

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVE I
BRODOGRADNJE**

DOKTORSKI STUDIJ STROJARSTVA

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**DIMENZIONIRANJE I UPRAVLJANJE HIBRIDNIH
BRODSKIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

Tino Vidović

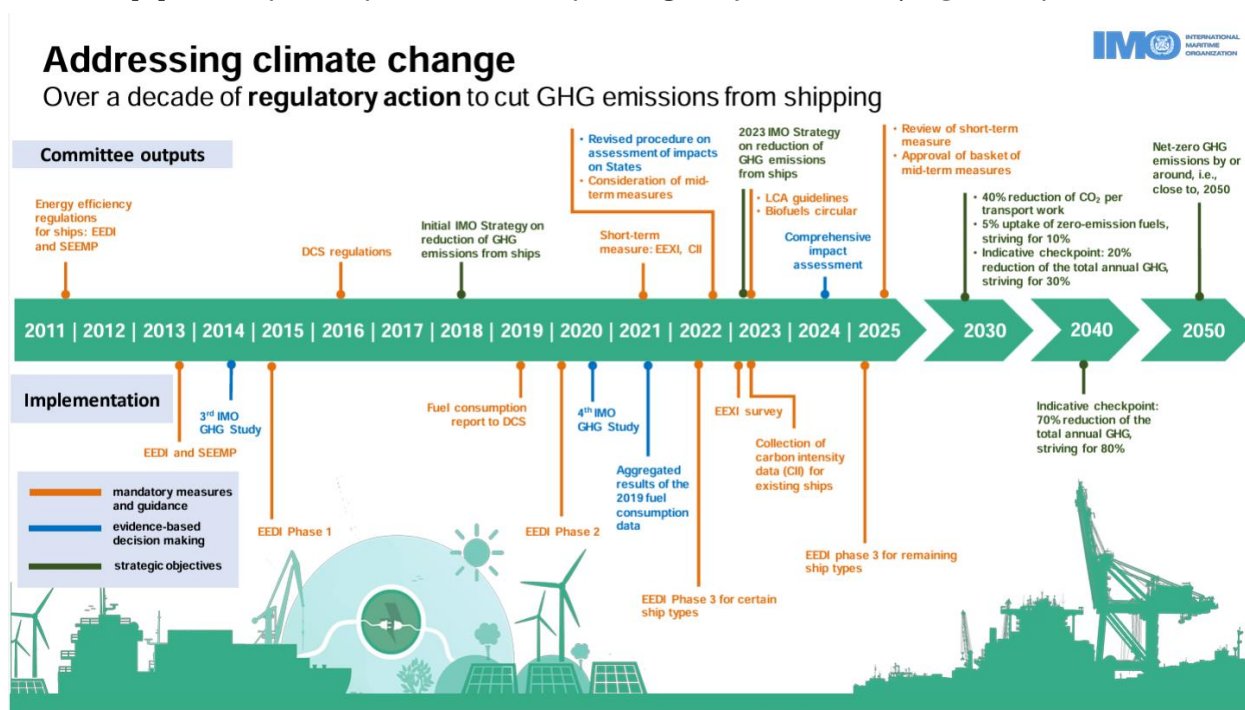
Split, studeni 2024.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Glavne komponente brodskih hibridnih sustava.....	4
2.1	Baterije	5
2.2	Motori s unutarnjim izgaranjem	7
2.3	Gorivni članci.....	8
3	Arhitekture pogonskih i energetske brodskih sustava.....	10
3.1	Mehanička propulzija	10
3.2	Električna propulzija	12
3.3	Hibridna propulzija	14
3.4	Elektropropulzija s hibridnim izvorima energije.....	15
3.5	Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije.....	17
3.6	Elektropropulzija s DC hibridnim izvorom energije	18
4	Modeliranje komponenti hibridnih brodskih sustava.....	20
4.1	Modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima	20
4.2	Metode temeljene na obradi podataka	23
5	Strategije upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava	26
5.1	Strategije temeljene na pravilima.....	26
5.2	Optimizirane strategije upravljanja.....	29
6	Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje	35
7	Dimenzioniranje hibridnih brodskih sustava	39
7.1	Analitički pristup	39
7.2	Metaheuristička optimizacija	41
8	Zaključak	45
	Literatura	46
	Popis kratica	56
	Sažetak	58
	Abstract	59

1 Uvod

Pomorski promet čini značajan udio u globalnoj trgovini, pri čemu se između 80% i 90% razmjene dobara odvija brodskim putem [1]. Energetska učinkovitost pomorskog prometa u odnosu na cestovni i zračni prijevoz jedan je od glavnih razloga njegove masovne primjene. Međutim, posljedica toga je i činjenica da je međunarodni pomorski promet postao najveći potrošač goriva u transportnom sektoru [2], pri čemu brodovi godišnje potroše oko 300 milijuna tona fosilnih goriva prema podacima Međunarodne pomorske organizacije (*engl. International Maritime Organization, IMO*). Ta visoka potrošnja dovodi do velikih količina emisija, pri čemu fosilna goriva čine osnovu pogonske energije brodova. Teško loživo ulje (*engl. Heavy fuel oil, HFO*) čini oko 72% potrošnje, brodsko dizelsko gorivo 26%, a ukapljeni prirodni plin (*engl. Liquefied natural gas, LNG*) svega 2% [3]. Iako LNG nudi veće energetske prednosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova (*engl. Greenhouse gases, GHG*) u usporedbi s HFO i dizelskim gorivom, njegova je primjena ograničena metanskim isparavanjem i tehničkim izazovima vezanim uz skladištenje na brodovima te su studije pokazale da LNG može smanjiti emisije sumpornih oksida (Sox) za 98%, dušikovih oksida (NOx) za 86%, te ugljikovog dioksida (CO₂) za 11%, u usporedbi s HFO [4]. Prema Četvrtoj IMO studiji stakleničkih plinova iz 2020., ukupni brodski promet (međunarodni, domaći i ribarski) emitirao je 1076 milijuna tona stakleničkih plinova, što je porast od 9,6% u odnosu na 2012. [5]. Uz to, prema podacima Europske agencije za okoliš (*engl. European*



Slika 1: Kronologija najvažnijih provedenih mjera i prikaz plana za smanjenja emisija stakleničkih plinova IMO-a do 2050. godine [6]

environment agency, EEA), pomorski promet bio je odgovoran za značajne udjele u ukupnim emisijama zagađivača u 2019. godini: 1,94% ugljičnog monoksida (CO), 20,98% dušikovih oksida, 11,80% sumpornih oksida, 4,63% čestica PM10 i 8,57% čestica PM2,5. Zbog svih ovih razloga Međunarodna pomorska organizacija godinama raznim regulativama poput Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (MARPOL), Indeksa projektiranja energetske učinkovitosti (*engl. The Energy Efficiency Design Indeks*, EEDI) i Plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda (*engl. Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP), nastoji što više ograničiti emisije stakleničkih plinova [7, 8]. Kronologija najvažnijih mjera i prikaz plana IMO-a d o 2050. godine može se vidjeti na slici 1.

Pomorska industrija danas razmatra tri osnovna pristupa za smanjenje emisija: primjena novih tehnologija, korištenje alternativnih goriva, te elektrifikacija pogonskih sustava uz korištenje više energetske izvora za sam pogon [9].

Direktne tehnološke inovacije za smanjenje emisija se koriste već dugi niz godina te su dovele već do značajnih smanjenja emisija poput recirkulacije ispušnih plinova (*engl. Exhaust Gas Recirculation*, EGR), korištenja scrubbera, dual-fuel sistema, miješanja vode i goriva u emulziju (*engl. Fuel Water Emulsion*, FWE), sustava povrata otpadne topline (*engl. Waste Heat Recovery*, WHR) te selektivne katalitičke redukcije (*engl. Selective Catalytic Reduction*, SCR) [10-12]. Unatoč njihovoj učinkovitosti u smanjenju stakleničkih plinova, ove tehnologije povećavaju kapitalne i operativne troškove zbog dodatnih instalacijskih troškova i troškova održavanja [13].

Alternativna goriva poput metanola, biodizela, amonijaka, bioplina, vodika i ukapljenog naftnog plina (*engl. Liquefied petroleum gas*, LPG) također se razmatraju kao obećavajuća rješenja zbog svog potencijala za smanjenje emisija [14, 15]. Etanol, kao najjednostavniji oblik alkohola, može se dobiti iz prirodnog plina, ugljena te različitih poljoprivrednih proizvoda. Unatoč visokoj zapaljivosti i kaloričnoj vrijednosti, njegova primjena i dalje predstavlja izazov zbog izrazite toksičnosti [16]. Korištenje metanola u motorima s unutarnjim izgaranjem istražuje se kao mogući način smanjenja emisija CO₂ [17]. S druge strane, vodik i amonijak, zbog svoje strukture bez ugljika, predstavljaju važna alternativna goriva u pomorskom sektoru. Biodizel se smatra najrazvijenijim biogorivom s obzirom na proces proizvodnje i opskrbi lanac [18]. Procesom esterifikacije, ulja i masti pretvaraju se u metil estere masnih kiselina, što rezultira gorivom sličnih svojstava dizelskom, ali s nižim emisijama SOx.

Hibridno-električni pogon, koji se koristi za brodove kako bi smanjio emisije štetnih plinova kroz smanjenje potrošnje goriva, predstavlja treću opciju. Usvajanjem ovakvih sustava ne samo za pogon, već i za opskrbu električnom energijom pomoćnih brodskih sustava, moguće je postići brojne prednosti, ne samo smanjenje emisija CO₂, NOx i drugih zagađivača [19-21]. Tehnologije hibridizacije u pomorskom sektoru uključuju upotrebu baterija, superkondenzatora, pa čak i zamašnjaka kao spremnika energije, koji se kombiniraju s motorima s unutarnjim izgaranjem i gorivnim člancima [22-24]. Iako

kombinacija alternativnih izvora energije povećava početne kapitalne izdatke, operativni troškovi smanjuju se zahvaljujući postizanju veće učinkovitosti sustava. Nedavne studije istražile su hibridne brodske pogonske sustave za poboljšanje učinkovitosti i smanjenje emisija. Hibridni dizel-električni sustavi mogu postići uštedu goriva od 6.9-8.8% ovisno o strategijama upravljanja, pri čemu brodovi za krstarenje poput jahta i kruzera pokazuju najveći potencijal [25]. Hibridni sustavi temeljeni na gorivnim člancima mogu povećati ukupnu energetska učinkovitost za 22.5% ako su dio kogeneracijskog postrojenja [26]. Eksperimentalni testovi na plovilima unutarnje plovidbe pokazali su da hibridni pogon u načinu rada "nulte emisije" može postići do četiri puta veću energetska učinkovitost u usporedbi s konvencionalnim pogonima, uz značajno smanjenje emisija i buke [27]. Modeliranje učinkovitosti potpuno električnih brodskih pogonskih sklopova na temelju podataka otkrilo je da hibridiziranje brodskih energetska sustava povećava ukupnu učinkovitost i operativnu fleksibilnost, pri čemu hibridni istosmjerni sustavi pokazuju daljnja poboljšanja zahvaljujući radu motora s promjenjivom brzinom [28].

Iako uvođenje hibridnih pogonskih sustava u brodove povećava složenost i troškove samih sustava, dekarbonizacija i novi regulativni zahtjevi čine ova rješenja neophodnima i održivima na duži rok. Važno je napomenuti da su hibridni pogonski sustavi relativno novi u pomorskom sektoru u usporedbi s automobilskom industrijom, no iskustva iz drugih industrija pridonose ubrzanju razvoja hibridnih energetska rješenja. Cilj ovog rada jest pružiti sveobuhvatan pregled trenutačnog stanja u području hibridnih propulzijskih tehnologija u brodarstvu te predstaviti odgovarajuće arhitekture i strategije upravljanja tim sustavima.

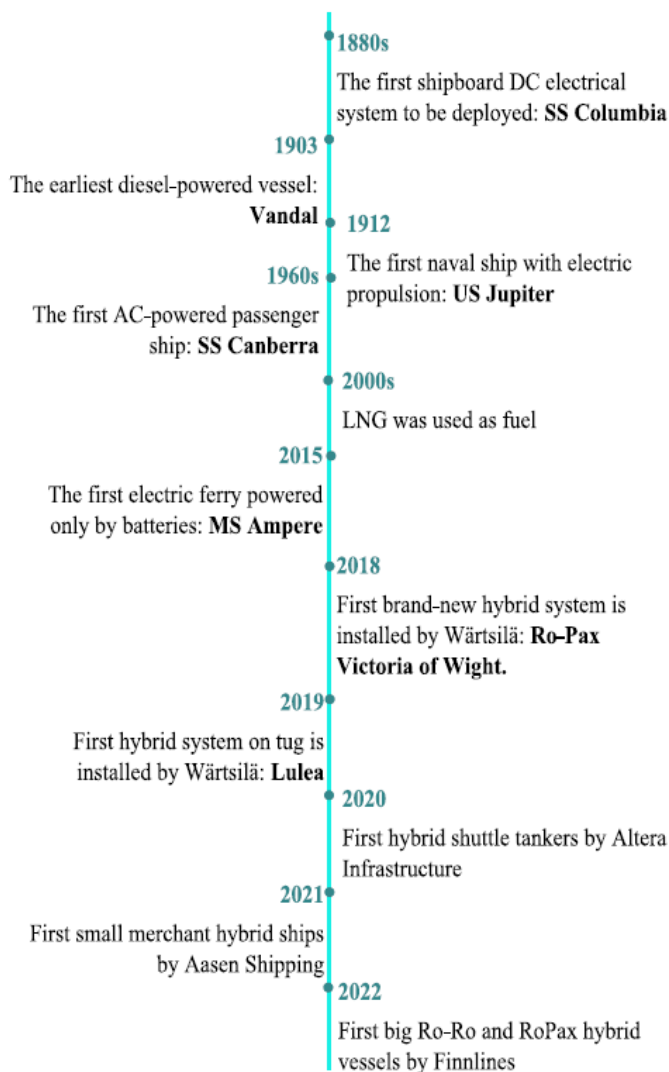
2 Glavne komponente brodskih hibridnih sustava

Kako bi se istaknula evolucija dizajna hibridnih elektroenergetskih sustava na brodovima i plovilima, u ovom dijelu prikazana je ukratko povijest razvoja brodskog električnog i hibridnog pogona. Na slici 2 prikazana je kronologija ključnih događaja u razvoju hibridnog pogonskog sustava [29].

Vandal, prvi dizel-električni brod, izgrađen je 1903. godine, dok je 1912. godine mornaričko plovilo USS Jupiter, prvo s električnim pogonskim sustavom, uvedeno u vojnu službu [30]. Jupiter je bio opremljen s tri pogonska sustava: izravno s parnom turbinom, turboelektričnim pogonom i dizel pogonom. Njegov dvostruki turboelektrični pogonski sustav od 3500 hp pokazao se izuzetno uspješnim. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća, uvođenje izmjeničnih motora, transformatora i dizel motora potaknulo je daljnji razvoj primjene električne energije u brodovima.

Putnički brod SS Canberra, koji koristi izmjenični (*engl. Alternate current, AC*) pogon, izgrađen je 1960-ih, a AC električni motori počeli su se razvijati i primjenjivati tijekom 1970-ih. Napredak elektroničke tehnologije tijekom energetske krize 1970-ih potaknuo je prijelaz u eru potpuno električnih brodova [30]. Specijalizirani komercijalni brodovi, poput brodova za ukapljeni prirodni plin, značajno su utjecali na dizajn električnih sustava. Prijelaz s parnih motora na motore s unutarnjim izgaranjem označio je značajan tehnološki napredak, koji je utjecao na snagu i tehnologiju brodskih pogonskih sustava.

Hibridni sustavi, kao varijanta integriranih elektroenergetskih sustava, mogu kombinirati mehaničke i električne komponente, došli su nešto kasnije. Prvi svjetski trajekt u potpunosti



Slika 2: Kronologija ključnih događaja u razvoju hibridnih i električnih brodskih pogonskih sustava [29]

na baterijski pogon, MF Ampere, počeo je s radom u siječnju 2015., označivši početak ere potpuno električnih brodova. Jedan od najvećih proizvođača brodskih pogonskih komponenti Wärtsilä proširila je svoj utjecaj na tržište hibridnih brodskih sustava [31] te je od 2018. godine dizajnirala i instalirala prvi novoizgrađeni hibridni sustav na brodu Ro-Pax Victoria of Wight te hibridni tegljač i ledolamac Vilja [32]. Tablica 1. prikazuje neke od najpoznatijih hibridnih i električnih brodova koji trenutno plove.

Tablica 1: Tablica najpoznatijih hibridnih i električnih brodova koji trenutno plove

Ime broda	Godina	Operater	Vrsta	Ključne značajke
MS Roald Amundsen	2019	Hurtigruten	Kruzer	Prvi hibridni kruzer na svijetu, radi bez emisija u zaštićenim područjima [33]
Ampere	2015	Norled	Trajekt	Prvi potpuno električni trajekt na svijetu [34]
Ellen	2019	DFDS	Trajekt	Potpuno električni, na jugu Danske na liniji dugoj 22 nautičke milje [35]
Viking Energy	2003 (preuređen 2021)	Razni	Opskrbni brod	Preuređen u plug-in hibrid s baterijskim sustavom snage 1600 kW, a 2024. će biti opremljen gorivnim člancima koje koriste amonijak kao gorivo [36]
Catriona	2018	CalMac	Trajekt	Dizelsko-električni hibrid; napravljen s ciljem smanjenja potrošnje goriva i emisije CO ₂ za najmanje 20% [37]
Crowley eWolf	U izgradnji	Crowley Maritime	Tegljač	Potpuno električni Ima kapacitet baterije od 6,2 MWh za poboljšanu operativnu učinkovitost [38]
Saint Malo	2024	Brittany Ferries	Trajekt	Među najvećim hibridnim plovilima, ima kapacitet baterije od 11 MWh [39]

2.1 Baterije

Baterije predstavljaju trenutačno vodeću tehnologiju za pohranu energije zahvaljujući visokoj gustoći energije u usporedbi sa ostalim sustavima pohrane energije [21], nižim troškovima u usporedbi s drugim tehnologijama iste energetske razine te iskustvu iz drugih sektora transporta. Strukturno, baterije se sastoje od elektroda, elektrolita i separatora, a njihov učinak uvelike ovisi o materijalu elektroda [40]. S obzirom na različite vrste baterija dostupne za komercijalnu primjenu u transportnom sektoru, odabir odgovarajuće vrste baterije ključan je korak za pomorsku industriju kako bi se osigurala pouzdana, učinkovita i optimalna implementacija. Iako se u budućnosti mogu razmotriti i druge vrste baterija, prema analizama sustava pohrane energije (*engl. Energy Storage System, ESS*) litij-ionske baterije trenutno se smatraju najprikladnijima za brodski sektor zbog visoke energetske gustoće, dugog životnog vijeka (cikličnosti), te visoke industrijske zrelosti i dostupnosti [41]. Osim toga, cijena litij-ionskih baterija značajno se smanjila posljednjih godina, čime se

dotatno povećava njihova privlačnost. U [21], svojstva više vrsta baterija detaljno su analizirana te su dovedeni sljedeći zaključci:

- **Olovno-kiselinske baterije:** Imaju nisku gustoću energije (30–50 Wh/kg) i kraći do srednji vijek trajanja (500–1000 ciklusa), ali su jeftine (70 \$/kWh). Zbog većih dimenzija, manje su pogodne za brodove gdje je prostor ograničen [42].
- **Nikalkadmijske (NiCd) baterije:** Srednje gustoće energije (50–75 Wh/kg) i dugog vijeka trajanja (2000–2500 ciklusa), ali niže učinkovitosti (60–65%) i više cijene (300 \$/kWh). Pogodne su za manje zahtjeve snage.
- **Nikalhidridne (NiMH) baterije:** Srednje gustoće energije (60–100 Wh/kg) i srednjeg vijeka trajanja (750 ciklusa), s cijenom od 300–500 \$/kWh, mogu biti opcija za brodove s umjerenim potrebama snage, no karakterizira ih visoka stopa samopražnjenja, čak i do 28% [43]
- **Litij-ionske baterije:** Visoka gustoća energije (100–200 Wh/kg) i učinkovitost (85–90%) čine ih najboljim izborom za hibridne brodove. Iako su skuplje (200–700 \$/kWh), njihova dugotrajnost i performanse opravdavaju trošak.

Tablica 2: Karakteristike različitih materijala katoda za litij-ionske baterije koje se mogu koristiti u brodovima

Materijal katode	Gustoća energije (Wh/kg)	Primjene	Utjecaj na okoliš	Sigurnost	Temperaturni raspon
Litij Kobalt Oksid (LCO)	150-200	Mobiteli, kamere, laptopi	Loš utjecaj na okoliš zbog iskopavanja kobalta	Umjerena sigurnost, rizik od pregrijavanja	-20 do 60 °C
Litij Nikal Mangan Kobalt Oksid (NMC)	150-250	Alati, medicinska oprema	Manji sadržaj kobalta, ali uključuje iskopavanje nikla	Poboljšana sigurnost s boljom termalnom stabilnošću	-10 do 55 °C
Litij Željezo Fosfat (LFP)	95-140	Električna vozila, sustavi za pohranu, hibridni i električni brodovi	Ekološki prihvatljivo, bez kobalta i nikla	Vrlo sigurno, termički stabilno	-30 do 60 °C
Litij Nikal Kobalt Aluminij Oksid (NCA)	200-260	Električna vozila visokih performansi, hibridni i električni brodovi	Smanjen sadržaj kobalta, visoki sadržaj nikla	Dobra sigurnost s visokom energijskom gustoćom	-20 do 60 °C
Litij Mangan Oksid (LMO)	100-150	Alati, medicinska oprema, električna vozila, hibridna vozila	Manji trošak za okoliš zbog uporabe mangana	Umjerena sigurnost, veći rizik pri visokim temperaturama	-10 do 55 °C

Tablica 2. prikazuje karakteristike različitih materijala katode za litij-ionske baterije koje se mogu koristiti u brodovima, analizirajući ih s obzirom na napetost, gustoću energije, utjecaj na okoliš, sigurnost i temperaturni raspon. Ovi podaci su preuzeti iz [44] i [45].

Baterije predstavljaju izvrsno rješenje za hibridizaciju brodskih sustava, te je provedeno niz analiza primjenom različitih strategija. Na primjer, hibridni sustav koji se sastoji od litij-ionskih baterija s gorivnim člancima analiziran je za obalne brodove, uzimajući u obzir izvedivost i potencijalne koristi s obzirom na faktore kao što su snaga, gustoća energije, životni vijek i troškovi [46]. Nadalje, analiza hibridnog baterijsko-dizelskog električnog pogonskog sustava pokazala je potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova za 14% u globalnoj floti brodova za suhi rasuti teret [47].

Istovremeno, postoje projekti potpuno električnih brodskih pogona, kao što je MF Ampere, koji se smatra važnim korakom prema brodovima s nultom emisijom. Ovaj projekt označava prekretnicu u razvoju potpuno električnih trajekata, a trajekt je u Norveškoj u pogonu od 2015. Opremljen je NMC baterijama s kapacitetom od 1 MWh. Punjenje se odvija preko obalne mreže tijekom kratkih pauza u lukama i tijekom noći [48].

2.2 Motori s unutarnjim izgaranjem

Najkonvencionalniji i najčešći način za proizvodnju energije na brodu, kako za pogon tako i za električne potrebe, su motori s unutarnjim izgaranjem. Tijekom 19. i 20. stoljeća, pogonski motori na brodovima zamijenjeni su iz parnih strojeva i turbina na dizelske motore te predstavljaju glavne pogonske strojeve koji se trenutno koriste na plovilima. Glavne prednosti pomorskih dizelskih motora uključuju široko iskustvo u njihovoj upotrebi, dobro poznate operativne procedure, lako dostupne rezervne dijelove, kao i razvijenu globalnu mrežu za opskrbu gorivom, što ih stavlja na vrh tržišta izvora energije za brodove. Međutim, osobito u posljednje vrijeme, ekološki izazovi počinju narušavati njihov udio na tržištu. Štetne emisije iz dizelskih motora pokušavaju se kontrolirati od strane IMO-a, no čini se da je s današnjom tehnologijom i dizelskim gorivima teško ostati ispod zadanih granica. Iako postoje različite mogućnosti za kontrolu i eliminaciju štetnih emisija, poput već spomenutih sustava za pročišćavanje dimnih plinova, sustava za recirkulaciju ispušnih plinova, selektivne katalitičke redukcije, promjenjivog vremena ubrizgavanja i sustava za čišćenje ispušnih plinova, visoki investicijski troškovi u odnosu na životni vijek broda i ograničene količine fosilnih goriva čine alternativna goriva i hibridni pogon privlačnim rješenjima [49, 50]. Dizelski motori pokazuju smanjenu učinkovitost pri djelomičnim opterećenjima jer su u takvim uvjetima dizajnirani da troše više goriva po jedinici proizvedene energije nego kada rade na optimalnim opterećenjima. To znači da motori, umjesto da održavaju stabilnu razinu potrošnje goriva u odnosu na obujam obavljenog posla, troše dodatne resurse kako bi održali stabilan rad. Ovaj gubitak učinkovitosti dovodi do povećanih emisija štetnih plinova, što se suprotstavlja sve strožim ekološkim standardima koje nameću međunarodne organizacije poput Međunarodne pomorske organizacije.

S obzirom na važnost smanjenja emisija kako bi se udovoljilo regulativama i očuvala konkurentnost na tržištu, smanjenje potrošnje goriva postaje glavni prioritet u industriji brodskog pogona. Zbog toga proizvođači preporučuju da se dizelski motori koriste na

opterećenju iznad 60% njihovog maksimalnog kontinuiranog radnog kapaciteta [30], jer je to raspon u kojem postižu optimalnu učinkovitost u smislu potrošnje goriva i emisija.

Međutim, uvjeti na moru zahtijevaju varijabilna opterećenja, posebno tijekom pristajanja, manevriranja i isplovljavanja, kada je često potrebna niža ili neregularna razina snage. Kako bi se smanjila neučinkovitost motora u takvim uvjetima, razvijene su tehnike korištenja sustava za pohranu energije, poput baterija i superkondenzatora. Ovi sustavi omogućuju dizelskim motorima da rade na konstantnijem opterećenju, tako da se višak proizvedene energije može pohraniti kada je opterećenje nisko, a kasnije koristiti kada potražnja za energijom poraste. Na taj način dizelski motori zadržavaju optimalniji radni režim, smanjujući potrošnju goriva i emisije, što doprinosi većoj ekološkoj prihvatljivosti brodova i efikasnijem ispunjavanju tržišnih standarda.

2.3 Gorivni članci

Gorivni članci izravno pretvaraju kemijsku energiju goriva u istosmjernu električnu energiju. Budući da postoji samo jedan korak pretvorbe energije eliminacijom procesa izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem, ukupna učinkovitost je relativno viša nego kod pomorskih dizelskih motora te najčešće koriste vodik kao osnovno gorivo, što im omogućuje čišći rad u usporedbi s dizelskim motorima [51]. Na taj način, u kontekstu strogih propisa o emisijama, gorivni članci su vrlo obećavajući zbog niskog utjecaja na okoliš u pogonu budućih brodova. Glavna razlika između gorivnih članaka i drugih sustava za pohranu energije je njihova sposobnost rada bez potrebe za punjenjem, pa mogu proizvoditi električnu energiju sve dok postoji stabilan dovod goriva. Gorivni članci klasificiraju se prema vrsti elektrolita koji se koristi, a komercijalno je dostupno pet vrsta gorivnih članaka: gorivni članak s protonski provodljivom membranom (*engl. Proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC*), alkalni gorivni članak (*engl. Alkaline fuel cell, AFC*), gorivni članak s rastaljenim karbonatom (*engl. Molten carbonate fuel cell, MCFC*) i gorivni članak s krutim oksidom (*engl. Solid oxide fuel cell, SOFC*). U tablici 3. se mogu vidjeti prednosti i nedostaci navedenih članaka [52, 53].

Komercijalno najpopularnija vrsta gorivnih članaka je PEMFC zbog svoje tehnološke zrelosti i široke primjene u drugim energetske primjenama [54]. Tehnološka zrelost donosi prednost s aspekta troškova i operativnog iskustva. Međutim, kao glavni nedostatak, PEMFC zahtijeva visoku čistoću vodika, jer se članak može oštetiti i prestati raditi zbog trovanja ugljikovim monoksidom [55]. Glavne promjene u operativnim svojstvima različitih tipova gorivnih članaka proizlaze iz radnih temperatura; gorivni članci s visokim i niskim radnim temperaturama pokazuju različite karakteristike. MCFC, PAFC i SOFC su tipovi visokih temperatura. Postoji i visokotemperaturna verzija PEMFC koja se dobije zamjenom materijala membrane perfluorosulfonske kiseline (Nafion) s polibenzimidazolom (PBI). Visokotemperaturni PEMFC rješava neke probleme PEMFC-a kao što su upravljanje vodom na strani katode i visoka osjetljivost na nečistoće u gorivu [56]. Gorivni članci visokih

temperatura manje su osjetljivi na sastav goriva i znatno su fleksibilniji u izboru goriva; primjerice, vodik i ugljikovodici poput dizelskog ulja, metanola i ukapljenog prirodnog plina (LNG) opcije su goriva za SOFC i MCFC putem procesa reformiranja [57].

Tablica 3. Prednosti i nedostaci najčešće korištenih tehnologija gorivnih članaka

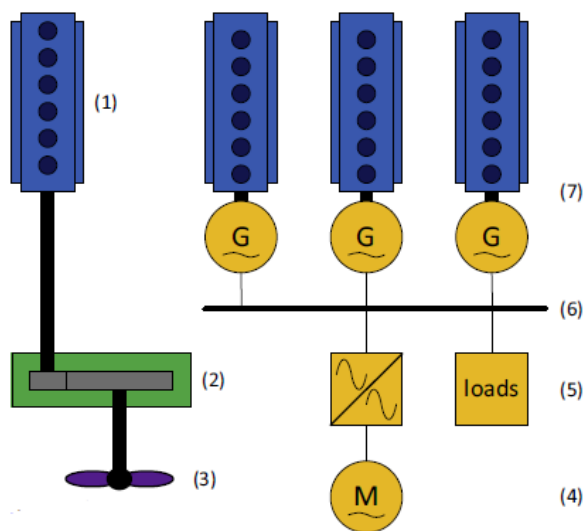
Tehnologija	Prednosti	Nedostaci
PEMFC	- Visoka učinkovitost i gustoća snage - Brzo vrijeme pokretanja - Niske radne temperature (60-80°C)	- Visoka cijena materijala (npr. platinasti katalizatori) - Ograničena trajnost - Zahtijeva čisto vodikovo gorivo
AFC	- Visoka učinkovitost i niska cijena materijala - Dobre performanse u okruženjima s visokim temperaturama	- Osjetljivo na CO ₂ u gorivu, zahtijeva čisti vodik - Niža gustoća snage u usporedbi s PEMFC-ima
PAFC	- Dobra izdržljivost i pouzdanost	- Niža učinkovitost od PEMFC-a i SOFC-a - Više radne temperature (150-200°C)
MCFC	- Može raditi na prirodni plin i druga goriva - Visoka učinkovitost u velikim razmjerima	- Visoke radne temperature (600-700°C) - Korozivni elektrolit zahtijeva posebne materijale
SOFC	- Visoka učinkovitost (do 60% ili više) - Može koristiti različita goriva (zemni plin, bioplín) - Dug radni vijek	- Visoke radne temperature (600-1000°C) mogu dovesti do toplinskog stresa - Sporo vrijeme pokretanja - Skupi materijali

Osim fleksibilnosti goriva, povećanje snage i učinkovitosti izravne su posljedice visokih radnih temperatura. Gorivni članci su modularni pa se njihove fizičke karakteristike, kao što su težina ili dimenzije, mijenjaju ovisno o potrebnoj snazi sustava. Općenito, izlazna snaga je na razini kW, međutim, za verzije s visokim temperaturama, dosegnute su i razine MW. Zapravo, ispušni plinovi visokih temperatura mogu se koristiti u kombiniranom sustavu s turbinom, čime se povećava ukupna učinkovitost sustava i izlazna snaga [58]. Odabir najperspektivnijeg tipa gorivnih članaka za hibridizaciju uvelike ovisi o operativnom profilu broda. Međutim, iz provedenih projekata, čini se da PEMFC, MCFC i SOFC pokazuju bolje performanse u usporedbi s drugim tipovima. Imaju različite prednosti; ako je potreba za snagom visoka i postoji poteškoća u skladištenju vodika na brodu, SOFC i MCFC su preferirani. S druge strane, s aspekta emisija, visoke gustoće snage i tehnološke zrelosti, prednosti PEMFC-a su značajne. Međutim, potreba za vodikom visoke čistoće kao gorivom još uvijek nije ekonomična za dugotrajna plovila. Dakle, nulte emisije ostvarive su s PEMFC-om ako je riječ o plovidbi unutarnjim i/ili kratkim morskim putovima s ograničenim zahtjevima za pogonskom snagom.

3 Arhitekture pogonskih i energetskih brodskih sustava

3.1 Mehanička propulzija

Tipična arhitektura za moderni brod s mehaničkim pogonom prikazana je na slici 3 [50]. Glavni pogonski stroj (1), obično dizelski motor, pokreće propulzijski sustav (3), najčešće propeler, bilo izravno ili putem prijenosnika (2). Za proizvodnju i distribuciju električne energije za pomoćne potrošače (5), kao što su primjerice elektromotori promjenjivog broja okretaja (4), grijanje, ventilacija, klimatizacija i drugi kritični te pomoćni sustavi, potreban je odvojeni AC električni mrežni sustav (6). Dizelski, parno-turbinski ili plinsko-turbinski generatori (7) napajaju ovaj električni sustav.



Slika 3: Klasični mehanički brodski pogonski sustav s generatorima za proizvodnju el. energije za pomoćne potrošače [50]

Za velike teretne brodove koji koriste sporokretne dizelske motore reduktor nije potreban, a promjena smjera može se postići promjenom smjera okretanja motora. S druge strane, manji brodovi trebaju reduktor kako bi smanjili brzinu motora, jer ih pokreću srednje ili brzokretni dizelski motori. Reduktor se također može koristiti za reverziju smjera rotacije osovine. Najčešće korišteni propulzijski sustav je propeler s fiksnim korakom (*engl. Fixed pitch propeller, FPP*), koji zahtijeva reverzibilni motor ili prijenosnik za zaustavljanje i reverziju. Alternativno, propeler s podesivim korakom (*engl. Controllable pitch propeller, CPP*) može osigurati negativni potisak za zaustavljanje i reverziju.

Mehanička propulzija je posebno je učinkovita pri projektnoj brzini, između 80 i 100% maksimalne brzine. U tom rasponu dizelski motor radi na svojoj najefikasnijoj radnoj točki. Štoviše, mehanička propulzija uključuje samo tri stupnja pretvorbe energije: glavni motor, prijenosnik i propeler, što dovodi do niskih gubitaka pri pretvorbi energije. Budući da su ograničenja emisije NO_x za motore razina II i III izražena u g/kWh, učinkovito funkcioniranje koje vodi nižem izlazu snage također smanjuje emisiju NO_x, pri čemu treba uzeti u obzir da su ograničenja za brzokretne motore stroža nego za sporokretne motore. Konačno, kapitalni i operativni trošak sustava s mehaničkom propulzijom je nizak zbog jednostavne

konstrukcije, što opravdava primjenu kod transportnih brodove. To je prikazano energetsom analizom na tankeru za teret, koji 88% svoje energije pretvara u glavnim dizelskim motorima [59]. Ova studija zaključuje da se kod ovih tipova brodova potrošnja goriva i emisije mogu najbolje smanjiti povratom topline iz ispušnih plinova i rashladne vode kako bi se generirala pomoćna električna energija i grijanje.

Međutim, usklađivanje motora s projektiranom brzinom također fiksira ponašanje postrojenja za ostatak radnog područja. CPP može dodati dodatnu slobodu kontrole uz cijenu povećanja složenosti sustava.

Unatoč prednostima, mehanička propulzija suočava se s određenim izazovima:

- Manevriranje je ograničeno radnim područjem motora. CPP može poboljšati manevriranje, ali ono ostaje ograničeno kako bi se spriječilo preopterećenje motora.
- Visoko statičko i dinamičko opterećenje motora može povećati potrebu za održavanjem. Primjena CPP-a s odgovarajućom kontrolnom strategijom može smanjiti statičko i dinamičko opterećenje [60].
- Mehanička propulzija ima nisku učinkovitost goriva i visoke emisije pri plovidbi brzinama ispod 70% maksimalne brzine, budući da potrošnja goriva motora znatno raste ispod 50% nazivne snage.
- Emisije NOx glavnog pogonskog motora određene su njegovim radnim točkama unutar radnog područja. Istraživanje dizelskih motora u automobilskoj industriji pokazalo je da su emisije NOx tijekom WLTC (*engl. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle*) ciklusa, s povećanim profilom ubrzanja, znatno veće od Euro 6 standarda od 80 mg/km. Taj trend potvrđuju mjerenja NOx emisija provedena na istraživačkom motoru MAN4L20/27 snage 300 kW bez tehnologije smanjenja NOx-a [61]. Osim toga, dizelska mehanička propulzija tijekom ubrzanja uzrokuje visoke emisije NOx zbog visokih temperatura u cilindru uzrokovanih zaostatkom turbine.

Kod brodova s mehaničkom propulzijom, istraživanja su ponajviše usmjerena na različite načine kontrole opterećenja motora. Standardna strategija za brodove s propelerima fiksnog koraka uključuje regulaciju broja okretaja motora pomoću regulatora brzine, često kontroliranog PID regulatorom [60, 62]. Ova metoda, iako pruža zaštitu od prevelike brzine i gotovo linearnu vezu između postavke ručice i brzine, može dovesti do poremećaja opterećenja motora u određenim uvjetima [63]. Studije sugeriraju da robusni PID dizajn, poput onog kojeg predlaže Xiros [64], može smanjiti poremećaje predviđanjem derivacija brzine pomoću mjerenja zakretnog momenta osovine, čime se poboljšava stabilnost protiv vanjskih utjecaja poput vjetera i valova. Drugi pristup, koji su razvili Guillemette i Bussières [65], koristi adaptivni regulator brzine kako bi optimizirao povratni signal brzine i smanjio fluktuacije opterećenja motora, iako praktična primjena ovog pristupa još nije potvrđena. Za brodove s propelerima podesivog koraka (CPP), kombinatorске krivulje koriste se za zajedničko upravljanje kutom propelera i brzinom motora, iako imaju ograničenja u

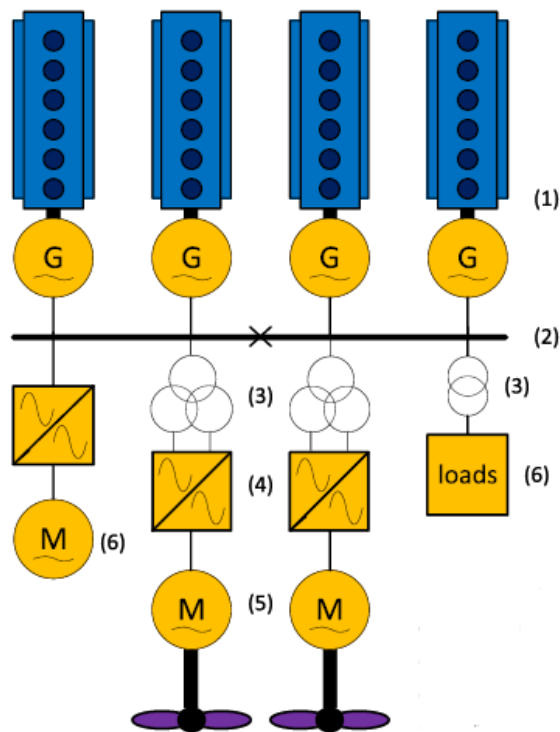
dinamičkoj prilagodbi promjenjivim uvjetima okoline, što ponekad dovodi do povećanih troškova održavanja ili smanjene učinkovitosti propulzije [66].

3.2 Električna propulzija

Električna propulzija postoji od ranih 1900-ih godina. Tijekom 1990-ih, električna propulzija dobila je značajan zamah u industriji kruzera. Tipična arhitektura sustava električne propulzije prikazana je na slici 4. Više dizelskih generatora (1) napaja visokonaponsku električnu sabirnicu konstantne frekvencije (2). Ta sabirnica napaja motor električne propulzije (5) i opterećenje pomoćnih sustava (6), u većini slučajeva putem transformatora (3). Motor električne propulzije sastoji se od naponskog pretvarača (4) koji se koristi za kontrolu brzine osovinske linije, a time i brzine broda.

Ovakvo arhitektura donosi mnogo prednosti :

- Električna propulzija predstavlja energetski učinkovito rješenje kada pomoćni sustava uzimaju značajan dio zahtjeva za ukupnom snagom i kada je profil opterećenja raznolik, budući da se snaga generatora može koristiti i za propulziju, i za pomoćne sustave [67]. Da bi se to postiglo, sustav upravljanja energijom usklađuje broj aktivnih motora sa zahtjevima za kombiniranu propulzijsku i pomoćnu snagu. Ova strategija upravljanja osigurava da motori ne rade neučinkovito pri djelomičnom opterećenju.
- Emisije NO_x -a kod električne propulzije manji su u usporedbi s mehaničkom propulzijom, jer je propulzijska snaga pri punoj brzini broda, u većini slučajeva, raspodijeljena na više motora, koji, zbog niže pojedinačne snage, rade pri većoj brzini okretaja. Nadalje, zbog spomenutog sustava upravljanja u električnoj propulziji, dizelski generatori rade bliže optimalnoj radnoj točki, pri čemu obično proizvode manje emisija NO_x ili zahtijevaju manje mjere za smanjenje NO_x-a koje povećavaju potrošnju goriva. Osim toga, uvijek rade pri nazivnoj brzini, za razliku od motora mehaničke propulzije, koji mogu raditi i pri smanjenoj brzini pri djelomičnom opterećenju, što dovodi do većih emisija NO_x.



Slika 4: Tipični raspored elektropropulzijskog sustava [50]

- Treća prednost električne propulzije je smanjen opseg održavanja, budući da se motori dijele između propulzije i pomoćnog opterećenja te se isključuju kada nisu potrebni.
- Četvrto, električna propulzija može smanjiti emitiranu buku zbog izostanka mehaničkog prijenosnog puta od motora do propelera. U tu svrhu, dizajn motora i pretvarača snage mora biti optimiran za minimalne fluktuacije momenta.

Suprotno tome, električna propulzija suočava se s izazovima kao što su:

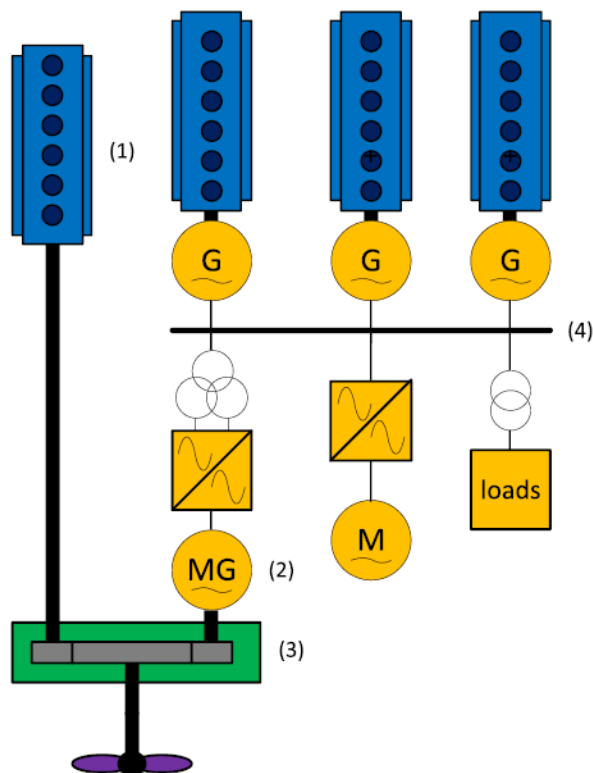
- Zbog dodatnih stupnjeva pretvorbe u energetskim pretvaračima i elektromotorima, električna propulzija ima povećane gubitke. Ti gubici dovode do povećanja specifične potrošnje, osobito pri maksimalnoj brzini broda.
- Kada rade redundantni motori kako bi se postigla visoka dostupnost propulzije, što je potrebno za osjetljive manevre, motori rade pri niskom djelomičnom opterećenju. To dovodi do loše potrošnje goriva i visokih emisija.
- Većina brodova s električnom propulzijom koristi FPP, jer elektromotori s promjenjivom brzinom vožnje mogu pružiti maksimalni moment pri svakoj brzini i raditi u obrnutom smjeru. U [63] je pokazano da emitirana buka uslijed kavitacije raste u operativnim uvjetima pri fiksiranju koraka propelera i korištenju kontrole brzine, što je standardna strategija kontrole za elektromotore. Stoga, kavitacija potencijalno raste u operativnim uvjetima, osobito za električnu propulziju s propelerima fiksnog koraka i kontrolom brzine, kao i za mehaničku propulziju s FPP.
- Zbog činjenice da sva opterećenja koriste napon i frekvenciju električne mreže, dolazi do oscilacija napona i frekvencije u uvjetima kvara.

Istraživanja u području električne propulzije usmjerena su na strategije upravljanja koje omogućuju kontrolu brodske električne mreže s konstantnom frekvencijom i propulzije kako bi se održala željena brzina i smjer broda. Za kontrolu napona i frekvencije, AC mreže s konstantnom frekvencijom ponajviše koriste „droop“ kontrolu za raspodjelu aktivnog opterećenja između generatora [68]. Iako su mreže s konstantnom frekvencijom robusne, uzrokuju veću potrošnju goriva i trošenje motora zbog konstantnog rada pri nazivnoj brzini, što također utječe na emisije. Alternativna rješenja, poput mreža s promjenjivom frekvencijom, koje predlaže Simmonds, mogu uštedjeti do 5% goriva, ali zahtijevaju specijaliziranu opremu i dodatnu pretvorbu za opterećenja s konstantnom frekvencijom [69]. Kod elektropropulzije pod primarnom kontrolom se gleda sustav održavanja stabilnog napona i frekvencije mreže, dok sustav upravljanja energijom provodi sekundarnu kontrolu, što uključuje upravljanje opterećenjem generatora, prevenciju nestanka struje i rekonfiguraciju nakon kvarova, posebno za plovila koja zahtijevaju visoke manevarske sposobnosti [70]. Napredne strategije upravljanja u stvarnom vremenu, koje su predložili Amgai i Abdelwahed [71], i praćenje snage na više različitih vremenskih razina koje predlaže Seenumani i sur. [70], pokazuju potencijal za održavanje napona i frekvencije u uvjetima kvara, premda svaka ima ograničenja u praktičnoj primjeni.

3.3 Hibridna propulzija

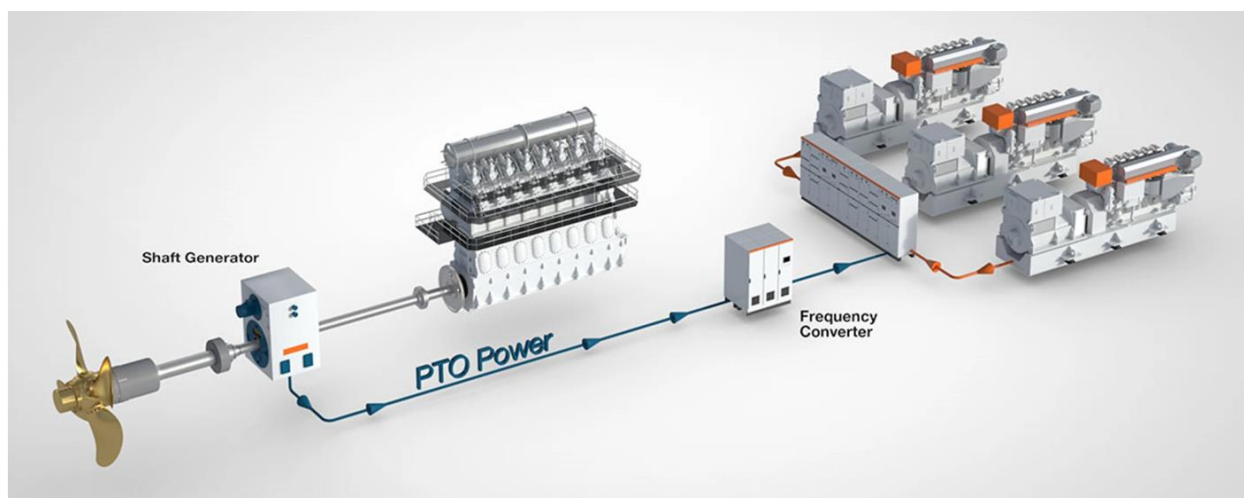
Kada pomoćno opterećenje predstavlja samo dio potrebne propulzivne snage, gubici povezani s električnom konverzijom dovode do povećane potrošnje goriva za električne propulzijske sustave [72]. Dodatna električna oprema također dovodi do povećanja težine, dimenzija i troškova. Zbog toga hibridna propulzija je idealna za brodove s promjenjivim zahtjevima snage i potreban im je fleksibilan način pogona. Ovaj sustav posebno je koristan za trajekte, tegljače i jahte, koji mogu koristiti električni pogon za smanjenje emisija i buke u ekološki osjetljivim područjima, dok dizelski motor služi za duže ili zahtjevnije vožnje [73].

U hibridnoj propulziji, glavni motor na izravan mehanički pogon (1) osigurava propulziju pri visokim brzinama uz visoku učinkovitost. Nadalje, električni motor (2), koji je povezan s istim vratilom preko reduktora (3) ili izravno na vratilo koje pokreće propeler, osigurava propulziju pri malim brzinama, čime se izbjegava neučinkovito korištenje glavnog motora u djelomičnom opterećenju. Prema tome, glavni motor također se može koristiti kao generator za električna opterećenja na električnoj brodskoj mreži (4). Tipičan izgled takvog hibridnog propulzijskog sustava prikazan je na slici 5. Kada je glavni motor mehaničkog pogona u radu, ovaj sustav omogućava kapacitet generiranja električne energije bilo iz električnog generatora ili izravno iz glavnog motora. Uobičajeno je da se kapacitet generiranja određuje temeljem pravila ili od strane operatora. Budući da je hibridna propulzija kombinacija električnog i mehaničkog pogona, ona može iskoristiti prednosti obaju sustava, koji su objašnjeni detaljno u poglavljima 3.1 i 3.2. Međutim, za postizanje tih prednosti, potreban je odgovarajući dizajn, a često je potrebno napraviti kompromis između svih zahtjeva. Strategija upravljanja omogućuje optimalan kompromis i može koristiti dodatni stupanj upravljanja prijenosom električne energije iz mehaničkog pogona u brodsku električnu mrežu i obrnuto. Glavni izazov u dizajnu hibridne propulzije je uspostaviti ravnotežu između svih zahtjeva te postaviti strategiju upravljanja kako bi se postigla ta ravnoteža. Istraživanja u području hibridne propulzije usmjerena su na optimizaciju performansi i učinkovitosti u različitim radnim režimima. Wijsmuller i Hasselaar [74] analiziraju hibridnu propulziju za brodove za vuču u hitnim situacijama, pri čemu se



Slika 5: Tipični hibridni pogonski sustav [50]

najekonomičnija konfiguracija pokazala hibridnim sustavom s velikim i malim motorom na svakoj osovini za učinkovitu plovidbu pri patrolnim brzinama te električnom propulzijom za niske brzine. Barcellos [75] pokazuje slične prednosti za offshore brodove, gdje hibridna propulzija štedi više od 10% goriva optimiziranjem mehaničkog sustava za tranzit i električnog sustava za potrebe dinamičkog pozicioniranja. Hibridni sustavi općenito su ekonomični kada operativni profil uključuje značajno vrijeme pri niskoj snazi, što također primjećuje de Waard [76]. Trenutno istraživanja u području strategija upravljanja hibridnom propulzijom ponajviše se bace slučajem gdje je elektromotor montiran direktno na glavnu osovinu gdje se može koristiti ili kao dodatan izvor momenta ili kao osovinski generator, ovisno o uvjetima opterećenja. Takav sustav komercijalno nudi Wärtsilä i prikazan je na slici 6 [77]. Sulligoi i sur. [78] demonstriraju uspješan paralelni rad generatora na osovini i dizel generatora koristeći „droop“ kontrolu, iako ovaj pristup možda ne iskorištava u potpunosti dinamiku plinske turbine. Dodatno, Topaloglou i sur. [79] predlažu korištenje električnog momenta za smanjenje toplinskog opterećenja motora i emisije NO_x, postižući smanjenje emisija od 16% i poboljšane performanse tijekom ubrzanja.



Slika 6: Wärtsilä hibridni propulzijski sustav [77]

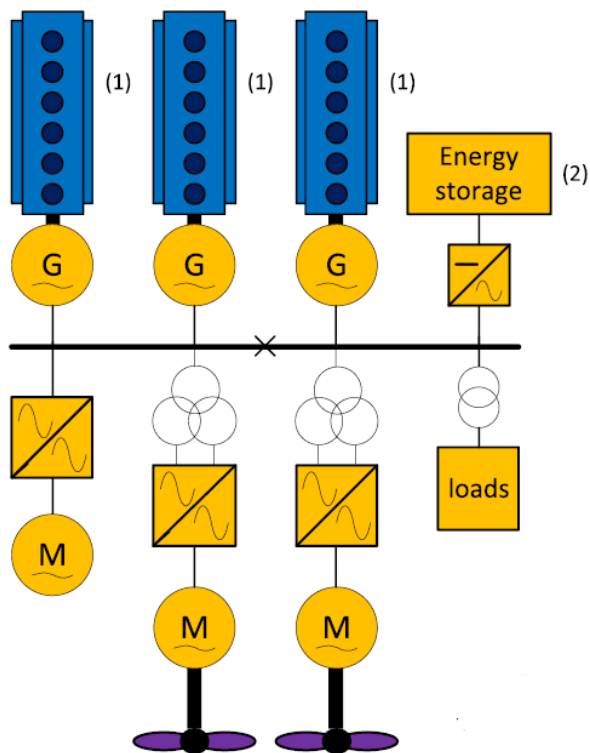
3.4 Elektropropulzija s hibridnim izvorima energije

U električnoj propulziji s hibridnim izvorima energije, kombinacija dvaju ili više vrsta izvora energije može osigurati električnu energiju. Takav tipičan sustav je prikazan na slici 7. Klasifikacija načina proizvodnje električne energije može se napraviti na sljedeći način:

- Proizvodnja toplinskim strojevima, poput dizelskih motora (1), plinskih ili parnih turbina
- Elektrokemijska proizvodnja iz gorivnih članaka
- Napajanje iz skladištene energije putem sustava za pohranu energije (2) poput baterija, zamašnjaka ili superkondenzatora

Primjena pohrane energije i hibridnog napajanja u brodskim energetske i propulzijskim sustavima može imati višestruke koristi:

- Pohrana energije može osigurati potrebnu električnu energiju i omogućiti isključivanje jednog ili više motora kada bi radili neučinkovito pri djelomičnom opterećenju. Pohranjena energija može se zatim ponovno puniti kada motor radi u točki rada s nižom specifičnom potrošnjom goriva i manjim emisijama CO₂ i NO_x, čime se može uštedjeti gorivo, smanjiti emisije, smanjiti buka, povećati udobnost i omogućiti privremena plovidba bez emisija, buke i vibracija motora [80].
- Baterija može omogućiti poravnanje opterećenja, održavajući konstantno opterećenje motora te održavajući učinkovitiju radnu točku, dok baterija pokriva vršna opterećenja.
- Baterija može omogućiti smanjenje vršnog opterećenja; baterija isporučuje energiju u razdobljima kada je potrebna visoka snaga, a puni se kada su zahtjevi za snagom manji. Ova strategija omogućava učinkovitiji rad motora i smanjenje instalirane snage.
- Kada se baterija puni s mreže, to također može smanjiti potrošnju goriva i lokalne emisije. Ipak, potrebno je uzeti u obzir trošak i emisije proizvodnje energije iz mreže, što dovodi do daljnjih komplikacija pri izračunu potrošnje i emisija [81].
- Baterija može pohraniti regeneriranu energiju prilikom kočenja električnim motorima. U trenutnim sustavima električne propulzije ta se energija gubi u kočnim otpornicima. Iako su uštede goriva zbog pohrane energije od kočenja ograničene jer brodovi rijetko trebaju brzo stati, značajna energija može se regenerirati na brodovima s velikim kranovima te u brodovima za offshore radove [82].
- Baterija može osigurati rezervnu snagu u slučaju kvara na dizelskim generatorima. Ovo može smanjiti potrebu za radom dodatnih dizelskih motora kao rezervne snage i potencijalno smanjiti instaliranu snagu na plovilima s visokim zahtjevima za dostupnošću propulzije, primjerice na plovilima kojima je dinamičko pozicioniranje jako bitno.



Slika 7: Tipičan elektropropulzijski sustav s hibridnim izvorima energije [50]

Baterija u hibridnom sustavu napajanja radi paralelno s generatorima, što vodi sljedećim izazovima:

- Strategija upravljanja treba maksimizirati smanjenje potrošnje goriva i emisija, pravilnim odabirom vremena punjenja i pražnjenja baterije.
- Fluktuacije opterećenja na dizelskim motorima povećavaju trošak goriva, emisije i troškove održavanja. Stoga bi strategija upravljanja idealno trebala raspodijeliti dinamičko opterećenje između baterije i dizelskog motora tako da su trošak goriva, emisije i opterećenje održavanja svih izvora energije minimizirani.
- Potrebno je smanjiti ili nadoknaditi povećane kapitalne troškove zbog ugradnje baterija smanjenjem instalirane snage dizelskih motora.

Upotreba baterija u pomorskim aplikacijama, posebno za tegljače i trajekte, brzo se širi zbog potencijalne uštede goriva i smanjenja emisija [81]. Volkerovo istraživanje [83] o hibridnim sustavima za tegljače i trajekte naglašava da ušteda goriva ovisi o operativnim profilima i minimalna je bez punjenja s obale. Trajekt MV Hallaig, s električnim pogonom i hibridnim napajanjem, postigao je uštedu goriva od 35%: 24% punjenjem s mreže tijekom noći, što može biti ekološki prihvatljivo uz obnovljive izvore energije, i 11% optimiziranim upravljanjem motora i baterije [81]. Ovaj slučaj pokazuje potencijal naprednih strategija upravljanja u hibridnim sustavima za značajno smanjenje goriva i emisija u pomorskim uvjetima. Strategije upravljanja energijom bit će detaljnije obrađene u poglavlju 5.

3.5 Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije

Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije koristi maksimalnu učinkovitost izravnog mehaničkog pogona i fleksibilnost kombinacije pogona s izgaranjem iz glavnog motora i pohranjene energije iz sustava za pohranu energije za električno napajanje. Pri niskoj propulzivnoj snazi dostupan je električni pogon za pokretanje broda, čime se omogućava isključivanje glavnog motora. Kao i s hibridnim pogonom, ovaj način pogona je najkompleksniji, ali pruža i najveću fleksibilnost jer kombinira sve prednosti navedene u poglavlju 3.3 o sustavima s hibridnom propulzijom te sve prednosti elektropropulzijskog sustava s hibridnom izvorom energije navedenog u poglavlju 3.4.

Hibridni pogon s hibridnim napajanjem primarno je istraživan i primjenjivan na lučkim tegljačima, pri čemu je Damen isporučio prvi hibridni tegljač 2014., a jahta Savannah, koju je Feadship lansirao 2015., također koristi ovu tehnologiju [84]. Ove aplikacije pokazale su potencijal za značajno smanjenje lokalnih emisija, posebno kada se baterije pune iz obalne mreže [85]. Tehnološko sveučilište u Delftu istražilo je heurističku strategiju upravljanja temeljenu na pravilima, gdje se način rada prilagođava aktivnosti plovila (npr. vuča, prijelaz ili pripravnost) i stanju napunjenosti baterije, što pomaže optimizirati potrošnju goriva. Međutim, uštede goriva uvelike ovise o radnom profilu plovila i dimenziji komponenti, a oslanjanje na električnu energiju za puni vučni potisak može predstavljati rizike za pouzdanost. Nadalje, Grimmelijs i sur. [86] predstavili su model strategije minimizacije

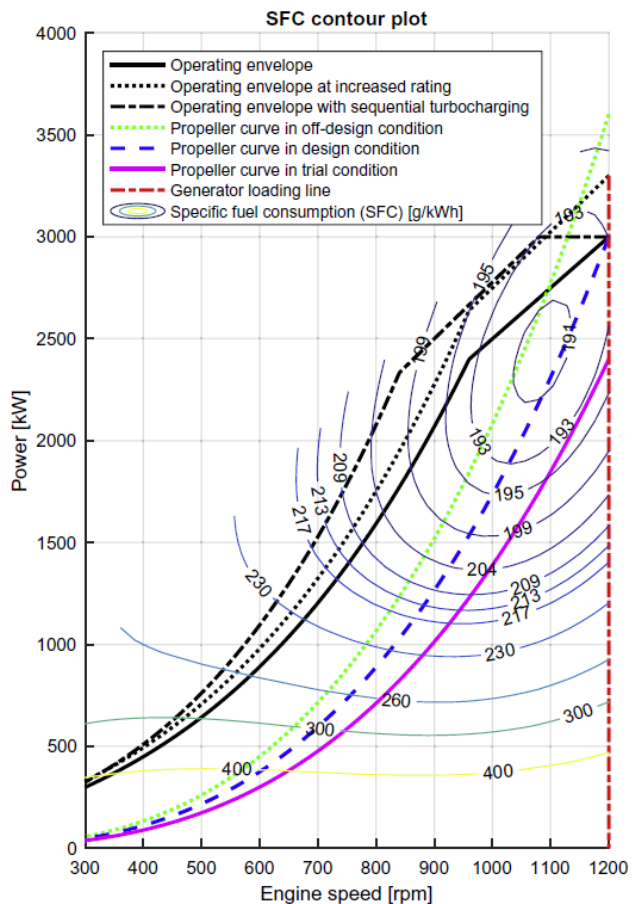
ekvivalentne potrošnje (ECMS) za tegljače, no ova metoda je detaljnije raspravljena u poglavlju 6.

3.6 Elektropropulzija s DC hibridnim izvorom energije

Jedan od glavnih nedostataka električne propulzije jest povećana potrošnja goriva motora pri djelomičnom opterećenju kod rada pri konstantnoj brzini okretaja u usporedbi s motorom koji radi pri promjenjivoj brzini (poput motora s mehaničkom propulzijom) [50]. To je ilustrirano krivuljama potrošnje goriva na slici 8. Taj nedostatak djelomično može biti riješen uvođenjem DC (*engl. Direct current*) brodske električne mreže. Povijesno, DC sustavi su primjenjivani u specifičnim aplikacijama poput podmornica [50]. Međutim, problemi zaštite od kvarova i stabilnosti energetskog sustava ograničili su njihovu primjenu. Nastavak razvoja energetske elektronike i inteligentnih sustava za zaštitu od kvarova i osiguravanje stabilnosti sustava omogućio je širu primjenu DC sustava. Najvažniji razlozi za primjenu DC sustava su povećana učinkovitost pri djelomičnom opterećenju generatora i smanjenje gubitaka u pretvorbi energije [80].

Prednosti primjene hibridnog DC napajanja na brodovima s električnom propulzijom uključuju sljedeće:

- DC sustavi omogućuju rad dizelskog motora pri promjenjivoj broju okretaja, što potencijalno dovodi do smanjenja potrošnje goriva, emisija, buke te mehaničkog i toplinskog opterećenja motora.
- DC sustavi su otporniji na kvarove, jer energetska elektronika omogućava trenutačno upravljanje električnim varijablama, a električni kvarovi se ne šire kroz mrežu te ne remete napon i frekvenciju mreže.
- Količina i dimenzija sklopne opreme može se smanjiti kada energetska elektronika u sustavu obavlja zaštitu od kvarova [87].



Slika 8: Tri propelerne krivulje i linija opterećenja generatora unutar tri radna područja dizel motora s konturnim prikazom specifične potrošnje [50]

Iako DC sustavi mogu donijeti značajne koristi, sljedeći izazovi trebaju biti riješeni:

- Svi izvori energije i opterećenja moraju biti povezani na DC mrežu putem naponskog pretvarača. Ako je potrebno napajati veliki broj potrošača s konstantom frekvencijom, to može dovesti do značajnog povećanja troškova. Međutim, ako se većina ukupnog opterećenja napaja putem pogona s promjenjivim brojem okretaja, DC sustavi mogu dovesti do smanjenja troškova.
- Za omogućavanje DC arhitektura potrebno je riješiti zaštitu od kvarova.
- Potrebna je koordinirana strategija upravljanja kako bi se riješili problemi stabilnosti i postigla optimalna izvedba

DC sustavi, kao što je već kazano, tradicionalno su se koristili u podmornicama s velikim baterijama, no sada se primjenjuju i šire. Američka mornarica koristi DC sustav na svojim razaračima DDG-1000 [88], a Kraljevska mornarica Ujedinjenog kraljevstva istražila je DC sustave za fregate [87]. DC sustavi sada su uobičajeni na trajektima i offshore plovilima, poput MV Jaguar (2012) od Alewijnsea i MV Edda Ferd (2013) od Siemens [84]. Prvi potpuno električni trajekt, MF Ampere, koristi DC mrežu koja se napaja isključivo iz baterija. Offshore DC sustavi obično imaju centralizirani dizajn s jednom ili dvije DC razvodne ploče, distribuirajući AC snagu putem naponskog pretvarača kako bi se osigurala lokalna stabilnost i zaštita od kvarova [87]. Luksuzne jahte također imaju koristi od DC sustava za veću udobnost i tihi električni pogon [89]. Strategije upravljanja za DC brodske sustave su prilično neistražene. Zahedi i sur. [80] predlažu strategiju optimizacije koja daje prednost učinkovitosti goriva, ostvarujući do 8% uštede, dok Park i sur. [90] pokazuju izvedivost modela prediktivnog upravljanja u stvarnom vremenu za uravnoteženje više kriterija izvedbe.

4 Modeliranje komponenti hibridnih brodskih sustava

Matematičko modeliranje u svrhu računalnih simulacija je tehnika za stvaranje digitalnih replika stvarnih sustava ili procesa kako bi se proučavalo njihovo ponašanje u kontroliranim uvjetima. Ova metoda omogućava testiranje i eksperimentiranje bez utjecaja na stvarni sustav, što je korisno kada bi eksperimentiranje u stvarnom životu bilo preskupo, rizično ili tehnički izazovno. U simulacijama je važno pronaći ravnotežu između složenosti, vremena i točnosti. Najšire korištena metoda za modeliranje komponenata je pristup temeljen na fizikalnim zakonitostima [91]. Ti modeli prikazani su matematičkim jednadžbama s poznatim ulazno-izlaznim odnosima. Međutim, u složenijim sustavima može biti izazovno i vremenski zahtjevno prepoznati te odnose. Drugi pristup, koji ubrzano dobiva na popularnosti, jest metoda modeliranja temeljena na obradi podataka. Ovim pristupom moguće je modelirati komponente bez potpunog razumijevanja sustava, njegovih unutarnjih parametara i temeljnih fizikalnih zakonitosti, već se umjesto toga oslanja isključivo na podatke. Ipak, ovakav pristup može dati fizikalno nekonzistentne rezultate ako nisu pravilno implementirani [92].

4.1 Modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima

Većina studija modeliranja zasnovanih na fizikalnim zakonitostima odnosila se na dizelske električne, baterijske ili hibridne brodove s vodikom, dok se u literaturi postoji praznina u modeliranju energetskih sustava s alternativnim gorivima, koji su se u posljednje vrijeme značajno razvijali. Pojednostavljeni matematički modeli i obične diferencijalne jednadžbe uglavnom su se koristili za modeliranje brodskih energetskih i pogonskih komponenti, dok je MATLAB/Simulink bio najčešće korišten alat za analize [93].

Bagherabadi i sur. u svom istraživanju [94] modelirali su gorivni članak s pomoćnim komponentama koristeći metodu teorije grafova kako bi istražili učinkovitost i dinamički odziv sustava za različite dimenzije i topologije komponenti. Model je imao mogućnost rada u stvarnom vremenu te je mogao pratiti dinamiku gorivnog članka uz skaliranje raspona snage

Balestra i Schjøllberg [95] modelirali su pogonski sustav trajekta na vodik, kombinirajući podatke o stvarnom radu i dinamičke modele komponenti u Simulinku, uz korištenje ode3 (Bogacki-Shampine) solvera. Proučavali su učinke dimenzija komponenti na strategiju upravljanja energijom (*engl. Energy management system, EMS*) temeljenu na pravilima, kao i obrnute učinke. Razvijeni matematički model pokazao se kao robustan i skalabilan, te primjenjiv za sustave do 10 MW.

Donnarumma i sur. [96] prikazali su model pojednostavljenog električnog energetskog sustava, pri čemu su uzeli u obzir elektromehaničko ponašanje dinamičkog odnosa snage i

frekvencije. Budući da se dinamika plovila i električnog sustava razlikovala, sustavi s krutim običnim diferencijalnim jednadžbama integrirani su u vremensku simulacijsku platformu s kraćim vremenskim koracima. Model je imao mogućnost rada u stvarnom vremenu i koristio se za proučavanje ponašanja plovila u zahtjevnim radnim uvjetima.

Zhu i sur. [97] su također razmatrali elektromehaničku dinamiku za matematičko modeliranje DC-baziranog brodskog distribucijskog sustava na razini sustava. Za predloženu metodu modeliranja smanjenog reda i prosječne vrijednosti korišten je solver s promjenjivim korakom ode15s, čime su postigli visoku računalnu učinkovitost simulacija uz dovoljnu točnost za stacionarne i prolazne operacije, omogućujući prilagodbu i drugim sustavima.

Abrougui i sur. [98] koristili su MATLAB/Simulink za rješavanje običnih diferencijalnih jednadžbi za pogonske komponente električnog broda, gdje su jednadžbe električnog stroja bile pojednostavljene, te je brzo i precizno pokazano da nije došlo do prekoračenja u brzini naprijed broda i brzini vrtnje električnog motora.

Zhu i Dong [99] su u svom istraživanju koristili MATLAB/Simulink i SimPowerSystems za rješavanje temeljnih jednadžbi dinamičkih komponenti AC distribucijskog sustava za dizelski električni trajekt. Parametri komponenti određeni su na temelju podataka proizvođača, a smanjenje potrošnje goriva i troškova energije prikazano je usporedbama s konvencionalnim verzijama trajekta.

Hemdana i sur. [100] analizirali su različite serijske i paralelne konfiguracije pogonskog sustava s gorivnim člankom, generatorom, baterijama i solarnim panelima. Sveukupni model bio je četvrtog reda, nelinearan i multivarijabilan; potrebna snaga procijenjena je rješavanjem diferencijalnih jednadžbi pogonskog sustava, pri čemu je potvrđeno pravilno funkcioniranje sustava u različitim topologijama.

ovi fizikalni pristup modeliranju, kojim se nastojalo izbjeći dugotrajno rješavanje simulacija složenih međusobno povezanih energetske sustava, bila je kosimulacija korištenjem tzv. Functional Mockup Interface standarda [101]. Korištenjem ovog standarda modeli se mogu rješavati neovisno koristeći vlastite solvere i lokalne vremenske korake, različite metode modeliranja i alate, no simuliraju se zajedno u istom digitalnom okruženju, čime je postignuto značajno smanjenje vremena simulacije uz zadržavanje željene točnosti. Perabo i sur. [102] su odvojeno modelirali komponente AC-baziranog dizelskog električnog plovila u MATLAB/Simulink-u, dok je simulacija integriranog pogonskog sustava provedena na platformi Open Simulation. Korišteni su solveri prvog reda Eulera za električne komponente i četvrtog reda Runge-Kutta za motore i propelere, a rezultati su dobiveni nakon 8 minuta uz gotovo identičnu točnost kao kod monolitne simulacije.

U radu [103] kosimulacijom je modeliran hibridni DC sustav s baterijama i dizelskim generatorima, pri čemu su komponente i njihovi kontroleri podijeljeni u različite funkcionalne modele (FMU) prema potrebnoj razini točnosti. Eulerov solver prvog reda i Runge-Kutta solver četvrtog reda korišteni su u ovom procesu. Rezultati dinamičkih

opterećenja uspoređeni su s [104], gdje je monolitna simulacija izvedena u MATLAB/Simulinku za isti sustav korištenjem metode teorije grafova, te se pokazalo da su rezultati kosimulacijom dobiveni brže, bez gubitka točnosti. Razvijeni model hibridnog energetskog sustava mogao se koristiti za virtualno testiranje u stvarnom vremenu.

Skjong i sur. [105] također su koristili kosimulaciju, koristeći Euler i Runge-Kutta metode integracije za različite funkcionalne modele, pri čemu su istraživali hidrodinamičke performanse brodova u različitim uvjetima. Tablica 4 prikazuje sumirani pregled radova koji su koristili modele temeljene na fizikalnim zakonitostima.

Tablica 4: Pregled radova koji su koristili modele temeljene na fizikalnim zakonitostima

Ref.	Autori	Opis modela	Alat/Metoda	Fokus istraživanja
[90]	Mytonopoulos i sur.	Pregled modeliranja i optimizacije brodskih energetskih sustava	MATLAB/Simulink	Analiza modeliranja brodskih energetskih sustava s alternativnim gorivima
[91]	Bagherabadi i sur.	Model gorivnog članka s pomoćnim komponentama koristeći teoriju grafova	Nepoznat	Istraživanje učinkovitosti i dinamičkog odziva za različite dimenzije i topologije
[92]	Balestra i Schjøberg	Model pogonskog sustava trajekta na vodik u Simulinku	MATLAB/Simulink (ode3 solver)	Učinci dimenzija komponenti na EMS temeljen na pravilima
[93]	Donnarumma i sur.	Pojednostavljeni model električnog energetskog sustava s elektromehaničkim ponašanjem	Nepoznat	Dinamički odnos snage i frekvencije u zahtjevnim uvjetima
[94]	Zhu i sur.	Modeliranje DC-baziranog brodskog distribucijskog sustava	Solver s promjenjivim korakom ode15s	Visoka računalna učinkovitost za stacionarne i prolazne operacije
[95]	Abrougui i sur.	MATLAB/Simulink za modeliranje pogonskih komponenti električnog broda	MATLAB/Simulink	Precizno praćenje brzine naprijed i brzine vrtnje električnog motora
[96]	Zhu i Dong	AC distribucijski sustav za dizelski električni trajekt	MATLAB/Simulink, SimPowerSystems	Ušteda goriva i energije u odnosu na konvencionalne trajekte
[97]	Hemdana i sur.	Serijske i paralelne konfiguracije pogonskog sustava s gorivnim člankom i solarnim panelima	Nepoznat	Funkcioniranje sustava u različitim topologijama
[98]	Gomes i sur.	Kosimulacija pomoću Functional Mockup Interface standarda	Functional Mockup Interface standard	Smanjenje vremena simulacije zadržavajući točnost
[99]	Perabo i sur.	Modeliranje komponenti AC-baziranog dizelskog električnog plovila u MATLAB/Simulink-u i Open Simulation	MATLAB/Simulink, Open Simulation	Integrirana simulacija s Eulerovim i Runge-Kutta solverima
[100]	Ghimire i sur.	Kosimulacija hibridnog DC sustava s baterijama i dizelskim generatorima	Euler i Runge-Kutta solveri	Brža simulacija uz očuvanje točnosti u usporedbi s monolitnom simulacijom
[101]	Ghimire i sur.	Monolitna simulacija hibridnog sustava koristeći teoriju grafova	MATLAB/Simulink	Usporedba s kosimulacijom
[102]	Skjong i sur.	Hidrodinamičke performanse brodova u različitim uvjetima koristeći kosimulaciju	Euler i Runge-Kutta metode integracije	Performanse brodskih sustava u različitim uvjetima

4.2 Metode temeljene na obradi podataka

Ghimire i sur. u svom radu [28] razvili su dinamičke modele pogonskog sustava temeljene na polinomima kako bi procijenili ukupnu učinkovitost, s obzirom na konvencionalne dizelsko-električne i hibridne konfiguracije baterija, uz AC ili DC distribucijske sustave. Pokazana je računalna učinkovitost metode za procjene učinkovitosti složenih energetske sustava.

U radu Swider i sur. [106] izgradili su statistički model, tzv. Generalized Additive Model, kojim se mogla procijeniti potrebna snaga broda i njezini najutjecajni parametri za različite vremenske i valne uvjete. Takav model bio je točniji od modela temeljenog na regresiji jer je mogao uključiti nelinearne efekte.

Fang i sur. [107] predložili su metodu koja koristi ekstremni model učenja (Extreme Learning Machine) za karakterizaciju nesigurnosti fotonaponske proizvodnje energije. Neuralna mreža je trenirana kako bi predvidjela izlaznu snagu za različite uvjete temperature i solarnog zračenja duž navigacijske rute. Ova se metoda pokazala robusnom jer je omogućavala fleksibilnost u promjeni radnih uvjeta.

Postoji nekoliko studija koje su se usredotočile na predviđanje performansi broda.

Karagiannidis i Themelis [108] u svom radu trenirali su neuralne mreže korištenjem podataka s brodskih senzora kako bi procijenili snagu osovine i potrošnju goriva. Pokazali su da se poboljšanjem svijesti o stanju trupa i propelera te pažljivom filtracijom podataka preciznost modela mogla povećati za 1,5%.

Coraddu i sur. [109] predložili su digitalni blizanac temeljen na obradi podataka za dva tankera kako bi izračunali gubitak brzine uslijed onečišćenja na trupu brodova i propeleru. Ovaj model je koristio ekstremni model učenja za otkrivanje odstupanja u brzini, pri čemu je metoda imala veću točnost predviđanja u odnosu na standardni pristup ISO 19030.

Assani i sur. [110] u svom opsežnom pregledu literature o digitalnim blizancima u pomorstvu prikazali su da je dostupno ograničeno znanje o digitalnim blizancima energetske sustava brodova temeljenih na obradi podataka te da ima prostora za napredak u tom smjeru, jer se u većini slučajeva ti modeli razvijaju na fizikalnim zakonitostima.

Postoji nekoliko studija slučaja koje su koristile metode temeljene na obradi podataka za praćenje stanja i otkrivanje grešaka u glavnim strojnim sustavima brodova.

U radu [111] razvijen je model podržanih vektora (Support Vector Machine) koji je treniran koristeći podatke iz dnevnih izvješća za normalne radne uvjete s ograničenim pretpostavkama kako bi pratio performanse dizelskog generatora u brodovima. Pokazano je da model temeljen na obradi podataka može točno razlikovati normalne i neispravne uvjete rada stroja te se može koristiti za različite energetske sustave. Modeli temeljeni na obradi podataka mogli su rano otkriti kvarove povezane s temperaturom ispušnih plinova i tlakom usisnog zraka glavnog motora, kako bi se održao energetski učinkovit rad.

Surogatni modeli temeljeni na obradi podataka također su korišteni za modeliranje složenih sustava radi postizanja dovoljno točnih rezultata uz brzu računalnu obradu. Ti su modeli obučavani podacima iz fizičkih simulacija koje su inače dugotrajne. Surogatni modeli su nedavno korišteni za optimizaciju performansi gorivnih članaka koje imaju složena, multifizikalna svojstva [112]. Surogatni modeli također su korišteni za modeliranje i optimizaciju baterija u električnim vozilima, posebno za njihove sustave upravljanja toplinom. Zhang i sur. [113] koristili su adaptivni Krigingov visoko dimenzionalni model za modeliranje i optimizaciju sustava upravljanja toplinom u baterijama za električna vozila. Surogatno potpomognute optimizacije također su se provodile za električne motore i pretvarače snage. Balasubramanian i sur. [114] primijenili su surogatni model drugog reda polinoma za optimizaciju dizajna indukcijskog stroja, dok su Lim i sur. [115] koristili Krigingov model za sinkroni motor s permanentnim magnetom kako bi poboljšali elektromagnetsku učinkovitost. Što se tiče naponskih pretvarača snage, u radu [116] korištena je neuralna mreža za poboljšanje učinkovitosti i smanjenja dimenzija komponenti, a u [117] provedena je surogatna globalna optimizacija za unapređenje konfiguracije naponskog pretvarača.

U cjelini, za studije modeliranja energetske sustava brodova temeljene na obradi podataka, najviše su korišteni modeli strojnog učenja za procjene snage i učinkovitosti, predikcije brzine te praćenje stanja energetske sustava pod različitim endogenim i egzogenim parametrima. Tablica 5 prikazuje sumirani pregled radova koji su koristili metode temeljene na obradi podataka.

Tablica 5: Pregled radova koji su koristili metode temeljene na obradi podataka

Ref.	Autori	Opis modela/metode	Fokus istraživanja
[27]	Ghimire i sur.	Dinamički modeli pogonskog sustava temeljeni na polinomima	Procjena učinkovitosti dizelsko-električnih i hibridnih sustava
[103]	Swider i sur.	Generalized Additive Model za procjenu potrebne snage broda	Snaga broda i utjecajni parametri u vremenskim i valnim uvjetima
[104]	Fang i sur.	Extreme Learning Machine za predikciju fotonaponske energije	Fleksibilnost predikcije u promjeni radnih uvjeta
[105]	Karagiannidis i Themelis	Neuralne mreže za procjenu snage osovine i potrošnje goriva	Poboljšanje točnosti kroz filtraciju podataka
[106]	Coraddu i sur.	Digitalni blizanac za izračun gubitka brzine zbog onečišćenja	Predviđanje brzine uz veću točnost
[107]	Assani i sur.	Pregled digitalnih blizanaca u pomorstvu	Ograničeno znanje i potencijal za razvoj digitalnih blizanaca
[108]	Lazakis i sur.	Support Vector Machine za praćenje performansi dizelskog generatora	Otkrivanje normalnih i neispravnih radnih uvjeta
[109]	Li i sur.	Surogatni modeli za optimizaciju performansi gorivnih članaka	Optimizacija složenih energetske sustava
[110]	Zhang i sur.	Adaptivni Krigingov model za optimizaciju sustava upravljanja toplinom baterija	Održavanje temperaturnog raspona rada
[111]	Balasubramanian i sur.	Surogatni model za optimizaciju dizajna indukcijskog stroja	Optimizacija elektromotora
[112]	Lim i sur.	Krigingov model za sinkroni motor s permanentnim magnetom	Poboljšanje elektromagnetske učinkovitosti
[113]	Bui i sur.	Duboka neuronska mreža za optimizaciju komponenti pretvarača snage	Optimizacija dimenzija komponenti
[114]	Rafiezadeh i sur.	Surogatna globalna optimizacija za konfiguraciju pretvarača snage	Unapređenje konfiguracije pretvarača

5 Strategije upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava

Implementacija strategije pametnog upravljanja energijom u stvarnom vremenu od iznimne je važnosti za brodove s hibridnim pogonom kako bi se osigurala veća učinkovitost sustava i komponenti te ekonomično, sigurno i pouzdano djelovanje. S obzirom na to da hibridni energetske sustavi sadrže više izvora energije i nekoliko potrošača, tijekom različitih vrsta operacija mogu se pojaviti različite dinamičke karakteristike. Stoga sustav upravljanja energijom (EMS) mora biti dobro organiziran i primijenjen kako bi omogućio jasan odgovor na promjenjive dinamičke zahtjeve sustava i osigurao sigurno napajanje pomoćnih sustava i pogonskih sustava broda. Primjeren EMS može poboljšati energetske učinkovitost i smanjiti potrošnju goriva kontroliranjem svakog izvora energije radi postizanja optimalnih uvjeta rada. Općenito, postoje dvije vrste EMS-a koje se mogu razmotriti za brodove: strategije temeljene na pravilima i optimizirane strategije upravljanja [118].

5.1 Strategije temeljene na pravilima

Sustav upravljanja temeljen na pravilima je statička strategija upravljanja koja pokazuje dobru robusnost i visoku učinkovitost u stvarnom vremenu, pružajući praktična pravila upravljanja dobivena iz prethodnih iskustava i stručnog znanja. Međutim, kapaciteti optimizacije su ograničeni zbog slabog dinamičkog odgovora na promjene. Upravljanje temeljenom na pravilima često se koristi s logičkim pragovima [119], a predložene su različite strategije upravljanja istim pristupom za hibridne sustave s više izvora energije. Primjerice, hijerarhijski sustav upravljanja energijom za hibridni sustav koji se sastoji od solarnih panela, vjetroturbina, baterija i sustava gorivnih članaka prikazan je uzimajući u obzir ekonomske aspekte u radu Torreglosa i sur. [120] i bit će u nastavku detaljnije pojašnjen. Hijerarhijska strategija upravljanja uključuje glavno upravljanje usmjereno na strategiju troškova generacije i podređeno upravljanje za kaskadno upravljanje u stvarnom vremenu. Glavno upravljanje koristi skup od 10 operativnih stanja, koja se određuju prema unosima poput neto snage, stanja napunjenosti baterije (*engl. State of charge, SOC*) i razina vodikovog spremnika, koji se mogu klasificirati kao visoki (H), normalni (N) ili niski (L). Sustav radi u načinu punjenja (višak energije iz vjetroturbina i PV panela) ili načinu pražnjenja (nedostatak energije). Ekonomski kriteriji utječu na izbor izvora energije, s posebnim stanjima (2, 4, 7 i 10) koja optimiziraju troškove i održavaju SOC i razine vodika unutar granica. EMS izračunava troškove generacije i apsorpcije, uzimajući u obzir životni vijek i ekonomske parametre za komponente poput baterija, gorivnih članaka i elektrolizatora, kao i faktore poput neto sadašnje vrijednosti (NPC) i faktora serijske sadašnje vrijednosti (SPWF). Dijagram na slici 9. predstavlja sustav kontrole za hibridni brodski sustav koji koristi gorivne članke, baterije, elektrolizatore i vjetroturbine za upravljanje proizvodnjom i trošenjem energije. Kroz niz logičkih odluka, sustav određuje kako će se energija generirati, skladištiti

ili trošiti, ovisno o trenutnim potrebama, stanju napunjenosti baterija te razini napunjenosti tanka vodika.

1. Početna točka (Start):

- Sustav započinje procjenom **neto snage** (P_{net}), koja je definirana kao razlika između snage opterećenja (ukupna potrošnja brodskih sustava) i ukupne snage proizvedene iz obnovljivih izvora, tj. vjetroturbine i solarnog sustava.

$$\text{Dakle: } P_{net} = P_{load} - (P_{wind} + P_{solar}) \quad (1)$$

- Ako je $P_{net} > 0$, to znači da postoji potreba za dodatnom snagom, i sustav prelazi u „Način punjenja“, dok u suprotnom prelazi u „Način pražnjenja“ kako bi iskoristio postojeće resurse.

2. Način punjenja:

- U načinu punjenja sustav pokušava pohraniti višak energije. Provjerava se je li maksimalna snaga punjenja baterije veća od neto snage punjenja ($P'_{ch} > P_{net}$). Ako je odgovor "DA", prebacuje se na **S5** gdje je $P_{fc} = 0$ i $P_{bat} = P_{net}$.
- Ako je odgovor "NE", provjerava se SOC baterija i razina napunjenosti tanka vodika. Ovisno o različitim kombinacijama visokih i niskih razina (L ili H), prelazi se na različite strategije poput **S6**, **S7**, **S8**, i **S9**.

3. Način pražnjenja:

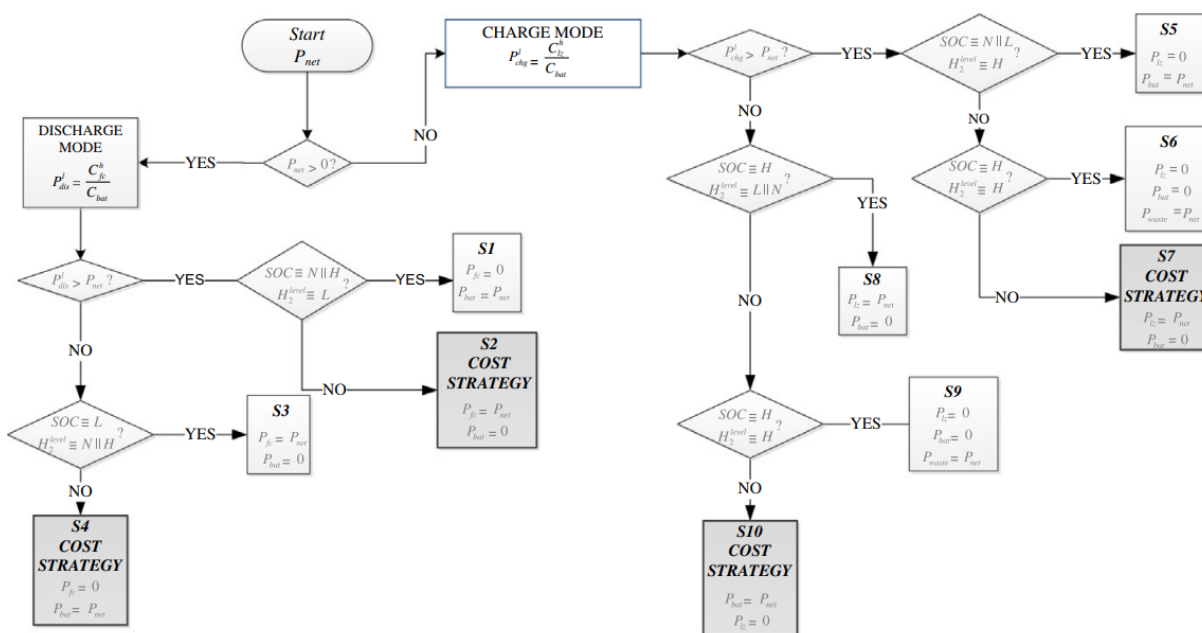
- U načinu pražnjenja sustav koristi energiju iz baterija i drugih izvora. Provjerava se je li maksimalna snaga za pražnjenje baterija manja od neto snage ($P'_{dis} > P_{net}$). Ako je odgovor "NE", sustav provjerava SOC baterija i razinu napunjenosti tanka vodika.
- Ovisno o SOC-u i H nivou, sustav koristi različite strategije, poput **S1**, **S2**, **S3**, i **S4**. Na primjer, u **S2**, energija se troši na način koji optimizira troškove, s $P_{fc} = P_{net}$ i $P_{bat} = 0$.

4. Strategije optimizacije troškova:

- Snage P'_{ch} i P'_{dis} izračunate su kako bi se odredilo koji će izvor generirati ili apsorbirati neto snagu, ovisno o ekonomskim kriterijima. Ovi ekonomski kriteriji definirani su u stanjima **S2**, **S4**, **S7**, i **S10** (označeni kao "cost strategy" - strategija troškova) na dijagramu toka.
- Ostatak stanja (kao što su **S1**, **S3**, **S5**, **S6**, **S8**, i **S9**) uključen je sustav upravljanja energijom kako bi se osiguralo da SOC baterije i razina vodika u tanku ostanu

unutar operativnih granica. Bez ovih stanja, sustav ne bi mogao kontrolirati napunjenost baterije niti razinu vodika u tanku.

Ovaj dijagram predstavlja automatizirani pristup gdje sustav dinamički odlučuje kako će raspodijeliti i koristiti energiju, osiguravajući ekonomičnost i trajnost sustava kroz različite načine upravljanja energijom ovisno o potrebama, stanju baterije i raspoloživoj količini vodika. Ostatak stanja dizajniran je da zamijeni strategiju troškova u kritičnim situacijama, čime se izbjegavaju preopterećenja ili potpuno pražnjenje, osiguravajući stabilnost i pouzdanost sustava.



Slika 9: Strategija upravljanja temeljena na pravilima iz rada Torreglosa i sur. [120]

S druge strane, budući da strategija upravljanja temeljenom na pravilima u velikoj mjeri ovisi o iskustvu projektanta, postaje teško pronaći optimalnu točku za složenije i dinamičnije sustave. S obzirom na to da su pomorski uvjeti nepredvidivi i podložni vanjskim utjecajima poput djelovanja mora i vjetrova, složenije strategije upravljanja postaju važnije kada je potrebno upravljanje s dinamičnim vremenski varijabilnim nelinearnim problemima. Fuzzy logičko upravljanje jedna je od kontrolnih metoda koja ne zahtijeva točan matematički model uz prihvatljivu pogrešku. Razvijena je metoda upravljanja temeljenom na fuzzy logici za upravljanje energijom PV, baterijskog, dizelskog hibridnog RORO broda [121]. Kao rezultat istraživanja, postignuto je smanjenje potrošnje goriva i emisija poboljšanjem ukupnih performansi broda usporedbom stvarnih podataka broda i rezultata simulacija. Druga usporedba između EMS-a temeljenih na fuzzy logici i proporcionalno-integralnom (PI) upravljanju provedena je za sustave napajanja svih električnih brodova srednjeg napona u DC [122]. Iako oba EMS-a uspješno opskrbljuju brodski sustav napajanja pri različitim

zahtjevima za energijom, fuzzy logičko upravljanje pokazalo je bolje rezultate u upravljanju stanjem napunjenosti baterija mijenjanjem stopa punjenja i pražnjenja. Međutim, uspostavljanje fuzzy pravila zahtijeva visoku stručnost u upravljanju sustavom i predikciji ponašanja. Brodovi su dinamički sustavi te ih je teško uklopiti u stabilni linearni matematički model. Slijedom toga, optimizirane strategije upravljanja mnogo su učinkovitije za brodove s više izvora energije nego strategije temeljene na pravilima, zahvaljujući svojoj osjetljivosti na različite operativne aspekte i prikladnosti za složene sustave [123].

5.2 Optimizirane strategije upravljanja

Optimizirana strategija upravljanja može se podijeliti u dvije kategorije: globalna optimizacija (GO) i optimizacija u stvarnom vremenu (*engl. Real-time optimization*, RTO). Prvo, globalna optimizacija koristi sve modele sustava i uvjete s teorijskom osnovom i točnim matematičkim jednadžbama kako bi provela sveobuhvatnu optimizaciju unutar zadanog razdoblja. GO može uključivati algoritam dinamičkog programiranja (*engl. Dynamic programming algorithm*, DPA) [124], genetski algoritam (*engl. Genetic algorithm*, GA) [125], neuralnu mrežu (*engl. Artificial neural network*, ANN) [126], optimizaciju rojem čestica (*engl. Partical Swarm optimization*, PSO) [127], algoritam optimizacije kolonije mrava (*engl. Ant colony optimization algorithm*, ACOA) [128], algoritam simuliranog kaljenja [129] i algoritam diferencijalne evolucije (*engl. Differential evolution algorithm*, DEA) [130] ili druge napredne algoritme optimizacije.

DPA zahtijeva sve informacije o problemu optimizacije unaprijed. U istraživanju optimizacije rasporeda proizvodnje energije za potpuno električni brod pomoću DPA, u odnosu na operativna ograničenja poput emisija stakleničkih plinova ili rasporeda putovanja, i uz pretpostavku da se promjene opterećenja broda mogu predvidjeti, moguće je postići smanjenje operativnih troškova i emisija stakleničkih plinova [124].

GA pokazuje svestranost i široku primjenjivost uz nisku složenost algoritma. Primjerice, u [125] predložena je GA optimizacija za smanjenje potrošnje goriva optimiziranjem raspodjele opterećenja s različitim konfiguracijama izvora energije za kruzer. Kao rezultat, hibridni sustavi pokazali su najbolje performanse među analiziranim parametrima, poput ekonomskih i okolišnih.

U drugom istraživanju o optimalnom dimenzioniranju solarnih panela, sustava za pohranu energije (ESS) i dizelskih generatora korištene su dvije različite varijante PSO za tanker, uz zaključak da bez ESS-a konfiguracija solarno-dizelskog hibridnog sustava nije ekonomski izvediva [127].

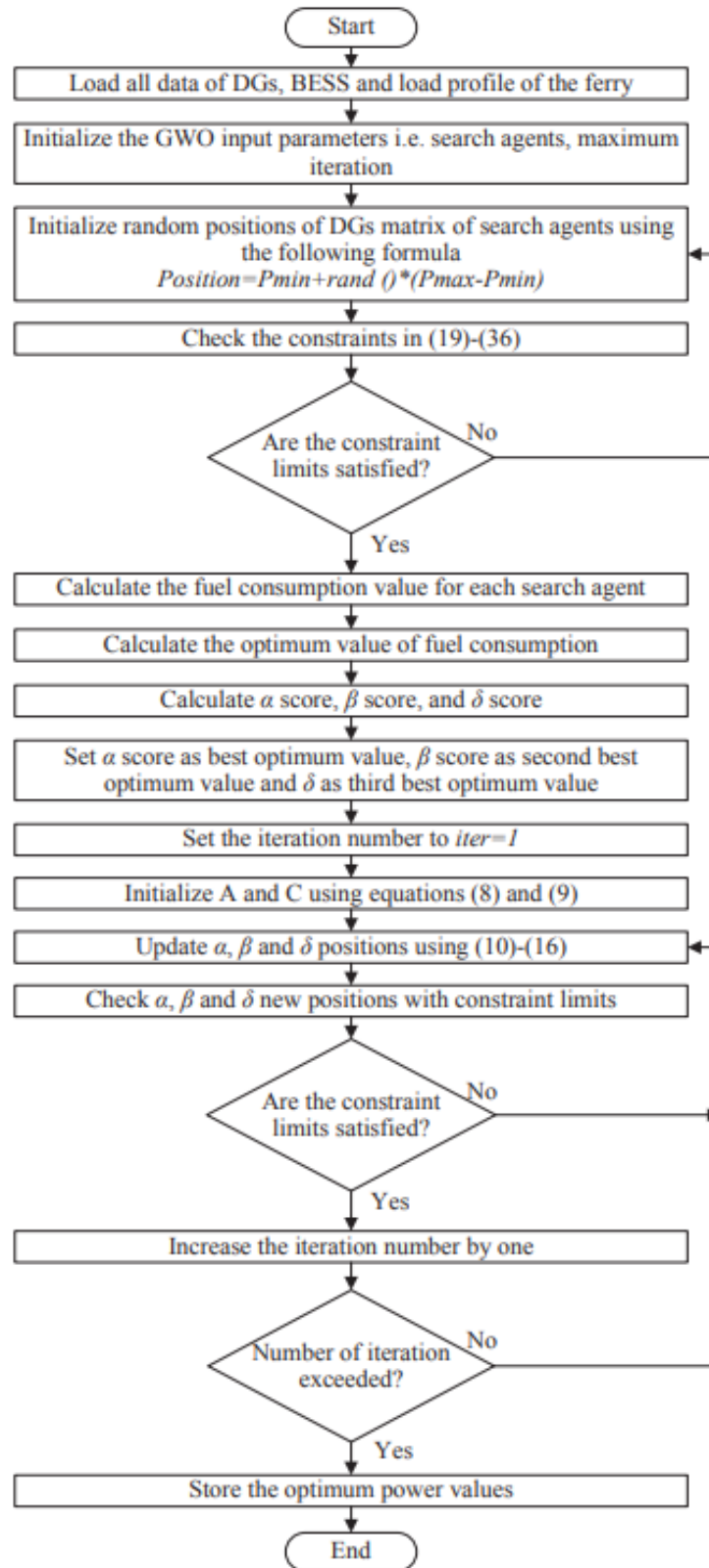
U svrhu osiguravanja učinkovitosti i sigurnosti rada broda s fotonaponskim/baterijskim/dizelskim sustavima i „cold ironing“ sustavom, u radu [131] razvijen je trostupanjski idealni model upravljanja energijom i strategija upravljanja pomoću adaptivne višekontekstualne kooperativne evoluirajuće optimizacije rojem čestica. Iako

predložena strategija može smanjiti troškove električne energije broda uz povećanje korištenja solarne energije, opsežan proces optimizacije zahtijeva vrlo velik obujam podataka što povećava računalno opterećenje i produžava vrijeme potrebno za dobivanje rezultata.

Al-Falahi i sur. [123] su primijenili dvije strategije upravljanja, temeljene na pravilima i na algoritmu optimizatora sivog vuka (*engl. Grey wolf optimizer, GWO*), gdje su potrošnja goriva i smanjenje emisija postavljeni kao indikatori performansi. GWO nadmašuje tradicionalnu metodu temeljenu na pravilima, koja se oslanja na unaprijed određene uvjete, u smislu smanjenja potrošnje goriva i emisija. GWO može riješiti probleme optimizacije s više ciljeva i mnogim operativnim ograničenjima, dok tradicionalne metode koriste unaprijed određene uvjete. Dijagram strategije upravljanja dobivene GWO optimizacijom prikazan je na slici 10 te služi za minimizaciju potrošnje goriva i raspodjelu snage za trajekt s dizel generatorima, baterijskim sustavom za pohranu energije i profilom opterećenja trajekta. Dijagram je podijeljen u nekoliko koraka:

1. **Početak i inicijalizacija** – Učitavaju se podaci o generatorima, baterijskom sustavu i profilu opterećenja trajekta. Postavljaju se parametri GWO algoritma, poput broja agenata za pretraživanje i maksimalnog broja iteracija. Agenti dobivaju početne slučajne pozicije unutar definiranih granica.
2. **Provjera ograničenja** – Provjerava se zadovoljavaju li agenti postavljena ograničenja. Ako ne zadovoljavaju, prilagođavaju se.
3. **Izračun potrošnje i optimizacija** – Izračunava se potrošnja goriva za svakog agenta, te se identificiraju najbolji agenti na temelju ocjena α , β i δ , koji predstavljaju tri najbolje pozicije.
4. **Ažuriranje pozicija i ponovna provjera ograničenja** – Na temelju pozicija najboljih agenata, svi agenti ažuriraju svoje pozicije prema formulama koje vode prema optimalnim vrijednostima, te se provjerava zadovoljavaju li nove pozicije ograničenja.
5. **Povećanje broja iteracija i provjera granice** – Broj iteracija se povećava. Ako broj iteracija prelazi zadanu granicu, proces završava.
6. **Pohrana optimalnih vrijednosti** – Na kraju, pohranjuju se optimalne vrijednosti snage koje su pronađene tijekom optimizacije.
7. **Kraj** – Algoritam završava nakon što se pohrane optimalne vrijednosti.

Algoritam razvijen u radu [132] uključuje metodu optimizacije fuzzy logikom s GWO (FL-GWO) kako bi se smanjili operativni troškovi hibridnog električnog trajekta. Nalazi pokazuju da predloženi FL-GWO nadmašuje GWO u uštedi goriva, s povećanjem od 3,14 % i 1,81 % u uvjetima normalnog i visokog opterećenja. Međutim, u oba rada [123, 132] nisu provedene usporedbe s drugim vrstama metaheurističkih algoritama optimizacije kako bi se dodatno potvrdila učinkovitost predloženog algoritma upravljanja



Slika 10: Dijagram strategije upravljanja dobivene GWO optimizacijom [123]

Druga vrsta optimizirane strategije upravljanja je RTO, odnosno optimizacija u stvarnom vremenu. Ovo je strategija optimizacije koja se fokusira na trenutne uvjete energetske potražnje sustava, uspostavljanjem modela u stvarnom vremenu za potrošnju energije. Pontryaginov princip minimuma (PMP) i strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) dvije su popularne RTO tehnike. PMP koristi strategiju minimizacije globalnih problema optimizacije razdvajanjem na lokalne podprobleme kako bi se poboljšalo vrijeme odziva u proračunima sustava. Iako se PMP uglavnom koristi za hibridna električna vozila s mogućnošću vanjskog punjenja (PHEV) [133], rijetko se primjenjuje u brodarstvu.

U radu [133] istraženo je korištenje PMP-a u stvarnom vremenu za smanjenje potrošnje goriva u hibridnom vozilu na gorivne članke. Istovremeno ažuriranje funkcije upravljanja energijom u skladu s nepredviđenim dnevnim ciklusima vožnje, poput zaustavljanja i pokretanja, dinamičkog opterećenja i niske ili visoke izlazne snage, dalo je bolje rezultate od upravljanja temeljenog na pravilima. Rezultati simulacije pokazuju da je trajnost gorivnog članka poboljšana s blagim povećanjem potrošnje goriva i degradacije baterije, te da su prosječni dnevni operativni troškovi učinkovito smanjeni.

ECMS nastoji izračunati optimalne referentne točke upravljanja snagom i optimalne formulacije upravljanja kako bi se minimizirala potrošnja goriva motora [134]. Za nepoznati operativni profil HEV-a, ECMS pokazuje najbolju učinkovitost u potrošnji goriva u usporedbi s različitim strategijama upravljanja [135]. U demonstraciji ECMS-a na hibridnom trajektu postignuto je smanjenje potrošnje goriva za 10% optimizacijom ravnoteže snage između izvora energije [47]. ECMS metoda će detaljnije biti objašnjena u sljedećem poglavlju.

Primjena ACOA algoritma s strategijom minimizacije ekvivalentne potrošnje ECMS na dizelsko-električni hibridni brod analizirana je s ciljem smanjenja potrošnje goriva i fluktuacija stanja napunjenosti baterije u [128]. EMS temeljen na ACOA gotovo je udvostručio učinkovitost u odnosu na strategiju temeljenu na pravilima, smanjujući potrošnju goriva za 6,9% do 12,1%.

U radu [80] predložen je algoritam optimizacije za određivanje optimalnih uvjeta opterećenja radi smanjenja potrošnje goriva hibridnog pogonskog sustava brodova. Proučavani sustav uključivao je dizelske motore, sinkroni generator, ispravljačke jedinice i Li-Ion bateriju kao pohranu energije. Rezultirajuća potrošnja goriva u simulaciji uspoređena je s onom konvencionalnog sustava s izmjeničnom strujom, kao i s istosmjernim sustavom napajanja bez pohrane energije. Rezultati pokazuju da dok istosmjerni sustav bez pohrane energije pruža primjetnu uštedu goriva u usporedbi s konvencionalnim izmjeničnim sustavom (15% uštede goriva), dok optimalno korištenje pohrane energije u istosmjernom sustavu može rezultirati s dodatnih 7% uštede u odnosu na istosmjerni sustav bez pohrane energije.

U radu [136] predložen je EMS temeljen na Double Q learning modelu. Double Q model se trenirao korištenjem stohastičkih profila snage prikupljenih kontinuiranim praćenjem putničkog trajekta, koristeći plug-in hibridni model sastavljen od gorivnih članaka i

baterijskog propulzijskog sustava. Strategije upravljanja energijom koje je generirao model potvrđene su pomoću drugog testnog skupa podataka prikupljenog tijekom drugog mjenog razdoblja. Ograničenje ove metode je potreba za velikom količinom podataka zbog zahtjeva metode za validaciju. Nadalje, kako Q model uključuje „maximization biases“ performanse sustava mogu proizvesti nezadovoljavajuće rezultate. Investicijski i operativni troškovi također nisu uzeti u obzir, što može utjecati na ekonomsku isplativost metode.

U radu [137] korištena je Model Predictive Control (MPC) metoda kako bi se izbjegli frekvencijske prijelazne pojave uzrokovane propelerom u brodski energetska sustav. Uređaj za ublažavanje bio je baterijski sustav pohrana energije, izravno povezan s DC frekvencijskim pretvaračem. Rezultati simulacije pokazuju da predloženo rješenje s baterijskim sustavom i MPC može održati prijelazne frekvencijske poremećaje u brodskom energetska sustavu unutar dopuštenih vrijednosti koje su propisane standardima kvalitete.

U nastavku je prikazana tablica koja sumira sve strategije opisane u prethodna dva poglavlja.

Tablica 6: Pregled strategija upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava

Ref.	Metoda	Opis	Vrsta metode	Prednosti	Nedostaci
[117]	Hijerarhijsko upravljanje	Sustav upravljanja energijom za solarne panele, vjetroturbine, baterije i FC, uključujući ekonomske aspekte.	Metoda temeljena na pravilima	Osigurava optimizaciju troškova i balans SOC te razine vodika.	Složena implementacija, ovisnost o postavljenim pravilima.
[118], [119]	Fuzzy logičko upravljanje	Metoda upravljanja bez preciznog matematičkog modela, primijenjena na PV-baterijsko-dizelski RORO brod, koja smanjuje potrošnju goriva i emisije.	Metoda temeljena na pravilima	Fleksibilno i učinkovito smanjenje potrošnje goriva i emisija.	Visoka stručnost potrebna za postavljanje pravila, zahtjevi za kompleksnijim matematičkim modelima.
[130]	Pontryaginov princip minimuma	Primjena na lokalne podprobleme u stvarnom vremenu radi optimizacije potrošnje goriva u hibridnim vozilima.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Poboljšana prilagodljivost i trajnost sustava.	Ograničena primjena u pomorskoj industriji.
[45], [131], [132]	Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje	Optimizira potrošnju goriva balansiranjem izvora energije u hibridnim sustavima.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Učinkovitost u hibridnim sustavima, smanjenje potrošnje goriva.	Teško odrediti faktor ekvivalencije
[120]	Grey Wolf Optimizer	Algoritam za smanjenje potrošnje goriva i emisija, nadmašuje tradicionalne metode temeljenim na pravilima, primijenjen za hibridne sustave.	Optimizacijska metoda, globalna	Nadmašuje tradicionalne metode temeljenim na pravilima.	Visoki zahtjevi za podacima i resursima za validaciju.
[120], [129]	Fuzzy logika s GWO	Kombinacija fuzzy logike i GWO za uštedu goriva na hibridnim trajektima, s poboljšanjima u usporedbi s GWO metodom.	Optimizacijska metoda, globalna	Ušteda goriva i povećana učinkovitost.	Nedostatak usporedbe s drugim metaheurističkim algoritmima.
[134]	Model Predictive Control	Primjenjuje se za održavanje stabilnosti sustava u prijelaznim stanjima kroz baterijski sustav, prema standardima kvalitete, uz regulaciju frekvencijskih oscilacija.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Održava stabilnost sustava prema standardima kvalitete.	Visoka složenost implementacije, zahtijeva baterijski sustav

6 Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje

Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) je jedna od poznatih strategija optimizacije upravljanja energijom u stvarnom vremenu, koja je proizašla iz rada [138]. Glavna ideja ECMS-a je preoblikovati problem globalne optimizacije u problem lokalne optimizacije minimizacijom ekvivalentne potrošnje goriva. Ekvivalentna potrošnja goriva je definirana kao zbroj stvarne potrošnje goriva iz motora s unutrašnjim izgaranjem i pretvorene potrošnje goriva iz spremnika energije (najčešće baterija). Na temelju PMP-a, predlaže se faktor ekvivalencije za pretvorbu električne energije u ekvivalentnu energiju goriva. Međutim, performanse upravljanja HEV-ovima snažno ovise o točnoj procjeni faktora ekvivalencije. Optimalni faktor ekvivalencije povezan je posebice s voznim ciklusom i ograničenjima SOC-a baterije, a ti parametri su općenito nepredvidivi. Stoga je faktor ekvivalencije ključni element ECMS-a, koji je intenzivno istraživao od strane velikog broja stručnjaka.

U nastavku će biti prikazan optimizacijski problem kojeg su definirali Kalikatzarakis i sur. [139] gdje su primjenili ECMS metodu na hibridni tegljač. Pogonski sustav tegljača sastoji se od dva glavna dizelska motora, dizel generatora, indukcijskog elektromotora te baterijskog sustava za pohranu energije. Glavni motori rade kako bi minimizirali trenutnu ekvivalentnu potrošnju goriva plovila, uz uvjet brzine propelera, zahtjeva za snagom za pogon, tražene snage pomoćnih sustava, stanja napunjenosti baterije i tri binarne varijable za ON/OFF stanje svake komponente. Struja baterije i_{bat} i okretni moment M_{im} elektromotora utvrđuju se iz kontrolnih varijabli ECMS-a, snage baterije P_{bat} i snage elektromotora P_{im} kako slijedi:

$$i_{bat}(t) = \frac{P_{bat}}{\sqrt{3}u_{line}(t)\cos(f_p)} \quad (2)$$

$$M_{im}(t) = \frac{P_{im}}{2\pi t_s g_b \eta_t} \quad (3)$$

Zahtjev za pogonskom snagom glavnih motora P_{me} je određen iz ukupne zahtijevane snage $P_{d,p}$ umanjene za doprinos snage elektromotora P_{im} :

$$P_{me}(t) = P_{d,p}(t) - P_{im}(t) \quad (4)$$

Slično tome, tražena snaga pomoćnih sustava P_{aux} određuje snagu dizel generatora P_{dg} , kada dizel generator i baterijski paketi rade paralelno, ili snagu baterije P_{bat} kada je dizel generator isključen, uz sljedeću jednakost:

$$P_{dg}(t) = P_{aux}(t) + (P_{im}(t) + b_{im}(t)P_{im,+fc_loss}) - P_{bat}(t) \quad (5)$$

Ekvivalentna potrošnja goriva ima za cilj prebacivanja globalnog optimizacijskog problema minimiziranja potrošnje goriva u operativnom profilu na trenutnu optimizaciju ekvivalentne potrošnje goriva. Da bi se to postiglo, trošak se dodjeljuje korištenju svakog izvora energije. Kada strategija ima za cilj pražnjenje baterije na minimalni SOC, to se može postići

smanjenjem troška dodijeljenog korištenju baterije. Stoga je ekvivalentna potrošnja goriva zbroj potrošnje goriva glavnih motora i dizel generatora i ekvivalentne potrošnje goriva baterijskih paketa, te se može definirati kao slijedi:

$$\dot{m}_{fuel,eqv}(t) = \sum \dot{m}_{fuel,me}(t) + \dot{m}_{dg} + \dot{m}_{fuel,bat}(t). \quad (6)$$

Umjetna potrošnja goriva baterijskih paketa proporcionalna je faktoru ekvivalencije s , koji se razlikuje ovisno o tome puni li se baterijski paket ili prazni. U izvornoj formulaciji ECMS-a [140], faktor ekvivalencije je vektor vrijednosti, jedan za punjenje i jedan za pražnjenje, no Kirk u [141] je pokazao da nije potrebno više faktora, već se faktor ekvivalencije može implicitno uzeti u obzir pomoću jednog parametra, kako slijedi:

$$\dot{m}_{fuel,bat}(t) = c_{sfo,eqv}(t) P_{bat}(t) = \frac{s(t)}{\eta_{bat}(P_{bat}(t))^{\text{sgn}(P_{bat}(t))}} \frac{P_{bat}(t)}{Q_{lhw}} \quad (7)$$

gdje je η_{bat} učinkovitost baterije, Q_{lhw} donja ogrijevna vrijednost goriva i $s(t)$ faktor ekvivalencije.

Rezultatni problem definicije optimizacije je:

$$u_c^0(t) = \arg \min_{u_c} \dot{m}_{f,eqv}(u_c, s(t)). \quad (8)$$

Minimizacijski algoritam mora ipak biti ograničen, te u ovom slučaju moraju biti definirana radna područja svih aktivnih sustava, a to je minimalno i maksimalno stanje napunjenosti baterije te minimalne i maksimalne izlazne snage glavnih motora i dizel generatora.

Sljedeći dio poglavlja usmjeren je na primjenu strategije minimizacije ekvivalentne potrošnje u cestovnim vozilima, s posebnim naglaskom na metode procjene faktora ekvivalencije i izazove povezane s optimizacijom upravljanja energijom. Fokus će biti na prilagodba koje omogućuju učinkovitu primjenu ECMS-a u stvarnim voznim ciklusima. U drugom dijelu teksta bit će obrađena primjena ECMS-a u pomorstvu, uključujući specifične izazove i prilagodbe potrebne za učinkovitu primjenu ove strategije u pomorskom sektoru.

Istraživanja faktora ekvivalencije uključuju metode procjene i utjecajne faktore. Općenito, ove metode procjene mogu se klasificirati u dvije vrste [142]. Prva vrsta metoda procjene temelji se na pretpostavci da je faktor ekvivalencije konstantan tijekom voznog ciklusa. Optimalni konstantni faktor ekvivalencije može se dobiti na temelju prosječne učinkovitosti pretvorbe energije između goriva i električne energije [140], metodom "shooting" algoritma [143], globalnom optimizacijom poput DP-a [144], metodom marginalnih troškova temeljenom na DP-u [145], GA [146] i algoritmom optimizacije kolonije mrava [147]. Iako su takve metode vrlo jednostavne, za njih je potrebno potpuno poznavanje voznog ciklusa unaprijed te je potrebna ponovna kalibracija faktora ekvivalencije za svaki pojedinačni ciklus, što ograničava opću primjenu ECMS-a.

Druga vrsta metoda procjene uključuje izračun varijabilnog faktora ekvivalencije direktno tokom simulacije, koji se dalje može podijeliti u dvije podkategorije. Prva podkategorija uzima u obzir ograničenja SOC-a baterije tijekom voznog ciklusa. Zbog sličnosti između faktora ekvivalencije i PMP koeficijenta, na temelju prve metode procjene koeficijenta, funkcija faktora ekvivalencije može se sastojati od konstantnog optimalnog faktora ekvivalencije dobivenog optimizacijom u kombinaciji s korekcijskim članom SOC-a ili koji je formuliran kao P kontrola [148], PI kontrola [149] ili druga nelinearna povratna kontrola [145]. Glavni nedostatak ovih pristupa je osjetljivost funkcije faktora ekvivalencije na vozni ciklus. Ovo ograničenje je u radu [145] prevladano dodavanjem adaptivnog zakona funkciji faktora ekvivalencije. Dodavanjem odstupanja SOC-a baterije u funkciju cilja može zadovoljiti zahtjeve ograničenja SOC-a baterije, ali će dovesti do određenih žrtvovanja ekonomske učinkovitosti goriva zbog nepredvidivog ponašanja baterije. Stoga Sezer i sur. [150] su predstavili novu strategiju održavanja SOC-a koja dodatno poboljšava performanse optimizacije eliminiranjem odstupanja SOC-a iz funkcije troškova i određivanjem prostora pretraživanja optimizacijskih parametara temeljem gornjih i donjih granica SOC-a.

Druga kategorija razmatra ograničenja SOC-a baterije i informacije o voznom ciklusu. Ovisno o razini dostupnih podataka unaprijed, konstruiraju se različite mape faktora ekvivalencije i relevantnih faktora za ažuriranje faktora ekvivalencije. Faktor ekvivalencije može biti povezan s:

- SOC-om baterije i pozicijom vozila [151],
- SOC-om baterije, pozicijom vozila, profilom nadmorske visine i prosječnom brzinom [152],
- SOC-om baterije, duljinom putovanja i promjenom nadmorske visine [153],
- SOC-om baterije, prošlom i predviđenom brzinom vozila i GPS podacima [154].

Takvi pristupi ne zahtijevaju potpuno poznavanje voznog ciklusa, pa se mogu primijeniti u sustavu upravljanja u stvarnom vremenu koristeći prošle, trenutne i buduće informacije iz 3D karata u vozilu [151], navigacijskog sustava temeljenog na GPS-u [152-154] i telemetrijskog sustava [155]. ECMS temeljen na ovoj metodi procjene također se naziva adaptivni ECMS (A-ECMS) ili telemetrijski ECMS (T-ECMS). Slabost ovog pristupa je da metode predikcije informacija o voznom ciklusu obično pate od pogrešaka u predikciji i visokih računalnih troškova.

Što se tiče korištenja ECMS-a u pomorstvu, postoje nekoliko istraživanja koja su spoznala potencijalne benefite ove metode kao strategije upravljanja energijom. Hibridna tehnika upravljanja koja koristi ECMS i strategiju temeljenu na pravilima, uključujući kontroler SOC-a i logiku start-stop za motor, opisana je u radu [156]. Vu et al. u [157] uvode novi način predviđanja opterećenja koja zahtijeva samo informacije o općim radnim karakteristikama broda koji predviđaju zahtjeve za opterećenjem u određenom trenutku iz povijesnih podataka. Rezultati simulacije pokazuju da je optimalni trošak rada hibridnog tegljača 9.31% niži u usporedbi sa strategijom upravljanja energijom temeljenom na pravilima. U slučaju

neizvjesnosti opterećenja, algoritam daje trošak 8.90% niži u usporedbi sa strategijom upravljanja energijom temeljenom na pravilima

A-ECMS primijenjen je u radu [139] s ciljem povećanja uštede goriva i smanjenja emisija. Metode u stvarnom vremenu uspoređivane su s postojećim sustavom temeljenim na pravilima. Ipak, budući da razlika između dviju procedura nije bila stalna niti značajna, A-ECMS ne nadmašuje redovito konvencionalni ECMS zbog ograničenog vremenskog okvira adaptivnog algoritma i nepredvidivosti raspodjele energetske potražnje.

Zaključno, iako strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) je pokazala značajan utjecaj kao strategija upravljanja energijom u cestovnim vozilima, postoji značajna praznina u istraživanjima primjene ove strategije u pomorstvu. Posebno nedostaje istraživanja koja bi se fokusirala na mogućnost određivanja adaptivnog faktora ekvivalencije gdje najveći utjecaj ima SOC baterije i profil opterećenja hibridnog sustava, koji ne varira ni približno toliko kao u cestovnom prometu. Takav pristup mogao bi omogućiti precizniju procjenu faktora ekvivalencije, optimizirajući upravljanje energijom u pomorskim hibridnim sustavima te otvarajući nove mogućnosti za daljnje istraživanje i razvoj ECMS-a u ovom sektoru.

7 Dimenzioniranje hibridnih brodskih sustava

Jedan od najvećih izazova pri integraciji baterijskog sustava u hibridni pogonski sustav je određivanje njegovog optimalnog kapaciteta [158]. Izbori će imati utjecaj na trošak investicije, količinu uštedenog goriva i procijenjeni vijek trajanja sustava za pohranu energije [159]. Osim toga, najbolje opcije ovise o karakteristikama performansi broda i sigurnosnim ograničenjima u različitim režimima rada plovila, koji često favoriziraju upotrebu sustava za pohranu, ali istovremeno nameću neka ograničenja na njegove dimenzije i korištenje [160]. Kada se u sustav ugradi baterijski sustav pohrane malog kapaciteta, mogući su nepotrebni troškovi održavanja zbog starenja opreme, dok visoki investicijski troškovi neće postići najbolji omjer troškova i koristi pri upotrebi sustava prevelikog kapaciteta [161].

7.1 Analitički pristup

Analitički pristup određuje optimalni kapacitet baterijskog sustava (*engl. Battery energy storage system*, BESS) izvođenjem i evaluacijom niza matematičkih jednadžbi [162]. Tijekom procesa odabira, ciljne funkcije i uspostavljena ograničenja sustava kontinuirano se procjenjuju s više parametara, a parametri s najboljim rezultatima, uključujući kapacitet BESS-a, odabrani su kao najbolje rješenje. Barrera-Cardenas i sur. u [163], su razvili metodologiju za dimenzioniranje sustava za pohranu energije u baterijama za hibridne pomorske energetske sustave i primijenili za slučajeve s dva operativna profila, prvi u kojima se BESS koristi kao rezerva snage ili drugi, koji strateškim opterećivanjem motora ga se drži u optimalnom području rada. Ova metodologija predlaže niz različitih kapaciteta sustava koristeći tri ključna indeksa performansi: godišnja uštede goriva, očekivani vijek trajanja baterija i indeks isplativosti (*engl. Cost benefit indeks*, CBI). Vijek trajanja baterije je ključan za ekonomsku održivost BESS-a, a prvenstveno ovisi o starenju ćelija baterije, koje gube kapacitet i povećavaju unutarnji otpor tijekom vremena. Za litij-ionske baterije, degradacija kapaciteta je pouzdaniji kriterij za kraj životnog vijeka od povećanja unutarnjeg otpora [164]. U radu su definirana dva načina starenja baterije. Kalendarsko starenje događa se tijekom perioda mirovanja i ovisi o temperaturi i stanju napunjenosti (SOC), dok se degradacija zbog cikliranja javlja tijekom aktivnog korištenja. Ukupni gubitak kapaciteta u određenom razdoblju izračunava se na temelju degradacije zbog cikliranja i kalendarskog starenja i definirana je sljedećim izrazom:

$$\frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{BOL}}} = \sum_{t=1}^{N_{\text{cal}}} D_{Q,\text{cal}}(t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{cycle}}} D_{Q,\text{cyc}}(k) < \frac{k_{\text{EOL}}}{100} \quad (9)$$

gdje Q_{loss} je ukupni gubitak kapaciteta baterije, Q_{BOL} je inicijalni kapacitet baterije, N_{cal} i N_{cycle} broj ciklusa kod kalendarskog starenja i ciklične degradacije, $D_{Q,\text{cal}}$ i $D_{Q,\text{cyc}}$ su faktori usred kalendarskog starenja i cikličke degradacije i k_{EOL} je prag kraja životnog vijeka baterije.

Uštede goriva izračunavaju se za oba načina rada, kad je BESS samo rezerva snage ili kad služi za preuzimanje dinamičkih opterećenje motora. Ukupna ušteda goriva na godišnjoj razini se računa iz sljedeće jednadžbe:

$$\Delta FC = 8760 \cdot (k_{L,NSR} \cdot \Delta FC_{NSR} + (1 - k_{L,NSR}) \cdot \Delta FC_{SR}) \quad (10)$$

gdje je ΔFC godišnja ušteda goriva, $k_{L,NSR}$ udio rada motora u kojem je motor radio u režimu gdje baterija služi kao rezerva snage, ΔFC_{NSR} i ΔFC_{SR} je satna ušteda goriva u režimu gdje baterija služi kao rezerva snage i u režimu gdje je motor strateški opterećen.

CBI se izračunava oduzimanjem troškova instalacije sustava za pohranu energije i pokretanja/zaustavljanja DG-a od kumulativnih ušteda goriva, čime se određuje ekonomska isplativost BESS-a. To možemo vidjeti u sljedećoj jednadžbi:

$$CBI = CFST - C_{BESS} - C_{SS} \quad (11)$$

gdje $CFST$ ukupna novčana ušteda u gorivu, C_{BESS} je trošak instalacije baterijskog sustava u brod kod retrofittinga te C_{SS} je trošak uzrokovan učestalijim startanjem i gašenjem motora.

Metodologija otkriva kompromis između maksimiziranja uštede goriva i maksimiziranja CBI-a. Postizanje maksimalne uštede goriva i najvišeg CBI-a suprotstavljeni su ciljevi; maksimiziranje jednog obično zahtijeva kompromis u drugome. U studiji, CBI se pokazao osjetljivijim na vijek trajanja BESS-a nego na kapacitet BESS-a. Umjereno velika BESS jedinica, optimizirana za korištenje kao rezerva snage visokog kapaciteta, pruža bolji CBI od veće BESS jedinice koja se koristi za strateško opterećenje, što bi moglo smanjiti stres zbog cikliranja i produljiti vijek trajanja baterije, ali nije ekonomski toliko isplativa solucija. Studija zaključuje da bi korištenje BESS-a za strateško opterećenje trebalo biti ograničeno. Međutim, analiza troškova provedena u ovom radu ima značajna ograničenja jer su procjene nekih varijabli, kao što su operativni troškovi i troškovi održavanja te vijek trajanja BESS-a, teško odredive.

Analitički pristup određivanja kapaciteta BESS-a za hibridne energetske sustave također je osmišljen i korišten u radu [165]. Otkriveno je da su maksimalne uštede goriva i indeks koristi dva suprotstavljena cilja. Analiza koristi i troškova pokazala je da je upotreba BESS-a za strateške operacije opterećenja irelevantna. Iako instalacija BESS-a velikog kapaciteta povećava uštede goriva, to također rezultira smanjenjem indeksa koristi-trošak kao i vijeka trajanja baterije.

U radu [166] predložen je pristup za određivanje kapaciteta baterije, pri čemu je optimalni kapacitet BESS-a određena na temelju najzahtjevnijeg uvjeta napajanja, a izračunata je

prema IEEE normi Std. 485-2010 [167]. S obzirom na to da je norma zamijenjena, predložena metoda izračuna više nije prikladna za korištenje u trenutnom sustavu.

7.2 Metaheuristička optimizacija

Suvremene metode optimizacije sve više dobivaju na popularnosti, što dovodi do pojave novog područja optimizacije poznatog kao metaheuristička optimizacija. Većina metaheurističkih algoritama inspirirana je prirodom, jednostavni su i lako primjenjivi te se oslanjaju na snažnu teorijsku osnovu, a ne na empirijske tehnike, kako bi identificirali najbolje rješenje u kratkom vremenskom periodu [168]. Metaheuristička optimizacija inspirirana prirodom može se podijeliti u četiri skupine i neki algoritmi su već spomenuti u prethodnim poglavljima.

- Prva kategorija algoritama inspirirana prirodom uključuje evolucijske algoritme, koji koriste operatore selekcije, križanja, mutacije i reprodukcije za identificiranje superiornih rješenja [169]. Genetski algoritam (GA) prepoznat je kao najistaknutiji evolucijski algoritam, a drugi popularan algoritam je algoritam diferencijalne evolucije (DEA).
- Algoritmi temeljeni na fizikalnim zakonitostima čine drugu kategoriju. Fizikalne zakonitosti služe kao inspiracija za ove tehnike optimizacije [169], s poznatim algoritmima kao što su simulirano kaljenje i optimizator multi-svemira (*engl. Multi-Verse Optimizer, MVO*).
- Treća kategorija su algoritmi temeljeni na ljudskom ponašanju, koji su inspirirani različitim okolnostima često povezanim s ljudskim ponašanjem i percepcijom [105]. Najpriznatiji algoritmi u ovoj kategoriji su Harmony Search (HS) i Human Group Formation (HGF).
- Tehnike optimizacije inteligencije roja uključene su u posljednju kategoriju. Društveno ponašanje rojeva ili zajednica poput životinjskih krda, kolonija insekata i jata ptica inspirira ove algoritme [170]. Optimizacija rojem čestica je najčešće korišteni algoritam u ovoj kategoriji, dok ostali uključuju Grey Wolf Optimizer (GWO), i Harris Hawks Optimization (HHO).

Metaheuristička optimizacija može se vidjeti u radu [171], gdje je genetski algoritam (GA) primijenjen za pronalaženje optimalnog kapaciteta BESS-a. Količina uštede goriva postignuta predloženom metodom ovisila je o kapacitetu i težini sustava te troškovima, no usporedba s temeljnim sustavom bez BESS-a nije provedena.

Optimalno dimenzioniranje BESS-a razmatrano je u višeobjektivnom pristupu optimizacije u radu od Zhu i sur. [172]. Ne-dominirani sortirajući genetski algoritam II (NSGA II) primijenjen u ovom radu donosi koristi u sve tri ciljne funkcije, smanjujući potrošnju goriva za 14,99 %, emisiju stakleničkih plinova za 14,12 % i troškove životnog ciklusa za 12,11 %. Predložena strategija verificirana je korištenjem hardware-in-the-loop metode, ali primijenjeni EMS

temeljen na pravilima sa statičkim parametrima ograničava performanse optimalnog rješenja.

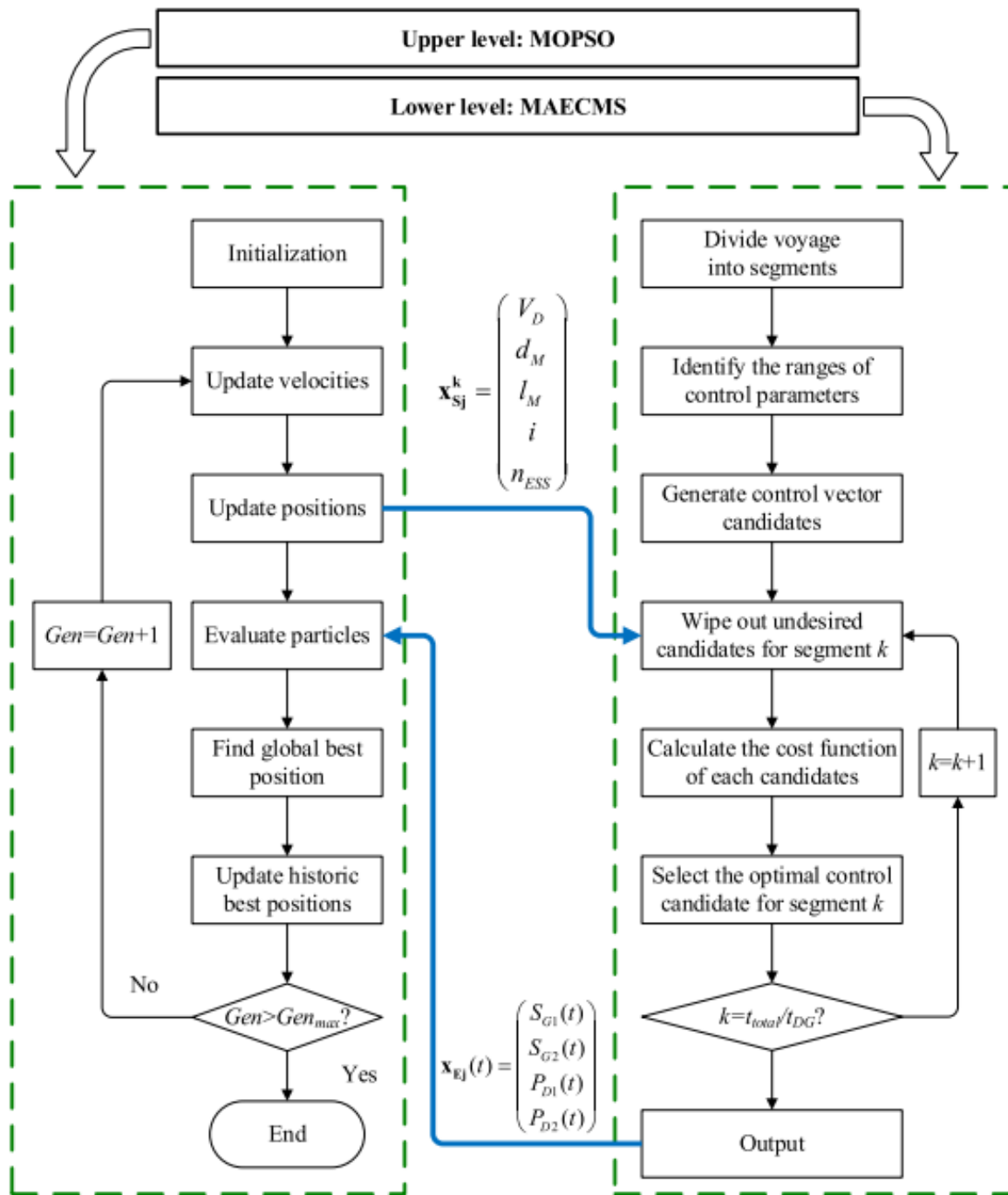
Damian i sur. u [173], su radili optimizaciju kapaciteta BESS-a prevedenu u dva koraka pomoću algoritma Harris Hawks Optimization (HHO), pri čemu je optimalni kapacitet BESS-a određen nakon pronalaska optimalne radne točke, ali stanje napunjenosti BESS-a tokom rada nije bilo razmatrano.

Wen i sur. [174] su proveli je analiza troškova pomoću PSO algoritma za optimizaciju kapaciteta triju vrsta skladišnih tehnologija: olovno-kiselinske baterije, Li-ion baterije i superkondenzatora, u tankeru s hibridnim sustavom dizelskog generatora i PV. Rezultati simulacije sugeriraju da upotreba ESS-a štedi novac u odnosu na tradicionalno skladištenje, no održavanje i dugovječnost baterija nisu uzeti u obzir, što je rezultiralo suboptimalnim rezultatima.

U radu [175] predloženo je optimalno dimenzioniranje BESS-a pomoću MOPSO i NSGA II algoritama kako bi se smanjila potrošnja goriva i kapacitet ugrađenog BESS-a, pri čemu je vijek trajanja baterije bio jedno od ograničenja. Rezultati su pokazali da se uštede goriva u hibridnom električnom trajektu razlikuju ovisno o kapacitetu ugrađenog BESS-a. Ograničenje ove metode je da dizajner mora žrtvovati jedan od ciljeva radi većih koristi. Kako bi se smanjila potrošnja goriva, veliki BESS mora biti integriran u sustav i zamijenjen kako bi zadovoljio ograničenja, što dovodi do visokih investicijskih troškova.

Zhu i sur. [176] predložili su dvostupanjsku optimizaciju s više ciljeva, koja koristi PSO za dimenzioniranje komponenti na višoj razini i modificiranu adaptivnu strategiju minimizacije ekvivalentne potrošnje za upravljanje energijom na nižoj razini. Optimizacija je obuhvaćala tri cilja: potrošnju goriva, emisiju stakleničkih plinova (GHG) i ukupne troškove unutar životnog ciklusa. U nedostatku standardiziranog operativnog ciklusa za brodove, analizirao se generična ruta tegljača sa dva standarda stila plovidbe. Profil jedne vožnje je trajao 4800 sekundi, a tegljač radi 6 tura dnevno, 200 dana godišnje. Eksperimenti na HIL platformi pokazuju da dvostupanjska optimizacija smanjuje potrošnju goriva za 3,37%, emisiju GHG za 6,70% i troškove za 13,95% u odnosu na jednostupanjsku optimizaciju. Ova metoda je posebno važna za dizajn HEPS-a u područjima sa strogim ekološkim standardima i kod troškovno osjetljivih brodovlasnika te se može primijeniti na različite vrste brodova. Ovo je jedan od rijetkih radova koji se bavio istodobno dimenzioniranjem i strategijom upravljanja komponenti, no radio je to samo na profilu opterećenja za tegljača te je koristio ECMS

metodu koja nije uzimala u obzir rutu plovila. Na slici 11 može se vidjeti dijagram kako su obuhvaćene obje optimizacijske strukture.



Slika 11: Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije (MOPSO za višu razinu i MAECMS za nižu razinu) [176]

U radu [112] istražen je izazov optimalnog dimenzioniranja hibridnog broskog energetskeg sustava sastavljenog od PV/dizel sustava i sustava za pohranu energije korištenjem različitih varijanti PSO. Triangularni PSO (TRIPSO) i PSO s promjenjivom inercijskom težinom (TVIW-PSO) rezultiraju značajnim uštedama i smanjenjem zagađenja. Nalazi sugeriraju da uporaba TVIW na PSO i TRIPSO može poboljšati rezultate optimizacije, ali povećava složenost računanja sustava. Nažalost, kada zadatak postane složeniji i dimenzija raste, algoritmi imaju poteškoća s pronalaženjem optimalnog rješenja u razumnom vremenskom okviru, što otežava njihovu praktičnu primjenu [20].

8 Zaključak

Ovim kvalifikacijskim radom istaknuta je važnost hibridnih propulzijskih tehnologija u pomorskoj industriji kao jednog od ključnih koraka prema smanjenju štetnih emisija i poboljšanju energetske učinkovitosti brodske industrije. Analiza provedena u radu pokazala je kako hibridni sustavi mogu značajno smanjiti potrošnju goriva i emisije stakleničkih plinova, što doprinosi globalnim ciljevima dekarbonizacije pomorstva, dok istodobno omogućuju smanjenje operativnih troškova za brodare. Te su uštede mogu postići kroz optimizirano upravljanje energijom, korištenjem alternativnih goriva te pametnim kombiniranjem različitih izvora energije poput dizelskih motora, baterija i gorivnih članaka, čime se smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima.

Naglašene su razlike u samim pogonskim i energetske sustavima i arhitekturama. Različite varijante arhitektura nude jedinstvene prednosti i izazove, što ih čini prikladnima za različite primjene u pomorstvu, ovisno o vrsti plovila, profilu rada, zahtjevima za energetske učinkovitost i regulativnim ograničenjima.

Stavljen je poseban naglasak na modeliranje komponenti hibridnih brodskih sustava. Modeli se uglavnom temelje na fizikalnim modelima i modelima temeljenim na podacima. Fizikalni modeli koriste matematičke jednadžbe za precizno simuliranje ponašanja komponenti, dok modeli temeljeni na podacima koriste stvarne operativne podatke za brzo predviđanje performansi. Oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke. Modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima pružaju visok stupanj točnosti, ali su kompleksniji i zahtijevaju više vremena za simulaciju. Modeli temeljeni na podacima, s druge strane, omogućavaju brzo prilagođavanje i učinkovitiju obradu velikih skupova podataka, no mogu dati rezultate koji nisu uvijek konzistentni s fizikalnim principima ako podaci nisu kvalitetni ili pravilno analizirani.

Također, obrađene su različite metode dimenzioniranja ovih sustava, s pripadajućim ciljevima, kao i različite strategije upravljanja energijom. Većina istraživanja fokusira se samo na dimenzioniranje, odnosno optimizaciju sustava, ili na strategiju upravljanja energijom. Istraživanja usmjerena na optimalno dimenzioniranje sustava često zanemaruju važnost strategije upravljanja energijom za postizanje optimalnog rješenja. S druge strane, studije koje se bave optimalnom strategijom upravljanja često koriste komercijalne alate s unaprijed definiranom funkcijom cilja za dimenzioniranje, što rezultira neusklađenošću ciljeva dimenzioniranja i strategije upravljanja energijom.

Iz pregledane literature može se zaključiti da dosadašnja istraživanja nisu u potpunosti obuhvatila sve potrebne aspekte za postizanje optimalnog rješenja sustava koje bi bolje odgovaralo realnim uvjetima na brodu, pogotovo u smjeru postizanja optimalne strategije upravljanja i optimalnog dimenzioniranja kapaciteta cijelog sustava.

Literatura

- [1] J. Ling-Chin and A. P. Roskilly, "A comparative life cycle assessment of marine power systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 477-493, 2016.
- [2] C. Dere and C. Deniz, "Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency," *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 206-217, 2019.
- [3] N. Gray, S. McDonagh, R. O'Shea, B. Smyth, and J. D. Murphy, "Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors," *Advances in Applied Energy*, vol. 1, p. 100008, 2021.
- [4] H. Stančin, H. Mikulčić, X. Wang, and N. Duić, "A review on alternative fuels in future energy system," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 128, p. 109927, 2020.
- [5] T.-H. Joung, S.-G. Kang, J.-K. Lee, and J. Ahn, "The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050," *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 4, no. 1, pp. 1-7, 2020.
- [6] I. M. Organization. "Addressing climate change." <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/updated%20timeline%202023.pdf> (accessed November 1st, 2024).
- [7] M. Stec, A. Tatarczuk, T. Iluk, and M. Szul, "Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 108, p. 103333, 2021.
- [8] J. Barreiro, S. Zaragoza, and V. Diaz-Casas, "Review of ship energy efficiency," *Ocean Engineering*, vol. 257, p. 111594, 2022.
- [9] T. Vidović, J. Šimunović, G. Radica, and Ž. Penga, "Systematic overview of newly available technologies in the green maritime sector," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 641, 2023.
- [10] Y. Zhao, Y. Fan, K. Fagerholt, and J. Zhou, "Reducing sulfur and nitrogen emissions in shipping economically," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 90, p. 102641, 2021.
- [11] T. P. Zis, K. Cullinane, and S. Ricci, "Economic and environmental impacts of scrubbers investments in shipping: a multi-sectoral analysis," *Maritime Policy & Management*, vol. 49, no. 8, pp. 1097-1115, 2022.
- [12] G. Kosmadakis and P. Neofytou, "Reversible high-temperature heat pump/ORC for waste heat recovery in various ships: A techno-economic assessment," *Energy*, vol. 256, p. 124634, 2022.
- [13] L. Bilgili, "Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 110985, 2021.
- [14] H. Xing, C. Stuart, S. Spence, and H. Chen, "Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050," *Journal of Cleaner Production*, vol. 297, p. 126651, 2021.
- [15] Z. I. Rony *et al.*, "Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals," *Fuel*, vol. 338, p. 127220, 2023.
- [16] B. Zincir and C. Deniz, "Methanol as a fuel for marine diesel engines," in *Alcohol as an alternative fuel for internal combustion engines*: Springer, 2021, pp. 45-85.
- [17] B. Zincir, C. Deniz, and M. Tunér, "Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine," *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, pp. 1006-1019, 2019.

- [18] M. D. B. Watanabe, F. Cherubini, and O. Cavalett, "Climate change mitigation of drop-in biofuels for deep-sea shipping under a prospective life-cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 364, p. 132662, 2022.
- [19] E. K. Dedes, D. A. Hudson, and S. R. Turnock, "Investigation of Diesel Hybrid systems for fuel oil reduction in slow speed ocean going ships," *Energy*, vol. 114, pp. 444-456, 2016.
- [20] Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, B. Shen, and T. Long, "A review of multi-energy hybrid power system for ships," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110081, 2020.
- [21] O. B. Inal, J.-F. Charpentier, and C. Deniz, "Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111965, 2022.
- [22] A. Haxhiu, A. Abdelhakim, S. Kanerva, and J. Bogen, "Electric power integration schemes of the hybrid fuel cells and batteries-fed marine vessels—An overview," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 1885-1905, 2021.
- [23] J. Hou, J. Sun, and H. Hofmann, "Control development and performance evaluation for battery/flywheel hybrid energy storage solutions to mitigate load fluctuations in all-electric ship propulsion systems," *Applied energy*, vol. 212, pp. 919-930, 2018.
- [24] M. Jelić, V. Mrzljak, G. Radica, and N. Račić, "An alternative and hybrid propulsion for merchant ships: current state and perspective," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-33, 2021.
- [25] P. Ghimire, M. Zadeh, S. Thapa, J. Thorstensen, and E. Pedersen, "Operational Efficiency and Emissions Assessment of Ship Hybrid Power Systems with Battery; Effect of Control Strategies," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024.
- [26] D. Oh, D.-S. Cho, and T.-W. Kim, "Design and evaluation of hybrid propulsion ship powered by fuel cell and bottoming cycle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 22, pp. 8273-8285, 2023.
- [27] W. Litwin, W. Leśniewski, D. Piątek, and K. Niklas, "Experimental research on the energy efficiency of a parallel hybrid drive for an inland ship," *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1675, 2019.
- [28] P. Ghimire, M. Zadeh, J. Thorstensen, and E. Pedersen, "Data-driven efficiency modeling and analysis of all-electric ship powertrain: A comparison of power system architectures," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 1930-1943, 2021.
- [29] S. E. Damian *et al.*, "Review on the challenges of hybrid propulsion system in marine transport system," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, p. 105983, 2022.
- [30] H. P. Nguyen *et al.*, "The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review," *International Transactions on electrical energy systems*, vol. 31, no. 11, p. e12580, 2021.
- [31] W. Corporation. "Wärtsilä extends leadership in hybrid vessel segment." <https://www.wartsila.com/media/news/20-05-2022-wartsila-extends-leadership-in-hybrid-vessel-segment-3104424> (accessed 27th October, 2024).
- [32] R. A. Ltd. "Port of Luleå 36 Metre Hybrid Icebreaker Tug." <https://ral.ca/2019/07/05/port-of-lulea-36-metre-hybrid-icebreaker-tug/> (accessed 27th October, 2024).
- [33] H. press. "World's first hybrid cruise ship completes sea trial." <https://press.hurtigruten.com/pressreleases/worlds-first-hybrid-cruise-ship-completes-sea-trial-2917534> (accessed 27th October, 2024).
- [34] O. energy. "World's First Electric Car Ferry Enters Service." <https://www.offshore-energy.biz/worlds-first-electric-car-ferry-enters-service/> (accessed 27th October, 2024).
- [35] D. M. Authority. "The longest journey with an electric ferry has taken place in Denmark." <https://www.dma.dk/news/2019/august/the-longest-journey-with-an-electric-ferry-has-taken-place-in-denmark> (accessed 27th October, 2024).

- [36] T. Brown. "Viking Energy to be retrofit for ammonia fuel in 2024." <https://ammoniaenergy.org/articles/viking-energy-to-be-retrofit-for-ammonia-fuel-in-2024/> (accessed 27th October, 2024).
- [37] CalMac. "Third hybrid ferry launches on the Clyde." <https://www.calmac.co.uk/press/ferry-launch> (accessed 27th October, 2024).
- [38] Crowley. "Crowley Accepts Delivery of eWolf, the First Fully Electric Tugboat in the U.S." <https://www.crowley.com/news-and-media/press-releases/crowley-accepts-delivery-of-ewolf-the-first-fully-electric-tugboat-in-the-u-s/> (accessed 27th October, 2024).
- [39] B. Ferries. "Brittany Ferries' Saint-Malo will be the largest hybrid-vessel ever built." <https://brittanyferriesnewsroom.com/brittany-ferries-saint-malo-will-be-the-largest-hybrid-vessel-ever-built/> (accessed 27th October, 2024).
- [40] J. Meng *et al.*, "Advances in structure and property optimizations of battery electrode materials," *Joule*, vol. 1, no. 3, pp. 522-547, 2017.
- [41] R. Yin *et al.*, "Risk analysis for marine transport and power applications of lithium ion batteries: A review," *Process Safety and Environmental Protection*, 2023.
- [42] S. De Breucker, E. Peeters, and J. Driesen, "Possible applications of plug-in hybrid electric ships," in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009: IEEE, pp. 310-317.
- [43] P. Taheri, M. Yazdanpour, and M. Bahrami, "Analytical assessment of the thermal behavior of nickel-metal hydride batteries during fast charging," *Journal of Power Sources*, vol. 245, pp. 712-720, 2014.
- [44] Y. Lu, "Study on the performance of lithium iron phosphate battery based on its application in transportation field," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2798, no. 1: IOP Publishing, p. 012019.
- [45] G. Lucà Trombetta, S. G. Leonardi, D. Aloisio, L. Andaloro, and F. Sergi, "Lithium-ion batteries on board: A review on their integration for enabling the energy transition in shipping industry," *Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1019, 2024.
- [46] P. Wu and R. Bucknall, "Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry," *International journal of hydrogen energy*, vol. 45, no. 4, pp. 3193-3208, 2020.
- [47] E. K. Dedes, D. A. Hudson, and S. R. Turnock, "Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping," *Energy policy*, vol. 40, pp. 204-218, 2012.
- [48] S. Karimi, M. Zadeh, and J. A. Suul, "Shore charging for plug-in battery-powered ships: Power system architecture, infrastructure, and control," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 47-61, 2020.
- [49] J. Hansson, S. Månsson, S. Brynolf, and M. Grahn, "Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders," *Biomass and Bioenergy*, vol. 126, pp. 159-173, 2019.
- [50] R. Geertsma, R. Negenborn, K. Visser, and J. Hopman, "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments," *Applied energy*, vol. 194, pp. 30-54, 2017.
- [51] Y. Bicer and I. Dincer, "Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 9, pp. 4583-4596, 2018.
- [52] F. M. Guangul and G. T. Chala, "A comparative study between the seven types of fuel cells," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 13, no. 3, pp. 185-194, 2020.
- [53] R. Delpizzo, *Fuel Cells-A New Wave of Marine Power Technology?* 2011.

- [54] J. J. De-Troya, C. Alvarez, C. Fernández-Garrido, and L. Carral, "Analysing the possibilities of using fuel cells in ships," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2853-2866, 2016.
- [55] J. Baschuk and X. Li, "Carbon monoxide poisoning of proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Energy Research*, vol. 25, no. 8, pp. 695-713, 2001.
- [56] T. Tronstad, H. H. Åstrand, G.-P. Haugom, and L. Langfeldt, "Study on the use of fuel cells in shipping," 2017.
- [57] A. Haseltalab, L. van Biert, H. Sapra, B. Mestemaker, and R. R. Negenborn, "Component sizing and energy management for SOFC-based ship power systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 245, p. 114625, 2021.
- [58] V. Cigolotti, M. Genovese, and P. Fragiaco, "Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4963, 2021.
- [59] F. Baldi, H. Johnson, C. Gabrieli, and K. Andersson, "Energy and exergy analysis of ship energy systems—the case study of a chemical tanker," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 18, no. 2, pp. 82-93, 2015.
- [60] P. Van Spronsen and R. Tousain, "An optimal control approach to preventing marine diesel engine overloading aboard Karel Doorman class frigates," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 34, no. 7, pp. 493-498, 2001.
- [61] Y. Linden, "NO-emission prediction in a Diesel Engine: Using a two zone in-cylinder simulation model," 2017.
- [62] D. Stapersma, P. Schulten, and H. Grimmeli, "A fresh view on propulsion control," in *7th international naval engineering conference and exhibition, Amsterdam, 2004*: IMarEST, pp. 221-240.
- [63] A. Vrijdag, D. Stapersma, and T. Van Terwisga, "Control of propeller cavitation in operational conditions," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 15-26, 2010.
- [64] N. Xiros, *Robust control of diesel ship propulsion*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [65] J.-R. Guillemette and P. Bussieres, "Proposed optimal controller for the Canadian patrol frigate diesel propulsion system," in *The 1997 11th Ship Control Systems Symposium. Part 1(of 2), Southampton, UK, 04/97*, 1997, pp. 219-236.
- [66] A. Vrijdag, D. Stapersma, and T. Van Terwisga, "Tradeoffs in ship propulsion control: engine overloading and cavitation inception in operational conditions," in *9th International naval conference and exhibition, Hamburg, Germany, 2008*: IMarEST, pp. 82-93.
- [67] J. F. Hansen and F. Wendt, "History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2229-2242, 2015.
- [68] K. Mollenhauer, H. Tschöke, and K. G. Johnson, *Handbook of diesel engines*. Springer Berlin, 2010.
- [69] O. Simmonds, "DC: Is it the alternative choice for naval power distribution?," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 37-43, 2014.
- [70] N. Karim, R. Lisner, H. Kazemi, and F. Annaz, "Rule-based power management for the all-electric ship," in *Proceedings of the Australian University power engineering conference*, 2002: Citeseer.
- [71] R. Amgai and S. Abdelwahed, "Power management of shipboard power systems using Interaction Balance Principle," in *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, 2014: IEEE, pp. 1-6.

- [72] T. J. McCoy, "Trends in ship electric propulsion," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, vol. 1: IEEE, pp. 343-346.
- [73] G. Castles, G. Reed, A. Bendre, and R. Pitsch, "Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships," in *2009 IEEE electric ship technologies symposium*, 2009: IEEE, pp. 515-520.
- [74] M. Wijsmuller and T. Hasselaar, "Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels," *Ship and boat international*, pp. 34-7, 2007.
- [75] R. Barcellos, "The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations," in *Offshore Technology Conference Brasil*, 2013: OTC, pp. OTC-24467-MS.
- [76] D. De Waard, "Parameterization of ship propulsion drives and their fuel efficiency under different operational modes and configurations," in *Proceedings of the engine as a weapon VI conference. Bath, UK*, 2015, pp. 44-57.
- [77] Wärtsilä. "Wärtsilä Shaft Generators." <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shaft-generator> (accessed November 3rd, 2024).
- [78] G. Sulligoi, S. Castellan, M. Aizza, D. Bosich, L. Piva, and G. Lipardi, "Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation," 2012.
- [79] S. K. Topaloglou, G. I. Papalambrou, and N. P. Kyrtatos, "Controller Design for Hybrid Diesel Electric Ship Propulsion during Transient Operation," in *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2016, vol. All Days, ISOPE-I-16-397.
- [80] B. Zahedi, L. E. Norum, and K. B. Ludvigsen, "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems," *Journal of power sources*, vol. 255, pp. 341-354, 2014.
- [81] A. Breijs and E. Amam, "Energy management—adapt your engine to every mission," in *Proceedings of the 13th international naval engineering conference*, 2016, pp. 1-8.
- [82] E. Ovrum and T. Bergh, "Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation," *Applied Energy*, vol. 152, pp. 162-172, 2015.
- [83] T. Völker, "Hybrid Propulsion Concepts on Ships," 2013.
- [84] P. van Loon and P. van Zon, "From operational profile to hybrid propulsion," in *Proceedings of the 24th international HISWA symposium on yacht design and yacht construction, Amsterdam, The Netherlands*, 2016, pp. 14-15.
- [85] J. Drijver, "Evaluation of transmission losses, heat flows and temperatures of propulsive drive lines," Master's thesis, Delft university of technology, 2013.
- [86] H. Grimmelius, P. de Vos, M. Krijgsman, and E. van Deursen, "Control of hybrid ship drive systems," in *10th International conference on computer and IT applications in the maritime industries*, 2011, pp. 1-15.
- [87] M. Butcher, R. Maltby, and P. Parvin, "Compact DC power and propulsion systems—the definitive solution?," in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009: IEEE, pp. 521-528.
- [88] N. Doerry and K. McCoy, "Next generation integrated power system: NGIPS technology development roadmap," *Naval Sea Systems Command*, 2007.
- [89] D. Bosich and G. Sulligoi, "Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid electric propulsion and LVDC distribution," in *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013: IEEE, pp. 1-6.
- [90] H. Park *et al.*, "Real-time model predictive control for shipboard power management using the IPA-SQP approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 2129-2143, 2015.

- [91] A. Smirnov, A. Burt, H. Zhang, and I. Celik, "Component-based modelling of multi-physics systems," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 30, no. 4, pp. 409-415, 2010.
- [92] G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, and L. Yang, "Physics-informed machine learning," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 6, pp. 422-440, 2021.
- [93] F. Mylonopoulos, H. Polinder, and A. Coraddu, "A comprehensive review of modeling and optimization methods for ship energy systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32697-32707, 2023.
- [94] K. M. Bagherabadi, S. Skjong, and E. Pedersen, "Dynamic modelling of PEM fuel cell system for simulation and sizing of marine power systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 40, pp. 17699-17712, 2022.
- [95] L. Balestra and I. Schjøberg, "Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10924-10938, 2021.
- [96] S. Donnarumma, M. Martelli, F. D'Agostino, D. Kaza, and F. Silvestro, "Multiphysics modeling and simulation of integrated electric propulsion system for ship dynamic positioning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024.
- [97] W. Zhu, J. Shi, and S. Abdelwahed, "End-to-end system level modeling and simulation for medium-voltage DC electric ship power systems," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 37-47, 2018.
- [98] H. Abrougui, H. Bouaicha, H. Dallagi, C. Zaoui, and N. Samir, "Study and modeling of the electric propulsion system for marine boat," in *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, 2019: IEEE, pp. 173-180.
- [99] H. H. Zhu and Z. Dong, "Modeling and Simulation of Hybrid Electric Ships with AC Power Bus-A Case Study," in *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2018: IEEE, pp. 1-8.
- [100] I. Hemdana, H. Bouaicha, H. Dallagi, C. Zaoui, and S. Nejim, "Study, Modeling and Simulation of a Hybrid Ship Propulsion System," in *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, 2019: IEEE, pp. 136-143.
- [101] C. Gomes *et al.*, "The fmi 3.0 standard interface for clocked and scheduled simulations," in *Modelica Conferences*, 2021, pp. 27-36.
- [102] F. Perabo, D. Park, M. K. Zadeh, Ø. Smogeli, and L. Jamt, "Digital twin modelling of ship power and propulsion systems: Application of the open simulation platform (osp)," in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020: IEEE, pp. 1265-1270.
- [103] P. Ghimire, M. Zadeh, and E. Pedersen, "Co-simulation of a marine hybrid power system for real-time virtual testing," in *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2021: IEEE, pp. 1-6.
- [104] P. Ghimire, M. Zadeh, E. Pedersen, and J. Thorstensen, "Dynamic modeling, simulation, and testing of a marine DC hybrid power system," *IEEE Transactions on transportation electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 905-919, 2020.
- [105] S. Skjong, B. Taskar, E. Pedersen, and S. Steen, "Simulation of a hybrid marine propulsion system in waves," *Proc. 28th CIMAC World Congr*, pp. 1-16, 2016.
- [106] A. Swider, H. Langseth, and E. Pedersen, "Application of data-driven models in the analysis of marine power systems," *Applied Ocean Research*, vol. 92, p. 101934, 2019.
- [107] S. Fang, Y. Xu, S. Wen, T. Zhao, H. Wang, and L. Liu, "Data-driven robust coordination of generation and demand-side in photovoltaic integrated all-electric ship microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 1783-1795, 2019.

- [108] P. Karagiannidis and N. Themelis, "Data-driven modelling of ship propulsion and the effect of data pre-processing on the prediction of ship fuel consumption and speed loss," *Ocean Engineering*, vol. 222, p. 108616, 2021.
- [109] A. Coraddu, L. Oneto, F. Baldi, F. Cipollini, M. Atlar, and S. Savio, "Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling," *Ocean Engineering*, vol. 186, p. 106063, 2019.
- [110] N. Assani, P. Matić, and M. Katalinić, "Ship's digital twin—a review of modelling challenges and applications," *Applied sciences*, vol. 12, no. 12, p. 6039, 2022.
- [111] I. Lazakis, C. Gkerekos, and G. Theotokatos, "Investigating an SVM-driven, one-class approach to estimating ship systems condition," *Ships and Offshore Structures*, vol. 14, no. 5, pp. 432-441, 2019.
- [112] H. Li, B. Xu, G. Lu, C. Du, and N. Huang, "Multi-objective optimization of PEM fuel cell by coupled significant variables recognition, surrogate models and a multi-objective genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 236, p. 114063, 2021.
- [113] W. Zhang, Z. Liang, W. Wu, G. Ling, and R. Ma, "Design and optimization of a hybrid battery thermal management system for electric vehicle based on surrogate model," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 174, p. 121318, 2021.
- [114] A. Balasubramanian, F. Martin, M. M. Billah, O. Osemwinyen, and A. Belahcen, "Application of surrogate optimization routine with clustering technique for optimal design of an induction motor," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5042, 2021.
- [115] D.-K. Lim, K.-P. Yi, S.-Y. Jung, H.-K. Jung, and J.-S. Ro, "Optimal design of an interior permanent magnet synchronous motor by using a new surrogate-assisted multi-objective optimization," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [116] V.-H. Bui *et al.*, "Deep neural network-based surrogate model for optimal component sizing of power converters using deep reinforcement learning," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78702-78712, 2022.
- [117] R. Rafieezadeh, S. Busquets-Monge, and S. Alepuz, "Design optimization of switching-cell-array-based power converters," in *2022 IEEE 31st International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2022: IEEE, pp. 39-46.
- [118] F. Balsamo, C. Capasso, G. Miccione, and O. Veneri, "Hybrid storage system control strategy for all-electric powered ships," *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 1083-1090, 2017.
- [119] D. Da Rù, M. Morandin, S. Bolognani, and M. Castiello, "A threshold logic control strategy for parallel light hybrid electric vehicle implementation," in *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, 2016: IET, pp. 1-6.
- [120] J. Torreglosa, P. García, L. Fernández, and F. Jurado, "Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 514-526, 2014.
- [121] Y. Yuan, T. Zhang, B. Shen, X. Yan, and T. Long, "A fuzzy logic energy management strategy for a photovoltaic/diesel/battery hybrid ship based on experimental database," *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2211, 2018.
- [122] M. M. S. Khan, M. O. Faruque, and A. Newaz, "Fuzzy logic based energy storage management system for MVDC power system of all electric ship," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 798-809, 2017.
- [123] M. D. Al-Falahi, K. S. Nimma, S. D. Jayasinghe, H. Enshaei, and J. M. Guerrero, "Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries," *Energy conversion and management*, vol. 172, pp. 50-66, 2018.

- [124] F. D. Kanellos, G. J. Tsekouras, and N. D. Hatziaargyriou, "Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1166-1175, 2014.
- [125] M. A. Ancona *et al.*, "Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 42-58, 2018.
- [126] W. Tarelko and K. Rudzki, "Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption," *Neural computing and applications*, vol. 32, no. 23, pp. 17379-17395, 2020.
- [127] R. Kumar and M. Fozdar, "Optimal sizing of hybrid ship power system using variants of particle swarm optimization," in *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2017: IEEE, pp. 527-532.
- [128] Y. Xiang and X. Yang, "An ECMS for multi-objective energy management strategy of parallel diesel electric hybrid ship based on ant colony optimization algorithm," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 810, 2021.
- [129] B. Wang, J. Xu, B. Cao, and B. Ning, "Adaptive mode switch strategy based on simulated annealing optimization of a multi-mode hybrid energy storage system for electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 194, pp. 596-608, 2017.
- [130] L. Wu, Y. Wang, X. Yuan, and Z. Chen, "Multiobjective optimization of HEV fuel economy and emissions using the self-adaptive differential evolution algorithm," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2458-2470, 2011.
- [131] R. Tang, X. Li, and J. Lai, "A novel optimal energy-management strategy for a maritime hybrid energy system based on large-scale global optimization," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 254-264, 2018.
- [132] M. D. Al-Falahi, S. D. Jayasinghe, and H. Enshaei, "Hybrid algorithm for optimal operation of hybrid energy systems in electric ferries," *Energy*, vol. 187, p. 115923, 2019.
- [133] K. Song, X. Wang, F. Li, M. Sorrentino, and B. Zheng, "Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability," *Energy*, vol. 205, p. 118064, 2020.
- [134] R. Geertsma, "Autonomous control for adaptive ships: with hybrid propulsion and power generation," 2019.
- [135] A. Sciarretta *et al.*, "A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle," *Control engineering practice*, vol. 29, pp. 287-298, 2014.
- [136] P. Wu, J. Partridge, and R. Bucknall, "Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships," *Applied Energy*, vol. 275, p. 115258, 2020.
- [137] V. Shagar, S. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, "Frequency transient suppression in hybrid electric ship power systems: A model predictive control strategy for converter control with energy storage," *Inventions*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2018.
- [138] G. Paganelli, T. M. Guerra, S. Delprat, J.-J. Santin, M. Delhom, and E. Combes, "Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 214, no. 7, pp. 705-717, 2000.
- [139] M. Kalikatzarakis, R. Geertsma, E. Boonen, K. Visser, and R. Negenborn, "Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging," *Control Engineering Practice*, vol. 76, pp. 133-154, 2018.
- [140] G. Paganelli, S. Delprat, T.-M. Guerra, J. Rimaux, and J.-J. Santin, "Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains," in *Vehicular Technology Conference*.

- IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No. 02CH37367)*, 2002, vol. 4: IEEE, pp. 2076-2081.
- [141] D. E. Kirk, *Optimal control theory: an introduction*. Courier Corporation, 2004.
- [142] P. Zhang, F. Yan, and C. Du, "A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 88-104, 2015.
- [143] F. Vidal-Naquet and G. Zito, "Adapted optimal energy management strategy for drivability," in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2012: IEEE, pp. 358-363.
- [144] D. Sinoquet, G. Rousseau, and Y. Milhau, "Design optimization and optimal control for hybrid vehicles," *Optimization and Engineering*, vol. 12, pp. 199-213, 2011.
- [145] D. Pei and M. J. Leamy, "Dynamic programming-informed equivalent cost minimization control strategies for hybrid-electric vehicles," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 135, no. 5, p. 051013, 2013.
- [146] J. Park and J.-H. Park, "Development of equivalent fuel consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 13, pp. 835-843, 2012.
- [147] L. Li *et al.*, "Research of ant colony optimized adaptive control strategy for hybrid electric vehicle," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, no. 1, p. 239130, 2014.
- [148] T. van Keulen, B. de Jager, A. Serrarens, and M. Steinbuch, "Optimal energy management in hybrid electric trucks using route information," *Oil & Gas Science and Technology—Revue de l'Institut Français du Pétrole*, vol. 65, no. 1, pp. 103-113, 2010.
- [149] X. Ye, Z. Jin, X. Hu, Y. Li, and Q. Lu, "Modeling and control strategy development of a parallel hybrid electric bus," *International journal of automotive technology*, vol. 14, pp. 971-985, 2013.
- [150] V. Sezer, M. Gokasan, and S. Bogosyan, "A novel ECMS and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 8, pp. 3557-3570, 2011.
- [151] C. Zhang and A. Vahid, "Real-time optimal control of plug-in hybrid vehicles with trip preview," in *Proceedings of the 2010 American control conference*, 2010: IEEE, pp. 6917-6922.
- [152] D. Ambuhl and L. Guzzella, "Predictive reference signal generator for hybrid electric vehicles," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 9, pp. 4730-4740, 2009.
- [153] C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, "A-ECMS: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management," *European journal of control*, vol. 11, no. 4-5, pp. 509-524, 2005.
- [154] C. Zhang and A. Vahidi, "Route preview in energy management of plug-in hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 546-553, 2011.
- [155] B. Geng, J. K. Mills, and D. Sun, "Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4238-4248, 2011.
- [156] B. Škugor, J. Deur, M. Cipek, and D. Pavković, "Design of a power-split hybrid electric vehicle control system utilizing a rule-based controller and an equivalent consumption minimization strategy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 228, no. 6, pp. 631-648, 2014.
- [157] T. L. Vu, A. A. Ayu, J. S. Dhupia, L. Kennedy, and A. K. Adnanes, "Power management for electric tugboats through operating load estimation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 2375-2382, 2015.

- [158] M. A. Hannan *et al.*, "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103023, 2021.
- [159] C. Bordin and O. Mo, "Including power management strategies and load profiles in the mathematical optimization of energy storage sizing for fuel consumption reduction in maritime vessels," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 425-441, 2019.
- [160] M. R. Patel, *Shipboard electrical power systems*. Crc Press, 2021.
- [161] R. Martins, H. C. Hesse, J. Jungbauer, T. Vorbuchner, and P. Musilek, "Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2048, 2018.
- [162] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, P. Taylor, J. Ekanayake, S. L. Walker, and S. Padmanaban, "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 489-504, 2019.
- [163] T. M. Masaud, F. Eluyemi, and R. Chaloo, "Optimal sizing of battery storage systems for microgrid expansion applications," in *2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [164] M. Swierczynski, D. I. Stroe, A. I. Stan, and R. Teodorescu, "Lifetime and economic analyses of lithium-ion batteries for balancing wind power forecast error," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 6, pp. 760-770, 2015.
- [165] R. Barrera-Cardenas, O. Mo, and G. Guidi, "Optimal sizing of battery energy storage systems for hybrid marine power systems," in *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2019: IEEE, pp. 293-302.
- [166] K. Kim, K. Park, J. Lee, K. Chun, and S.-H. Lee, "Analysis of battery/generator hybrid container ship for CO₂ reduction," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 14537-14543, 2018.
- [167] I. S. Association, "IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications," *IEEE, New York*, 2010.
- [168] X.-S. Yang, "Metaheuristic optimization: algorithm analysis and open problems," in *International symposium on experimental algorithms*, 2011: Springer, pp. 21-32.
- [169] Y. Meraihi, A. B. Gabis, A. Ramdane-Cherif, and D. Acheli, "A comprehensive survey of Crow Search Algorithm and its applications," *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, no. 4, pp. 2669-2716, 2021.
- [170] F. Fausto, A. Reyna-Orta, E. Cuevas, Á. G. Andrade, and M. Perez-Cisneros, "From ants to whales: metaheuristics for all tastes," *Artificial Intelligence Review*, vol. 53, pp. 753-810, 2020.
- [171] E. Sciberras and R. Norman, "Multi-objective design of a hybrid propulsion system for marine vessels," *IET electrical systems in transportation*, vol. 2, no. 3, pp. 148-157, 2012.
- [172] J. Zhu, L. Chen, B. Wang, and L. Xia, "Optimal design of a hybrid electric propulsive system for an anchor handling tug supply vessel," *Applied energy*, vol. 226, pp. 423-436, 2018.
- [173] S. E. Damian and L. A. Wong, "Optimal Energy Storage Placement and Sizing in Distribution System," in *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, 2022: IEEE, pp. 1-6.
- [174] S. Wen *et al.*, "Optimal sizing of hybrid energy storage sub-systems in PV/diesel ship power system using frequency analysis," *Energy*, vol. 140, pp. 198-208, 2017.
- [175] R. Tjandra, S. Wen, D. Zhou, and Y. Tang, "Optimal sizing of BESS for hybrid electric ship using multi-objective particle swarm optimization," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia)*, 2019: IEEE, pp. 1460-1466.
- [176] J. Zhu, L. Chen, X. Wang, and L. Yu, "Bi-level optimal sizing and energy management of hybrid electric propulsion systems," *Applied Energy*, vol. 260, p. 114134, 2020.

Popis kratica

AC	Izmjenična Struja (<i>engl. Alternate Current</i>)
ACOA	Optimizacija Kolonijom Mrava (<i>engl. Ant Colony Optimization Algorithm</i>)
AFC	Alkalni Gorivni Članak (<i>engl. Alkaline Fuel Cell</i>)
ANN	Umjetna Neuralna Mreža (<i>engl. Artificial Neural Network</i>)
BESS	Sustav Za Pohranu Energije U Baterijama (<i>engl. Battery Energy Storage System</i>)
CBI	Indeks Troškova I Koristi (<i>engl. Cost Benefit Index</i>)
CO	Ugljični Monoksid (<i>engl. Carbon Monoxide</i>)
CO₂	Ugljični Dioksid (<i>engl. Carbon Dioxide</i>)
CPP	Propeler S Podesivim Korakom (<i>engl. Controllable Pitch Propeller</i>)
DC	Istosmjerna Struja (<i>engl. Direct Current</i>)
DEA	Algoritam Diferencijalne Evolucije (<i>engl. Differential Evolution Algorithm</i>)
DPA	Algoritam Dinamičkog Programiranja (<i>engl. Dynamic Programming Algorithm</i>)
ECMS	Strategija Minimizacije Ekvivalentne Potrošnje (<i>engl. Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>)
EEA	Europska Agencija Za Okoliš (<i>engl. European Environment Agency</i>)
EEDI	Indeks Energetske Učinkovitosti Dizajna (<i>engl. Energy Efficiency Design Index</i>)
EGR	Recirkulacija Ispušnih Plinova (<i>engl. Exhaust Gas Recirculation</i>)
EMS	Sustav Upravljanja Energijom (<i>engl. Energy Management System</i>)
EOL	Kraj Životnog Vijeka (<i>engl. End of Life</i>)
ESS	Sustav Za Pohranu Energije (<i>engl. Energy Storage System</i>)
FMU	<i>engl. Functional Mockup Unit</i>
FPP	Propeler S Fiksni Korakom (<i>engl. Fixed Pitch Propeller</i>)
FWE	Emulzija Goriva I Vode (<i>engl. Fuel Water Emulsion</i>)
GA	Genetski Algoritam (<i>engl. Genetic Algorithm</i>)
GHG	Staklenički Plinovi (<i>engl. Greenhouse Gases</i>)
GO	Globalna Optimizacija (<i>engl. Global Optimization</i>)
GPS	Globalni Sustav Pozicioniranja (<i>engl. Global Positioning System</i>)
GWO	<i>engl. Grey Wolf Optimizer</i>
HEV	Hibridno Električno Vozilo (<i>engl. Hybrid Electric Vehicle</i>)
HFO	Teško Loživo Ulje (<i>engl. Heavy Fuel Oil</i>)
HGF	<i>engl. Human Group Formation</i>
HHO	<i>engl. Harris Hawks Optimization</i>
HIL	<i>engl. Hardware In Loop</i>
HS	<i>engl. Harmony Search</i>
IMO	Međunarodna Pomorska Organizacija (<i>engl. International Maritime Organization</i>)
ISO	Međunarodna Organizacija Za Standardizaciju (<i>engl. International Organization for Standardization</i>)
LCO	Litij-Kobalt Oksidna Baterija (<i>engl. Lithium Cobalt Oxide Battery</i>)

LFP	Litij-Željezofosfatna Baterija (<i>engl. Lithium Iron Phosphate Battery</i>)
LMO	Litij-Mangan Oksidna Baterija (<i>engl. Lithium Manganese Oxide Battery</i>)
LNG	Ukapljeni Prirodni Plin (<i>engl. Liquefied Natural Gas</i>)
LPG	Ukapljeni Naftni Plin (<i>engl. Liquefied Petroleum Gas</i>)
MARPOL	Međunarodna Konvencija O Sprječavanju Onečišćenja S Brodova (<i>engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>)
MCFC	Gorivni Članak S Rastaljenim Karbonatom (<i>engl. Molten Carbonate Fuel Cell</i>)
MOPSO	Optimizacija Rojem Čestica S Više Ciljeva (<i>engl. Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>)
MPC	Kontrola Predikcijskim Modelom (<i>engl. Model Predictive Control</i>)
MVO	Optimizator Multi-Svemira (<i>engl. Multi-Verse Optimizer</i>)
NCA	Litij-Nikal-Kobalt-Aluminij Oksidna Baterija (<i>engl. Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide Battery</i>)
NMC	Litij-Nikal-Mangan-Kobalt Oksidna Baterija (<i>engl. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery</i>)
NOx	Dušikovi Oksidi (<i>engl. Nitrogen Oxides</i>)
NPC	Neto Sadašnja Vrijednost (<i>engl. Net Present Cost</i>)
NSGA	Genetski Algoritam Bez Dominacije U Sortiranju (<i>engl. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>)
PAFC	Gorivni Članak S Fosfornom Kiselinom (<i>engl. Phosphoric Acid Fuel Cell</i>)
PBI	Polibenzimidazol (<i>engl. Polybenzimidazole</i>)
PEMFC	Gorivni Članak s Protonski Provodljivom Membranom (<i>engl. Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>)
PHEV	Plug-In Hibridno Električno Vozilo (<i>engl. Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>)
PI	Proporcionalno-Integralni (<i>engl. Proportional-Integral</i>)
PID	Proporcionalno-Integralno-Derivativni (<i>engl. Proportional-Integral-Derivative</i>)
PM	Čestice (<i>engl. Particulate Matter</i>)
PMP	Pontryaginov Princip Minimuma (<i>engl. Pontryagin's Minimum Principle</i>)
PSO	Optimizacija Rojem Čestica (<i>engl. Particle Swarm Optimization</i>)
PV	Fotonaponski (<i>engl. Photovoltaic</i>)
RTO	Optimizacija U Stvarnom Vremenu (<i>engl. Real-Time Optimization</i>)
SCR	Selektivna Katalitička Redukcija (<i>engl. Selective Catalytic Reduction</i>)
SEEMP	Plan Upravljanja Energetskom Učinkovitošću Broda (<i>engl. Ship Energy Efficiency Management Plan</i>)
SOC	Stanje Napunjenosti Baterije (<i>engl. State of Charge</i>)
SOFC	Gorivni Članak S Krutim Oksidom (<i>engl. Solid Oxide Fuel Cell</i>)
SOx	Sumporni Oksidi (<i>engl. Sulfur Oxides</i>)
SPWF	Faktor Serijske Sadašnje Vrijednosti (<i>engl. Serial Present Worth Factor</i>)
WHR	Povrat Otpadne Topline (<i>engl. Waste Heat Recovery</i>)
WLTC	<i>engl. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i>

Sažetak

Ovim kvalifikacijskim radom istaknuta je važnost hibridnih propulzijskih tehnologija u pomorskoj industriji kao jednog od ključnih koraka prema smanjenju štetnih emisija i poboljšanju energetske učinkovitosti brodske industrije. Analiza pokazuje da hibridni sustavi, kroz optimizirano upravljanje energijom i kombinaciju dizelskih motora, baterija i gorivnih članaka, smanjuju potrošnju fosilnih goriva i emisije, pridonoseći ciljevima dekarbonizacije te snižavanju operativnih troškova brodara. Obradene su različite pogonske i energetske arhitekture, koje imaju specifične prednosti i primjenjuju se ovisno o vrsti plovila i regulativnim zahtjevima. Poseban naglasak stavljen je na modeliranje komponenti hibridnih sustava, koristeći fizikalne modele i modele temeljene na podacima. Fizikalni modeli nude točnost, ali su kompleksniji, dok modeli temeljeni na podacima omogućuju brzu obradu i prilagodbu, ali mogu odstupati od stvarnih rezultata bez kvalitetnih podataka. Prikazane su metode dimenzioniranja i strategije upravljanja energijom i ukazano je na probleme kod usklađivanja tih ciljeva. Istraživanja često razdvajaju optimizaciju sustava od strategije upravljanja, što otežava postizanje optimalnog rješenja. Zaključeno je da postoji potreba za integriranim pristupom koji bolje odgovara stvarnim uvjetima u brodskom prometu, uz naglasak na optimalno upravljanje energijom i dimenzioniranje kapaciteta sustava.

Abstract

This paper aims to highlight the importance of hybrid propulsion technologies in the maritime industry as a keystone toward reducing harmful emissions and improving the energy efficiency of the shipping sector. The analysis shows that hybrid systems, through optimized energy management and the combination of diesel engines, batteries, and fuel cells, can reduce fossil fuel consumption and emissions, contributing to decarbonization goals and lowering operating costs for shipowners. Different propulsion and energy architectures are examined, each offering specific advantages and being applied depending on the type of vessel and regulatory requirements. Special emphasis is placed on modeling hybrid system components, using both physical and data-driven models. Physical models provide accuracy but are more complex, while data-driven models enable fast processing and adaptability but may deviate from real results without high-quality data. Methods for system sizing and energy management strategies are presented, highlighting the challenge of aligning these objectives. Research often separates system optimization from energy management strategies, making it difficult to achieve an optimal solution. It is concluded that an integrated approach is needed that better suits real-world conditions in maritime transport, with a focus on optimal energy management and system capacity sizing.