

Erno Luminiitty

TASASÄHKÖÖN PERUSTUVA SÄHKÖNJAKELU LAIVASSA

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	3
2.	LAIVAN TASASÄHKÖJAKELUN HISTORIA	4
3.	LAIVASÄHKÖSUUNNITTELU.....	6
4.	LAIVAN SÄHKÖJAKELUVERKON RAKENNE.....	7
4.1	Tasasähköjakuverkon rakenne	7
4.2	Vaihtosähköjakuverkon rakenne	9
4.3	Suunnittelutopologiat	9
4.3.1	Erotettu sähköjakelujärjestelmä	11
4.3.2	Integroitu sähköjakelujärjestelmä	12
4.4	Komponentit.....	13
4.4.1	Polttomoottorivoimalaitokset.....	13
4.4.2	Tasasuuntaajat	13
4.4.3	Vaihtosuuntaajat.....	17
4.4.4	DC/DC-muuntajat	18
5.	EDUT JA HAITAT.....	19
5.1	Johtimet	19
5.2	Oikosulkuilanteet	19
5.3	Paino ja tilantarve.....	20
5.4	Harmoniset yliaallot	20
5.5	Integroituvuus.....	21
6.	INTEGROITUVUUDEN MAHDOLLISUUDET	22
6.1	Uusiutuva energia ja energiavarastot	22
6.2	Satamaverkkoon liittäminen.....	23
7.	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET.....	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Alternative Current
AFE	Active front-end
ASR	Automatic Speed Regulator
DC	Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IMO	International Maritime Organization
IPS	Integrated Power System
LVDC	Low Voltage Direct Current
MMC	Modular Multilevel Converter
MVDC	Medium Voltage Direct Current
PWM	Pulse-Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
VSD	Variable Speed Drive

1. JOHDANTO

Tehoelektroniikan kehittyminen on johtanut jo aiemmin unohduksiin jääneiden tasavirtajakeluverkkojen uudelleen kehittämiseen eri sovelluskohteissa. Vanhoihin ongelmiin on keksitty ratkaisuja ja tasavirtajakelujärjestelmiä on alettu katsoa uudesta näkökulmasta. Siihen on vaikuttanut niin sähkökäyttöiset kulkuneuvot, uusiutuvan energian hyödyntäminen, ilmastonmuutos ja polttoainevarantojen vähentyminen unohtamatta taloudellista hyötymistä. Merenkulkualukset ovat yksi näistä sovelluskohteista, joihin on herännyt kiinnostus tasasähköön perustuvasta jakelujärjestelmästä.

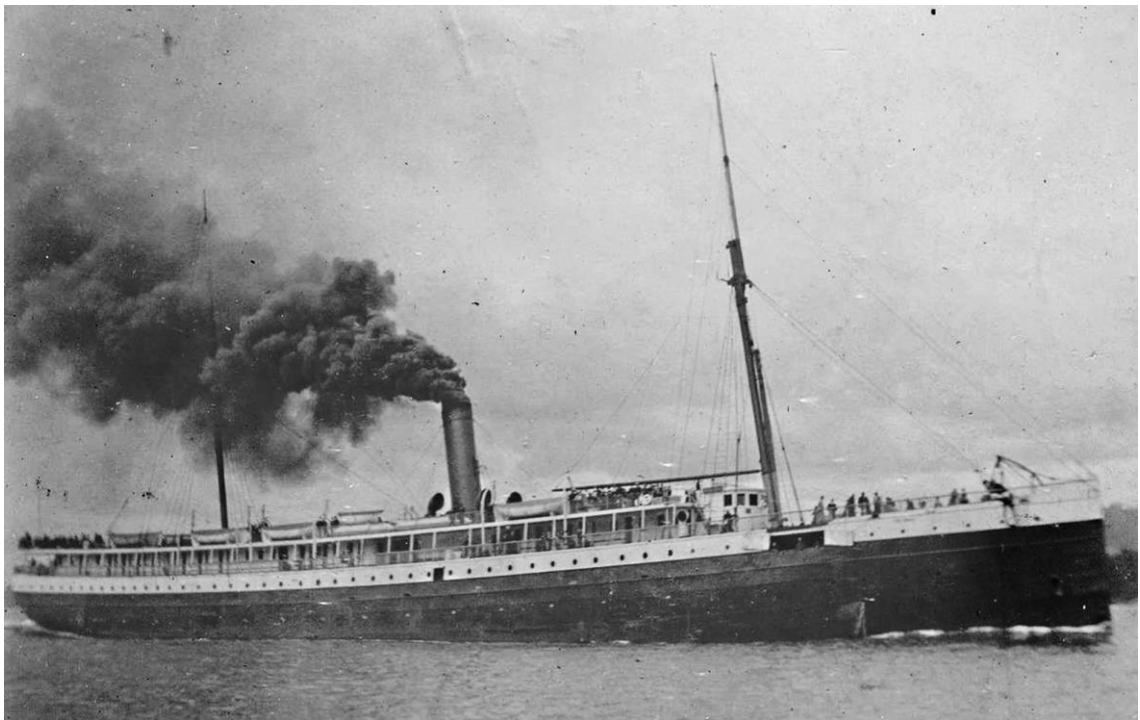
Merenkulku on yksi tärkeimmistä tukijaloistamme. IMO:n (International Maritime Organization) mukaan merenkulun vuosittaiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2012 olivat 938 miljoonaa tonnia [1]. Merenkulkualuksien sähköjakelujärjestelmät on aikaisemmin toteutettu vaihtosähköllä. Tasasähköön perustuvalla jakelulla saataisiin huomattavasti parannettua sähköistä hyötysuhdetta ja sitä kautta polttoainesäästöjä. Järjestelmän hinta olisi alhaisempi. Kiinnostukseen tasasähköjakelujärjestelmiin laivoissa vaikuttaa myös energiavarastojen hyödyntäminen ja sataman sähköjakelujärjestelmän yhdistäminen laivan itsenäiseen jakelujärjestelmään. Työn tavoitteena on selvittää tasasähköön perustuvan järjestelmän rakennetta ja vertailla DC-sähköjakelujärjestelmän etuja sekä haasteita. Työn tavoitteena on myös tarkastella DC-sähköjakelujärjestelmän sopivuutta tulevaisuuden kehityksen näkökulmasta.

Luvussa 2 perehdytään tasasähköön perustuvan jakelun historiaan merenkulkualuksissa. Luvussa 3 pyritään selvittämään mitä vaatimuksia ja ominaisuuksia itsenäinen tasasähköjakelujärjestelmä vaatii, jotta se olisi turvallinen ja luotettava. Luvuissa 4 ja 5 tarkastellaan tasasähköjakelujärjestelmän rakennetta, mahdollisuuksia ja haittoja verrattuna vaihtosähköjakelujärjestelmiin. Luvussa 6 käsitellään tasasähköön perustuvan jakelun tulevaisuuden käyttömahdollisuuksia. Työn yhteenveto käsitellään luvussa 7.

2. LAIVAN TASASÄHKÖJAKELUN HISTORIA

Ensimmäinen sähköinen valaistusjärjestelmä esiteltiin vuonna 1878 Pariisissa. Valaistusjärjestelmä perustui tasasähköjakeluverkkoon. [2] Sähkön tuomat mahdollisuudet merenkulkuun turvallisuuden ja ylellisyyden näkökulmasta huomattiin. Thomas Edison, sähkövalaistuksen ja sähkönjakelujärjestelmien kehityksen suuri vaikuttaja, aloitti suunnittelemaan laivaan täysin itsenäistä ja kelluvaa sähkönjakelua vuonna 1880 [3].

Höyrylaiva *SS Columbia* oli ensimmäinen tunnettu merenkulkualus, jonka valaistus sähköistyi 1880-luvulla [2]. Thomas Edison suunnitteli aluksen tasasähköön perustuvan sähkönjakelujärjestelmän. Laivassa oli neljä hihnakäyttöistä 6 kW:n dynamoita. Kolme niistä syötti sähköä yhteensä 120 hehkulampulle. Neljättä käytettiin muiden dynamoiden magnetointigeneraattorina. Dynamoiden jännitetasoa säädettiin muuttamalla konehuoneen valaistuksen kirkkautta. [3] Aluksen voimansiirtojärjestelmä oli kuitenkin edelleen mekaaninen [2]. Höyrylaiva *SS Columbiasta* on kuvassa 1.



Kuva 1. Höyrylaiva SS Columbia [3]

1830-luvun lopulla Moritz Hermann Jacobi asensi 1 kW:n akkukäyttöisen tasavirtamootorin pieneen veneeseen. Jacobin laiva pystyi etenemään 4 km/h. Siinä oli kuitenkin lukuisia teknisiä puutteita. Toimiva sähköllä liikuteltava alus oli vuonna 1885 rakennettu matkustajalautta *Elektra*, joka toimi 4,5 kW:n sähkömootorilla ja akulla. [3]

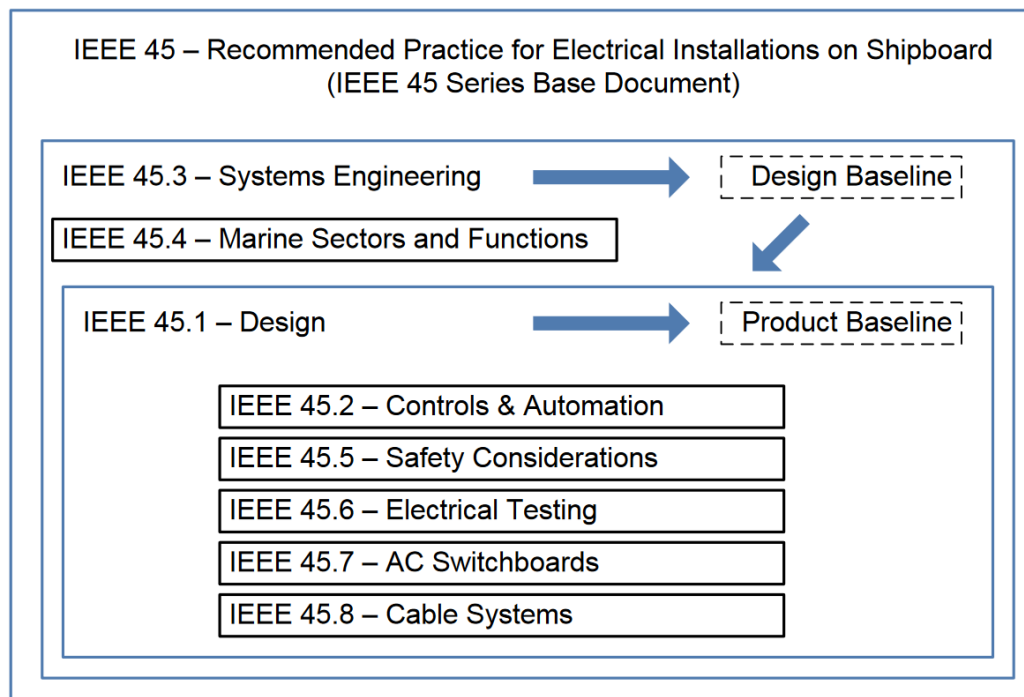
Sähköisiä voimansiirtojärjestelmiä aloitettiin ensin käyttämään merivoimien laivoissa. Esimerkiksi *USS Jupiter* toimi turbiinin pyörittämällä sähkökäyttövoimalla 1900-luvun alussa. *USS Jupiter* oli kokeilu, jossa oli lisäksi mekaaninen käyttövoimajärjestelmä. [4]

Mantereella huomattiin 1800-luvun lopulla, että tasavirtajakelujärjestelmät toimivat hyvin vain lyhyillä etäisyyksillä. Jännitteen muuttamiseen tarvittiin liikkuvia komponentteja. Nikola Teslan vaihtosähköjärjestelmillä sen sijaan pystyttiin muuttamaan jännitteen suuruutta ilman liikkuvia komponentteja ja suhteellisen edullisesti. Jännitteen suuruuden kasvattaminen mahdollisti pitempiä jakeluetäisyyksiä. [4]

Merenkulkualuksissa vaihtosähköjakelujärjestelmiin siirtyminen oli luonnollista. Komponentit olivat jo valmiiksi suunniteltuja, helpommin saatavilla ja edullisempia. [2] Kuitenkaan haasteilta ei vältytty. 1900-luvun alussa DC-moottorit olivat vaihtelevien kuormien ohjauksessa parempia kuin AC-moottorit. Lisäksi vaihtovirtamoottoreissa oli ongelmia tehokertoimen hallinnassa. DC-moottorit olivat kuitenkin monimutkaisia rakenteita ja niiden ohjausjärjestelmät olivat suuria ja painavia. [4] Uudemmissa laivoissa alettiin käyttämään vaihtosähköjakelujärjestelmiä ja tasavirtajakelujärjestelmän käyttö väheni [2].

3. LAIVASÄHKÖSUUNNITTELU

Laivasähkösuunnittelussa on otettava huomioon suunnittelulle asetetut standardit ja määräykset. IEEE-järjestö määrittelee suositellut käytännöt merenkulkualuksien sähköjärjestelmien suunnittelussa standardisarjalla IEEE 45. Kuvassa 2 on esitetty standardisarjan sisältö. IEEE 45.3 keskittyy konseptisuunnitteluun ja IEEE 45.1 keskittyy tuotesuunnitteluun. [5]



Kuva 2. Standardisarja IEEE 45 [5]

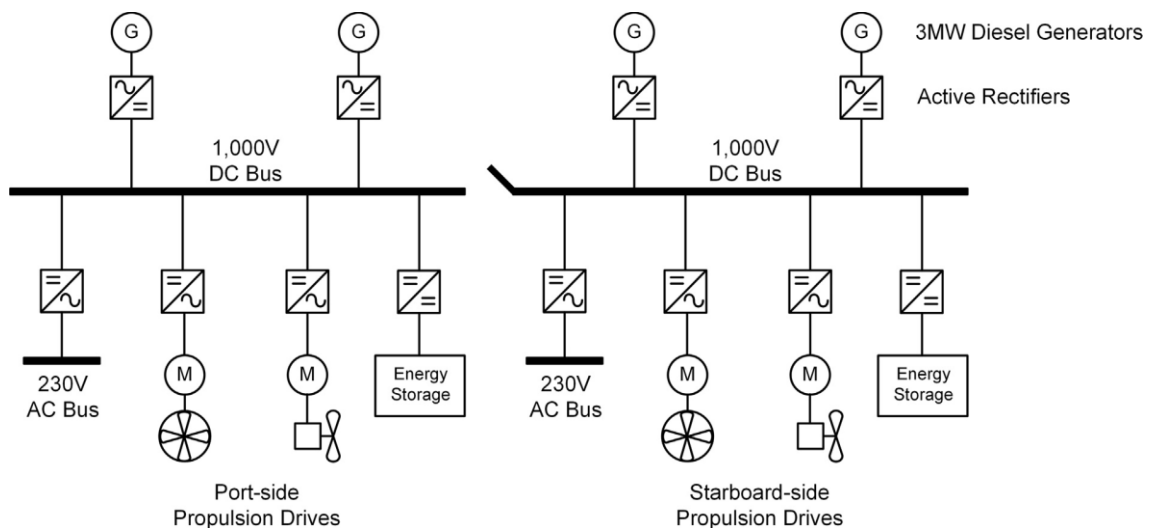
Nykyaikaisen laivan toimintakunto ja ohjattavuus on täysin riippuvainen sähköjakelujärjestelmästä. Sähköjakelujärjestelmä ylläpitää muun kuorman lisäksi navigointi-, propulsio- ja turvallisuusjärjestelmiä. Merenkulkualuksien sähköjakelujärjestelmät suunnitellaan aina kokonaisuutena alusta loppuun asti. Kaikki mahdolliset tekijät on otettava huomioon ongelmatilanteiden varalta. Laivan kelluvan sähköjakelujärjestelmän on selviydyttävä vikatilanteissa itsenäisesti ja turvallisesti. Oikein valituilla komponenteilla ja hierarkkisella suunnittelulla saadaan varmatoiminen ja selviytymiskykyinen sähköjakelujärjestelmä. Kuormat jaotellaan neljään QoS-kategoriaan, jotka on keskeytymätön, lyhyen ajan keskeytys, pitkän ajan keskeytys ja vapautettu. QoS (Quality of Service) on luotettavuusmitta, joka saadaan huoltokatkosten välisestä ajasta. [6]

4. LAIVAN SÄHKÖJAKELUVERKON RAKENNE

Merenkulkualuksen sähköjakelujärjestelmä on itsenäinen ja kelluva. Kuormien tarvitsema sähköenergia on tuotettava itse. Merenkulkualuksissa käytetään usein polttomoottorivoimalaitoksia. Polttomoottorivoimalaitoksissa generaattori muuttaa polttomoottorin tuottaman liike-energian sähköenergiaksi. Generaattorien tuottama sähköenergia ohjataan väyliä pitkin laivaa liikuttaville sähkömoottoreille ja muille kuormille, kuten esimerkiksi valaisimille, navigointilaitteille, lisäkoneille ja jäähdytyspumpuille. Generaattoreiden ja kuormien välissä on oltava muuntajia, konverttereita ja muuta tehoelektroniikkaa ohjattavuuden takaamiseksi. Tällöin laivaa työntävien sähkömoottoreiden pyörimisnopeutta voidaan muuttaa, generaattoreiden ei tarvitse toimia kuormien vaatimalla taajuudella ja jännite saadaan kuormille sopivaksi. [2, 7]

4.1 Tasasähköjakeluverkon rakenne

Laivan tasavirtajakeluverkossa vaihtovirtageneraattoreiden tuottama sähköenergia syötetään yhdelle tai kahdelle DC-väylälle, josta se johdetaan sähköenergiaa tarvitseville kuormille. Tavallisesti DC-väylän jännitetaso on MVDC-järjestelmissä 1,5 kV:n ja 15 kV:n välillä. MVDC-sähköjakelujärjestelmää käytetään yli 20 MW:n teholuokan laivoissa. LVDC-järjestelmissä DC-väylän jännite voi esimerkiksi olla 1 kV tai pienempi. Kuvassa 3 on esitetty LVDC-jakelujärjestelmä. [2, 8]



Kuva 3. Tasasähköön perustuva LVDC-jakelujärjestelmä [2]

Generaattorin ja DC-väylän väliin tarvitsee kytkeä AFE-konvertteri (active front-end), joka muuttaa generaattorin tuottaman vaihtosähkön tasasähköksi [2]. AFE-konvertterissa on samanlainen rakenne kuin dioditasasuuntaajassa, mutta diodit on korvattu IGBT-puolijohdekytkimillä (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Lisäksi AFE-konvertteri tarvitsee lisäkomponentteja IGBT-puolijohdekytkimen ohjaukseen ja suojaukseen. AFE-konvertterit ovat kalliita. [9]

Tasasähköjakelujärjestelmissä käytetään yleensä vaihtosähkömoottoreita. VSD (variable speed drive) voidaan kytkeä suoraan DC-väylään [2]. VSD eli taajuusmuuttaja säätelee laivaa työntävien sähkömoottoreiden toimintaa muuttamalla taajuutta ja jännitettä. Taajuusmuuttajan avulla sähkömoottoreita voidaan ohjata koko toiminta-alueella parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. Ilman taajuusmuuttajaa laivaa työntävien sähkömoottoreiden ainoa mahdollinen ohjaus olisi käynnistäminen ja sammuttaminen. Moottorille täytyisi tällöin aina antaa enemmän sähköenergiaa kuin moottori käyttää. Lisäksi VSD auttaa moottorin käynnistyksessä, jolloin jakelujännite ei putoa. [9]

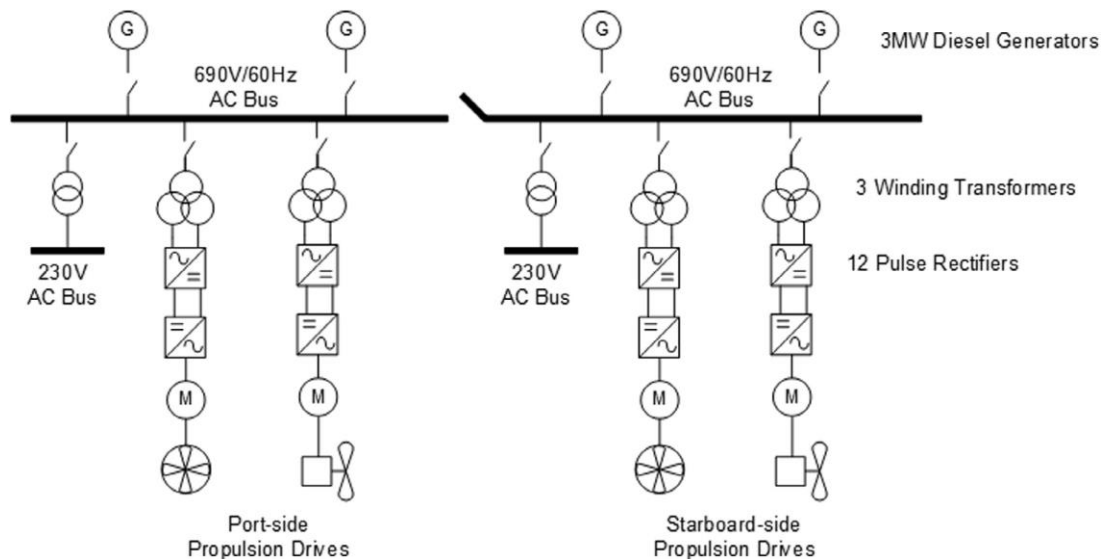
Muille vaihtosähköä käyttäville kuormille invertterit muuttavat tasasähkön vaihtosähköksi. Energiavarastojen, kuten akkujen, kytkeminen on tasavirtaväylän avulla mahdollista. DC/DC-konverttereita tarvitaan kuitenkin ohjaamaan tehonkulkua väylän ja energiavarastojen välillä. [2]

Laivan DC-sähkönjakelujärjestelmän maadoittamiseen käytetään kolmea tapaa, jotka on määritelty IEEE:n standardissa 142. Bipolaarisia eli kaksisuuntaisia komponentteja käyttämällä voidaan DC-sähkönjakelujärjestelmä toteuttaa maadoittamatta. Toinen tapa on käyttää bipolaaristen komponenttien kanssa suuri resistanssista maadoitusta. Suuri resistanssissa maadoituksessa muuntajan tai generaattorin nollajohdin maadoitetaan suuri resistanssisen vastuksen kautta. Vastus pienentää oikosulkuvirtaa. Suuri resistanssisesti maadoitettua järjestelmää ei tarvitse ensimmäisen maavian takia sammuttaa. Suuri resistanssisen maadoituksen etuja on järjestelmän toiminnan jatkuvuus, maavioista aiheutuneiden ylijännitteiden pieneneminen ja suurista maavikavirroista aiheutuvien turvallisuusriskien väheneminen. Kolmas vaihtoehto on jäykkä maadoitus käyttämällä yksinapaista runkoa virran paluureittinä. Tapaa ei suosita, koska se aiheuttaa meriveden kanssa korroosiota ja turvallisuusriskin. [6, 10, 11]

MVDC-sähkönjakelujärjestelmän pääjänniteväylän tulisi olla suuri resistanssisesti maadoitettu. LVDC-sähkönjakelujärjestelmän pääjänniteväylän ja sähkönjakeluväylien tulisi olla joko suuri resistanssisesti maadoitettu tai maadoittamaton. LVDC-sähkönjakelujärjestelmien sekundääriväylien tulisi olla jäykästi maadoitettu. Sähkönjakelujärjestelmissä voidaan käyttää useaa eri maadoitustapaa, jos osajärjestelmät on galvaanisesti erotettu. [11]

4.2 Vaihtosähköjaketuverkon rakenne

Vaihtovirtajakelujärjestelmät toteutetaan yleisemmin 440 V:n; 690 V:n; 3,3 kV:n; 6,6 kV:n ja 11 kV:n jakelujännitteillä [2]. Vaihtovirtajakelujärjestelmien taajuus on joko 50 Hz tai 60 Hz. Maanpuolustussovelluksissa käytetään myös 400 Hz:n sähköjakelujärjestelmiä. [6] Generaattorit kytketään perinteisesti vaihtovirtajakelujärjestelmissä suoraan pääkytkintauluun [7]. Kuvassa 4 on 690 V:n vaihtosähköjakelujärjestelmä.

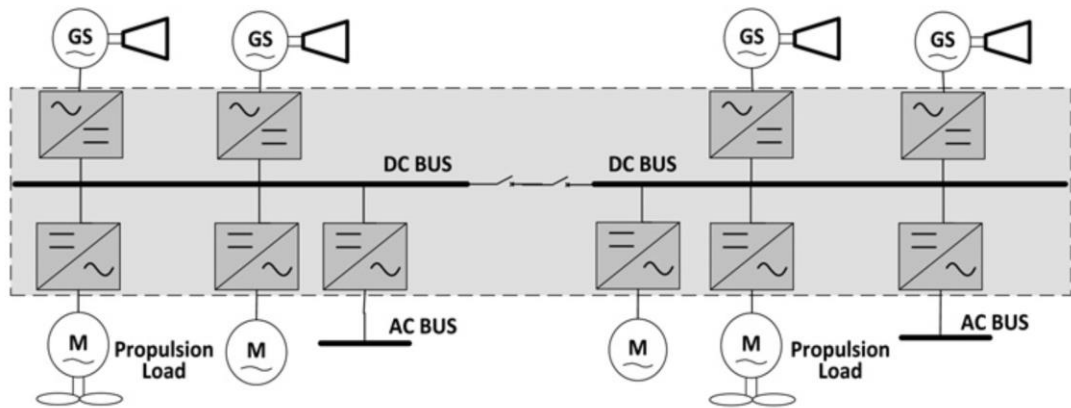


Kuva 4. Vaihtosähköön perustuva LVAC-sähköjakelujärjestelmä [2]

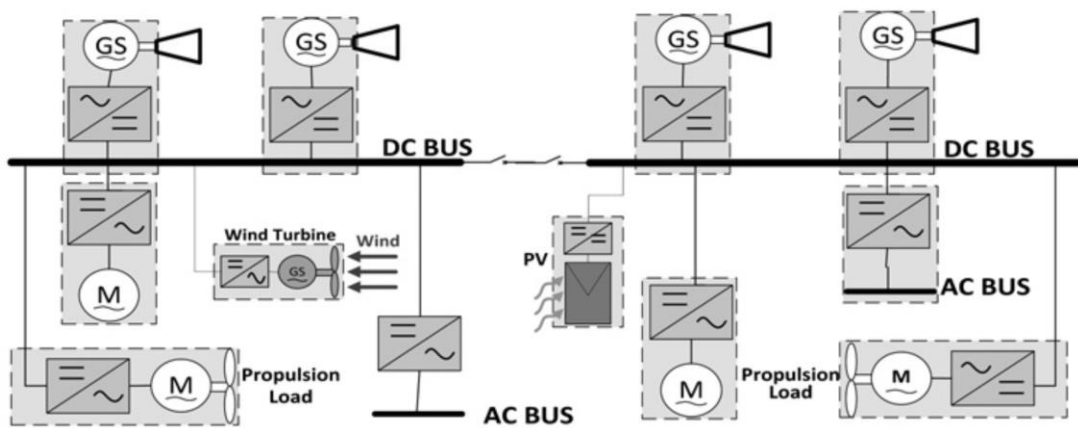
Ohjattavuuden takaamiseksi on myös vaihtosähköjaketussa käytettävä tasasuuntaajia. Kuvan 4 vaihtovirtajakelujärjestelmässä AC-väylän kolmivaiheinen sähkövirta ohjataan muuntajan läpi ja se tasasuunnataan 12-pulssisella tasasuuntaajalla. Taajuusmuuttajalla ohjataan propulsio-moottoreita. [2]

4.3 Suunnittelutopologiat

Laivoissa käytetyt DC-sähköjakelujärjestelmät voidaan jaotella keskitettyihin ja täysin hajautettuihin järjestelmiin. Keskitetyssä DC-sähköjaketuverkossa jokainen konvertteri sijaitsee samassa tilassa. Hajautetussa DC-sähköjaketuverkossa konvertterit sijaitsevat lähellä generaattoreita tai sitä tarvitsevaa kuormaa. Keskitetty DC-sähköjakelujärjestelmä on esitetty kuvassa 5 ja hajautettu DC-sähköjakelujärjestelmä kuvassa 6. [12]



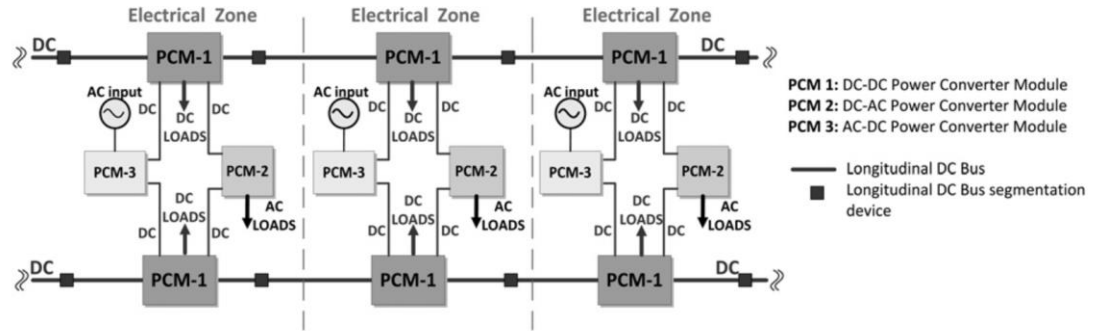
Kuva 5. Keskitetty sähköjakelujärjestelmä [12]



Kuva 6. Hajautettu sähköjakelujärjestelmä [12]

Kuvien 5 ja 6 sähköjakelujärjestelmien rakenteet ovat radiaalisia. Radiaalisessa rakenteessa propulsio-kuormat, generaattorit, energiavarastot ja osajakelujärjestelmät on kytketty pääjakeluväyliin. Pääjakeluväylät on kytketty toisiinsa kytkennällä, joka voidaan tarvittaessa avata. [6]

Vyöhykerakenne rinnakkaisilla konverttereilla, kuvassa 7, on yleinen käytäntö DC-sähköjakelujärjestelmissä. Vyöhykerakenteessa on yleensä kaksi pitkästä DC-väylää. DC-väylien kytkentäpisteillä mahdollistetaan vyöhykkeet. Vyöhykerakenne on luotettava. Vikatilanteessa toimimaton vyöhyke voidaan eristää muista. Tällöin koko sähköjakelujärjestelmä ei lakkaa toimimasta. [12]

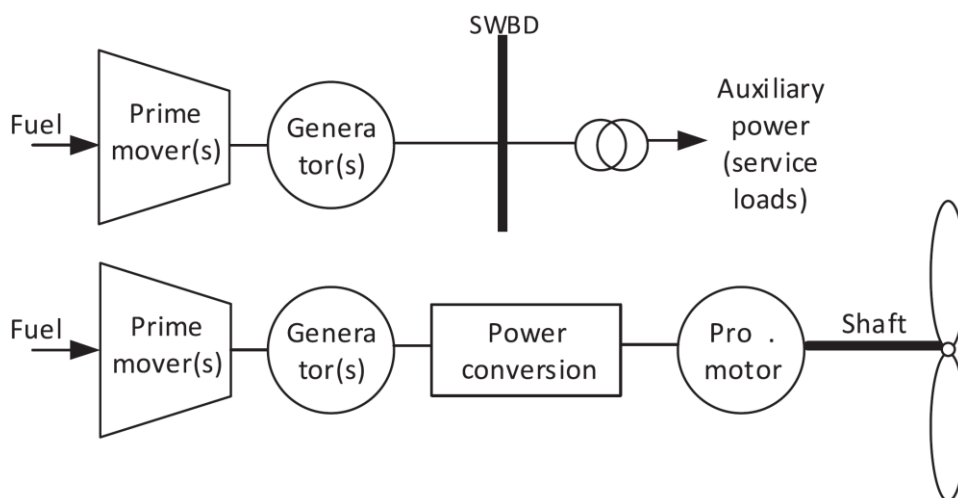


Kuva 7. Vyöhykerakenne [12]

Merenkulkualuksien sähköjakelujärjestelmien suunnittelutopologioita voidaan tarkastella myös propulsio-järjestelmän näkökulmasta suhteessa sähköjakeluverkkoon. Erotetussa sähköjakelujärjestelmässä on kaksi toisistaan erillistä sähköjakelujärjestelmää. Integroidussa sähköjakelujärjestelmässä on ainoastaan yksi sähköjakelujärjestelmä. Näille suunnittelurakenteille on historialliset syyt. [13]

4.3.1 Erotettu sähköjakelujärjestelmä

Erotetussa sähköjakelujärjestelmässä on kaksi osajärjestelmää, jotka syöttävät sähköenergiaa propulsio-järjestelmään ja avustaville kuormille. Kuvassa 8 on erotetun sähköjakelujärjestelmän rakenne. Osajärjestelmien toisistaan erotetut generaattorit tuottavat propulsioon ja avustavien kuormien vaatiman sähköenergian. Osajärjestelmillä varmistetaan ohjattavuus. Erotetussa sähköjakelujärjestelmässä noin 90 % laivalla tuotetusta sähköenergiasta on varattu propulsio-järjestelmälle. Välttämättömien avustavien kuormien lisääminen on kuitenkin hankalaa, eikä sähköenergiaa välttämättä riitä kaikille osasysteemin tarpeellisille kuormille. [5, 13]

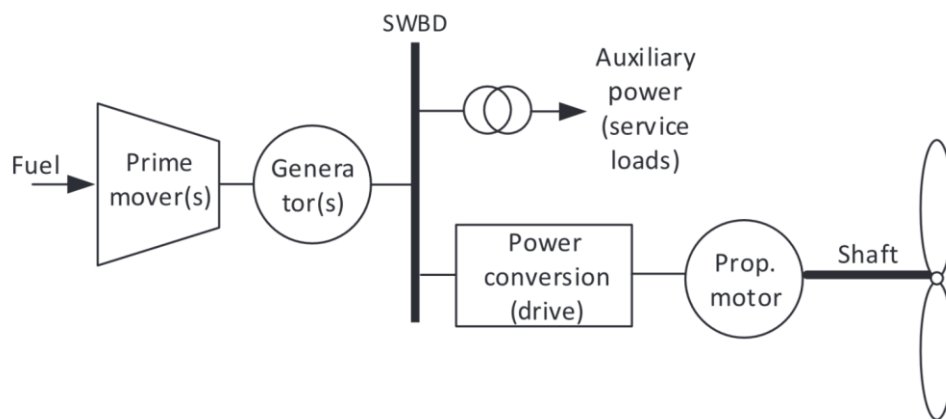


Kuva 8. Erotettu sähköjakelujärjestelmä [13]

Erotettu sähköjakelujärjestelmä on perinteinen topologia merenkulkualuksissa. Laitoissa, joissa käytettiin erotettua sähköjakelujärjestelmää, oli alun perin mekaaninen propulsio-järjestelmä. Mekaaninen propulsio-järjestelmä korvattiin sähköisellä propulsio-järjestelmällä, joka rakennettiin muun sähköjakelujärjestelmän rinnalle toisistaan erotetusti. Sähköisellä propulsio-järjestelmällä saavutetaan nopeampi vasteaika kuin mekaanisella propulsio-järjestelmällä. [5, 13]

4.3.2 Integroitu sähköjakelujärjestelmä

Integroidussa sähköjakelujärjestelmässä eli IPS:ssä (Integrated Power System) aluksen propulsio ja avustavien kuormien vaatima sähköenergia tuotetaan samalla generaattorilla. Sähköenergia jaetaan kuormille suunnitellussa tärkeysjärjestyksessä varmistaakseen erityisesti ohjattavuus ja turvallisuus. Integroitu sähköjakelujärjestelmä parantaa sähkötehon joustavuutta ja saatavuutta. Integroitu sähköjakelujärjestelmä on esitetty kuvassa 9. [5, 13]



Kuva 9. Integroitu sähköjakelujärjestelmä [13]

Integroituun sähköjakelujärjestelmään voidaan liittää helposti jälkeenpäin asennettuja kuormia. Tilapäisten kuormien sähköenergian saatavuus voidaan varmistaa energiavaroilla tai polttomoottorilaitoksilla, jotka voidaan kytkeä tarvittaessa. Integroidussa sähköjakelujärjestelmässä tarvitaan vähemmän polttomoottorivoimalaitoksia kuin saman tehoisessa erotetussa sähköjakelujärjestelmässä. Polttoaineen kulutus vähenee, mikä lisää taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. [5, 13]

4.4 Komponentit

Nykyisissä DC-sähköjakelujärjestelmissä käytetyissä komponenteissa on hyvien puolien lisäksi myös huonoja puolia, jotka liittyvät ohjattavuuteen, sähköiseen dynamiikkaan tai liian korkeaan hintaan. Tehoelektroniikan uusia erilaisia sovelluksia kehitetään jatkuvasti ja puolijohdetutkimuksia tehdään paljon. Tehoelektroniikkaan vahvasti sidonnainen laivan DC-sähköjakelujärjestelmän hyötysuhde kehittyy, kun uusien komponenttien sopevuutta testataan. [13]

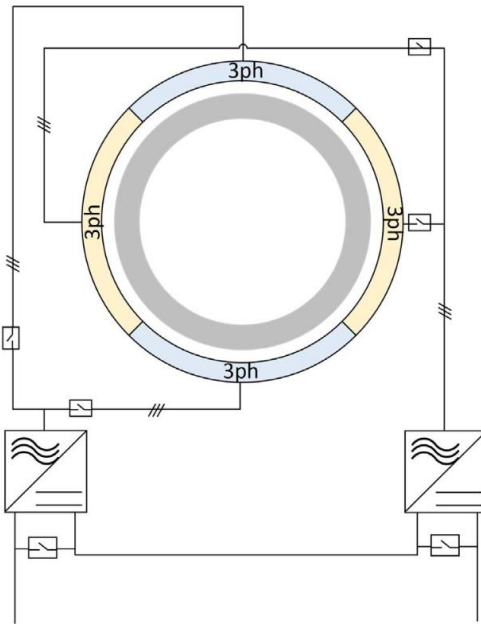
4.4.1 Polttomoottorivoimalaitokset

Laivan generaattoreita pyörittää yleensä diesel- tai turbiinimoottorit. Polttomoottorista saadaan paras hyötysuhde ja alhaisin polttoaineenkulutus, kun polttomoottori toimii optimoidulla vakiopyörimisnopeudella. Polttomoottorin vakiopyörimisnopeutta pitää yllä automaattinen nopeuden säätäjä eli ASR (automatic speed regulator). [7] Laivan polttomoottorit käyttävät polttoaineena usein dieseliä, raskasta polttoöljyä tai maakaasua. [14]

Generaattoreilla tuotetaan laivan sähköjakelujärjestelmän tarvitsema sähköenergia. Avonapainen tahtigeneraattori on yleisesti käytetyin generaattori. Pysyvästi magnetoitua tahtigeneraattoria pidetään hyvänä vaihtoehtona DC-sähköjakelujärjestelmään. Pysyvästi magnetoitu tahtigeneraattori parantaa hyötysuhdetta, luotettavuutta ja vähentää käyttökustannuksia. Pysyvästi magnetoitua tahtigeneraattoria voidaan käyttää suurilla pyörimisnopeuksilla. [14, 15]

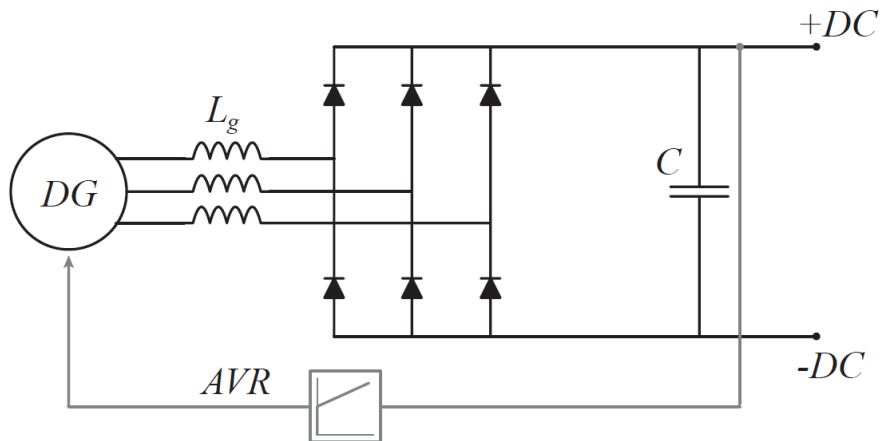
4.4.2 Tasasuuntaajat

Tasasuuntaajilla muutetaan generaattoreiden tuottama vaihtovirta tasavirraksi. Kuvassa 10 on generaattorin kytkentä MVDC-sähköjakeluverkkoon kahden sarjaan kytkettyjen IGBT-tasasuuntaajien kautta. Laivan tasasähköön perustuvassa jakelussa tasasuuntaajilla on vaikutusta sähköenergian laatuun. Oikeilla tasasuuntaajien valinnoilla saadaan aikaan joustava sähköjakelujärjestelmä ja oikosulkutilanteessa voidaan hyödyntää tasasuuntaajien ominaisuuksia. [14] Tasasuuntaajille on ominaista siltarakente. Laivan DC-sähköjakelujärjestelmään sopivia tasasuuntaajia ovat esimerkiksi dioditasasuuntaaja, tyristoritasasuuntaaja, aktiivinen tasasuuntaaja ja modulaarinen monitasoinen konvertteri. Suodatin on välttämätön kaikissa edellä mainituissa suuntaajissa paitsi modulaarisessa monitasoisissa konvertterissa. [16]



Kuva 10. Generaattorin kytkentä MVDC-sähköjakoalueeseen [15]

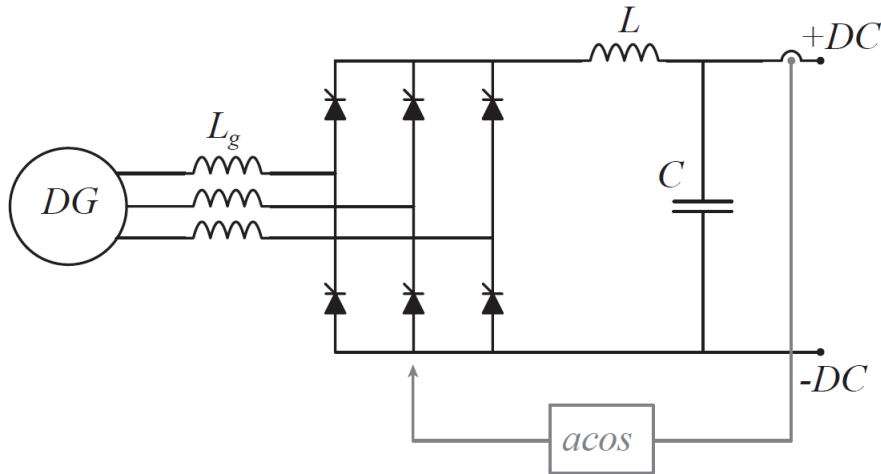
Kuvan 11 dioditasasuuntaaja on yksinkertaisin ja halvin tasasuuntaajatopologia. Dioditasasuuntaaja on passiivinen, joten sillä ei voi ohjata ulostulon jännitettä tai sisääntulon virtaa. Dioditasasuuntaajaa vaatii aina suodattimen. Dioditasasuuntaajaa käytetään soveluksissa, joissa on yksisuuntainen tehonsiirto. LVDC-sähköjakoaluejärjestelmissä voidaan käyttää dioditasasuuntaajaa osana 12-pulssin dioditasasuuntaajaa rinnan tai sarjaan kytkettynä. [14]



Kuva 11. Dioditasasuuntaaja [14]

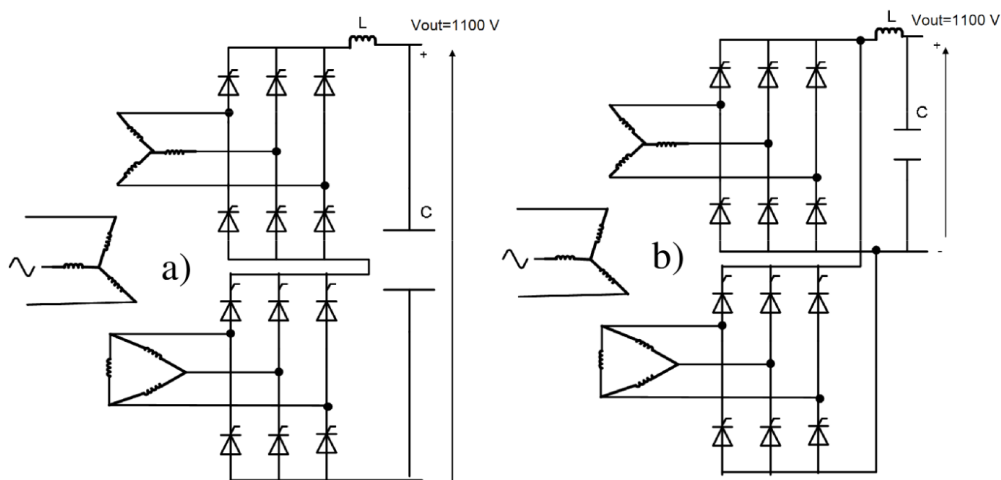
Tyristoritasasuuntaajassa on diodisillan tilalla tyristorisilta. Tyristoreilla voidaan säätää jännitettä kapealla alueella. Normaleissa olosuhteissa se toimii vastaavalla tavalla kuin dioditasasuuntaaja. Tyristoritasasuuntaajaa käytetään vain LVDC-sähköjakoaluejärjestelmissä ja matalajännitteisen jakeluosan konvertterina MVDC- ja LVDC-sähköjakoaluejärjestelmissä. [14]

Kuvan 12 6-pulssisessa tyristoritasasuuntaajassa kuusi tyristoria on kytketty siltarakenteeseen. Tyristorisiltaa syötetään kolmivaiheisella vaihtovirralla, jolloin ulostulona saadaan tasavirtaa. 6-pulssisen tyristoritasasuuntaajan rakennetta hyödynnetään laivan 12-pulssisessa tyristoritasasuuntaajassa, jolloin saadaan 6-pulssista tyristoritasasuuntaajaa parempi sähkön dynamiikka. [17]



Kuva 12. Tyristoritasasuuntaaja [14]

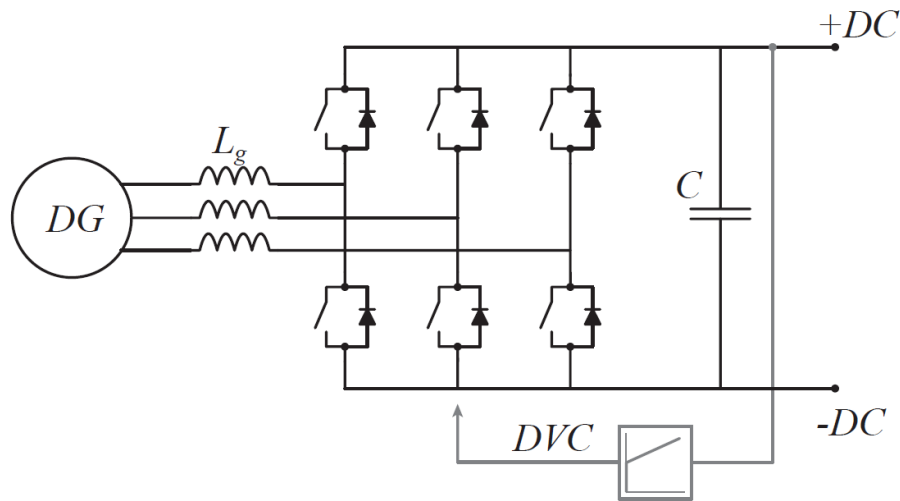
12-pulssinen tyristoritasasuuntaaja on esitetty kuvassa 13. 12-pulssinen tyristori- tai dioditasasuuntaaja koostuu vaiheensiirtomuuntajasta ja kahdesta samanlaisesta 6-pulssisesta tasasuuntaajasta. Vaiheensiirtomuuntajassa on kaksi toisiokäämitystä, joista yksi on yhdistetty Y-haaraan ja toinen Δ -haaraan. Toisiokäämityksen pääjännite on yleensä puolet ensiökäämityksen pääjännitteestä. [17] 6-pulssiset tasasuuntaajat voivat olla kytketty rinnan tai sarjaan. Vaiheensiirtomuuntaja syöttää tyristorisiltatasasuuntaajia kolmivaiheisella jännitteellä 30° :n vaihdesiirrolla. [18]



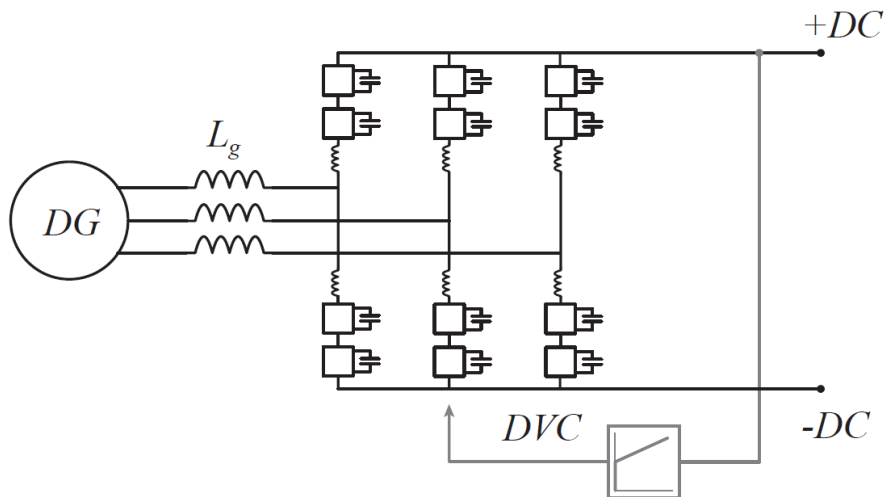
Kuva 13. 12-pulssinen tyristoritasasuuntaaja [18]

Vaihesiirtomuuntajan avulla poistetaan harmonisia värähtelyitä ja THD-arvo on 12-pulssisessa tyristoritasasuuntaajassa parempi kuin 6-pulssisessa tyristoritasasuuntaajassa [17]. Lisäksi tehokerrointa parannetaan LC-suodattimella, joka asennetaan tasasuuntaajan ja DC-väylän väliin. Raskas matalataajuuksinen vaiheensiirtomuuntaja rajoittaa jännitteen säätötoiminta-aluetta ja vaihtovirran ohjausta. Tyristorien suuret syttymiskulmat laajentavat jännitteen toiminta-aluetta, mutta tehokerroin huononee. [18]

Aktiivinen tasasuuntaaja on esitetty kuvassa 14. Aktiivisessa tasasuuntaajassa käytetään aktiivisesti ohjattavia IGBT-kytkimiä. Aktiivinen tasasuuntaaja on diodi- ja tyristoritasasuuntaajiin verrattuna kalliimpi. Aktiivista tasasuuntaaja käytetään esimerkiksi osana AFE-konvertteria aktiivisen suodattimen kanssa tai DC/DC-muuntajan kokoonpanossa. Aktiivisessa tasasuuntaajassa kaksisuuntainen tehonsiirto on mahdollista rajoitetusti. Aktiivinen tasasuuntaaja ei voi ohjata virtaa vikatilanteessa. [14, 19]



Kuva 14. Aktiivinen tasasuuntaaja [14]



Kuva 15. Modulaarinen monitasoinen konvertteri [14]

Modulaarista monitasoista konvertteria eli MMC:ta (Modular Multilevel Converter) käytetään laivojen MVDC-sähkönjakelujärjestelmissä. Modulaarinen monitasoinen konvertteri muodostaa usean jännitetason avulla siniaallon muotoista vaihtosähköä. MMC on joustava komponentti 1,5—15 kV:n jännitetasoille. Moduulien rakentamiseen voidaan käyttää erilaisia puolijohdekytkimiä käyttötarkoituksesta riippuen. Modulaarisen monitasoisen konvertterin hyötysuhde on korkea matalilla kytkentätaajuuksilla. MMC:ssa kaksisuuntainen tehonsiirto on mahdollista ja se ei tarvitse ulostulosuodatinta. MMC:lla on kyky varastoida energiaa. Modulaarinen monitasoinen konvertteri on esitetty kuvassa 15 [8, 14]

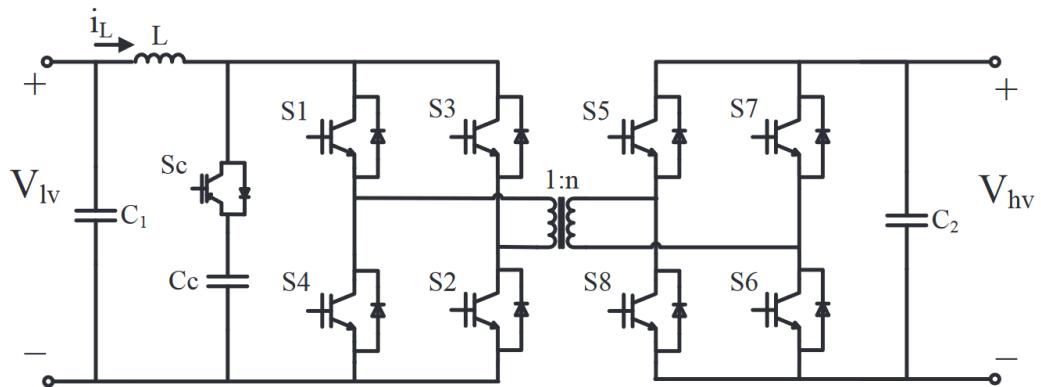
4.4.3 Vaihtosuuntaajat

Vaihtosuuntaajilla muutetaan DC-puskurin tasavirta yksi- tai kolmivaiheiseksi vaihtovirraksi riippuen kuorman tarpeesta. Kaksitasoisen vaihtosuuntaajan topologia saadaan kääntämällä aktiivisen tasasuuntaajan topologian suunta. IGBT-kytkimiä ohjataan PWM-ohjaussignaalilla niin kuin aktiivisessa tasasuuntaajassa. [20]

Laivan vaihtosähköä käyttävien kuormien toiminta voi olla ohjattavuuden ja turvallisuuden kannalta tärkeä. Vaihtosuuntaajan tuottaman vaihtosähkön dynamiikan on vastattava kuormien vaatimuksia. Monitasoisen tasasuuntaajan tuottaman vaihtosähkön aallonmuoto on hyvin lähellä siniaaltoa ja siinä on alhainen THD. [20]

4.4.4 DC/DC-muuntajat

DC/DC-muuntajalla lasketaan tai nostetaan jännitetasoa. DC/DC-muuntajan avulla kytetään hybridisähkölaivan energiavarausta tai matalajännitteinen osasähköjakelu pääsähköjakelujärjestelmään [21]. Laivan sähköjakelujärjestelmän eristämättömät kaksisuuntaiset DC/DC-muuntajat ovat buck-, boost- ja buck-boost-tyyppisiä. Ilman sähköistä erotusta kaksisuuntaiset DC/DC-muuntajat eivät riitä suurelle jännite-erolle. Jännitteenmuutosuhde on eristämättömissä pienempi kuin 10. [22, 23]



Kuva 16. kaksisuuntainen kokosilta DC/DC-muuntaja [22]

MVDC-sähköjakelujärjestelmän ja matalajännitteisen energiavarausta väliin kytetään sähköisesti eristetty kaksisuuntainen DC/DC-muuntaja. Eristetty kaksisuuntainen kokosilta DC/DC-muuntaja on esitetty kuvassa 16. Kahden kaksisuuntaisen aktiivisen konverterin väliin on kytketty suuritaajuuksinen muuntaja. [22]

5. EDUT JA HAITAT

Jokaisessa sähköisessä sovelluksessa on aina hyvien puolien lisäksi myös huonoja puolia. Huonot puolet voidaan minimoida, mutta ei poistaa. Tarkastellaan DC-sähköjaka-
lunjärjestelmän etuja ja haittoja verrattuna AC-sähköjaka-
lunjärjestelmään.

5.1 Johtimet

DC-sähköjaka-
lunjärjestelmässä sähköenergian dynamiikka on parempi kuin vaihtovirta-
järjestelmissä. Tasavirtajärjestelmissä ei ole perustaajuutta ja vaihe-eroa. Vaihe-ero ai-
heuttaa reaktiivista tehoa. Vaihtovirtajärjestelmissä reaktiivinen virta kasvattaa häviöitä
ja vähentää sähköjaka-
lun kapasiteettia. Lisäksi vaihtovirtajärjestelmän johtimissa syn-
tyy virranahdistusta. [13] Virranahdistuksessa taajuuden kasvaessa johtimen tehollinen
pinta-ala pienenee. Virranahdistuksen vaikutus on huomattava suurilla taajuuksilla pak-
suissa johtimissa, jolloin johtimen tehollinen vastus kasvaa. [24]

DC-sähköjaka-
lunjärjestelmässä johtimilla on ainoastaan resistiivistä kuormaa. Reaktii-
vistä virtaa ei ole, joten se ei vähennä johtimien sähköjaka-
lun kapasiteettia eikä kasvata
häviöitä. Tasavirtajaka-
lunjärjestelmässä sama kapasiteetti voidaan saavuttaa pienemmällä
kaapelin määrällä ja painolla. Johtimien perustaajuuden puuttuessa johtimissa ei tapahdu
virranahdistusta. [13] Virranahdistus on kuitenkin otettava huomioon suojauksessa, jos
viallinen tasoituskondensaattori aiheuttaa muuttuvaa virtaa [24].

5.2 Oikosulkuilanteet

Vaihtovirtajärjestelmässä kaapelin impedanssi aiheuttaa virrasta riippuvaisen jännitteen
aleneman. Impedanssi rajoittaa luonnostaan oikosulkuvirtoja. Tasavirtajärjestelmän joh-
timissa on ainoastaan pieni resistiivinen kuorma. Vähäisen kuorman muista hyödyistä
huolimatta johtimet eivät kuitenkaan rajoita oikosulkuvirtoja. Oikosulkuvirtojen rajoitta-
minen ja virtapiirin katkaiseminen on lisäksi hankalampaa virran suunnanmuutoksen
puuttuessa. Perinteisen virrankatkaisimen sijaan käytetään monimutkaisempaa tehoelekt-
roniikkaa. Oikosulkuvirtoja voidaan hallita pienemmillä virran suuruuksilla kuin vaihto-
virtajärjestelmissä. Suuret hallitsemattomat oikosulkuvirrat vaarantavat tehoelektroniik-
kaa sisältävät komponentit. [13]

Huolellisella suunnittelulla ja oikein valituilla komponenteilla saadaan aikaan luotettava
sähköjaka-
lunjärjestelmä. DC-sähköjaka-
lunjärjestelmän oikosulkuolosuhteet riippuvat
valitusta konvertteritopologiasta. Oikosulkuilanteessa tasasuuntaajan tyristorisillan syt-
tymiskulmaa voidaan ohjata, jolloin DC-väylän virta saadaan vähennettyä nolnaan. Oh-
jaamattomassa siltarakenteessa generaattori syöttää virtapiiriä niin kauan kun se tuottaa

jännitettä. Generaattorin impedanssi rajoittaa oikosulkuvirran suuruutta. Tyristori-tasasuuntaajissa, dioditasasuuntaajissa ja IGBT-tasasuuntaajissa ulostulosuodatin on pakollinen harmonisten värähtelyjen vuoksi. Oikosulkutilanteessa suodattimen kondensaattoriin ja käämiin varastoituu huomattava osa sähköenergiasta, jolloin oikosulkuvirta pienenee. Suodattimet lisäävät tilantarvetta, painoa ja hintaa. [16]

Modulaarirakenteisessa monitasoisessa konverterissa eli MMC:ssa (Modular Multi-level Converter) on riittävästi tasoja ja pulssitaajuus on suuri, joten suodatinta ei tarvita. Neljän kvadrantin MMC pystyy säätämään moduulikondensaattoreiden sähköenergian varastointikykyä DC-väylän oikosulussa. DC-sähköjakelujärjestelmissä, joissa on suuri riski vikatilanteeseen ja vaaditaan nopeaa toimintakyvyn palautumista, on neljän kvadrantin MMC tarpeellinen. Kahden kvadrantin MMC ei ole yhtä hyvä suojaamaan oikosulkutilanteessa, koska se käyttäytyy diodisillan tavoin. [16]

5.3 Paino ja tilantarve

Lisääntyneen tehoelektroniikan määrä laivojen sähköjakelujärjestelmissä aiheuttaa tilan puutetta. Laivassa olevien tehoelektroniikkakomponenttien tärkeimpiä valintakriteereitä on komponentin tilavuus ja paino. Esimerkiksi perinteiset vaihtovirtamuuntajat ovat raskaita ja isoja. Muuntajien öljyjäähdytys aiheuttaa paloturvallisuus- ja ympäristöriskin vikatilanteessa. [12, 14]

Muuntajien ja AC-sähköjakelujärjestelmän pääkytkintaulun poistaminen ovat DC-sähköjakelujärjestelmän tärkeimmät edut. DC-sähköjakelujärjestelmän dieselgeneraattoreiden koko ja paino ovat paljon pienempiä kuin AC-sähköjakelujärjestelmissä. DC-sähköjakelujärjestelmällä saadaan aikaiseksi kevyempi rakenne ja tilaa jää myös uusille laitteistolaajennuksille, kuten esimerkiksi energiavarastojärjestelmille. [12, 15]

5.4 Harmoniset yliaallot

Epälineaarit kuormat aiheuttavat harmonisia yliaalloja ja lisäävät THD-arvoa (Total Harmonic Distortion). Tehoelektroniikan komponentit ovat epälineaarisia kuormia. THD-arvo kertoo harmonisten taajuuksien ja perustaajuuden amplitudien välisen suhteen. THD-arvo lasketaan kaavalla 1

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{100} X_i^2}}{X_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

jossa X_i on signaalin Fourier-sarjan harmoninen komponentti. THD-arvo pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. THD-arvon kasvu aiheuttaa lukuisia sivuvaikutuksia. Harmoniset yliaallot muun muassa lisäävät häviöitä sähkökoneissa ja johtimissa, lyhen-

tävät komponenttien elinikää ja huonontavat laivan sähkönjakelujärjestelmän hyötysuhdetta, jolloin kulutus ja päästöt kasvavat. Korkea THD-arvo saattaa rikkoa laivan sähkönjakelujärjestelmän komponentit tai pahimmassa tapauksessa aiheuttaa tulipalon. [13, 25]

Jännite- ja taajuusmuuttajat aiheuttavat harmonisia yliaaltoja eniten. 6- ja 12-pulssiset tasasuuntaajat aiheuttavat matalataajuisia harmonisia ylivärähtelyn komponentteja kertaluokilla $6k \pm 1$ ja $12k \pm 1$, missä $k = 1, 2, 3 \dots$. Kuvassa 3 esitetyssä laivan AC-sähkönjakelujärjestelmässä on 12-pulssinen muuttaja. Kuvan 2 DC-sähkönjakelujärjestelmässä on 12-pulssinen tasasuuntaaja voitu poistaa. Lisäksi DC-sähkönjakelujärjestelmään on lisätty AFE-muuttaja. AFE-muuttajan aktiivinen suodin voi suodattaa mitä tahansa taajuutta, jolloin THD-arvo pienenee. AFE-muuttaja poistaa matalat harmoniset yliaallot ja tuottaa korkeita yliaaltoja. Korkeat yliaallot voidaan poistaa passiivisella suodattimella. DC-sähkönjakelujärjestelmässä voidaan vähentää harmonisia värähtelyjä ja parantaa THD-arvoa. [2, 25]

5.5 Integroituvuus

AC-sähkönjakelujärjestelmissä generaattoreiden pyörimisnopeus täytyy synkronisoida sähkönjakelunverkon taajuuteen. DC-sähkönjakelujärjestelmissä voidaan dieselgeneraattoreita käyttää parhaan hyötysuhteen tarjoavalla pyörimisnopeudella. Tällöin polttoaineen kulutusta voidaan pienentää jopa 20 %. Suurinopeuksisia kaasuturbiineja ja generaattoreita käytettäessä AC-sähkönjakelujärjestelmän taajuuden ohjaus vaatii vaihteiston alentamaan pyörimisnopeutta. Tasasähköön perustuvassa sähkönjakelussa voidaan käyttää suurinopeuksisia generaattoreita ja kaasuturbiineja ilman alennusvaihteistoa. Generaattorista saadaan lyhyempi ja kooltaan pienempi. [14, 15]

Vaatus kehittää hyötysuhteeltaan parempia ja vähäpäästöisempiä merenkulkualuksia lisää hybridilaivojen kehitystä. DC-sähkönjakelujärjestelmän integroituvuus mahdollistaa erilaisten energianlähteiden yksinkertaisemman liittämisen ja käytön.[22] Kappaleessa 6 käsitellään mahdollisuuksia tarkemmin.

6. INTEGROITUVUUDEN MAHDOLLISUUDET

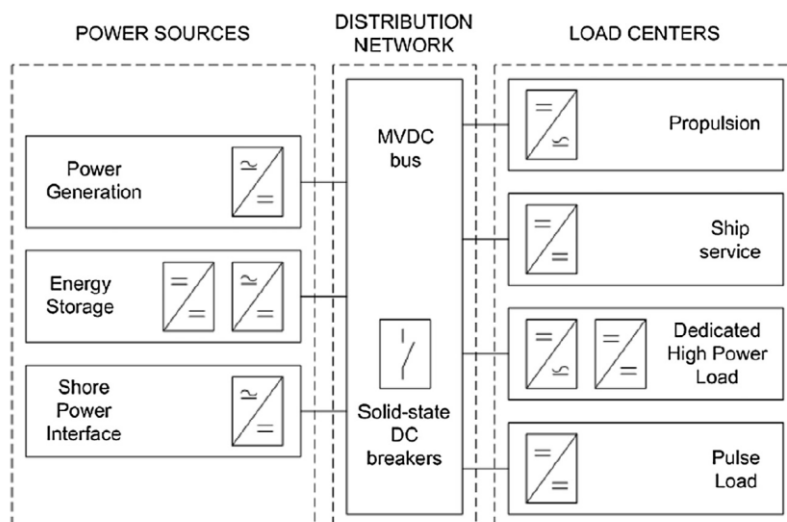
Laivan DC-sähkönjakelujärjestelmä integroituu hyvin tulevaisuuden järjestelmiin. Tarkastellaan uusiutuvan energian ja energiavarastoiden hyödyntämistä DC-sähkönjakelujärjestelmässä. Käsitellään DC-sähkönjakelujärjestelmän liittämistä satamajakelujärjestelmään päästöttömän satamatekniikan mahdollistamiseksi.

6.1 Uusiutuva energia ja energiavarastot

Kiinnostus uusiutuvan energian hyödyntämiseen laivoissa on lisääntynyt. Merenkulkualuksissa voidaan hyödyntää aurinkoenergiaa, tuulivoimaa, meren lämpöenergiaa ja aaltoenergiaa. DC-sähkönjakelujärjestelmän yksinkertainen integroituvuus uusiutuviin energialähteisiin lisää kiinnostusta DC-sähkönjakelujärjestelmiin merenkulkualuksissa. Uusiutuva energialähde voidaan liittää lataamaan energiavarastoja tai kiinnittää konvertterin kautta suoraan DC-väylään. Uusiutuvaa energiaa voidaan käyttää hybridi- tai täys-sähköisissä laivoissa. [26, 27]

Energiavarastojen avulla laivan hyötysuhde saadaan optimoitua. Nopeisiin sähköenergian tarpeisiin voidaan käyttää energiavarastoja ilman, että muuttaa dieselgeneraattoreiden toiminta-aluetta. Esimerkiksi satama-alueella laivan turvallinen telakoiminen vaatii useita laivan etenemisnopeuden suuruuden ja suunnan muutoksia. Päästötön satamaan saapuminen vähentää merkittävästi polttoainekulujen lisäksi myös satama-alueen päästöjä. [22]

Energiavarastoina voidaan käyttää akkuja, superjohtavia käämejä, vauhtipyöriä ja superkondensaattoreita. Energiavarastotyyppinä voidaan käyttää yksittäin tai hybridinä. [28] Akun ja vauhtipyörän yhdistelmällä saadaan parempi suorituskyky verrattuna muihin hybridisovelluksiin. Vauhtipyörän ja superkondensaattorin yhdistelmä voi aiheuttaa taajuuden heilahtelua. [29]



Kuva 17. Hybridi DC-sähkönjakelujärjestelmä [15]

Energiavarasto voidaan liittää DC-sähkönjakelujärjestelmässä DC/DC-konvertterin tai AC/DC-konvertterin kautta DC-väylään riippuen energiavarastotyypistä. AC-sähkönjakelujärjestelmässä energiavarasto voidaan liittää AC-väylään kaksisuuntaisen DC/AC-konvertterin kautta, mutta tehonlähteiden vaihekulman synkronisointi monimutkaistaa yhteen kytkemistä ja irrottamista. Synkronisointikomponentit lisäävät energiavarastojärjestelmän painoa ja kokoa. DC-sähkönjakelujärjestelmää hybridikäytössä pidetään hyötysuhteeltaan, luotettavuudeltaan, painoltaan ja tilan vaatimuksiltaan parempana vaihtoehtona. Kuvassa 17 on esitetty laivan tasasähköön perustuva hybridisähkönjakelujärjestelmä. Tulevaisuudessa myös täysin sähköiset laivat lisääntyvät. DC-sähkönjakelujärjestelmä on täyssähköisissä laivoissa kannattava valinta. [15]

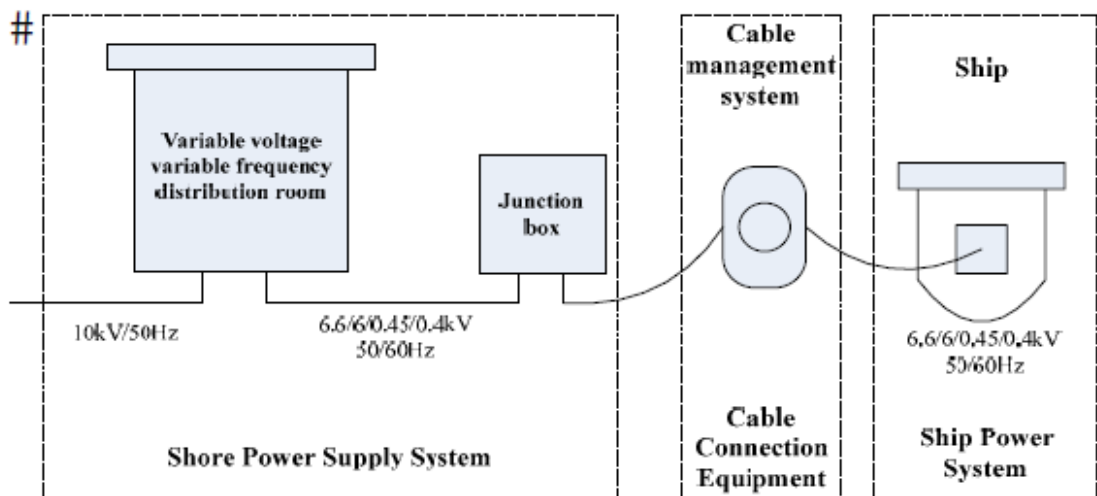
6.2 Satamaverkkoon liittäminen

Tavallisesti laivan sähköjakeluverkko on jatkuvasti täysin itsenäinen ja laivan dieselgeneraattorit vastaavat sähköntuotannosta myös satamassa. Dieselgeneraattorit aiheuttavat satama-alueella päästöjä. Merenkulkualusten aiheuttamat päästöt ovat erityisen haitallisia satama-alueella miehistön, matkustajien ja lähiasutuksen terveydelle sekä ympäristölle. [30] Dieselgeneraattorit tuottavat hiilimonoksidia, typenoksiedeja, rikkioksidia, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, otsonia ja pienhiukkasia [31]. Lisäksi dieselgeneraattorit aiheuttavat valtavaa melua ja tärinää satama-alueella [30].

Taloudellisesti laivojen käyttöaste pyritään pitämään mahdollisimman korkeana. Laivan satamassa oloaikaa pidetään mahdollisimman lyhyenä. Rahdin purkamiseen ja lastaamiseen sekä huoltotoihin kuluu aikaa kuitenkin suhteellisen runsaasti. Laivan liittäminen satamaverkkoon vähentäisi satama-alueen päästöjä ja lisäisi taloudellista kannattavuutta. Sataman sähköjakeluverkkoon liitetty laiva käyttää dieselgeneraattoreiden tuottaman

sähköenergian sijaan sataman sähköjakeluverkon sähköenergiaa. Taloudellinen kannattavuus saattaa vaihdella satamakohtaisesti, jos dieselgeneraattoreiden käyttämän polttoaineen hinta on alhaisempi kuin paikallinen sähkön hinta. [31]

Kuvassa 18 on esitetty satamaanliittämisen yleinen periaatekuva. Laivojen, joissa on AC-sähköjakelujärjestelmä, liittäminen sataman sähköjakelujärjestelmään on monimutkaista. Sataman ja aluksen sähköjakelujärjestelmien on oltava samassa vaiheessa. Taajuuksien ja jännitteiden arvot ovat yhtä suuria. Laivojen sähköjakelujärjestelmät toteutetaan usein eri jännitteillä ja taajuuksilla, joten sataman sähköjakelujärjestelmän tulee olla muunneltavissa taajuudeltaan ja jännitteeltään. [30]



Kuva 18. Periaatekuva sataman sähköjakelujärjestelmään liittamisestä [30]

DC-sähköjakeluun perustuvien laivojen liittäminen sataman sähköjakelujärjestelmään vähentäisi tarvittavia komponentteja ja yksinkertaistaisi liittämistä. Taajuuksien ja vaiheeron ei tarvitse olla yhtä suuret, vain jännitetason tarvitsee olla sama kuin laivan DC-sähköjakelujärjestelmässä. Sataman sähköjakeluverkko liitetään kuvan 17 tavoin tasa-suuntaajan kautta laivan sähköjakeluverkkoon. [15]

7. YHTEENVETO

Kiinnostus DC-sähköjakelujärjestelmiin laivoissa on lisääntynyt uudelleen tehoelektronikan kehittymisen myötä. DC-sähköjakelujärjestelmän avulla tavoitellaan parempaa sähköistä hyötysuhdetta, joka vaikuttaa polttoaineen kulutukseen. AC-sähköjakelujärjestelmässä tarvitaan enemmän komponentteja ohjattavuuden takaamiseksi. DC-sähköjakelujärjestelmissä ei ole raskaita ja kookkaita muuntajia tai isoa pääkytkintaulua, jotka ovat AC-sähköjakelujärjestelmissä. DC-sähköjakelujärjestelmässä on enemmän tilaa myös muille komponenteille, kuten esimerkiksi energiavarastoille.

Sähköjakelujärjestelmän sähköenergian dynamiikka riippuu käytetyistä komponenteista. 12-pulssiset diodi- ja tyristoritasasuuntaajat aiheuttavat harmonisia ylivärsähtelyitä ja niitä suodatetaan suodattimilla. DC-sähköjakelujärjestelmissä hyödynnetyn AFE-konvertterin aktiivisen suodattimen avulla saadaan vähennettyä matalataajuisia harmonisia yliaaltoja. Modulaarisella monitasoisella konvertterilla saadaan muodostettua sinimuotoista aaltomuotoa, jolloin THD-arvo on pieni. Modulaarinen monitasoinen konvertteri on suhteellisen tuore ja kallis tekniikka. Erilaisia uusia konvertteritopologioita kehitetään ja puolijohdetutkimuksen avulla hyötysuhdetta saadaan paremmaksi. Oikein valituilla komponenteilla voidaan suojata sähköjakelujärjestelmää oikosulkuvirroilta.

DC-sähköjakelujärjestelmien integroituvuus on merkittävin kiinnostavuuden lisääjä. Generaattoreita voidaan käyttää optimaalisella nopeudella, jolloin saadaan vähennettyä polttoaineen kulutusta. Uusituvan energian hyödyntäminen ja satamaan liittäminen on yksinkertaisempaa kuin AC-sähköjakelujärjestelmissä. Merenkulkualuksien DC-sähköjakelujärjestelmillä on valoisat näkymät tämän hetkisen kehityksen perusteella.

LÄHTEET

- [1] Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, pp. 127-142. Available (18.12.2018).
- [2] Progressing towards DC electrical systems for marine vessels, in: Energy Procedia, 2017, pp. 27-32. Available (18.12.2018).
- [3] C. Sulzberger, First Edison Lights at Sea: The SS Columbia Story, 1880-1907 [History], IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 13, Iss. 1, 2015, pp. 92-101. Available (18.12.2018).
- [4] E. Skjong, E. Rødskar, M. Molinas, T. A. Johansen, J. Cunningham, The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day, Proceedings of the IEEE, Vol. 103, Iss. 12, 2015, pp. 2410-2424. Available (18.12.2018).
- [5] IEEE Recommended Practice for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems, in: IEEE Std 1662-2016 (Revision of IEEE Std 1662-2008), 2017, pp. 1-68. Available (18.12.2018).
- [6] IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard--Design, in: IEEE Std 45.1-2017, 2017, pp. 1-198. Available (18.12.2018).
- [7] A. V. Grigoryev, S. M. Malyshev, R. R. Zaynullin, Unified ship power grids with alternators and DC power distribution, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1-3. Available (18.12.2018).
- [8] Y. Chen, Z. Li, S. Zhao, X. Wei, Y. Kang, Design and Implementation of a Modular Multilevel Converter With Hierarchical Redundancy Ability for Electric Ship MVDC System, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, Iss. 1, 2017, pp. 189-202. Available (18.12.2018).
- [9] N. Remijn, B. Krijgsman, Advantages of common DC busses on ships, 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), pp. 177-182. Available (18.12.2018).
- [10] IEEE Approved Draft Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships, in: IEEE P1709/D5, May 2018, 2018, pp. 1-48. Available (18.12.2018).
- [11] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, in: IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991), 2007, pp. 1-225.

- [12] F. D. Kanellos, G. J. Tsekouras, J. Prousalidis, Onboard DC grid employing smart grid technology: challenges, state of the art and future prospects, *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 5, Iss. 1, 2015, pp. 1-11. Available (18.12.2018).
- [13] E. Skjong, R. Volden, E. Rødskar, M. Molinas, T. A. Johansen, J. Cunningham, Past, Present, and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 2, Iss. 4, 2016, pp. 522-537. Available (18.12.2018).
- [14] U. Javaid, F. D. Freijedo, D. Dujic, W. van der Merwe, MVDC supply technologies for marine electrical distribution systems, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, Vol. 3, Iss. 1, 2018, pp. 65-76. Available (18.12.2018).
- [15] A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems, in: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, pp. 306-323. Available (18.12.2018).
- [16] V. Staudt, R. Bartelt, C. Heising, Fault Scenarios in DC Ship Grids: The advantages and disadvantages of modular multilevel converters. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 3, Iss. 2, 2015, pp. 40-48. Available (18.12.2018).
- [17] Bin Wu, *Multipulse SCR Rectifiers*, 2006. Available (18.12.2018).
- [18] D. Bosich, R. A. Mastromauro, G. Sulligoi, AC-DC interface converters for MW-scale MVDC distribution systems: A survey, 2017 *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, pp. 44-49. Available (18.12.2018).
- [19] K. O'Brien, R. Teichmann, S. Bernet, Active rectifier for medium voltage drive systems, *APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181)*, pp. 562 vol.1. Available (18.12.2018).
- [20] A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, pp. 1120-1141. Available (18.12.2018).
- [21] B. Zahedi, L. E. Norum, Voltage regulation and power sharing control in ship LVDC power distribution systems, 2013 *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-8. Available (18.12.2018).
- [22] Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems, in: *Journal of Power Sources*, 2014, pp. 341-354. Available (18.12.2018).
- [23] J. Lai, D. J. Nelson, Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, Iss. 4, 2007, pp. 766-777. Available (18.12.2018).
- [24] S. D. A. Fletcher, I. M. Elders, P. J. Norman, S. J. Galloway, C. D. Booth, G. M. Burt, J. McCarthy, J. E. Hill, The impact of incorporating skin effect on the fault analysis and protection system performance of DC marine and aerospace power systems,

10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change, pp. 1-5. Available (18.12.2018).

[25] M. Vražić, D. Vuljaj, Z. Hanic, M. Kovacic, Approach to ship power network optimization regarding total harmonic distortion, 2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS), pp. 207-211. Available (18.12.2018).

[26] Performance analysis of the combined supercritical CO₂ recompression and regenerative cycle used in waste heat recovery of marine gas turbine, in: Energy Conversion and Management, 2017, pp. 73-85. Available (18.12.2018).

[27] A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship, in: Energy, 2018, pp. 965-978. Available (18.12.2018).

[28] Z. Jingnan, Z. Ying, Control Strategy of Hybrid Energy Storage System in Ship Electric Propulsion, 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 1026-1030. Available (18.12.2018).

[29] A. T. Elsayed, O. A. Mohammed, A comparative study on the optimal combination of hybrid energy storage system for ship power systems, 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp. 140-144. Available (18.12.2018).

[30] F. Xu, Y. Lu, X. Xuan, P. Qiu, K. Tong, J. Xuan, Q. Chen, D. Jiang, Research on flexible medium-voltage DC distribution technology based shore-to-ship power supply system, IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 405-409. Available (18.12.2018).

[31] Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: State of the art and future solutions, in: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, pp. 840-852. Available (18.12.2018).