarinen järjestelmä jossa laivan runkoa käytetään virran paluureittinä. (Bosich & Sulligoi, 2013, s. 2)

2.5 Vikavirtasuojaus

Vikavirtasuojauksen toteuttaminen on yksi MVDC-järjestelmien pääongelmakohtista. DC-oikosulkuvirtaa voidaan rajoittaa piiriä syöttävällä konvertterilla jolloin syöttö katkaistaan vialliselta kuormalta virta-arvon ylittäessä 150 % nominaalista arvosta. Tällä tavalla virta katkeaa koko syötettävältä piiriltä joten suojaus ei toimi riittävän selektiivisesti. Selektiivisyyden ratkaisemiseksi tarvitaan toisenlainen lähestymistapa. Lisäksi ongelmana on oikosulkuvirran suuri nousunopeus jolloin vian poistamiseksi saatetaan tarvita järeämpää rakennetta kuten puolijohteilla toimivaa MVDC-katkaisijaa. Puolijohteilla toimivat katkaisijat ovat edelleen kehityksen asteella, mutta niillä voi olla merkittävä osa laivojen MVDC-suojausjärjestelmien toteuttamisessa.



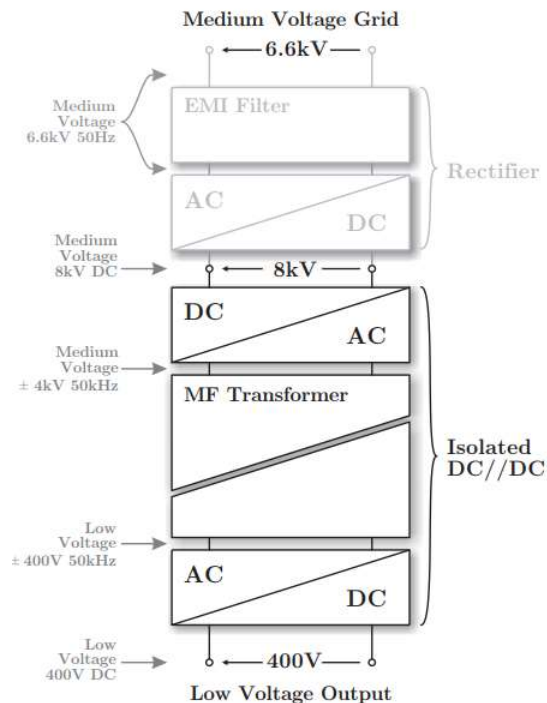
Kuva 22. IGBT-moduuleilla toteutettu SSCB (J. Langston et al., 2018, s. 3447)

DC-järjestelmässä vikavirran nousunopeutta rajoittaa lähinnä vain kaapelin pieni induktanssi. Nopea virran nousu yhdistettynä tarpeeseen saada virta katkaistua ennen tehoelektronisten kytkinten virtarajojen ylittymistä puolijohdekatkaisijassa (engl. Solid State Circuit Breaker) luo tarpeen suojausmetodeille joilla viat saadaan erotettua mikrosekunneissa. Jännitteen ollessa 1 kV tai enemmän ja vain muutaman mikro-Henryn induktanssin rajoittaessa virran nousua, vikavirran purkautuminen järjestelmän suodatinkondensaattoreista voi tapahtua useiden satojen (tai enemmän) A/ μ s. Jotta voidaan välttää SSCB:n tehoelektroniikkakytkinten vaurioituminen, jotka voivat kestää vain muutamia kilo-ampeereja, SSCB:n täytyy huomata vika ja avautua mikrosekuntien aikana. Tämä on useita suuruusluokkia nopeampi kuin perinteinen AC-katkaisija, joilla kestää tyypillisesti kymmeniä millisekunteja avautumiseen ja vikavirran sammuttamiseen. Vikojen nopealla poistamisella minimoidaan myös vaikutukset DC-pääkiskon jännitteen stabiilisuuteen. (Langston et al., 2018).

Eräs tapa toteuttaa SSCB on IGBT-perusteinen yksikkö (Langston et al., 2018) kuvassa 22. Kuten nähdään niin IGBT-perusteinen SSCB nojaa toiminnassaan täysin puolijohteisiin (verrattuna vaikka hybridi-katkaisijoihin) ja jossa normaalitilanteessa virta kulkee IGBT:den kautta. Jokainen katkaisija hyödyntää aika-virta-käyrää (engl. Time-Current-Curve) vikojen havaitsemiseen, käyttäen erikseen suunniteltua sekoitetun signaalin (engl. Mixed-Signal) ohjauspiiriä jotta saavutetaan erityisen nopeat havaitsemisajat. TCC perustuu eroon trippausajassa vs. vikavirran suuruudessa ja näin sitä voidaan säätää eri trippaus-ajoille vs. vikavirran suuruudelle katkaisijan termisen kestävyuden mukaisesti (Langston et al., 2018).

2.6 Galvaaninen erotus

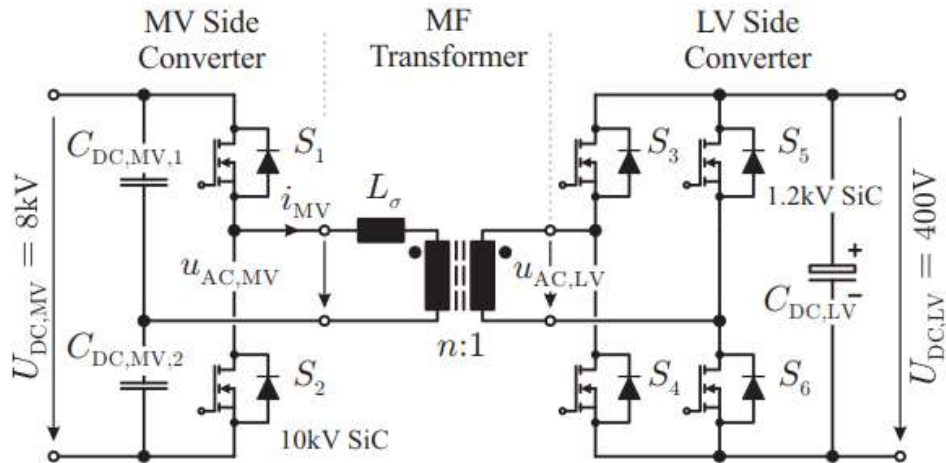
Galvaanisella erottamisella parannetaan ihmisten turvallisuutta ja järjestelmän suojausta. DC-järjestelmässä DC/DC-konvertterin tehtävä ei ole pelkästään muuntaa DC-jännitettä toiselle tasolla vaan sen täytyy huolehtia myös galvaanisesta erotuksesta. Yksi mahdollinen vaihtoehto voisi olla ns. puolijohdemuuntaja (engl. Solid State Transformer) jonka pääkomponentti on keskitaajuinen muuntaja (engl. Medium Frequency). SST (Kuva 23) koostuu invertteristä, MF-muuntajasta ja tasasuuntaajasta jolloin on mahdollista saavuttaa galvaaninen erotus.



Kuva 23. SST:n rakenne joka korostaa erotettua yhteyttä keskijännitteisen DC-linkin ja pienjännitteisen syötön välillä. Syöttö kulkee yksiasteisen (engl. Single-Stage) ei sarjaan kytketyn keskijännitteisen SiC:in perustuvan DC-DC-konvertterin kautta. (Rothmund et al., 2015, s. 1097).

Toteutus on monimutkaisempi perinteiseen AC-muuntajaan (50/60Hz) nähden, mutta ratkaisun vahvuus on pienempi paino ja koko. (Rothmund et al., 2015). Galvaanisesti erotetun DC-DC-konvertterin asteeksi sopii vaihesiirrolla moduloitu kaksitasoinen aktiivinen silta (engl. Dual Active Bridge) (Kuva 24), jonka kytkentäjännitteet on asetettu (engl. Clamp Voltage) ja kyseisellä rakenteella on mahdollista saavuttaa nolajännitteiset kytkennät (engl. Zero Voltage Switching) jolloin puolijohteilla on mahdollista saavuttaa korkea kytkentätaajuus ja hyötysuhde

(Rothmund et al., 2015, s. 1096-1097). SST on edelleen kehityksen asteella joten kaupallisia sovelluksia ei ole löydettävissä.



Kuva 24. DC-DC-konvertterin piirikaavio jossa hyödynnetään SiC-komponentteja. Syöttö kytketään MF-muuntaajaan ja lopulta keskijännitteisiin SiC-komponentteihin LV-puolella (Rothmund et al., 2015, s. 1097).

2.7 Kaapelit

HVDC-järjestelmissä on paljon käyttökokemusta suurjännitteisten DC-kaapelien käytöstä ja samoja kokemuksia pyritään hyödyntämään myös MVDC-järjestelmissä. CIGRE TB 496 antaa suosituksia eristettyjen (engl. Extruded) suurjännitekaapeleiden testaamiseen aina 500 kV:in asti, mutta ei ota kantaa HVDC- ja MVDC-kaapeleiden eroavaisuuksiin. MVDC-kaapelit ovat suunnittelultaan saman kaltaisia kuin HVDC-kaapelit, mutta niissä on eroja kuten johdinten poikkipinnat, eristeiden paksuus, eristeiden materiaali ja sähkökenttien aiheuttama rasitus käytössä ja testeissä. (Mazzanti & Marzinotto, 2013).

Kaapelin virtakapasiteetin kannalta, DC-järjestelmässä on mahdollista siirtää enemmän tehoa verrattuna AC-järjestelmään virranahitoilmiön, tehokertoimen ja induktiivisen reaktanssin puuttuessa. Virranahitoilmiössä virran tiheys on suurempi johtimen pinnalla verrattuna sen keskustaan, koska reaktanssi on korkeampi keskellä kun taas kahden keskenään lähekkäin sijoitetun johdinten magneettikenttien kohtaaminen aiheuttaa virran siirtymisen joko johdinten

lähimmäiseen tai kauimpaan reunaan, riippuen AC-virran suunnasta. Molemmat nämä ilmiöt aiheuttavat kaapeleille alentuneen virran kuljetuskapasiteetin. MVDC-järjestelmässä näitä vaikutuksia ei ole, koska DC-virralla ei ole suuntaa ja kaapeleiden koko poikkipintaa pystytään hyödyntämään virran kuljetukseen, tällöin suuremman kapasiteetin myötä käytettävien kaapeleiden koko ja massa pienenevät. Standardoituja MVAC-kaapeleita on kaupallisesti saatavilla yksi- tai kolmivaiheisina eri jännitetasoille käytettäväksi.

2.8 Hyödyt

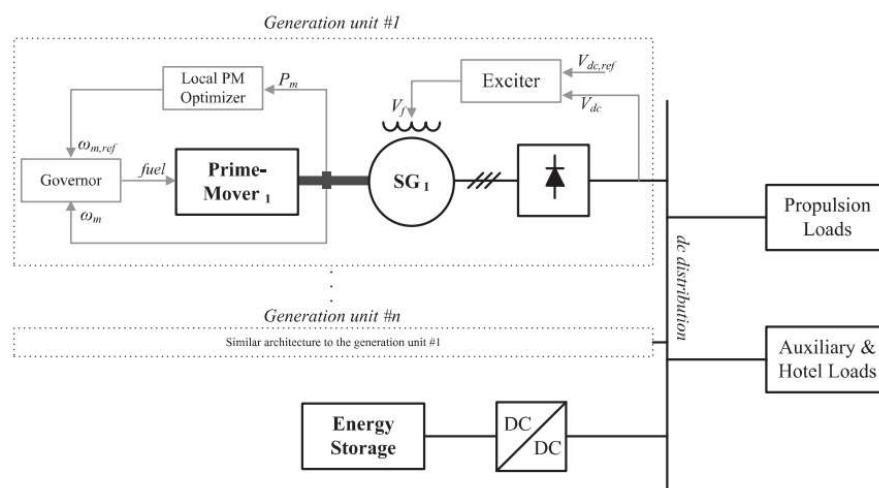
MVDC-järjestelmiin liittyy joitain tutkittuja ja käytännön LVDC-sovellusten kautta vahvistettuja hyötyjä joita käydään läpi seuraavissa alaluvuissa.

2.8.1 Moottorin hyötysuhde

Sähköisellä propulsiolla varustetut alukset ovat tyypillisesti perustuneet kiinteän jännitteen ja kiinteän taajuuden (50/60Hz) AC-generaattoriin ja sähköjakelujärjestelmään. Päävoimanlähteenä sähköisen propulsioiden risteilyaluksissa on tyypillisesti synkronigeneraattori jota pyörittää polttomoottori ja jonka polttoaineena toimii diesel, raskasöljy tai yleistyvä LNG. DC-järjestelmät ovat olleet erityisen mielenkiinnon kohteena, koska niihin on mahdollista integroida optimaalisella kierrosnopeudella toimiva primäärivoimanlähde joka tarkoittaa pienentynyttä polttoaineen kulutusta ja kasvanutta hyötysuhdetta (Satpathi, Ukil & Pou, 2018, s. 272).

AC-järjestelmässä primäärivoimanlähteet on kytketty kiinteän taajuuden generaattoreihin jotta sähköjärjestelmän taajuus (50/60 Hz) voidaan ylläpitää sallituissa rajoissa. Tällöin myös primäärivoimanlähteiden nopeudet on sidottu sähköjärjestelmän taajuuden ylläpitoon. Jokaisen primäärivoimanlähteen kuormitus määrittelee sen polttoainetehokkuuden eli polttoaineen massan joka tarvitaan työtä tekevän energian tuottamiseksi (SFOC jonka yksikkö on g/kWh) (engl. Specific Fuel Oil Consumption). Usean primäärivoimanlähteen ollessa käynnissä teho jaetaan tasaisesti näiden kesken joka voi johtaa tilanteeseen missä primäärivoimanlähteet toimivat alhaisella teholla nimellistehoon nähden (epäoptimaalinen tilanne). (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 87-88)

DC-järjestelmässä pääkiskon taajuus on 0 Hz jolloin primäärivoimanlähteen nopeuden ei tarvitse olla lukittuna 50/60 Hz kuten AC-järjestelmässä. Kuvassa 25 on esitetty DC-voimalaitoksen rakenne yksityiskohtaisesti. Generaattorin AC-teho muunnetaan DC:ksi kolmivaiheisella dioditasasuuntaajalla. Primäärivoimanlähteen pyörimisnopeutta säädetään paikallisella ohjauslaitteella polttoaineen kulutuksen minimoimiseksi, tämä ei olisi mahdollista perinteisessä AC-järjestelmässä jossa nopeusreferenssi on vakio jotta generaattoreiden tahtikäynti säilytetään. Tasaista tehonjakoa varten generaattoreiden välillä ja DC-kiskon jännitteen tason säilyttämiseksi, generaattoreiden magnetointi koordinoidaan toisen asteen droop ohjauksella. (Zahedi, Norum & Ludvigsen, 2014, s. 342) Vaiheita ja taajuutta ei ole tarpeellisesta synkronoida DC-järjestelmässä. Päägeneraattorin vikaantuessa varageneraattori voidaan kytkeä välittömästi suoraan DC-kiskoon. (Satpathi, Ukil & Pou, 2018)

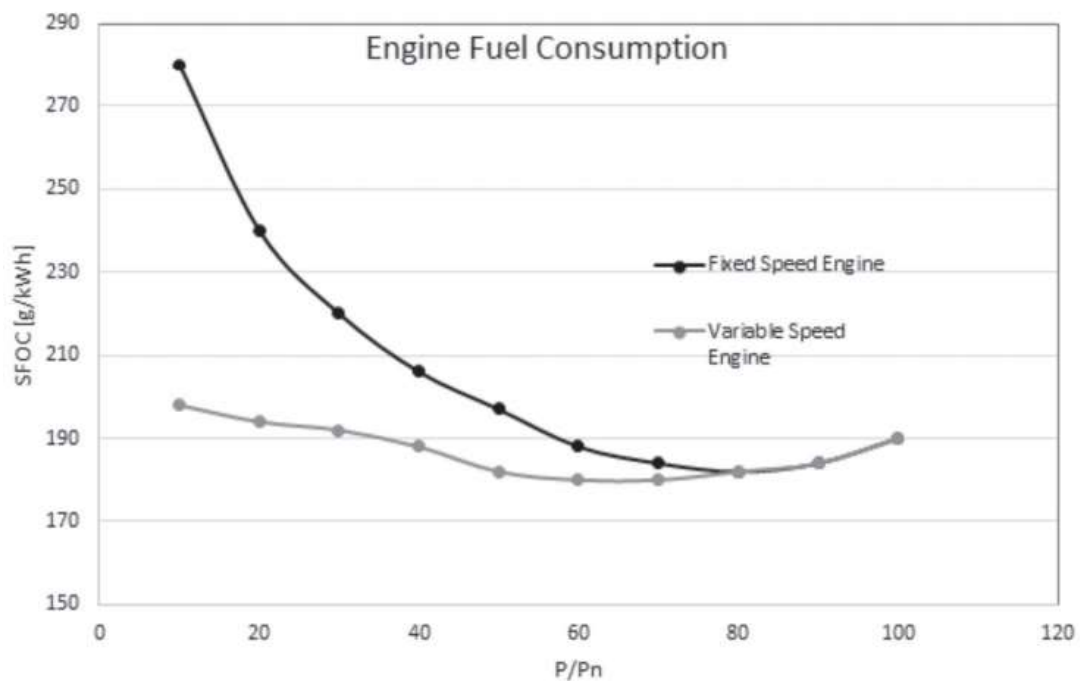


Kuva 25. Tarkka kuvaus DC-järjestelmän voimalaitoksesta. (Zahedi, Norum & Ludvigsen, 2014, s. 343)

SFOC-käyrät polttomoottoreille (Kuva 26) on hankittu polttomoottoreiden hyötysuhdekartoista. Polttomoottoreita kehitetään jatkuvasti hyötysuhteen ja päästöjen osalta, kuitenkin niiden polttoaineen energian hyödyntämissuhde on edelleen maksimissaan 40%, jolloin loput polttoaineen sisältämästä energiasta haihtuu lämpönä ja pakokaasuina. (Zahedi, Norum & Ludvigsen, 2014, s. 342)

Kuva 26 havainnollistaa, että moottorin toimiessa optimaalisella pyörimisnopeudella kussakin kuormitustilanteessa, polttoainetta saadaan hyödynnettyä korkeammalla hyötysuhteella

akselitehoksi. Polttoaineen hyödyntämistä voidaan parantaa säätämällä moottorin pyörimisnopeutta kuormituksen mukaan. Tästä nähdään perinteisen AC-järjestelmän heikkous jossa kaikkien generaattoreiden täytyy olla synkronoituna kiinteään taajuuteen estäen näin optimaalisen pyörimisnopeuden ohjaamisen. Lähestyttäessä dieselmoottorin optimaalista tehoaluetta SFOC-arvo tasoittuu AC- ja DC-järjestelmien välillä. DC-järjestelmän tehokkuus tulee esille tilanteissa jossa moottorin kuormitus on alle 80 % nimellisarvosta. Myös AC-järjestelmässä jokaisen moottorin pyörimisnopeutta on mahdollista säätää erikseen käyttämällä taajuusmuuttajaa vastaavia (engl. Back-To-Back) konverttereita jokaisella generaattorilla.



Kuva 26. Vertailu SFOC-arvon kehityksestä käytettäessä moottoria kiinteällä tai vaihtelevalla nopeudella. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 89)

Back-to-back –konverttereiden käyttö on kuitenkin kalliimpaa ja monimutkaisempaa verrattuna DC-järjestelmään siirtymiseen. Lisäksi risteilyalusten sähkötehosta merkittävä osa muunnetaan kuitenkin DC:ksi propulsioon sähkökäytöissä. Back-to-back -konverttereiden käyttö lisää muuntoasteita AC:n ja DC:n välille joka tarkoittaa voimansiirron kokonaishyötysuhteen heikentymistä. Tällöin DC-järjestelmä on mieluisampi vaihtoehto laivoissa polttoainekustannusten vähentämisen kannalta. (Zahedi, Norum & Ludvigsen, 2014, s. 343)

2.8.2 Generaattorien toiminta tehokertoimella 1

Generaattorin ulostulossa AC muunnetaan DC:ksi dioditasasuuntaajalla, jolloin loistehon virtaus eliminoituu. Tällöin generaattorin staattorikäämien ja tasasuuntaajan välisissä kaapeleissa ei kulje loistehoa, joten generaattorin tehokerroin on yksi ($\cos\varphi = 1$). Tämä tarkoittaa sitä, että generaattorit eivät tuota loistehoa ja niiden koko pienenee magnetointijärjestelmän koon verran (Doerry, Clayton, 2005). Pienentyneestä koosta huolimatta generaattorit syöttävät silti edelleen saman pätötehon laivan sähköverkkoon. Tämä johtaa siihen, että generaattorien virta on pienempi loistehon puuttuessa jolloin kaapelit generaattoreiden ja tasasuuntaajien välillä voivat olla huomattavasti pienempiä poikkipinnaltaan. Poikkipintojen pienentyminen staattorikäämityksissä johtaa generaattorin koon pienentymiseen. (Prenc, Cuculic & Baumgartner., 2016, s. 90)

Inverterien ja sähkömoottorien välisissä kaapeleissa kulkee edelleen pätö- ja loistehoa, koska kaikki sähkömoottorit vaativat magneettikentän sähkötehon muuntamiseksi mekaaniseksi tehoksi. Sähkömoottoreiden tarvitsema loisteho tuotetaan niitä syöttävissä inverttereissä säätämällä puolijohteiden IGBT (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) tai IGCT (engl. Integrated Gate Commutated Thyristor) sytytyksen viivettä jotta saadaan muodostettua vaihekulmaero jännitteen ja virran siniaaltojen välille. (Prenc, Cuculic & Baumgartner., 2016, s. 90).

2.8.3 Siirtohäviöt

AC-järjestelmiin verrattuna tehokertoimen ja johtimien virranahtoilmion (engl. Skin Effect) puuttuminen johtaa kaapelien poikkipintojen pienenemiseen (Satpathi, Ukil & Pou, 2018). Tämä ei toki vaikuta verkon osiin joissa kulkee AC-virtaa. DC-järjestelmässä verkossa ei kulje loistehoa ja riippuen jännitteen tasosta kaapeleiden massa voi pienentyä. Generaattoreissa ja DC-verkossa ei kulje loistehoa jolloin siirrettävät virrat ovat pienempiä ja tällöin myös tehohäviöt jäävät pienemmiksi. DC-verkossa ei ole AC-verkossa tapahtuvaa induktiivisen reaktanssin aiheuttamaa jännitehäviötä eli se voidaan jättää huomioimatta.

2.8.4 Järjestelmän koko ja paino

DC-järjestelmissä voidaan käyttää suuren pyörimisnopeuden kaasuturbiineja kytkettynä suuren pyörimisnopeuden generaattoreihin sillä niiden nopeuksien ei tarvitse olla lukittuna 50/60 Hz verkon taajuuteen. AC-järjestelmissä vastaavaa suurinopeuksista primäärivoimanlähdettä täytyy käyttää alennusvaihteen kanssa jotta roottorin pyörimisnopeus saadaan pienennettyä taajuuden ohjaamista varten, tämä selkeästi vähentää vaihtoehdon käyttöä laivoissa. Polttoainesäästön lisäksi, suuren nopeuden generaattorit painavat vähemmän ja vaativat vähemmän tilaa joten niiden käyttö laivassa voi tuottaa merkittäviä taloudellisia säästöjä laivan omistajalle. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 89)

DC-järjestelmä on usein kompaktimpi AC-järjestelmään verrattuna koska muuntajien tarve vähenee verkossa. Muuntajien koko ja paino ovat nimellistaajuuteen kääntäen verrannollisia. Laivan AC-järjestelmä toimii tyypillisesti 60 Hz taajuudella jolloin myös muuntajat ovat kooltaan isoja ja painavia (Reed et al., 2012, s. 73). DC-järjestelmässä AC-päätaulut, katkaisijat ja niiden suojareleet jäävät pois. Myös propulsiomuuntajat poistuvat. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 90)

Toisin kuin AC-järjestelmä joka vaatii kolme johdinta tehonsiirtoa varten, DC-järjestelmässä on vain kaksi johdinta. Yhden johtimen poistaminen pienentää painoa ja säästää tilaa kaapelikuiluissa. Vaihtoehto DC-kaapeleiden käytölle on DC-jakelukiskojärjestelmä. Sähkönjakelun toteuttamisesta kiskojärjestelmällä on useita hyötyjä: pienemmät poikkipinnat, ei kaapelin vaatimaa taittosädettä ja huomattavasti parempi palonkestävyys verrattuna kaapeleihin. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 89)

2.8.5 Akkujärjestelmien integrointi

Akkujärjestelmän integroinnilla voidaan parantaa voimalaitoksen hyötysuhdetta kun ainakin yksi primäärivoimanlähde voidaan kytkeä pois päältä pienellä kuormitustasolla. Tällä tavalla pystytään minimoimaan polttoaineen kulutus ja päästöjen muodostuminen. Toinen mahdollisuus akkujärjestelmän käytössä liittyy kuormituksen tasaamiseen optimaaliselle alueelle jolloin primäärivoimanlähteet toimivat vakioteholla joka ladaten tai purkaen akkuja,

näin moottorien ei tarvitse vastata propulsioon vaihteleviin kuormitusvaatimuksiin. Tällöin akkujärjestelmä ei ainoastaan pienennä polttoainekulutusta vaan vakavoi koko voimalaitoksen tehotasapainoa. (Lamichhane et al., 2020, s. 8)

Akkujärjestelmät on mahdollista kytkeä DC-kiskoon DC-DC-konvertterilla jolloin tehoa pystytään siirtämään molempiin suuntiin hyvällä hyötysuhteella (Satpathi, Ukil & Pou, 2018). Riittävän ison akkujärjestelmän omaavalla laivalla voi olla kolme eri operointimoodia: täyssähkö, hybridi ja polttoaine-moodi (Esim. LNG). Ensimmäisessä tapauksessa generaattorit ovat poissa käytöstä jolloin propulsiomooottoreita ja muita järjestelmiä syötetään akkujärjestelmästä. Toisessa tapauksessa generaattorit ja akkujärjestelmä toimivat yhdessä rinnakkain ja kolmannessa tapauksessa akut kytketään pois ja tarvittava teho tuotetaan pelkästään generaattoreilla. (D'Agostino et al., 2020, s. 5)

2.9 Haasteet

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi MVDC-järjestelmiin liittyviä haasteita.

2.9.1 Korkeat oikosulkuvirrat

Suuri oikosulkuvirran piikki aiheutuu DC-välipiirin kondensaattorin varauksen purkautumisesta, tämä aiheuttaa erityisiä vaikeuksia sopivien vianilmaisun algoritmien suunnitteluun. Vikavirran nousuaika on lyhyt joten vianilmaisun algoritmien tulee huomata viat erittäin nopeasti. Vikavirran huomaamisen lisäksi vian erottaminen on yksi isoimmista haasteista DC-järjestelmässä. Viallinen osuus pitää pystyä erottamaan joko käyttämällä DC-katkaisijaa tai käyttämällä katkaisijatonta arkkitehtuuria. (Fletcher et al., 2012)

AC-järjestelmän etu on kaapelin sisältämän impedanssin (induktiivinen reaktanssi) luontainen kyky rajoittaa oikosulkuvirtaa, tämä vaikuttaa merkittävästi sähköjärjestelmän komponenttien valintaan, päätaulun massa ja hinta kasvavat kun komponenttien vikavirtakestoisuutta joudutaan nostamaan. AC-järjestelmissä kaapelin impedanssi koostuu ohmisesta resistanssista ja induktiivisesta reaktanssista. Tilanne ei ole vastaava DC-järjestelmässä, jossa vain alhainen ohminen resistanssi rajoittaa oikosulkuvirtaa.

2.9.2 MVDC suojausjärjestelmän toteuttaminen

Yksi päähaasteista MVDC-järjestelmien suunnittelussa on tarvittavan suojausteknologian puuttuminen ja oikosulkusuojausta koskevien standardien ja ohjeistuksen vähyys. Oikosulkusuojauksen toteuttaminen pääasiassa tarkoittaa vian huomaamista, vian erottamista ja vian jälkeistä palautumista. Vian huomaaminen ja eristäminen on tarpeellista, jotta viallinen osa saadaan nopeasti erotettua toimivasta verkosta. Systemi tulee rakentaa niin ettei sähköjakeluverkossa tapahtuva vika katkaise sähköjä turhaan kriittisiltä kuormilta. Laivoissa oikosulkusuojaukseen liittyvät haasteet ovat vastaavia mitä esiintyy maapuolen HVDC-siirtojärjestelmissä ja DC-mikroverkoissa. Edellä mainituissa verkoissa on tosin merkittävä ero kuorman profiileissa verrattuna laivan sähköverkkoon. DC-mikroverkkojen ja HVDC-siirtojärjestelmien kuormien profiilit ovat suhteellisen hyvin ennustettavissa, mutta laivan MVDC-järjestelmään kytketty sähköinen propulsiojärjestelmä aiheuttaa merkittävää tehon vaihtelua ja saattaa edustaa jopa 80% tuotantokapasiteetista (Satpathi, Ukil & Pou, 2018, s. 272). Lisäksi maapuolella laitteet voivat olla kokoluokaltaan täysin erilaisia verrattuna laivasovelluksiin. HVDC-siirtojärjestelmissä käytettävät katkaisijat ovat kokoluokaltaan bulkkimaisia ja ne pystyvät katkaisemaan suuria oikosulkuvirtoja. Laivoissa ei ole kuitenkaan mahdollista käyttää vastaavanlaisia suureen katkaisukykyyn perustuvia bulkkimaisia katkaisijoita, vaan viat tulee erottaa hyvin nopeasti ennen alkuoikosulkuvirran nousua jolloin katkaisijoiden kokoluokkakin pysyy maltillisena.

Perinteiset sähkömekaaniset kytkinlaitteet ovat hitaita ja vikatilanteessa DC-jännitteen romahdus voi olla huomattavasti nopeampi AC-jännitteen romahdukseen verrattuna. AC-katkaisijan toiminta perustuu vian laukaisemiseen siniaallon nollakohdassa, jolloin valokaari saadaan kompaktisti sammutettua koskettimien väliltä. DC-järjestelmässä jännite pysyy kokoajan vakiona joten vian laukaiseminen on huomattavasti hankalampaa (Reed et al., 2012, s. 73). Suuritehoisia DC-katkaisijoita on olemassa kaupallisesti jonkin verran, mutta ne ovat monimutkaisempia, isompia ja kalliimpia verrattuna vastaaviin suojuoreilleillä varustettuihin AC-katkaisijoihin.

Suojauksen toteutusta suunniteltaessa täytyy varmistaa DC-järjestelmän selektiivisyys ja laitteiden suojaus, kuitenkin minimoiden kalliiden ja tilaa vaativien DC-katkaisijoiden käyttö,

niitä tulisi käyttää vain isojen lähtöjen suojaukseen. DC-järjestelmän kunnollinen suojaus voidaan saavuttaa yhdistämällä sulakesuojaus ja nopeasti pois kytkettävät puolijohteilla toimivat tehokomponentit. Tasasuuntaajat voidaan varustaa ohjattavilla kytkinlaitteilla, tällöin vikavirrat voidaan huomata paljon nopeammin kuin perinteisillä suojareleillä varustetuilla katkaisijoilla. Sulakkeita voidaan käyttää suojaamaan ja eristämään invertteri-moduuleita. Vakavan vian tapahtuessa DC-kiskoon, järjestelmä on suojattava generaattorin syöttämältä suurelta oikosulkuvirralla tasasuuntaajan pois-kytkettävillä puolijohteilla, kyseinen suojaus toimii samalla myös itse generaattorin suojalaitteena. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016, s. 94)

2.9.3 Kaupalliset sovellukset

Laivojen MVDC-järjestelmien toteutuksen esteenä on kaupallisten sovellusten puuttuminen. Kuten aikaisemmin todettu niin ABB ja Siemens ovat toteuttaneet laivojen LVDC-sähköjakelujärjestelmiä, mutta keskijännitteisistä DC-laivoista ei ole referenssejä löydettävissä. Suuritehoisia DC-DC-konverttereita ei ole juurikaan saatavilla kaupallisesti vaikka aihe on merkittävä mielenkiinnon ja tutkimuksen kohde. Riittävien vikavirtasuojausmenetelmien puuttuminen on eräs päähaasteista MVDC-järjestelmien toteuttamisessa. MVDC-kaapelit ovat myös tekniikka josta ei ole löydettävissä kaupallisia standardoituja tuotteita, kuitenkin kaapelien puutetta ei voida nähdä teknisesti esteenä vaan niiden yleistymistä jarruttaa muiden MVDC-teknologioiden puuttuminen.

Laivojen voimalaitosten tasasuuntaustekniikaksi on olemassa erilaisia ehdotuksia, mutta näiden käytännön testit ja operointikokemus puuttuvat. Tämän työn tapauskohtaisessa selvityksessä (Luku 4) käytettävälle 11 kV MVDC-jännitteelle ei ole löydettävissä kaupallisia suuren suorituskyvyn sähkökäyttöjä. Näin korkea jännite vaatii invertteriltä suuren kokoluokan rakenteen jotta se kykenee toimimaan suurella DC-linkin jännitteellä. Kaupallisesti löydettävissä suuritehoisissa MVAC-taajuusmuuttajissa jännite muunnetaan ensin (esim. 11 kV – 1.69 kV) jonka jälkeen se tasasuunnataan.

Edellä mainituista seikoista huomataan, että vaikka MVDC-järjestelmiin liittyy hyödyllisiä tekijöitä, kaupallinen tekniikka ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä jotta järjestelmiä voitaisiin harkita risteilyalusprojekteihin.

3 JÄRJESTELMÄVERTAILU MVAC-MVDC

Luvussa vertaillaan MVAC- ja MVDC-järjestelmien eroavaisuuksia komponentti- ja systeemitasolla, sekä miten konvertteri- ja polttoainekustannusten muodostuminen eroaa järjestelmien välillä. Vertailun lähtökohtana käytetään luvun 4 tapauksen, risteilyalus Mein Schiff 1:n MVAC-sähkönjakelujärjestelmää.

3.1 Voimalaitos

Kirjallisuudessa on mainintoja MVAC-järjestelmän suurista ja painavista muuntajista luopumiseen kun siirrytään MVDC-järjestelmään. Kuitenkin risteilyaluksissa on jo tänä päivänäkin usein käytössä 11 kV generaattorit joten erillistä muuntajaa ei tarvita jännitteen nostamista varten. DC-järjestelmässä generaattoreita ei ole tarpeellista tahdistaa verkkoon, joten AC-järjestelmän tahdistukseen liittyvät laitteistot jäävät tarpeettomiksi. MVDC-järjestelmässä voidaan luopua propulsiomuuntajista, tämä kuitenkin edellyttää invertterien välipiirien jännitekestoisuuden kasvamista yli 10 kV tasolle. Jotta yli 10 kV MVDC-järjestelmät yleistyvät niin vaatimuksena on, että moottoreiden ohjaamiseen käytettävät invertterit tehopooliohteineen kestävät kyseisen suuruista DC-linkin jännitettä. Tällä hetkellä kaupallisten taajuusmuuttajien välipiirin jännitekestoisuus on pääasiassa alle 10 kV.

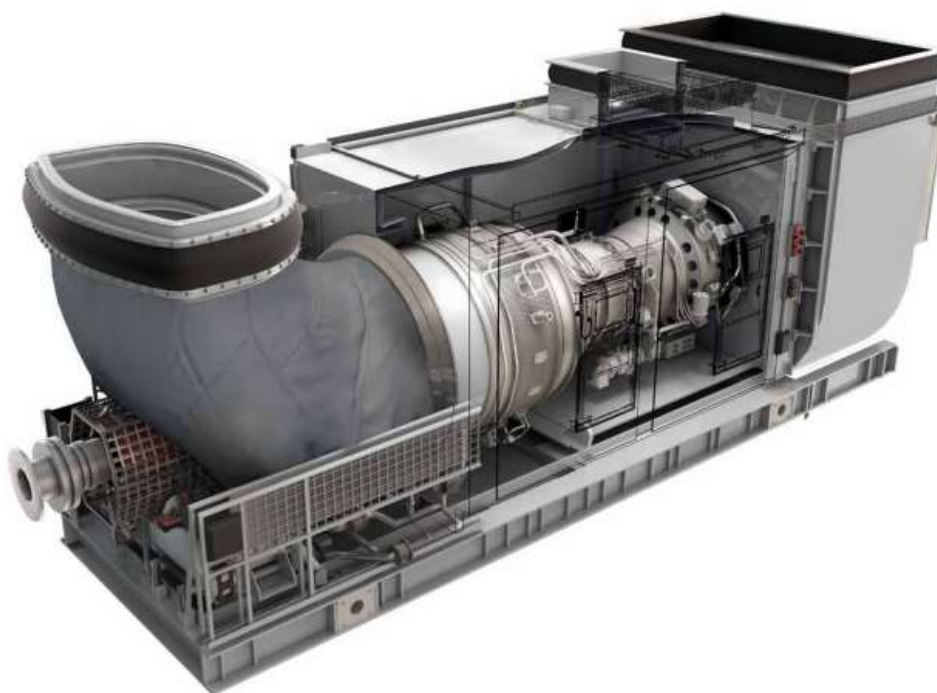
3.2 Primäärivoimanlähteet

Polttomoottoreita käytetään yleensä primäärivoimanlähteenä laivoissa. Polttoaineena käytetään usein dieseliä tai raskaspolttoöljyä (HFO), mutta vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös kaasua jolloin primäärivoimanlähteenä toimii kaasuturbiini, höyryturbiini tai näiden yhdistelmä, erityisesti LNG-aluksille. (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016)

Käytettäessä kaasuturbiineja (Kuva 27) primäärivoimanlähteen koko ja paino pienenevät (-77% ja -60%) ja polttoainepäästöt yli puolittuvat verrattuna polttomoottoreihin. Kasvatettaessa pyörimisnopeutta 500 rpm:stä (tyypillinen primäärivoimanlähteen pyörimisnopeusluokka) 9000 rpm:ään (tyypillinen kaasuturbiini), sähköisen generaattorin koko ja paino voivat pienentyä kymmenesosaan verrattuna perinteisesti käytettyyn teknologiaan. Kuitenkin

huolimatta näistä kaasuturbiinin hyödyistä, on tutkittu, että dieselmoottoriin verrattuna polttoaineenkulutus kasvaa 9% jonka myötä ratkaisun taloudellisuutta tulee tarkastella huolellisemmin. (MVDC large ship project, 2021)

Parempien vaihtoehtojen tarkastelua varten on harkittu myös hybridikonfiguraatioita (polttomoottori + kaasuturbiini). Tällaisella järjestelmällä saavutetaan koon ja painon pienentyminen (-41 %) ja puolittuneet polttoainepäästöt (noin -50 %), lisäksi voidaan taata suhteellisen korkea hyötysuhde. Edellä mainitun lisäksi on tutkittu sellaisten kaasuturbiinien käyttöä joissa hukkalämpöä hyödynnetään ilmastoinnin kylmän ilman tuotannossa absorptio- ja kompressiojäähdyttimissä, tällöin polttoaineenkulutus on marginaalisesti suurempi polttomoottoriratkaisuun verrattuna (noin +3.5-4%). (MVDC large ship project, 2021)



Kuva 27. Rolls Roycen laivakäyttöön tarkoitettu MT30 kaasuturbiini: 3000-3600 rpm (50-60 Hz) ja 36-40 MW. (Rolls royce, 2021)

Kestomagneettisynkronigeneraattoria (engl. Permanent Magnet Synchronous Generator) käytetään pääasiassa öljy- ja kaasuteollisuudessa turbokompressoreina (Saban et al., 2008), mutta niiden käytöstä DC-järjestelmien generaattorina on myös mainintoja kirjallisuudessa. PMSG:tä voidaan käyttää sovelluksissa joissa tarvitaan nopeuksia 8000 rpm ja ylöspäin.

(Sulligoi et al., 2011). Suuren pyörimisnopeuden PMSG:n toiminta on mahdollista kun magneettikenttä luodaan kestromagneettien avulla eikä ulkoisesti magnetoimalla roottorin kenttääkäämityksiä. Huolimatta PMSG:n hyödyistä on olemassa tiettyjä haasteita liittyen käytännön operointikokemuksen puutteeseen laivasovelluksissa joten PMSG:n kaikkia mahdollisuuksia on vaikea tarkastella (Sulligoi et al., 2013). MVDC-järjestelmään liittyessään PMSG:n ulostulo vaatii tasasuuntauksen konvertterilla ja kapasitiivisen filtterin rippelin (engl. Ripple) minimoimiseksi.

Edellä mainituista heikkouksista huolimatta MVDC-järjestelmässä kaasuturbiinit ovat hyvä vaihtoehto korvaamaan polttomoottorit primäärivoimanlähteenä, koska ne ovat luotettavia ja kompakteja sekä lisäävät sähkönjakelujärjestelmän energiatiheyttä. Tulevaisuuden MVDC-järjestelmissä kaasuturbiineja voidaan operoida laajalla nopeusalueella ja erityisesti suuren nopeuden kestromagneettisynkronigeneraattoriin kytkettynä joka operoi 50 Hz – 1 kHz taajuudella kuormitustilanteen mukaan (Prenc, Cuculić & Baumgartner., 2016).

Jotta kaasuturbiinien hyödyntäminen on taloudellisesti perusteltavissa niin kaasuturbiinin hinnan, kokoluokan ja päästöjen pienentyminen pitää nähdä riittävän houkuttelevina tekijöinä jotta kasvanut polttoaineenkulutus voidaan perustella. Kuten edellä mainittiin niin suuren pyörimisnopeuden kestromagneettisynkronigeneraattoreiden koko voi olla vain kymmenesosa perinteiseen synkronigeneraattoriin nähden, joten pienemmän materiaaltarpeen myötä sekä teknologian yleistyessä kestromagneettisynkronigeneraattoreiden hinnat voivat tippua synkronigeneraattoriin nähden. Kaasuturbiinin ja kestromagneettisynkronigeneraattorin hankintahinta voi tällöin olla perusteltavissa vaikka polttoaineenkulutus onkin hieman suurempi.

3.3 Päätaulut ja propulsio

MVDC-järjestelmän vikatapauksessa konvertterien DC-linkkien kapasitiivisuuden vuoksi vikavirtojen aikavakiot ovat erittäin lyhyet ja tällöin oikosulkuvirrat nousevat suuriksi erittäin nopeasti vian sattuessa. Tämä johtaa siihen, että vikat tulee hoitaa äärimmäisen nopeasti jotta vältetään konverttereiden tuhoutuminen. DC-vikavirran käyttäytymisen vuoksi tarvitaan puolijohteilla toimivia katkaisijoita ja nopeita sulakkeita jotka poistavat vikat mikrosekunneista

muutamisiin millisekunteihin. Nopeiden suojalaitteiden toiminta perustuu siihen, että viat saadaan katkaistua ennen vikaenergian nopeaa nousua, tämä johtaa suojalaitteiden koon merkittävään pienentymiseen. Vikavirran nopean katkaisun myötä johdinten poikki-pinnat voidaan mitoittaa pienemmiksi ja risteilyaluksen sähköverkossa esiintyvät vikatransientit pienenevät jolloin voimalaitoksen toimintavarmuus paranee ja kaapelointikustannukset pienenevät.

MVDC-järjestelmässä kaikki voimalaitoksessa tuotettava sähköteho tasasuunnataan joten konvertteritehoa tarvitaan enemmän kuin MVAC-järjestelmässä. Huomioitavaa on kuitenkin se, että myös MVAC-järjestelmässä suuri osa sähkötehosta tasasuunnataan propulsioon taajuusmuuttajissa, lisäksi esim. ilmastointijärjestelmän isot taajuusmuuttajaohjatut kompressorimootorit vaativat tasasuuntauksen. Mein Schiff 1 risteilyaluksen (Luku 4) MVAC-järjestelmässä 60% sähkötehosta tasasuunnataan laivan isoja taajuusmuuttajakäyttöjä (propulsio + ilmastointi) varten. Tasasuunnatun sähkötehon suuruus on kokonaisuudessaan jonkin verran isompi sillä risteilyaluksessa on huomattava määrä myös pienempiä taajuusmuuttajakäyttöjä esim. pumppuja ja tuulettimia varten.

MVDC-järjestelmässä tasasuuntaus on heti generaattorin jälkeen jolloin tasasuuntaajat voidaan asentaa päätauluhuoneeseen, tällöin laivan propulsiojärjestelmän taajuusmuuttajien tasasuuntaajayksikköjen sijainti muuttuu jolloin tilaa jää jo valmiiksi ahtaaseen paikkaan enemmän. Isojen sähkökuluttajien syöttämiseen (propulsio + ilmastointi) tarvittava konvertteriteho pysyy lähes samana MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä, MVDC-järjestelmässä taajuusmuuttajien sijoittelu vain muuttuu MVAC:hen verrattuna. MVDC-järjestelmän kompakti rakenne tarjoaa mahdollisuuden sijoittaa konvertterit joko hajautetusti tai keskitetysti, tällöin myös muidenkin kuin propulsioon taajuusmuuttajien tasasuuntaajayksiköt voidaan asentaa päätauluhuoneeseen tai mahdollisesti myös invertteri voidaan siirtää päätauluhuoneeseen. MVDC-järjestelmän pienempien johdinpoikki-pintojen, kompaktin rakenteen ja suojalaitteiden pienemmän koon vuoksi voidaan olettaa, että päätaulujen koko pienenee ja vapautuneen tilan myötä propulsiojärjestelmän sijoittelu helpottuu verrattuna MVAC-järjestelmään.

Kokonaisuuden kannalta katsottuna Mein Schiff 1 risteilyaluksen MVDC-järjestelmässä konvertteriteho lisääntyy n. 20 MW MVAC-järjestelmään verrattuna, eli ainakin saman sähkötehon verran kuin MVAC-risteilyaluksessa on suoraan AC-verkkoon kytkettyjä kuluttajia, näistä suuritehoisia ovat erityisesti sivu- ja keulathrusterit sekä ilmastoinnin kompressorimoottorit. MVDC-järjestelmässä tasasuuntaajien järjestely voidaan tehdä keskitetysti tai hajautetusti joten konvertteritehon sijaintia vain muutetaan paikasta toiseen vastaavasti myös yksittäisillä pienemmilläkin sähkönkuluttajilla: risteilyaluksen pienempiäkin induktiomootoreita ohjataan pääsääntöisesti paikallisesti taajuusmuuttajilla, elektroniset laitteet sisältävät hakkuriteholähteen, hotelli- ja valaistuskuormia on mahdollista muuttaa DC:ksi. Toki konverttereiden kokoluokat kasvavat pienjännitteisiin konverttereihin nähden tehonkin lisäksi, koska isommat jänniteluokat (> 10 kV) vaativat puolijohdekomponenttien sarjaan kytkentöjä. Vaikka asennetun konvertteritehon kustannukset kasvavat, niin toisaalta kaapeloinnin kustannukset tippuvat merkittävästi poikkipintojen ollessa jopa 40% pienempiä verrattuna AC-järjestelmään. Materiaalikustannusten lisäksi säästöä syntyy myös kaapelivetoon käytettävissä työtunneissa.

3.4 Keskijännitejakelu

Risteilyaluksen ilmastointijärjestelmässä on tyypillisesti 3-5 kompressorimoottoria (esim. 1 MW), moottorien määrä riippuu ilmastointijärjestelmän vaatimuksista ja sitä voidaan kasvattaa tai pienentää tarpeen mukaan. Kompressorimoottoreista esim. 1-2 voi olla taajuusmuuttajaohjattuja ja loput 11 kV verkkoon suoraan kytkeytyviä. MVDC-järjestelmässä jokaiselle ilmastoinnin kompressorimoottorille täytyy varata oma invertteri. Tilanteessa jossa esim. 1 moottori on taajuusmuuttajaohjattu ja 2 moottoria suoraan kytkettyjä 11 kV verkkoon, niin MVAC-järjestelmän vaatima taajuusmuuttaja (1 kpl) on parempi vaihtoehto verrattuna MVDC-järjestelmän inverttereihin (3 kpl) kun huomioidaan inverttereiden koko ja häviöteho. Tällöin voidaan luonnollisesti todeta, että komponenteilla kuten induktiomootorit jotka kytketään suoraan AC-verkkoon, MVAC-järjestelmän käyttö on järkevämpää laitteiston hinnan, koon ja häviötehon kannalta. Huomioitavaa on kuitenkin se, että sähkömoottorien ohjaus invertterin kautta saattaa olla tietyissä tapauksissa energiatehokkaampi vaihtoehto verrattuna suoraan sähköverkkoon kytkettyihin vakionopeudella pyöriiviin moottoreihin. MVDC-järjestelmän kannalta taas paksujen 11 kV kaapelien poikkipintojen pieneneminen

säästää merkittävästi kustannuksia ja helpottaa kaapelireittien suunnittelua ja kaapelien vetoa risteilyaluksen rakennusvaiheessa.

Keskijännitejakelun osalta MVDC:n hyödyllisin seikka on kaapelipoikkipintojen pieneneminen. Tällä on vaikutusta kaapelien kustannuksiin ja massaan, mutta se helpottaa myös merkittävästi paksujen 11 kV kaapelien vetämistä laivassa ja lisäksi se helpottaa hieman telakan kaapelireitityksen ja alueiden suunnittelua. DC-järjestelmän siirtohäviöt ovat pienemmät, jolloin polttoaineen kulutus voi pienentyä häviötehon verran ja lisäksi sillä on hieman vaikutusta myös ilmastoinnille aiheutuvaan lämpökuormaan. Propulsion osalta keula- ja sivuthrusterien moottorit syötetään MVAC-järjestelmässä suoraan keskijänniteverkosta (nopeuden säätö lapakulmien avulla), mutta MVDC-järjestelmässä ne vaativat omat invertterit (5 kpl) jotka nostavat kustannuksia. Generaattorin perään asennettava tasasuuntaaja kuitenkin nostaa kustannuksia merkittävästi verrattuna MVAC-järjestelmään.

3.5 Pienjännitejakelu

Pienjännitejakelu voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla: DC, AC tai hybridi. Hybridijärjestelmä toteutetaan syöttämällä paloalueen AC-virtakiskosta tasasuuntaajan kautta DC:llä esim. hyttikuluttajia ja akkujärjestelmiä, loput pienjännitekuluttajat syötetään AC:lla. Hyttien sähkökuluttajista merkittävä osa toimii jo muutenkin hakkuriteholähteellä jolloin ne hyödyntävät DC-tehoa, näitä ovat esimerkiksi matkapuhelimet latureineen, televisiot ja tietokoneet. Loputkin hyttien sähkökuluttajat kuten valaistus ja hiustenkuivaajat on mahdollista toteuttaa DC:nä. AC-virtakiskot ovat jo kompakti tapa siirtää paloalueella suuria virtoja (< 1000 A), joten ylimääräisten kaapelien vetäminen paloalueen syöttöasemalta DC-jakelua varten ei välttämättä ole järkevää.

Kokonaan AC:lla toteutetussa pienjännitejakelussa keskijännitteinen syöttö tehdään edelleen MVDC:llä, mutta jännite vaihtosuunnataan paloalueen syöttöasemalla ja tämän jälkeen vielä muunnetaan keskijännitteisestä pienjännitteiseksi.

MVDC-järjestelmien yhteydessä on puhuttu kirjallisuudessa SiC-perusteisten puolijohdemuuntajien käytöstä DC-jännitteiden tasojen muuntamiseen. Samalla pystytään

MVDC-verkko galvaanisesti erottamaan pienjännitteisestä DC-verkosta. Puolijohdemuuntajien hyötynä on lisäksi pienempi koko verrattuna perinteisiin matalataajuisiin muuntajiin. Puolijohdemuuntajat ovat edelleen kehitystyön alla. Puolijohdemuuntajien pienempää kokoa ei voida täysin katsoa MVDC-järjestelmän ominaishyödyksi, vastaavasti MVAC-verkossa voidaan käyttää puolijohdemuuntajia niiden mahdollisesti yleistyessä. MVDC-järjestelmän kannalta puolijohdemuuntajat ovat kuitenkin kompaktimpi ja energiatehokkaampi ratkaisu, koska ne vaativat invertterin ensiöön ja tasasuuntaajan toisioon. Vastaavasti MVAC-verkossa ne vaativat erilliset taajuusmuuttajat ensiö- ja toisiopuolille jotta verkon (60 Hz) taajuus saadaan vastaamaan puolijohdemuuntajan taajuutta, muuntamisen jälkeen taajuus muunnetaan taas takaisin 60 Hz:iin.

Pienjännitejakelujärjestelmässä on vähemmän suuria DC-linkkejä jolloin vikavirtojen aikavakiot ovat pidemmät. Tämän myötä DC-jakelussa on mahdollista käyttää hitaammin toimivia suojalaitteita kuten virranrajoittimia (engl. Fold-Back) tai DC-ilmakatkaisijoita. Virran rajoitukseen ja ilmakatkaisijoihin perustuvalla suojausmenetelmällä, on mahdollista toteuttaa pienjännitejakelu koko laivassa. Pienjännitejakelun toteutus DC:llä verrattuna AC-jännitteeseen säästää jopa yli 40% kaapelipoikkipinnoissa. Lisäksi DC-jännitteen käyttö mahdollistaa edullisemman rakenteen omaavien kaapeleiden käytön verrattuna monijohtimisiin kaksoissuojattuihin (engl. Double-Screened) kaapeleihin. DC:llä toteutetun pienjännitejakelun osalta kaapelipoikkipintojen pienentyminen (< 40%) ja painavista (11/0.69/0.4 kV, 60 Hz) muuntajista luopuminen ovat merkittävimmät seikat. Tällöin syöttöasemien tila- ja massavaraukset pienentyvät jolloin tilaa vapautuu laivan omistajalle tuottavaan toimintaan.

3.6 MVDC kustannusvaikutukset

Kustannusten suhteen ei ole olemassa tarkkaa tietoa miten komponenttien hinnat muodostuvat MVDC-järjestelmien mahdollisesti kaupallistuessa. Tietyissä tapauksissa MVDC-järjestelmän toteutus voi olla tulevaisuudessa kaupallisesti kannattavampi MVAC-järjestelmään nähden. Tämä johtuu siitä, että MVDC-järjestelmät ovat edelleen kehityksen asteella, mutta samaan aikaan myös tehoelektronisten komponenttien hinnat pienenevät ja teholuokat kasvavat. Kuitenkin huomioitavaa on, että AC- ja DC-järjestelmien yksittäisiä komponentteja ei voi verrata suoraan keskenään vaan tulee arvioida järjestelmän kokonaiskustannuksia. Vaikka

MVDC-järjestelmän rakenne sisältää vähemmän jännitteen muuntoasteita sekä jännitteen ja virran suuntausta niin tämä johtaa toisaalta tehoelektroniikan komponenttien suuriin tehojänniteluokkiin jolloin komponenttien rakenne on monimutkaisempi ja koko suurempi.

Edellä todettiin konvertteritehon nousevan Mein Schiff 1 MVDC-risteilyaluksessa n. 20 MW suuruudella. Olettaen konvertteritehon kustannukseksi jäähdytysjärjestelmiseen ja kokonaistoimituksineen 500 €/kW niin tämä tarkoittaa 10 M€ lisähintaa. Toisaalta MVDC-järjestelmän pienempi polttoaineenkulutus (5-10%) ja aikaisemmin mainitut järjestelmän pienemmät poikkipinnat, pienempi koko ja paino voivat johtaa merkittäviin kustannussäästöihin. Alaluvussa 4.3 risteilyaluksen polttoaineenkulutuksia laskettaessa, vuoden aikana saavutettava polttoainesäästö on noin 2.9 M€ kun raskaspolttoöljyn hinnaksi oletetaan 1 €/kg. Merkittävät säästöt operointikustannuksissa voidaan kuitenkin nähdä selkeänä hyötynä vaikka konvertteritehon kustannukset kasvavat.

Taulukko 4. MVDC kustannusvaikutus risteilyaluksen suunnitteluun ja operointiin.

	Kustannusvaikutus MVDC
Polttoaineenkulutus	↘
Massa ja tilavuus	↘
Suunnittelu	↗
Henkilökunnan koulutus	↗

Kustannusten suhteen mielenkiintoisimpia seikkoja MVDC-järjestelmässä ovat säästyneet polttoainekustannukset ja järjestelmän pienempi koko ja paino. Taulukossa 4 on vertailtu risteilyaluksen operointiin ja suunnitteluun liittyvää kustannusvaikutusta. Järjestelmän pienemmän koon myötä risteilyaluksen vapautunutta tilaa pystytään hyödyntämään laivan omistajalle tuottavaan toimintaan kuten hytteihin tai ravintoloihin. MVDC-järjestelmän suunnittelu vaatii enemmän aikaa toimittajilta ja telakalta, mutta toisaalta MVDC-teknologian hallitseminen luo telakalle kilpailuedun laivaprojektien myynissä. Laivan omistajalle lisäkustannuksia aiheutuu kun henkilökuntaa perehdytetään laivan operointia ja huoltoa varten.

Kustannusten laskennassa tulee tapauskohtaisesti arvioida kuinka paljon laitteiston pienentyneet kokoluokka vapauttaa lisää tilaa tuottavaan toimintaan. Yksittäisten painavien komponenttien kuten suurten matalataajuisten muuntajien poistuminen yksinkertaistaa runkosuunnittelua kun

rungon vahvikkeet voidaan mitoittaa pienempien massojen mukaan. Rungonkoontivaiheessa primäärivoimanlähteiden ja generaattorien pienempi koko helpottaa tuotannonsuunnittelua ja lohkoihin nostamista.

Pitkällä aikavälillä MVDC-järjestelmän hintakehityksellä on potentiaalia olla edullisempi teknologia. Kuten aikaisemmin todettiin niin MVAC-järjestelmä vaatii suuremman määrän passiivisia komponentteja (kuten muuntajat ja kaapelipoikkipinta) joiden materiaalien kustannukset noudattavat inflaation kehitystä kun taas MVDC-teknologia hyödyntää enemmän puolijohdeteknologiaa jonka kustannukset halpenevat pidemmällä aikavälillä.

Uuden teknologian yleistymiseksi sen pitää olla selkeästi ylivertainen nykyiseen teknologiaan nähden. Voidaan olettaa, että jotta MVDC-järjestelmät yleistyvät, niiden rakentamisen ja suunnittelun tulee olla hintaluokaltaan vastaavanlaiset MVAC-järjestelmän kanssa. Lopullinen päätös syntyy kokonaistoimittajilta saatujen tarjousten perusteella, koska telakan kannalta MVDC-järjestelmän lisäkustannukset liittyvät paljolti lisääntyneeseen koulutustarpeeseen joka kuitenkin jää kokonaisuuden kannalta pieneksi kustannukseksi, etenkin kun puhutaan sarjalaivasopimuksista.

Tarkempi teknistaloudellinen vertailu ja tuotto prosenttien taso riippuvat paljolti myös laivan tilaajan strategiasta, operointikokemuksesta, henkilökunnasta ja liiketoiminnan tavoitteista. Kuten edellä mainittua niin MVDC-järjestelmän pienemmän koon myötä vapautuu myös muita säästö- ja ansaintakohteita, mutta näiden yksityiskohtaisempi tarkastelu vaatisi erillistä selvitystä. MVDC-järjestelmä voi olla toteutukseltaan myös MVAC-järjestelmää kalliimpi, jos sen tuottamat teknistaloudelliset, imagolliset tai ympäristöön liittyvät seikat nähdään hyödyllisiksi myös pienemmällä marginaaleilla. Myös tiukentuvat päästörajat lisäävät MVDC-järjestelmän houkuttelevuutta. Lisäksi maapuolen MVDC-mikroverkkojen yleistymisen ja niistä saatavat positiiviset kokemukset saattavat tehdä risteilyalusten MVDC-järjestelmistä mielenkiintoisempia. Tällöin MVDC-järjestelmän hyödyt projektien myynnissä, risteilyaluksen rakennusvaiheessa ja operoinnissa voivat tulla riittävän mielenkiintoisiksi.

3.7 Yhteenveto

Taulukkoon 5 on koottu lyhyt yhteenveto MVDC-järjestelmän potentiaalisista tekijöistä ja haasteista järjestelmien vertailun ja kannattavuuden tarkastelun pohjalta. Kuten taulukosta nähdään niin MVDC-järjestelmän käyttöönoton suurimpana esteenä on kaupallisten suuritehoisten MVDC-komponenttien puute. Teknologian kehittyessä MVDC:llä on täysi potentiaali tulla risteilyaluksissa kaupallisesti toteutettavaksi vaihtoehdoksi MVAC:n sijaan.

Taulukko 5. MVDC-järjestelmävertailun ja kannattavuuden yhteenveto

Mahdollinen potentiaali	Haasteet
Suurten propulsiomuuntajien eliminointi	Lisääntynyt konverteriteho yli 20MW risteilyaluksessa
Generaattorien tahdistusjärjestelmän eliminointi	Invertterien välipiirien jännitekestoisuuden kasvattaminen
MVDC-tekniikan yleistyessä kustannusten pienentyminen	MVDC-suojausjärjestelmien kaupallinen saatavuus
Induktiomoottoreiden käyttö paremmalla hyötysuhteella invertteriin kytkettynä	Induktiomoottoria ei voi kytkeä suoraan sähköverkkoon
Vikavirtojen nopea pois kytkentä	Suuret ja nopean nousunopeuden omaavat vikavirrat DC-linkkien kapasitiivisuuden vuoksi
Taajuusmuuttajan yksinkertaisempi rakenne, tasasuuntaajayksikön sijainnin muuttumisen myötä	Suuret jännitemuunnokset ja galvaaninen erotus DC-DC konverttereilla
Suuren pyörimisnopeuden primäärivoimanlähteet ja generaattorit	Kaupallisten MVDC-konvertterien puute
Nykyisten polttomoottorien käyttö paremmalla hyötysuhteella	Suuritehoisten DC-DC-konvertterien puute
Kaasuturbiinien pienemmät päästöt	Kaasuturbiinien alhaisempi polttoainetehokkuus
Pienemmät kaapelipoikkipinnat	MVDC-tekniikan hidas kehittyminen ja komponenttien pienet volyymit saattavat johtaa korkeisiin kustannuksiin
Akkujärjestelmien energiatehokkaampi ja helpompi integrointi	Kannattamattomat investoinnit akkujärjestelmiin

4 TAPAUS

Jotta nykyisestä sähköjakelujärjestelmästä saadaan parempi käsitys ja teknologiapuutteet paikannettua, käytetään oikeaa Meyer Turun telakalla rakennettua laivaa referenssinä. Työssä tutkitaan vuonna 2018 Meyer Turun telakalta luovutetun Mein Schiff 1 (Kuva 28) risteilyaluksen sähköjakeluverkon toteuttamista MVDC-tekniikalla.



Kuva 28. Mein Schiff 1 risteilyalus.

Laivassa on käytössä diesel-sähköinen propulsiojärjestelmä. Voimalaitos on jaettu kahteen eri osaan jotka on sijoitettu kahteen eri vesitiiviiseen osioon. Voimalaitos koostuu kahdesta keskijännitteisestä päätaulusta joita syöttää neljä päägeneraattoria ja hätätilanteessa hätägeneraattorit. Laivassa on 4 kpl dieselmootoreita Wärtsilä 2x12V46F + 2x8L46F joiden yhteisteho on 48 MW. Sähköjakelujärjestelmän (MVAC) jännite on 11 kV ja sähköjakelujärjestelmän taajuus on 60 Hz. Normaalitylanteessa päägeneraattorit syöttävät

keskijännitepäätauluja (MSB1 & MSB2) jotka on kytketty keskenään yhteen kiskokatkaisijan (engl. Tie Breaker) kautta joten kaikki voimalaitoksen osat toimivat yhtenä keskitettynä voimalaitoksena. Normaalin toiminnan estyessä voimalaitos voidaan jakaa kahteen eri osaan jolloin toiminta jatkuu kahtena itsenäisenä yksikkönä.

Taulukko 6. Mein Shiff 1 risteilyaluksen olennaisimmat tiedot.

Käyttöönottovuosi	2018
bruttovetoisuus	111,554 GT
Dieselmootoreiden teho	48 MW
Propulsioteho	28 MW
Nopeus	22 solmua
Pituus	317,5 m
Leveys	35,8 m
Syväys	8,05 m
Kannet	16 kpl
Matkustajat	2894
Matkustajahytit	1447
Henkilökunta	1000

Laivan sähköteho tuotetaan neljällä päägeneraattorilla (G1-G4) jotka sijaitsevat kahdessa eri konehuoneessa. Generaattorit ovat 3-vaiheisia hiiliharjattomia itsemagnetoituvia synkronigeneraattoreita joissa on erillinen jänniteregulaattori asennettuna päätauluhuoneisiin. Generaattorin tähtipisteet on maadoitettu suuren vastuksen kautta. Generaattorit on tahdistettu samaan kiskoon jolloin niitä voidaan käyttää rinnakkain.

Taulukko 7. Mein Shiff 1 risteilyaluksen voimalaitoksen tiedot.

Dieselmoottorit	2 x 14.8 MW 2 x 9.6 MW
koko voimalaitoksen moottoriteho	48.8 MW
Synkronigeneraattorit (3 ~ 11 kV, 60 Hz)	2 x 15.18 MVA 2 x 10.15 MVA
nopeus dieselmoottorit	600 rpm
Tuotettu kokonaissähköteho	46.7 MW

4.1 Järjestelmän ja komponenttien valinnat

Seuraavissa alaluissa tehdään valinnat liittyen MVDC-järjestelmän verkon rakenteeseen ja erityisesti MVDC-järjestelmässä tarvittaviin komponentteihin.

4.1.1 Sähkönjakeluverkon rakenne

MVDC-järjestelmässä suositeltava ratkaisu on toteuttaa sähkönjakelujärjestelmä säteittäisesti jolloin sähköverkon rakenne on samankaltainen MVAC-järjestelmän kanssa, sekä se on toteutukseltaan yksinkertainen ja kustannustehokas. Tällöin järjestelmä on helpompi suunnitella ja helpompi laivan henkilökunnalle operoida, koska se muistuttaa rakenteeltaan enemmän jo käytössä olevaa MVAC-järjestelmää.

4.1.2 MVDC jännitetaso

Taulukoiden 1 ja 3 mukaisesti Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän jännitetasoksi valikoitui 11 kV MVDC-jännite. Tällöin poikkipinnat ovat alhaisemmat ja järjestelmän koko ja paino on pienempi verrattuna vastaavan jännitetason MVAC-järjestelmään. Huomioitavaa on, että lopullinen MVDC-jännitetaso määräytyy valitun generaattorin ulostulojännitteen mukaisesti, kuitenkin on hyvä tähdätä yli 10 kV tasasuunnatun jännitteen luokkaan jotta MVDC:n hyödyt realisoituvat täydessä mittakaavassa. Taloudellisin ratkaisu on käyttää sarjatuotannossa valmistettavia generaattoreita joiden tasasuunnatun ulostulojännitteen taso on halutussa suuruusluokassa.

4.1.3 LVDC jännitetaso

Eristyskoordinaatio, kytkinkomponenttien taloudellinen mitoitus ja hyvä suojaustaso huomioiden, on Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän 230 VAC pienjännitejakelun korvaavaksi tasoksi valittu ± 375 VDC bipolaarinen järjestelmä. Aikaisemmin 400 VAC kytketyt 3-vaiheiset taajuusmuuttajat kytketään inverttereinä ± 375 V jännitteisten plus- ja miinus-napojen välille 750 VDC jännitteeseen. Korvaavaksi jännitetasoksi 690 VAC jakelussa on valittu 1500 VDC (± 750 V), jolloin pienjännitestandardin puitteissa on mahdollista saavuttaa johtojen ja virtakiskojen täysi tehonsiirtokapasiteetti.

4.1.4 Tasasuuntaaja ja kytkentä

Vaikka eri tasasuuntaajatopologioita on mahdollista harkita, Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmään dioditasasuuntaaja vaikuttaa olevan paras vaihtoehto, koska sen käyttöä puoltaa useimmat seikat. DRU:t ovat jo nykyään käytössä kaupallisten alusten taajuusmuuttajissa ja niiden suunnittelusta ja käytöstä on paljon kokemusta. TRU:lla ei ole huomattavia etuja DRU:hun verrattuna ellei vikavirtojen rajoitus ole erityisen haluttu ominaisuus. ARU:t ja MMC:t ovat kaikkein edistyneimmät ratkaisut, mutta niiden kalliit hinnat eivät tuo riittäviä hyötyjä jotta investointi olisi houkutteleva. Vaikka DRU:lla ei ole mahdollisuutta tarkkaan ohjaukseen, niiden dynaaminen suorituskyky on erittäin hyvä ominaisuus laivasovelluksiin.

Kuitenkaan 6-pulssista tasasuuntaajaa ei ole hyödyllistä kytkeä suoraan tyypilliseen 3-vaiheiseen generaattoriin. Nykyisten puolijohteiden rajalliset jännitekestoisuudet vaativat useiden puolijohdekomponenttien kytkemistä sarjaan ja tämä lisää apuvirtapiirien kuten jännitevakavointipiirien ja vaimennuspiirien (Snubbers) monimutkaisuutta. 6-pulssisen tasasuuntaajan tehon laatu on myös suhteellisen alhainen. Vaikkakin se on yksinkertainen ja luotettava ratkaisu niin se ei tarjoa riittävää jännitteen skaalautuvuutta ja sen takia muita ratkaisuja on harkittava.

Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän jännitetasoksi on valittu sama jännitetaso kuin MVAC:lla eli 11 kV. Generaattorin ulostulojännite mitoitetaan sen suuruiseksi, että se on tasasuuntauksen jälkeen 11 kV, näin vältetään suurikokoisten muuntajien käytöltä ja saadaan minimoitua häviöitä. 11 kV:n MVDC-jännitteen tason saavuttamiseksi generaattorin MVAC-ulostulojännitteen pitää olla noin 7,8 kV kuten nähdään kaavoista 1, 2 ja 3. 6-pulssisesti tasasuunnatun jännitteen suuruus saadaan,

$$V_{do} \approx 1.35 * 7,8kV = 10,5 kV \quad (1)$$

MVDC-ulostulojännitteen tulisi sisältää mahdollisimman vähän rippeliä (engl. Ripple). Tämän takia suuri kondensaattori on kytketty suodattimeksi MVDC-puolelle. Tämä kondensaattori latautuu lähes MVAC-tulojännitteen huippuarvojen tasolle (Robinson et al, 1997). Kun kyseessä on 24-pulssinen tasasuuntaaja niin yhdessä MVDC-puolen suodatinkondensaattorin

kanssa tasasuunnatun MVDC-jännitteen keskiarvo V_{do} alkaa lähestyä generaattorin MVAC-jännitteen huippuarvoa joka saadaan laskettua,

$$V_{do} = \sqrt{2}V_{LL} \approx 1.414 * V_{LL} \quad (2)$$

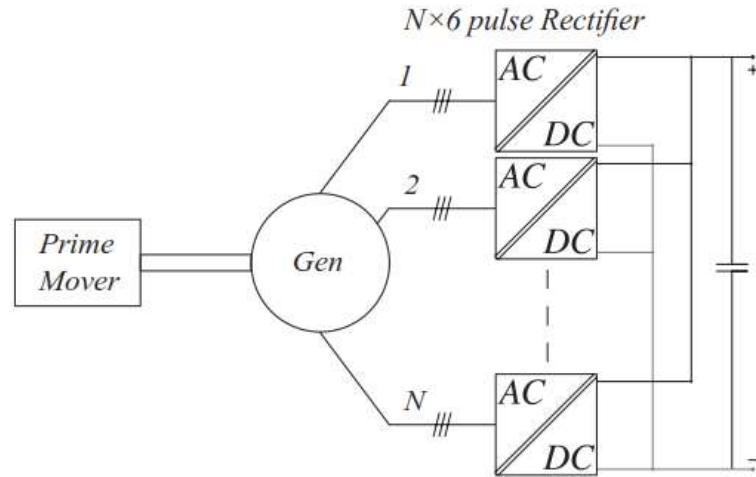
24-pulssisen tasasuuntaajan MVDC-jännite on generaattorin nimellisjännitteen mukaisesti laskettuna,

$$V_{do} \approx 1.414 * 7,8kV \approx 11 kV \quad (3)$$

Jotta 6-pulssisen tasasuuntaajan haittapuoliin löydetään ratkaisu, tulisi harkita 3-vaiheisia generaattoreita jotka sisältävät useamman setin 3-vaihekäämityksiä (engl. Multi-Phase Generator). Vastaavaa periaatetta on käytetty yleisimmin propulsiomoottoreissa, koska useampi setti 3-vaihekäämejä lisää järjestelmän redundanttisuutta. Kyseistä menetelmää ei ole käytetty MVAC-järjestelmissä generaattorien tahdistustarpeen vuoksi, mutta sillä on suuri potentiaali tulevaisuuden MVDC-järjestelmissä. Houkutteleva vaihtoehto on MPG:t kytkettynä useaan 6-pulssiseen DRU:hun. Monipulssiset DRU:t (Esim. 12, 18, 24-pulssia) riippuen järjestelmän jännite- ja tehovaatimuksista voitaisiin koostaa useista yksinkertaisista 6-pulssisista DRU-yksiköistä. Hyödyt käytettäessä monivaiheisia ja monipulssisia syöttöjä ovat: laadukas MVDC-jännite yksinkertaisella toteutuksella, monivaiheinen generaattori tietyin kriteerein korvaa monivaiheisen muuntaajan, parempi vikasietoisuus ja lisääntynyt järjestelmän redundanttisuus sekä nykyaikaista tehoelektroniikka pystytään hyödyntämään tehokkaammin. (Javaid, 2018) Edellä mainittu järjestelmän rakenne voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla (Kuva 29) ja (Kuva 32). Ensin tarkastellaan rinnankytkettyihin tasasuuntaajiin perustuvaa rakennetta.

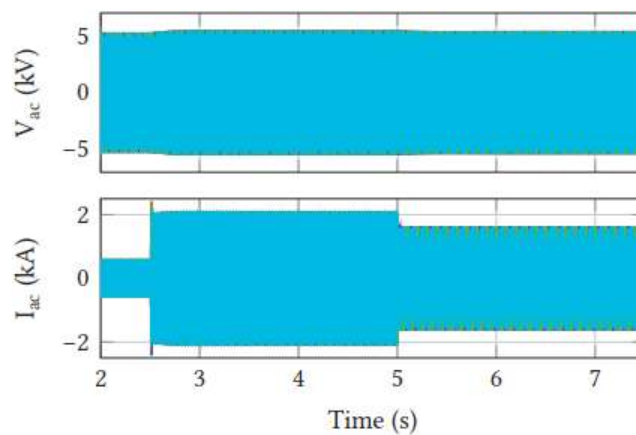
Generaattorin käämitysten $N \times 3$ -vaihetta täytyy kestää rinnan kytketyssä järjestelmässä täysi MVAC-puolen jännite joka Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän tapauksessa on 7,8 kV kun MVDC-puolen jännite on 11 kV. Kuten nähdään kuvasta 29, niin rinnan kytketyssä järjestelmässä jokaisen tasasuuntaajan tulee olla mitoitettu kestämään täysi MVDC-puolen jännite. Saatavilla olevien puolijohdekomponenttien (esim. 4,5 kV, 6,5 kV) takia 11 kV:n jännitteen synnyttämiseksi rinnankytketyssä toteutuksessa on tarpeellista kytkeä

puolijohdekomponentteja myös sarjaan, tarkoittaen myös vaimennuspiirejä ja jännitteen vakavointipiirejä (Javaid, 2018).

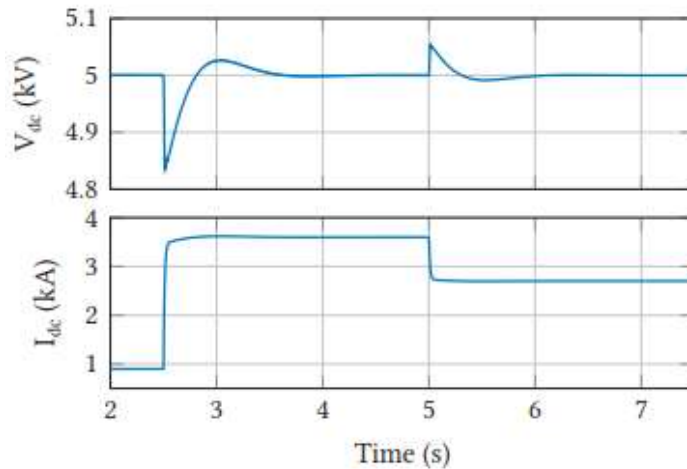


Kuva 29. Monipulssiset rinnankytketyt tasasuuntaajat. (Javaid, 2018, s.41)

Monipulssisten rinnankytkettyjen tasasuuntaajien suorituskykyä on tutkittu (Javaid, 2018, s. 45-48), tutkitun järjestelmän teho on 18 MW, AC-jännite (RMS) 3.7 kV, DC-jännite 5 kV ja tasasuuntaajajärjestelmän kokonaispulssiluku 12. Kuvissa 30 ja 31 on kyseessä tilanne jossa kuorma muutetaan 25%:sta 100%:iin 2.5 s kohdalla ja lasketaan takaisin 75%:iin 5 s kohdalla. Ainut ohjauslaite on generaattorin AVR joka korjaa jännitteen suuruutta. Kuten huomataan kuvasta 30 niin AC-puolen jännite pysyy tasaisena, virtapiikit pysyvät pieninä sekä virta seuraa nopeasti kuorman muutosta. Vastaavalla tavalla kuvasta 31 nähdään, että tasasuuntaajajärjestelmä on dynaaminen jolloin jännitevaihtelut pysyvät pieninä ja virta muuttuu nopeasti tehon mukana.



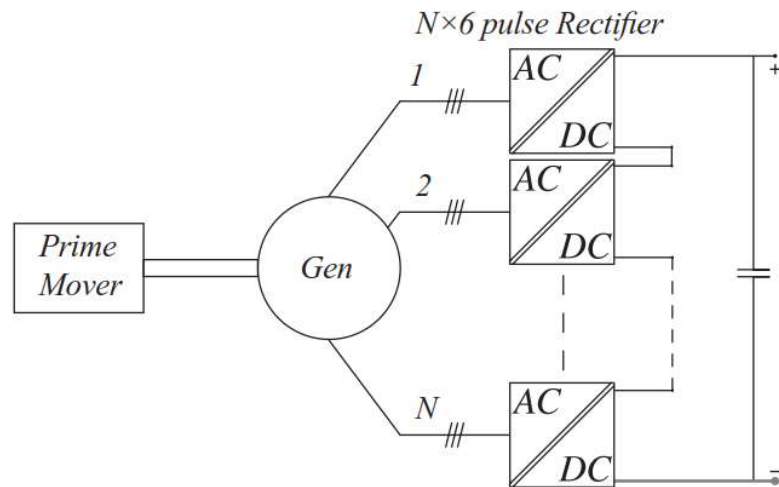
Kuva 30. DRU yksittäisen alimoduulin AC-puolen virta ja jännite. (Javaid, 2018, s. 46).



Kuva 31. Koko tasasuuntaajajärjestelmän DC-puolen virta ja jännite. (Javaid, 2018, s. 47).

Vaikka rinnankytketty järjestelmä takaa hyvän MVDC-syötön laadun, johtaa se lopulta tilanteeseen missä generaattorien ja moottorien jännitteet täytyy mitoittaa samansuuruisiksi. Oletus kyseisessä tapauksessa on, että moottorit (propulsio tai isot pumpput) on kytketty MVDC-jakelujärjestelmään oman erillisen invertterin kautta. Kuitenkin vian tapahtuessa joka johtaa yhden 3-vaiheisen käämisetin tai tasasuuntaajan menetykseen, systeemiä voidaan operoida edelleen vajaatehoisella käytöllä. Tämä tarkoittaa, että kaikkien kriittisten kuormien syöttöä jatketaan, mutta ei-tarpeelliset kuormat kytketään pois päältä. Tämä tekee monivaiheisista ja monipulssista rinnan kytketyistä tasasuuntaajista sopivia järjestelmiin joissa erityisesti suuri vikasietoisuus on tärkeää. Kuten aikaisemmin todettua niin vikatilanteessa MVDC-linkin kapasitiivisuuden vuoksi vikavirrat nousevat erittäin korkeiksi, tämän myötä monipulssisten rinnankytkettyjen DRU:den käyttö edellyttää nopeiden katkaisijoiden (esim. IGBT-katkaisija) kaupallistumista.

Monipulssisten sarjaan kytkettyjen tasasuuntaajien rakenne on esitetty kuvassa 32. Tasasuuntaajien sarjaan kytkentä alentaa puolijohteiden vaadittua jänniteluokkaa verrattuna rinnankytkettyyn tapaukseen, lisäksi näin vapautta järjestelmän optimointiin. Näin ollen laitteiden täytyy sietää pienempiä jännitteitä joka johtaa apuvirtapiirien kuten vaimentimien ja jännitteen vakavointipiirien vähenemiseen. Toinen saavutettava hyöty on lisääntynyt joustavuus optimoida ja valita jänniteluokkia generaattoreille ja moottoreille. Sarjaan kytketyssä järjestelmässä pienemmän jänniteluokan generaattorit kykenevät syöttämään suuremman jänniteluokan propulsiomooottoreita.



Kuva 32. Monipulssiset sarjaan kytketyt tasasuuntaajat. (Javaid, 2018, s.41)

Kuitenkaan sarjaan kytketty järjestelmä ei tarjoa redundanttisuutta ja yksittäisen tasasuuntaajan vikaantuessa koko syöttöketju menee luultavasti pois käytöstä. Vikaantuneen tasasuuntaajan ohittaminen tekee mahdolliseksi jatkaa järjestelmän käyttöä, mutta tällöin MVDC-järjestelmän jännite tippuu joten tämä on käytännön kannalta hankalaa.

Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän DRU:den kytkentätavaksi valitaan monipulssiset rinnan kytketyt DRU:t (Kuva 29), koska kyseisen ratkaisun tarjoama vikasietoisuus ja mahdollisuus operoida vajaalla teholla ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia risteilyaluksissa.

4.1.5 Maadoitus

Parhaimmat vaihtoehdot risteilyaluksen käyttötarkoituksen kannalta ovat maadoittamaton bipolaarinen järjestelmä (Kuva 18) ja bipolaarinen järjestelmä jossa on kiinteä maadoitus (Kuva 20). Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmään valitaan bipolaarinen järjestelmä jossa on kiinteä maadoitus, pienempi tarvittava eristystaso ja parempi toiminta hätätilanteessa tekee vaihtoehdosta paremman vaikka järjestelmän rakenne on monimutkaisempi.

4.1.6 Vikavirtasuojaus

Tällä hetkellä tehdään paljon tutkimusta ja prototyyppien testausta koskien MVDC-katkaisijoita. Kuitenkaan varteenotettavia MVDC-tekniikan kanssa yhteensopivia katkaisijoita laivakäyttöön ei ole kaupallisesti tarjolla. Laivojen MVDC-suojausjärjestelmät ovat vielä kehityksen asteella ja kaupallisia sovelluksia SSCB:stä tarvitaan. Kuitenkin Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmän oikosulkuvirtasuojaukseen SSCB vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta, kunhan ne tulevat kaupallisesti saataville. Pienjännitejakelella voidaan laajoilta osin hyödyntää jo nyt käytössä olevia DC-ilmakatkaisijoita, koska pienjännitepuolella ei ole vastaavia isoja DC-linkkejä kuin MVDC-puolella.

4.1.7 Galvaaninen erotus

SST on edelleen kehittyvä tekniikka josta ei ole kaupallisia sovelluksia saatavilla, mutta kaupallistuuessaan se vaikuttaa lupaavalta menetelmältä Mein Schiff 1 MVDC-risteilyaluksen galvaanisen erotuksen toteuttamista varten.

4.1.8 Kaapelit

Vaikka HVDC-kaapelit ovat jo vakiintuneet käyttöön sähkönsiirtojärjestelmissä, niin MVDC-kaapelit ovat tekniikka joka täytyy standardoida laivakäyttöön, ne eivät kuitenkaan ole esteenä MVDC:n yleistymiseen laivoissa vaan odottavat enemmän muiden MVDC-tekniikoiden kaupallistumista. Tämän vuoksi on odotettavissa, että vastaavia kaupallisesti saatavilla olevia MVAC-kaapeleita voidaan hyödyntää myös Mein Schiff 1 MVDC-järjestelmässä.

4.2 Sähköjakelejärjestelmien hyötysuhdevertailu MVAC-MVDC

Vertailtavana on Mein Schiff 1 MVAC- ja MVDC-sähköjakelejärjestelmien hyötysuhteet. Vertailu kohdistuu sähköjakelejärjestelmän suurimpiin tehonkuluttajiin, jolloin kaapelien ja pienempien kuluttajien tehohäviöt on jätetty huomioimatta, koska näillä ei ole lopputulokseen niin suurta merkitystä, kuitenkin niiden pois jättäminen yksinkertaistaa laskentaa.

MVAC-järjestelmän komponentti- ja kuormitustiedot perustuvat todellisen Mein Schiff 1 risteilyaluksen sähköjakelujärjestelmän tietoihin. MVDC-järjestelmä on rakennettu vastaamaan Mein Schiff 1 MVAC-järjestelmää mukaillen työssä ehdotettua MVDC-järjestelmän toteutustapaa. Hyötysuhdevertailun MVDC-järjestelmässä on käytössä kaasuturbiinit jolloin on mahdollista käyttää suuren pyörimisnopeuden ja hyvän hyötysuhteen omaavia kestromagneettisynkronigeneraattoreita.

Taulukossa 8 on eriteltyä sähkökomponenttien hyötysuhteet joita käytetään häviötehon laskennassa. Komponenttien hyötysuhteet muuttuvat todellisuudessa kuormituksen mukaisesti, mutta laskennan tarkkuuden kannalta on valittu käyttää samaa hyötysuhdetta kaikilla tehoalueilla. Lisäksi tutkittavissa tilanteissa kuormitukset liikkuvat riittävän lähellä komponenttien tehon nimellisarvoita, ettei yhden hyötysuhdearvon käyttämisestä aiheudu merkittävää virhettä. Laskennan tarkoituksena on myös havainnollistaa MVDC-sähköjakelujärjestelmän todellista toteutusta. Telakalla on myöhemmin mahdollista muokata häviötehon laskentataulukkoa käytettäväksi myös muilla kuormitustehon ja komponenttien hyötysuhteiden arvoilla.

Taulukko 8. Komponenttien hyötysuhteet häviötehon laskennassa.

Komponentti	Hyötysuhde
Synkronigeneraattori	97.7%
Kestomagneettisynkronigeneraattori	98%
Taajuusmuuttaja	97%
Sähkökoneet	97%
AC-muuntaja	98.6%
SiC DC-puolijohdemuuntaja	99%
Tasasuuntaaja	98%
Invertteri	98%
Sähkökeskukset	99.9%
AC-kompressorimoottori	95%

Taulukon 8 komponenteista kaikki muut paitsi SiC-perusteinen SST ovat käytössä jo tänä päivänä. SST:n suhteellisen korkean hyötysuhteen valinta perustuu simuloineilla ja prototyypeillä saavutettuun 99.17% hyötysuhteeseen (Rothmund et al., 2015, s. 1097).

Kuitenkin SST vaatii edelleen lisää tutkimusta ja käytännön testausta, laskennassa käytettävää hyötysuhdetta voidaan tarkentaa kun tietoa saadaan lisää useammasta lähteestä.

Tarkasteltaessa yksittäisiä sähkökuluttajia häviötehon suuruus saadaan laskettua kullekin komponentille hyötysuhteen perusteella,

$$P_{häviö.komp} = P_{komp} - P_{komp} * \frac{\eta_{komp}}{100 \%} \quad (4)$$

missä,

$P_{häviö.komp}$ = Komponentin häviöteho

P_{komp} = Komponentin pätöteho

η_{komp} = Komponentin hyötysuhde (%)

Laskentaa varten on tiedossa sähköjakelujärjestelmän kuormitustilanteet todelliselle Mein Schiff 1 MVAC-järjestelmälle. Laskennan yksinkertaistamiseksi voimalaitoksen ulostulopätöteho pidetään saman suuruisena MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä. MVDC-järjestelmän voimalaitoksessa aiheutuu enemmän tehohäviöitä tasasuuntauksen konvertteritehon myötä, tämän takia generaattorin akseliteho on mitoitettava suuremmaksi kuin MVAC-järjestelmässä jotta häviötehojen vähentämisen jälkeen voimalaitoksesta saadaan edelleen syötettyä sama sähkökuluttajien tarvitsema pätöteho. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että generaattorin akseliteho ja primäärivoimanlähteiden teho on suurempi MVDC-järjestelmässä vaikka risteilyaluksen sähköjakelujärjestelmän kuormitustilanne on sama. Tämän takia hyötysuhdelaskennassa käytetään MVAC- ja MVDC-järjestelmissä generaattorin akselitehona MVDC-järjestelmän tehoa, jotta tulokset ovat vertailukelpoiset keskenään. Sähköjakelujärjestelmän kokonaishyötysuhde suurimpien sähkökuluttajien osalta saadaan laskettua,

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{häviö}}{P_{gen}} \right) * 100 \% \quad (5)$$

missä,

η = Sähköjakelujärjestelmän kokonaishyötysuhde suurimpien sähkökuluttajien osalta (%)

$P_{häviö}$	=	Häviötehon suuruus
P_{gen}	=	Generaattorin akseliteho

Laskennan lähtötietona käytettävässä telakan energiatehokkuuslaskelmassa hätämuuntajien, konehuonemuuntajien, paloalue- ja keittiöjaketumuuntajien kuormitus on ilmoitettu näennäistehona joten niiden osalta pätötehon määrittämiseen käytetään tässä tapauksessa tehokerrointa 0.9. Pätöteho voidaan laskea kaavalla,

$$P = \cos\varphi * S \quad (6)$$

missä,

$\cos\varphi$	=	Tehokerroin
S	=	Näennäisteho

Propulsiomuuntajien, ilmastointimuuntajien sekä niistä syötettävien konverttereiden osalta ei ole kuormitustietoja käytettävissä, sähkökoneiden kuormitustiedot ovat tiedossa. Sähkökoneiden häviötehot on jo otettu energiatehokkuuslaskelmassa huomioon joten häviötehoa ei ole tarpeen laskea uudelleen mukaan. Tällöin muuntajan tai konvertterin pätötehon suuruus määritetään syötettävän sähkökoneen pätötehon, konvertterissa tapahtuvan häviötehon, ja muuntajan tapauksessa myös muuntajassa tapahtuvan häviötehon perusteella. Propulsion ja ilmastoinnin konverttereiden pätöteho voidaan määrittää,

$$P_{konv} = \frac{P_{sähkökone}}{\frac{\eta_{konv}}{100\%}} \quad (7)$$

missä,

$P_{sähkökone}$	=	Syötettävän sähkökoneen teho
η_{konv}	=	Konvertterin hyötysuhde (%)

Propulsion ja ilmastoinnin muuntajien pätötehot voidaan määrittää MVAC-järjestelmässä,

$$P_{muuntaja} = P_{häviö.mt} + P_{häviö.tamu} + P_{sähkökone} \quad (8)$$

missä,

$P_{häviö.mt}$	=	Muuntajan häviöteho
----------------	---	---------------------

$$\begin{aligned}
 P_{\text{häviö.tamu}} &= \text{Taajuusmuuttajan häviöteho} \\
 P_{\text{sähkökone}} &= \text{Syötettävän sähkökoneen teho}
 \end{aligned}$$

MVDC-järjestelmässä voidaan luopua painavista propulsio- ja ilmastointimuuntajista sekä taajuusmuuttajan tasasuuntaajyksikkö siirtyy heti generaattorin perään. MVDC-järjestelmän propulsio- ja ilmastoinnin konverttereiden teho määritetään invertterin häviötehon ja syötettävän sähkökoneen pätötehon mukaisesti,

$$P_{inv} = P_{\text{häviö.inv}} + P_{\text{sähkökone}} \quad (9)$$

Muiden kuluttajien osalta kuten päätaulut, hätätaulut ja sähkökoneet, lähtötiedoissa ilmoitettu teho on pätötehoa, joten tehokertoimen vaikutus on jo huomioitu, tällöin ne soveltuvat MVAC- ja MVDC-järjestelmien häviötehon laskentaan sellaisenaan. Keskusten ja muuntajien osalta tiedetään niiden perässä olevan pätötehon suuruus joten niiden kokonaisteho, häviöt mukaan lukien saadaan aikaisemmin todetulla periaatteella,

$$P_{kok} = \frac{P_{kuorma}}{\frac{\eta}{100\%}} \quad (10)$$

missä,

$$\begin{aligned}
 P_{kok} &= \text{Kokonaispätöteho} \\
 P_{kuorma} &= \text{Syötettävän kuorman pätöteho}
 \end{aligned}$$

4.2.1 Satamassa

Tarkasteltavassa tilanteessa Mein Schiff 1 risteilyalus on satamassa jolloin propulsiojärjestelmä on pois käytöstä, mutta muut järjestelmät kuten ilmastointi, keittiöt, valaistus ja aluksen apulaitteet ovat toiminnassa. Risteilyaluksen dieselgeneraattoreiden kuormitustilanne satamassa ollessa on nähtävissä taulukosta 9. Suurimmat sähkökuluttajat kyseisessä tilanteessa on merkitty MVAC-järjestelmän osalta taulukkoon 10 ja MVDC-järjestelmän osalta taulukkoon 11.

Taulukko 9. Voimalaitoksen tuotantotilanne satamassa ollessa.

Päägeneraattorit	Kytetty	Voimalaitoksen pätötehon tuotantokapasiteetti	Kuormitus	Pätötehon tuotanto
Iso (13,4 MW)	0 kpl	8,9 MW	66 %	5,9 MW
Pieni (8,9 MW)	1 kpl			

Risteilyaluksen ollessa satamassa propulsiojärjestelmän sähkökäytöt ja muuntajat eivät ole käytössä jolloin häviötehon suuruus jää pieneksi MVAC- ja MVDC-järjestelmissä. Suurimmat häviötehot aiheutuvat järjestelmien generaattoreissa ja MVDC-järjestelmässä voimalaitoksen tasasuuntaaja on iso häviötehon lähde. Muissa MVAC:n ja MVDC:n järjestelmien osioissa häviötehon suuruudet ovat samoissa suuruusluokissa keskenään ja eroa syntyy pääasiassa AC- ja DC-muuntajien hyötysuhteiden vaikutuksesta sekä ilmastoinnin kompressorimoottorien sähkökäyttöjen eroavaisuuksien myötä. MVAC-järjestelmässä on suoraan sähköverkkoon kytkettyjä ilmastoinnin kompressorimoottoreita ja yksi taajuusmuuttaja, MVDC-järjestelmässä taas kaikkia kompressorimoottoreita syötetään invertterin kautta jolloin häviötehoa aiheutuu hieman enemmän.

Taulukko 10. Mein Schiff 1 satamassa: MVAC-sähkönjakelujärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVAC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (Ulostulo sähköteho 5.9 MW)					
9111DG2 - Synkronigeneraattori (10,15 MVA)	11	6038,9	97,7	138,9	139
Keskijännitepäätaulut ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11	264,3	99,9	0,3	1
9131PS02 Päätaulu 2	11	540,5	99,9	0,5	
Pienjännitepäätaulut ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	519,4	98,6	7,3	35
9121T2 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	550,4	98,6	7,7	
9121T3 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	602,4	98,6	8,4	
9121T4 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	655,4	98,6	9,2	
MS01 Päätaulu	0,69	512,5	99,9	0,5	
MS02 Päätaulu	0,69	580,6	99,9	0,6	
MS03 Päätaulu	0,69	594,6	99,9	0,6	
MS04 Päätaulu	0,69	596,6	99,9	0,6	
Hätätaulut					
ES01 Hätätaulu	0,69/0,4	259,3	99,9	0,3	4
ES02 Hätätaulu	0,4	250,3	99,9	0,3	
9121ET1/ET2 - Häätämuuntaja 1&2 (600 kVA)	0,69/0,4	253,8	98,6	3,6	
Ilmastointi					
5441K504.2 - Muuntaja ilmastointikompressori 2 (1260 kVA)	11/0,71	288,6	98,6	4,0	53
5441K504.3 - Taajuusmuuttaja ilmastointikompressori 2	0,71	284,5	97	8,5	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	11	264,0	95	13,2	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	11	276,0	95	13,8	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	11	264,0	95	13,2	
Paloalue- ja keittiöjakelu					
9121T21 - Jakelumuuntaja MFZ1-2 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	479,2	98,6	6,7	34
9121T31 - Jakelumuuntaja MFZ3 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	274,7	98,6	3,8	
9121T41 - Jakelumuuntaja MFZ4 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	254,7	98,6	3,6	
9121T51 - Jakelumuuntaja MFZ5 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	330,4	98,6	4,6	
9121T61 - Jakelumuuntaja MFZ6 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	262,0	98,6	3,7	
9121T71 - Jakelumuuntaja MFZ7 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	345,9	98,6	4,8	
9121GT11 - Keittiö jakelumuuntaja 1 (1000 kVA)	11/0,4	127,8	98,6	1,8	
9121GT12 - Keittiö jakelumuuntaja 2 (1000 kVA)	11/0,4	388,8	98,6	5,4	
				Yhteensä kW:	266

Taulukko 11. Mein Schiff 1 satamassa: MVDC-sähkönjakelujärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVDC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (Ulostulo päätöteho 5.9 MW)					
9111DG2 - kestmagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	6143,3	98	122,9	243
9111RF2 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	6020,4	98	120,4	
Keskijännitepäätaulut ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11 DC	264,3	99,9	0,3	1
9131PS02 Päätaulu 2	11 DC	540,5	99,9	0,5	
Pienjännitepäätaulut ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	517,3	99	5,2	25
9121T2 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	548,2	99	5,5	
9121T3 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	600,0	99	6,0	
9121T4 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	652,7	99	6,5	
MS01 Päätaulu	0,75 DC	512,5	99,9	0,5	
MS02 Päätaulu	0,75 DC	580,6	99,9	0,6	
MS03 Päätaulu	0,75 DC	594,6	99,9	0,6	
MS04 Päätaulu	0,75 DC	596,6	99,9	0,6	
Hätätaulut					
ES01 Häätäulu	0,75 DC	259,3	99,9	0,3	3
ES02 Häätäulu	0,75 DC	250,3	99,9	0,3	
9121ET1/ET2 - Hätä DC-muuntajat 1&2 MF (600 kW)	0,75 DC	252,7	99	2,5	
Ilmastointi					
5441K501.1 - Invertteri ilmastointikompressori 1	11/7,8 DC-AC	269,4	98	5,4	57
5441K504.1 - Invertteri ilmastointikompressori 2	11/7,8 DC-AC	281,6	98	5,6	
5441K516.1 - Invertteri ilmastointikompressori 3	11/7,8 DC-AC	269,4	98	5,4	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	7,8 AC	264,0	95	13,2	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	7,8 AC	276,0	95	13,8	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	7,8 AC	264,0	95	13,2	
Paloalue- ja keittiöjakelu					
9121T21 - DC-jakelumuuntaja MFZ1-2 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	477,3	99	4,8	25
9121T31 - DC-jakelumuuntaja MFZ3 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	273,6	99	2,7	
9121T41 - DC-jakelumuuntaja MFZ4 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	253,6	99	2,5	
9121T51 - DC-jakelumuuntaja MFZ5 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	329,1	99	3,3	
9121T61 - DC-jakelumuuntaja MFZ6 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	260,9	99	2,6	
9121T71 - DC-jakelumuuntaja MFZ7 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	344,5	99	3,4	
9121GT11 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 1 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	127,3	99	1,3	
9121GT12 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 2 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	387,3	99	3,9	
Yhteensä kW:					354

Taulukosta 12 nähdään, että molempien järjestelmien hyötysuhteet ovat suhteellisen korkeat propulsiojärjestelmän ollessa poissa käytöstä. MVDC-järjestelmän suurempi konvertteriteho vaikuttaa merkittävästi siihen, että MVAC-järjestelmän hyötysuhde on parempi.

Taulukko 12. Mein Schiff 1 satamassa: MVAC- ja MVDC-sähkönjakelujärjestelmien hyötysuhteet.

	Generaattorin akseliteho (MW)	Häviöteho (MW)	Sähkönjakelujärjestelmän hyötysuhde (%)
MVAC	6,14	0,27	95,7
MVDC		0,35	94,2

4.2.2 Kesällä 16 solmun nopeudella

Tarkasteltavassa tilanteessa laiva kulkee kesällä 16 solmun nopeudella. Risteilyaluksen dieselgeneraattoreiden kuormitus tilanteessa on nähtävissä taulukosta 13. Suurimmat sähkönkuluttajat kyseisessä kuormitus tilanteessa on merkitty MVAC-järjestelmän osalta taulukkoon 14 ja MVDC-järjestelmän osalta taulukkoon 15.

Taulukko 13. Mein Schiff 1 kesällä 16 solmun nopeudella: voimalaitoksen tuotantotilanne.

Päägeneraattorit	Kytetty	Voimalaitoksen pätötehon tuotantokapasiteetti	Kuormitus	Pätötehon tuotanto
Iso (13,4 MW)	1 kpl	22,3 MW	77 %	17,1 MW
Pieni (8,9 MW)	1 kpl			

Taulukko 14. Mein Schiff 1 kesällä 16 solmun nopeudella: MVAC-sähkönjakelujärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVAC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (Ulostulo sähköteho 17,1 MW)					
9111DG1 - Synkronigeneraattori (15,18 MVA)	11	8751,3	97,7	201,3	403
9111DG4 - Synkronigeneraattori (10,15 MVA)	11	8751,3	97,7	201,3	
Keskijännitepäätaulut ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11	5295,7	99,9	5,3	783
9131PS02 Päätaulu 2	11	5572,0	99,9	5,6	
6222PT1 - Propulsiomuuntaja 1 (8050 kVA)	11/1,69	2627,7	98,6	36,8	
6222PT2 - Propulsiomuuntaja 2 (8050 kVA)	11/1,69	2627,7	98,6	36,8	
6222PT3 - Propulsiomuuntaja 3 (8050 kVA)	11/1,69	2627,7	98,6	36,8	
6222PT4 - Propulsiomuuntaja 4 (8050 kVA)	11/1,69	2627,7	98,6	36,8	
6222PT11 - Propulsio magn. muuntaja 1 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT12 - Propulsio magn. muuntaja 2 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT13 - Propulsio magn. muuntaja 3 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT14 - Propulsio magn. muuntaja 4 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PFC1 - Propulsio taajuusmuuttaja 1	1,69	2590,9	97	77,7	
6222PFC2 - Propulsio taajuusmuuttaja 2	1,69	2590,9	97	77,7	
6222PFC3 - Propulsio taajuusmuuttaja 3	1,69	2590,9	97	77,7	
6222PFC4 - Propulsio taajuusmuuttaja 4	1,69	2590,9	97	77,7	
6221PM1 - Propulsiomoottori 1 (Liukurengaskone 14 000 kW)	1,69	5026,4	97	150,8	
6221PM2 - Propulsiomoottori 2 (Liukurengaskone 14 000 kW)	1,69	5026,4	97	150,8	
Pienjännitepäätaulut ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	825,2	98,6	11,6	52
9121T2 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	857,1	98,6	12,0	
9121T3 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	916,4	98,6	12,8	
9121T4 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	897,3	98,6	12,6	
MS01 Päätaulu	0,69	813,8	99,9	0,8	
MS02 Päätaulu	0,69	821,8	99,9	0,8	
MS03 Päätaulu	0,69	904,9	99,9	0,9	
MS04 Päätaulu	0,69	834,8	99,9	0,8	
Hätätaulut					
ES01 Hätätaulu	0,69/0,4	315,3	99,9	0,3	4
ES02 Hätätaulu	0,4	254,3	99,9	0,3	
9121ET1/ET2 - Hätämuuntaja 1&2 (600 kVA)	0,69/0,4	257,4	98,6	3,6	
Ilmastointi					
5441K504.2 - Muuntaja ilmastointikompressori 2 (1260 kVA)	11/0,71	288,6	98,6	4,0	53
5441K504.3 - Taajuusmuuttaja ilmastointikompressori 2	0,71	284,5	97	8,5	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	11	264,0	95	13,2	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	11	276,0	95	13,8	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	11	264,0	95	13,2	
Paloalue- ja keittiöjakelu					
9121T21 - Jakelumuuntaja MFZ1-2 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	480,1	98,6	6,7	35
9121T31 - Jakelumuuntaja MFZ3 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	273,8	98,6	3,8	
9121T41 - Jakelumuuntaja MFZ4 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	252,8	98,6	3,5	
9121T51 - Jakelumuuntaja MFZ5 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	336,8	98,6	4,7	
9121T61 - Jakelumuuntaja MFZ6 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	260,1	98,6	3,6	
9121T71 - Jakelumuuntaja MFZ7 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	345,9	98,6	4,8	
9121GT11 - Keittiö jakelumuuntaja 1 (1000 kVA)	11/0,4	127,8	98,6	1,8	
9121GT12 - Keittiö jakelumuuntaja 2 (1000 kVA)	11/0,4	388,8	98,6	5,4	
				Yhteensä kW:	

Taulukko 15. Mein Schiff 1 kesällä 16 solmun nopeudella: MVDC-sähkönjakelujärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVDC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (Ulostulo sähköteho 17,1 MW)					
9111DG1 - kestomagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	8902,5	98	178,1	705
9111DG4 - Kestomagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	8902,5	98	178,1	
9111RF1 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	8724,5	98	174,5	
9111RF4 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	8724,5	98	174,5	
Keskijännitepäätaulu ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11 DC	5295,7	99,9	5,3	518
9131PS02 Päätaulu 2	11 DC	5572,0	99,9	5,6	
6222PFC1 - Propulsioinvertteri 1	11/7,8 DC-AC	2564,5	98	51,3	
6222PFC2 - Propulsioinvertteri 2	11/7,8 DC-AC	2564,5	98	51,3	
6222PFC3 - Propulsioinvertteri 3	11/7,8 DC-AC	2564,5	98	51,3	
6222PFC4 - Propulsioinvertteri 4	11/7,8 DC-AC	2564,5	98	51,3	
6221PM1 - Propulsiomoottori 1 (Kestomagneettikone)	7,8 AC	5026,4	97	150,8	
6221PM2 - Propulsiomoottori 2 (Kestomagneettikone)	7,8 AC	5026,4	97	150,8	
Pienjännitepäätaulu ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	821,8	99	8,2	38
9121T2 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	853,6	99	8,5	
9121T3 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	912,7	99	9,1	
9121T4 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	893,6	99	8,9	
MS01 Päätaulu	0,75 DC	813,8	99,9	0,8	
MS02 Päätaulu	0,75 DC	821,8	99,9	0,8	
MS03 Päätaulu	0,75 DC	904,9	99,9	0,9	
MS04 Päätaulu	0,75 DC	834,8	99,9	0,8	
Hätätaulut					
ES01 Häätäulu	0,75 DC	315,3	99,9	0,3	3
ES02 Häätäulu	0,75 DC	254,3	99,9	0,3	
9121ET1/ET2 - Hätä DC-muuntajat 1&2 MF (600 kW)	0,75 DC	256,4	99	2,6	
Ilmastointi					
5441K501.1 - Invertteri ilmastointikompressori 1	11/7,8 DC-AC	269,4	98	5,4	57
5441K504.1 - Invertteri ilmastointikompressori 2	11/7,8 DC-AC	281,6	98	5,6	
5441K516.1 - Invertteri ilmastointikompressori 3	11/7,8 DC-AC	269,4	98	5,4	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	7,8 AC	264,0	95	13,2	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	7,8 AC	276,0	95	13,8	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	7,8 AC	264,0	95	13,2	
Paloalue- ja keittiöjakelu					
9121T21 - DC-jakelumuuntaja MFZ1-2 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	478,2	99	4,8	25
9121T31 - DC-jakelumuuntaja MFZ3 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	272,7	99	2,7	
9121T41 - DC-jakelumuuntaja MFZ4 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	251,8	99	2,5	
9121T51 - DC-jakelumuuntaja MFZ5 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	335,5	99	3,4	
9121T61 - DC-jakelumuuntaja MFZ6 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	259,1	99	2,6	
9121T71 - DC-jakelumuuntaja MFZ7 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	344,5	99	3,4	
9121GT11 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 1 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	127,3	99	1,3	
9121GT12 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 2 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	387,3	99	3,9	
				Yhteensä kW:	1345

Propulsiojärjestelmän kasvanut tehontarve aiheuttaa suurimman muutoksen verrattuna voimalaitoksen tuotantotilanteeseen satamassa. Tällöin lisääntyneen tehon osuus tulee pääasiassa propulsiojärjestelmän käyttöön ja tämän myötä toinen isoista päägeneraattoreista kytketään verkkoon. MVDC-järjestelmän voimalaitoksen ja propulsiojärjestelmän yhteenlaskettu tehonkulutus on hieman suurempi MVAC:hen verrattuna, mutta puolijohteisten DC-muuntajien hyötysuhde on parempi AC-muuntajiin verrattuna joka tasoittaa häviötehon suuruutta järjestelmien välillä. Taulukosta 16 voidaan nähdä, että MVAC- ja MVDC-järjestelmien hyötysuhteet ovat lähes samalla tasolla, joten laskentatarkkuus huomioiden voidaan sanoa ettei järjestelmien välillä ole eroa.

Taulukko 16. Mein Schiff 1 kesällä 16 solmun nopeudella: MVAC- ja MVDC-sähkönjakelujärjestelmien hyötysuhteet.

	Generaattorin akseliteho (MW)	Häviöteho (MW)	Sähkönjakelujärjestelmän hyötysuhde (%)
MVAC	17,81	1,33	92,5
MVDC		1,35	92,4

4.2.3 Kesällä täydellä nopeudella

Tarkasteltavassa tilanteessa laiva kulkee kesällä täydellä nopeudella. Risteilyaluksen dieselgeneraattoreiden kuormitustilanne kyseisellä hetkellä on nähtävissä taulukosta 17. Suurimmat sähkökuluttajat kyseisessä kuormitustilanteessa on merkitty MVAC-järjestelmän osalta taulukkoon 18 ja MVDC-järjestelmän osalta taulukkoon 19.

Taulukko 17. Mein Schiff 1 kesällä täydellä nopeudella: voimalaitoksen tuotantotilanne.

Päägeneraattorit	Kytetty	Voimalaitoksen pätötehon tuotantokapasiteetti	Kuormitus	Pätötehon tuotanto
Iso (13,4 MW)	2 kpl	44,6 MW	86 %	38,5 MW
Pieni (8,9 MW)	2 kpl			

Taulukko 18. Mein Schiff 1 kesällä täydellä nopeudella: MVAC-sähköjaketeljärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVAC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (Ulostulo päätöteho 38.5 MW)					
9111DG1 - Synkronigeneraattori (15,18 MVA)	11	9851,6	97,7	226,6	906
9111DG2 - Synkronigeneraattori (10,15 MVA)	11	9851,6	97,7	226,6	
9111DG3 - Synkronigeneraattori (15,18 MVA)	11	9851,6	97,7	226,6	
9111DG4 - Synkronigeneraattori (10,15 MVA)	11	9851,6	97,7	226,6	
Keskijännitepäätaulut ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11	15238,8	99,9	15,2	2278
9131PS02 Päätaulu 2	11	16113,6	99,9	16,1	
6222PT1 - Propulsiomuuntaja 1 (8050 kVA)	11/1,69	7728,6	98,6	108,2	
6222PT2 - Propulsiomuuntaja 2 (8050 kVA)	11/1,69	7728,6	98,6	108,2	
6222PT3 - Propulsiomuuntaja 3 (8050 kVA)	11/1,69	7728,6	98,6	108,2	
6222PT4 - Propulsiomuuntaja 4 (8050 kVA)	11/1,69	7728,6	98,6	108,2	
6222PT11 - Propulsio magn. muuntaja 1 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT12 - Propulsio magn. muuntaja 2 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT13 - Propulsio magn. muuntaja 3 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PT14 - Propulsio magn. muuntaja 4 (400 kVA) + tasasuuntaus	0,69/1,69	76,5	96	3,1	
6222PFC1 - Propulsio taajuusmuuttaja 1	1,69	7620,4	97	228,6	
6222PFC2 - Propulsio taajuusmuuttaja 2	1,69	7620,4	97	228,6	
6222PFC3 - Propulsio taajuusmuuttaja 3	1,69	7620,4	97	228,6	
6222PFC4 - Propulsio taajuusmuuttaja 4	1,69	7620,4	97	228,6	
6221PM1 - Propulsiomoottori 1 (Liukurengaskone 14 000 kW)	1,69	14783,5	97	443,5	
6221PM2 - Propulsiomoottori 2 (Liukurengaskone 14 000 kW)	1,69	14783,5	97	443,5	
Pienjännitepäätaulut ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	941,1	98,6	13,2	59
9121T2 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	973,0	98,6	13,6	
9121T3 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	1022,3	98,6	14,3	
9121T4 - Konehuonemuuntaja (2250 kVA)	11/0,69	994,0	98,6	13,9	
MS01 Päätaulu	0,69	928,9	99,9	0,9	
MS02 Päätaulu	0,69	997,0	99,9	1,0	
MS03 Päätaulu	0,69	1009,0	99,9	1,0	
MS04 Päätaulu	0,69	930,9	99,9	0,9	
Hätätaulut					
ES01 Hätätaulu	0,69/0,4	318,3	99,9	0,3	4
ES02 Hätätaulu	0,4	254,3	99,9	0,3	
9121ET1/ET2 - Häätämuuntaja 1&2 (600 kVA)	0,69/0,4	257,4	98,6	3,6	
Ilmastointi					
5441K504.2 - Muuntaja ilmastointikompressori 2 (1260 kVA)	11/0,71	913,8	98,6	12,8	128
5441K504.3 - Taajuusmuuttaja ilmastointikompressori 2	0,71	901,0	97	27,0	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	11	440,0	95	22,0	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	11	874,0	95	43,7	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	11	440,0	95	22,0	
Paloalue- ja keittiöjaku					
9121T21 - Jakelumuuntaja MFZ1-2 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	569,6	98,6	8,0	44
9121T31 - Jakelumuuntaja MFZ3 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	313,1	98,6	4,4	
9121T41 - Jakelumuuntaja MFZ4 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	291,2	98,6	4,1	
9121T51 - Jakelumuuntaja MFZ5 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	442,7	98,6	6,2	
9121T61 - Jakelumuuntaja MFZ6 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	355,1	98,6	5,0	
9121T71 - Jakelumuuntaja MFZ7 (1700 kVA)	11/0,69/0,4	486,5	98,6	6,8	
9121GT11 - Keittiö jakelumuuntaja 1 (1000 kVA)	11/0,4	168,0	98,6	2,4	
9121GT12 - Keittiö jakelumuuntaja 2 (1000 kVA)	11/0,4	529,4	98,6	7,4	
				Yhteensä kW:	3419

Taulukko 19. Mein Schiff 1 kesällä täydellä nopeudella: MVDC-sähkönjakelujärjestelmän suuritehoisimpien komponenttien tehohäviöt.

Järjestelmä ja komponentit	Jännite (kV)	Teho (kW)	MVDC Hyötysuhde (%)	Häviöteho (kW)	Häviöt Total (kW)
Voimalaitos (sähköteho 38.5 MW)					
9111DG1 - kestmagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	10021,9	98	200	1587
9111DG2 - kestmagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	10021,9	98	200	
9111DG3 - kestmagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	10021,9	98	200	
9111DG4 - Kestomagneettisynkronigeneraattori (12 MW)	7,8 AC	10021,9	98	200	
9111RF1 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	9821,4	98	196	
9111RF2 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	9821,4	98	196	
9111RF3 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	9821,4	98	196	
9111RF4 - Tasasuuntaaja (12 MW)	7,8/11 AC-DC	9821,4	98	196	
Keskijännitepäätaulut ja propulsio					
9131PS01 Päätaulu 1	11 DC	15238,8	99,9	15	1522
9131PS02 Päätaulu 2	11 DC	16113,6	99,9	16	
6222PFC1 - Propulsioinvertteri 1	11/7,8 DC-AC	7542,6	98	151	
6222PFC2 - Propulsioinvertteri 2	11/7,8 DC-AC	7542,6	98	151	
6222PFC3 - Propulsioinvertteri 3	11/7,8 DC-AC	7542,6	98	151	
6222PFC4 - Propulsioinvertteri 4	11/7,8 DC-AC	7542,6	98	151	
6221PM1 - Propulsiomoottori 1 (Kestomagneetikone)	7,8 AC	14783,5	97	444	
6221PM2 - Propulsiomoottori 2 (Kestomagneetikone)	7,8 AC	14783,5	97	444	
Pienjännitepäätaulut ja konehuonemuuntajat					
9121T1 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	937,3	99	9	43
9121T2 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	969,1	99	10	
9121T3 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	1018,2	99	10	
9121T4 - Konehuoneen DC-muuntaja MF (2000 kW)	11/0,75 DC	990,0	99	10	
MS01 Päätaulu	0,75 DC	928,9	99,9	1	
MS02 Päätaulu	0,75 DC	997,0	99,9	1	
MS03 Päätaulu	0,75 DC	1009,0	99,9	1	
MS04 Päätaulu	0,75 DC	930,9	99,9	1	
Hätätaulut					
ES01 Häätätaulu	0,75 DC	321,2	99	3	8
ES02 Häätätaulu	0,75 DC	256,6	99	3	
9121ET1/ET2 - Hätä DC-muuntajat 1&2 MF (600 kW)	0,75 DC	256,4	99	3	
Ilmastointi					
5441K501.1 - Invertteri ilmastointikompressori 1	11/7,8 DC-AC	449,0	98	9	123
5441K504.1 - Invertteri ilmastointikompressori 2	11/7,8 DC-AC	891,8	98	18	
5441K516.1 - Invertteri ilmastointikompressori 3	11/7,8 DC-AC	449,0	98	9	
5441K501 - Ilmastointikompressori 1	7,8 AC	440,0	95	22	
5441K504 - Ilmastointikompressori 2	7,8 AC	874,0	95	44	
5441K516 - Ilmastointikompressori 3	7,8 AC	440,0	95	22	
Paloalue- ja keittiöjakelu					
9121T21 - DC-jakelumuuntaja MFZ1-2 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	567,3	99	6	31
9121T31 - DC-jakelumuuntaja MFZ3 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	311,8	99	3	
9121T41 - DC-jakelumuuntaja MFZ4 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	290,0	99	3	
9121T51 - DC-jakelumuuntaja MFZ5 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	440,9	99	4	
9121T61 - DC-jakelumuuntaja MFZ6 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	353,6	99	4	
9121T71 - DC-jakelumuuntaja MFZ7 MF (1600 kW)	11/0,75 DC	484,5	99	5	
9121GT11 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 1 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	167,3	99	2	
9121GT12 - Keittiö DC-jakelumuuntaja 2 MF (1000 kW)	11/0,75 DC	527,3	99	5	
				Yhteensä kW:	3316

Risteilyaluksen kulkiessa täydellä nopeudella kesäolosuhteissa propulsiojärjestelmän ja ilmastoinnin häviötehon suuruus kasvaa verrattuna tilanteeseen kesällä 16 solmun nopeudella. Vastaavasti myös sähköjakelujärjestelmien hyötysuhteet ovat alhaisemmat, koska konvertteritehoa käytetään suhteessa enemmän voimalaitoksen kokonaistehoon (Taulukko 20), mutta selkeää eroa järjestelmien välille ei synny.

Taulukko 20. Mein Schiff 1 kesällä täydellä nopeudella: MVAC- ja MVDC-sähköjakelujärjestelmien hyötysuhteet.

	Generaattorin akseliteho (MW)	Komponenttien häviöteho (MW)	Sähköjärjestelmän hyötysuhde (%)
MVAC	40,09	3,42	91,5
MVDC		3,32	91,7

4.2.4 Yhteenveto

Sähköjakelujärjestelmän hyötysuhde on MVAC- ja MVDC-järjestelmissä heikompi tilanteessa joissa erityisesti kasvaneen propulsiotehon myötä voimalaitoksen tuottamasta sähkötehosta suurempi suhteellinen osuus käytetään propulsiojärjestelmän konverttereissa. Tilanteessa jossa koko sähköjärjestelmä mallinnettaisiin, niin kokonaishyötysuhde olisi taulukoissa 12, 16 ja 20 saatuja arvoja alhaisempi, koska voimalaitoksen kuormitustilanne olisi edelleen sama, mutta häviötehon lähteitä tulisi lisää. Energiatuhokkuuksien vertailussa ei ole otettu kaapeleita huomioon, MVDC-järjestelmässä on pienemmät siirtohäviöt jolloin MVDC-järjestelmä saisi pientä etua otettaessa kaapelit mukaan häviötehon laskentaan. Lasketut arvot kuitenkin toimivat viitteinä vertailtaessa MVAC- ja MVDC-sähköjakelujärjestelmien energiatahokkuuksia keskenään.

4.3 Polttoaineenkulutus

Mein Schiff 1 MVAC- ja MVDC-järjestelmien polttoaineen vertailulaskentaa varten on valittu risteilyaluksessa jo olemassa olevat dieselmoottorit (Kuva 33) Wärtsilä 46F (2 x 14.8 MW ja 2 x 9.6 MW, 600 rpm). Polttoaineenkulutuksen laskennassa ei huomioida sähköjärjestelmän

häviötehon suuruutta, eli laskenta perustuu kiinteällä ja vaihtelevalla taajuudella pyörivien dieselmootoreiden polttoaineenkulutuksen vertailuun.



Kuva 33. Mein Schiff 1 risteilyaluksessa käytettävä Wärtsilä 46F 4-tahtimootori (saatavuus: 7.2 MW – 19.2 MW) joka toimii HFO:lla, MDO:lla tai kevyellä polttoöljyllä. (Wärtsilä, 2021)

Laivan operointiprofiililla on suuri merkitys kulutetun polttoaineen suuruuteen. Polttoaineen kulutuksen laskennan tarkkuus riippuu siitä miten hyvin SFOC-arvo pystytään arvioimaan kullakin kuormitushetkellä. Tässä työssä laskentaa varten on käytössä kuva (26) SFOC-arvot joiden perusteella pystytään arvioimaan polttoaineen kulutusta kullakin tehoalueella. Laivan hetkellinen polttoaineenkulutus voidaan laskea kaavalla:

$$m_{\text{polttoaine}} = \text{SFOC} * P \quad (11)$$

missä,

$m_{\text{polttoaine}}$	=	polttoaineen massavirta
SFOC	=	moottorin polttoainetehokkuus
P	=	moottorin teho

AC-järjestelmässä dieselmoottorin SFOC-arvo (g/kWh) suurenee merkittävästi kun dieselmoottoria käytetään epäoptimaalisella pyörimisnopeudella kuormitustilanteeseen nähden. Tällöin polttoainetta joudutaan käyttämään suurempi määrä verrattuna tilanteeseen jossa dieselmoottoria käytetään optimikierronnopeudella kuormitustilanteeseen nähden. Mein Schiff 1 risteilyaluksen voimalaitos koostuu 2 x 14.4MW + 2 x 9.6MW dieselmoottoreista. Laskentaa varten laivan voimalaitoksen katsotaan koostuvan neljästä yhtä suuresta 12 MW moottorista, jolloin voimalaitoksen kokonaisteho pysyy samana, mutta tehonjako yksinkertaistuu. Taulukossa 21 on esitetty miten SFOC-arvo käyttäytyy eri kuormitusalueilla, vastaavia arvoja käytetään tässä työssä polttoaineen kulutuksen laskennassa.

Taulukko 21. Yksittäisen dieselmoottorin (12 MW) SFOC-arvo kuormitustilanteen mukaisesti.

		MVAC-järjestelmä	MVDC-järjestelmä
Kuorma (%)	Kuorma (kW)	SFOC (g/kWh)	SFOC (g/kWh)
10	1,2	280	200
20	2,4	240	195
30	3,6	220	192
40	4,8	205	188
50	6	198	182
60	7,2	188	180
70	8,4	185	180
80	9,6	182	182
90	10,8	185	185
100	12	190	190

Kuten edellä todettua niin voimalaitoksen kokonaisteho jaetaan tasan kaikkien dieselmoottoreiden välillä jotta tehonjako yksinkertaistuu,

$$P_m = \frac{P_{tot}}{n_m} \quad (12)$$

missä,

P_m = yksittäisen moottorin nimellisteho

P_{tot} = voimalaitoksen kokonaisteho

n_m = voimalaitoksen dieselmoottoreiden määrä

Lasketaan voimalaitoksen kuormituksen suuruus valitulla operointitasolla,

$$P_{vk} = \frac{k}{100 \%} * P_{tot} \quad (13)$$

missä,

P_{vk} = voimalaitoksen teho kullakin kuormitusalueella
 k = kuormituksen suuruus koko voimalaitoskapasiteetista (%)

Yksittäisen moottorin kunkin kuormitustilanteen teho saadaan selvitettyä tehonjaon mukaisesti jakamalla voimalaitoksen hetkellisen kuormituksen suuruus kytkettyjen generaattoreiden määrällä,

$$P_{mk} = \frac{P_{vk}}{n_g} \quad (14)$$

missä,

P_{mk} = yksittäisen moottorin teho kullakin kuormitusalueella
 n_g = käynnissä olevien dieselmoottorien määrä

Vuosittainen polttoaineenkulutus saadaan hyödyntäen MVAC:n ja MVDC:n SFOC-arvoja (g/kWh),

$$FC_k = t_k * n_g * P_{mk} * SFOC_k \quad (15)$$

missä,

FC_k = kuormitusalueen polttoaineenkulutus vuodessa
 t_k = kuormitusalueen operointiaika vuodessa
 $SFOC_k$ = kuormitusalueen SFOC-arvo (MVAC tai MVDC)

Järjestelmien MVAC ja MVDC polttoaineen vuosikulutuksen suhteellinen ero saadaan määritettyä,

$$\Delta FC = 100 * \left(1 - \frac{FC_{MVDC}}{FC_{MVAC}}\right) \quad (16)$$

missä,

$$\Delta FC = \text{polttoaineen kulutuksen prosentuaalinen muutos MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä}$$

$$FC_{MVDC} = \text{Vuosittainen polttoaineenkulutus MVDC-järjestelmällä}$$

$$FC_{MVAC} = \text{Vuosittainen polttoaineenkulutus MVAC-järjestelmällä}$$

Risteilyalukselle on laadittu polttoaineen laskentaa varten kuvitteellinen kuormitusprofiili. Taulukosta (22) selviää laivan kuormituksen suuruus, operointiaika kullakin kuormitusalueella, dieselmoottoreiden teho ja kuormituksen jako, polttoaineen kulutus MVAC- ja MVDC-järjestelmissä sekä MVDC-järjestelmällä saavutettava polttoaineen säästö. Vuoden operointiajasta (8760 h) 15% vietetään satamassa jolloin Mein Schiff 1 risteilyaluksen kuormitus on noin 13 % koko voimalaitoksen tehosta, muilla kuormitusalueilla risteilyalus on liikkeessä.

Taulukko 22. Risteilyaluksen MVAC- ja MVDC-järjestelmien polttoaineenkulutuksen vertailu.

Risteilyaluksen kuormitusprofiili				Kuormituksen jako moottori				Polttoaineenkulutus		Polttoaineen säästö MVDC	
Kuorma (%)	Kuorma (MW)	Op. aika (%)	Op. aika (h/a)	PG1 (MW)	PG2 (MW)	PG3 (MW)	PG4 (MW)	MVAC (tonnia/a)	MVDC (tonnia/a)	(tonnia/a)	(%)
13	6,2	15	1314	6,2				2214	1623	590	27
20	9,6	10	876	9,6				2018	1640	378	19
30	14,4	30	2628	7,2	7,2			8326	7266	1060	13
50	24	15	1314	12	12			6244	5740	505	8
60	28,8	20	1752	9,6	9,6	9,6		9486	9082	404	4
80	38,4	10	876	9,6	9,6	9,6	9,6	6122	6122	0	0

Polttoaineenkulutuksen pienentyminen MVDC-järjestelmällä on erityisen huomattavaa kun voimalaitoksen kuormitus on 50 % tai vähemmän. Tilanteessa jossa risteilyaluksen kuormitusprofiili ja operointiaika painottuu voimalaitoksen nimellistehon alapäähän, niin MVDC-järjestelmällä saavutettavat hyödyt ovat merkittävämpiä.

Eri kuormitusalueilla laskettujen polttoaineenkulutuksen säästöjen perusteella on esitettyä taulukossa 23 MVDC-järjestelmällä saavutettava vuotuinen säästö. Taulukosta nähdään, että valitulla kuormitusprofiililla MVDC-järjestelmän vuotuisesti polttoainesäästöksi tulee 2937 tonnia joka tarkoittaa 8.5 % vuotuista säästöä verrattuna perinteiseen MVAC-järjestelmään.

Taulukko 23. Risteilyaluksen MVAC- ja MVDC-järjestelmien vuosittaisen polttoaineenkulutuksen vertailu.

Polttoaineenkulutus		Polttoaineen säästö MVDC	
MVAC (tonnia/a)	MVDC (tonnia/a)	(tonnia/a)	(%)
34410	31473	2937	8,5

4.4 Päästöt

Kirjallisuudessa on kaksi eri tapaa laivojen päästöjen arvioimiseksi. Ensimmäinen perustuu energian käyttöön perustuvaan arviointiin (Jun et al., 2001) ja toinen polttoaineen kulutukseen perustuvaan arviointiin (Trozzi, 2010). Päästöjen laskenta on esitetty kahdella eri tavalla (17) ja (18),

$$E_i = \sum[(P_j)(LF_j)(A_j)(EF_{ij})] \quad (17)$$

missä,

i	=	paakokaasun tyyppi
j	=	moottorin numero
E_i	=	päästön määrä (g)
P	=	moottorin nimellisteho
LF	=	kuormituskerroin %
A	=	aika (h)
EF	=	emissiokerroin (g/kWh)

Käytettäessä energian käyttöön perustuvaa kaavaa (17) MVAC- ja MVDC-järjestelmien kanssa, järjestelmien välillä ei synny eroa joten päästöjen kannalta lopputulos on sama. Tämän takia tässä työssä päästöt lasketaan polttoaineenkulutuksen mukaan. Käytettäessä jo edellä laskettuja polttoaineenkulutuksen lukemia, päästöt voidaan laskea,

$$E_i = \sum[(EF_{ijkl})(FC_i)] \quad (18)$$

missä,

i	=	paakokaasun tyyppi
-----	---	--------------------

j	=	moottorin numero
k	=	polttoaineen tyyppi
l	=	moottorin tyyppi
EF	=	emissiokerroin (g/MJ tai g/kg polttoaineenkulutus)

Pakokaasupäästöt voidaan selvittää aikaisemmin laskettujen polttoaineen kulutuksen tietojen perusteella,

$$E_{ia} = EF * FC_a \quad (19)$$

missä,

a = vuosittainen arvo

Vuosittaiset pakokaasupäästöt molemmille järjestelmille operointiprofiilin mukaisesti on esitetty taulukossa 24. Taulukossa esitetyt päästökertoimet RFO:n merkittävimmille kaasuille NO_x, SO₂ ja CO₂ on tehty seuraavien olettamuksien mukaisesti:

1. NO_x: Lloyd rekisterin raportoimat emissiokertoimet keskinopeille dieselmoottoreille (Lloyd's Register, 1999) tai olemassaolevat oletus päästökertoimet perustuen Tier 2 tulkintaan *IPCC Guidelines for the ocean-going ships consuming residual fuel oil (RFO)* (IPCC, 1996).
2. SO₂: 2.7% (keskimääräiset) RFO:n rikkipitoisuudet; 97.753% polttoaineen rikistä konvertoitu SO₂:ksi (US EPA, 2009); ja SO₂ molekyyli­massa on kaksi kertaa rikin paino.
3. CO₂: Hiilen sisältökerroin on 21.1 g hiiltä/MJ; RFO netto kaloriarvo 40.19 Tj/Gg (IPCC, 1996); ja CO₂ molekyyli­massa on (44/12) kertaa hiilen paino.

Taulukko 24. Merkittävimpien pakokaasujen emissiokertoimet ja vuosittaiset päästöt.

Pakokaasun tyyppi	Emissiokerroin (g/kg)	Päästöt (tonnia/a)	
		MVAC	MVDC
NO _x	87	2994	2738
SO ₂	52,787	1816	1661
CO ₂	3109	106981	97851

Pakokaasupäästöt on laskettu dieselmootoreiden polttoaineenkulutuksen perusteella joten kukin päästö laskee saman määrän kuin polttoaineenkulutus eli 8.5% MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

MVDC-järjestelmän toteutuksen esteeksi muodostui kaupallisten sovellusten puuttuminen. Siemens ja ABB ovat toimittaneet LVDC-tekniikkaan perustuvia laivoja, mutta keskijännitteisiä referenssejä ei ollut löydettävissä. MVDC:llä erityisesti vikavirtasuojaus ja konvertteritekniikka vaativat tutkimusta ja kehitystä, sekä telakan kannalta erityisesti käytännöllisiä sovellusesimerkkejä. Lisäksi keskijännitteisiä risteilyaluskäyttöön soveltuvia suuren suorituskyvyn sähkökäyttöjä ei ollut kaupallisesti löydettävissä.

Jännitetasoa määriteltäessä oli selkeää, että risteilyaluksen jännitetaso pitää olla keskijänniteluokassa, koska suuritehoisen sähkönjakelujärjestelmän toteuttaminen pienjännitteellä on hyvin epäkäytännöllistä. Jännitetasoksi määritettiin 11 kV jolloin se vastaa suuruudeltaan MVAC-järjestelmän jännitettä. Mahdollisia tutkimuskohteita voisi olla 5-10 kV MVDC-järjestelmien toteutus risteilyaluksissa ja muissa laivoissa joissa on iso voimalaitos, tällöin pullonkaulaksi saattaa muodostua tarve mitoittaa johdinten poikkipinnat liian suuriksi.

Vikavirtasuojauksen toteuttamiseen MVDC-järjestelmissä tarvitaan käytännöllisiä sovelluksia. DC-vikavirran käyttäytyminen tekee suojausjärjestelyiden toteuttamisesta yhden MVDC-järjestelmien isoimmista ongelmista. Ratkaisuksi ehdotettiin IGBT-perusteisten katkaisijoiden käyttöä. Puolijohteilla toimivat katkaisijat voisivat olla yksi ratkaisu ongelmaan, mutta ne vaativat edelleen jatkotutkimusta ja käytännön sovellusten toteuttamista.

Galvaanisen erotuksen luomiseksi jännitteen muuntamisen ohella, suositeltiin keskitaajuisten puolijohdemuuntajien käyttöä. Toteutus on monimutkaisempi AC-järjestelmän painaviin 60 Hz muuntajiin nähden, mutta sen vahvuus on pienempi paino ja koko. SST soveltuisi hyvin käytettäväksi paloalueiden syöttöasemilla, koska se galvaanisesti erottaa 11 kV ja pienjännitejakelun toisistaan, samalla säästäten tilaa ja painoa. SST ei ole kuitenkaan kaupallisesti saatavilla joten niistä tarvitaan lisää tutkimusta ja käytännön kokemuksia.

Lasketut sähkönjakelujärjestelmien hyötysuhteet ovat lähes samat, MVAC-järjestelmä erottui edukseen ainoastaan satamakäytössä jolloin propulsiojärjestelmät ovat poissa käytöstä. MVDC-järjestelmän heikompi hyötysuhde satamakäytössä johtuu tarpeesta tasasuunnata

kaikki generaattoreilla tuotettu sähköteho, vastaavassa tilanteessa MVAC-järjestelmän konvertteriteho on huomattavasti pienempi. Energiatohokkuuksien vertailussa ei otettu kaapeleita huomioon, mutta MVDC-järjestelmässä on pienemmät siirtohäviöt joten otettaessa kaapelit mukaan laskentaan MVDC-järjestelmä saisi etua vertailuun. Sähkönjakelujärjestelmän häviötehon tarkemmassa määrittämisessä myös komponenttien hyötysuhteiden tulisi olla määritetty tarkasti kuormitusalueen mukaisesti. Lopulta kuitenkin suurin osa MVAC- ja MVDC-järjestelmän häviötehon erosta aiheutuu voimalaitoksen kasvaneen konvertteritehon myötä. Työssä tehty energiatohokkuuslaskelma havainnollistaa hyvin MVDC-järjestelmän rakennetta ja antaa tietyt viittekehitykset häviöiden muodostumiselle. Tarkempi sähkönjakelujärjestelmän energiatohokkuuden määrittäminen vaatisi kuitenkin koko järjestelmän yksityiskohtaisen tarkastelun. Yksityiskohtaisempi tarkastelu johtaisi myös alhaisempaan hyötysuhteeseen, koska järjestelmään tuotaisiin enemmän häviötehon lähteitä.

Polttoainelaskennassa tulosten suuruus riippuu merkittävästi käytettävästä kuormitusprofiilista, joten alhaisilla kuormitustasoilla MVDC-järjestelmän polttoaineensäästö on suurempi, mutta lähempänä nimellistä kuormitusta polttoaineenkulutus tasaantuu järjestelmien välillä. Saatu tulos (8.5% polttoainesäästö) on linjassa myös kirjallisuudessa esitettyjen tulosten kanssa (5-10% polttoainesäästö). Tulevaisuudessa risteilyaluksissa voidaan hyödyntää kaasuturbiineja yhdessä kestopolttomoottoreihin perustuvilla generaattoreilla. Hyvä selvityskohde olisi tehdä vastaavat laskelmat myös kaasuturbiinien osalta. Polttoaineenkulutuksen laskennassa ei huomioitu häviötehon suuruutta, eli laskenta perustuu kiinteällä ja vaihtelevalla taajuudella pyörivien dieselmoottoreiden polttoaineenkulutuksen vertailuun. Sähköjärjestelmän häviövertailussa saadut tulokset ovat kaikilla tutkituilla alueilla samassa suuruusluokassa joten niillä ei olisi polttoainelaskentaan suurta vaikutusta. Lisäksi häviötehot pitäisi laskea saman operointiprofiilin mukaisesti kuin polttoainelaskenta, silloin sähköjärjestelmän kuormitustehoista täytyisi tällöin olla enemmän tietoa käytettävissä jotta pystytään selvittämään häviötehon suuruus laajemmalla operointialueella.

6 YHTEENVETO

Selvitettäessä MVDC-järjestelmien nykytilannetta selvisi, että MVDC on edelleen kehitystyön alla oleva teknologia myös muilla teollisuudenaloilla. Vaikka HVDC-siirtojärjestelmiä on käytetty jo vuosikymmeniä niin DC-järjestelmien käyttöönotto keskijännitepuolella on edelleen vasta alkutaipaleellaan. Viimeisten vuosikymmenten aikana tapahtunut kehitys tehopuolijohteissa on johtanut suuritehoisten konvertterien tutkimuksen ajankohtaistumiseen ja Siemens on tuonut markkinoille MVDC-konvertterin, jonka myötä on oletettavissa, että kaupalliset sovellukset tulevat lisääntymään. MVDC ei ole pelkästään alaspäin skaalattu versio HVDC:stä vaan sen on tarkoitus toimia älykkäiden sähköverkkoratkaisujen sekä optimoitujen offshore-sovellusten mahdollistajana. Maapuolen ja offshore-ratkaisujen yleistymistä jarruttaa MVDC-vikavirtasuojausmenetelmien kaupallisten sovellusten puuttuminen. Myös regulaation ja standardien vähäisyys herättää kysymyksiä miten MVDC-järjestelmiä tullaan rakentamaan, mutta toisaalta niiden voidaan olettaa kehittyvän sitä mukaa kun varteenotettavia teknologioita saadaan markkinoille.

Mein Schiff 1 MVDC-sähköjakeluverkon rakenteeksi valikoitui säteittäinen jakelujärjestelmä. Tällöin järjestelmän rakenne on yksinkertainen ja se on kustannustehokasta toteuttaa. MVDC-järjestelmän toteuttamiseen ei ole vielä olemassa standardeja, mutta niitä varmasti tulee kun MVDC etenee kaupalliselle asteelle. Tässä työssä pyrittiin tekemään johtopäätöksiä rakenteen kannalta tehtyjen tutkimusten ja IEEE-standardisuositusten perusteella. Myös nykyisellä risteilyaluksiin vakiintuneella MVAC-järjestelmällä on merkitystä MVDC-järjestelmiä suunnitellessa. On järkevää hyödyntää MVAC-järjestelmästä parhaita menetelmiä ja kokemuksia myös MVDC-järjestelmän toteutuksessa. MVDC-järjestelmä voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, keskitetysti tai hajautetusti. Näin järjestelmä voidaan rakentaa laivan järjestelyn mukaisesti eikä toisinpäin. Hajautetussa järjestelmässä on lyhyemmät kaapelipituudet verrattuna keskitettyyn järjestelmään.

Tasasuuntaajien merkitys on suuri MVDC-sähköjakelujärjestelmien toteutuksessa vaikka perinteisissä MVAC-järjestelmissä niiden rooli on lähinnä taajuusmuuttajan DC-välipiirin esiasteena. Tasasuuntaajien osalta tarkastelussa oli dioditasasuuntaajat, tyristoritasasuuntaajat, aktiiviset tasasuuntaajat ja modulaariset monitasoiset konvertterit. Dioditasasuuntaaja on jo

tuttu ratkaisu laivasovelluksissa ja sen edullinen hinta sekä yksinkertainen rakenne puoltavat sen käyttöä. Ongelmana on ettei yksittäistä 6-pulssista tasasuuntaajaa ole järkevä käyttää MVDC-sähkönjakelujärjestelmässä suoraan generaattorin ulostuloon kytkettynä. 6-pulssisen dioditasasuuntaajan tehon laatu on usein alhainen ja lisäksi tasasuuntaajien suora sarjaankytkentä generaattorin perään lisää järjestelmän toteutuksen monimutkaisuutta. Ratkaisuksi 6-pulssisen tasasuuntaajan haittapuoliin ehdotettiin 3-vaiheisten ja useamman käämisetin sisältävien generaattoreiden käyttöä, jolloin tasasuuntaajien kytkentöjen avulla on mahdollista parantaa näiden käyttömahdollisuuksia osana MVDC-järjestelmän sähköntuotantoa. MPG:t kytkettynä useaan 6-pulssiseen DRU:hun tekee mahdolliseksi koostaa MVDC-luokan suuritehoisia 24-pulssisia DRU:ta jolloin saavutetaan laadukas ja luotettava tapa tuottaa MVDC-jännitettä. Työssä generaattorin ulostulojännitteeksi valittiin 7,8 kV, koska tämä johtaa 24-pulssisesti tasasuunnattuna valittuun noin 11 kV:n MVDC-jännitteeseen.

Parhaimmat maadoitusvaihtoehdot risteilyalukseen ovat maadoittamaton bipolaarinen järjestelmä ja bipolaarinen järjestelmä jossa on kiinteä maadoitus. Pienempi tarvittava eristystaso ja redundanttinen toiminta hätätilanteessa tekee bipolaarisesta järjestelmästä kiinteällä maadoituksella paremman vaihtoehdon vaikka järjestelmän rakenne on monimutkaisempi toteuttaa.

Kustannuksia vertailtaessa selvitettiin missä tilanteessa MVDC-järjestelmä voi olla kaupallisesti riittävän houkutteleva jotta sitä voidaan harkita korvaavaksi teknologiaksi MVAC-järjestelmälle. Vaikka MVDC-järjestelmät ovat edelleen kehityksen asteella niin voitiin tehdä oletus, että järjestelmän toteutuksen kustannusten pitää olla samassa hintaluokassa MVAC-järjestelmän kanssa jotta siitä tulee riittävän houkutteleva vaihtoehto. Tilanteessa jossa järjestelmät ovat hintatasoltaan samanlaisia, MVDC-järjestelmän hyödyt tulevat esiin. Myös imagolliset, ympäristöön ja päästöihin liittyvät tekijät voivat vauhdittaa MVDC-järjestelmien yleistymistä. Lisäksi maapuolen MVDC-järjestelmistä saatavat positiiviset kokemukset tekevät laivasovellusten rakentamisesta mielenkiintoisempia.

MVDC-järjestelmän komponenttien kustannustaso voi MVDC:n kaupallistuessa alittaa MVAC-järjestelmän komponenttien kustannustason. Pitkällä aikavälillä passiivisten komponenttien kuten muuntajien ja kaapelien hinnat nousevat inflaation mukana, mutta

puolijohdekniikkaa hyödyntävässä MVDC-järjestelmässä komponenttien koko ja hinta laskevat. Kustannusten suhteen merkittävimpiä tekijöitä ovat pienentyneet polttoaineenkulutus sekä massa ja tilavaraukset. MVDC-järjestelmän suunnittelu ja operointi vaatii enemmän perehtymistä ja koulutusta, mutta toisaalta nämä ovat pieniä kustannuksia verrattuna saavutettaviin kokonaishyötyihin. Meyer Turku Oy:lle on kilpailuetu, että MVDC-teknologia hallitaan ja tämä näkyy projektien myynissä sekä tehokkaana laivanrakennusprosessina.

Häviötehon laskenta suoritettiin MVAC- ja MVDC-järjestelmien suuritehoisimmille komponenteille. Tarkastelu tehtiin kolmessa eri tilanteessa jotka vastaavat Mein Schiff 1:n todellisia kuormitustilanteita, sähköjakelujärjestelmien hyötysuhteiden laskentatulokset ovat: satamassa (MVAC 95.7% - MVDC 94.2%), kesällä 16 solmun nopeudella (MVAC 92.5% - MVDC 92.4%) ja kesällä täydellä nopeudella (MVAC 91.5% - MVDC 91.7%). Merkittävää eroa järjestelmien välille ei löydetty, kuitenkin risteilyaluksen satamassa saatu tulos on johdonmukainen katsottaessa koko järjestelmän tilaa.

Primäärivoimanlähteeksi polttoaineenkulutuksen laskentaa varten valittiin jo käytössä olevat dieselmoottorit (4 kpl). Polttoaineenkulutusta tutkittiin MVAC- ja MVDC-järjestelmien välillä laatimalla kuvitteellinen risteilyaluksen kuormitusprofiili. Laskennassa apuna käytettiin kiinteästi ja vapaasti pyöriville polttomootoreille määritettyjä SFOC-arvoja. MVDC-järjestelmässä polttomoottoria voidaan pyörittää vapaalla nopeudella joten erityisesti alhaisemmillä kuormitustasoilla polttoainetta säästyy huomattavasti verrattuna MVAC-järjestelmään. Polttoaineenkulutuksen säästökseksi MVDC-järjestelmällä laskettiin 8.5% käytetyn kuormitusprofiilin mukaisesti.

Päästöjen laskentaa varten esitettiin kaksi eri tapaa: energian käyttöön ja polttoaineenkulutukseen liittyvät tavat. Energian käyttöön perustuvan laskentatavan mukaisesti järjestelmien välille ei synny eroa, mutta käytettäessä polttoaineenkulutukseen perustuvaa menetelmää, päästöjen määrä laskee vastaavan lukeman kuin polttoaineenkulutus eli 8.5%.

MVDC-sähköjakelujärjestelmiä pidetään kehitysaskeleena laivojen sähköjärjestelmissä. Tällä hetkellä on kuitenkin vielä huomattava tarve kehitystyölle erityisesti kaupallisten komponenttien ja ratkaisujen tuomiseksi käyttöön. Tässä diplomityössä esitettiin

risteilyaluksen MVDC-järjestelmä ja yksi mahdollinen tapa sen toteuttamiseksi. MVDC-järjestelmällä on omat haasteensa ja MVAC-järjestelmää ei pysty yksinkertaisesti suoraan muuttamaan MVDC-järjestelmäksi. Jotta MVDC-järjestelmät voidaan ottaa käyttöön, tarvitaan jatkokehitystä näillä osa-alueilla: galvaanisesti erottavat suuritehoiset DC-DC-konvertterit, keskijännitesähkökäytöt, suuren pyörimisnopeuden kestopagneettisynkronigeneraattorit, MVDC-suojalaitteet ja suojausjärjestelmien toteutus, keskijännitetasasuuntaajat, MVDC-kaapelit sekä kaasuturbiinit.

LÄHTEET

ABB. Application Note 5SYA 2051: Voltage ratings of high power semiconductors, 2013.

ABB, “Onboard DC Grid. The step forward in Power Generation and Propulsion,” 2011.

[Online]. Available:

[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/292d42e87306453dc12579ad0050a457/\\$file/12_10_OnboardDCGrid_Technical-Information.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/292d42e87306453dc12579ad0050a457/$file/12_10_OnboardDCGrid_Technical-Information.pdf).

ABB. 2010. ACS6000. [WWW-dokumentti]. [viitattu 20.06.2021]. Saatavissa:

https://library.e.abb.com/public/5e7f2eb1c4d429c948257e12004d4282/ACS%206000%20EN%20Rev%20F_lowres.pdf

ABB. 2021. [WWW-dokumentti]. [viitattu 23.07.2021]. Saatavissa:

<https://new.abb.com/marine/marine-references/dina-star>

Adnanes, A. K. “Maritime electrical installations and diesel electric propulsion,” Tech. Rep., 2003.

Bosich, D. & Sulligoi, G. 2013, “*Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid electric propulsion and LVDC distribution*”, IEEE.

Bosich, D., Giadrossi, G. & Sulligoi, G, 2014, "Voltage control solutions to face the CPL instability in MVDC shipboard power systems", - *2014 AEIT Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*.

Bosich, D., Vicenzutti, A., Pelaschiar, R., Menis, R. & Sulligoi G, 2015, "Toward the future: The MVDC large ship research program", - *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*.

Christe, A. and Dujic, D. “Galvanically isolated modular converter,” IET Power Electron., vol. 9, no. 12.

Chaudhuri, N., Chaudhuri, B., Majumder, R. and Yazdani, A., Multiterminal direct-current grids: Modeling, analysis, and control. John Wiley & Sons, 2014.

CIGRE WG B1.32, "Recommendations for testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV", CIGRE Technical Brochure 496, 2012

D'Agostino, F., Kaza, D., Martelli, M., Schiapparelli, G., Silvestro, F. & Soldano, C. 2020, "Development of a Multiphysics Real-Time Simulator for Model-Based Design of a DC Shipboard Microgrid", *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 14.

Dong, D., Pan, Y., Lai, R., Wu, X., and Weeber, K., "Active fault- current foldback control in thyristor rectifier for dc shipboard electrical system," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 1. Mar, 2017.

Doerry, N. H. and Clayton, D. H. "Shipboard electrical power quality of service," in *Electric Ship Technologies Symposium*, 2005 IEEE.

Dujic, D., Wahlstroem, J., Sosa, J. A. M. and Fritz, D., "Modular medium voltage drive for demanding applications," in *Int. Power Electron. Conf. (IPEC-Hiroshima - ECCE ASIA)*, May 2014.

Fletcher, S.D.A., Norman, P.J., Galloway, S.J., Crolla, P. & Burt, G.M. 2012, "Optimizing the Roles of Unit and Non-unit Protection Methods Within DC Microgrids", *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, no. 4.

Giannakis, A. & Pefitsis, D. 2018, "MVDC Distribution Grids and Potential Applications: Future Trends and Protection Challenges", - 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe).

Hansen, J. F., Lindtjøn, J. O., and Vanska, K. "Onboard dc grid for enhanced dp operation in ships," in *Dynamic Positioning Conf.*, 2011.

“IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships” 2010, IEEE.

Javaid, U. 2018, “MVDC Distribution Fed High Power Multi-Motor Drives”.

Jun, P., Gillenwater, M., and Barbour, W. CO₂, CH₄, and N₂O emissions from transportation waterborne navigation, in Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2001.

Kaipia, T., Salonen, P., Lassila, J., Partanen J., 2007. Application of Low Voltage DC-Distribution system – A Techno-Economical Study. 19th International Conference on Electricity Distribution, 21–24.5.2007, Wien, Itävalta, CIRED.

Langston, J., Schoder, K., Sloderbeck, M., Steurer, M., & Rockhill, A., 2018, "Testing Operation and Coordination of DC Solid State Circuit Breakers", - IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Lamichhane, A., Zhou, L., Yao, G. & Luqman, M. 2020, "Modeling, Control and Power Management of Six-Phase PMSM Based Shipboard MVDC Distribution System", *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 16.

Lloyd's Register, "Marine Exhaust Emissions Research Programme ", London, 1999.

Mazzanti, G., & Marzinotto, M. 2013, Main Realizations of HVDC Extruded Cable Systems in the World.

Meyer Turku Oy. 2021. Meyer Turun telakka. [WWW-dokumentti]. [viitattu 13.3.2021]. Saatavissa:

https://www.meyerturku.fi/fi/meyerturku_com/shipyard/company/about_the_shipyard_1/about_the_shipyard.jsp

Mo, R. Ye, Q., and Li, H., “Dc impedance modeling and stability analysis of modular multilevel converter for mvdc application,” in IEEE Energy Conversion Congr. and Expo. (ECCE), Sep. 2016.

“MVDC PLUS - Solutions.” Whitepaper, Siemens.

MVDC large ship project. 2021. [WWW-dokumentti]. [viitattu 13.07.2021]. Saatavissa: <http://www.mvdc.it/en/il-progetto/prime-movers/>

Partanen, J., Pyrhönen, J., Silventoinen, P., Niemelä, M., Lassila, J., Kaipia, T., Salonen, P., Peltoniemi, P., Nuutinen, P., Lana, A., Haa-kana, J., Pinomaa, A., Makkonen, H., Voutilainen, V., Paajanen, P., Järventausta, P., Tuusa, H., Suntio, T., Kannus, K., Lahti, K., Nikan-der, A., Mäkinen, A., Alahuhtala, J., Suntala, T., Nousiainen, L., Rekola, J., Vornanen, T., 2010 Tehoelektroniikka sähköjälkelussa – Pienjännitteinen tasasähköjälkelu. ISBN 978-952-214-981-7

Prenc, R., Cuculić, A. & Baumgartner, I. 2016, "Advantages of using a DC power system on board ship", *Journal of Maritime & Transportation Science*, vol. 52, no. 1.

Pierri, E., Binder, O., Hemdan, N. G. A., and Kurrat, M., “Challenges and opportunities for a European HVDC grid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, October 2016.

Reed, G.F., Grainger, B.M., Sparacino, A.R. & Zhi-Hong Mao 2012, "Ship to Grid: Medium-Voltage DC Concepts in Theory and Practice", *IEEE power & energy magazine*, vol. 10, no. 6.

Reed, G. F., Grainger, B. M., Sparacino, A. R., Taylor, E. J., Korytowski, M. J., and Mao, Z.-H. “Medium Voltage DC Technology Developments, Applications, and Trends.” CIGRE, 2012 Grid of the Future Symposium.

Robinson, F.V.P. 1997, Power electronics converters, applications and design: Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins (2nd edition), John Wiley, Chichester, 1995, ISBN: 0-471-30576-6, Elsevier Ltd.

Rolls Royce oy. 2021. MT30 Marine Gas Turbine. [WWW-dokumentti]. [viitattu 19.06.2021].
Saatavissa: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/naval/gas-turbines/mt30-marine-gas-turbine.asp>

Rothmund, D., Ortiz, G., Guillod, T. & Kolar, J. W. 2015, "10kV SiC-based isolated DC-DC converter for medium voltage-connected Solid-State Transformers", - *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*.

Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, 1996.

Saban, D. M., Bailey, C., Gonzalez-Lopez, D. and Luca, L., "Experimental evaluation of a high-speed permanent-magnet machine," in *55th IEEE Petroleum and Chemical Ind. Tech. Conf.*, Sep. 2008.

Satpathi, K., Ukil, A. & Pou, J. 2018, "Short-Circuit Fault Management in DC Electric Ship Propulsion System: Protection Requirements, Review of Existing Technologies and Future Research Trends", *IEEE transactions on transportation electrification*, vol. 4, no. 1.

Siemens. 2021. [WWW-dokumentti]. [viitattu 23.07.2021]. Saatavissa: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:36bce2d7-5781-47b2-b26b954c0db64b35/version:1567605879/bluedrive-plusc.pdf>

Siemens Marine and Shipbuilding. (2016). Bluedrive plusc – makes vessels safer, more profitable and environmentally friendly. [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/rr-b-ferry-0317-sp.pdf>

L. Mahon, Diesel generator handbook. Newnes, 1992.

Sulligoi, G., Tessarolo, A., Benucci, V., Trapani, A. M., Baret, M., and Luise, F., "Design, implementation and testing of a shipboard mediumvoltage dc generation system based on a ultra-high speed 12-phase alternator," in IEEE Electric Ship Tech. Symp. (ESTS), Apr. 2011.

Sulligoi, G., Bosich, D., Arcidiacono, V. & Giadrossi, G. 2013, "Considerations on the design of voltage control for multi-machine MVDC power systems on large ships", - *2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*.

Shen, Z. J., Sabui, G., Miao, Z. and Shuai, Z., "Wide-bandgap solid-state circuit breakers for DC power systems: Device and circuit considerations," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 62, no. 2, 2015.

Trozzi, C., "Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation ", Techne Consulting, Rome 2010.

U.S Department of energy. 2021. [WWW-dokumentti]. [viitattu 23.07.2021]. Saatavissa: <https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power>

U.S. Environmental Protection Agency, Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories, Report Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, April 2009.

Wahlstroem, J., Dujic, D., Luescher, M. A. and Reist, S., "High power igct based multilevel inverter," in Proc. of Int. Exhibition and Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), May 2014.

Wärtsilä Oy. 2021. Wärtsilä 46F. [WWW-dokumentti]. [viitattu 19.06.2021]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/diesel-engines/wartsila-46f>

Zahedi, B., Norum, L.E. & Ludvigsen, K.B. 2014, "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems", *Journal of Power Sources*, vol. 255.

LIITE 1. POLTTOAINEENKULUTUKSEN VERTAILULASKELMA

Päämoottorien 4 kpl kokonaisteho

$$P_1 := 2 \cdot 14.4 \text{ MW} = 28.8 \text{ MW}$$

$$P_2 := 2 \cdot 9.6 \text{ MW} = 19.2 \text{ MW}$$

$$P_{DM} := P_1 + P_2 = 48 \text{ MW}$$

Moottorien kuormituksen kuvaus eri operointitasoilla

kuorma (kW)	operointiaika vuodessa	moottorit käynnissä kpl	Yksittäisen moottorin teho
$P_{13} := 0.13 \cdot P_{DM} = 6.24 \text{ MW}$	$t_{13} := 1314 \text{ h}$	$g_{13} := 1$	$P_{g13} := \frac{P_{13}}{g_{13}} = 6.24 \text{ MW}$
$P_{20} := 0.2 \cdot P_{DM} = 9.6 \text{ MW}$	$t_{20} := 876 \text{ h}$	$g_{20} := 1$	$P_{g20} := \frac{P_{20}}{g_{20}} = 9.6 \text{ MW}$
$P_{30} := 0.3 \cdot P_{DM} = 14.4 \text{ MW}$	$t_{30} := 2628 \text{ h}$	$g_{30} := 2$	$P_{g30} := \frac{P_{30}}{g_{30}} = 7.2 \text{ MW}$
$P_{50} := 0.5 \cdot P_{DM} = 24 \text{ MW}$	$t_{50} := 1314 \text{ h}$	$g_{50} := 2$	$P_{g50} := \frac{P_{50}}{g_{50}} = 12 \text{ MW}$
$P_{60} := 0.6 \cdot P_{DM} = 28.8 \text{ MW}$	$t_{60} := 1752 \text{ h}$	$g_{60} := 3$	$P_{g60} := \frac{P_{60}}{g_{60}} = 9.6 \text{ MW}$
$P_{80} := 0.8 \cdot P_{DM} = 38.4 \text{ MW}$	$t_{80} := 876 \text{ h}$	$g_{80} := 4$	$P_{g80} := \frac{P_{80}}{g_{80}} = 9.6 \text{ MW}$

AC-järjestelmän SFC - fixed speed engine

$SFC_{AC13} := 270 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC40} := 205 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC70} := 185 \frac{g}{kWh}$
$SFC_{AC20} := 240 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC50} := 198 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC80} := 182 \frac{g}{kWh}$
$SFC_{AC30} := 220 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC60} := 188 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{AC90} := 185 \frac{g}{kWh}$
		$SFC_{AC100} := 190 \frac{g}{kWh}$

AC-järjestelmän polttoaineenkulutus eri operointitasoilla

Kuorma	Polttoaineenkulutus t/a	
13%	$FC_{AC13} := t_{13} \cdot g_{13} \cdot P_{g13} \cdot SFC_{AC13}$	$FC_{AC13} = 2213.827 \text{ t}$
20%	$FC_{AC20} := t_{20} \cdot g_{20} \cdot P_{g20} \cdot SFC_{AC20}$	$FC_{AC20} = 2018.304 \text{ t}$
30%	$FC_{AC30} := t_{30} \cdot g_{30} \cdot P_{g30} \cdot SFC_{AC30}$	$FC_{AC30} = 8325.504 \text{ t}$
50%	$FC_{AC50} := t_{50} \cdot g_{50} \cdot P_{g50} \cdot SFC_{AC50}$	$FC_{AC50} = 6244.128 \text{ t}$
60%	$FC_{AC60} := t_{60} \cdot g_{60} \cdot P_{g60} \cdot SFC_{AC60}$	$FC_{AC60} = 9486.029 \text{ t}$
80%	$FC_{AC80} := t_{80} \cdot g_{80} \cdot P_{g80} \cdot SFC_{AC80}$	$FC_{AC80} = 6122.189 \text{ t}$

DC-järjestelmän SFC - variable speed engine

$SFC_{DC13} := 198 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC40} := 188 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC70} := 180 \frac{g}{kWh}$
$SFC_{DC20} := 195 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC50} := 182 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC80} := 182 \frac{g}{kWh}$
$SFC_{DC30} := 192 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC60} := 180 \frac{g}{kWh}$	$SFC_{DC90} := 185 \frac{g}{kWh}$
		$SFC_{DC100} := 190 \frac{g}{kWh}$

DC-järjestelmän polttoaineenkulutus eri operointitasoilla

Kuorma	Polttoaineenkulutus t/a	
13%	$FC_{DC13} := t_{13} \cdot g_{13} \cdot P_{g13} \cdot SFC_{DC13}$	$FC_{DC13} = 1623.473 \text{ t}$
20%	$FC_{DC20} := t_{20} \cdot g_{20} \cdot P_{g20} \cdot SFC_{DC20}$	$FC_{DC20} = 1639.872 \text{ t}$
30%	$FC_{DC30} := t_{30} \cdot g_{30} \cdot P_{g30} \cdot SFC_{DC30}$	$FC_{DC30} = 7265.894 \text{ t}$
50%	$FC_{DC50} := t_{50} \cdot g_{50} \cdot P_{g50} \cdot SFC_{DC50}$	$FC_{DC50} = 5739.552 \text{ t}$
60%	$FC_{DC60} := t_{60} \cdot g_{60} \cdot P_{g60} \cdot SFC_{DC60}$	$FC_{DC60} = 9082.368 \text{ t}$

80%

$$FC_{DC80} := t_{80} \cdot g_{80} \cdot P_{g80} \cdot SFC_{DC80}$$

$$FC_{DC80} = 6122.189 \text{ t}$$

DC-järjestelmällä saavutettava polttoainesäästö

Kuorma Polttoainesäästö (t/a)

Prosentuaalinen säästö

13%	$\Delta FC_{13} := FC_{AC13} - FC_{DC13} = 590.354 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC13} - FC_{DC13}}{FC_{AC13}} = 26.667 \text{ \%}$
20%	$\Delta FC_{20} := FC_{AC20} - FC_{DC20} = 378.432 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC20} - FC_{DC20}}{FC_{AC20}} = 18.75 \text{ \%}$
30%	$\Delta FC_{30} := FC_{AC30} - FC_{DC30} = 1059.61 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC30} - FC_{DC30}}{FC_{AC30}} = 12.727 \text{ \%}$
50%	$\Delta FC_{50} := FC_{AC50} - FC_{DC50} = 504.576 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC50} - FC_{DC50}}{FC_{AC50}} = 8.081 \text{ \%}$
60%	$\Delta FC_{60} := FC_{AC60} - FC_{DC60} = 403.661 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC60} - FC_{DC60}}{FC_{AC60}} = 4.255 \text{ \%}$
80%	$\Delta FC_{80} := FC_{AC80} - FC_{DC80} = 0 \text{ t}$	$100 \cdot \frac{FC_{AC80} - FC_{DC80}}{FC_{AC80}} = 0 \text{ \%}$

DC-järjestelmällä saavutettava polttoainesäästö yhteensä

AC-järjestelmän yhteenlaskettu polttoaineenkulutus (t/a)

$$FC_{AC_tot} := FC_{AC13} + FC_{AC20} + FC_{AC30} + FC_{AC50} + FC_{AC60} + FC_{AC80} = 34409.981 \text{ t}$$

DC-järjestelmän yhteenlaskettu polttoaineenkulutus (kt/a)

$$FC_{DC_tot} := FC_{DC13} + FC_{DC20} + FC_{DC30} + FC_{DC50} + FC_{DC60} + FC_{DC80} = 31473.348 \text{ t}$$

DC-järjestelmän polttoainesäästö (t/a)

$$\Delta FC_{tot} := FC_{AC_tot} - FC_{DC_tot} = 2936.632 \text{ t}$$

Prosentuaalinen säästö (%)

$$100 \cdot \frac{FC_{AC_tot} - FC_{DC_tot}}{FC_{AC_tot}} = 8.534 \text{ \%}$$

Polttoaineen kustannussäästö vuodessa

$$hinta_{polttoaine} := 1 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

$$\Delta hinta_{polttoaine} := hinta_{polttoaine} \cdot \Delta FC_{tot} = 2.937 \text{ M€}$$

RFO emissiokertoimet

$$NO_x := 87 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$SO_2 := 52.787 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$CO_2 := 3109 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

MVAC

$$NO_{x_MVAC} := NO_x \cdot FC_{AC_tot} = 2993.668 \text{ t}$$

$$SO_{2_MVAC} := SO_2 \cdot FC_{AC_tot} = 1816.4 \text{ t}$$

$$CO_{2_MVAC} := CO_2 \cdot FC_{AC_tot} = 106980.63 \text{ t}$$

MVDC

$$NO_{x_MVDC} := NO_x \cdot FC_{DC_tot} = 2738.181 \text{ t}$$

$$SO_{2_MVDC} := SO_2 \cdot FC_{DC_tot} = 1661.384 \text{ t}$$

$$CO_{2_MVDC} := CO_2 \cdot FC_{DC_tot} = 97850.64 \text{ t}$$

Prosentuaalinen muutos (%)

$$NO_x : 100 \cdot \left(1 - \frac{NO_{x_MVDC}}{NO_{x_MVAC}} \right) = 8.534 \text{ \%}$$

$$SO_2 : 100 \cdot \left(1 - \frac{SO_{2_MVDC}}{SO_{2_MVAC}} \right) = 8.534 \text{ \%}$$

$$CO_2 : 100 \cdot \left(1 - \frac{CO_{2_MVDC}}{CO_{2_MVAC}} \right) = 8.534 \text{ \%}$$