

Upravljački sustavi u konceptu dizel-električne propulzije

Šarlija, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:652824>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-20**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek
Preddiplomski sveučilišni studij Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa
(jednopedmetni - izvanredni)



Marin Šarlija

**Upravljački sustavi u konceptu dizel-električne
propulzije**

Završni rad

Zadar, 2019.

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek

Preddiplomski sveučilišni studij Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa
(jednopedmetni - izvanredni)

Upravljački sustavi u konceptu dizel-električne propulzije

Završni rad

Student/ica:

Marin Šarlija

Mentor/ica:

doc. dr. sc. Marko Valčić

Zadar, 2019.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Marin Šarlija**, ovime izjavljujem da je moj **završni** rad pod naslovom **Upravljački sustavi u konceptu dizel-električne propulzije** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 1. srpnja 2019.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Problem i predmet istraživanja.....	1
1.2. Svrha i cilj završnog rada.....	2
1.3. Struktura rada.....	2
2. Brodski elektroenergetski sustavi.....	4
2.1. Osnovne karakteristike brodskih sustava propulzije.....	4
2.2. Podjela sustava propulzije na brodovima.....	5
2.2.1. Dizel motorna propulzija.....	6
2.2.2. Parno turbinska propulzija.....	8
2.2.3. Plinsko turbinska propulzija.....	9
2.2.4. Električna propulzija.....	10
3. Koncept dizel-električne propulzije.....	12
3.1. Struktura sustava.....	15
3.2. Različite varijante sustava.....	17
3.3. Skladišta energije.....	18
4. Sustav upravljanja električnom energijom.....	20
4.1. Upravljanje proizvodnjom električne energije.....	20
4.2. Upravljanje potrošnjom električne energije.....	21
4.3. Upravljanje tokovima snaga.....	23
5. Eksploatacijski problemi elektroenergetskih sustava.....	26
5.1. Otpornost sustava upravljanja električnom energijom na kvarove.....	26
5.2. Prevencija ispada elektroenergetskog sustava.....	27
5.3. Optimalna proizvodnja električne energije.....	29
6. Zaključak.....	31

LITERATURA.....	33
POPIS SLIKA	35
POPIS TABLICA.....	35
SAŽETAK.....	36

1. Uvod

U korak s ostvarenjem novih tehnoloških spoznaja primjetan je porast potražnje pomorske industrije za sve većim teretnim i kružnim brodovima koje ujedno odlikuju performanse razvijanja sve većih brzina, boljih manevarskih sposobnosti, smanjenog štetnog utjecaja na okoliš te koji ostvaruju niže troškove održavanja i veću pouzdanost i sigurnost. U skladu s navedenim neizbježno je spomenuti električne instalacije koje su prisutne kao sastavni dio svakog plovnog objekta, u službi napajanja komunikacijske i navigacijske opreme, sustava za alarmiranje i nadzor, rada motora i crpki, ventilatora, vitla, pa sve do instalacija velikih snaga koje su namijenjene za rad električne propulzije. U razvoju električne propulzije veoma važnu ulogu imaju elektronički sklopovi koji između ostalog služe za upravljanje i regulaciju brzine vrtnje elektromotora.

Istražujući područje vezano za temu završnog rada i područje električne propulzije, vidimo da dosadašnja istraživanja i rješenja koja su primijenjena pokazuju da su električni pogonski sustavi posebno korisni kod plovnih objekata s promjenjivim brzinama, kao što su brodovi za opskrbu, plutajući brodovi za proizvodnju, razne bušotine, brodovi za raznošenje tereta, ledolomci te putnički brodovi za krstarenje, pa je stoga i istražena osnovna ideja i najznačajniji segmenti dizel-električne propulzije.

Točka povezivanja svih instaliranih energetske uređaja na plovnim objektima je sustav upravljanja tokovima snaga. Svrha sustava upravljanja električnom energijom (engl. Power Management System, PMS) je da osigura dostatnu raspoloživu snagu za sve eksploatacijske uvjete pojedinog plovnog objekta te kontrolira elektroenergetski sustav kako bi se maksimizirale mogućnosti sprečavanja ispada elektroenergetskog sustava, smanjila potrošnja goriva te smanjili troškovi održavanja kroz zaštitu opreme od kvarova i oštećenja. Kroz takvu interakciju različitih sustava maksimiziramo i sam rad pojedinog plovnog objekta.

1.1. Problem i predmet istraživanja

Pouzdanost i stabilnost tijekom napajanja broskog elektroenergetskog sustava veoma je značajna kako za sigurnost broda, posade i tereta, tako i za ekonomski učinak broda. U suprotnom, zbog ispada elektroenergetskog sustava, mogu nastati štete velikih razmjera. Da bismo spriječili nastanak štete od presudnog je značaja koristiti odgovarajuće metode sprečavanja ispada elektroenergetskog sustava a da pritom ne ometamo rad pogonskih strojeva koji bi trebao biti u blizini optimalnog opterećenja.

Sukladno navedenom kao problem istraživanja ovog rada nameće se pouzdanost elektroenergetskog sustava broda, točnije da li sustav upravljanja električnom energijom obavlja svoju primarnu zadaću tako da osigurava napajanje za neometano obavljanje svih eksploatacijskih potreba. Navodeći predmet istraživanja ovog završnog rada, odnosi se na rad sustava upravljanja električnom energijom te o primijenjenim metodama za povećanje pouzdanosti sustava prilikom nastanka određenih kvarova.

1.2. Svrha i cilj završnog rada

Osnovni cilj ovog rada je utvrditi teoretske spoznaje o konceptu dizel-električne propulzije te pouzdanosti i funkcionalnosti njezinog najznačajnijeg segmenta, misleći pritom na sustav upravljanja električnom energijom te na taj način po ostvarenju ciljeva rada, postići i samu svrhu rada u vidu omogućavanja elementarnog razumijevanja principa rada dizel električne propulzije i njezinih segmenata.

1.3. Struktura rada

Rad se sastoji od šest poglavlja koja formiraju jednu cjelinu.

U prvom poglavlju, *Uvodu*, istaknuta je važnost električnih instalacija na plovnim objektima te njihova uloga pri radu dizel električne propulzije. Istaknuti su problem i predmet istraživanja, definirana je svrha i cilj završnog rada te je napisana struktura završnog rada.

U drugom poglavlju, naslova *Brodski elektroenergetski sustavi* opisane su osnovne karakteristike brodskih elektroenergetskih sustava u usporedbi s kopnenim elektroenergetskim sustavima te izvedena osnovna podjela najzastupljenijih brodskih sustava propulzije u pomorskoj industriji.

U trećem poglavlju, naslova *Koncept dizel-električne propulzije* opisane su osnovne značajke i struktura dizel-električne propulzije. Izvršena je podjela raznih varijanti sustava te je skrenuta pažnja na mogućnost korištenja skladišta energije u svrhu stabilnosti i funkcionalnosti elektroenergetskog sustava.

U četvrtom poglavlju, naslova *Sustav upravljanja električnom energijom* detaljnije su obrađene najznačajnije funkcije sustava i njegove osnovne zadaće te upravljanje električnom energijom u konceptu sustava upravljanja električnom energijom

U petom poglavlju naslova *Eksploatacijski problemi elektroenergetskog sustava* govori se o pojavi problema i kvarova u radu sustava tijekom eksploatacije te o prevenciji ispada elektroenergetskog sustava i optimalnom radu dizel-generatora

U posljednjem šestom poglavlju iznesen je zaključak na temelju kojeg će također biti predložene i preporuke za daljnja istraživanja.

Po završetku sadržaja biti će popisane reference, slike i tablice koje su se koristile za izradu ovog završnog rada.

2. Brodski elektroenergetski sustavi

U ovom poglavlju namjena je navesti karakteristike brodskih sustava propulzije te prikazati osnovnu podjelu ovisno o učestalosti njihove primjene u praksi.

Najveća razlika između elektroenergetskog sustava na plovnim objektima i kopnenog elektroenergetskog sustava je u tome što su elektroenergetski sustavi na plovnim objektima izolirani sustavi s veoma kratkim udaljenostima između proizvedene energije i potrošača, dok za razliku kod sustava na kopnu ta udaljenost može dosegnut i stotine kilometara koje se postižu pomoću dugih dalekovoda i do nekoliko transformacija napona između njih. Količina instalirane električne energije na plovnim objektima može biti veoma visoka i to daje posebne izazove pri projektiranju takvih sustava. Mora se računati na maksimalne struje kratkog spoja kako bi se mogao izvršiti pravilan odabir uređaja koji mogu izdržati sva dinamička i termička opterećenja u periodu do isključenja struje kratkog spoja. Elektroenergetski sustavi na kopnu imaju upravljački sustav koji je podijeljen u nekoliko odvojenih podsustava, dok na plovnim objektima ne postoje takve mogućnosti zbog limitiranog prostora. Projektiranje elektroenergetskih sustava, sustava propulzije i upravljačkih sustava na plovnim objektima se značajno promijenilo i unaprijedilo tijekom relativno nedavnog razdoblja. Zbog ubrzanog razvoja računala, mikroprocesora i komunikacijske mreže, integracija sustava koji su u prošlosti tradicionalno bili odvojeni, danas postoje kao samostalni sustavi i to ne samo u smislu izvedbe, već kao industrijski standardi. Sve je veća potražnja industrije za sustavima propulzije s redundancijom i mogućnošću fizičkog odvajanja pojedinih sustava. Na taj način međusobne veze različitih sustava na plovidbi postaju sve složenije, čineći dizajn, projektiranje i izgradnju plovnog objekta još kompleksnijom [1].

2.1. Osnovne karakteristike brodskih sustava propulzije

Osnovu svakog brodskog propulzijskog sustava predstavlja glavni porivni stroj koji je ujedno i izvor mehaničkog rada s kojim pokrećemo brodski propulzor (brodski vijak) i ostvarujemo poriv samog broda. Veoma važan segment kod početnog dizajniranja sustava propulzije broda je veza između porivnog stroja, osovinskog voda, transmisijskog sustava (reduktor i prekretno spojnica) i propulzora. Kao porivni stroj najčešće se primjenjuju toplinski strojevi, koji koriste kemijsku energiju goriva te stvaraju zakretni moment koji se preko osovinskog voda i transmisijskog sustava prenosi do propulzora koji stvara silu poriva. Na određenim brodovima u primjeni je također i električni prijenos snage od toplinskog stroja do propulzora na način da toplinski stroj pokreće električni generator, dok je propulzor pogonjen

elektromotorom. Porivni strojevi koji razvijaju male brzine vrtnje najčešće su izravno priključeni na osovinski vod, dok se kod porivnih strojeva s većim brzinama vrtnje preporučuje poriv preko zupčanih prijenosa (reduktora), kako bismo regulirali brzinu vrtnje brodskog vijka i ostvarili njegov najpovoljniji stupanj djelovanja. Pogonske karakteristike broda se postižu na više načina:

- Promjenom smjera vrtnje porivnog stroja zajedno s osovinskim vodom i vijkom
- Prekretnim spojka
- Promjenom položaja krila brodskog vijka

Koristeći parnu turbinu u ulozi porivnog stroja ne može se vršiti preket zbog njene konstrukcijske izvedbe te stoga one imaju ugrađenu posebnu turbinu za vožnju krmom [3]. Govoreći o osnovnim karakteristikama brodskih sustava propulzije nezaobilazno je reći ponešto o samim propulzorima i njihovom utjecaju na iskoristivost propulzije. Iskoristivost raznih tipova propulzora značajno varira, no unatoč velikom broju tipova koji se koriste, iskoristivost brodskog vijka teško je dostižna što je ujedno i veliki razlog njegove široke primjene u pomorskoj industriji [4].

Najzastupljenije vrste propulzora koje se ugrađuju i koriste na plovnim objektima su:

- Vijci s fiksnim korakom (engl. Fixed Pitch Propeler, FPP),
- Vijci s promjenjivim korakom (engl. Controllable Pitch Propeler, CPP),
- Vijci u sapnici (engl. ducted propellers),
- Pod-propulzori (engl. thrusters-pod drives),
- Voiht-Schneiderovi propulzori,
- Vodmlazni propulzori (engl. water jet).

S obzirom na međunarodne zahtjeve glede zaštite okoliša te sve se učestalijem razmatranju njihove primjene, u ovome poglavlju bi svakako trebalo spomenuti i primjenu alternativnih porivnih sustava koji koriste obnovljive ili neobnovljive izvore energije, ali u ovom radu nije namjera baviti tim sustavima.

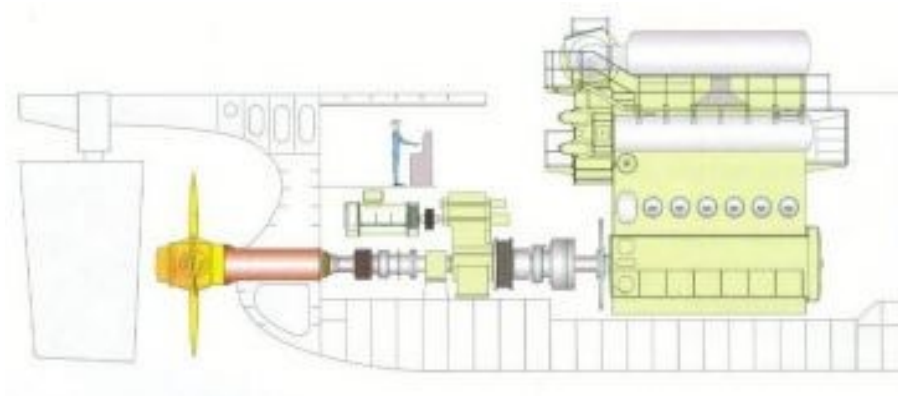
2.2. Podjela sustava propulzije na brodovima

U suvremenom pomorskom prometu većina današnjih brodova kao primarne pokretače propulzora, najčešće brodskog vijka, koristi dizelske motore. Razlog je njihov povoljan stupanj

iskoristivosti, konstrukcijska jednostavnost te pouzdanost. Unatoč navedenim prednostima dizelskih motora ne smijemo izostaviti i mnoge druge važne čimbenike kao što su negativan ekološki utjecaj, iskoristivost prostora broda, masa i veličina porivnog stroja, zbog kojih u praksi pronalaze primjenu i porivni strojevi koji koriste parne ili plinske turbine te niz različitih kombiniranih izvedbi. U takvim izvedbama često se također koriste i elektromotori kao porivni strojevi zbog njihovih dobrih karakteristika, kao npr. vožnja naprijed i vožnja krmom, čime se poboljšava manevarska sposobnost broda [2]. Uobičajeno je da tip porivnog stroja određuje i sam naziv propulzijskog sustava broda. Kao što je ranije u radu spomenuto, zbog postojanja mnogo različitih izvedbi sustava propulzije na brodovima, namjera je reducirati podjelu pa će se stoga u nastavku govoriti o konvencionalnim sustavima propulzije.

2.2.1. Dizel motorna propulzija

Dizel motorna propulzija predstavlja najzastupljeniji pogonski sustav današnjih brodova. Zakretni moment koji stvara porivni stroj (dizel motor) prenosi se mehaničkom vezom (osovinskim vodom) do broskog vijka te se na taj način postiže poriv broda. Brodski vijak ne mora nužno imati jednaku brzinu vrtnje kao i porivni stroj a to prvenstveno ovisi o odabiru prijenosa snage koje može biti direktno (neposredno) predavanje snage broskom vijku, predavanje snage reduktorom (brzina vrtnje vratila pogonskog stroja se reducira na brzinu vrtnje broskog vijka) i predavanje snage preko reduktora i prekretnne spojke (na taj način omogućen je suprotan smjer vrtnje osovine broskog naspram smjera vrtnje vratila pogonskog stroja). Dizelske motore možemo kategorizirati po principu rada, njihovoj konstrukciji, broju okretaja, izlaznoj snazi, korištenom gorivu, njihovoj upotrebi te ostalim karakteristikama.



Slika 1. Direktni prijenos snage kao standard kod sporookretnih dvotaktnih motora s križnom glavom

Izvor: [13]

Dizelske motore s kojima se susrećemo u pomorskoj industriji najčešće dijelimo u četiri kategorije:

- Sporookretni dvotaktni motori s križnom glavom (engl. Low-speed two-stroke crosshead engines) izlaznih snaga od 1500 do 100 000 kW i brzina vrtnje između 50-250 min^{-1} , koristeći pritom teško gorivo (engl. Heavy Fuel Oil, HFO)
- Srednjookretni četverotaktni motori (engl. Medium-speed four-stroke engines) izlaznih snaga od 500 do 30 000 kW i brzina vrtnje između 400-1000 min^{-1} , koristeći pritom teško gorivo
- Brzookretni četverotaktni motori (eng. High-speed four-stroke engines) izlaznih snaga od 100 do 5000 kW i brzina vrtnje između 960-2100 min^{-1} , koristeći pritom dizel gorivo (engl. Marine Diesel Oil, MDO)
- Brzookretni četverotaktni motori (eng. High-speed four-stroke engines) izlaznih snaga do 100 kW i brzina vrtnje između 1500-3000 min^{-1} , koristeći pritom dizel gorivo



Slika 2. Sporookretni dvotaktni motor s križnom glavom

Izvor: [13]

Na većini brodova trgovačke mornarice najviše su u primjeni sporookretni dvotaktni dizelski motori s križnom glavom koji postižu maksimalnu brzinu vrtnje do 240 min^{-1} . Takvi motori imaju najveću jediničnu masu i dosežu snage oko 100 000 kW uz efektivni stupanj djelovanja do 50 %. Spojeni su direktno na osovinu, i najčešće koriste brodski vijak sa promjenjivim korakom (CPP) ili brodski vijak s fiksnim korakom (FPP) te se uglavnom izvode kao prekretni motori.

Prednosti upotrebe dizelskih motora u pomorskoj industriji su: dobro poznata tehnologija, veliki broj proizvođača s razvijenom mrežom distributera rezervnih dijelova i obučениh inženjera potrebnih za popravke, mogućnost korištenja teškog goriva, jednostavno održavanje, dok su nedostaci: visoka emisija štetnih plinova, dimenzije glavnih porivnih strojeva, potrebna velika financijska ulaganja za prilagodbu ekološkim zahtjevima međunarodnih organizacija.

2.2.2. Parno turbinska propulzija

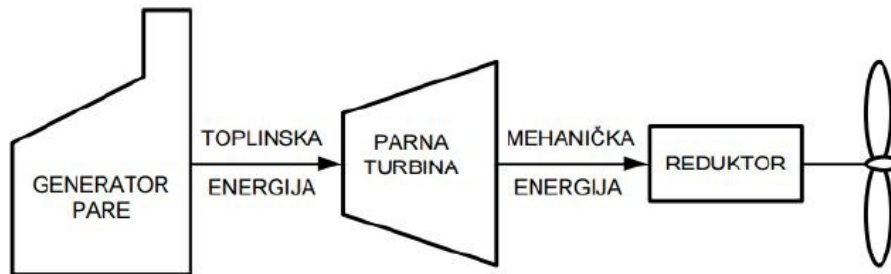
Osnovni elementi broskog parno turbinskog postrojenja prikazani su na slici 3. redosljedom od generatora pare, turbine, reduktora te osovine s broskim vijkom. Kemijska energija tekućeg ili plinovitog goriva se u generatoru pare izgaranjem pretvara u toplinsku energiju nakon čega se predaje vodenoj pari koja potom strujeći kroz lopatice rotora turbine stvara silu koja zakreće rotor te na taj način daje mehaničku energiju koja se preko reduktora prenosi na osovinu broskog vijka.

Parna turbina je toplinski stroj u kojem se toplinska energija vodene pare prolaskom kroz statorske sapnice pretvara u kinetičku energiju koja potom u vidu strujanja pare kroz rotorski dio turbine vrši pretvorbu kinetičke energije u mehanički rad.

Parne turbine se uglavnom koriste za pogon crpki, kompresora, generatora te brodskih vijaka. Parna turbina u ulozi glavnog broskog pogonskog stroja se najčešće koristi kada su potrebne veće snage poriva. Danas se proizvode parne turbine za civilnu upotrebu koje razvijaju snage i do 100 000 kW dok one proizvedene za ratne mornarice postižu snage i do 300 000 kW. Parne turbine najčešće susrećemo u primjeni na tankerima za ukapljeni plin, putničkim brodovima za kružna putovanja te ratnim brodovima.

Prednosti parnih turbina se mogu ogledati u tome što razvijaju velike brzine vrtnje, povoljan zakretni moment, nisku razinu vibracija i buke, relativno siguran pogon i mali

troškovi održavanja, dok bi nedostaci bili otežane manevarske sposobnosti, mali stupanj iskoristivosti te potreba zasebne turbine za vožnju krmom.

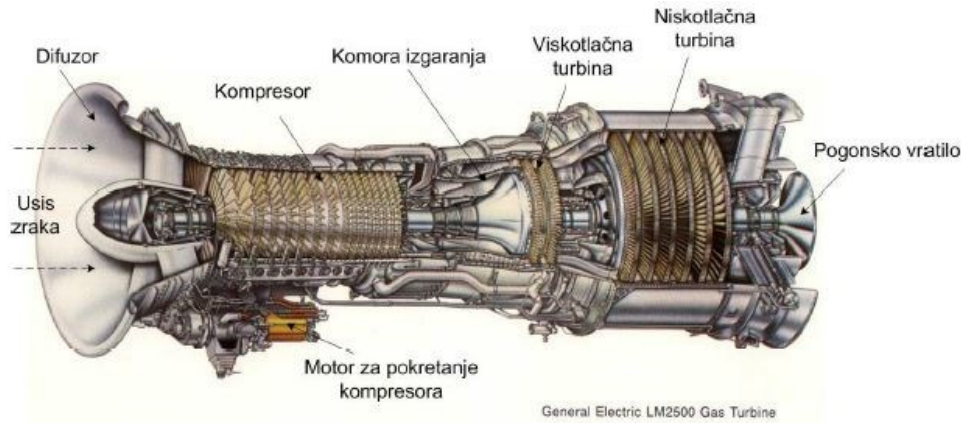


Slika 3. Shematski prikaz parno turbinskog postrojenja
Izvor: [2]

2.2.3. Plinsko turbinska propulzija

Pojednostavljeno plinsko turbinsko postrojenje s otvorenim procesom sastoji se od kompresora, komore za izgaranje i plinske turbine. U aksijalnom kompresoru usisani zrak se komprimira do maksimalnog tlaka i temperature, nakon čega izgaranjem tekućeg ili plinovitog goriva u komori za izgaranje nastaju plinovi izgaranja koji potom dolaze na turbinu gdje se događa ekspanzija smjese zraka i plinova izgaranja do okolnog tlaka stvarajući pritom rad koji je potreban za pogon kompresora i poriva broda. Plinske turbine se mogu koristiti u čistom mehaničkom pogonu ili pak alternativno, za proizvodnju struje koja služi za rad porivnog elektromotora. To je dalo poticaj razvoju hibridnih pogonskih rješenja kao što su CODAG (COmbined Diesel and Gas turbine) sustavi koji koriste dizelske motore za propulziju kod malih brzina dok se pri razvoju velikih brzina pali plinska turbina, CODOG (COmbined Diesel Or Gas turbine) sustavi izvedeni su na način da je porivni stroj propelera ili vodenih potisnika ili dizel motor ili plinska turbina odvojeno, COGAG (COmbined Gas turbine And Gas turbine) sustavi koriste plinsku turbinu malih snaga za male brzine i/ili velike motore za velike brzine, CODLAG (COmbined Diesel eLectric And Gas turbine) sustavi koji koriste elektromotore i dizel-generatore za razvijanje malih brzina i plinske turbine za velike brzine. Također trebalo bi napomenuti i sustav kod kojeg plinska turbina pokreće dizel-generator i natak način proizvodi struju potrebnu za propulziju broda (engl. Full Electric Propulsion, FEP) [14]. Jedno od najčešće korištenih kombiniranih propulzijskih sustava je COGES (COmbined Gas turbine Electric and Steam) u kojem se pri radu plinske turbine nastali ispušni plinovi odvede u utilizator služeći tako za proizvodnju pare pomoću koje

turbina prilikom ekspanzije pare u turbini ostvaruje mehanički rad potreban za poriv broda. COGES sustavi propulzije postižu iznimno visok stupanj iskoristivosti čitavog procesa i on iznosi do 60 %. Slika 4. prikazuje najrašireniju izvedbu plinskih turbina s otvorenim procesom.



Slika 4. Plinska turbina s otvorenim procesom

Izvor: [2]

Suvremene parne turbine dizajnirane su za izgaranje komercijalno dostupnih goriva koji udovoljavaju trenutnoj zakonskoj regulativi o emisiji štetnih plinova no takva goriva su znatno skuplja od konvencionalnih brodskih goriva koja sagorijevaju u dizel motorima. Govoreći o plinskim turbinama i raznim kombiniranim postrojenjima u kojima plinske turbine također imaju svoju ulogu može se reći da su prednosti takvih postrojenja: visoka učinkovitost, mala masa postrojenja a samim time i jednostavnija instalacija, male emisije štetnih plinova, relativni jednostavno održavanje, relativno laka zamjena. Dok bi nedostaci bili u: skuplje pogonsko gorivo plinskih turbina, sama plinska turbina ima mali stupanj korisnosti i nedostatak osposobljenog stručnog kadra.

2.2.4. Električna propulzija

Električna propulzija predstavlja pogon brodskog vijka s elektromotorom. Tehnologija električne propulzije mijenja način na koji brod prenosi energiju od primarnog stroja (dizel motor, parna turbina, plinska turbina) do propulzora, kao i način na koji se upravlja s tokovima snaga prema sustavu propulzije i opće brodske mreže [7]. Važnu ulogu u razvoju električne propulzije imaju elektronički sklopovi za upravljanje i regulaciju brzine vrtnje propulzijskog elektromotora. Oni su omogućili da sa zajedničkih sabirnica trofazne glavne sklopne ploče napajaju direktno trofaznom strujom kavezni asinkroni motori za razne

namjene pri kojima nije potrebna promjena brzina vrtnje, zatim ostala trošila priključena na opću brodsku mrežu te preko upravljačkih sklopova i propulzijski elektromotori [5]. Gledajući način napajanja propulzijskog elektromotora razlikujemo:

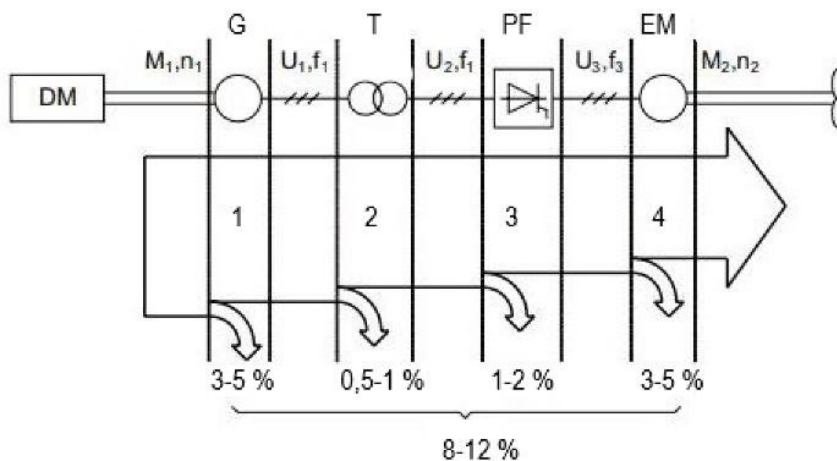
- Potpuno električnu propulziju: Propulzijski elektromotor se napaja iz akumulatorskih jedinica. Najčešće se koristi kod malih brodica, podmornica, torpeda i brodica s posebnim zahtjevima;
- Kombinirana propulzija: Sustavi kod kojih uz akumulatorske jedinice postoje još i dizel generatori pomoću kojih se napaja propulzijski elektromotor;
- Propulzija s električnim prijenosom: Sustavi kod kojih se propulzijski elektromotor napaja električnom energijom iz generatora koji je pogonjen primarnim strojem (dizel motor, parna turbina, plinska turbina). Između primarnog stroja i propulzora uvijek se nalazi električni prijenosni element.

Uvođenje novih izvora električne energije i mogućnost ekonomične pretvorbe toplinske energije u električnu imati će značajan utjecaj na električnu propulziju u budućnosti, pa će stoga za potrebe ovog rada u nastavku biti stavljen naglasak na dizel-električnu propulziju.

3. Koncept dizel-električne propulzije

Promatrajući pojedine tipove plovnih objekata koji koriste dizel-električnu propulziju ali imaju različitu namjenu i eksploatacijske profile, vidljivo je da se dizajn njihovih sustava propulzije uvelike razlikuje pa ih stoga treba i razmatrati odvojeno. U ovom radu namjera je govoriti o sustavima koje karakterizira konstantan napon i frekvencija mreže na glavnoj sklopnoj ploči, preko koje se dalje napajaju svi električni potrošači na brodu, kako glavni visokonaponski električni sustav sa svojim potrošačima i sustavom propulzije, tako i niskonaponski električni sustav također. Poriv broda ostvaruje se na način da se visoki napon s glavne sklopne ploče pomoću transformatora i statičkih pretvarača frekvencije dovodi do propulzijskih elektromotora, pri tom vršeći regulaciju broja okretaja. Takav način električnog prijenosa snage prolazi kroz četiri stupnja promjene energije. Točnije rečeno, osnovna ideja dizel-električne propulzije (propulzije s električnim prijenosom) je zamjena glavnih dizelskih porivnih motora s porivnim elektromotorima te podjela proizvodnje električne energije na nekoliko manjih dizelskih generatora. Time je promijenjen način prijenosa snage između porivnog stroja i propulzora ali i same distribuciju električne energije kako prema sustavu propulzije tako i prema ostalim potrošačima [1]. Slika 5. prikazuje sustav propulzije s električnim prijenosom snage te četiri stupnja promjene energije koje se događaju tijekom rada sustava:

- (1) Mehaničko-električna promjena gdje se pomoću momenta i brzine vrtnje (M_1, n_1) pogonskog dizel motora (DM) u sinkronim generatorima (G) stvara određeni napon i frekvencija (U_1, f_1).
- (2) Transformacija napona gdje se napon i frekvencija glavne sklopne ploče (U_1, f_1) u propulzijskim transformatorima (T) pretvaraju u napon i frekvenciju (U_2, f_2) koji kao takvi odlaze prema pretvaračima frekvencije (PF).
- (3) Regulacija frekvencije i napona gdje se u propulzijskim pretvaračima frekvencije napon i frekvencija (U_2, f_2) pretvaraju u željeni napon i frekvenciju (U_3, f_3) koji su potrebni za pogon porivnog elektromotora.
- (4) Električno-mehanička promjena gdje određeni napon i frekvencija (U_3, f_3) pokreću porivni elektromotor (EM) koji stvara određeni moment i brzinu vrtnje (M_2, n_2) koji se dalje prenose na osovinu brodskog vijka [6].



Slika 5. Bilanca snage dizel električne propulzije

Izvor: [6]

Gubici snage u komponentama koje se nalaze između osovine dizel motora i osovine pogonskog elektromotora su mehanički i električni gubici i uzrok su porasta temperature električne opreme i okolnog prostora. Izračunamo li električnu iskoristivost za svaku komponentu pojedinačno, sinkroni generator: $\eta = 0,95-0,97$, razvodna ploča: $\eta = 0,999$, propulzijski transformatori: $\eta = 0,99-0,995$, propulzijski pretvarači frekvencije: $\eta = 0,98-0,99$ te porivni elektromotori: $\eta = 0,95-0,97$, dobijemo ukupnu električnu iskoristivost dizel električne propulzije koja najčešće iznosi između 0,88 i 0,92 pri punom opterećenju [1], a može se odrediti prema

$$\eta = \frac{P_{izl}}{P_{ul}} = \frac{P_{izl}}{P_{izl} + P_{gubitaka}} \quad (3.1)$$

Iz izraza (3.1) možemo izračunati da su ukupni gubici između osovine dizel motora i osovine porivnog elektromotora najčešće između 8 i 12 %. Osnovne značajke dizel električnog prijenosa koje su navedene razlikuju se od značajki drugih glavnih pogona ali ne samo u stacionarnom i prijelaznom stanju prvenstveno zbog različitih metoda promjene brzine vrtnje i prekreta (reverziranja), nego također i u stupnju korisnog djelovanja, cijeni, iskorištenju prostora i slično. Uspoređujući dizel-električnu propulziju s ostalim vrstama glavnog poriva broda mogu se odrediti određene prednosti i nedostatci [5].

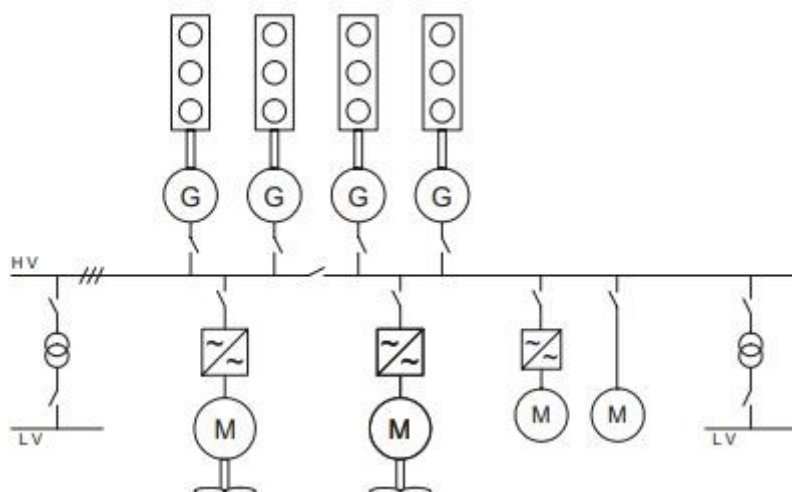
Prednosti dizel električne propulzije su:

- Odabir najpovoljnije brzine brodskog vijka i pogonskog stroja jer među njima nema mehaničkog spoja
- Primarni strojevi mogu biti brzohodni nereverzibilni čime se pojednostavljuje njihova konstrukcija i produžuje vrijeme do remonta
- Nema prijenosa udaraca i vibracija s propelera na glavni porivni stroj
- Smještaj pogonskog stroja i generatora ne ovisi o položaju osovinskog voda što dovodi do povoljnijeg iskorištenja prostora ovisno o tipu broda
- Prekretanje propelera se obavlja bez promjene smjera vrtnje porivnog stroja
- Raspoloživa je ista snaga za vožnju naprijed i vožnju krmom dok kod kočenja pogonski elektromotor razvija 2-3 puta veći zakretni moment od nazivnog
- Veće područje regulacije brzine propelera i kraći zaustavni put
- Bolje manevarske sposobnosti broda (lako i brzo daljinsko upravljanje režimima rada)
- Mogućnost pokretanja jedne osovine brodskog vijka iz više različitih izvora
- Mogućnost isključivanja pojedinih agregata kada je kod malih i srednjih brzina broda dovoljna manja snaga te se u takvim režimima plovidbe postiže visoka ekonomičnost pogona
- Smanjenje potrošnje goriva i emisije štetnih plinova
- Mogućnost korištenja električne energije proizvedene za rad propulzije za napajanje ostalih brodskih uređaja

Nedostatci dizel električne propulzije su:

- Niža iskoristivost zbog dvostruke pretvorbe energije
- Viša cijena i ponekad veća masa propulzijskog sustava
- Potreban veći broj visokokvalificiranog osoblja što također utječe na troškove.

Na slici 6. prikazana je shema elektroenergetskog sustava dizel-električne propulzije s tipičnim komponentama na kojoj se vide četiri dizel generatora koji služe za proizvodnju električne energije s kojom se napaja glavna sklopna ploča koja je podijeljena na dvije ili više sekcija kako bi se omogućila redundancija. Visokonaponske sklopne ploče (engl. High Voltage, HV) služe za napajanje velikih potrošača snage kao što su glavni porivni elektromotori i elektromotori za rad propulzora. Preko frekvencijskih pretvarača omogućava se regulacija rada elektromotora dok se pomoću transformatora dobiva željeni napon na niskonaponskim sklopnim pločama (engl. Low Voltage, LV) koje služe za napajanje ostalih električnih potrošača [15].



Slika 6. Tipični elektroenergetski sustav dizel-električne propulzije

Izvor: [15]

Dizel električna propulzija najčešće se primjenjuje na brodovima koji imaju potrebu za velikom potrošnjom električne energije, dobrim manevarskim sposobnostima i čestim promjenama brzine pa je stoga najčešće susrećemo kod putničkih brodova za kružna putovanja, trajektima, jahtama, ledolomcima, istraživačkim brodovima, opskrbnim brodovima, brodovima za polaganje cjevovoda ili kabela, ratnim brodovima te raznim platformama.

3.1. Struktura sustava

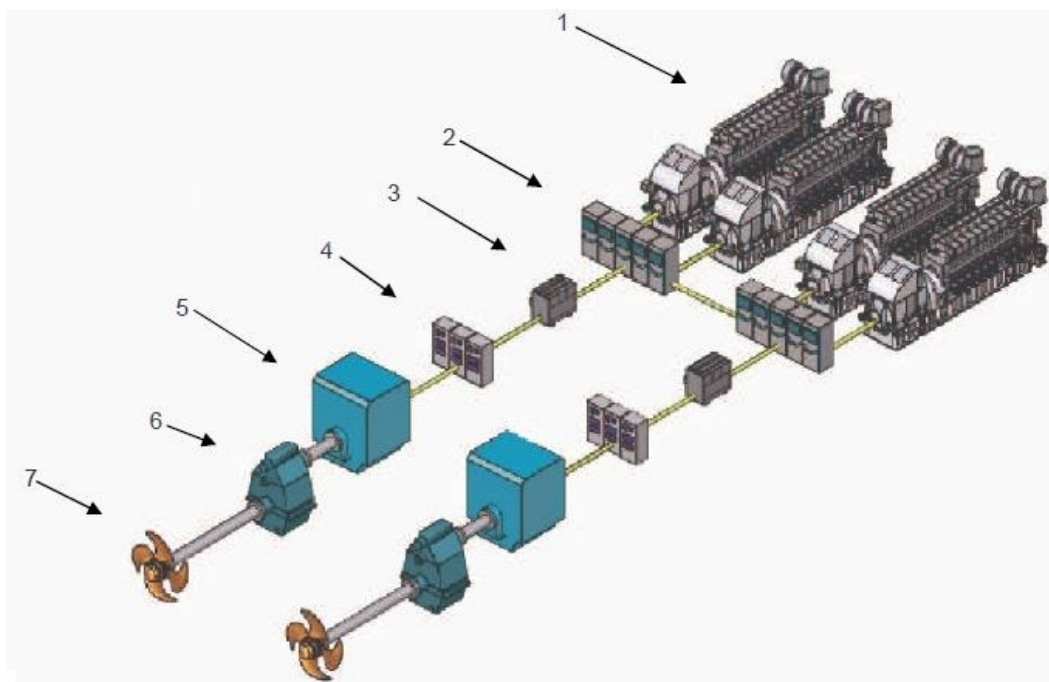
Prilikom projektiranja dizel-električne propulzije razmatra se vrsta i namjena broda te eksploatacijski uvjeti u kojima će brod obavljati svoje zadaće, gdje se onda na osnovu prikupljenih podataka projektira cjelokupno postrojenje dizel-električne propulzije. Uobičajen tijek projektiranja provodi se po redoslijedu:

- Osnovni podatci o brodu: (Vrsta broda, vrsta propulzije, vrsta propelera, eksploatacijski uvjeti, zahtjevi klasifikacijskih društava sukladno klasi broda);
- Procjena potrebne snage i brzine: (Projektni dizajn broda, snaga propulzijskog sustava u svim eksploatacijskim uvjetima, rubni uvjeti stanja mora);
- Analiza električnog opterećenja: (Potrebna električna energija za sve potrošače u svim eksploatacijskim uvjetima, učinkovitost dizel-električnog postrojenja u slučaju gubitka glavnih komponenti sustava, definiranje ukupne snage koju je potrebno instalirati);

- Odabir pogonskih motora: (Broj i vrsta motora/generatora, maksimalno dozvoljeno opterećenje, strategija održavanja u svim eksploatacijskim uvjetima);
- Razvodne ploče: (Odabir frekvencije, odabir napona, broj sekcija razvodnih ploča, parametri glavnog alternatora);
- Komponente upravljanja propulzorom: (Odabir frekvencijskog pretvarača i broja impulsa, provjera transformatorskih jedinica, odabir vrste porivnog elektromotora, provedba metode smanjenja totalnog harmoničkog izobličenja (engl. Total Harmonic Disorder, THD));
- Provjera dizel električnog postrojenja: (Provjeriti struje kratkog spoja, provjeriti raspoloživost jalove snage, provjeriti granice totalnog harmoničkog izobličenja).

Podjelu dizel električne propulzije možemo učiniti prema različitim kriterijima kao što su vrsta primarnog stroja (dizel motor, parna turbina, plinska turbina ili razne kombinacije), značajke pogona (npr. prema brzini i učestalosti preokretanja, prema opsegu promjene brzine, prema snazi, prema veličini promjene momenta i sl.) ili prema vrsti struje (električni prijenos se dijeli na: istosmjerno - istosmjerni, na izmjenično - istosmjerni tzv. kombinirani sustav i na izmjenično - izmjenični trofazni sustav). Dizel-električna propulzija sa potpuno integriranim elektroenergetskim sustavom za primarni stroj koristi dizel motor koji je obično brzine vrtnje između 700 i 1500 min^{-1} i snage približno do 6000 kW [5]. Izmjenični sinkroni generatori pogonjeni dizel-motorima proizvode električnu energiju koja se potom isporučuje putem kablova na glavnu sklopnu ploču koja dijeli električnu energiju na dva distribucijska sustava: jedan za pogon broda i jedan za ostala električna opterećenja. Glavna sklopna ploča može mijenjati raspodjelu snage između ova dva sustava u momentu trenutka kako bi se zadovoljili trenutni zahtjevi broda. Fleksibilnost prebacivanja između snage brodske službe i pogonske snage sama po sebi osigurava viši stupanj redundancije što je ujedno i jedna od značajnijih prednosti dizel električne propulzije [7]. U primjeni su razni tipovi frekvencijskih pretvarača koji nam iz oblika ulaznog napona sintetiziraju izlazni napon i frekvenciju potrebne za regulaciju brzine vrtnje propulzijskih elektromotora. Kod dizel-električne propulzije to su najčešće statički pretvarači frekvencije. Sinkroni propulzijski elektromotori se upotrebljavaju za veće i najveće snage, a za srednje snage se upotrebljavaju kavezni asinkroni.

Slika 7. prikazuje komponente dizel-električne propulzije koja se sastoji od dizel-generatora (1), glavne sklopne ploče (2), transformatora koji nisu nužno potrebni ovisno o tipu frekvencijskih pretvarača (3), frekvencijskih pretvarača (4), propulzijskih elektromotora (5), reduktora koji nisu nužno potrebni ovisno o brzini propulzijskog elektromotora (6) i brodskog vijka (7).



Slika 7. Komponente dizel električne propulzije

Izvor: [16]

3.2. Različite varijante sustava

Osim podjele dizel električne propulzije po različitim kriterijima koji su ranije navedeni u ovom poglavlju, mogu se još vršiti i dodatne podjele budući da svaka vrsta struje koja je navedena može imati i do nekoliko podvrsta s raznim rješenjima koja zadovoljavaju tehničke zahtjeve električnog pogona propulzora. Odnosi se na:

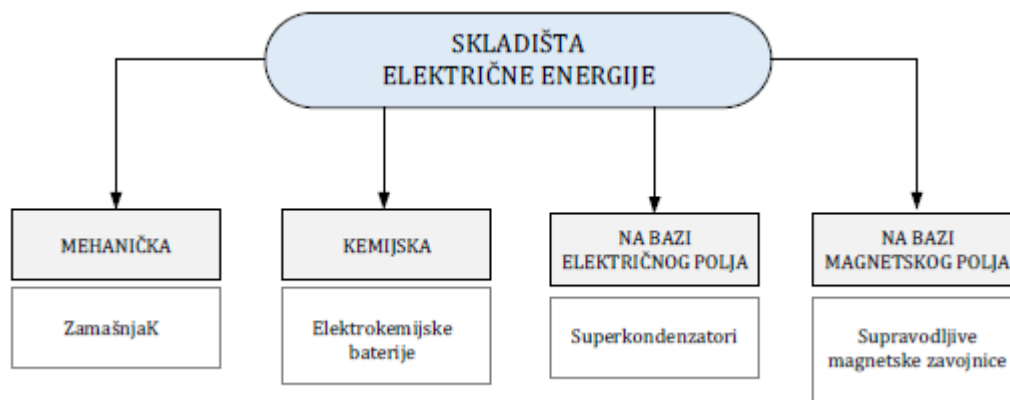
- Istosmjerno - istosmjerni električni prijenos: kojeg čine istosmjerni generator i istosmjerni porivni elektromotor s različitim međusobno izvedenim spojevima. Ovakav prijenos pronašao je svoju primjenu na brodovima s teškim uvjetima plovidbe koji su zahtijevali često preokretanje propelera i promjene brzine vrtnje i momenta. Najčešće transportni brodovi, ledolomci i tegljači;

- Izmjenično - istosmjerni električni prijenos: kojeg čine sinkroni generator koji putem neupravljivih ili upravljivih poluvodičkih pretvornika napaja istosmjerni porivni stroj. Ovakav prijenos je pronašao svoju primjenu u prvo vrijeme na ribarskim brodovima a kasnije s vremenom i na mnogim vrstama suvremenih brodova. Prednosti ovakvog prijenosa u odnosu na istosmjerno - istosmjerni prijenos je ta da generatori u svim režimima rada mogu raditi s konstantnim naponom što omogućuje istovremeno napajanje i brodske mreže i porivnih elektromotora, mogućnost kratkotrajnog generatorskog kočenja te imaju kraće vrijeme prekreta i kočenja;
- Izmjenično - izmjenični električni prijenos: kojeg čine sinkroni generatori koji napajaju sinkrone ili asinkrone porivne elektromotore. Poboljšanje kvalitete ovakvog električnog prijenosa dobije se napajanjem izmjeničnih elektromotora preko frekvencijskih pretvarača a ne direktno preko izmjeničnog generatora (brodske mreže) jer se na taj način omogućuje kvalitetnija regulaciju brzine vrtnje propelera i brzine broda ujedno zadržavajući konstantni napon i frekvenciju generatora što omogućava istovremeno napajanje i trošila opće brodske mreže. Ova vrsta električnog prijenosa u današnje vrijeme je pronašla najširu primjenu na brodovima i upotrebljava se za velike porivne snage, dok joj je primarni stroj jedan od toplinskih strojeva. Izvedbe ovakvog električnog prijenosa mogu biti razne ovisno o vrsti primarnog stroja, broju generatora, broju propelera, vrsti porivnog elektromotora i sl. Prema propisima klasifikacijskih društava najviši dopušteni napon je 11000 V ali obično je između 5500 i 7500 V. Frekvencije nisu nužno 50 ili 60 Hz već se one određuju prema najpovoljnijem omjeru brzine vrtnje primarnih strojeva i propulzora. Kod postrojenja u eksploataciji frekvencije su najčešće između 35 i 80 Hz.

3.3. Skladišta energije

Govoreći o elektroenergetskim sustavima koji koriste dizel-električnu propulziju potrebno je spomenuti i mogućnost korištenja skladišta energije. Skladišta energije su dugo godina ispitivana na brodovima ratne mornarice kao rješenje za ublažavanje, preuzimanje impulsnih opterećenja elektroenergetskog sustava u trenucima primjene raznih vrsta oružja kojima je potreban kratak impuls velikih snaga. U današnje vrijeme s porastom tehnološkog razvoja, skladišta energije pronalaze sve veću primjenu i na civilnim plovnim objektima, najčešće kod brodova koji obavljaju zahtjevne eksploatacijske zadaće te im je stoga potrebna visoka stabilnost i raspoloživost elektroenergetskog sustava.

U slučaju naglog kvara ili ispada jednog od glavnih generatora, skladište energije bi preuzelo trenutno opterećenje do trenutka sinkronizacije generatora u pričuvi i na taj način sačuvalo elektroenergetski sustav od ispada. Skladišta energije povećavaju raspoloživost i sigurnost elektroenergetske mreže na način da pohranjuju dio proizvedene električne energije kada ona sustavu nije potrebna a predaju je natrag kada sustav s obzirom na proizvodnju električne energije ne može zadovoljiti potrošnju. Kod odabira vrste sustava za skladištenje energije potrebno je razmotriti razne čimbenike koji ponajprije proizlaze iz same konstrukcije broda i njegovih eksploatacijskih zadataka. Energija koja se pohranjuje u sustav skladištenja energije limitirana je kapacitetom i brzinom oslobađanja te energije. Kod zahtjeva za dugotrajnim napajanjem (više sati ili dana) potrebni su veliki skladišni kapaciteti što samim time utječe na rast cijene i odluku o odabiru vrste skladišta energije. Suprotno tome u primjeni na brodskim elektroenergetskim sustavima od skladišta energije se očekuje da kompenzira kratkotrajna opterećenja kako bi se sačuvala stabilnost napona i frekvencije potrebnih za uključivanje rezervnog generatora na mrežu nakon ispada generatora koji je bio na mreži. Taj proces bi zahtijevao kratkotrajno oslobađanje energije u trajanju ne duže od 50 sekundi što kod odabira skladišta energije u prvi plan stavlja cijenu snage (kW ili MW).



Slika 8. Vrste skladišta električne energije
Izvor: [8]

Uzevši u obzir iskustva s ratnih brodova, smatra se da će se u budućnosti na civilnim plovnim objektima najčešće koristiti skladišta energije u vidu elektrokemijskih baterija, superkondenzatora i zamašnjaka. Najveći razlog tome je taj što te tehnologije postižu najveće gustoće energije, pa bi ostale tehnologije bile prevelike ili bi njihova implementacija bila tehnički prekomplikirana [8].

4. Sustav upravljanja električnom energijom

Sustav upravljanja električnom energijom je ključni dio sustava automatizacije i napajanja svih brodskih mreža a posebno važnu primjenu predstavlja kod plovnih objekata koji koriste električnu propulziju [11]. Prilikom eksploatacije plovnog objekta dolazi do raznih prijelaznih pojava, oscilacija u opterećenju, smetnji na brodskoj mreži zbog harmonijskih učinaka i sl. koji utječu na međusobno djelovanje opterećenja mreže i rada generatora. Sustav upravljanja električnom energijom je najčešće točka povezivanja svih instaliranih energetske uređaja koji ima ulogu nadzora i sveobuhvatne kontrole funkcionalnosti elektroenergetskog sustava [9].

Količina dostupne električne energije ovisi prvenstveno o karakteristikama samog sustava upravljanja električnom energijom, točnije o parametrima kao što su broj generatora, ukupna instalirana snaga, konfiguracija mreže, klasa broda. Optimalan rad i upravljanje povećava mogućnost sprečavanja ispada elektroenergetskog sustava, osigurava optimalno opterećenje i broj generatora te na taj način također smanjuje potrošnju goriva i troškove održavanja kroz zaštitu opreme od kvarova i oštećenja. Svrha sustava upravljanja električnom energijom je osigurati dostatnu raspoloživu snagu za sve eksploatacijske uvjete plovnog objekta, praćenjem opterećenja i statusa dizel-generatora i elektroenergetskog sustava. Ako je raspoloživa snaga premala zbog povećanja opterećenja, greške ili kvara u pokrenutom generatorskom setu, sustav upravljanja električnom energijom će automatski pokrenuti sljedeći generator u redosljednom pokretanju [9]. Pravila klase zahtijevaju od dizel-generatora 45 sekundi za pokretanje, sinkronizaciju i početak dijeljenja opterećenja. Dakle, uvijek je izazov za sustav upravljanja električnom energijom da unaprijed predvidi situaciju i pokrene dizel-generatore prije nego što potrošači povuku električnu energiju s mreže i na taj način preoptereće dizel-generatore. Najznačajnije funkcije sustava upravljanja električnom energijom se mogu podijeliti u tri grupe: Upravljanje proizvodnjom električne energije, upravljanje potrošnjom električne energije i upravljanje razdiobom snaga.

4.1. Upravljanje proizvodnjom električne energije

U sustavima dizel-električne propulzije najčešće se ugrađuje 4-6 dizel-generatora, iznimno kod velikih brodova za bušenje podmorja gdje njihov broj može biti i do 8 jedinica. Prilikom proizvodnje električne energije, namjera je pokretanjem i zaustavljanjem generatora ovisno o opterećenju držati sve pogonske motore koji su u radu što je bliže moguće

optimalnoj točki opterećenja. Samo upravljanje proizvodnjom električne energije odnosi se na automatsko pokretanje ili zaustavljanje dizel-generatora ovisno o trenutnom opterećenju, nastanku kvara ili ispada elektroenergetskog sustava, na automatsku sinkronizaciju generatora, raspodjelu opterećenja u paralelnom radu, kontrolu napona i frekvencije te koordinaciju upravljačkih krugova i zaštitnih funkcija dizel generatora [8]. Kako bi se osiguralo dovoljno generatora na brodskoj mreži tako da rezerva snage može pokriti sva iznenadna odstupanja u opterećenju a da se pritom ne poremeti stabilnost sustava, algoritmi sustava upravljanja električnom energijom tradicionalno imaju implementiranu funkciju za automatsko pokretanje ili zaustavljanje dizel generatora ovisno opterećenju. Ukoliko prilikom eksploatacije sustav radi preko odvojenih sabirnica, tada će funkcija automatskog pokretanja ili zaustavljanja generatora djelovati kao dva zasebna sustava upravljanja električnom energijom, svaki na jednoj strani mreže. Da bi se odredili uvjeti za pokretanje i zaustavljanje dizel generatora, potrebno je poznavati sigurno radno područje u kojem se mora držati potrošnja za različit broj generatora na mreži.

Regulacija napona i podjela jalove snage između paralelno spojenih generatora se vrši promjenom struje uzbude preko automatskog regulatora napona, dok je za održavanje stabilnosti frekvencije i raspodjelu radne snage kod paralelnog rada zadužen regulator broja okretaja pogonskog dizel motora. Regulacija struje uzbude i broja okretaja na najnižoj razini je u pravilu realizirana pomoću PID regulatora bez obzira na primijenjenu metodu raspodjele opterećenja. Zbog dominacije elektromotornih pogona u ukupnoj potrošnji, prividna snaga koju generatori predaju mreži uvijek je kombinacija radne snage i jalove snage. Radna snaga manifestira se kroz koristan rad i gubitke što zahtijeva potrošnju goriva. S druge strane, jalova snaga potrebna je za održavanje magnetskih i električnih polja u električnim strojevima i kabelima te ne zahtijeva potrošnju goriva, ali reaktivna struja pridonosi povećanju gubitaka u generatorima i ima značajan utjecaj na ekonomičnost električne centrale [8].

4.2. Upravljanje potrošnjom električne energije

Upravljanje potrošnjom električne energije se odnosi na nadzor snage opterećenja te koordinaciju ograničenja potrošnje, potom rasterećenja i blokiranja manje važnih potrošača na temelju raspoložive rezervne snage [8]. Potrošnja električne energije na brodovima se odnosi na sustave propulzije, tehničke sustave (bušenje, polaganje kablova ili cijevi, ...), pomoćne strojeve, palubne uređaje, hotelske sustave, sustave za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju (engl. Heating Ventilation and Air Condition, HVAC) te upravljačke i komunikacijske sustave. Svaki plovni objekt u bilo kojem trenutku treba imati na raspolaganju dostatnu

količinu električne energije, međutim ponekad nastaju situacije gdje postoji nedostatak energije koji je najčešće uzrokovan uključivanjem velikih potrošača na brodsku mrežu ili zbog ispada proizvođača energije (dizel-generatora) s brodske mreže. Frekvencija će početi padati ukoliko se nastala situacija adekvatno ne ispravi i drastično se povećava mogućnost ispada elektroenergetskog sustava. Sustav upravljanja električnom energijom se sastoji od dvije razine kojima je svrha optimalno upravljanje elektroenergetskim sustavom i potrošnjom goriva. Nižu razinu čine regulatori, sklopne ploče, regulatori brzine vrtnje, prekidači i sl. a višu razinu algoritmi sustava upravljanja električnom energijom. Niža razina štiti opremu dok je viša razina zaslužna za koordinaciju kako bi se uz optimalan rad prevenirao ispad elektroenergetskog sustava. Sklopne ploče na nižoj razini kontroliraju sustav zaštite (zaštita od premale/prevelike frekvencije, zaštita od povratne snage generatora, zaštita od kratkog spoja) te izračunavaju aktivnu i jalovu snagu, frekvenciju, napon i onda takve izračunate signale šalju u postaju sustava upravljanja električnom energijom. Kod prekidača postoje zaštitni releji s različitim vremenskim zakašnjenjima, ovisno o njihovoj lokaciji u postrojenju. Vremenska zakašnjenja su pažljivo izmjerena kako bi se neispravna oprema mogla isključiti bez štetnog utjecaja na ostalu opremu. Regulatori broja okretaja na dizel-generatorima kontroliraju polužje visokotlačnih pumpi goriva i na taj način održavaju stabilnost frekvencije napona brodske mreže i raspodjelu opterećenja između pojedinih generatora, dok automatski regulatori napona smješteni u dizel-generatorima služe za kontrolu napona i raspodjelu reaktivnog opterećenja koje se postiže promjenom strujnog polja. Kako bi se spriječili negativni ishodi, sustav upravljanja električnom energijom koristi signale raspoložive rezervne snage na način da zbraja raspoloživu snagu dizel-generatora i usmjerava je prema primarnim potrošačima. Vrijeme reakcije je obično unutar desetinke sekunde. Osim navedenog, sustav upravljanja električnom energijom također na temelju raspoložive rezervne snage po potrebi prihvaća ili odbija opterećenje velikih potrošača na brodskoj mreži. Uz raspoloživu rezervnu snagu koristi se još i brzo smanjenje opterećenja (engl. Fast Load Reduction, FLR) koje postavlja ograničenja snage na frekvencijske pretvarače propulzijskih elektromotora ili ostalih uređaja s frekvencijskim pretvaračima. Frekvencijski pretvarači reagiraju unutar milisekundi uz pomoć brzih elektroničkih sklopova. FLR se također često koristi kod nastanka kvarova kao što su ispad generatora ili iskapčanje prekidača koji povezuje sabirnice. FLR se aktivira pomoću signala nakon kojeg u roku deset milisekundi smanjuje potrošnju energije. U ekstremnim situacijama kada raspoloživa rezervna snaga i brzo smanjenje opterećenja nisu dostatni, provodi se otklanjanje opterećenja na način da se sa brodske mreže potpuno isključe potrošači kako bi se smanjila potrošnja energije, no ovakva

metoda je drastična zbog potrebnog vremena za ponovno pokretanje sustava. Sustav upravljanja električnom energijom također u algoritmima ima programirano da ovisno o eksploatacijskim zahtjevima i konfiguraciji broda može ograničavati povećanje snage pojedinih potrošača kako bi se izbjegla velika opterećenja na dizel-generatorima[10].

4.3. Upravljanje tokovima snaga

Glavne sklopne ploče u brodskim sustavima su uglavnom visokonaponske (HV) ili niskonaponske (LV) sklopne ploče. Projektirane su prema vrijednosti napona na njima i vrijednosti struje kratkog pomoću kojih se odredi maksimalna dozvoljena struja koja nastaje kod pojave kratkog spoja a da je sklopna ploča može izdržati bez štetnih posljedica. Prilikom određivanja dozvoljene vrijednosti struje kratkog spoja i njezinog limitiranja kod nekih sustava se također i određuje koliki je maksimalni dozvoljeni broj za istovremeni rad dizel-generatora na brodskoj mreži. Sklopne ploče su najčešće podijeljene u dvije ili više sekcija kako bi se osigurala bolja redundancija sustava, što prvenstveno ovisi o tipu i eksploatacijskom profilu plovnog objekta te zahtjevima registra. Podjela na više sekcija ili rad preko jedne sklopne ploče se postiže međusobnim spajanjem ili odvajanjem sabirnicama (engl. Busbar Breaker) [17].

Zahtjevi registra nalažu da kvar na jednoj sklopnoj ploči ili jednom dijelu sklopne ploče ne smije utjecati na rad ostalih sklopnih ploča ili ostalog dijela sklopne ploče na kojoj se kvar pojavio. Kod najstrožih zahtjeva redundancije u slučaju pojave požara ili poplave moraju postojati vodootporni i vatrootporni razdjelnici kako bi se pojedine sabirnice sklopnih ploča mogle razdvajati [1]. U konfiguraciji rada s dvije sklopne ploče, koje imaju jednake kapacitete generatora i jednako opterećenje na obje strane, u slučaju ispada jedne od njih maksimalni gubitak kapaciteta generatora i opterećenja mreže može iznositi 50 %. Kako bi se izbjegli visoki troškovi takvih konfiguracija sustav će se često dijeliti na tri ili četiri sekcije, što ujedno smanjuje dodatne instalacije. U skladu s time prebacivanjem prekidača i omogućavanjem spajanja generatora ili opterećenja na dvije različite sekcije za posljedicu ima slične učinke smanjenja troškova. Za vrijeme navigacije sklopne ploče su najčešće povezane, što omogućava fleksibilnost kod upravljanja potrošnjom električne energije. Prijelazni momenti opterećenja raspoređeni su na veći broj dizel-generatora te se najoptimalniji broj jedinica može se spojiti na mrežu. Kod DP plovnih objekata klase 3, uobičajen je rad s odvojenim sabirnicama kako bi se spriječio ispad jedne od sekcija, međutim današnji propisi i pravila omogućuju rad sa spojenim sabirnicama, ako su zaštitni krugovi konstruirani tako da otkrivaju i na vrijeme izoliraju neispravne elemente sustava bez ispada ispravnih dijelova.

Ovisno o snazi i tipu potrošača postoji nekoliko naponskih nivoa u distribuciji električne energije što je i prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Naponski nivoi u distribucijskom sustavu

Naponski nivoi	Vrijednosti napona	Primjena
HV	11 kV 6.6 kV	Generatori, propulzori, servisni transformatori
LV	690 V 480 V 440 V 380 V	Pumpe, klimakomore, servisni transformatori, oprema u nuždi
Rasvjeta i mala snaga	220 V 208 V 110 V	Rasvjeta, jednofazni motori
Baterijski sustav	110 Vdc 24 Vdc	Sustav navigacije, DP sustav, upravljanje propulzorima

Izvor: Izradio student prema [17]

Prilikom projektiranja naponskih vrijednosti broskog sustava za distribuciju električne energije veoma je važan faktor ukupna količina snage dobivene iz dizel-generatora. Ako snage prelaze 10 MW najčešće se koriste visokonaponski sustavi dok se u slučaju manje snage, najčešće ispod 10 MW koriste niskonaponski sustavi. Obje izvedbe imaju određene prednosti i nedostatke. Visokonaponska oprema ima veću cijenu ali ta razlika se može kompenzirati korištenjem kabela s manjim presjekom i korištenjem opreme koja podnosi niže struje kratkog spoja budući da je kod visokog napona potrebna manja jakost struje, dok niskonaponska oprema ima nižu cijenu, nedostatak je određivanje opreme koja podnosi visoke vrijednosti struja kratkog spoja te nemogućnost istovremenog rada svih dizel-generatora.

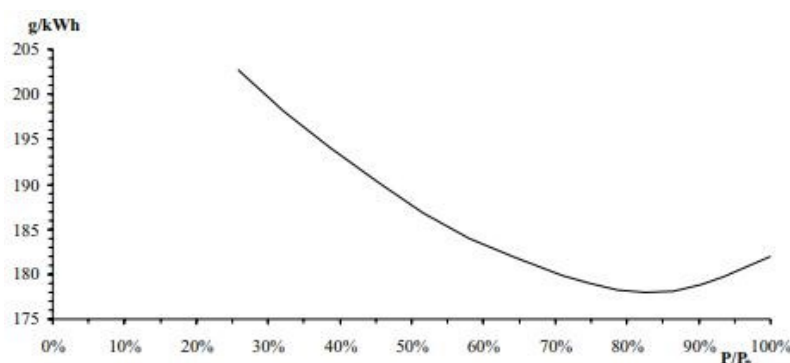
Prekidači (engl. Circuit breakers) služe za spajanje odnosno uključivanje i isključivanje dizel-generatora na sklopne ploče. Postoje razne izvedbe prekidača od kojih su u najčešćoj primjeni zračni prekidači (engl. Air Circuit Breakers, ACB) a služe za spajanje potrošača većih snaga i spajanje generatora. Za potrošače manjih snaga najčešće se koriste prekidači s lijevanom jezgrom (engl. Moulded Case Circuit Breakers, MCCB). Prekidači su međusobno spojeni na način koji omogućava sustavu upravljanja električnom energijom da daljinski kontrolira i upravlja sa njihovim radom. Sklopna ploča koja se koristi u slučaju nužde (engl. Emergency switchboard, ESB) služi za napajanje potrošača koji su potrebni u slučaju nužde. Prilikom stabilnog rada elektroenergetskog sustava sklopna ploča u nuždi se

napaja sa glavne sklopne ploče (engl. Main switchboard, MSB) sve do trenutka ispada elektroenergetskog sustava u kojem se automatski pokrene dizel-generator za nuždu i osigura daljnje napajanje.

Svrha transformatora je izolirati različite dijelove sustava distribucije električne energije na nekoliko sekcija, obično kako bi se omogućilo više razina napona, a ponekad i za fazni pomak. Transformatori s faznim pomakom mogu se koristiti za napajanje frekvencijskih pretvarača (npr. pretvarača propulzijskih elektromotora), kako bi smanjili strujne poremećaje na način da eliminiraju najdominantnije harmonične poremećaje struje, što ujedno i smanjuje poremećaje napona generatora i ostalih potrošača. Transformatori također imaju učinak prigušenja visoke frekvencije, posebno ako je transformator opremljen s uzemljenom bakrenom izolacijom između primarnog i sekundarnog namota. Između ostalog jedna od svrha transformatora je da omogući i izolira podjelu elektroenergetskog sustava na različite razine napona. Takva uloga se najviše odnosi na međusobno spajanje glavnih sklopnih ploča s ostalim sklopnim pločama, transformiranje napona za napajanje velikih potrošača.

5. Eksploatacijski problemi elektroenergetskih sustava

Tijekom eksploatacije potrošnja propulzijskog sustava ima dominantnu ulogu u ukupnoj potrošnji i najčešće zahtjeva rad više dizel-generatora u paralelnom radu, kako bi se održala stabilnost elektroenergetskog sustava. Slika 9. prikazuje graf s kojeg je vidljivo da se najbolja ekonomičnost i efikasnost elektroenergetskog sustava postiže dok pogonski strojevi generatora (dizel motori) rade pri optimalnom opterećenju koje iznosi oko 85 % maksimalne nazivne snage.



Slika 9. Specifična potrošnja goriva dizel-motora

Izvor: [6]

Rad pri malim opterećenjima znatno utječe na povećanje specifične potrošnje i povećanje emisije štetnih plinova. Unatoč navedenim prednostima optimalnog opterećenja pogonskih strojeva, elektroenergetski sustav postaje osjetljiviji na pojave koje za rezultat mogu imati ispad generatora, odnosno skokovito povećanje opterećenja na preostalim generatorima, aktiviranje odgovarajućih zaštita i najvjerojatnije potpuni ispad sustava.

5.1. Otpornost sustava upravljanja električnom energijom na kvarove

Najčešći kvarovi koji dovode do ispada elektroenergetskog sustava su kvarovi na pogonskom stroju generatora i njegovim pomoćnim sustavima, s posebnim naglaskom na kvarove regulatora broja okretaja i automatskog regulatora napona (engl. Automatic Voltage Regulator, AVR). Gotovo ih je nemoguće predvidjeti, a upravo su oni razlog ispada nekoliko ili čak svih generatora s mreže zbog negativnih efekata nejednake raspodjele radne odnosno jalove snage. Najveći izazovi pri optimalnom radu sustava sa spojenim sabirnicama su: vrijeme odziva sustava za prevenciju ispada i smanjenje opterećenja, harmonička izobličenja, tranzijentne pojave, otpornost regulatora broja okretaja i automatskog regulatora napona na

kvarove, vrijeme otklanjanja eventualnog kvara te rad u ekstremnim vremenskim uvjetima. Dosadašnja istraživanja i primijenjena rješenja u svrhu povećanja iskoristivosti i smanjenja rizika od ispada elektroenergetskog sustava na plovnim objektima bazira se na algoritamskim metodama koje su instalirane u sustave upravljanja električnom energijom. Primjenom već spomenutih električnih zaštita i metoda koje povećavaju stabilnost brodske električne mreže ne mogu se pravovremeno predvidjeti i spriječiti kvarovi koji nastaju na dizel-generatorima, točnije njihovim regulatorima broja okretaja i automatskim regulatorima napona. Jedno od rješenja navedenih problema bi mogla biti upotreba skladišta energije koja bi u slučaju ispada jednog od dizel-generatora, u relativno kratkom vremenu preuzela potreban dio opterećenja do trenutka sinkronizacije generatora u pričuvi i na taj način spriječila ispad elektroenergetskog sustava.

5.2. Prevencija ispada elektroenergetskog sustava

Ispadi elektroenergetskih sustava obično su uzrokovani kratkim spojevima, preopterećenjima ili greškama u sustavu odgovornom za raspodjelu aktivnog ili reaktivnog opterećenja. Zaštita elektroenergetskog sustava osigurava se pravilnim odabirom i primjenom elektroničkih instrumenata i zaštitnih sustava koji će selektivno upravljati sustavom izolirajući nastale greške i kvarove te na taj način sprječavati veća oštećenja ili štetne posljedice. Važno je napomenuti da se selektivno upravljanje temelji na stacionarnim proračunima, postavkama i tolerancijama instrumenata i zaštitnih uređaja pa se stoga moraju uzeti u obzir i pojave raznih oscilacija na broskoj mreži (npr. oscilacije u radu dizel-generatora) što za uzrok mogu imati neselektivno djelovanje sustava zaštite. Preopterećenja sustava se dešavaju kada su kapaciteti proizvodnje električne energije manji od potreba električne brodske mreže. Do pojave preopterećenja može doći na nekoliko načina:

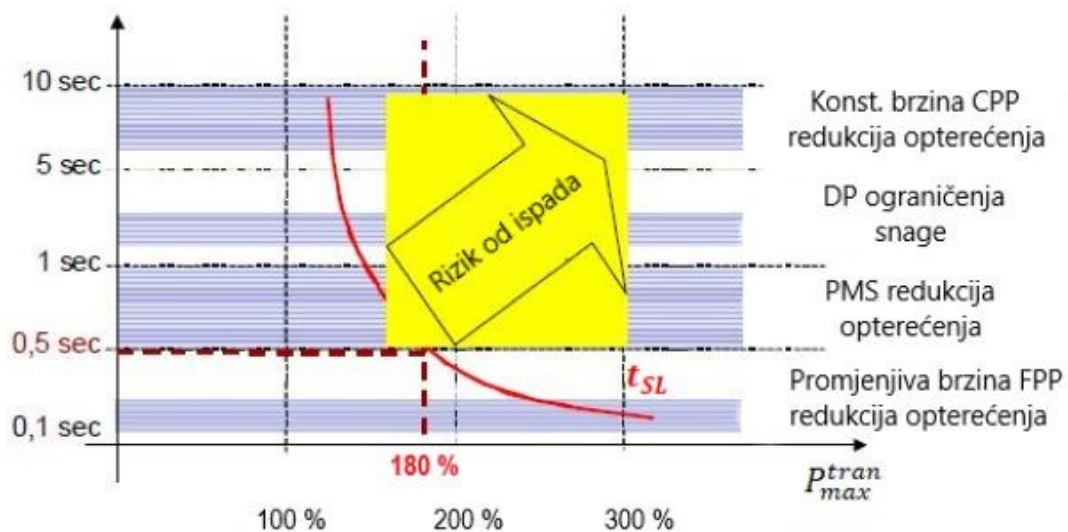
- Prekidač strujnog kruga na neispravnom generatoru je isključen: zbog kratkog spoja ili greške uzemljenja opterećenje sustava se prenosi na preostale generatore u radu;
- Dugotrajno preopterećenje pogonskog motora: kada je opterećenje motora veće od njegove nazivne snage generator se može pregrijati. Generator proizvodi veću količinu struje te se povećava rizik od kratkog spoja. Takav rad pogonskog motora u budućnosti može povećati sklonost kratkom spoju i povećanju razvijanja mehaničkih kvarova;

- Kvar pogonskog motora: iako se isključivanje pogonskog motora može predvidjeti u razumnom roku (alarm pred-upozorenja), može doći do nekih grešaka koje se mogu pojaviti neočekivano;
- Funkcionalnost sustava upravljanja električnom energijom i rada elektroenergetskog sustava: kada je raspoloživa snaga smanjena, sustav će pokrenuti nove jedinice i / ili ograničiti opterećenje na potrošačima. Preopterećenje se može dogoditi ako funkcionalnost sustava nije na prihvatljivoj razini ili uslijed grešaka unutar samog sustava.

Važna funkcija sustava upravljanja električnom energijom koja povećava ukupne mogućnosti sprječavanja zamračenja, naziva se alarmom prije upozorenja. To je funkcija koja služi za sprječavanje naglog gubitka pogonskog motora. Alarm pred-upozorenja treba automatski pokrenuti startanje sljedećeg raspoloživog generatora ukoliko se pojave bilo kakvi uvjeti koji mogu dovesti do granice isključivanja (engl. Shut-down limit) pogonskog motora [11]. Promatrajući sliku 10. zamjetno je da je za različite sustave unutar dizel-električne propulzije vrijeme ispada elektroenergetske mreže uslijed aktiviranja pod frekvencijske zaštite koja se aktivira na granici od - 10% normalne brzine vrtnje dizel-generatora, biti najkraće kod propulzijskog sustava gdje se frekvencijskim pretvaračem postiže promjenjiva brzina vrtnje porivnog elektromotora i propelera s fiksnim korakom, a najduže vrijeme aktiviranja zaštite će biti kod propulzijskog sustava s konstantnom brzinom vrtnje i propelerom s promjenjivim korakom. Pojedini znanstvenici koji se bave ovim područjem došli su do zaključka da sustav za prevenciju ispada i smanjenje opterećenja mora reagirati najmanje unutar vremenskog perioda od 500 milisekundi za slučaj dva paralelno spojena generatora (pod pretpostavkom da sustav radi sa spojenim sabirnicama, da su generatori opterećeni s 80 % nazivne snage te da se pogonski stroj generatora automatski gasi kod 110 % nazivnog opterećenja kako zahtijevaju pravila registra. Povećanjem broja generatora u paralelnom radu taj vremenski period se neznatno povećava i rijetko prelazi 2-3 sekunde [8].

U slučaju iznenadnog ispada jednog od dva dizel-generatora koji su na mreži opterećenje se prebacuje na preostali generator. Za primjer, ako su dva jednako opterećena generatora na brodskoj električnoj mreži svaki sa 80 % nazivne snage, znači da će u slučaju ispada jednog od njih opterećenje na preostalom porasti na 160 %. Za pogonski dizel motor limit

maksimalnog nazivnog opterećenja je 110 %, nakon čega se motor zaustavlja. Uslijed takvih okolnosti frekvencija na preostalom generatoru počinje padati i kada dostigne vrijednost od - 10 % normalne brzine dolazi do pod frekvencijske zaštite koja otvara sklopku i na taj način izbacuje i preostali generator s brodske mreže, što za posljedicu ima ispad elektroenergetskog sustava. Kako bi se izbjegao potpuni ispad elektroenergetskog sustava FLR zaštita mora smanjiti opterećenje na potrošačima prije nego se dogodi frekvencijski pad (npr. kod porivnih elektromotora unutar 500 milisekundi), no budući da kod različitih sustava zaštite brzina odziva može varirati, smatra se da je bolje uvesti sigurnosnu granicu i odrediti neku višu vremensku vrijednost prije pojave pod frekvencije, kao npr. $t_{SL} = 0.6$ sekundi [12].



Slika 10. Vrijeme odziva kod prevencije ispada elektroenergetskog sustava

Izvor: [12]

5.3. Optimalna proizvodnja električne energije

Pod optimalnom proizvodnjom električne energije može se govoriti i o optimalnoj potrošnji goriva, odnosno o što manjoj razlici u specifičnoj potrošnji goriva (g/kWh) dizel-generatora koji su u radu i spojeni na brodskoj električnoj mreži. U tu svrhu razvijena je tablica startanja dizel-generatora s obzirom na opterećenje mreže a formirana je pomoću izraza

$$P_{start}(k) = \frac{P_L(k)}{k} \Rightarrow N_{on} = k + 1. \quad (5.3)$$

Jednadžba 5.3. prikazuje da će opterećenje brodske električne mreže biti podjednako raspodijeljeno po dizel-generatorima koji su u radu, odnosno porastom vrijednosti $P_L(k)$ koja predstavlja opterećenje mreže, također rasti i vrijednost $P_{start}(k)$ koja predstavlja opterećenje generatora, sve dok se ne dostigne krajnji limit, najčešće određen od proizvođača, pri kojem se starta idući generator ($N_{on} = k + 1$). Također važno je uzeti u obzir iduće faktore:

- Područje kontinuiranog rada dizel motora, za koje proizvođači preporučuju da ne bude niže od 15 % nazivne snage, niti na maksimalnom nazivnom opterećenju od 110 % u trajanju dužem od jednog sata.
- Zahtjevi prevencije ispada elektroenergetskog sustava koji ovisno o području rada dizel motora na mreži, ubacuju slijedeći generator ako preopterećenje iznosi duplo više od opterećenja generatora koji je trenutno na mreži. Npr. ukoliko se smatra sigurnosnim ograničenjem rad motora pri 75 % opterećenja, sustav prevencije ispada će ubaciti idući generator na mrežu, kad je prethodni na 150 % opterećenja ili više.
- Konačno valja uzeti u obzir koliko navedena rješenja optimizacije utječu na specifičnu potrošnju goriva tokom jedne godine. S ovog aspekta potrebno je uzeti u obzir i operativni profil plovila koji u konačnici određuje koji će od prethodno navedenih faktora, ili njihovih kombinacija biti prioritet [12].

6. Zaključak

Razvojem tehnoloških dostignuća dizel-električna propulzija je postala standard za određene vrste brodova. Prilikom projektiranja elektroenergetskog sustava s električnom propulzijom uključena su razna znanstvena područja kao što su tehnologije električnih strojeva, automatskog upravljanja, brodskih električnih mreža, energetske elektronike itd. Takvi sustavi su u pravilu veoma složeni kako zbog specifičnosti potrošnje i proizvodnje električne energije tako i zbog zahtjeva klasifikacijskih društava na otpornost prema kvarovima. Složenost takvih sustava je bila glavna motivacija pisanja ovog rada, s namjerom da se na osnovnoj razini omogući upoznavanje s elektroenergetskim sustavom dizel-električne propulzije. U radu su obrađene najvažnije značajke upravljačkih sustava u konceptu dizel-električne propulzije misleći pritom na optimalnu proizvodnju i potrošnju električne energije, problematiku elektroenergetskog sustava točnije upravljanje i raspodjela električne energije te ograničenja koja su određena od strane klasifikacijskih društava.

Govoreći o smanjenju potrošnje goriva i poboljšanju redundancije napajanja u slučaju nužde važno je spomenuti razvoj i primjenu tehnologije skladišta energije koja mogu povećati stabilnost i funkcionalnost plovnih objekata koji koriste električnu propulziju na način da omoguće rad dizel-generatora u području oko minimuma krivulje specifične potrošnje goriva te mogu smanjiti broj potrebnih dizel-generatora na mreži. Unatoč navedenim prednostima, zbog nedefiniranog ekonomskog učinka ovisno o tipu i eksploatacijskom profilu plovnog objekta tehnologija skladišta energije još uvijek nije pronašla širu primjenu, čime se otvara prostor za daljnja znanstvena istraživanja i razvoj novih metoda primjene.

Najvažniju ulogu u optimalnom i stabilnom radu elektroenergetskog sustava i njegovih električnih zaštita imaju upravljački algoritmi PMS sustava kojima je zadaća da razlikuju kratke prijelazne pojave od stvarnih kvarova, istovremeno održavajući sigurnost sustava. Ustanovljeno je da se pravovremeno rasterećenje mreže u slučaju ispada jednog od dizel-generatora najbolje postiže kod propulzijskih sustava gdje se koriste porivni elektromotori koji su napajani pretvaračima frekvencije zbog njihove mogućnosti gotovo trenutnog prekida napajanja prema porivnim elektromotorima što također govori o važnosti upravljačkog sustava električne propulzije u kontekstu prevencije od ispada elektroenergetskog sustava i optimizacije potrošnje goriva. Prvenstveno zbog svojih tehnoloških prednosti te značajnog utjecaja na optimalnu potrošnju goriva i emisije štetnih ispušnih plinova električna propulzija pronalazi sve veću primjenu u pomorskoj industriji što također potvrđuje kontinuirani razvoj

novih područja istraživanja krenuvši od modifikacije postojećih algoritama PMS sustava, integracija skladišta energije, nove vrste transformatora, novi koncepti propulzora, pa sve do razvoja novih izvora električne propulzije kao što su gorive ćelije.

Nadalje može se zaključiti da je dizel-električna propulzija eksploatacijski gledano, kvalitetnije rješenje od klasične dizel-mehaničke propulzije ponajviše zbog manevarskih sposobnosti pri svim režimima plovidbe, potrošnji goriva u svim eksploatacijskim profilima, manjeg štetnog utjecaja na okoliš te boljeg iskorištavanja broskog prostora. Iako se uzmu u obzir povećani investicijski troškovi pri izgradnji brodova s električnom propulzijom za razliku od brodova s dizel-mehaničkom propulzijom ne smije se zanemariti činjenica kako će se u skoroj budućnosti takvi troškovi sve više smanjivati zbog snažne konkurencije velikih svjetskih proizvođača električne opreme i sve veće serijske proizvodnje uslijed rasta samog tržišta. Sve stroži propisi Međunarodne pomorske organizacije (engl. International Maritime Organization, IMO) koji se odnose za područja kontrole emisije štetnih plinova (engl. Emission Control Areas, ECA), gdje je količina sumpora u brodskom gorivu ograničena na iznos od 0,1 % te doneseni novi propis koji glasi da se do 2020. godine udio sumpora u brodskom gorivu na globalnoj razini mora smanjiti s današnjih 3,5 % na 0,5 % sumpora u gorivu, ide u prilog razvoju scenarija gdje bi postojeći brodovi s klasičnom dizel-mehaničkom propulzijom koji imaju značajno veću potrošnju goriva postali sve manje konkurenti brodovima s električnom propulzijom.

LITERATURA

- [1] Alf Kare Adnanes, *ABB - Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*, Oslo, Norway, 2003.
- [2] Vito Jakulica, *Alternativne tehnologije poriva brodova*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, Hrvatska, 2018.
- [3] Velimir Ozretić, *Brodski pomoćni strojevi i uređaji*, Split, Hrvatska, 1996.
- [4] Damir Radan, *Uvod u hidrodinamiku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, Siječanj 2004.
- [5] Božidar Skalicki, Josip Grilec, *Brodski električni strojevi i uređaji*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [6] Dubravko Vučetić - Ivan Čekada 2006, *Eksploatacijske prednosti električne propulzije*
- [7] Mukund R. Patel, *Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy*, 2012.
- [8] Aleksandar Cuculić, *Tehničko ekonomska analiza primjene skladišta energije u elektroenergetskim sustavima plovni objekata s dinamičkim pozicioniranjem*, Doktorski rad, Rijeka, 2015.
- [9] Asgeir J. Sorensen, *Marine Control Systems Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures*, Lecture notes, NTNU, Trondheim, Norway, 2012.
- [10] Torstein Ingebrigtsen Bø, *Scenario and Optimization-Based Control of Marine Electric Power Systems*, Doctoral thesis, NTNU, Trondheim, Norway, 2016.
- [11] Damir Radan, *Integrated Control of Marine Electrical Power Systems*, PhD thesis, Dept. Engineering Cybernetics, NTNU, Trondheim, Norway, 2000.
- [12] Damir Radan, T. A. Johansen, A. J. Sorensen, A.K. Adnanes, *Optimization of Load Dependent Start Tables in Marine Power Management Systems with Blackout Prevention*, NTNU, Trondheim, Norway
- [13] Kees Kuiken, *Diesel engines for ship propulsion and power plants*, Onnen, Netherland, 2008.
- [14] Claire Soares, *Gas Turbines, A Handbook of Air, Sea and Land Applications*, United States, 2007

- [15] Jan Fredrik Hansen, A.K.Adnanes, T.I.Fossen, *Modelling and control of Marine Power Systems*, Trondheim, Norway, 2001.
- [16] MAN, *Diesel-electric propulsion plants guideline*
- [17] Monika Černe, *Elektropropulzija*, Veleučilište u Rijeci, Rijeka, 2016.

POPIS SLIKA

- Slika 1. Direktni prijenos snage kao standard kod sporookretnih dvotaktnih motora s križnom glavom [13]
- Slika 2. Sporookretni dvotaktni motor s križnom glavom [13]
- Slika 3. Shematski prikaz parno turbinskog postrojenja [2]
- Slika 4. Plinska turbina s otvorenim procesom [2]
- Slika 5. Bilanca snage dizel električne propulzije [6]
- Slika 6. Tipični elektroenergetski sustav dizel-električne propulzije [15]
- Slika 7. Komponente dizel električne propulzije [16]
- Slika 8. Vrste skladišta električne energije [8]
- Slika 9. Specifična potrošnja goriva dizel-motora [6]
- Slika 10. Vrijeme odziva kod prevencije ispada elektroenergetskog sustava [12]

POPIS TABLICA

- Tablica 1. Naponski nivoi u distribucijskom sustavu [17]

SAŽETAK

Upravljački sustavi u konceptu dizel-električne propulzije

Dizel-električna propulzija je postala industrijski standard za brodove kao što su brodovi za prijevoz nafte i plina, putnički brodovi za kružna putovanja, trajekti, plovila sa sustavom za dinamičko pozicioniranje, ratni brodovi te brodovi raznih specijalnih namjena. U radu je naveden i prikazan uvod u brodske elektroenergetske sustave te opći pregled osnovnih karakteristika različitih brodskih sustava propulzije. Posebni naglasak stavljen je na dizel-električnu propulziju, njenu strukturu te različite varijante sustava dizel-električne propulzije s kakvima se susrećemo na brodovima. Napisan je kratki pregled razvoja tehnologije skladišta energije budući da postoji sve veći interes industrije za njihovom primjenom, najčešće na plovnim objektima koji koriste dizel-električnu propulziju i sustave dinamičkog pozicioniranja. Kao najznačajniji segment u okviru dizel-električne propulzije obrađen je sustav upravljanja električnom energijom te su definirane njegove glavne funkcije. Uočeni su problemi i kvarovi koji se pojavljuju tijekom eksploatacije te su istražene postojeće metode za sprečavanje ispada elektroenergetskog sustava. U konačnici skrenuta je pažnja i na odnos optimalne proizvodnje električne energije i specifične potrošnje goriva dizel-generatora.

Ključne riječi:

Elektroenergetski sustav, dizel-električna propulzija, sustav upravljanja električnom energijom.

ABSTRACT

Control systems in the concept of diesel-electric propulsion

Diesel-electric propulsion has become a standard for ships like oil and gas transport ships, cruise ships, ferries, boats with dynamic positioning systems, warships and ships of various special purposes. The paper work presents introduction to marine electrical power systems and a general overview of the basic characteristics of various propulsion systems. Particular emphasis is placed on the diesel-electric propulsion, its structure and various types of the diesel-propulsion system we encounter on ships. There is a brief insight into the development of energy storage technology as there is an increasing interest in the industry for their application, most often on floating facilities that use diesel power propulsion and dynamic positioning. As the most important segment of the diesel-electric propulsion system, the power management system has been elaborated and its main functions are defined. Problems and failures that occurred during the exploitation were observed and existing methods for preventing the failure of the power system were explored. Finally, attention has been paid to the optimal ratio of electricity generation and specific fuel consumption of the diesel generators.

Keywords:

Electric power system, diesel-electric propulsion, power management system.