

Mr. sc. Dubravko Vučetić

Pomorski fakultet u Rijeci

Studentska 2

51000 Rijeka

Ivan Čekada, ing.

K. Kranjca 46/3

52220 Labin

Pregledni članak

UDK: 629.5.03

621.313

621.436.1

Primljeno: 18. travnja 2006.

Prihvaćeno: 08. svibnja 2006.

EKSPLOATACIJSKE PREDNOSTI ELEKTRIČNE PROPULZIJE

U radu su obrađene eksploatacijske prednosti električne propulzije opremljene posljednjom generacijom POD-ova pogonjenih elektromotorima s permanentnim magnetima u odnosu na dizel-mehaničku propulziju. Analiza je provedena na području potrošnje goriva, raspoloživosti, manevarskih sposobnosti i utjecaja na okoliš. Usporedna analiza potrošnje goriva provedena je na osnovi specifične potrošnje prema razvijenoj snazi na osovini motora i prema potrošnji po prijađenom putu prema brzini plovidbe. Svi obrađeni parametri pokazuju nedvojbene eksploatacijske prednosti električne propulzije s POD-ovima, ne samo za brodove koji se zbog specifičnog eksploatacijskog profila već tradicionalno opremaju električnom propulzijom, već i za gotovo sve tipove brodova. Zbog eksploatacijskih prednosti, aktualnih trendova u zaštiti okoliša, sve bržeg rasta cijene goriva kao i smanjenja investicijskih troškova zbog oštre konkurencije između velikih proizvođača električne opreme, može se s velikom sigurnošću očekivati daljnja ekspanzija električne propulzije unutar svjetske pomorske flote.

Ključne riječi: brod, električna propulzija, potrošnja, manevar, ekologija

1. UVOD

Još od davne 1838. godine kada je Jacobi uspješno predstavio prvo plovilo na električni pogon, električna propulzija je uvijek imala izvjesne eksploatacijske prednosti pred ostalim konfiguracijama pogona, koje su poticale njenu primjenu na pojedinim vrstama brodova. Poput mnogih drugih izuma i električna propulzija je svoju primjenu najprije našla u vojnoj industriji koja je do

kraja 19. stoljeća izgradila veliki broj podmornica s potpuno električnom propulzijom napajanom iz akumulatorskih baterija. Presudne eksploatacijske prednosti električne propulzije tada su očigledno bile tihi rad i mogućnost plovidbe pod vodom bez potrošnje kisika i emisije produkata izgaranja.

Između 1902. i 1910. godine dizel-motori nisu imali mogućnost prekreta pa se električna propulzija nametnula sposobnošću jednostavnog reverziranja poriva. U godinama koje su slijedile, a posebno tijekom 20-tih i 30-tih godina 19. stoljeća, izgrađen je veći broj ratnih i putničkih brodova s turboelektričnom propulzijom. Za izbor električne propulzije presudna je bila sposobnost jednostavnog reverziranja, redukcije broja okretaja i prijenosa vrlo velike snage.

Tijekom II. svjetskog rata porinuto je u SAD-u više od 300 manjih ratnih brodova i 530 tankera s električnom propulzijom pri čemu je iskorištena prednost brže gradnje i riješen problem premalih kapaciteta za proizvodnju reduktora. Pojavom kvalitetnijih dizel-motora, reduktora i vijaka s promjenljivim korakom, električna propulzija sredinom 20. stoljeća privremeno nestaje s trgovačkih brodova, ali se zbog odličnih manevarskih sposobnosti i ekonomičnijeg rada pri malom porivu i dalje intenzivno koristi na ledolomcima i istraživačkim brodovima.

Otkriće tiristora i razvoj reguliranih elektromotornih pogona napajanih iz tiristorskih ispravljača 70-tih, odnosno statičkih pretvarača frekvencije 80-tih godina, omogućili su integraciju brodskog elektroenergetskog sustava, a time i potpuno iskorištenje ukupne instalirane snage pogonskih strojeva za propulziju, prekraj tereta i ostalu potrošnju. Nakon vrlo uspješne zamjene parnog pogona dizel-električnim na „S/S Queen Elizabeth II“ ubrzo su prednosti u vidu povećanja korisnog brodskog prostora, smanjenja potrošnje goriva, tihog i mirnog rada, dobrih manevarskih sposobnosti i visoke raspoloživosti, potakle primjenu istih rješenja i na novoizgrađenim brodovima za kružna krstarenja klase „Fantasy“ i „Princess“. Konceptija integriranog elektroenergetskog sustava konstantne frekvencije i napona s propulzijskim elektromotorima pogonjenim iz statičkih pretvarača danas je standardno rješenje na velikim putničkim brodovima, ali i na plovilima s dinamičkim pozicioniranjem.

Novi zamah električna propulzija dobiva uvođenjem zakretnih podtrupnih potisnika (AZIPOD) početkom 90-tih, koji dodatno potenciraju sve njene eksploatacijske prednosti. Električna propulzija s aktualnom generacijom podtrupnih potisnika, zasnovanom na elektromotorima s permanentnim magnetima, zahvaljujući povećanoj hidrodinamičkoj efikasnosti ima i kod plovidbe maksimalnom brzinom značajno manju potrošnju goriva od dizel-mehaničke propulzije [3, str.13.]. Cilj je ovoga rada da sistematizira i detaljnije analizira eksploatacijske prednosti električne propulzije te ukaže na mogućnosti širenja područja njene primjene.

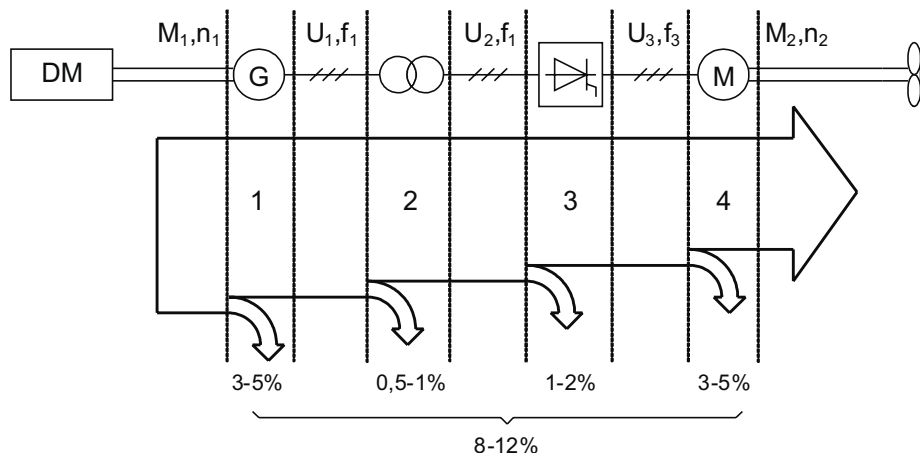
2. POTROŠNJA GORIVA

Iako svi do sada spomenuti učinci električne propulzije utječu na ekonomsku efikasnost broda, zbog direktnog, lako uočljivog utjecaja na smanjenje troškova eksploatacije, smanjenje potrošnje goriva je ipak njen najekspoziraniji pozitivni efekt.

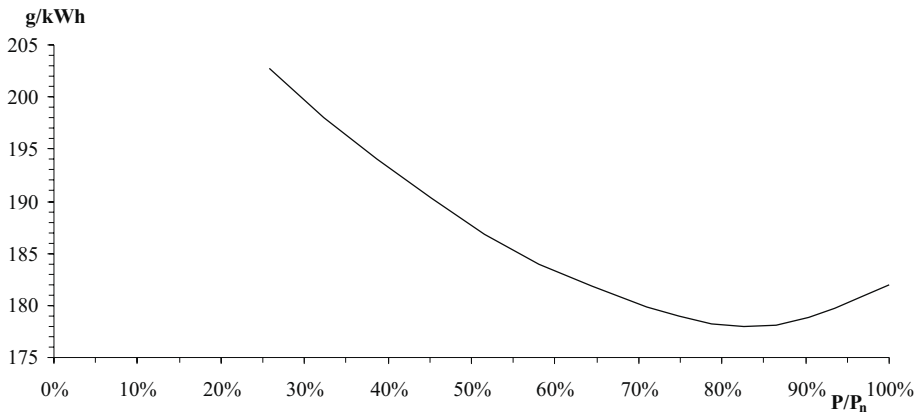
U koncepciji broda s potpuno integriranim elektroenergetskim sustavom (IFEP - Integrated Full Electric Ship), koju karakterizira jedna električna centrala s konstantnom frekvencijom i naponom mreže te regulacija broja okretaja propulzijskih elektromotora pomoću statičkih pretvarača frekvencije, sustav električnog prijenosa snage na brodski vijak pretpostavlja četiri stupnja konverzije energije (Slika 1): (1) mehaničko-električnu konverziju u sinkronim generatorima, (2) transformaciju napona u propulzijskim transformatorima, (3) regulaciju frekvencije i napona u propulzijskim pretvaračima frekvencije i (4) električko-mehaničku konverziju u propulzijskim elektromotorima.

U slučaju manjih plovih objekata, u kojima se zbog male ukupne instalirane snage ne primjenjuje visoki napon, ispada drugi stupanj pretvorbe, ali to zbog vrlo visokog stupnja korisnosti transformatora ($\eta \approx 0,99$) ne poboljšava ukupnu bilancu snage električnog prijenosa, već je zbog nižeg napona, a time i veće struje, te prema tome nižeg stupnja korisnosti generatora, propulzijskih elektromotora i pretvarača frekvencije, naprotiv kvvari.

Iz bilance snage prikazane na slici 1 vidljivo je da se, usprkos vrlo visokom stupnju korisnosti pojedinih elemenata u sustavu električne propulzije, ipak u električnom prijenosu energije do broskog vijka sveukupno izgubi između 8 i 12 % snage [1, str. 7.]. U usporedbi s direktnom mehaničkom propulzijom kod



Slika 1. Bilanca snage propulzije s električnim prijenosom



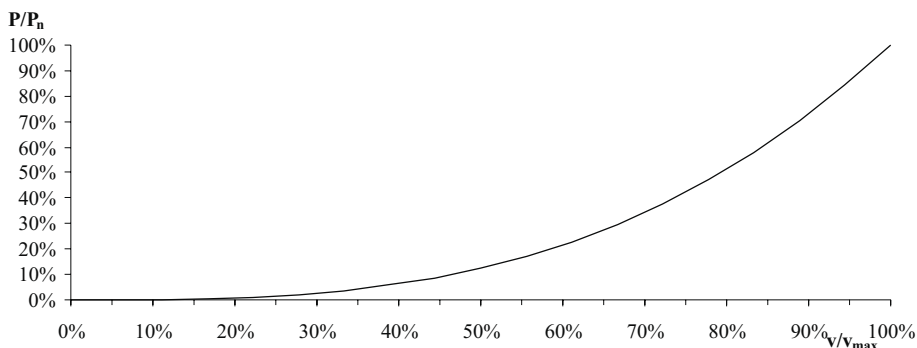
Slika 2. Specifična potrošnja goriva dizel-motora

koje se, zavisno od broja okretaja, duljine osovinskog voda i toga da li je primijenjen reduktor, gubi između 2 i 4% snage [11, str. 7-2], električni prijenos je bez sumnje, energetske gledano, sam po sebi lošiji izbor.

Prednost električne propulzije je međutim sadržana u mogućnosti povećanja stupnja korisnosti na početku i na kraju propulzijskog lanca. Zbog niskog stupnja korisnosti pogonskih strojeva i brodskog vijka, upravo se na spomenutim mjestima može postići najveće smanjenje gubitaka, a time i značajne uštede na troškovima goriva. Preciznije rečeno, električna propulzija omogućuje:

- rad pogonskih strojeva s konstantnim okretajima u području oko optimalnog opterećenja bez obzira na eksploatacijski profil plovila
- veći hidrodinamički stupanj korisnosti.

Na karakterističnom dijagramu specifične potrošnje goriva dizel-motora, prikazanom na slici 2, može se uočiti da se najniža specifična potrošnja, a to znači i najviši stupanj iskorištenja postiže kod približno 80% nazivnog opterećenja. Udaljavanjem od minimuma, krivulja postaje sve strmija što je posebno izraženo kod opterećenja manjih od 50%. Kod direktne mehaničke propulzije sporohodni brodski dizel-motori pri smanjenoj brzini plovidbe rade u nepovoljnom području i tako umanjuju efekte smanjenja potrošnje usporavanjem broda, što je jedan od osnovnih načina optimiranja ekonomskog učinka broda. Otegotna je okolnost da je otpor broda kod malih brzina približno proporcionalan drugoj, a u blizini maksimalne brzine često i petoj potenciji brzine [11, str. 7-6]. Shodno tome, snaga propulzije je približno proporcionalna trećoj, a kod većih brzina i šestoj potenciji brzine, tako da već i relativno malo smanjenje brzine od samo nekoliko čvorova smanjuje snagu propulzije ispod prije spo-



Slika 3. Ovisnost snage poriva o brzini broda

menutih 50% snage pogonskog stroja (Slika 3), kada se specifična potrošnja počinje brže povećavati.

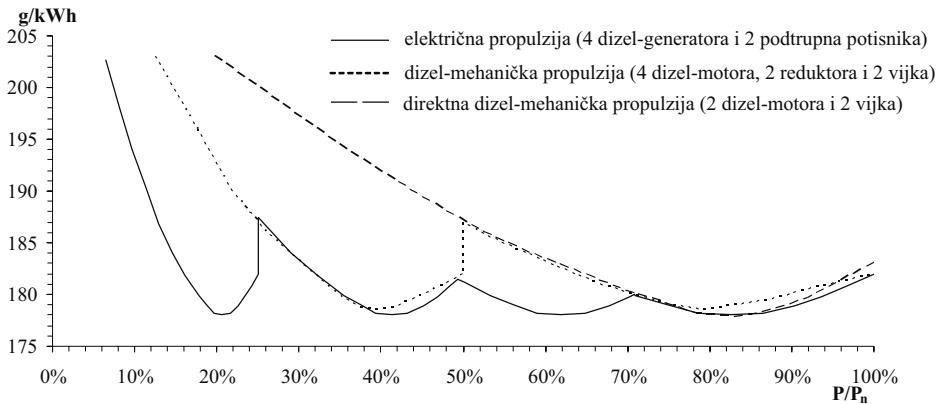
Od mehaničkih rješenja za smanjenje specifične potrošnje goriva kod plovidbe smanjenom brzinom, odnosno povećanje fleksibilnosti pogona, uglavnom se koriste brodski vijak s prekretnim krilima (CPP) i konfiguracija s po dva manja pogonska stroja spojena preko spojki i reduktora na isti brodski vijak što omogućuje korištenje manjeg broja motora pri manjim brzinama.

Metoda smanjenja specifične potrošnje pogonskih strojeva broda s električnom propulzijom svodi se na uključivanje i isključivanje dizel-generatora sukladno potrebnom porivu u pojedinim režimima plovidbe, tako da dizel-motori uglavnom rade pri optimalnom opterećenju i uz konstantan broj okretaja. Povećavanjem broja ugrađenih agregata sužuje se područje njihovog opterećenja, odnosno smanjuje prosječna specifična potrošnja goriva, ali se istovremeno povećava broj sati rada, odnosno troškovi održavanja.

Slika 4 prikazuje usporedbu specifične potrošnje goriva u zavisnosti od ukupne razvijene snage na osovina dizelskih motora kod tri različita rješenja:

- direktne dizel-mehaničke propulzije (2 dizel-motora i 2 vijka)
- dizel mehaničke propulzije (4 dizel-motora, 2 reduktora i 2 vijka)
- dizel-električne propulzije (4 dizel-generatora).

Treba uočiti da u području iznad 70% ukupne instalirane snage nema velike razlike u specifičnoj potrošnji. U području između 25 i 50 % električna propulzija i rješenje s reduktorima imaju približno jednaku specifičnu potrošnju zahvaljujući isključivanju polovine motora. Kod najnižih opterećenja (ispod 25%) električna propulzija ima uvjerljivo najnižu specifičnu potrošnju goriva. Direktna dizel-mehanička propulzija inferiorna je kod svih opterećenja manjih od 70%. Treba naglasiti da se u slučaju električne propulzije broj dizel-generatora može jednostavno povećati i tako uz umjereno povećanje investicijskih



Slika 4. Usporedba specifične potrošnje goriva u zavisnosti od ukupne razvijene snage na osovina dizelskih motora

troškova još više poravnati dijagram specifične potrošnje, odnosno smanjiti prosječnu specifičnu potrošnju.

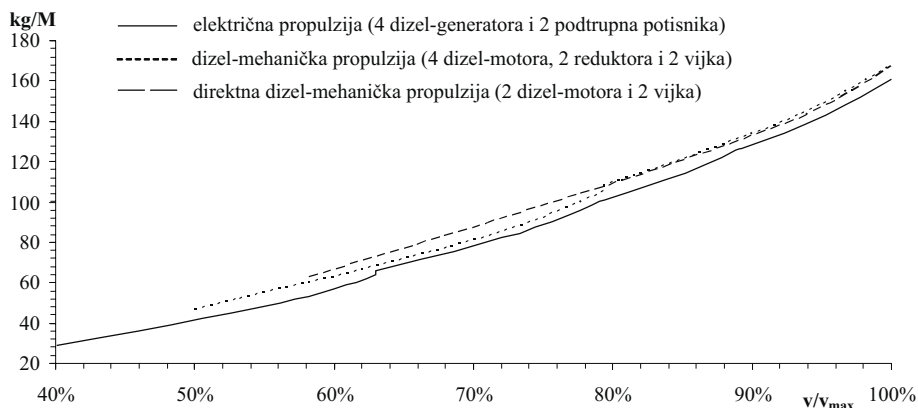
Fleksibilnost pogona posebno dolazi do izražaja kod brodova koji u eksploatacijskom profilu imaju značajan udio plovidbe smanjenim brzinama, odnosno opterećenjima te su prema tome i najpogodniji za primjenu električne propulzije. Također, brodovi s fleksibilnijim pogonom daju mnogo bolje rezultate u kriznim vremenima kad je zbog nedostatka tereta i/ili niskih vozarina potrebno optimalno smanjiti brzinu plovidbe [6, str.193.].

Iako se u stručnoj literaturi smanjenje potrošnje goriva najviše spominje u kontekstu optimiranja broja dizel-generatora u radu kod različitih uvjeta plovidbe, podtrupni potisnici, a posebno njihova zadnja generacija zasnovana na tehnologiji motora s permanentnim magnetima, omogućuju i značajne uštede zahvaljujući većoj hidrodinamičkoj efikasnosti [3, str. 9.].

Dok je položaj, kut i promjer brodskog vijka kod dizel-mehaničke propulzije određen položajem pogonskog stroja i duljinom osovinskog voda, vijci podtrupnih potisnika optimalnih dimenzija mogu se postaviti u hidrodinamički optimalan položaj čime se postiže primjetno veći stupanj korisnog djelovanja.

Sinkroni motori s permanentnim magnetom kakvi se koriste u podtrupnim potisnicima osim što imaju viši stupanj korisnosti, izvode se s manjim promjerom od klasičnih motora pa je njihovom primjenom postignuto značajno smanjenje omjera promjera tijela POD-a i promjera propelera što primjetno povećava stupanj korisnog djelovanja [3, str. 3.].

Izvedba POD-a s dva vijka (TWIN) i zakrilcima na tijelu koja preusmjeravaju strujanje prednjeg vijka djelomično stvarajući efekat kontrarotirajućih vijaka dodatno povećava hidrodinamičku iskoristivost propulzora.



Slika 5. Usporedba potrošnje goriva po prijeđenoj nautičkoj milji u zavisnosti od brzine broda

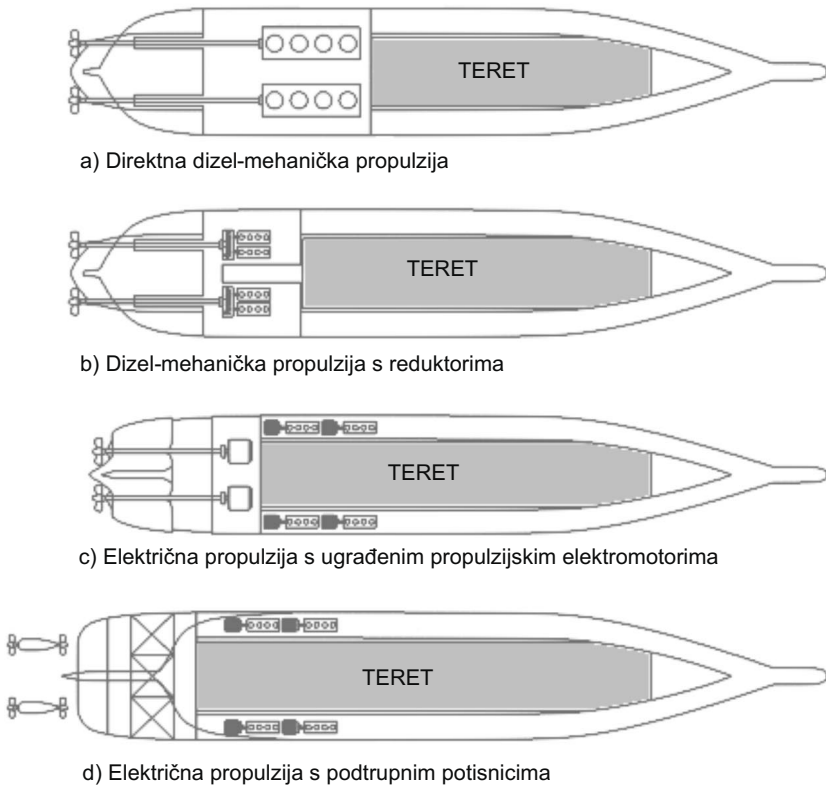
Dobici u hidrodinamičkom stupnju korisnog djelovanja brodskog vijka kod nove generacije POD-ova ne samo da pokrivaju gubitke u električnom prijenosu snage već se postiže sveukupno viši stupanj korisnosti od direktne dizel-mehaničke propulzije. Na slici 5 je prikazana usporedba utroška goriva po prijeđenoj nautičkoj milji u zavisnosti od brzine broda za tri koncepcije propulzije sa slike 4. Vidljivo je da električna propulzija s podtrupnim potisnicima ima najnižu potrošnju goriva pri svim brzinama.

3. BRODSKI PROSTOR

Uz velike uštede na troškovima goriva kod brodova koji često mijenjaju brzinu plovidbe u stručnoj literaturi je jako eksponirana i mogućnost povećanja korisnog brodskog prostora primjenom električne propulzije. Ovdje treba razlikovati dvije stvari:

(1) smanjenje strojarnice korištenjem bržih dizel-motora za pogon generatora umjesto sporohodnih za direktnu dizel-mehaničku propulziju, što se može postići i primjenom reduktora i (2) povoljniji smještaj pogonskih strojeva unutar jedne ili više proizvoljno raspoređenih manjih strojarnica zahvaljujući potpunoj slobodi koju daje električni prijenos snage.

Na slici 6. je dan usporedni prikaz smještaja sustava brodske propulzije u slučaju broda s električnom propulzijom u varijanti ugrađenih propulzijskih elektromotora i zakretnih podtrupnih potisnika, te broda s dizel-mehaničkom propulzijom u varijanti sporohodnih motora s direktnim prijenosom i srednjohodnih motora s reduktorom.



Slika 6. Iskorištenje brodskog prostora kod različitih koncepcija propulzije

Kod direktne dizel-mehaničke propulzije (Slika 6a) sporohodni motori velikih dimenzija moraju biti postavljeni pod određenim kutom kako bi se postiglo što bolje strujanje na brodskom vijku i stoga zahtijevaju dugačak osovinski vod i tako ostavljaju vrlo male mogućnosti izbora pri njihovom smještaju. Eventualno skraćivanje osovinskog voda povećava njegov nagib, zakreće ravninu propelera u hidrodinamički nepovoljniji položaj i podiže položaj pogonskog stroja.

U konfiguraciji s reduktorima prikazanoj na slici 6b situacija je zbog manjih dimenzija srednjohodnih motora povoljnija, ali je osovinski vod još uvijek jako dugačak, pa centralno smješteni pogonski strojevi značajno smanjuju korisni brodski prostor.

Dizel-električna propulzija s ugrađenim propulzijskim elektromotorima (Slika 6c) omogućuje proizvoljni smještaj dizel-generatora, ali ostaje problem centralno smještenih propulzijskih elektromotora sa sustavima hlađenja i podmazivanja i još uvijek dugačkim osovinskim vodovima na štetu korisnog prostora. Treba, također, napomenuti da primjenom električne propulzije u kon-

cepciji integriranog elektroenergetskog sustava (IFEP) nestaju pomoćni motori s generatorima jer se cijeli sustav napaja iz jedne električne centrale.

Zakretni podtrupni potisnici eliminiraju osovinski vod (Slika 6d), smješteni su daleko na krmi i u potpunosti oslobađaju centralni dio trupa što je izuzetno značajno kod npr. Ro-Ro brodova. Dizel-generatori, pretvarači i transformatori se, zavisno od vrste broda, mogu smjestiti u najmanje vrijedne krmene ili bočne prostore. Zbog duljine, a time i težine energetske kabela treba ipak težiti postizanju što manje udaljenosti između POD-ova i generatora. Nije suviše napomenuti da primjenom zakretnih podtrupnih potisnika nestaju kormila s pripadajućom opremom što također oslobađa dio prostora. Nova generacija podtrupnih potisnika je i po pitanju prostora povoljnija od prve generacije, jer se motori s permanentnim magnetima hlade morem preko tijela POD-a i nemaju potrebe za sustavom hlađenja koji je kod prve generacije zauzimao značajan dio, istina ne previše kvalitetnog, prostora u krmi.

U svakom slučaju činjenica je da se primjenom električne propulzije postiže maksimalno pomicanje brodskih energetske sustava prema krmi, a time i povećanje prostora za teret. Sustavi s podtrupnim potisnicima su i ovdje u prednosti zbog smještaja propulzijskih motora izvan trupa te eliminacije dugog osovinskog voda i reduktora.

4. MANEVARSKA SVOJSTVA

Manevarske sposobnosti važne su za sve brodove, a posebno za one koji plove u priobalnom moru, imaju česte manevre i/ili potrebu za dinamičkim pozicioniranjem. Dobro je poznato da je električna propulzija po manevarskim sposobnostima superiorna u odnosu na dizel-mehanički poriv brodskog vijka, što se međutim u manje stručnim krugovima ponekad pogrešno vezuje isključivo uz korištenje zakretnih potisnika (Steerable Thrusters, Rudderpropellers) i zakretnih podtrupnih potisnika (AZIPOD). Bolje manevarske sposobnosti ne dolaze samo od sposobnosti zakretanja ravnine vijka, odnosno vektora poriva već i od mnogo boljih dinamičkih svojstava njegovog pogona zbog:

- momentne karakteristike s konstantnim maksimalnim momentom
- manje zamašne mase izložene promjeni brzine kod dinamičkih promjena
- rada pogonskih strojeva s konstantnim brojem okretaja
- jednostavnog povezivanja u sustav dinamičkog pozicioniranja
- jednostavne instalacije snažnih bočnih potisnika.

Elektromotori napajani iz statičkih pretvarača frekvencije mogu raditi s konstantnim maksimalnim momentom u cijelom području brzina, što se postiže istovremenom regulacijom frekvencije i napona. Zahvaljujući velikom momentu moguće je brzo zaustavljanje i ubrzavanje brodskog vijka u oba smjera vrtnje što

daje brz odziv broda kao objekta regulacije, odnosno odlična dinamička svojstva. Treba ipak napomenuti da se kod propulzijskih elektromotora pri najvećim brzinama često primjenjuje princip slabljenja magnetskog toka, čija je posljedica smanjenje momenta, što međutim ne umanjuje bitno sveukupno izvrsne dinamičke karakteristike pogona.

Kod dizel-mehaničke propulzije pri ubrzavanju broskog vijka ubrzavaju se i zamašne mase osovinskog voda i dizel-motora, dok se kod električne propulzije dizel-generatori vrte konstantnim okretajima, a ubrzavaju se samo propulzijski elektromotori, osovine i naravno brodski vijak, pa je ukupni moment inercije koji treba savladati kod ubrzanja, odnosno usporenja znatno manji, a time i odziv brži.

Konstantan broj okretaja dizel-motora omogućuje sa stanovišta vremenskih konstanti propulzije gotovo trenutno preuzimanje opterećenja. Kod dizel-mehaničke propulzije ubrzavanje motora podložno je nizu tehnoloških ograničenja pa traje mnogo duže.

Upravo velika brzina odziva omogućuje jednostavno povezivanje električne propulzije u kombinaciji s bočnim potisnicima u sustav dinamičkog pozicioniranja. Dizel-mehanička propulzija se također može koristiti za dinamičko pozicioniranje, ali u pravilu samo u kombinaciji s broskim vijkom s prekretnim krilima, što je opet povezano s velikim utroškom goriva i jakom električnom centralom za pogon pramčanih i krmnih bočnih potisnika, dok u slučaju električne propulzije njihova snaga ne predstavlja problem za integrirani elektroenergetski sustav.

Iako i električna propulzija s ugrađenim propulzijskim elektromotorima ima odlične manevarske sposobnosti, ipak primjena zakretnih podtrupnih potisnika ima i u ovom slučaju niz vrlo značajnih prednosti:

- manje zamašne mase
- nepotrebnost krmnih bočnih potisnika
- veliki krmni bočni poriv
- znatno manji radijus okretanja pri punoj brzini
- kraći zaustavni put broda.

Zbog izostanka osovinskog voda podtrupni potisnici imaju mnogo manji moment inercije od sustava s ugrađenim propulzijskim elektromotorima, a time i bolju dinamiku regulacije brzine.

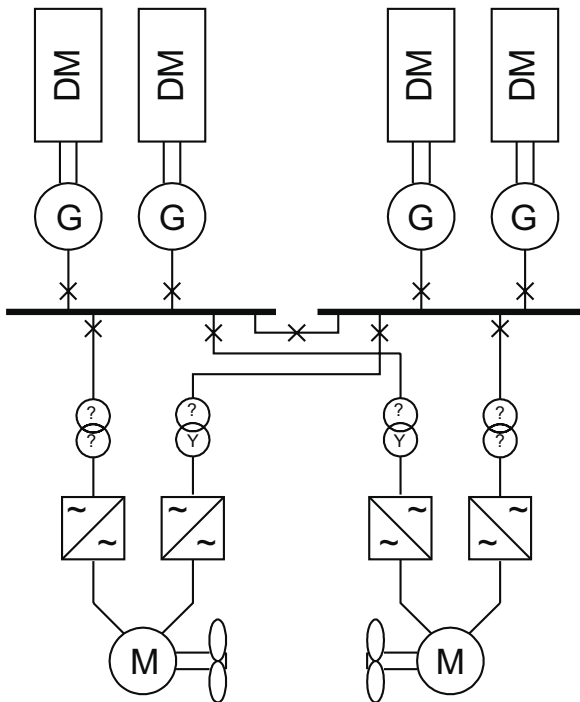
Zakretanjem POD-a usmjerava se po potrebi sva snaga glavne propulzije u bočnom smjeru što, osim eliminacije krmnih bočnih potisnika, omogućuje mnogo sigurnije i kvalitetnije upravljanje brodom. Kod brodova s vrlo visokim nadvođem, odnosno velikom bočnom površinom, kao što su brodovi za kružna krstarenja i brodovi za prijevoz kontejnera, problemi manevra kod jačeg bočnog vjetra nisu se uvijek mogli uspješno riješiti primjenom bočnih potisnika te su ponekad zahtijevali korištenje tegljača.

Razumljivo je da se brod opremljen pramčanim bočnim potisnikom i propulzijom sa zakretnim podtrupnim potisnicima može okrenuti na mjestu. Na probnim vožnjama se međutim pokazalo da brodovi s POD-ovima imaju i vrlo mali radijus okretanja u vožnji. Tako je ispitivanje brodova blizanaca za kružna krstarenja jednog opremljenog POD propulzijom, a drugog električnom propulzijom s ugrađenim propulzijskim elektromotorima pokazalo pri punoj brzini 40% manji radijus okretanja kod POD propulzije [9, str. 6.]. Sličan rezultat postignut je i na probnoj vožnji tankera „Uikku“ nakon rekonstrukcije kojom mu je dizel-mehanička propulzija zamijenjena dizel-električnom POD propulzijom [7, str. 5-3].

Već je objašnjeno da POD propulzija ima bolju dinamiku što znači i bržu promjenu smjera vrtnje a prema tome i kraći zaustavni put u slučaju manevra zaustavljanja. Zaustavni put se međutim u slučaju propulzije s dva POD-a može još više skratiti manevrom istovremene kontra-rotacije zakretnih podtrupnih potisnika čime se pri zaustavljanju koristi optimizirani smjer vrtnje vijka, ali i izbjegava faza nagle rekuperacije energije koja izaziva jake dinamičke poremećaje a time i nestabilnost u elektroenergetskom sustavu [10, str.1]. Već spomenutom „Uikku“ se primjenom POD propulzije zaustavni put smanjio za približno 45% [7, str 5-3].

5. RASPOLOŽIVOST POGONA

Iako je sustav električne propulzije mnogo složeniji od sustava dizel-mehaničke propulzije, ipak zahvaljujući velikoj redundanciji, ima znatno veći stupanj raspoloživosti. Električni sustavi općenito preuzimaju sve veće područje primjene zbog malih zahtjeva održavanja, visokog stupnja pouzdanosti i trajnosti. Stoga je i električni prijenos snage modernog broda s električnom propulzijom projektiran tako da zahtijeva minimalne intervencije tijekom eksploatacijskog vijeka broda. Do zastoja prema tome dolazi jedino u slučaju iznenadnog kvara. Na slici 7 je dan pojednostavljeni prikaz tipičnog elektroenergetskog sustava broda s dvovijčanom električnom propulzijom. Karakterizira ga veći broj dizel-generatora, dva vijka pokretana dvonamotnim propulzijskim elektromotorima napajanim iz ukupno četiri pretvarača frekvencije sa zasebnim propulzijskim transformatorima. U slučaju jednog kvara na prikazanom sustavu bez obzira da li se radi o dizel-motoru, generatoru, propulzijskom transformatoru, pretvaraču ili namotima motora, brod ostaje bez četvrtine snage, što znači da sukladno slici 3 može nastaviti plovidbu s otprilike 90% maksimalne brzine. Raspoloživa snaga i navedena brzina ne samo da garantiraju sigurnost broda već i minimiziraju gubitke zbog eventualnog kašnjenja.



Slika 7. Tipični elektroenergetski sustav broda s dvovijčanom električnom propulzijom

Najveća vjerojatnost pojave kvara u sustavu električne propulzije vezana je uz njegove najsloženije podsustave, pretvarače frekvencije i sustav dizelskih motora, gdje se isti mogu otkloniti bez zaustavljanja brodskog vijka. Suvremeni sustavi samodijagnostike, te pristupačnost i manipulativnost rezervnih dijelova omogućuju vrlo brz popravak pretvarača, dok trajanje zastoja na dizel-motoru jako ovisi o vrsti kvara, ali je u svakom slučaju mnogo kraće nego kod direktne mehaničke propulzije sa sporohodnim dizel-motorom [4, str. 41.]. Uz razumnu rezervu uzetu pri planiranju putovanja te adekvatnu brojnost i osposobljenost posade, kvar se može otkloniti dovoljno brzo da se spriječi kašnjenje broda u određenu luku.

Zadržavanje velike brzine broda još je značajnije kod havarija većih razmjera s nemogućnošću popravka na brodu, jer značajno smanjuje vrijeme putovanja do određene luke i kasnije do luke u kojoj će se izvršiti remont. Iako su podtrupni potisnici nove generacije projektirani tako da bez remonta izdrže eksploatacijski vijek broda ipak i na njima može doći do havarije (proboj izolacije namotaja propulzijskog elektromotora, blokiranje rotora...). Popravak u pravilu zahtijeva demontažu POD-a i remont kod proizvođača. Kako se skida samo donji, zakretni dio POD-a cijela se operacija izvodi relativno brzo i bez dokovanja. Najveći je problem vrijeme izgubljeno u plovidbi do rezervnog POD-a,

ako je takav na raspolaganju ili čekanje na popravak staroga, odnosno isporuku novoga.

Noviji brodovi s električnom propulzijom se grade s više odvojenih strojnica kako bi se u slučaju požara u jednoj zadržala proizvodnja električne energije, a time i poriv broda.

6. EKOLOGIJA

Ekološki učinci tehnoloških sustava su u pravilu vrlo slojeviti, a ponekad i prikriveni, te se ne mogu uvijek u potpunosti predvidjeti niti procijeniti, pogotovo u sveobuhvatnom pristupu kakav je primijenjen u ovom članku. Ekološki probici električne propulzije su:

- smanjenje potrošnje goriva
- smanjenje emisije štetnih plinova
- smanjenje buke i vibracija
- povećanje sigurnosti broda
- izbjegavanje sidrenja
- produljenje eksploatacijskog vijeka broda.

Kako je već objašnjeno u drugom poglavlju, jedna od najviše eksponiranih prednosti dizel-električne propulzije je značajno smanjenje potrošnje goriva što samo po sebi znači bolje očuvanje energetskih resursa i manju emisiju štetnih plinova kod istog tehnološkog učinka. Osim toga, srednjohodni i brzohodni motori na brodovima s dizel-električnom propulzijom rade s konstantnim okretajima pa imaju znatno nižu emisiju štetnih plinova od motora u sustavu dizel-mehaničke propulzije.

Iako nisu toliko eksponirani poput kumulativnog zagađenja okoliša emisijom štetnih plinova i ispuštanjem opasnih tvari, vibracije i buka također imaju štetan učinak na ljude i životinje. Električna propulzija uspješno smanjuje buku i vibracije kroz:

- korištenje manjih srednjohodnih ili brzohodnih dizel-motora i plinskih turbina
- povoljniji smještaj dizel-motora
- eliminaciju reduktora
- smanjenje torzijskih vibracija na brodskom vijku zbog mirnog rada propulzijskog elektromotora.

POD propulzija ima i dodatne prednosti koje doprinose smanjenju vibracija i buke:

- eliminaciju dugačkih osovinskih vodova
- povećanje razmaka između oboda vijka i trupa.

Veliki broj ekoloških incidenata uzrokovanih istjecanjem tereta pokazao je da se od brodova koji prevoze potencijalno opasan teret mora zahtijevati posebno visok stupanj sigurnosti. Električna propulzija povećava sigurnost broda kroz:

- visok stupanj raspoloživosti pogona broda
- bolja manevarska svojstva
- manju opasnost od požara širih razmjera.

Kako su tehnički aspekti raspoloživosti i manevarskih sposobnosti električne propulzije objašnjeni u poglavljima 3 i 4 ovdje samo treba još naglasiti njihov ekološki značaj. U analizi havarija koje su rezultirale gubitkom tankera pokazalo se da je u 30% slučajeva glavni razlog nesreće bio gubitak poriva [2, str. 1-5]. Kako je potpuni gubitak poriva kod broda s električnom propulzijom i dva brodska vijka vrlo malo vjerojatan, uvođenjem električne propulzije drastično bi se smanjio broj ovih ekološki vrlo opasnih havarija.

Superiorne manevarske sposobnosti propulzije s podtrupnim potisnicima obrazložene u poglavlju 4. povećavaju sigurnost pri manevriranju u blizini obale, ali i pri izbjegavanju sudara i nasukavanja. Više manjih strojarnica s automatskim sustavima gašenja omogućuje brzo lokaliziranje i efikasno gašenje požara prije nego što opasno ugrozi sigurnost broda i tereta. Primjenom sustava dinamičkog pozicioniranja može se na mjestima na kojim obitavaju zaštićene vrste organizama izbjeći sidrenje.

Zahvaljujući karakteristikama potrošnje goriva opisanim u poglavlju 1 brodovi opremljeni električnom propulzijom imaju veliku eksploatacijsku fleksibilnost tako da im je ekonomska efikasnost znatno manje ovisna o situaciji na tržištu nego kod brodova s dizel-mehaničkom propulzijom, pa sporije zastarijevaju. Eventualne rekonstrukcije kao što su produljenje ili skraćivanje broda i/ili povećanje maksimalne brzine jednostavnije su i jeftinije. Zahvaljujući povoljnijim uvjetima eksploatacije (manje vibracije, rad motora s konstantnim brojem okretaja...) vitalni dijelovi pogonskih strojeva i brodske konstrukcije trajniji su nego kod dizel-mehaničke propulzije. Zbog svega navedenog ispravno projektirani brodovi s električnom propulzijom ostaju u službi mnogo dulje od brodova s dizel-mehaničkom propulzijom čime se smanjuje potrošnja energije i zagađenje pri reciklaži starih i izgradnji novih brodova. Štoviše zastarjele brodove s ekološki i ekonomski neprihvatljivo velikom potrošnjom goriva i emisijom štetnih tvari, moguće je u specifičnim slučajevima uz prihvatljiva ulaganja konvertirati na električnu propulziju i tako im produljiti životni vijek, kako je to npr. učinjeno s velikim putničkim brodom „Queen Elizabeth II“.

7. ZAKLJUČAK

Suvremeni sustavi električne propulzije s podtrupnim potisnicima su, eksploatacijski gledano, nesumnjivo mnogo kvalitetnije rješenje od klasične dizel-mehaničke propulzije. Provedene usporedne analize pokazuju superiornost električne propulzije u iskorištavanju brodskog prostora, stupnju raspoloživosti, utjecaju na okoliš, manevarskim svojstvima kod svih brzina, vrsti manevara i potrošnji goriva kod svih eksploatacijskih profila plovila.

Iako su investicijski troškovi za izgradnju broda s električnom propulzijom i zakretnim podtrupnim potisnicima danas mnogo viši nego za dizel-mehaničku propulziju više je razloga koji ukazuju na mogućnost njene ekspanzije u bliskoj budućnosti. Kao prvo, investicijski troškovi će se nastaviti smanjivati zbog jake konkurencije između velikih svjetskih proizvođača brodske električne opreme i proizvodnje u većim serijama zbog proširenja tržišta.

Mnogo veća sigurnost i manja emisija štetnih tvari brodova s električnom propulzijom uz sve strože propise za određena područja plovidbe i pojedine vrste ekološki opasnih tereta nastavit će sužavati područje eksploatacije brodova s dizel-mehaničkom propulzijom.

Rast cijene goriva zbog smanjenja rezervi i velikog povećavanja potražnje uvjetovanog naglim industrijskim i ekonomskim razvojem dalekoistočnih zemalja, prije svega Kine, utjecat će na povećanje troškova goriva i vjerojatno smanjenje brzine plovidbe. U takvom scenariju bi postojeći brodovi s klasičnom dizel-mehaničkom propulzijom zbog značajno veće potrošnje goriva postali nekonkurentni brodovima s električnom propulzijom.

LITERATURA

1. Adnanes, A. K., Maritime Electrical Installations, and Diesel Electric Propulsion, Oslo, ABB AS Marine, 2003.
2. Ahlquist, I., Increasing availability through introduction of redundancy, Electric Propulsion - The Effective Solution?, Conference Proceedings, 1, London, IMarE, 1995., str. 1-1 - 1-8.
3. Andersen, L. P., U.Gragen, Siemens-Schottel Propulsor - The Energy Saving Propulsion Concept, Dynamic Positioning Conference, Houston, 1997.
4. Butler, D., Guide to Ship Repair Estimates (In Man-Hours), Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000.
5. A.K. Dev - Podded Propulsion - It's Future in Marine Transportation, Singapore Polytechnic Technical Journal, 2002.
6. Glavan, B., Ekonomika morskog brodarstva, Zagreb, Školska knjiga, 1992.
7. Laukia, K., The AZIPOD System - Operational Experience and Design for the Future, Electric Propulsion - The Effective Solution?, Conference Proceedings, 1, London, IMarE, 1995., str. 5-1 - 5-14.
8. Laurence, C. A., Vessel Operating Economies, Fairplay Publications, 1984.
9. Lönnberg, F. G., Azipod Propulsion - Azimuthing Electric Propulsion Drive, Helsinki, ABB Oy Marine and Turbocharging, 2002.
10. Smith, K. S., L. Ran, L.G. Mowatt, J. Penman, Braking Operation of Marine Electrical Propulsion Systems, Electric Propulsion - The Effective Solution?, Conference Proceedings, 1, London, IMarE, 1995., str. 19-1 - 19-7.
11. USNA, Principles of Ship Performance, EN200 Course Notes, USNA, 2003.

Summary

EXPLOITATION ADVANTAGES OF ELECTRIC PROPULSION

The exploitation advantages of diesel-electric propulsion with the last generation of podded drives using permanent magnet electrical motors towards diesel-mechanic propulsion systems, in the field of fuel consumption, utilisation of on-board space, availability, manoeuvrability and environmental impact are elaborated. Comparative analysis of fuel consumption is performed on the basis of specific consumption per shaft power, as well as consumption per mile in respect to ship's speed. All investigated exploitation aspects show positive advantages of podded electric propulsion, not only for ship types traditionally predisposed to electrical propulsion, because of their specific operation profile, but also for almost any type of ship. Thanks to the exploitation advantages and to actual trends in fuel prices and environment protection as well as to the decrease of investment costs due to severe market competition between great electrical equipment manufacturers, further electrical propulsion expansion in the world's fleet could certainly be expected.

Key words: *ship, electric propulsion, consumption, manoeuvre, ecology*

*Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2
51000 Rijeka
Croatia*

*K. Kranjca 46/3
52220 Labin
Croatia*