

# Analiza performansi hibridnih brodskih energetske sustava

---

Hinić, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:155387>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split - Repository - Faculty of Maritime Studies Split for permanent storage and preservation of digital resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**VEDRAN HINIĆ**

**ANALIZA PERFORMANSI HIBRIDNIH  
BRODSKIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**ANALIZA PERFORMANSI HIBRIDNIH  
BRODSKIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**Prof. dr. sc. Gojmir Radica**

**STUDENT:**

**Vedran Hinić**

**MB: 0171275106**

**SPLIT, 2024.**

## SAŽETAK

Ovaj rad istražuje razvoj i evaluaciju performansi hibridnog pogonskog sustava za manja plovila koristeći se razvijenim modelom i simulacijama, usmjeravajući se na smanjenje emisija štetnih plinova i optimizaciju energije. Hibridni energetske sustavi, koji kombiniraju dizelski generator, vodikov gorivni članak, baterijski set i električni motor, predstavljaju odgovor na globalne klimatske promjene i potrebu za smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima. U radu se analiziraju performanse ovog sustava pod različitim profilima opterećenja, s posebnim naglaskom na efikasnost, utjecaj na okoliš i operativnu fleksibilnost. Rezultati pokazuju značajne prednosti hibridnog pogonskog sustava u smanjenju potrošnje goriva i emisija štetnih plinova, naglašavajući njegovu ulogu kao održivog rješenja za budućnost pomorskih operacija. Razvoj tehnologija skladištenja energije, kao što su baterije i sustavi za opskrbu energijom pomoću vodika, ključan je za napredak hibridnih energetskih sustava, omogućavajući bolje upravljanje proizvodnjom energije i povećavajući efikasnost i pouzdanost sustava.

**Ključne riječi:** *hibridni energetske sustavi, dizel generatori, gorivni članci, efikasnost*

## ABSTRACT

This thesis explores the development and performance evaluation of a hybrid propulsion system for small vessels using developed models and simulations, focusing on reducing harmful gas emissions and optimizing energy. Hybrid energy systems, which combine a diesel generator, hydrogen fuel cell, battery pack, and electric motor, present a response to global climate change and the need for reducing dependence on fossil fuels. The paper analyzes the performance of this system under different load profiles, with special emphasis on efficiency, environmental impact, and operational flexibility. The results demonstrate significant advantages of the hybrid propulsion system in reducing fuel consumption and harmful gas emissions, highlighting its role as a sustainable solution for the future of maritime operations. The development of energy storage technologies, such as batteries and hydrogen supply systems, is crucial for the advancement of hybrid energy systems, enabling better energy production management and increasing the efficiency and reliability of the system.

**Keywords:** *Hybrid energy systems. Diesel generators, fuel cells, efficiency*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI .....</b>	<b>2</b>
<b>3. KOMPONENTE I KONFIGURACIJE HIBRIDNIH PROPULZIJSKIH SUSTAVA.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1. DIZEL-ELEKTRIČNA PROPULZIJA .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2. PRIJENOS I PRETVORBA ENERGIJE U HIBRIDNIM PROPULZIJSKIM SUSTAVIMA .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3. ELEKTRIČNI PROPULZORI .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4. GORIVNI ČLANCI.....</b>	<b>19</b>
<b>3.5. BATERIJE.....</b>	<b>24</b>
<b>3.6. GENERATORI S VARIJABILNOM BRZINOM VRTNJE .....</b>	<b>27</b>
<b>4. RAZRADA I ANALIZA PERFORMANSI HIBRIDNOG MODELA .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. KOMPONENTE MODELA .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.1. Dizelski motor .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.2. Gorivni članak.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.3. Pretvarači .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.4. Baterijski set.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.5. Generator i električni motor.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. SIMULACIJA MODELA U RAZNIM PROFILIMA RADA.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.1. Prvi profil opterećenja – rad u luci i manevriranje .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.2. Drugi profil opterećenja – navigacija .....</b>	<b>48</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>51</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>53</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>55</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>57</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>58</b>

# 1. UVOD

Suočeni s globalnim izazovima smanjenja emisija štetnih plinova i povećanja energetske učinkovitosti, pomorska industrija traži inovativna rješenja. Hibridni pogonski sustavi, koji integriraju konvencionalne i obnovljive izvore energije, predstavljaju ključnu tehnologiju u ostvarivanju ovih ciljeva. Ovaj rad se bavi razvojem i evaluacijom hibridnog pogonskog sustava za manja plovila, analizirajući njegovu operativnu efikasnost, utjecaj na okoliš i potencijal u smanjenju potrošnje goriva. Cilj rada je pokazati kako integracija različitih tehnologija pogona može doprinijeti održivijoj budućnosti pomorskog transporta.

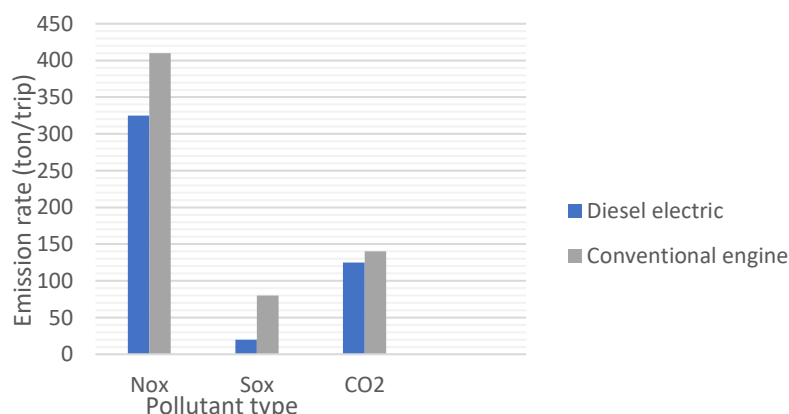
Poglavlje hibridni energetski sustavi istražuje kombinaciju dvije ili više tehnologija proizvodnje i skladištenja energije kako bi se povećala efikasnost sustava i osigurala bolja ravnoteža opskrbe energijom. Ovaj odjeljak detaljno razmatra optimizaciju iskorištavanja izvora energije, smanjenje emisija ugljičnog dioksida i poboljšanja pouzdanosti i stabilnosti energetskih sustava.

Poglavlje komponente i konfiguracije hibridnih pogonskih sustava opisuje različite komponente i konfiguracije hibridnih pogonskih sustava, uključujući dizel-električni pogon, sustave za prijenos i pretvorbu energije, električne propulzore, gorivne članke, baterije i generatore s promjenjivom brzinom vrtnje.

Poglavlje razrada i analiza performansi hibridnog modela fokusira se na teorijske aspekte komponenti modela i simulaciju modela u različitim operativnim profilima, pružajući uvide u efikasnost i ponašanje hibridnog sustava pod različitim profilima opterećenja manjeg plovila do 135 tona. Analiza performansi fokusira se na eksploatacijski profil te se zanemaruju emisije prije i nakon eksploatacije modela.

## 2. HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI

Hibridni energetska sustavi kombiniraju dvije ili više tehnologija za proizvodnju energije i skladištenje energije kako bi se povećala efikasnost sustava i osigurala bolja ravnoteža u opskrbi energijom. Razvoj hibridnih energetskih sustava odražava težnju za optimizacijom iskorištavanja izvora energije, smanjenjem emisija ugljičnog dioksida i poboljšanjem pouzdanosti i stabilnosti energetskih sustava. Sve stroži zahtjevi i regulacije od strane regulatornih tijela, prvenstveno za utjecaj na okoliš i emisiju štetnih plinova, kontinuirano unaprjeđuje pogonske sustave brodova, uvodi inovativne tehnologije i alternativna goriva, smanjuje specifičnu potrošnju goriva i povećava efikasnost samih sustava. Slika 1. prikazuje usporedbu emisije štetnih plinova dizel električne propulzije i konvencionalnog dizelskog pogona putničkog broda. Rezultati konvencionalnog dizelskog pogona odnose se na četverotaktni motor, dok su dvotaktni sporokretni dizelski motori pokazali najveću učinkovitost u trgovačkoj mornarici preookeanske plovidbe [7].



**Slika 1. Emisija štetnih plinova za dizel električnu propulziju i konvencionalni pogon [7]**

Hibridni sustavi su se počeli intenzivnije razvijati tijekom posljednjih desetljeća kao odgovor na globalne klimatske promjene i potrebu za smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima. Razvoj tehnologija skladištenja energije, poput baterija, super kondenzatora i sustava za opskrbu energijom pomoću vodika, ključan je za napredak hibridnih energetskih sustava, omogućavajući bolje upravljanje u proizvodnji energije [16].

Suvremeni trendovi u razvoju hibridnih energetske sustava uključuju integraciju različitih tehnologija skladištenja energije kako bi se iskoristile njihove komplementarne karakteristike - na primjer, kombiniranje baterija s visokom energetske gustoćom s super kondenzatorima koji nude brze odzive i visoku snagu. Ovaj pristup omogućava povećanje efikasnosti i pouzdanosti sustava, kao i produljenje vijeka trajanja komponenti [16].

Prednosti hibridnih energetske sustava uključuju povećanu efikasnost kroz bolje iskorištavanje izvora energije, smanjenje emisija stakleničkih plinova, te veću sigurnost i pouzdanost opskrbe energijom. Također, hibridni sustavi mogu pružiti energetske neovisnost i smanjiti troškove energije dugoročno. Izazovi implementacije hibridnih energetske sustava u pomorskom okruženju uključuju visoke početne troškove, potrebu za naprednim sustavima upravljanja za optimizaciju rada hibridnog sustava, te izazove povezane s održavanjem i pouzdanošću u zahtjevnim pomorskim uvjetima. Usporedba potrošnje goriva u hibridnim pomorskim energetske sustavima pokazala je da optimizacija snage motora može dovesti do značajne uštede goriva. Posebno, hibridni sustavi koji koriste kombinaciju dizelskih generatora i baterija omogućuju prilagodbu izlazne snage prema trenutnoj potražnji energije, čime se smanjuje ukupna potrošnja goriva i emisije dušikovih oksida NO<sub>x</sub> (engl. *Nitrogen oxides*) [10].

Optimalno upravljanje energetske sustavom za pomorske hibridne sustave može rezultirati uštedom goriva između 6 % i 32 %, ovisno o tipu plovila. Integracijom sustava za skladištenje energije ESS (engl. *Energy storage system*) i primjenom algoritama za optimalno upravljanje, moguće je znatno smanjiti operativne troškove te istodobno smanjiti emisije stakleničkih plinova [6].

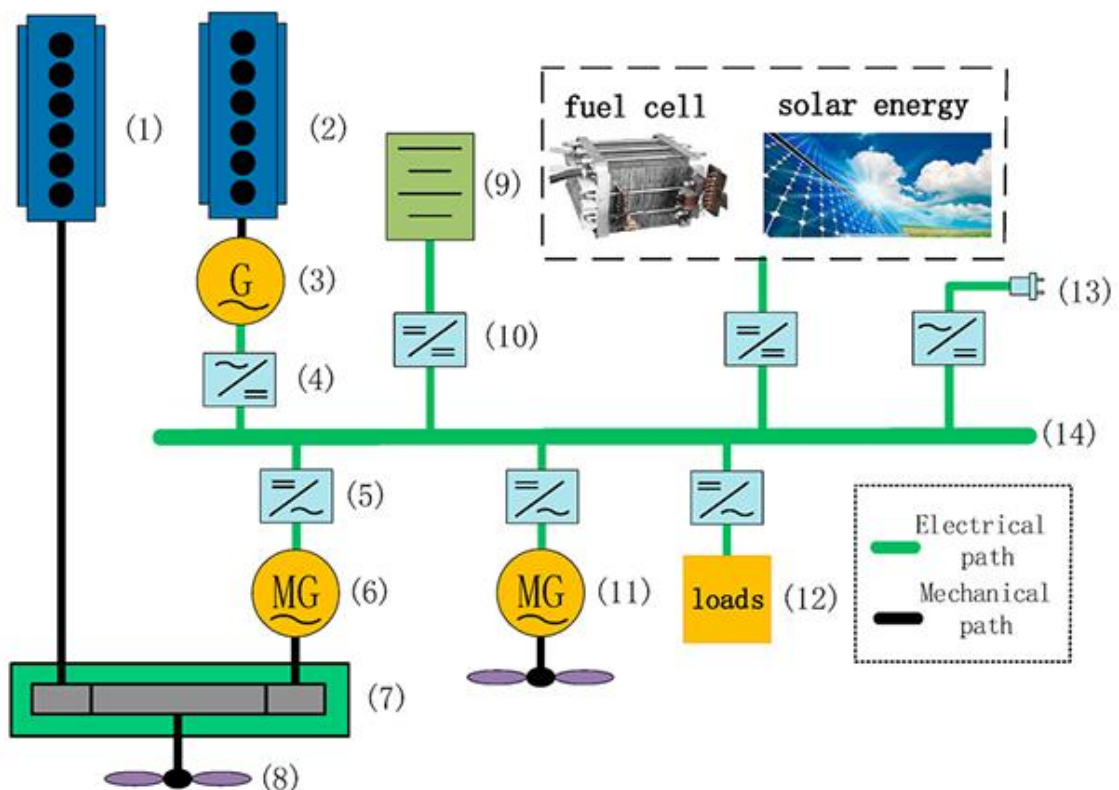
Razvoj u pomorske hibridne propulziji ističe važnost električnih i hibridnih električnih propulzijskih sustava kao održivih rješenja za upravljanje emisijama ugljičnog dioksida CO<sub>2</sub> (engl. *Carbon dioxide*) u pomorskom prijevozu. Prednosti uključuju usklađenost s međunarodnim zakonima, povećanu fleksibilnost i pouzdanost, smanjene operativne troškove, te pristup naprednim mogućnostima automatizacije [6].



### 3. KOMPONENTE I KONFIGURACIJE HIBRIDNIH PROPULZIJSKIH SUSTAVA

Konfiguracija hibridnih propulzijskih sustava može se znatno razlikovati ovisno o operativnom profilu, veličini i specifičnim zahtjevima plovila. Tipično, te konfiguracije mogu biti kategorizirane kao paralelne, serijske ili kombinirane (serijsko-paralelne), svaka nudeći različite prednosti i razmatranja za projektante brodova i operatere.

Paralelni hibridni sustavi omogućuju da i dizelski motor i elektromotor izravno pogone vratilo brodskog vijka, bilo pojedinačno ili zajedno. Ova konfiguracija omogućava fleksibilno upravljanje, optimizirajući učinkovitost goriva tijekom različitih faza putovanja, kao što su krstarenje pri niskim brzinama ili manevriranje u lukama. Slika 2. prikazuje paralelnu konfiguraciju propulzijskog sustava [17].

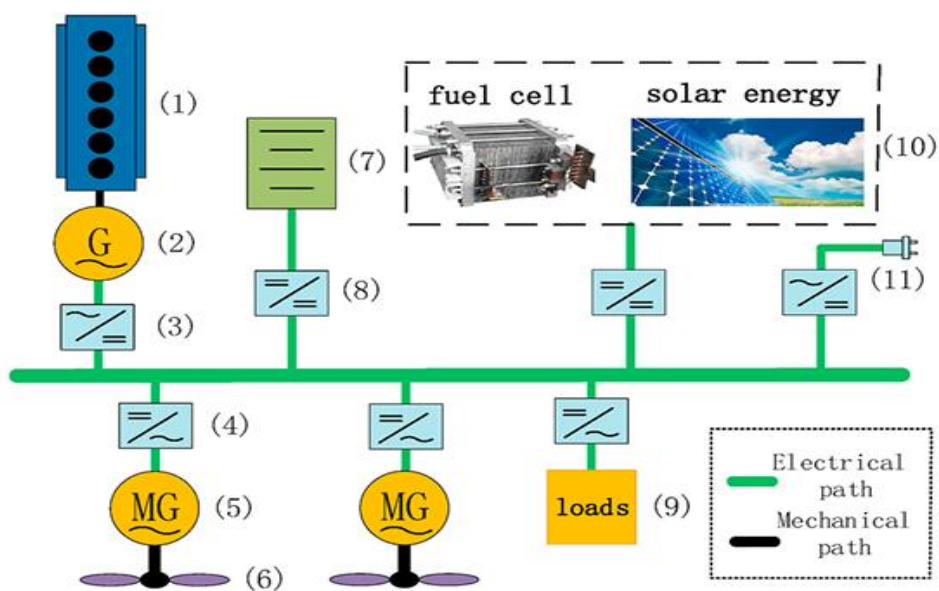


Slika 2. Paralelna konfiguracija propulzijskog sustava [17]

- (1) – Glavni porivni stroj.
- (2) – Motor dizel generatorske jedinice.

- (3) – Alternator dizel generatorske jedinice.
- (4), (5) – Pretvarač.
- (6) – Električni multi kvadrantni stroj.
- (7) – Reduktor.
- (8) – Brodski vijak.
- (9) – Uređaj za skladištenje električne energije.
- (10) – Ispravljač.
- (11) – Električni motor.
- (12) – Potrošači-
- (13) – Priključak za napajanje s kopna.
- (14) – Sabirnica istosmjerne struje.

Serijski hibridni sustavi kao sustav prikazan na slici 3. uključuju dizelski motor koji generira električnu energiju koja se zatim koristi za pogon elektro propulzijskog motora. U ovom postavu, dizelski motor radi s optimalnom učinkovitošću, s elektromotorom koji pruža potrebnu snagu za propulziju. Uređaji za skladištenje energije mogu osigurati dodatnu snagu za velike zahtjeve ili omogućiti potpuno električni rad tijekom ograničenih područja. [17].

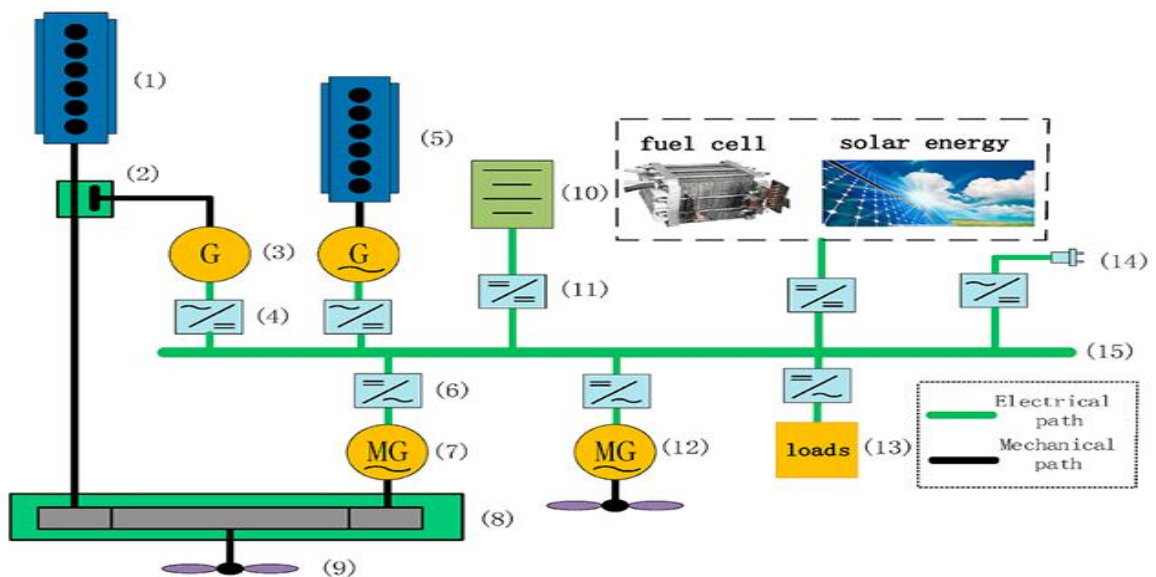


Slika 3. Serijska konfiguracija propulzijskog sustava [17]

- (1) – Motor dizel generatorske jedinice.
- (2) – Alternator dizel generatorske jedinice.

- (3), (4) – Pretvarač.
- (5) – Električni motor.
- (6) – Brodski vijak.
- (7) – Uređaj za skladištenje električne energije.
- (8) – Ispravljač.
- (9) – Potrošači-
- (10) – Priključak za napajanje s kopna.
- (11) – Sabirnica istosmjerne struje.

Kombinirani sustavi koriste prednosti i paralelnih i serijskih konfiguracija, nudeći maksimalnu fleksibilnost i učinkovitost. Ova složena konfiguracija prikazana na slici 4., može pružiti značajne operativne prednosti, uključujući sposobnost kratkotrajnog rada na samo električni pogon kako bi se smanjile emisije u osjetljivim područjima [17].



Slika 4. Kombinirana konfiguracija propulzijskog sustava [17]

- (1) - Glavni porivni stroj.
- (2), (8) – Reduktor.
- (3) – Alternator dizel generatorske jedinice.
- (4), (6) – Pretvarač.
- (5) – Motor dizel generatorske jedinice.
- (7) – Električni multi kvadrantni stroj.
- (9) – Brodski vijak.

- (10) – Uređaj za skladištenje električne energije.
- (11) – Ispravljač.
- (12) – Električni motor.
- (13) – Potrošači-
- (14) – Priključak za napajanje s kopna.
- (15) – Sabirnica istosmjerne struje.

Sustav za upravljanje energijom EMS (engl. *Energy management system*) igra ključnu ulogu u hibridnoj propulziji, dinamički dodjeljujući izvore energije prema potražnji, optimizirajući performanse i osiguravajući energetske učinkovitost. Napredna EMS rješenja uključuju predvidive algoritme i praćenje u stvarnom vremenu za donošenje informiranih odluka koje uravnotežuju opskrbu energijom, potrošnju i skladištenje [17].

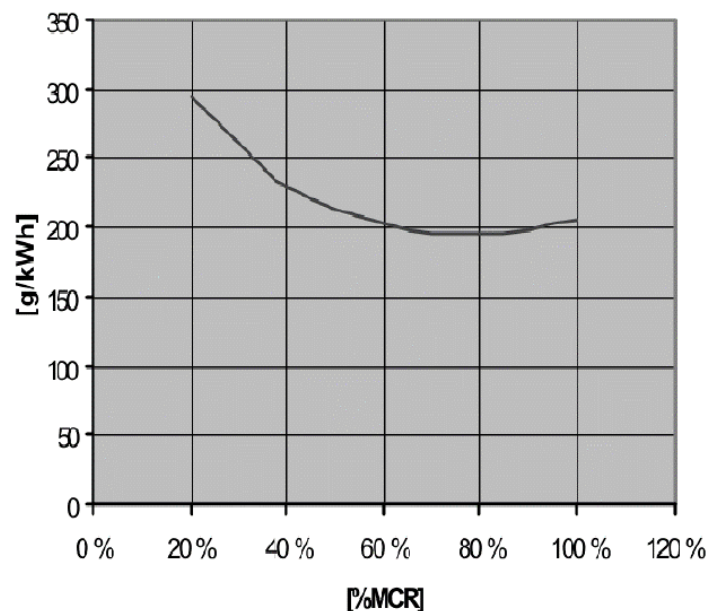
### **3.1. DIZEL-ELEKTRIČNA PROPULZIJA**

Danas je cilj smanjenja potrošnje fosilnih goriva i povećanja upotrebe obnovljive energije jedno od najvažnijih pitanja u pomorskom sektoru. Propisi koje je stvorila Međunarodna pomorska organizacija IMO (engl. *International maritime organization*) kako bi se spriječilo okolišno i zračno zagađenje u pomorstvu postaju sve utjecajnije iz dana u dan i čine nužnim prijelaz s konvencionalnih sustava na alternativne. Iako su studije u području korištenja potpuno električnih pomorskih plovila koji koriste isključivo obnovljivu energiju također u tijeku, oni nisu preferirani zbog visokih troškova i nedostatka održivosti, dok je korištenje dizel električne propulzije u pomorskim plovilima jedna od alternativa u ovom području, s poboljšanjima koja su napravljena na ovom sustavu, on može biti najučinkovitiji izbor [13].

U posljednjih nekoliko godina, električni propulzijski sustavi postali su preferirani za mnoge tipove brodova. Takvi sustavi, koji su pokretani električnim motorima i voženi pri promjenjivim brzinama, gdje su sustavi uspostavljeni s dizelskim generatorima ili plinskim turbinama, pokazali su se korisnima u različitim aspektima. Smanjena potrošnja goriva i ispušnih plinova, niski troškovi održavanja, poboljšana upravljivost, visoka pouzdanost, smanjena buka i vibracije su neke od tih prednosti [13].

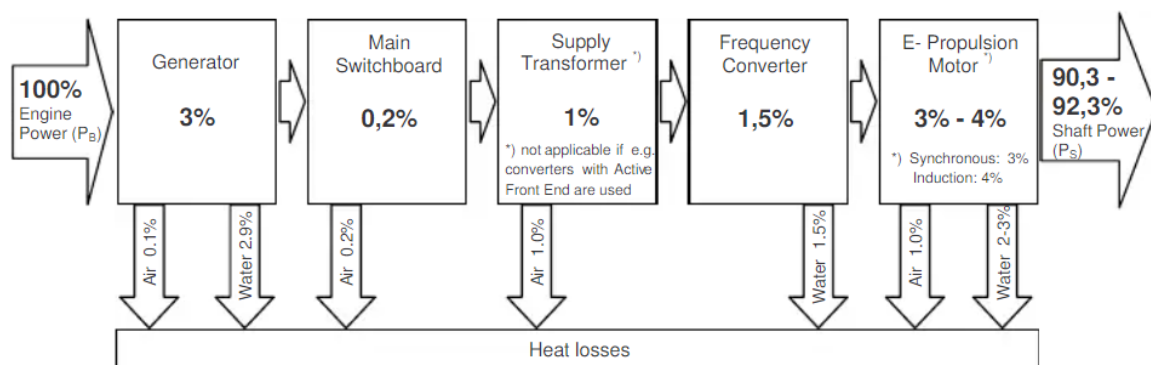
Načelo rada dizel-električne propulzije uključuje generiranje električne energije pomoću dizelskih generatora, koja se zatim isporučuje električnim motorima koji pokreću brodske vijke. U ovom sustavu, dizelski motori koriste se za pogon generatora (alternatora) koji proizvode električnu energiju. Ova električna energija zatim se distribuira kroz sustav upravljanja energijom do električnih motora, koji mogu varirati svoju brzinu na temelju potražnje za energijom. Ova postavka omogućava veću fleksibilnost i učinkovitost u distribuciji energije, jer električni motori mogu raditi na optimalnim brzinama za različite uvjete rada, što dovodi do poboljšane učinkovitosti potrošnje goriva i smanjenih emisija. Dizel električni propulzijski sustav pruža prednosti u smislu operativne fleksibilnosti, smanjene mehaničke složenosti i poboljšane kontrole nad propulzijom i proizvodnjom energije, čineći ga prikladnim izborom za različite tipove pomorskih plovila.

Najčešća izvedba dizel električne propulzije podrazumijeva mrežu izmjenične struje sa generatorima konstantne brzine vrtnje. Najmanja potrošnja goriva kod dizelskih motora s fiksnom brzinom općenito se postiže na maksimalnoj kontinuiranoj stopi od 80-85 %, kako je prikazano na slici 5. Pri niskim opterećenjima motora, učinkovitost goriva značajno se smanjuje [13].



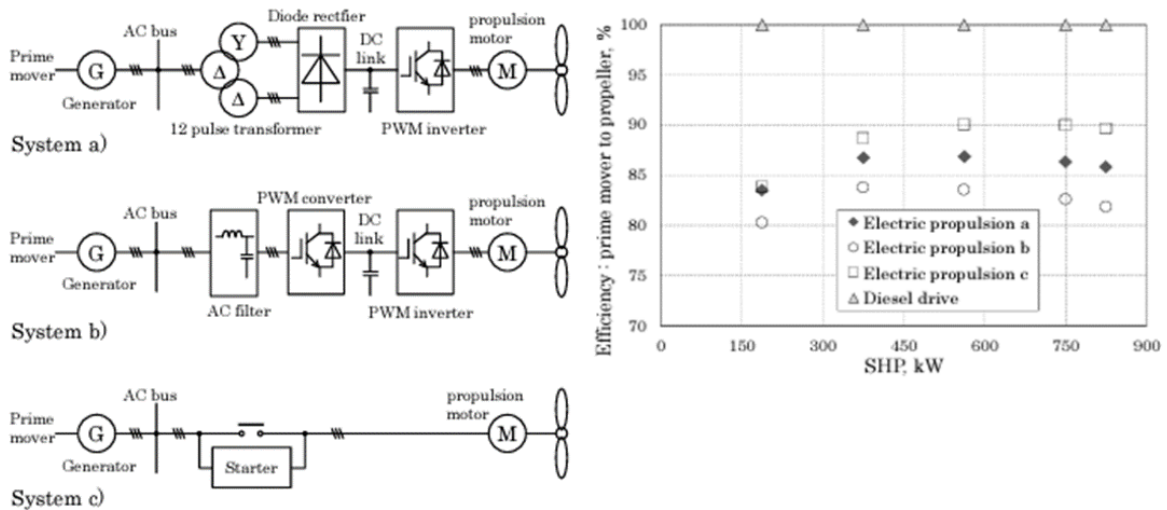
**Slika 5. Specifična potrošnja goriva generatora s konstantnom brzinom vrtnje [13]**

U dizel-električnim propulzijskim sustavima, gubici se primarno javljaju tijekom pretvorbe i prijenosa energije od dizelskog generatora do električnog motora koji pokreće brodski vijak. Ovi gubici mogu se kategorizirati kako prikazuje slika 6. [2].



**Slika 6. Raspodjela gubitaka u dizel električnoj propulziji [2]**

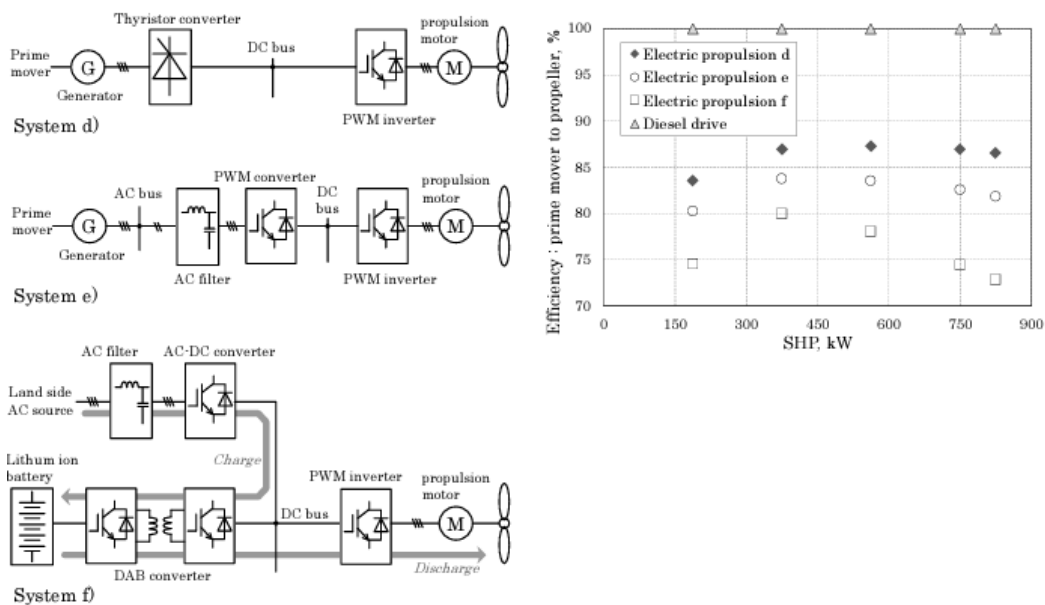
Dva su načina izvedbe dizel električne propulzije, sa mrežom izmjenične struje AC (engl. *Alternating current*) i mrežom istosmjerne struje DC (engl. *Direct current*). AC i DC dizel-električni propulzijski sustavi su s dva različita pristupa koja se koriste u pomorskom inženjerstvu za napajanje brodova. Oba sustava pretvaraju mehaničku energiju proizvedenu dizelskim motorima u električnu energiju koja zatim napaja električne motore povezane s brodskim vijcima. Međutim, razlikuju se u načinu na koji se električna energija generira, distribuira i koristi za pogon broda. U AC sustavima, dizelski generatori proizvode izmjeničnu struju koja se može izravno koristiti za AC električne motore ili se pretvara u različite frekvencije pomoću invertera. AC propulzijski sustavi često koriste pogone promjenjive frekvencije VFD (engl. *Variable frequency drive*) za kontrolu brzine električnih motora, pružajući preciznu kontrolu nad brzinom broskog vijka, a time i brzinom broda. AC sustavi omogućavaju upotrebu standardnih, serijskih električnih komponenti i motora. Mogu učinkovito prenositi energiju na duge udaljenosti, što je korisno na velikim brodovima gdje su generatori smješteni daleko od pogonskih motora. Glavno ograničenje AC sustava je složenost i trošak pretvorbe frekvencije. Potrebni su VFD-ovi za prilagodbu brzine motora, što povećava ukupne troškove i zahtjeve za održavanje sustava. Slika 7. prikazuje izvedbe dizel električne propulzije s mrežom izmjenične struje s obzirom na način pretvorbe energije i njihovu učinkovitost [8].



**Slika 7. Izvedbe dizel električne propulzije s mrežom izmjenične struje i učinkovitost**

[8]

DC sustavi generiraju istosmjernu struju koja može dolaziti od dizelskih generatora opremljenih s ispravljačima ili od AC generatora nakon AC u DC pretvorbe. DC energija može se učinkovito kontrolirati i distribuirati do DC električnih motora, često koristeći elektroničke pretvarače snage za prilagodbu brzine motora. DC sustavi pružaju jednostavniju i učinkovitiju kontrolu brzine električnih motora, jer ne zahtijevaju pretvorbu frekvencije. To može dovesti do bolje energetske učinkovitosti, posebno pri djelomičnim opterećenjima. DC sustavi također imaju tendenciju manjih električnih gubitaka i mogu ponuditi bolji dinamički odziv i jednostavniju kontrolu motora. Distribucija DC energije može biti manje učinkovita na većim udaljenostima zbog većih gubitaka u vodičima, čineći ih manje prikladnim za vrlo velike brodove. Osim toga, visoke struje uključene u DC sustave mogu zahtijevati deblje kabele i robusniju izolaciju. Slika 8. prikazuje izvedbe dizel električne propulzije s mrežom istosmjerne struje i učinkovitost svakog [8].



**Slika 8. Izvedbe dizel električne propulzije s mrežom istosmjerne struje i učinkovitost [8]**

DC sustavi mogu biti učinkovitiji, posebno pri djelomičnim opterećenjima, zbog izravne kontrole brzine motora bez potrebe za pretvorbom frekvencije. Međutim, AC sustavi mogu učinkovito distribuirati energiju na veće udaljenosti. AC sustavi mogu uključivati veću složenost i veće troškove zbog potrebe za uređajima za pretvorbu frekvencije. DC sustavi, iako jednostavniji u kontroli motora, mogu uključivati veće troškove za distribuciju energije u velikim sustavima. Oba sustava nude fleksibilnost u pogledu rasporeda i dizajna. Međutim, izbor između AC i DC često ovisi o specifičnim operativnim zahtjevima, veličini broda i razmatranjima troškova. Tablica 1. prikazuje usporedbu kontrola ovih dvaju propulzijskih sustava [14].

**Tablica 1. Usporedba kontrola sustava s izmjeničnom i istosmjernom strujom [14]**

Usporedba	Sustav sa izmjeničnom strujom	Sustav sa istosmjernom strujom
<b>Kontrola sustava</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frekvencija generatora regulira se preko regulatora brzine i preko raspodjele opterećenja</li> <li>• Kontrola raspodjele opterećenja je nužna</li> <li>• Napon se regulira preko automatskog regulatora napona uzbudnom strujom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frekvencija generatora može biti odabrana je se izmjenični napon ispravlja</li> <li>• Kontrola raspodjele opterećenja nije nužna</li> <li>• Kontrola napona je nužna za raspodjelu opterećenja</li> </ul>



### 3.2. PRIJENOS I PRETVORBA ENERGIJE U HIBRIDNIM PROPULZIJSKIM SUSTAVIMA

Elektronika za prijenos snage predstavlja specijaliziranu granu elektronike koja se bavi kontroliranom transformacijom električne energije. Ova transformacija uključuje prilagodbu električne snage za razne primjene, uključujući ali ne ograničavajući se na izvore napona i struje, električne pogone, aktivno filtriranje u energetske sustavima, distribuiranu proizvodnju, pametne mreže, elektrokemijske procese, distribuiranu proizvodnju [5]. U hibridnim propulzijskim sustavima, elektronički pretvarači snage koriste se ne samo za konverziju snage već i za precizno upravljanje naponom i strujom između komponenata sustava, koje često rade na različitim nominalnim naponima.

U električnim energetske sustavima, uređaji za elektroniku snage primarno izvode sljedeće funkcije kroz periodično uključivanje i isključivanje struje na odabranim frekvencijama:

Za AC krugove:

- Pretvaraju izmjeničnu struju AC u istosmjernu DC,
- Pretvaraju frekvenciju izmjenične struje,
- Kontroliraju napon izmjenične struje,
- Pružaju mogućnost regulacije snage bez promjene napona ili frekvencije, što je ključno za aplikacije poput podesivih pogona i frekvencijskih invertera.

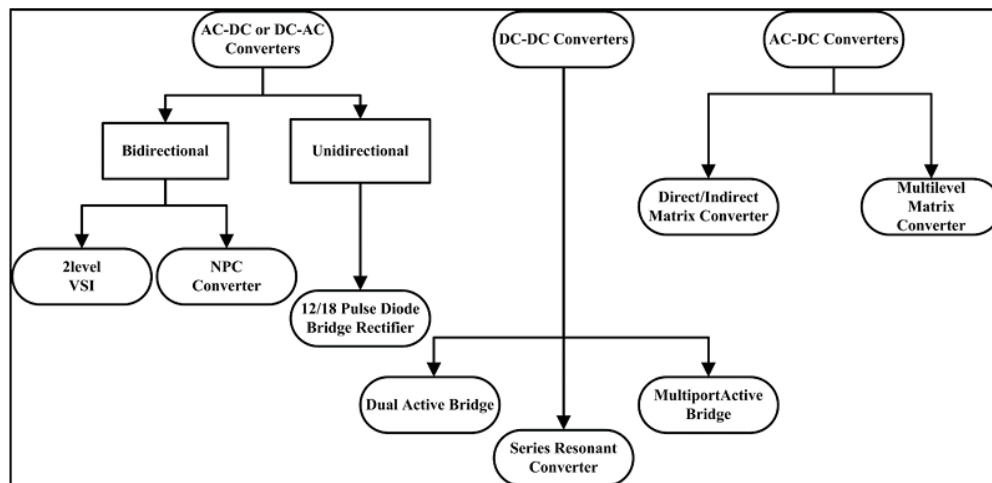
Za DC krugove:

- Pretvaraju istosmjernu struju DC u izmjeničnu AC,
- Kontroliraju napon istosmjerne struje,
- Upravljaju distribucijom i balansiranjem opterećenja između različitih dijelova sustava, što je od velike važnosti za aplikacije poput punjača baterija i DC distribucijskih sustava [12].

Direktan ili indirektan rezultat korištenja kontrolera elektroničke snage je povećanje učinkovitosti cijelog sustava.

Pretvarači omogućavaju prilagodbu snage generirane iz izvora za optimalnu raspodjelu napona; ovakva prilagodba napona ključna je za učinkovit rad izvora napajanja koji zahtijevaju specifične uvjete za svoju operaciju. Resursi se mogu konfigurirati da rade na svojim optimalnim radnim točkama, čime se postiže maksimalna efikasnost. Distribucija

i balansiranje opterećenja između različitih izvora je poboljšano, a integracija s mjestima potrošnje osigurava da svaki otpor dobiva potrebnu snagu u skladu s operativnim zahtjevima. Danas, gotovo svaki izvor i otpor zahtijevaju odgovarajući pretvarački uređaj [15]. Različite vrste pretvarača koji se koriste u pogonskim hibridnim sustavima uključuju pretvarače tipa VSI (engl. *Voltage source inverter*) za AC motore, obično asinkrone motore, ciklokonvertere za AC motore, tipično sinkrone motore, pretvarače tipa CSI (engl. *Current source inverter*) za AC motore, također obično za sinkrone motore, te DC pretvarače ili SCR (engl. *Silicon Controlled Rectifier*) za DC motore. Moderni pomorski elektronički pretvarači snage uključuju serijski povezane pretvarače, naponski zatezne pretvarače i izolirane naponske pretvarače. Izbor specifičnog tipa pretvarača ovisi o karakteristikama i zahtjevima samog pogona [15]. Slika 9. prikazuje klasifikaciju pretvarača prema namjeni.



**Slika 9. Klasifikacija pretvarača snage prema namjeni [15]**

Rad serijski povezanih pretvarača Alstom, bilo u AC ili DC krugovima, temelji se na principu kontrole protoka električne energije kroz poluvodičke elemente. Ti pretvarači transformiraju električnu energiju iz jednog oblika u drugi (AC u DC, DC u AC, ili čak AC u AC i DC u DC) s željenim karakteristikama napona, struje ili frekvencije. Specifični mehanizam rada može se znatno razlikovati ovisno o primjeni i tipu pretvarača [15].

U DC krugovima serijski povezani pretvarači primarno prilagođavaju razinu napona. Spajanjem pretvarača u seriju, izlazni napon svakog pretvarača se zbraja, omogućavajući sustavu da postigne veći ukupni izlazni napon. Svaki pretvarač u seriji kontrolira se signalom vrata (engl. *Gate*) koji određuje kada i kako pretvarač provodi električnu energiju. Ova kontrola je ključna za regulaciju izlaznog napona i osiguravanje stabilnosti kroz seriju.

Osnovne komponente DC pretvarača su poluvodički elementi poput dioda, tiristora ili tranzistora. Ti elementi se uključuju i isključuju na visokim frekvencijama kako bi pretvorili DC ulaz u viši ili niži DC izlazni napon [15].

U AC krugovima serijski povezani pretvarači mogu kontrolirati ne samo amplitudu napona već i njegovu fazu. To je posebno važno za primjene koje zahtijevaju preciznu kontrolu nad protokom energije, kao što su upravljanje kvalitetom energije ili sustavi s promjenjivom brzinom pogona. Za AC pretvarače, sinkronizacija s mrežom ili opterećenjem je ključna. Pretvarači moraju uskladiti frekvenciju i fazu AC sustava na koji su povezani. To se često postiže sofisticiranim algoritmima kontrole koji u stvarnom vremenu prilagođavaju rad pretvarača. Ponekad, serijski povezani pretvarači u AC aplikacijama rade tako što prvo ispravljaju AC ulaz u DC, obrađuju DC, povećavaju ili smanjuju napon, filtriraju itd., a zatim ga vraćaju u AC s željenim karakteristikama. Ovaj proces se naziva AC-DC-AC pretvorba i uobičajen je u primjenama poput promjenjivih frekvencijskih pogona. Bez obzira na primjenu AC ili DC, opći radni princip uključuje ulaznu fazu, energija se prima od izvora, AC ili DC i može biti filtrirana ili obrađena kako bi bila prikladna za pretvorbu. Fazu pretvorbe, energija se pretvara korištenjem poluvodičkih prekidačkih elemenata koji se kontroliraju kako bi se postigle željene karakteristike izlaza. U serijskim konfiguracijama, ova faza se ponavlja kroz više pretvarača, svaki doprinoseći postizanju željenog ukupnog izlaza. Izlazna faza, pretvorena energija se dostavlja opterećenju. U serijskim konfiguracijama, izlazi pojedinačnih pretvarača kombiniraju se kako bi se postigao viši napon ili modificirane karakteristike [15].

Serijski povezani pretvarači su dizajnirani za visoku učinkovitost, često koristeći tehnike poput modulacije širine impulsa PWM (engl. *Pulse width modulation*) za preciznu kontrolu nad izlazom. Učinkovitost i performanse ovih pretvarača ovise o dizajnu sustava kontrole, karakteristikama poluvodičkih uređaja i specifičnim zahtjevima primjene. [15].

Pretvarači s ograničenjem napona, poznati i kao višerazinski pretvarači s ograničenjem, specijalizirani su tipovi elektroničkih pretvarača snage koji se koriste i u AC i DC krugovima, ovisno o specifičnoj primjeni i dizajnu. Ovi pretvarači su posebno značajni zbog svoje sposobnosti generiranja izlaznih napona s više razina, što može približnije davati sinusoidan valni oblik u usporedbi s tradicionalnim dvorazinskim pretvaračima. Ta sposobnost čini ih izuzetno prikladnima za primjene za velike snage visokog napona.

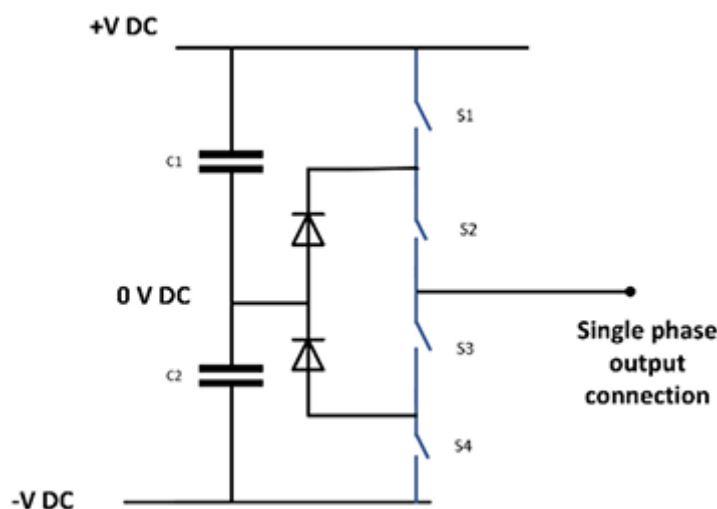
Pretvarači s ograničenjem napona rade kombinirajući više poluvodičkih elemenata i kondenzatora u konfiguraciji koja omogućava generiranje stepenastih izlaznih napona. Ti stupnjevi mogu stvoriti valni oblik koji nalikuje sinusu, smanjujući harmonijsku distorziju i poboljšavajući kvalitetu snage isporučene teretu.

Izraz ograničenje napona odnosi se na metodu korištenja dioda za ograničenje ili drugih poluvodičkih uređaja za fiksiranje napona na određenim točkama u krugu, sprečavajući prekoračenje postavljene razine. Ovaj mehanizam je ključan za zaštitu uređaja u pretvaraču i za kontrolu izlaznih razina napona. Korištenjem nekoliko razina napona, generiranih serijalnim povezivanjem prekidača i kondenzatora, pretvarač može proizvesti višerazinski izlazni napon. Svaka razina napona dodaje se na valni oblik, povećavajući rezoluciju izlaznog signala i omogućavajući glađi prijelaz između razina. Višerazinski izlaz smanjuje harmonijsku distorziju u valnom obliku, što je korisno i za električni sustav i za povezana opterećenja. Manja harmonijska distorzija znači manje naprezanje na električnim komponentama i poboljšanu učinkovitost. U AC primjenama, kao što su inverterski sustavi za izvore obnovljive energije ili promjenjivi pogoni brzine za motore, pretvarači s ograničenjem napona koriste se za generiranje AC izlaza smanjenih harmonika. Oni mogu učinkovito pretvarati DC u AC s poboljšanom kvalitetom valnog oblika, čineći ih prikladnima za aplikacije povezane s mrežom i pogone motora visokih performansi. U DC primjenama, pretvarači s ograničenjem napona mogu se koristiti u sustavima prijenosa za učinkovito povećavanje ili smanjenje DC napona. Također se koriste u DC-DC pretvorbenim aplikacijama gdje su potrebna visoka učinkovitost i precizna kontrola napona [15].

Postoji nekoliko vrsta pretvarača s ograničenjem napona, uključujući, ali ne ograničavajući se na:

- Diodno ograničeni pretvarač. Koristi diode za ograničenje napona na neutralnu točku, omogućavajući generiranje tri ili više razina napona.
- Pretvarač s lebdećim kondenzatorima: Koristi niz kondenzatora napunjenih na različite razine napona kao mehanizam za ograničenje, pružajući fleksibilnost u generiranim razinama napona.
- Kaskadni H-most pretvarač: Sastoji se od nekoliko H-most jedinica povezanih u seriju, pri čemu svaka jedinica može generirati više razina napona. Ovaj tip je izrazito modularan i skalabilan za primjene visokog napona [15].

Slika 10. prikazuje pojednostavljenu shemu pretvarača s naponskom stezaljkom.



**Slika 10. Pretvarač s naponskom stezaljkom [15]**

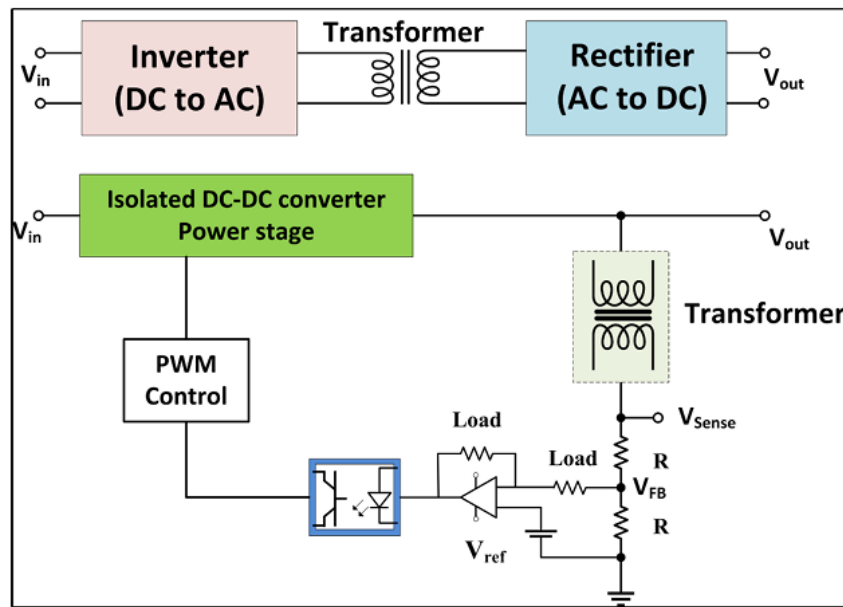
Izolirani pretvarači napona koriste se i u AC i DC krugovima, pružajući ključnu funkciju u mnogim primjenama elektroničkih pretvarača snage. Njihova primarna uloga je prijenos električne energije iz jednog kruga u drugi bez izravne električne veze, čime se izolira ulaz od izlaza. Ova izolacija je važna za sigurnost, smanjenje buke i sprječavanje petlji uzemljenja. Izolirani pretvarači koriste se u raznim aplikacijama, uključujući kontrolu energetske sustava [1].

Izolirani pretvarači napona koriste transformator ili drugu izolacijsku tehniku za postizanje električne izolacije između ulaza i izlaza. U mnogim izoliranim pretvaračima, transformator se koristi za prijenos energije između primarnog ulaznog i sekundarnog izlaznog kruga. Omjer namotaja transformatora određuje razinu napona koja se prenosi, omogućujući prilagodbu izlaznog napona prema potrebi. Izolirani pretvarači često koriste tehniku prebacivanja za kontrolu energije koja se prenosi kroz transformator. Prebacivački elementi, poput tranzistora, kontroliraju se na način da se omogući visoka učinkovitost i precizna regulacija izlaznog napona [15].

Transformator ne samo da omogućava prijenos energije već i stvara fizičku izolaciju između ulaznog i izlaznog kruga, što je ključno za sigurnost i eliminaciju elektromagnetske interferencije EMI (engl. *Electromagnetic interference*). U mnogim izoliranim pretvaračima, povratna veza se koristi za kontrolu i regulaciju izlaznog napona. Ova povratna informacija može biti prenesena preko optičkih spojnica ili drugih izoliranih

metoda kako bi se osiguralo održavanje preciznog izlaznog napona unatoč promjenama na ulazu ili opterećenju.

Izolirani pretvarači napona naširoko se koriste u aplikacijama gdje je potrebna izolacija između različitih dijelova električnog sustava. [15]. Slika 11. prikazuje shemu ovog pretvarača



Slika 11. Izolirani pretvarač napona [15]

### 3.3. ELEKTRIČNI PROPULZORI

Evolucija brodskih propulzijskih sustava značajno je obilježena pojavom električnih motora, koji nude alternativu tradicionalnim mehaničkim pogonima. Ovaj pomak prema električnoj propulziji potaknut je težnjom za povećanjem učinkovitosti, smanjenjem emisija i fleksibilnošću koju električni sustavi pružaju u odnosu na svoje mehaničke pandane. Integracija električnih motora u hibridne brodske propulzijske sustave predstavlja ključni napredak, iskorištavajući prednosti i električne i konvencionalne propulzije kako bi se zadovoljile raznolike potrebe modernih pomorskih operacija [3].

Hibridni brodski propulzijski sustavi kombiniraju prednosti motora s unutarnjim izgaranjem sa električnom propulzijom, gdje električni motori igraju ključnu ulogu. Ti sustavi nude operativnu fleksibilnost, omogućujući optimizaciju potrošnje goriva i

smanjenje emisija, posebno u scenarijima gdje brodovi rade na različitim brzinama i opterećenjima.

Električni motori u hibridnim brodskim propulzijskim sustavima mogu se općenito klasificirati u sljedeće kategorije:

- AC indukcijski motori ACIM (engl. *Alternating current induction motor*): Poznati po svojoj jednostavnosti, robusnosti i isplativosti, AC indukcijski motori rade na principu elektromagnetske indukcije. Široko se koriste zbog svoje sposobnosti da izdrže teške pomorske uvjete i zbog jednostavnosti održavanja.
- AC sinkroni motori ACSM (engl. *Alternating current synchronous motor*): Ovi motori održavaju konstantnu brzinu pod različitim opterećenjima, što ih čini pogodnima za primjene koje zahtijevaju preciznu kontrolu brzine. Njihova učinkovitost i faktor snage općenito su veći od indukcijskih motora, posebno u primjenama visoke snage [3]
- Motori s trajnim magnetima PMM (engl. *Permanent magnet motor*): Karakterizirani upotrebom trajnih magneta za generiranje magnetskog polja, ovi motori nude visoku učinkovitost, i smanjenu težinu, čineći ih idealnima za primjene u ograničenim prostorima.
- Motori s visoko temperaturnim super vodičima HTSM (engl. *High temperature superconducting motor*): Koristeći super vodiče za postizanje nultog električnog otpora, HTSM-ovi nude neusporedivu učinkovitost, značajno smanjenje težine i veličine te izvrsnu gustoću snage. Međutim, zahtijevaju kriogeničke sustave hlađenja za održavanje super vodljivog stanja [3].

Električni motori istosmjerne struje, DC motori, klasificiraju se na motore s četkicama i bez četkaste motore. Motori s četkicama imaju fizičke četkice i komutator, dok bez četkasti istosmjerni motori BLDC (engl. *Brushless direct current*) motori koriste elektronički kontroler za komutaciju. Motori s četkicama su jednostavniji i ekonomičniji, ali zahtijevaju više održavanja. Nasuprot tome, BLDC motori nude veću učinkovitost, pouzdanost i izdržljivost, s manje buke i održavanja, čineći ih pogodnima za precizne primjene u pomorskom okruženju. Izbor između ovih tipova ovisi o specifičnim zahtjevima u pogledu performansi, troškova i održavanja u propulzijskim sustavima [9]. Tablica dva prikazuje najbitnije karakteristike za navedene električne motore.

**Tablica 2. Karakteristike električnih motora korištenih u hibridnim propulzijskim sustavima [15].**

<b>Motori</b>	<b>Raspon brzine</b>	<b>Početni okretni moment</b>	<b>Snaga</b>	<b>Učinkovitost</b>
<b>DC Motor</b>	Široki raspon	Visok	Visoka snaga	70 do 80 %
<b>Sinkroni Motor</b>	Nema raspona (Sink brzina)	Nula	Visoka snaga	Visoka učinkovitost
<b>Indukcijski Motor</b>	Radi na približno sinkronoj brzini	Visok početni okretni moment	Visoka snaga	85-97%
<b>PMS Motor</b>	Široki raspon brzina	Nema početnog okretnog momenta	Visoka snaga	Visoka učinkovitost
<b>HTS Motor</b>	Široki raspon brzina	Dobar početni okretni moment	Visoka snaga	Visoka učinkovitost

### 3.4. GORIVNI ČLANCI

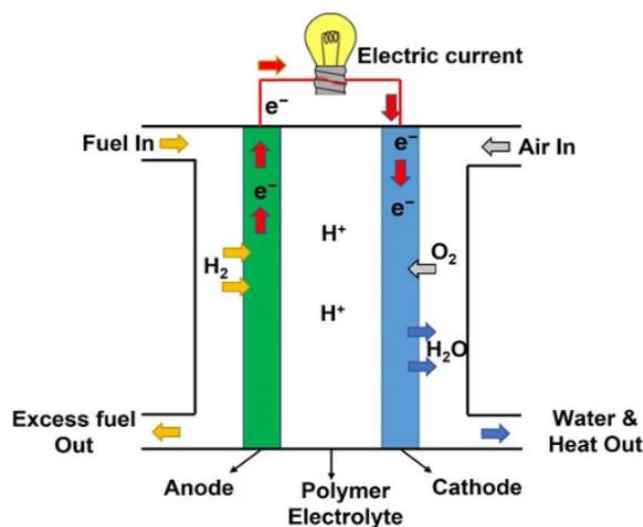
Gorivni članci postaju sve značajniji u pomorskoj primjeni zbog svoje visoke učinkovitosti i niskog utjecaja na okoliš. Ti elektrokemijski uređaji pretvaraju kemijsku energiju goriva, obično vodika, izravno u električnu energiju, nudeći čišću alternativu fosilnim gorivima [1].

Gorivni članci koriste se u pomorskoj propulziji kako bi se zadovoljili strogi propisi o emisijama i smanjio ugljični otisak brodarstva. Nude tihi rad bez vibracija i pogodne su za plovila koja zahtijevaju nisku razinu buke, poput podmornica ili istraživačkih brodova. Visoka energetska gustoća gorivnih članaka u usporedbi s tradicionalnim baterijama također ih čini atraktivnima za duže misije bez potrebe za ponovnim punjenjem goriva.

Gorivni članci proizvode električnu energiju elektrokemijskom reakcijom između vodika i kisika. Vodik se dovodi do anode gdje se disocira na protone i elektrone. Protoni se kreću kroz elektrolit do katode, dok elektroni putuju kroz vanjski krug, generirajući električnu struju. Na katodi se protoni, elektroni i kisik kombiniraju kako bi formirali vodu,



koja je jedini nusprodukt ako se koristi čisti vodik [1]. Slika 12. prikazuje osnovni princip rada gorivnog članka na vodik.



**Slika 12. Osnovni princip rada gorivnog članka [1]**

Performanse gorivnih članaka mjerene su u pogledu specifične snage (vati po kilogramu) i operativnog života. Na primjer, gorivni članak s protonskom izmjenjivačkom membranom, koja se široko koristi u pomorskim aplikacijama, ima specifične snage koje mogu varirati od 150 do 350 [W/kg] i operativni život od oko 6000 [h]. PEM gorivni članci poznati su po svojoj komsettnosti, maloj težini i sposobnosti brzog pokretanja na niskim temperaturama, koje mogu biti niske kao 80°C. Njihova učinkovitost može varirati od 40 % do 60 %, ovisno o dizajnu i operativnim uvjetima [1].

Gorivni članci nude nekoliko prednosti:

- Visoka učinkovitost u pretvaranju goriva u električnu energiju,
- smanjene emisije stakleničkih plinova i onečišćenja,
- tih rad bez pokretnih dijelova, što vodi do visoke pouzdanosti,
- fleksibilnost u ocjenama snage i skalabilnost, budući da se više gorivnih članaka može složiti kako bi se postigao željeni izlaz [1].

Vodik i kisik se obično koriste kao reaktanti na dvije strane članka: u tom slučaju, tijekom rada ne dolazi do emisija. Međutim, ovisno o tipu gorivnog članka, mogu se koristiti i drugi reaktanti, među kojima su amonijak, metan i metanol zanimljive opcije za isporuku vodika. U tom slučaju, ispušni plinovi iz gorivnog članka treba tretirati [4].

Gorivni članci mogu se klasificirati ovisno o radnoj temperaturi, materijalu elektrolita, tipičnom gorivu, rasponu snage, rasponu životnog vijeka i primjenama, kako je prikazano u Tablici 3., koja sažima glavne tehnologije gorivnih članaka i njihove karakteristike. Na temelju raspona temperatura moguće je identificirati kategoriju visokih temperatura SOFC (engl. *Solid Oxide Fuel Cell*) i MCFC (engl. *Molten Carbonate Fuel Cell*), kategoriju srednjih temperatura PAFC (engl. *Phosphoric Acid Fuel Cell*) i kategoriju niskih temperatura AFC (engl. *Alkaline Fuel Cell*) i PEMFC (engl. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) [1].

**Tablica 3. Tehnologije i karakteristike gorivnih članaka [1]**

Vrsta gorivnog članka	Temperatura [°C]	Elektrolit	Tipično gorivo	Raspon snage	Električna učinkovitost	Vijek trajanja [h]
PEMFC	60–80 LT- 110–180 HT-	Vodena polimerna membrana	Vodik	≤1 MW	45–55%	60,000– 80,000
SOFC	500-1000	Porozni keramički materijal	H <sub>2</sub> , metanol, ugljikovodici	≤1 MW	50–60%	20,000– 80,000
MCFC	650–800	Rastopljena sol karbonata	H <sub>2</sub> , metanol, ugljikovodici	≤1 MW	43–55%	15,000– 30,000
PAFC	140–200	Fosforna kiselina	H <sub>2</sub> , LNG i metanol	≤11 MW	30–42%	40,000– 60,000
AFC	60–200	Kalijev hidroksid	Vodik	≤500 kW	40–50%	5,000– 8,000

Postoji nekoliko kriterija za usporedbu primjenjivosti vrsta gorivnih članaka za pomorske primjene, kao što su gustoća snage, emisije, sigurnost i učinkovitost. Kriteriji gustoće snage temelje se na masi i volumenu sustava; stoga je cilj pronaći vrste gorivnih članaka koje imaju manju masu i volumen s visokom snagom. Najperspektivnija vrsta gorivnih članaka za pomorske primjene prema kriterijima gustoće snage je PEMFC, dok se MCFC i PAFC smatraju manje prikladnima za pomorske primjene zbog njihovih većih volumena i niže gustoće snage. Osim toga, PEMFC ima prednost brzog pokretanja koje mu omogućuje da bude pogodan za transportni sektor. S druge strane, MCFC i SOFC imaju sporo pokretanje i manje su prilagodljivi promjenama opterećenja na temelju njihove visoke radne temperature, što dovodi do negativnih cikličkih učinaka. Kriteriji emisija ispušnih plinova smatraju se kamenom temeljcem korištenja gorivnih članaka za pomorske primjene, ali

kriteriji emisija ovise o gorivu koje se koristi; na primjer, emisije iz PEMFC-a pokretanog vodikom su samo voda, dok SOFC, PAFC i MCFC pokretani ugljikovodičnim gorivima (dizelom ili LNG-om) emitiraju vodu i CO<sub>2</sub>. Korištenje ugljikovodičnih goriva daje potencijal fleksibilnosti na brodu s aspekta skladištenja, isplativosti i dostupnosti [4].

Koncept sigurnosti gorivnih članaka procjenjuje se po izolaciji cijevi ispušnih plinova, posebno za vrste MCFC i SOFC, koje moraju imati učinkovitu izolaciju zbog visoke temperature ispušnih plinova. Kod gorivnih članaka na vodik, učinkovitost izolacije i ventilacije spremnika za pohranu mora se provjeriti u procesu prijenosa između spremnika i anodne strane zbog eksplozivnih i hlapljivih svojstava vodika. Stoga, gorivni članci niske temperature, poput PEMFC-a, imaju više potencijalnih prednosti za primjenu na brodovima s gledišta sigurnosti, ali postoji više komplikacija za pohranu vodika.

Na temelju podataka navedenih u Tablici 3, učinkovitost gorivnih članaka kreće se između 50–60 %, što je više od tipičnih vrijednosti konvencionalnih pomorskih pogonskih postrojenja kao što su motori s unutarnjim izgaranjem zbog izravne pretvorbe iz kemijske u električnu energiju u gorivom članku. Štoviše, sustavi gorivnih članaka također imaju visoku učinkovitost pri djelomičnom opterećenju, dok motori s unutarnjim izgaranjem obično predstavljaju smanjenje učinkovitosti pri radu na niskoj snazi [4].

Pomoćne komponente su potrebne za generiranje električne energije s gorivnim člancima. Te komponente se obično nazivaju BoP (engl. *Balance of plant*), i čine veliki dio ukupnog sustava. Može se napraviti razlika između toplih i hladnih BoP komponenata u sustavima s gorivnim člancima visoke temperature i sustavima s opremom za obradu goriva. Tople BoP komponente uključuju, na primjer, izmjenjivače topline i procesore goriva, dok se uređaji za upravljanje snagom i kontrole sustava klasificiraju kao hladni dijelovi. Mnoge BoP komponente troše snagu i dodatno gorivo [4].

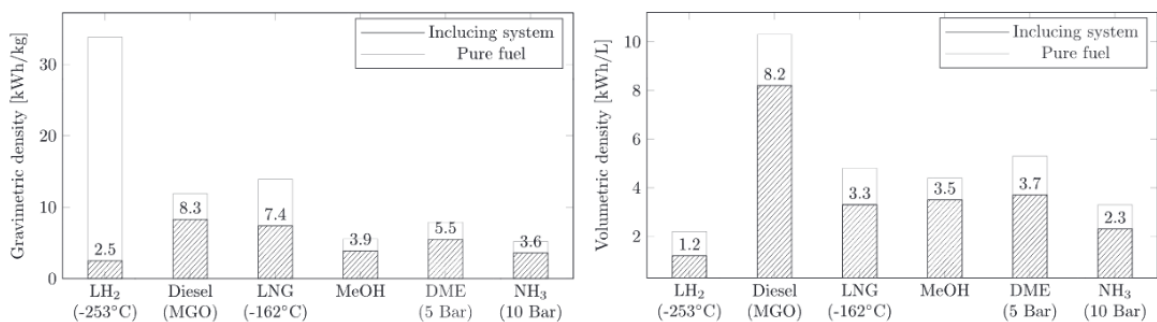
Jedna klasa BoP komponenata koristi se za opskrbu gorivom i oksidansom članku stoga uključuje pumpe, puhala i kompresore. Ovisno o tipu gorivnog članka, mogu biti prisutni izmjenjivači topline kako bi se radni mediji doveli na pravu temperaturu, a evaporatori se koriste ako se opskrbljuje tekućim gorivima. Radni mediji često zahtijevaju filtraciju i ovlaživanje, a ispušni plinovi mogu sadržavati značajnu količinu gorivnih komponenata, koje se obično spaljuje u katalitičkom gorioniku. Svi radni mediji reguliraju se kontrolnim sustavima i aktuatorima, kao što su brzine puhala, ventili i regulatori tlaka. Gorivni članci visoke temperature često su opremljeni gorionicima za zagrijavanje sustava

tijekom pokretanja. Iako se gorivni članci visoke temperature obično hlade zrakom katode, temperaturni gradijenti u gorivnim člancima niske temperature su premali da bi se na ovaj način postiglo dovoljno hlađenje. Stoga će ti sustavi obično imati zaseban sustav hlađenja. Budući da gorivni članci generiraju istosmjernu energiju s promjenjivim naponom i strujom, oprema za uvjetovanje snage, kao što su pretvarači istosmjerne u izmjeničnu struju, koristi se za proizvodnju električne energije na naponu i frekvenciji mreže. Oprema za obradu goriva još je jedan važan dio BoP-a s značajnim utjecajem na ukupnu učinkovitost [4].

Dizelsko gorivo trenutno je dominantni energent u pomorskoj industriji. Konvencionalni dizelski generator setovi u potpunosti su prilagođeni ovim gorivnima, ali se ne mogu izravno koristiti u gorivnim člancima. Iako je izravna elektrokemijska oksidacija raznih goriva moguća u nekim tipovima gorivnih članaka, relativno brza kinetika oksidacije vodika dominira na praktičnim gustoćama snage. To implicira da većina gorivnih članaka učinkovito radi na vodikom. Posebno, gorivni članci niske temperature oksidiraju isključivo vodik, dok se neka alternativna goriva, kao što su metan i CO (engl. *Carbon monoxide*), mogu interno pretvoriti u plin bogat vodikom u gorivnim člancima visoke temperature [4].

Razmatra se konverzija dizela u vodik na brodu, budući da je infrastruktura za dizel lako dostupna i vodik je znatno skuplji i znatno manje energetski gust. Međutim, dodatni sustav za konverziju i dobivanje vodika iz dizelskog goriva povećava složenost, trošak i veličinu sustava gorivnog članka. Štoviše, potreba za smanjenjem i konačnim uklanjanjem emisija stakleničkih plinova čini razmatranje alternativnih goriva neophodnim [4].

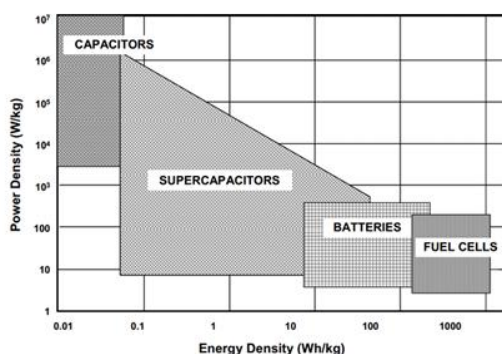
Stoga se predviđa promjena prema čistijim fosilnim gorivima i obnovljivim gorivnima, ali njihovo usvajanje ovisit će, između ostalog, o njihovoj dostupnosti, infrastrukturi, utjecaju na okoliš, sigurnosti, cijeni, propisima i tehničkoj prikladnosti. Međutim, tehnička prikladnost pomorskih sustava gorivnih članaka dio je opsega ovog rada, stoga se neke opcije kratko raspravljaju u ovom odjeljku. Prikazan je pregled i gravimetrijskih i volumetrijskih energetskih gustoća ovih goriva na Slici 13, prikazujući energetsku gustoću čistog goriva kao i s uključenim sustavom skladištenja [4].



**Slika 13. Gravimetrijska i volumetrijska gustoća goriva za gorivne članke [4].**

### 3.5. BATERIJE

Tehnologije čiste energije, koje uključuju skladištenje i pretvorbu energije, postaju najkritičniji elementi u prevladavanju iscrpljenosti fosilnih goriva i globalnog onečišćenja. Od svih tehnologija čiste energije, elektrokemijske tehnologije smatraju se najizvedivijima, ekološki prihvatljivijima i održivima. S povećanjem potražnje i za energijom i za gustoćom snage ovih elektrokemijskih energetskih uređaja, daljnja istraživanja i razvoj su potrebni kako bi se prevladali izazovi poput troškova i trajnosti, koji se smatraju njihovim glavnim preprekama. Slika 14. prikazuje graf različitih uređaja za skladištenje energije. Graf prikazuje gustoću snage ovih uređaja naspram njihove gustoće energije. Super kondenzator ima sposobnost pružanja velike količine snage, ali nema sposobnost skladištenja tako velikih količina energije kao baterija ili gorivni članak. Odabir kojeg uređaja za skladištenje energije koristiti ovisi o operativnim karakteristikama danog sustava [18].

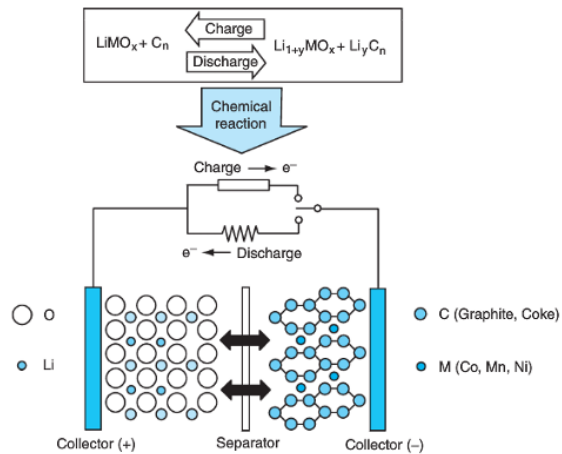


**Slika 14. Karakteristika elektrokemijskih energetskih uređaja [18]**

Postoje dvije vrste baterija, primarne i sekundarne. Primarna baterija pretvara kemijsku energiju u električnu energiju putem ireverzibilne reakcije. Glavne prednosti

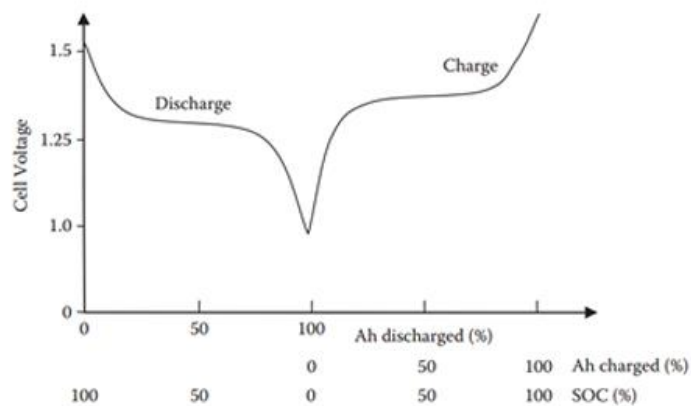
primarnih baterija su njihova niska cijena i visoka energetska gustoća. Upotreba primarnih baterija ograničena je na aplikacije gdje je dovoljna visoka energetska gustoća za jednokratnu upotrebu, prema tome nisu pogodne za primjenu u hibridnim brodskim propulzijskim sustavima. Sekundarne baterije ili elektrokemijske punjive baterije su uređaji za skladištenje energije u kojima je elektrokemijska reakcija reverzibilna. Nakon pražnjenja, baterija se može ponovno napuniti ubrizgavanjem izravne struje iz vanjskog izvora. Tokom punjenja pretvara električnu energiju u kemijsku energiju. Tokom pražnjenja reakcija je obrnuta [18].

Ćelija baterije ima četiri osnovne komponente prikazane na slici 15. Povezuje se sa energetske krugom putem dva metalna terminala. Jedan je povezan s negativnom elektrodom, anodom, a drugi s pozitivnom katodom. Tijekom pražnjenja, elektroni prolaze od anode do katode kroz vanjsko opterećenje. Da bi se uskladio protok elektrona u strujnom krugu, ioni u ćeliji teku prema katodi. Kada se ćelija puni, elektroni su prisiljeni kretati se u suprotnom smjeru vanjskim naponom. Ioni u ćeliji teku prema anodi. Na taj način električna energija se pohranjuje kao kemijska energija u ćeliji baterije. Za prijenos iona između anode i katode koristi se elektrolit. Elektrolit je tradicionalno vodena otopina s visokom koncentracijom nabijenih iona. Elektrolit dolazi u nekoliko različitih vrsta i ovisi o namijenjenoj primjeni. Separator se koristi za električno izoliranje pozitivne i negativne elektrode. Izravan kontakt između dvije elektrode dovest će do kratkog spoja i pražnjenja baterije, čineći je beskorisnom. Separator omogućuje bliže postavljanje elektroda, čime se smanjuje ukupni volumen baterije. Negativna i pozitivna elektroda povezane su s vanjskim terminalom na kućištu ćelije. Ćelije baterije spajaju se serijski i paralelno i o tome ovisi nazivni napon i struja baterije. Ako je potreban viši napon baterije spaja se više ćelija u seriju, ako je potrebna veća struja više ćelija se spaja u paralelu [18].



**Slika 15. Osnovne komponente baterije [18]**

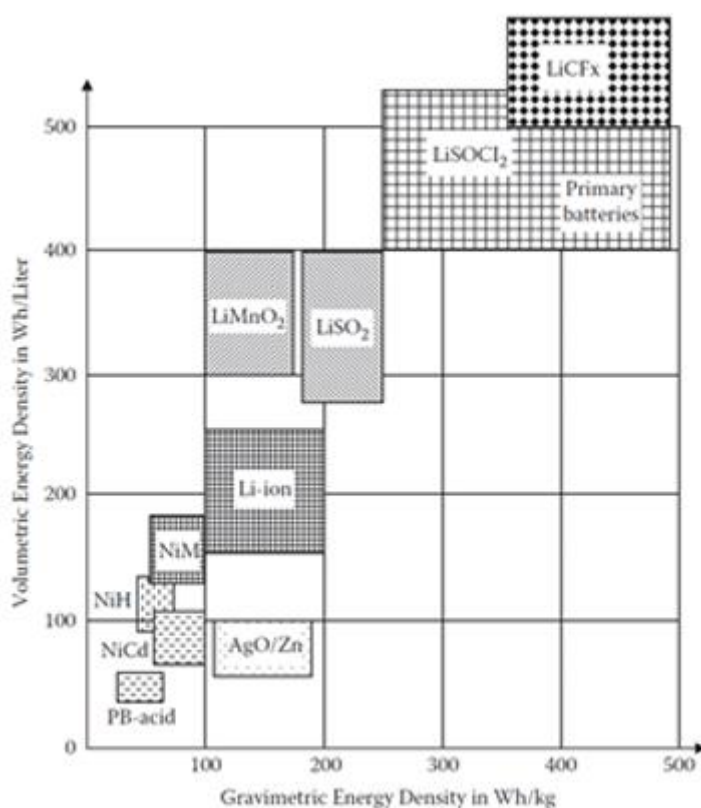
Kapacitet baterije predstavlja maksimalnu količinu energije koja se može izvući iz baterije pod određenim uvjetima. Kapacitet baterije nalazi se pražnjenjem baterije konstantnom strujom dok napon ne dosegne određenu granicu. Najčešće korištena mjera za kapacitet baterije su amper-sati [Ah]. Izmjereni terminalni napon ćelije će varirati kako se puni i prazni. U idealnoj bateriji ne bi bilo razlike između napona punjenja i pražnjenja. Krivulje punjenja i pražnjenja imaju plato s malo varijacija u naponu kako je prikazano na slici 16. Prosjek napona na tim platoima se nazivaju naponi punjenja i pražnjenja [18].



**Slika 16. Krivulja punjenja i pražnjenja baterije [18]**

Ćelije pohranjuju elektrokemijsku energiju na niskom električnom potencijalu koji se tipično kreće od 1.2 do 3.6 [V]. To uglavnom ovisi o elektrokemiji materijala koji se koriste. Na trenutnom tržištu postoji veliki izbor baterija prilagođenih za različite primjene. Parametri kao što su cijena, kapacitet punjenja, napon ćelije, trajnost i energetska gustoća su

važni pri odabiru baterije za određenu primjenu. Slika 17. prikazuje graf različitih vrsta baterija rangiranih prema njihovom omjeru energije i težine [Wh/kg] i njihovom omjeru energije i volumena [Wh/litra]. Kao što možemo vidjeti iz slike, litij-polimer baterije imaju najviše volumetrijske gustoće, ali je njihova upotreba ograničena zbog visokih početnih troškova. Li-ion baterije su trenutno najbrže rastući tip baterija. Ima znatno veću volumetrijsku energetska gustoću od mnogih svojih konkurenata. Također pruža veći napon ćelije, 3.5 [V] po ćeliji. Energetske gustoće se kreću od 100 [Wh/kg] do 200 [Wh/kg] za najbolje Li-ion baterije. Tipične ocjene u gustoći snage su između 1000 [W/kg] i 3000 [W/kg] [18].



**Slika 17. Gustoća snage i energije za različite tipove baterija [18]**

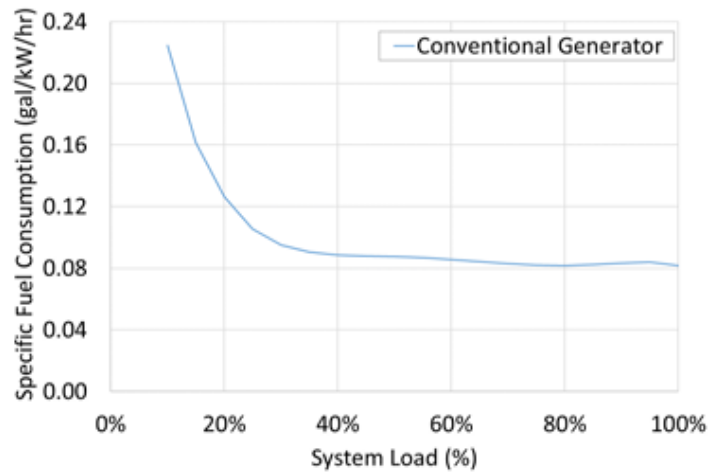
### 3.6. GENERATORI S VARIJABILNOM BRZINOM VRTNJE

U posljednjih nekoliko godina, interes za jedinice promjenjive brzine kao pogon određenih komercijalnih plovila je porastao. Tehnologija promjenjive brzine omogućava regulaciju i prilagodbu brzine motora prema električnom opterećenju koje je spojeno, što ga čini ekonomičnijim za rad. U usporedbi s tradicionalnim, jedinicama konstantne brzine, jedinice promjenjive brzine mogu ponuditi nekoliko prednosti, kao što su: do 15 %



smanjenja potrošnje goriva; do 20 % povećanja vremena između generalnih popravaka; niže emisije buke; te povećana gustoća snage s manje prostora za instalaciju [19]. Implementacija ovih sustava u već postojeće hibridne propulzijske sustave otvara potpuno nove mogućnosti u smanjenju emisija štetnih plinova, povećanju performansi sustava i uštede goriva.

Konvencionalni dizelski generatori imaju dobru učinkovitost potrošnje goriva pri većim opterećenjima. Međutim, specifična potrošnja goriva se povećava za opterećenja manja od 40 %, kako je prikazano na Slici 18. Budući da su sustavi generatora tradicionalno dimenzionirani da zadovolje vršnu potražnju za energijom, male energetske instalacije mogu raditi značajne količine vremena na opterećenjima manjim od 40 %, što rezultira povećanom potrošnjom goriva. Čak i u većim instalacijama, zahtjevi pouzdanosti energije za kritične potrošače mogu zahtijevati značajnu rezervu spremnu za rad, čime se dalje smanjuje prosječno opterećenje generatora i prisiljava motore da rade u područjima niže učinkovitosti i veće potrošnje goriva. Rad na niskim opterećenjima također može povećati troškove održavanja zbog stanja poznatog kao "mokra slaganje", gdje dizelsko gorivo ne sagorijeva potpuno i počinje se nakupljati u komponentama ispušnog sustava. Obnovljivi izvori energije mogu pružiti sredstvo za smanjenje potrošnje goriva. Međutim, potencijalni obnovljivi izvori ponekad mogu imati kontraproduktivan učinak, gdje generator ne može biti umanjen, ali izvori obnovljive energije dodatno smanjuju opterećenje na generatoru. To može uzrokovati neočekivano povećanje potrošnje goriva. Mikro mrežni sustavi i hibridni sustavi proizvodnje energije koji također uključuju skladištenje energije mogu ublažiti ovaj problem. Takvi sustavi dostupni danas sastoje se od više odvojenih komponenata umjesto jednog, samostalnog sustava [11].

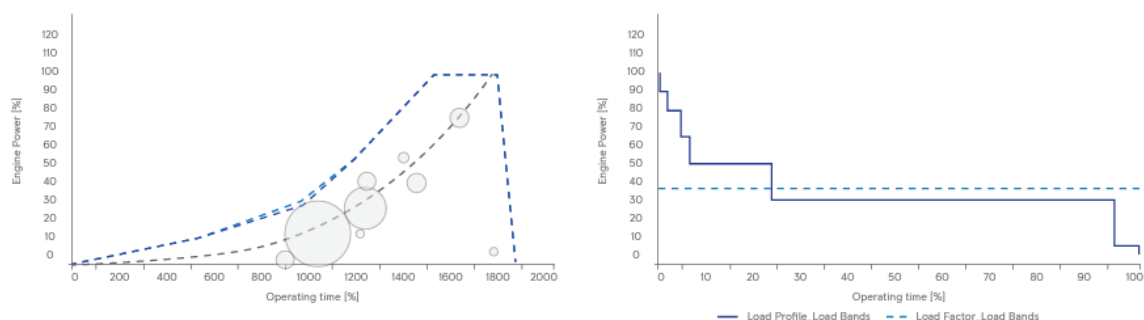


**Slika 18. Specifična potrošnja goriva generatora s fiksnom brzinom vrtnje [11]**

Konvencionalni generatori rade na fiksnoj brzini, npr., 1800 [rpm] za 60 [Hz], 1500 [rpm] za 50 [Hz], bez obzira na električnu potražnju. Rad na visokoj brzini i niskom opterećenju nije učinkovit u potrošnji goriva i može uzrokovati probleme s održavanjem kao što je mokro slaganje, kako je ranije raspravljano. Motor promjenjive brzine, međutim, može se usporiti kao odgovor na smanjenu električnu potražnju. To omogućuje motoru da radi u regijama s boljom učinkovitošću goriva i s manje problema s održavanjem [11].

Slika 19. prikazuje učinkovitost klasičnog dizel generatora u ovisnosti o radnom vremenu i profil opterećenja. Prekinuta linija na grafu učinkovitosti prikazuje idealiziranu krivulju učinkovitosti motora, dok su krugovi karakteristične točke koje predstavljaju stvarne uvjete rada motora pod različitim opterećenjima. Možemo primijetiti da učinkovitost raste s vremenom rada motora do određene točke, nakon koje počinje padati [19].

Puna linija na profilu opterećenja pokazuje stvarni profil opterećenja, dok prekinuta linija prikazuje opseg opterećenja. Iz dijagrama je vidljivo da postoji niz padova u opterećenju tijekom vremena, što ukazuje na varijacije u potražnji za energijom [19].



**Slika 19. Učinkovitost i profil opterećenja generatora s fiksnom brzinom vrtnje [19]**

Osim dizelskog motora i generatora, mora se uzeti u obzir i pretvorba električne energije kroz razne električne komponente poput pretvarača. Ispitivanje još jednog slučaja pokazalo je da su moguće prednosti u učinkovitosti do 5 % s generatorom pri djelomičnom opterećenju [18].

Sustavi s generatorima promjenjive brzine daju AC struju koja nije kontrolirana kao ona kod generatora s fiksnom brzinom vrtnje te u slučaju sustava s više jedinica ne mogu napajati zajedničku glavnu razvodnu ploču AC mreže jer bi došlo do režima rada poznatog kao „obrnuta snaga“. U tom slučaju generator koji je na manjoj frekvenciji bi počeo raditi kao električni motor i potraživao bi električnu energiju od generatora koji je u tom trenutku na višoj frekvenciji i u konačnici bi ga preopteretio, što je vidljivo iz formule koja povezuje frekvenciju mreže i brzine vrtnje.

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

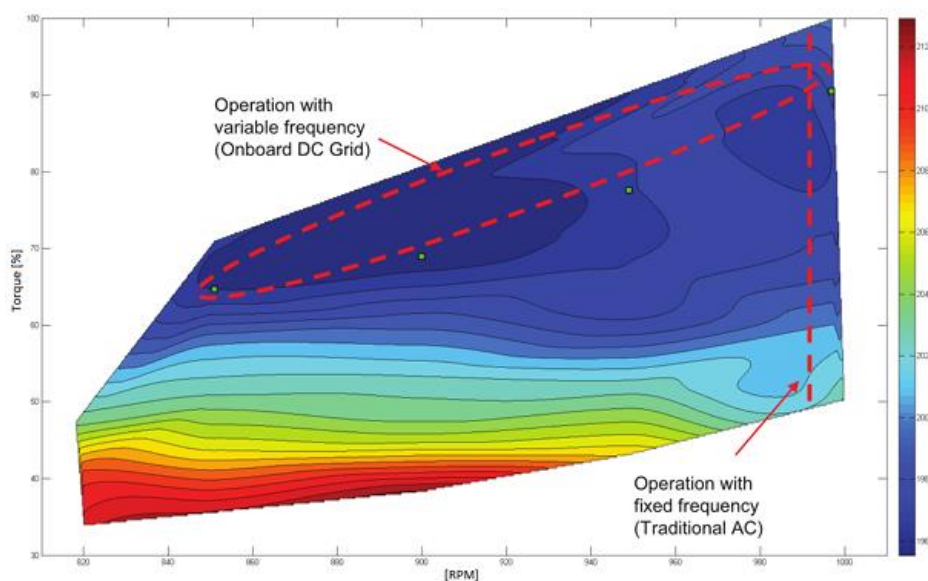
Gdje je:

- f – frekvencija,
- p – broj polova generatora,
- n – brzina vrtnje generatora [18].

Prema tome potrebno je sustav dimenzionirati u skladu s ovim karakteristikama. Slika 20. prikazuje pojednostavljenu shemu mreže s generatorima promjenjive brzine vrtnje. Problem s različitim frekvencijama jedinica pri varijabilnoj brzini vrtnje riješen je implementacijom zajedničke sabirnice istosmjernje struje.

Ugrađena DC mreža je zapravo proširenje DC veze koja se nalazi u konvencionalnim pogonima promjenjive brzine. Glavna razlika od konvencionalnog AC sustava je u tome što se električna energija dovodi od generatora preko ispravljača u zajedničku DC sabirnicu. S





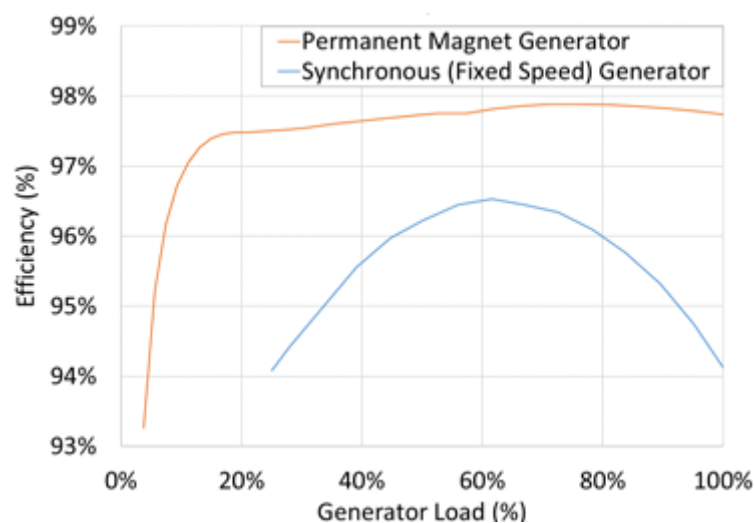
**Slika 21. Mapa potrošnje goriva generatora s varijabilnom i fiksnom brzinom vrtnje [18]**

Kako je već navedeno, dvije ključne stavke moraju se riješiti s radom promjenjive brzine. Generator povezan s motorom promjenjive brzine proizvest će "divlji" izmjenični napon s varirajućim naponom i frekvencijom. To mora biti ispravljeno i pretvoreno kako bi se proizvela upotrebljiva izmjenična struja, npr. 480 [V], 60 [Hz]. Osim toga, motori promjenjive brzine općenito pate od lošeg odziva na promjene opterećenja jer motor treba ubrzati kako bi se zadovoljila povećana potražnja za opterećenjem. Jedna metoda za rješavanje ovoga je kroz dodavanje skladišta energije čime se dobiva hibridni propulzijski sustav [11].

Dodatni problem je vrsta samog generatora. Sinkroni izmjenični generatori su norma za proizvodnju električne energije AC. Sinkroni izmjenični generatori su lako dostupni po relativno niskoj cijeni, ali učinkovitost im može varirati za nekoliko postotnih točaka kako se opterećenje mijenja. Najbolje su prilagođeni za rad s konstantnom brzinom i ne mogu se koristiti u sustavima s generatorima s varijabilnom brzinom vrtnje. Ovi strojevi su također obično hlađeni zrakom, što rezultira prilično velikim prostornim zahtjevima kako bi se osigurao dovoljan protok hladnog zraka za hlađenje [11].

Generator s trajnim magnetima PMG (engl. *Permanent magnet generator*) koristi trajne magnete umjesto uzbudnog namota za stvaranje magnetskog polja u rotoru. To

omogućuje znatno jača magnetska polja i omogućuje PMG-ovima da budu gušći u snazi od sinkronih izmjeničnih generatora. PMG-ovi su bolje prilagođeni za rad s promjenjivom brzinom i mogu postići veću, gotovo konstantnu učinkovitost kroz cijeli raspon opterećenja. PMG-ovi su također tipično hlađeni tekućinom, što dodatno smanjuje prostorne zahtjeve u usporedbi sa sinkronim strojevima. Kao takvi, PMG-ovi u kombinaciji s glavnim pogonima promjenjive brzine nude potencijal za poboljšanu učinkovitost na manjem prostoru nego što je to kod konvencionalnih generatora, kako je prikazano na Slici 22. Međutim, PMG-ovi nisu tako lako dostupni kao sinkroni izmjenični generatori i skuplji su zbog upotrebe rijetkih zemnih magneta [11].

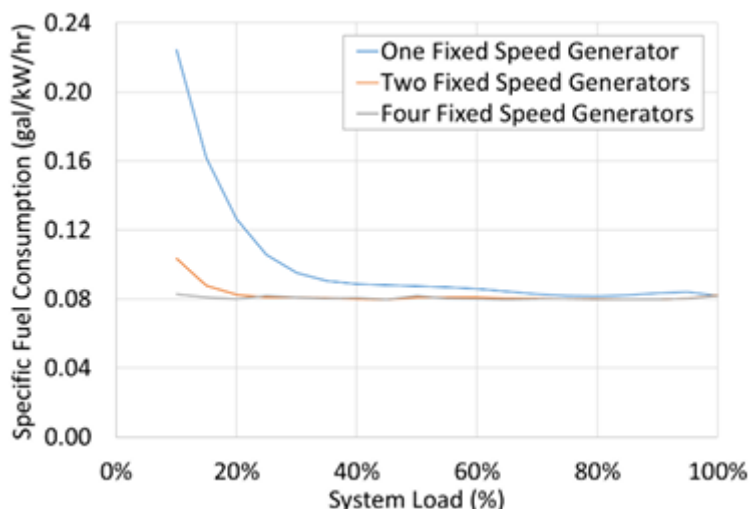


**Slika 22. Usporedba sinkronog i generatora s trajnim magnetima [11].**

Postoji još jedan način optimiziranja sustava, implementacijom više jedinica kako bi se povećao raspon rada pri optimalnom opterećenju. Uključivanje više manjih setova motora-generatora također može smanjiti potrošnju goriva i probleme s održavanjem pri nižim opterećenjima sustava. To se postiže radom samo onoliko setova motora-generatora koliko je potrebno za podršku opterećenju, čime se postavlja veće opterećenje na svaki pojedinačni motor. Arhitekture sustava u rasponu od jednog do četiri seta motora-generatora razmatrane su za hibridni energetski sustav.

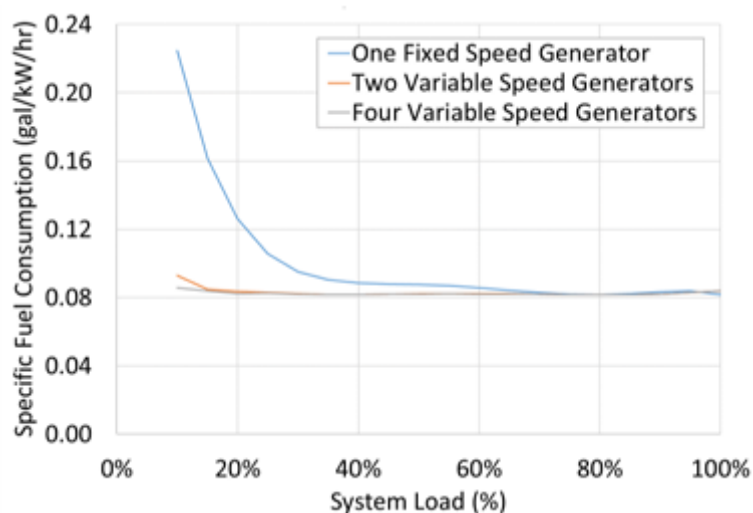
Korištenje više motora-generatora smanjuje potrošnju goriva pri nižim opterećenjima sustava. Za setove motora-generatora fiksne brzine, dva do četiri seta proizvela su gotovo konstantnu specifičnu potrošnju goriva do 20 % opterećenja. Povećanje

broja setova generatora nastavilo je poboljšavati specifičnu potrošnju goriva ispod 20 % opterećenja, kako je prikazano na Slici 23. [11].



**Slika 23. Usporedba potrošnje goriva s obzirom na broj jedinica [11]**

Kod setova motora-generatora promjenjive brzine, potrošnja goriva pri nižim opterećenjima za jednu jedinicu već je znatno poboljšana u usporedbi s motorom-generatorom fiksne brzine. Kao takav, relativno poboljšanje s povećanjem broja jedinica je smanjeno. Dva do četiri seta motora-generatora promjenjive brzine nude sličnu potrošnju goriva kroz sva opterećenja, kako je prikazano na slici 24. [11].



**Slika 24. Usporedba potrošnje goriva kod jednog generatora fiksne brzine vrtnje i setova s varijabilnom brzinom vrtnje [11]**

## 4. RAZRADA I ANALIZA PERFORMANSI HIBRIDNOG MODELA

Za ovu istraživanje kreiran je hibridni pogonski sustav za manje plovilo u virtualnom okruženju koristeći Cruise M AVL-ov softver. Cilj je procijeniti učinkovitost sustava i njegovo ponašanje u različitim scenarijima. Pogonski sustav se sastoji od dizel generatora, vodikovog gorivnog članka, baterijskog seta i električnog motora koji je izravno spojen s brodskim vijkom. Nudi pogon s nultom emisijom štetnih plinova tijekom manevriranja i boravka u luci što ga čini atraktivnom opcijom za obalnu plovidbu i česte operacije u luci. Veličina i parametri sustava prikazani su u tablici 4.

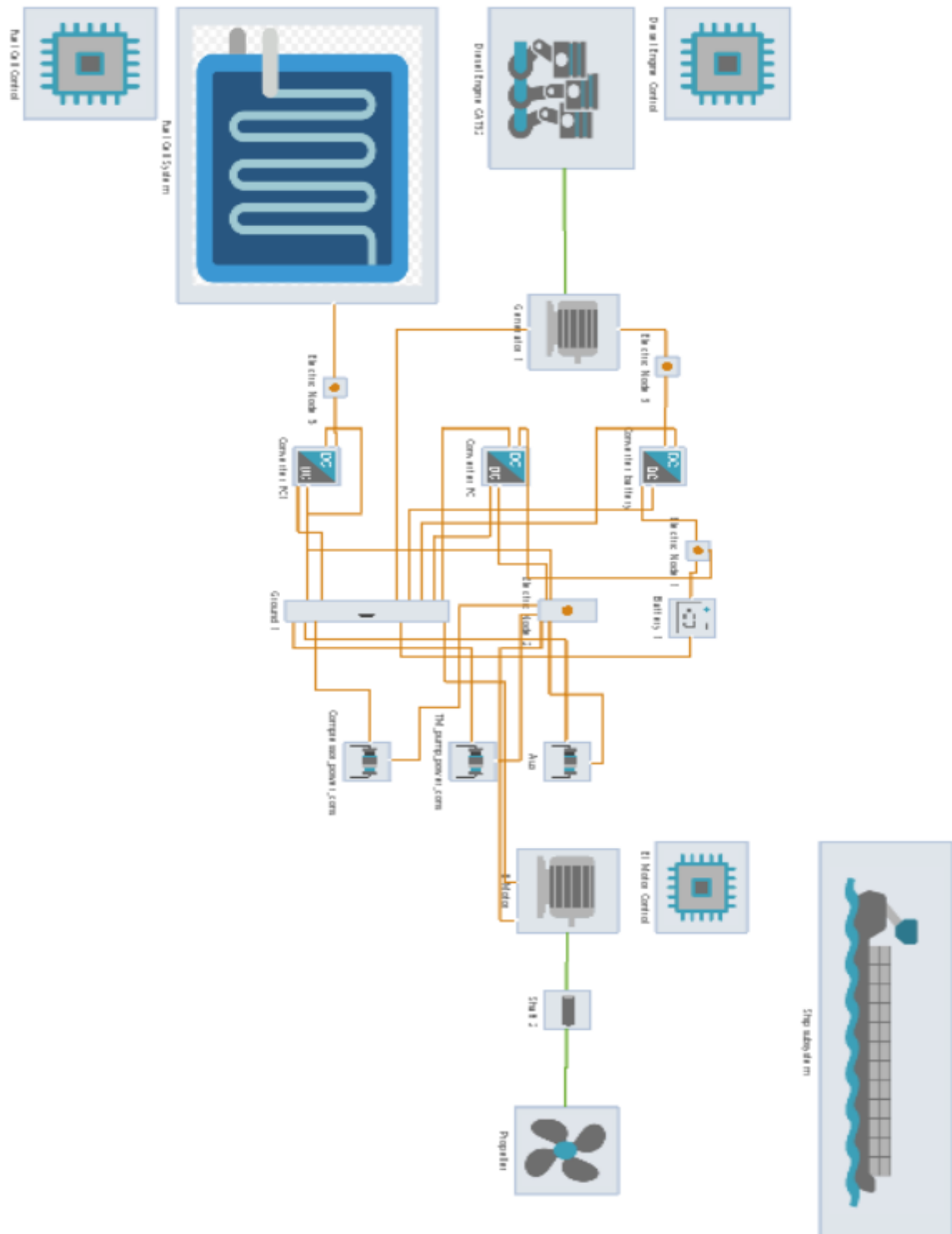
**Tablica 4. Veličina i parametri modeliranog hibridnog sustava**

Dizel motor i generator		Gorivni članak		Baterijski set		Električni motor		Veličina plovila	
Tip dizel motora	Caterpillar C32, 4 takta, prednabijen	Tip gorivnog članka	S protonskom izmjenjivačkom membranom (PEMFC)	Tip baterije	Olovni oksid	Tip električnog motora	Indukcijski	Istisnina [t]	136 t
Izlazna snaga motora/generatora [kW]	492kW @ 1800 rpm	Gorivo	Vodik	Broj ćelija	208 u seriji, 298 u paraleli	Voltaža i faze	690 V 3 faze	Maksimalna brzina [čv]	10.5 čv
Tip generatora	Sinkroni samo uzbudni	Izlazna snaga [kW]	250 kW na 100% opterećenja	Voltaža [V] i maksimalno punjenje [Ah]	680V 1200Ah	Maksimalna snaga [kW]	500kW	Snaga pomoćne opreme [kW]	15 kW
Voltaža generatora [V] i mreža	440V 60Hz, 3 faze					Maksimalna brzina [rpm]	350 rpm		

Pogonski sustav je dizajniran za maksimalnu učinkovitost s naglaskom na utjecaj na okoliš. Dok je plovilo u luci i tijekom manevriranja, tj. kada je mehaničko opterećenje na električnom motoru manje od 7 % ukupne potražnje za energijom, pomoćna potrošnja, pomoćni strojevi neophodni za gorivni članak i električni motor napajaju se iz gorivnog članka. Osim toga, uzima se u obzir dodatna energija za punjenje baterijskog seta, pri čemu je brzina punjenja u ovom slučaju približno 9 % na sat. Gorivni članak će puniti bateriju dok razina napunjenosti SoC (engl. *State of charge*) ne dosegne 80 %, nakon čega će gorivni



članak isporučivati samo potrebnu energiju za pomoćnu potrošnju i strojeve. Slika 25. prikazuje raspored pogonskog sustava.



Slika 25. Raspored hibridnog modeliranog propulzijskog sustava

Zbog različitih vrijednosti napona svake komponente, implementiran je niz pretvarača za usklađivanje izlaza generatora i gorivnog članka s nominalnim naponom električnog motora. Osim prethodno objašnjene logike rada sustava, jednom kada razina napunjenosti baterije padne na 20 % u bilo kojem trenutku, gorivni članak će se uključiti bez obzira na sve. Dok je plovilo u pokretu, kada je opterećenje na električnom motoru veće od 7 %, dizel generator će se pokrenuti i automatski doseći optimalno opterećenje od 80 %. Ostati će na 80 % sve dok je napunjenost baterije pozitivna, ako postane negativna, tj. generator pri opterećenju od 80 % više ne može dostatno napajati sustav, opterećenje generatora će se povećati na 100 %. U ovom slučaju generator pruža energiju za električni motor, pomoćnu potrošnju i puni bateriju dok je gorivni članak isključen. Generator može isporučiti maksimum od 492 [kW] pri 100 % opterećenja tako da će puniti bateriju sve dok je potražnja za energijom električnog motora i pomoćne potrošnje manja od 492 [kW]. To je slučaj za većinu profila opterećenja električnog motora budući da je njegova maksimalna snaga 500 kW. Pri punoj brzini naprijed i maksimalnoj brzini plovila, baterijskom setu treba otprilike 30 sati da padne sa 80 % na 20% napunjenosti kada bi se gorivni članak ponovno pokrenuo. Proračun potrebne porivne snage uzima u obzir masu plovila, viskoznost i gustoću mora te vučnu silu koja simulira aksijalno opterećenje na plovilo koje treba savladati. S obzirom da je ovaj hibridni propulzijski sustav namijenjen za mala plovila s čestim operacijama u luci i obalnom plovidbom ovo je izbjegnuto, ali služi kao opcija u slučaju nužde. Kada bi se generator pokvario plovilo bi i dalje bilo u stanju samostalno doći do najbliže luke.

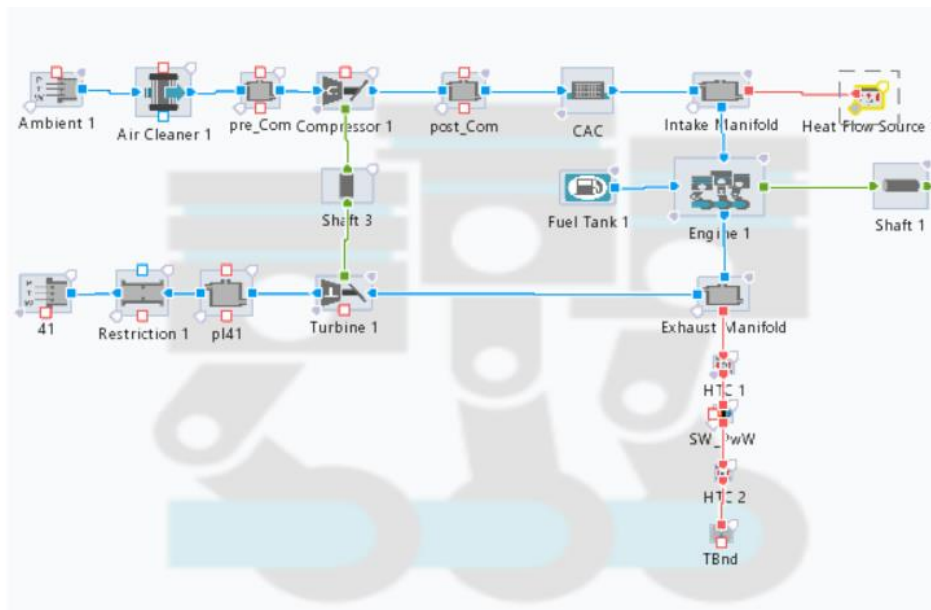
#### **4.1. KOMPONENTE MODELA**

Kako je već rečeno, ovaj model sastoji se od dizelskog motora koji pogoni generator, gorivnog članka, baterijskog seta, niza pretvarača i električnog motora koji je spojen direktno na brodski vijak. Većina ovih komponenti zahtjeva sustav kontrole kako bi sustav kao cjelina radio ispravno i efikasno. Komponente su maksimalno približene stvarnim uređajima koje simuliraju nizom parametara koji su definirani unutar modela.

##### **4.1.1. Dizelski motor**

Za potrebe pogonskog stroja generatora uzet je četverotaktni dizelski motor s prednabijanjem. Model je definiran parametrima i dimenzijama stvarnog motora Caterpillar

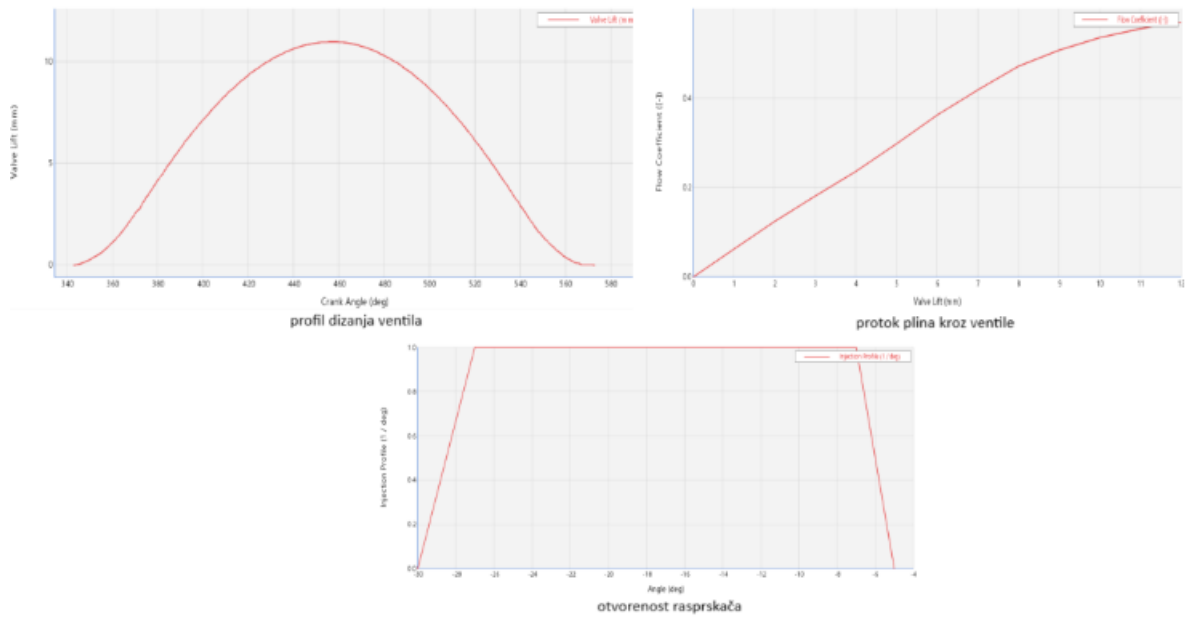
C32 te je prethodno ispitan kako bi se potvrdile vrijednosti i performanse koje odgovaraju stvarnima. Slika 26. prikazuje raspored modela motora i komponente od kojih se sastoji.



**Slika 26. Raspored i komponente modela motora**

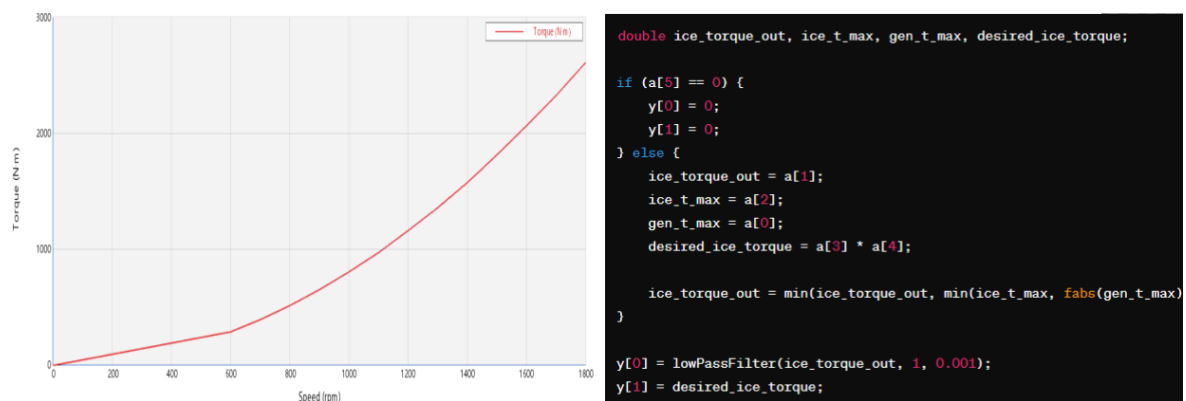
Model prikazuje pojednostavljenu shemu motora, stvarni ima 12 cilindara što je definirano unutar samog motora. Model se sastoji od usisne i ispušne grane, filtra zraka, hladnjaka zraka, kompresora, turbine i tanka goriva. Također je definiran prijenos topline u usisnoj i ispušnoj grani kako bi se model što više približio stvarnome.

Unutar modela samog motora definirani su razni parametri i veličine kao model trenja, model izgaranja u cilindru, vrsta ispiranja, geometrija cilindra motora, geometrija rasprskavača goriva, profil dizanja ispušnog i usisnog ventila, profil strujanja plina kroz usisne i ispušne ventile, vrijeme otvorenosti rasprskavača. Slika 27. prikazuje one parametre i veličine koji su definirani putem krivulja.



**Slika 27. Parametri modela motora**

AVL-ov softver omogućuje praćenje svih najbitnijih parametara tijekom rada motora kao što su specifična potrošnja goriva, izlazna snaga, potrošnja goriva, brzina vrtnje, a koji će biti prikazani kasnije u radu. Softver također omogućuje kreiranje mapa za karakterizaciju parametara i međusobnu ovisnost, integraciju PID regulatora i definiranje funkcija u C++ programskom jeziku. Pomoću ovih komponenti realizirana je i kontrola samog motora. Motor radi pri približno konstantnom broju okretaja a radi u rasponu momenta prema njegovim karakteristikama i potrebi generatora. Slika 28. prikazuje elemente sustava kontrole motora.



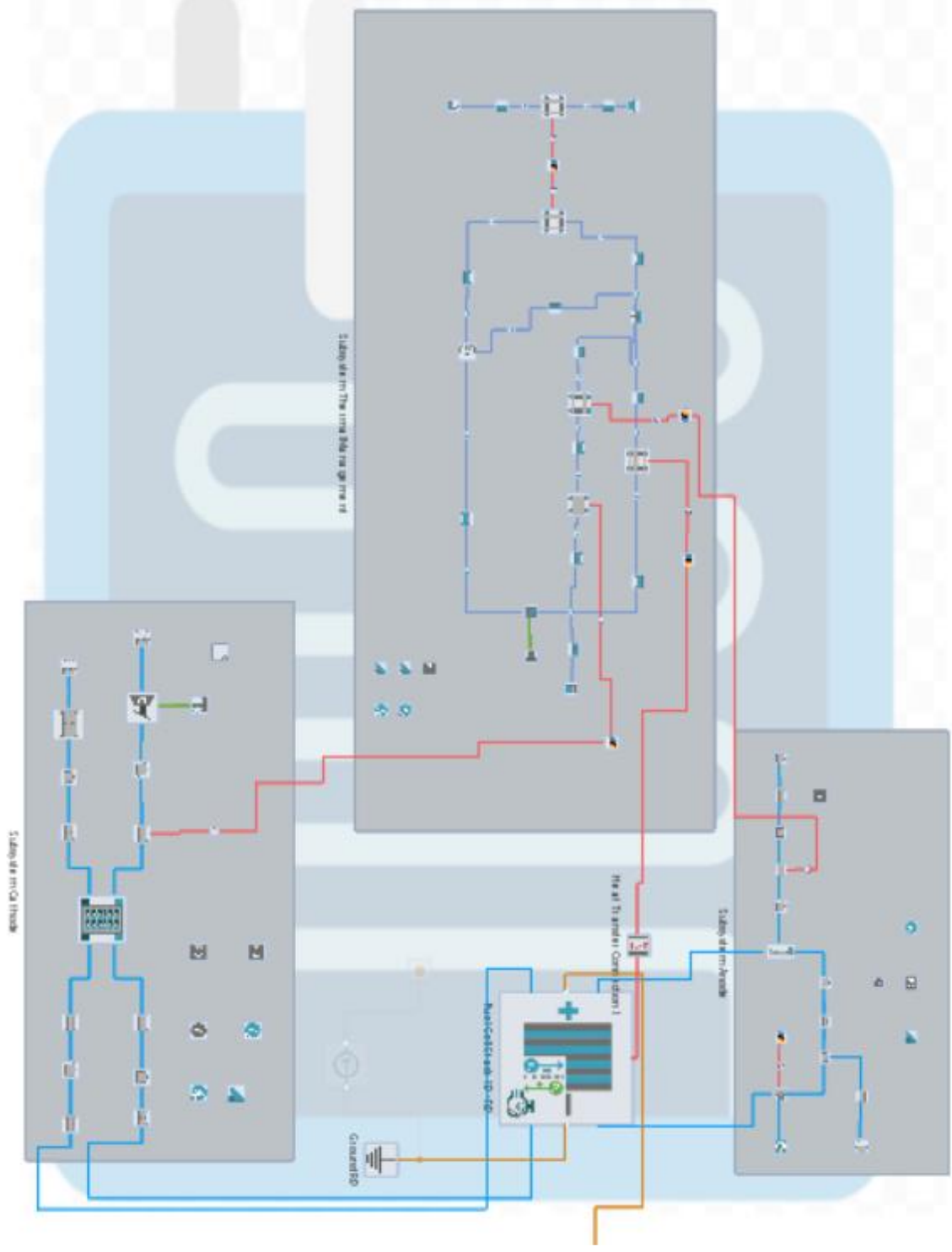
**Slika 28. Elementi sustava kontrole motora**

Krivulja prikazuje ovisnost momenta motora o brzini vrtnje. Brzina je promjenjiva iako motor u sustavu radi pri približno konstantnoj brzini vrtnje. To je postignuto funkcijom

koja je prikazana na slici. Moment generatora ograničen je maksimalnim momentima samog motora i generatora, te prati zahtjev generatora. Kontinuirana kontrola momenta realizirana je PID regulatorom.

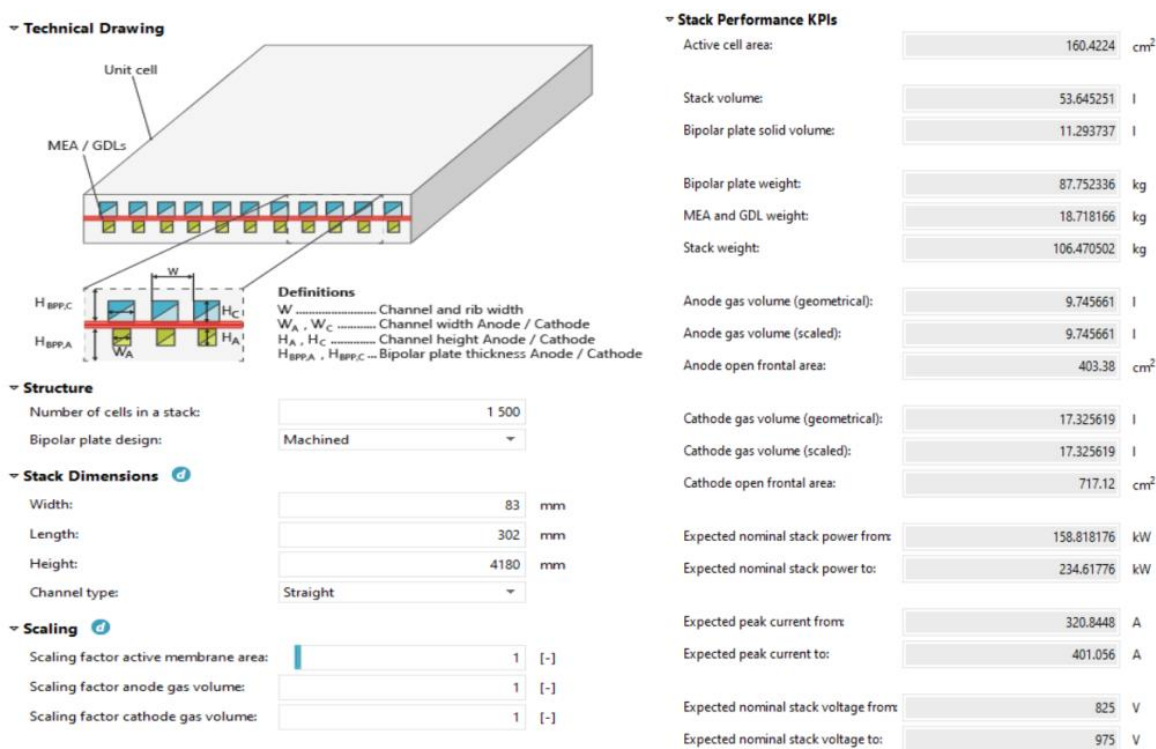
#### **4.1.2. Gorivni članak**

Gorivni članak modeliran je kao tip PEMFC tip sa sustavom hlađenja te podsustavima anode i katode. Pogonsko gorivo je vodik. Podsustavi anode i katode imaju svoje sustave kontrole koji su definirani PID regulatorima, a koji osiguravaju pravilan protok vodika i kisika. Sustav hlađenja, s obzirom da se radi o tipu gorivnog članka koji spada u nisko temperaturne vrste, održava temperaturu na 65 °C. Kao rashladno sredstvo koristi se glikol zbog svog velikog specifičnog toplinskog kapaciteta i pogodnosti za zatvorene sustave hlađenja. Slika 29. prikazuje raspored modela gorivnog članka s pripadajućim podsustavima.



Slika 29. Raspored modela gorivnog članka

Sami model gorivnog članka definiran je geometrijom koja određuje dimenzije gorivnog članka, izlaznu snagu, napon, struju. Prema ovim parametrima modelirani su sustav hlađenja i podsustavi anode i katode. Kako je prikazano u tablici 4. gorivni članak daje oko 250 [kW] izlazne snage što je definirano prema potrebama cijelog sustava. Slika 30. prikazuje geometriju gorivnog članka i dobivene vrijednosti izlazne snage, napona i struje.



Slika 30. Geometrija gorivnog članka

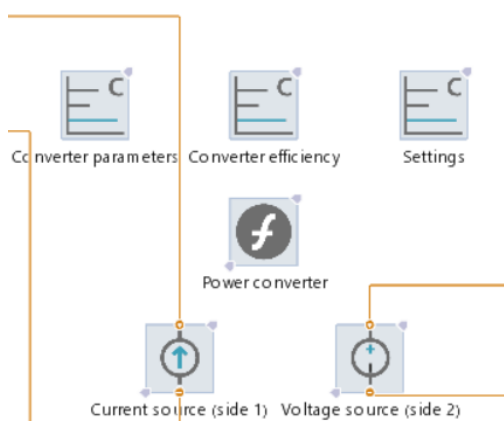
#### 4.1.3. Pretvarači

Niz pretvarača nužan je u ovom modelu zbog različitih nazivnih napona izvora i trošila električne energije i zbog različitih vrsta električne energije. Generator daje AC struju, električni motor konzumira AC struju dok gorivni članak daje DC struju i baterijski set skladišti DC struju. Softver nudi rješenje pretvarača funkcijom kojom su povezane obje strane i koja izlaznu stranu pretvarača postavlja prema trošilu ili komponenti s kojom je spojena. Slika 31. prikazuje raspored pretvarača. Ulazna komponenta je struja izvora a izlazna komponenta je napon trošila ili komponente s kojom je spojen. Učinkovitost pretvarača iznosi 93 % što je približno stvarnim pretvaračima. U postavkama pretvarača može se definirati da li je pretvarač jednosmjernan ili dvosmjernan, u ovom modelu sva tri su jednosmjerna. Funkcija snaga pretvarača definira na koji način će se napon pretvarati na

izlaznoj strani a povezuje ga s potrebama trošila ili komponente s kojom je spojen. Funkcija također definira slučajeve u kojima pretvarač ne može ispravno realizirati izlazni signal kao što su:

- "Traženi napon na strani 2 veći je od danog maksimalnog napona na strani 2."
- "Traženi napon na strani 2 manji je od danog minimalnog napona na strani 2."
- "Stvarna struja na strani 2 veća je od dane nominalne struje na strani 2."
- "Stvarna snaga na strani 2 veća je od dane nominalne snage na strani 2."
- "Stvarni napon na strani 1 veći je od danog maksimalnog napona na strani 1."
- "Stvarni napon na strani 1 manji je od danog minimalnog napona na strani 1."
- "Stvarna struja na strani 1 veća je od dane nominalne struje na strani 1."

Ovim postavkama izbjegavaju se neželjene situacije gdje izvor ne dobiva dovoljno ili dobiva previše snage, gdje je previše strujno opterećen ili je napon ispod ili preko nazivne vrijednosti.



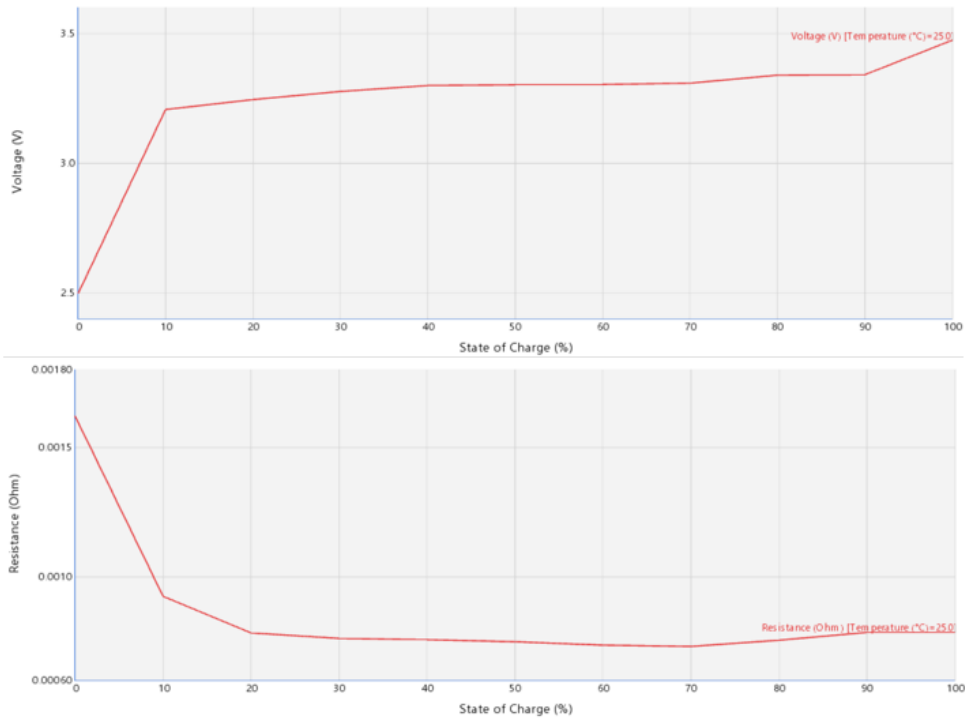
**Slika 31. Raspored pretvarača korištenih u modelu**

#### 4.1.4. Baterijski set

Softver pruža modeliranje baterijskog seta kao ekvivalentnog modela baterije gdje definiranjem broja ćelija u seriji i paraleli daje nazivni napon seta, a samo ponašanje baterije prilikom punjenja i pražnjenja definirano je kapacitetom baterije u [Ah] i krivuljama koje definiraju napon pojedine ćelije s obzirom na SoC baterije i otpor pojedine ćelije s obzirom na SoC. U ovom modelu postavljeno je 208 ćelija serijski i 298 ćelija paralelno s varijacijom napona svake ćelije 2.5 – 3.5 [V] te kapacitetom svake ćelije od 4 [Ah] što odgovara



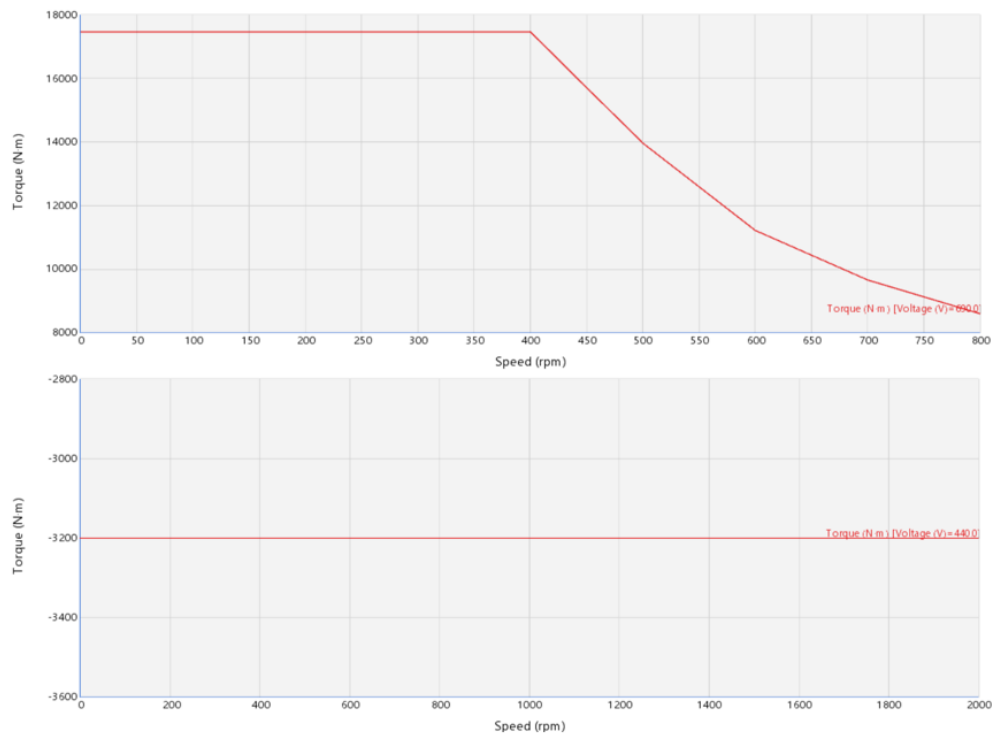
klasičnoj bateriji s olovnim oksidom. Slika 32. prikazuje krivulje napona i otpora s obzirom na napunjenost baterije.



**Slika 32. Krivulja napona i otpora baterijskog seta**

#### 4.1.5. Generator i električni motor

Softver nudi komponentu definiranu kao električni stroj, unutar komponente potrebno je definirati kvadrante rada stroja na osnovu kojih će se stroj ponašati kao motor ili generator. U ovom modelu električni motor definiran je maksimalnim momentom u prvom kvadrantu gdje je moment pozitivan odnosno motor potražuje električnu energiju i proizvodi moment. Generator je definiran u četvrtom kvadrantu gdje je maksimalni moment negativan odnosno zahtjeva moment i proizvodi električnu energiju. Slika 33. prikazuje krivulje maksimalnog momenta za električni motor i generator u modelu.



**Slika 33. Krivulje maksimalnog momenta električnog motora i generatora**

Električni motor sadrži osobinu držanja konstantnog momenta na malim okretajima dok to kod generatora nije bitno jer u ovom modelu radi na približno 1800 [rpm]. Osim maksimalnog momenta, i generatoru i električnom motoru potrebno je definirati učinkovitost na različitim brojevima okretaja za cijeli raspon momenta. Vrijednosti korištene u modelu maksimalno su približene stvarnim uređajima pa je srednja učinkovitost električnog motora 93 – 94 % a generatora 91 – 92 %.

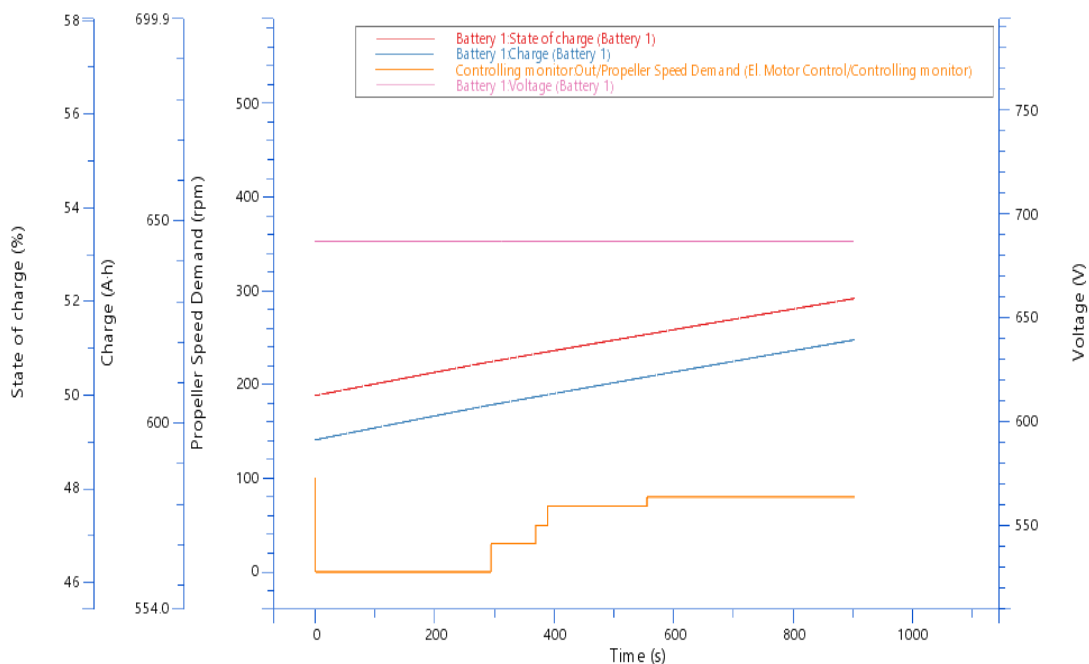
#### **4.2. SIMULACIJA MODELA U RAZNIM PROFILIMA RADA**

Serijska simulacija provedena je za različite profile opterećenja kako bi se pokazalo ponašanje sustava za svaki od njih. Predstavljeni su najznačajniji parametri za analizu učinkovitosti. Prvi profil opterećenja predstavlja operacije u luci i manevriranje s opterećenjem na električnom motoru ispod 7%, kada gorivni članak opskrbljuje sustav pogona potrebnom snagom. Profil opterećenja traje 15 minuta. Drugi profil opterećenja prikazuje ponašanje sustava tijekom plovidbe, postupno povećavajući opterećenje na električnom motoru dok se ne postigne maksimalna brzina plovila. Ovaj profil opterećenja traje 40 minuta. Važno je napomenuti da softver AVL Cruise M omogućuje modeliranje samo aksijalnog otpora, stoga se to uzima u obzir samo u obliku vučne sile koju električni

motor treba prevladati zajedno s masom plovila. Radikalne sile i otpor na trupu plovila se zanemaruju. Tokom ubrzavanja potrebno je savladati masu plovila i vučnu silu koja predstavlja otpor, kada se dosegne maksimalna brzina vučna sila ostaje iste veličine.

#### 4.2.1. Prvi profil opterećenja – rad u luci i manevriranje

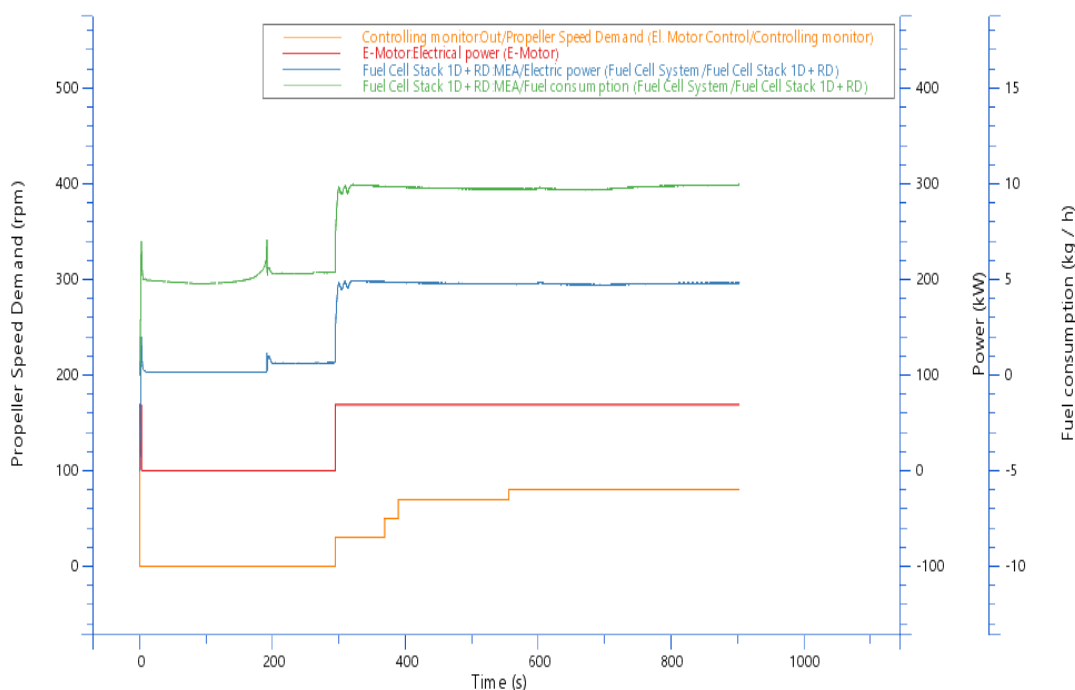
Slika 34. prikazuje stanje baterije tijekom prvog profila opterećenja, operacija u luci i manevriranja. Početno stanje je 50% SoC za bateriju, a brzina brodskog vijka je 0. Prvih 5 minuta profila, brod je uz obalu, zahtjev za brzinom brodskog vijka je nula. Gorivni članak osigurava energiju za punjenje baterije, pomoćnu potrošnju i strojeve. Brzina punjenja je otprilike 9% po satu. Od 5. minute do kraja profila, postupno se povećava zahtjev za brzinom brodskog vijka, odvija se manevriranje. Napunjenost baterije se nije promijenila, a gorivni članak sada također osigurava energiju za električni motor. Napon baterije je stabilan na 690 [V].



**Slika 34. Stanje baterije tokom prvog profila opterećenja**

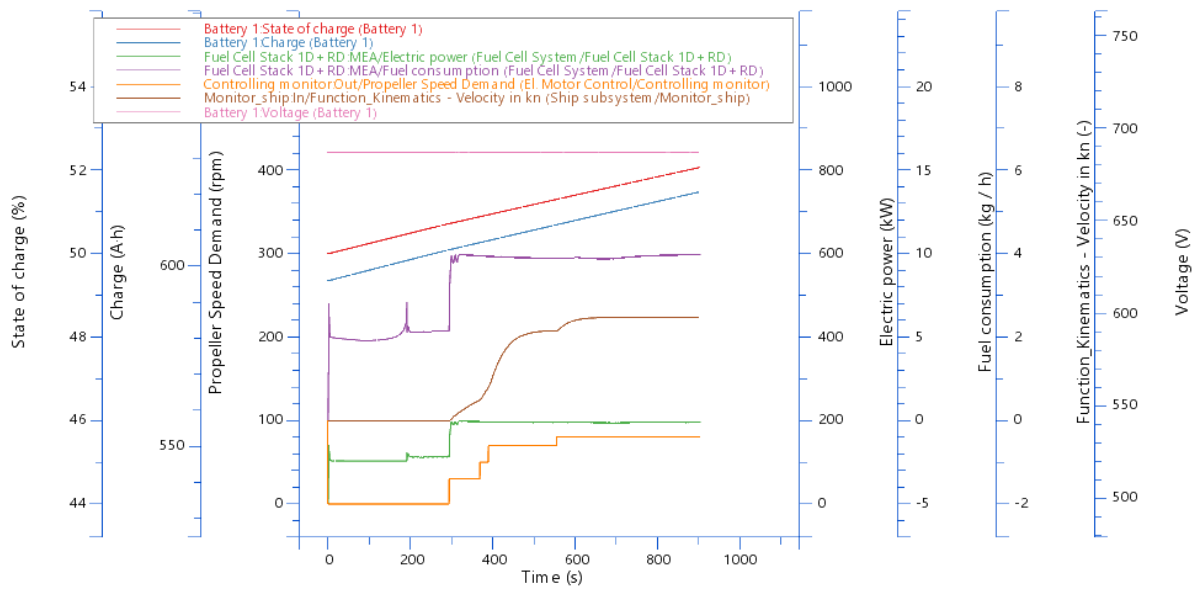
Slika 35. prikazuje parametre gorivnog članka i električnog motora za isti profil opterećenja. Dok je zahtjev za brzinom brodskog vijka 0, gorivni članak osigurava energiju za punjenje baterije, pomoćnu potrošnju i strojeve. Izlazna snaga gorivnog članka je nešto iznad 100 [kW], a potrošnja vodika je oko 5 [kg/h]. Kada se poveća zahtjev za brzinom brodskog vijka, izlazna snaga gorivnog članka ide na oko 200 [kW], a potrošnja goriva na

nešto iznad 10 [kg/h]. Vidljivo je da kada električni motor zahtijeva energiju, izlazna snaga gorivnog članka proporcionalno raste, ne mijenjajući količinu energije za bateriju i pomoćne potrošače. Budući da se vodik koristi kao primarno gorivo za gorivni članak, štetne emisije ispušnih plinova kao što su SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> su nula za ovaj profil opterećenja, i brod je potpuno neovisan tijekom operacija u luci. Jednom kada SoC baterije dostigne 80%, gorivni članak će smanjiti izlaznu snagu i nastaviti opskrbljivati električni motor i pomoćnu potrošnju i strojeve.



**Slika 35. Parametri gorivnog članka i električnog motora tokom prvog profila**

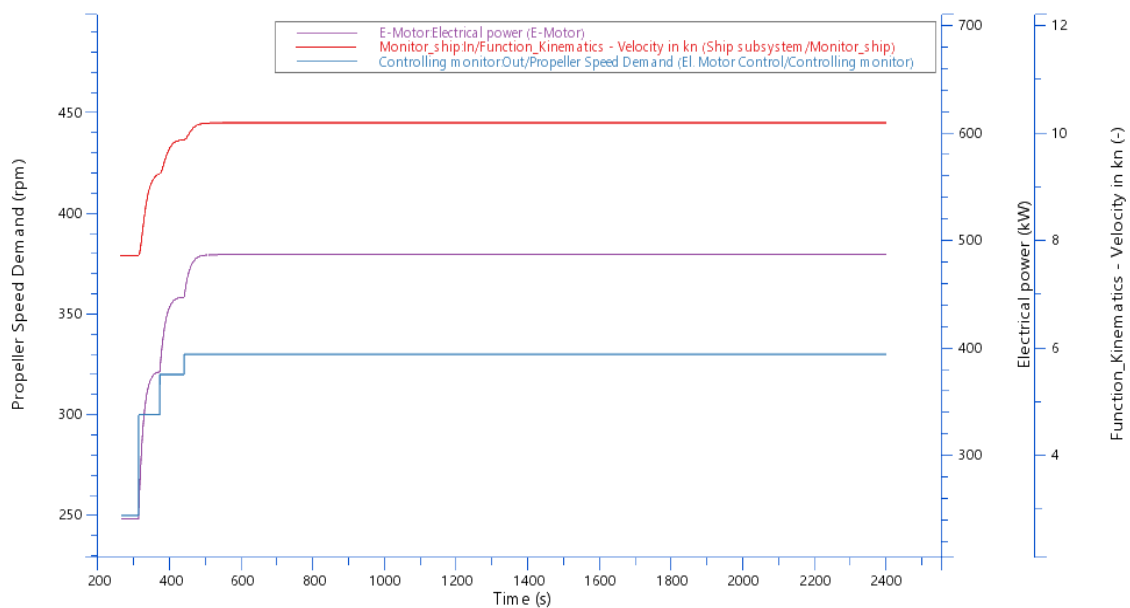
Kako je spomenuto ranije, u slučaju otkazivanja generatora koji je primarni izvor energije tokom navigacije, brod i dalje može doći do najbliže luke za potrebe popravaka. Slika 36. prikazuje, uz već objašnjene parametre, i brzinu broda u čvorovima koju brod može postići tokom napajanja samo preko gorivnog članka, a iznosi nešto manje od 3 čvora.



**Slika 36. Brzina broda tokom manevriranja**

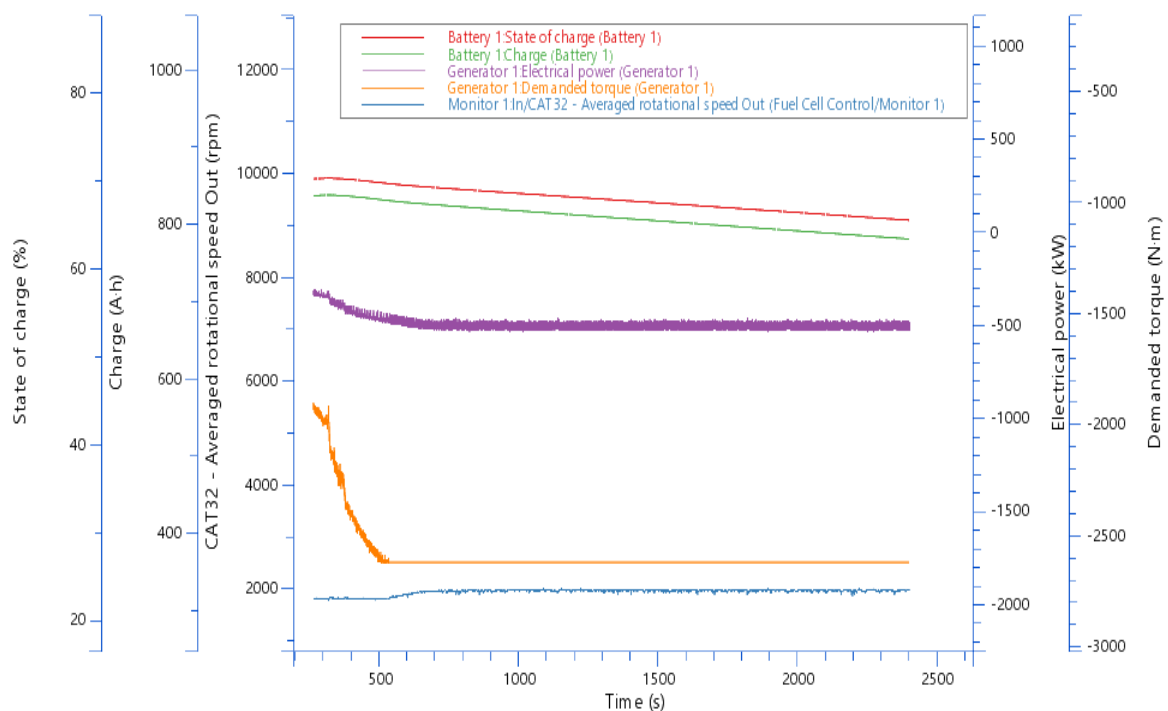
#### 4.2.2. Drugi profil opterećenja – navigacija

Drugi profil opterećenja pruža uvid u parametre tijekom navigacije. Slika 37. pokazuje performanse broda dok se postupno povećava opterećenje na električnom motoru dok se ne postigne maksimalna brzina. Vidljivo je da je brzina broda 10,5 čvorova, snaga električnog motora je nešto ispod 500 kW, a zahtijevana brzina broskog vijka je 350 okretaja u minuti. Postignuto je maksimalno opterećenje sustava i maksimalna brzina broda.



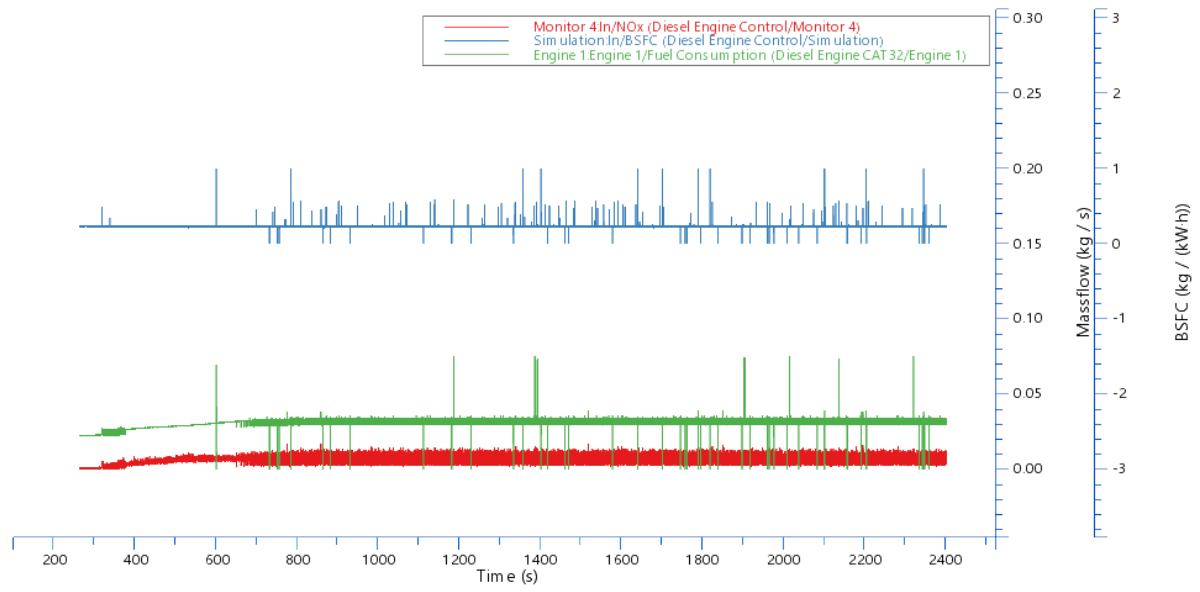
**Slika 37. Performanse broda tokom navigacije**

Dodatno, performanse generatora s parametrima baterije prikazane su na Slici 38. CAT32 dizelski motor održava gotovo konstantnu brzinu od 1800 [rpm]. Generator postupno povećava svoju izlaznu snagu dok ne dostigne maksimum. Moment proporcionalno prati. SoC baterije i punjenje se polako smanjuju, kako je ranije objašnjeno, budući da generator mora osigurati energiju za električni motor i pomoćne potrošače, kada se postigne maksimalna brzina, potražnja za energijom je nešto veća nego što generator može isporučiti. Gubici u pretvorbi energije također se uzimaju u obzir, pa generator mora pokriti i njih. Ovo stanje je održivo 30 sati kada bi SoC baterije pao s 80% na 20% i pokrenuo bi se gorivni članak.



**Slika 38. Performanse generatora tokom navigacije**

Konačno, Slika 39. prikazuje performanse dizelskog motora tijekom drugog profila opterećenja. Prikazani su specifična potrošnja goriva, emisija NOx i potrošnja goriva. Budući da motor radi na konstantnoj brzini, ove vrijednosti su više-manje konstantne za cijeli profil opterećenja. Ova karakteristika sklopova dizelskih generatora čini ih nepovoljnima za uvjete niskog opterećenja jer nije optimalno i emisije ispušnih plinova su visoke tijekom boravka u luci i manevriranja. Iz tog razloga, ovaj hibridni propulzijski sustav nudi optimalne uvjete rada, tj. samo profil visokog opterećenja za sklop dizelskog generatora.



**Slika 39. Performanse motora tijekom drugog profila opterećenja**

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su se istražile mogućnosti primjene različitih tehnoloških rješenja u brodskim hibridnim energetske sustavima. Izvršila se analiza performansi hibridnog pogonskog sustava za manja plovila, koristeći se AVL-ovim Cruise M softverom. Fokus rada je na smanjenju emisija štetnih plinova i optimizaciji iskorištavanja izvora energije. Hibridni energetski sustavi kombiniraju različite tehnologije za proizvodnju i skladištenje energije, kao što su dizelski generatori, vodikovi gorivni članci, baterijski setovi i električni motori, te predstavljaju održivo rješenje u odgovoru na globalne klimatske promjene i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima.

Analiza pokazuje da hibridni sustavi nude značajne prednosti u pogledu efikasnosti, smanjenja emisija štetnih plinova, sigurnosti i pouzdanosti opskrbe energijom, te omogućavaju energetske neovisnost i dugoročno smanjenje troškova energije. Ključ razvoja hibridnih energetske sustava leži u napredovanju tehnologija skladištenja energije, poput baterija i sustava za opskrbu energijom pomoću vodika, koji omogućavaju bolje upravljanje proizvodnjom energije i povećavaju efikasnost i pouzdanost sustava.

Suvremeni trendovi uključuju integraciju različitih tehnologija skladištenja energije kako bi se iskoristile njihove komplementarne karakteristike. Ovaj pristup ne samo da povećava efikasnost i pouzdanost sustava, već i produljuje vijek trajanja komponenti.

U radu se također detaljno razmatraju komponente i konfiguracije hibridnih propulzijskih sustava, uključujući paralelne, serijske i kombinirane (serijsko-paralelne) konfiguracije, te njihova primjena u različitim operativnim profilima plovila. Posebna pažnja posvećena je dizel-električnoj propulziji kao jednoj od alternativa konvencionalnim sustavima, s obzirom na njene prednosti u smanjenju potrošnje goriva, emisija štetnih plinova, troškova održavanja, te poboljšanja upravljivosti i pouzdanosti.

Električni motori, gorivni članci i baterije ključni su elementi hibridnih propulzijskih sustava, svaki donoseći svoje prednosti u pogledu učinkovitosti, gustoće snage, operativnog života i primjene. Diplomski rad ističe važnost električnih i hibridnih električnih propulzijskih sustava kao održivih rješenja za upravljanje emisijama CO<sub>2</sub> u pomorskom prijevozu.

Model hibridnog propulzijskog sustava napravljen je u virtualnom okruženju sastavljen od dizelskog motora, generatora, gorivnog članka, baterijskog seta i električnog motora koji pogoni plovilo. Komponente modela i način rada modela detaljno su razrađeni.



Model je testiran u tri različita profila opterećenja, operacije u luci, manevriranje plovilom i navigacija pri punom opterećenju sustava. Rezultatima se prikazalo kako sustav emitira 0% emisija štetnih plinova tijekom boravka u luci te da je potpuno neovisan o električnoj energiji s kopna. Tokom manevriranja, što podrazumijeva obalno područje i uske kanale, sustav također emitira 0 % emisija štetnih plinova zahvaljujući gorivnom članku. Tijekom navigacije prikazane su performanse dizelskog motora i generatora kao i performanse samog broda. Iz rezultata je vidljivo kako brod postiže brzinu od 10.5 čvorova. Model se pokazao prikladnim za manja plovila s čestim boravcima u luci i manevriranjem kada je u pogledu okoliša maksimalno efikasan. Model u usporedbi s čistim dizelskim propulzijskim sustavom iste veličine pokazuje znatnu uštedu fosilnih goriva, manje emisije štetnih plinova jer ih pri malim opterećenjima uopće nema, te veću fleksibilnost zbog paralelne konfiguracije.

## LITERATURA

- [1] Ahmed, G. E.; Massimo, R.; Eleonora, G.; Loredana, M.: *Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives*, Processes 2023, 11(1), 97; <https://doi.org/10.3390/pr11010097>
- [2] Almonacid, F.: *Diesel-electric Drives Diesel-electric Propulsion Plants A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion system*, [https://www.academia.edu/26078783/Diesel\\_electric\\_Drives\\_Diesel\\_electric\\_Propulsion\\_Plants\\_A\\_brief\\_guideline\\_how\\_to\\_engineer\\_a\\_diesel\\_electric\\_propulsion\\_system](https://www.academia.edu/26078783/Diesel_electric_Drives_Diesel_electric_Propulsion_Plants_A_brief_guideline_how_to_engineer_a_diesel_electric_propulsion_system) (pristupljeno 03.02.2024.)
- [3] Bassham, B. A.: *An evaluation of electric motors for ship propulsion*, 2003-06, Calhoun: The NPS Institutional Archive, <http://hdl.handle.net/10945/1029>
- [4] Biert, L.; Godjevac, M.; Visser, K.: *A review of fuel cell systems for maritime applications*, Journal of Power Sources, Volume 327, 30 September 2016, Pages 345-364, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- [5] Dorin, O. N.: *Switching Power Converters, medium and high power*, 2nd edition, 2014, Taylor & Francis group, 6000 broken sound Parkway, NW, suite 300, Boca Raton, FL 33487 – 2742
- [6] D. Park, F. Perabo, M. Choi, E. Skjong and M. Zadeh, "An Optimal Energy Management System for Marine Hybrid Power Systems," *2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL)*, Cartagena, Colombia, 2021, pp. 1-8, DOI: 10.1109/COMPEL52922.2021.9645951.
- [7] Elakafas, G. A.; Shouman, R. M.: *A Study of the Performance of Ship Diesel-Electric Propulsion Systems Froman Environmental, Energy Efficiency, and Economic Perspective*, Marine Technology Society Journal. Volume: 56. Issue: 1. 2022, DOI: 10.4031/MTSJ.56.1.3
- [8] Hiroyasu, K.; Mehdi, K. Z.: *Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption*, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/54/4/54\\_576/pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/54/4/54_576/pdf/-char/en) (pristupljeno 05.02.2024.)
- [9] Hyeon, M. J.; Seong, W. K.; Jong, S. K.: *Comparative analysis for selection of electric propulsion motors for small-sized ships with DC distribution*, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42, No. 10, pp. 836~842, 2018 J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME) <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.10.836>

- [10] Inal, B. O.; Charpentier, J. F.; Deniz, C.: *Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 156, March 2022, 111965, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
- [11] Kersey, J.; Michael, S.; Guy, B.; Travis, J.: *Hybrid Power Generation for Improved Fuel Efficiency and Performance*, Czero, Inc., Fort Collins, CO, USA, [https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2018/08/2017\\_EESAT\\_Proceeding\\_Kersey.pdf](https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2018/08/2017_EESAT_Proceeding_Kersey.pdf) (pristupljeno 06.02.2024.)
- [12] Mukund, R. P.: *Shipboard propulsion, power electronics, and ocean energy*, 2012, Taylor & Francis group, 6000 broken sound Parkway, NW, suite 300, Boca Raton, FL 33487 – 2742
- [13] Pamik, M.; Nuran, M.: (2020). *Increasing ship energy efficiency with diesel-electric propulsion system*, World Journal of Environmental Research, 10. 50-60. 10.18844/wjer.v10i2.5345.
- [14] Roslan, B. S.; Konovessis, D.; Tay, Z. Y.: *Sustainable Hybrid Marine Power Systems for Power Management Optimisation: A Review*, Energies 2022,15(24), 9622; <https://doi.org/10.3390/en15249622> (pristupljeno 08.02.2024.)
- [15] Saurabh, S.: A Review on Power Electronics and Drives in Electric Propulsion System, 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 937 012050
- [16] Thanikanti, B. S.; Vasudevan, K. R.: A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects, August 2020 PP(99):1-1, CC BY 4.0, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3015919
- [17] Yupeng, Y.; Jixiang, W.; Xinping, Y.; Boyang, S.: *A review of multi-energy hybrid power system for ships*, <https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/84018af3-a707-47b4-903d-d6ec90d8931c/content> (pristupljeno 05.02.2024.)
- [18] Øyvind, R. G.: *Modeling of Hybrid Marine Electric Propulsion Systems*, IMT Department of Marine Technology, 2014 Norwegian University of Science and Technology, [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/238867/736813\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/238867/736813_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (pristupljeno 10.02.2024.)
- [19] <https://www.mtu-solutions.com/cn/en/technical-articles/2020/variable-speed-generator-sets-offer-advantages-for-commercial-sh.html> ( pristupljeno 10.02.2024.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Emisija štetnih plinova za dizel električnu propulziju i konvencionalni pogon [7].	2
Slika 2. Paralelna konfiguracija propulzijskog sustava [17] .....	4
Slika 3. Serijska konfiguracija propulzijskog sustava [17] .....	5
Slika 4. Kombinirana konfiguracija propulzijskog sustava [17] .....	6
Slika 5. Specifična potrošnja goriva generatora s konstantnom brzinom vrtnje [13].....	8
Slika 6. Raspodjela gubitaka u dizel električnoj propulziji [2] .....	9
Slika 7. Izvedbe dizel električne propulzije s mrežom izmjenične struje i učinkovitost [8]	10
Slika 8. Izvedbe dizel električne propulzije s mrežom istosmjerne struje i učinkovitost [8] .....	11
Slika 9. Klasifikacija pretvarača snage prema namjeni [15] .....	13
Slika 10. Pretvarač s naponskom stezaljkom [15] .....	16
Slika 11. Izolirani pretvarač napona [15] .....	17
Slika 12. Osnovni princip rada gorivnog članka [1].....	20
Slika 13. Gravimetrijska i volumetrijska gustoća goriva za gorivne članke [4].....	24
Slika 14. Karakteristika elektrokemijskih energetske uređaja [18].....	24
Slika 15. Osnovne komponente baterije [18] .....	26
Slika 16. Krivulja punjenja i pražnjenja baterije [18] .....	26
Slika 17. Gustoća snage i energije za različite tipove baterija [18].....	27
Slika 18. Specifična potrošnja goriva generatora s fiksnom brzinom vrtnje [11] .....	29
Slika 19. Učinkovitost i profil opterećenja generatora s fiksnom brzinom vrtnje [19] .....	30
Slika 20. Propulzijski sustav s generatorima promjenjive brzine vrtnje [18].....	31
Slika 21. Mapa potrošnje goriva generatora s varijabilnom i fiksnom brzinom vrtnje [18]	32
Slika 22. Usporedba sinkronog i generatora s trajnim magnetima [11]. .....	33
Slika 23. Usporedba potrošnje goriva s obzirom na broj jedinica [11] .....	34
Slika 24. Usporedba potrošnje goriva kod jednog generatora fiksne brzine vrtnje i setova s varijabilnom brzinom vrtnje [11] .....	34
Slika 25. Raspored hibridnog modeliranog propulzijskog sustava .....	36
Slika 26. Raspored i komponente modela motora .....	38
Slika 27. Parametri modela motora .....	39
Slika 28. Elementi sustava kontrole motora .....	39
Slika 29. Raspored modela gorivnog članka .....	41

Slika 30. Geometrija gorivnog članka .....	42
Slika 31. Raspored pretvarača korištenih u modelu .....	43
Slika 32. Krivulja napona i otpora baterijskog seta.....	44
Slika 33. Krivulje maksimalnog momenta električnog motora i generatora.....	45
Slika 34. Stanje baterije tokom prvog profila opterećenja .....	46
Slika 35. Parametri gorivnog članka i električnog motora tokom prvog profila.....	47
Slika 36. Brzina broda tokom manevriranja.....	48
Slika 37. Performanse broda tokom navigacije .....	48
Slika 38. Performanse generatora tokom navigacije .....	49
Slika 39. Performanse motora tijekom drugog profila opterećenja.....	50

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba kontrola sustava s izmjeničnom i istosmjernom strujom [14].....	11
Tablica 2. Karakteristike električnih motora korištenih u hibridnim propulzijskim sustavima [15]. .....	19
Tablica 3. Tehnologije i karakteristike gorivnih članaka [1].....	21
Tablica 4. Veličina i parametri modeliranog hibridnog sustava.....	35

## POPIS KRATICA

NO <sub>x</sub> (engl. <i>Nyrogen oxides</i> )	Dušikovi oksidi
ESS (engl. <i>Energy storage system</i> )	Sustav skladištenja energije
CO <sub>2</sub> (engl. <i>Carbon dioxide</i> )	Ugljični dioksid
EMS (engl. <i>Energy management system</i> )	Sustav upravljanja energijom
IMO (engl. <i>International maritime organization</i> )	Međunarodna pomorska organizacija
AC (engl. <i>Alternating current</i> )	Izmjenična struja
DC (engl. <i>Direct current</i> )	Istosmjerna struja
VFD (engl. <i>Varibale frequency drive</i> )	Pretvarač frekvencije
VSI (engl. <i>Voltage soruce inverter</i> )	Pretvarač napona
CSI (engl. <i>Current source inverter</i> )	Pretvarač struje
SCR (engl. <i>Silicon Controlled Rectifier</i> )	Diodni most
PWM (engl. <i>Pulse width modulation</i> )	Modulator pulsa
EMI (engl. <i>Electromagnetic interference</i> ).	Elektromagnetske smetnje
SOFC (engl. <i>Solid Oxide Fuel Cell</i> )	Članak s čvrstim oksidom
MCFC (engl. <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> ),	Članak s taljenim karbonatom
PAFC (engl. <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> )	Članak s fosfornom kiselinom
AFC (engl. <i>Alkaline Fuel Cell</i> )	Alkalni gorivni članak
PEMFC (engl. <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> )	Gorivni članak s protonskom izmjenjivačkom membranom
BoP (engl. <i>Balance of plant</i> )	Ravnoteža postrojenja
CO (engl. <i>Carbon monoxide</i> ),	Ugljikov monoksid
PMG (engl. <i>Permanent magnet generator</i> )	Generator s trajnim magnetima
SoC (engl. <i>State of charge</i> )	Stanje napunjenosti baterije