

Dr. sc. Ivan Vlahinić  
Mr. sc. Dubravko Vučetić  
Pomorski fakultet  
Studentska 2, Rijeka

Pregledni članak  
UDK: 62 – 83  
629.5.064.5

## PERSPEKTIVA RAZVOJA STATIČKIH PRETVARAČA FREKVENCije U SUSTAVU ELEKTRIČNE PROPULZije BRODA

*U radu se analiziraju mogućnosti daljnjeg razvoja pretvarača frekvencije u sustavu električne propulzije. Izložena je klasifikacija elektroničkih ventila, principi rada i osnovne karakteristike najznačajnijih hibridnih elektroničkih ventila velikih snaga: IGBT, MCT, ETO, IGCT, MTO, ETO. Obrazložene su posebnosti primjene i karakteristike pretvarača frekvencije u sustavu električne propulzije. Objasnjeni su principi rada i analizirane pozitivne i negativne karakteristike poznatih pretvarača frekvencije. Unatoč trenutačnoj dominaciji u sustavima električne propulzije, sinkrokonvertor i ciklokonvertor su zbog ograničenja uzrokovanih mrežnom komutacijom ocijenjeni kao neperspektivna rješenja, jednako kao i velikim gubicima prekapčanja ograničeni pretvarači s prisilnom komutacijom. Kao perspektivne koncepcije, kojima se kvaliteta može povećati tehnološkim razvojem, ocijenjeni su rezonantni pretvarači, matrički pretvarači i MPI pretvarači.*

*Ključne riječi: električna propulzija, energetska elektronika, pretvarač frekvencije, brod*

### 1. UVOD

Od prve primjene tiristora, evolucija sustava električne propulzije usko je povezana s tehnološkim razvojem u području energetske elektronike. Razvoj elektroničkih ventila i pretvarača frekvencije velikih snaga danas ima presudan utjecaj na konfiguraciju elektroenergetskog sustava broda s električnom propulzijom.

Zadnjih godina, osim na plovnim objektima specijalne namjene, na kojima je uobičajena, električna propulzija sve se češće primjenjuje i na trgovačkim brodovima. Brodari se za električnu propulziju ponajprije odlučuju zbog odličnih manevarskih sposobnosti, mnogo manje strojarnice i povoljnijeg razmjesta brodskog prostora. Zbog manjih troškova eksploatacije preferira se IFEP (*Integrated Full Electric Propulsion*) koncepcija, kod koje je sustav električne propulzije integriran u elektroenergetski sustav broda.

Regulacija brzine povjerena je statičkim pretvaračima frekvencije, najčešće ciklokonvertorima ili sinkrokonvertorima. Njihov rad zasniva se na mrežnoj komutaciji tiristora i zbog toga niskoj radnoj frekvenciji, što omogućuje izradu jedinica velike snage, ali daje nesinusoidalni oblik struje i napona na propulzijskom motoru te uzrokuje velike distorzije napona mreže. Posljedica velikog sadržaja viših harmonika jesu torzione vibracije, buka i veliko povećanje gubitaka. Gubici u motoru napajanom nesinusoidalnim naponom mogu se povećati za više od 20%, što zahtijeva odgovarajuće smanjenje opterećenja i uzrokuje smanjenje stupnja korisnosti [13]. Kratkotrajni kratki spojevi, koji se kod svake mrežom vođene komutacije javljaju u trenucima komutiranja struje među fazama, uzrokuju propade napona i prenaponske pojave koje mogu izazvati pregaranje osigurača, greške u radu, proboje izolacije i druge vrste kvarova [14].

Za razliku od koncepcije odvojenih električnih sustava propulzije i preostale potrošnje, u kojoj smanjena kvaliteta energije ostaje samo unutar sustava propulzije, u IFEP koncepciji zagađenje se širi mrežom i prema tome negativno djeluje na cijeli elektroenergetski sustav. Da cijeli električni uređaj broda ne bi trpio posljedice smanjene kvalitete električne energije, u kojem bi se slučaju moralo predimenzionirati najveći dio električnih uređaja, ugrađuju se filtri.

Tehnološki napredak u području elektroničkih ventila i mikroprocesorskog upravljanja, omogućio je razvoj novih pretvarača velikih snaga, koje odlikuje iznimno mali sadržaj viših harmonika na mrežnoj i motorskoj strani.

Cilj je ovoga rada da analizira sadašnju situaciju u području energetske elektronike, posebno elektroničkih ventila i pretvarača frekvencije u području snaga koje odgovaraju potrebama električne propulzije i pokuša upozoriti na perspektivne smjerove daljnjeg razvoja.

## 2. ELEKTRONIČKI VENTILI

Elektronički ventili osnovni su funkcionalni dijelovi svakog statičkog pretvarača frekvencije i stoga presudno utječu na njegove performanse. To su elektronički elementi energetske elektronike koji poput sklopki po posebnom algoritmu električki povezuju i odvajaju ulazne i izlazne stezaljke pretvarača s ciljem postizanja željenog oblika, amplitude i frekvencije napona na izlazu. Danas se svi komercijalno upotrebljivi elektronički ventili za energetske elektroniku izrađuju na bazi silicija, ali postoje istraživanja koja upućuju na mogućnost primjene novih tehnologija zasnovanih na, npr., silicijevom karbidu. Elektronički ventili mogu se klasificirati prema sljedećim osnovnim karakteristikama: propusnost, upravljivost, maksimalna frekvencija prekapčanja, pad napona u stanju vođenja, nazivni napon i nazivna struja.

Prema propusnosti, ventili se dijele na jednosmjerne i dvosmjerne, ovisno o tome da li mogu provoditi struju samo u jednom ili u oba smjera.

Pod upravljivošću treba razlikovati dva pojma: stupanj upravljivosti i zahtjevnost ventila u odnosu na upravljački krug. Prema stupnju upravljivosti, elektronički ventili dijele se na neupravljive, poluupravljive i punoupravljive. Neupravljivi ventili imaju samo dvije stezaljke i nemaju upravljačku elektrodu. Poluupravljivi ventili blokiraju tok struje kod propusne polarizacije sve dok ne dobiju impuls na upravljačkoj elektrodi, a kada je struja jednom potekla, više je ne

moгу prekinuti. Mogućnost proizvoljnog propuštanja ili prekidanja struje svojstvo je punoupravljivih ventila. Pojam zahtjevnosti ventila u odnosu na upravljački krug odnosi se na vrstu, snagu i oblik impulsa koji se dovodi upravljačkoj elektrodi. Cilj je proizvesti elektroničke ventile kojima se može upravljati s pomoću jednostavnih upravljačkih krugova male snage jer se time smanjuje cijena, olakšava dijagnostika i povećava pouzdanost uređaja.

Maksimalna frekvencija prekapčanja (prelaska iz stanja blokiranja u stanje vođenja i obratno) važna je karakteristika i ovisi o gubicima prekapčanja i vremenu oporavljanja. Suvremeni pretvarači frekvencije rade na visokim frekvencijama kako bi postigli visoku kvalitetu električne energije na izlazu i sačuvali kvalitetu energije na ulazu. Što je frekvencija rada viša, i kvaliteta je energije veća. Treba ipak istaknuti da je gornja isplativa frekvencija rada sklopa velike snage ograničena ne samo mogućnostima ventila već i smanjenjem stupnja korisnosti kao posljedicom povećanja gubitaka prekapčanja koji su direktno proporcionalni radnoj frekvenciji.

Pad napona na ventilu nije značajan zbog smanjenja maksimalnog izlaznog napona budući da je kod srednjenaponskog sustava električne propulzije otprilike tisuću puta manji od nazivnog napona, već zbog gubitaka vođenja koji smanjuju stupanj korisnosti, a rastu proporcionalno struji i padu napona na ventilu.

Nazivni napon i nazivna struja određuju gornju graničnu snagu ventila koja je u području elektromotornih pogona najvećih snaga uvijek bila limitirajući faktor pri izboru. Zbog toga u sustavima električne propulzije za sada još uvijek prevladavaju tiristori i diode. Ipak, kod propulzijskih motora manjih snaga, unatoč višoj cijeni, mogu se, zbog mnogo manje harmoničke distorzije napona i struje, već danas koristiti uređaji koji koriste punoupravljive elektroničke ventile.

Uz osnovne vrste ventila – dioda, tiristora, tranzistora i GTO (Gate Turn Off) tiristora, zahvaljujući razvoju tehnologije izrade poluvodiča, stvaraju se novi i usavršavaju već postojeći hibridni elektronički ventili koji, integracijom više standardnih ventila u jedan element, iskorištavaju najbolje osobine ventila od kojih su sastavljeni. Spomenimo samo najznačajnije od njih:

IGBT (Insulating Gate Bipolar Transistor) pojavio se još 1983. godine, ali se tek odnedavno može koristiti u području velikih snaga i danas počinje zamjenjivati GTO tiristore. IGBT je nastao integracijom energetskog tranzistora i MOSFETA (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) koji mu daje struju baze. Zahvaljujući MOSFET-u upravljačka elektroda IGBT-a ima velik ulazni otpor pa se njime može upravljati koristeći upravljačke uređaje male snage. IGBT radi na otprilike istim frekvencijama kao i energetski tranzistor, ali ima nešto veći pad napona što uzrokuje povećane gubitke vođenja [6].

MCT (MOS Controlled Thyristor) je nastao integracijom GTO tiristora i dva MOSFETA koji pojačavaju struju upravljačke elektrode. MCT se pali i gasi pomoću slabih pozitivnih odnosno negativnih naponskih impulsa. Za sada se koristi uglavnom kod širinski impulsno moduliranih (ŠIM) pretvarača manjih i srednjih snaga, gdje zamjenjuje GTO tiristore [3].

FTO (Fast Turn Off) je hibridni ventil kojim se uspješno integrirati IGBT i MCT i tako eliminirati njihove pojedinačne nedostatke. IGBT i MCT spojeni su paralelno s posebno izvedenim upravljačkim elektrodama tako da se sa svakim može neovisno upravljati. MCT koji ima manji pad napona od IGBT, vodi struju

dok je ventil otvoren. Kada treba prekinuti tok struje, redom se: uključuje IGBT, isključuje MCT (struja se preseli na IGBT) i konačno isključuje IGBT [4].

GCT (Gate Commutating Thyristor) je stara inačica GTO tiristora. GTO tiristor treba za gašenje negativan impuls otprilike jednak 20% struje tereta. Dovodjenjem negativnog naponskog impulsa koji bi odveo 100% struje tereta, GTO bi se ugasio mnogo brže. Budući da odvođenje 100% struje kroz upravljačku elektrodu zapravo znači komutaciju struje iz smjera anoda-katoda na smjer anoda-gate pri čemu katoda ostaje bez struje, tiristor koji radi na tom principu dobio je ime GCT. Vrijeme komutacije skraćeno je sa oko 25 mikrosekundi na svega 1 mikrosekundu [4].

IGCT (Integrated Gate Commutating Thyristor) predstavlja integriranu nadogradnju GCT tiristora s ugrađenom komutacijskom diodom. IGCT ima sve prednosti GTO tiristora: veliku struju i napon te niske gubitke vođenja, ali ga krasi i razmjerno visoka frekvencija prekapčanja koja doseže 10 kHz. Nazivni naponi mogu biti do 4,5 kV, a struje do 3 kA. Već je napravljen pretvarač snage 100 MVA sa IGCT [4].

MTO (MOS Turn Off) tiristor iako po vanjskim karakteristikama na prvi pogled sličan IGCT, ipak predstavlja sasvim drukčiji hibrid, na kojemu se intenzivno radi zadnjih godina. Iako IGCT ima integrirane upravljačke krugove, ipak potrebnu energiju za komutacijsku struju dobiva izvana preko upravljačke elektrode. Nasuprot tome, MTO funkcionira slično MCT i nema potrebe za vanjskim strujnim impulsima, već se njime upravlja relativno slabim naponskim impulsima. MTO bi uskoro trebao biti dostupan u snagama i frekvencijama koje odgovaraju onima kod IGCT-a [9].

ETO (Emitter Turn Off) tiristor je kao i MCT hibrid GTO tiristora i MOSFET-a, ali za razliku od MCT-a gdje MOSFET-i daju samo upravljačke impulse, kod ETO-a vode cjelokupnu struju tereta. ETO ima dvije upravljačke elektrode – jednu za paljenje na koju se dovodi strujni impuls, i drugu za gašenje na koju se dovodi naponski impuls. Dva MOSFET-a rade kao komplementarni par – kada je prvi uključen drugi je isključen, i obratno [9]. ETO se pali istodobnim dovodjenjem impulsa na upravljačku elektrodu GTO tiristora i upravljačku elektrodu serijski spojenog n-kanalnog MOSFET-a. Gašenjem serijskog n-kanalnog MOSFET-a, pali se p-kanalni MOSFET koji preuzima cijelu struju tereta i odvodi je preko upravljačke elektrode GTO tiristora, što uzrokuje njegovo brzo gašenje.

Osim stvaranja novih elektroničkih ventila, razvoj znanosti i tehnologije neprestano poboljšava i karakteristike postojećih, posebno kada je riječ o snazi, upravljivosti, padu napona i frekvenciji prekapčanja. Karakteristike ventila, uz princip rada, ovise o čistoći silicija i preciznosti izrade. Nevjerojatan napredak koji se već godinama postiže na području mikroprocesora, a zasniva se na istim postavkama i istoj tehnologiji, dokazuje da daljnji razvoj nije toliko problem tehnologije, koliko tržišta. Zadnjih godina elektrodistribucija, svjesna problema i gubitaka koje joj stvara smanjena kvaliteta električne energije u mreži, počinje kontrolirati izvore "zagađenja" i postavljati uvjete vezane uz najveće dopuštene distorzije napona. Takav razvoj događaja, uz već postojeći trend štednje energije, mogao bi potaknuti masovnije korištenje kvalitetnijih pretvarača frekvencije, koji

u pravilu koriste punoupravljive elektroničke ventile što bi svakako ubrzalo njihov razvoj.

### 3. POSEBNOSTI PRIMJENE PRETVARAČA FREKVENCije U SUSTAVU ELEKTRIČNE PROPULZije

Osnovni je zadatak pretvarača frekvencije u sustavu električne propulzije da omogući promjenu smjera vrtnje i broja okretaja propelera u širokom rasponu brzina. Uz to, pretvarač frekvencije najčešće još i reducira frekvenciju izvora kako bi se ona prilagodila predviđenom nominalnom broju okretaja propulzijskog motora. Kao i sva druga brodska oprema, pretvarači frekvencije moraju biti prilagođeni eksploataciji u brodskim uvjetima, odnosno moraju ispunjavati propise i pravila o izgradnji brodova.

Električna propulzija postavlja pred pretvarače frekvencije i ove zahtjeve:

- veliku snagu
- rad u sva četiri kvadranta
- visok stupanj korisnosti
- nizak sadržaj viših harmonika na izlazu
- nizak stupanj distorzije napona mreže
- visok faktor snage
- visoku pouzdanost
- jednostavnost održavanja i dijagnostike
- malu masu i volumen
- nisku cijenu.

Snaga električne propulzije ovisi o veličini i brzini broda i kreće se od nekoliko MW do više desetaka MW. Iako je zbog povećanja raspoloživosti porivnog sustava korištenjem dvonamotnih motora i/ili više propelera, snaga pretvarača frekvencije barem dva puta manja od snage poriva broda, ipak je još uvijek dovoljno velika da zahtijeva posebne izvedbe pretvarača.

Tijekom manevra broda, sustav propulzije mora ispuniti zadaće vožnje naprijed, usporavanja, vožnje krmom i usporavanja pri vožnji krmom, što odgovara zahtjevu četverokvadrantnog elektromotornog pogona. Iznimno, ako bi se u sustav propulzije uz pretvarač frekvencije ugradio i propeler s promjenljivim korakom što uvelike poskupljuje izvedbu, bio bi dovoljan dvokvadratni pogon. Zanimljivo je primijetiti da su na zahtjev naručioca građeni brodovi s propelerom promjenljivog koraka i pretvaračima koji omogućuju četverokvadratni pogon što je, gledano sa stajališta, upravljanja brzinom broda, potpuno nepotrebno [12].

Stupanj korisnosti pretvarača frekvencije u sustavu električne propulzije broda izravno utječe na troškove goriva, a kroz njih i na rentabilnost broda. Zbog velike snage pretvarača, već i manje razlike u stupnju korisnosti stvaraju u eksploataciji značajne uštede na troškovima goriva.

Viši harmonici stvaraju dodatne gubitke u propulzijskom motoru te mu smanjuju korisnost, a povećavaju težinu i cijenu, i prema tome imaju negativan utjecaj na rentabilnost broda. Posljedica prisutnosti viših harmonika jesu i vibracije koje se prenose na osovinski vod, kao i povećana buka.

Izobličenje mrežnog napona kao posljedica nesinusoidalne struje koju pretvarač vuče iz mreže u konfiguraciji odvojenog sustava propulzije, opterećuje višim harmonicima samo generatore, transformatore i kabele u sustavu propulzije, uzrokujući također buku, vibracije i značajno povećanje gubitaka, težine i cijene sustava. Još je nepovoljnija situacija u IFEP koncepciji kada se izobličenje napona sa svim spomenutim negativnim utjecajima širi mrežom i moguće ga je jedino ublažiti ugradnjom filtra. Filtri značajno opterećuju investiciju te povećavaju masu ugrađene opreme i troškove eksploatacije.

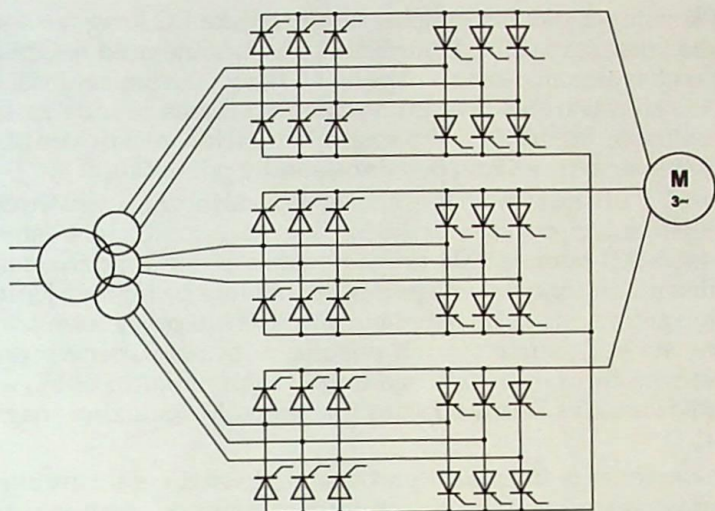
Faktor snage direktno utječe na korisnost sustava i cijenu generatora. Ako pretvarač uzima iz mreže mnogo jalove snage, ona jako opterećuje generator i kabele, povećavajući pritom gubitke u bakru. Nazivna snaga, težina i cijena generatora proporcionalne su djelatnoj snazi, a obrnuto proporcionalne faktoru snage. Generator koji napaja pretvarač frekvencije sa, npr., faktorom snage 0,75, bit će mnogo veći, teži i skuplji od generatora koji bi pretvarač iste snage napajao uz  $\cos\varphi=1$ .

Pouzdanost pretvarača frekvencije u sustavu propulzije važna je zbog sigurnosti broda, posade i tereta, kao i drugih sudionika u pomorskom prometu. Kako se u sustavu električne propulzije uvijek nalaze barem dva pretvarača frekvencije, u slučaju otkazivanja jednog, preostala snaga dovoljno je jamstvo sigurnosti. Ipak, sa smanjenom snagom brod neće postizati predviđenu brzinu što će, ako se kvar ne otkloni na vrijeme, izazvati kašnjenje broda sa svim troškovima koje ono donosi. Zbog toga je važno, uz visoku pouzdanost pretvarača, omogućiti i jednostavnu, sigurnu i brzu dijagnostiku i otklanjanje kvarova, bez isključivanja ispravnog dijela sustava električne propulzije.

Masa, volumen i smještaj sustava propulzije među glavnim su razlozima zbog kojih se brodari odlučuju za električnu propulziju. Razlike u ukupnoj masi pretvarača frekvencije iste ukupne snage, ugrađenih na jedan brod, mogu iznositi i više desetaka tona, a u volumenu i više stotina kubičnih metara. Svaki brodar zna izračunati povećanje prihoda koje donosi manja masa i volumen opreme. Glomazniji pretvarači, zbog veće količine ugrađenog materijala, u uvjetima suvremene proizvodnje imaju u pravilu i veću proizvodnu cijenu, pa će i brodari i proizvođači opreme radije izabrati lakše pretvarače manjih dimenzija.

#### 4. VRSTE PRETVARAČA FREKVENCIJE

Ciklokonvertor je najstariji i jedini direktni pretvarač frekvencije u komercijalnoj upotrebi. Ima više konfiguracija ciklokonvertora koje se mogu primijeniti u sustavu električne propulzije [11], ali gotovo sve se zasnivaju na šest-pulsnom trofaznom spoju (slika 1.). Šest-pulsni trofazni ciklokonverter sastoji se od tri para dvosmjernih tiristorskih punovalnih mostnih ispravljača (svaki sa 6 tiristora), što znači da ima ukupno 36 tiristora. Svakim se tiristorom odvojeno upravlja kako bi se na izlazu iz ciklokonvertora dobio otprilike sinusoidalni napon željene frekvencije koja u pravilu ne prelazi 30% frekvencije napajanja. Daljnjim povećanjem frekvencije izlaznog napona, zbog prevelikog sadržaja viših harmonika, u izlaznom se naponu ciklokonvertora naglo povećavaju gubici, vibracije i buka motora. Velik broj tiristora, složeni upravljački krugovi, nizak faktor snage i izraženi viši harmonici glavni su nedostaci ciklokonvertora. Pri primjeni ciklokonvertora u IFEP koncepciji problem je i velika širina spektra viših

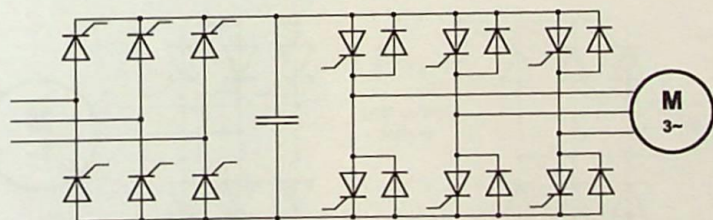


Slika 1. Ciklokonvertor (6 pulsni)

harmonika na mrežnoj strani, koje je stoga teško filtrirati [12]. Prednosti ciklokonvertera su: velika granična snaga (sastavljen je od sporih tiristora koji rade na mrežnoj frekvenciji), jednostavnost (zbog mrežne komutacije nisu potrebni komutacijski krugovi) i četverokvadratni pogon bez dodatnih uređaja. Ciklokonverter je, uz sinkrokonverter, za sada standardno rješenje u sustavima električne propulzije.

Indirektni pretvarači frekvencije (sinkrokonverter, pretvarač s utisnutom strujom, pretvarač s utisnutim naponom i širinsko impulsno modulirani pretvarač) sastoje se od ispravljača i izmjenjivača spojenih na istosmjernoj strani u istosmjerni međukrug u kojem se nalazi skladište energije koje osigurava kontinuirani protok energije za izmjenjivač. Prema tome koristi li se serijski spojena prigušnica ili paralelno spojeni kondenzator, razlikuju se pretvarači s utisnutom strujom i pretvarači s utisnutim naponom.

Pretvarač s utisnutim naponom, zahvaljujući kondenzatoru, ima tijekom komutacije tiristora izmjenjivača praktično konstantan napon istosmjernog međukruga (slika 2.). Dok tiristori ispravljača imaju mrežnu komutaciju, tiristori

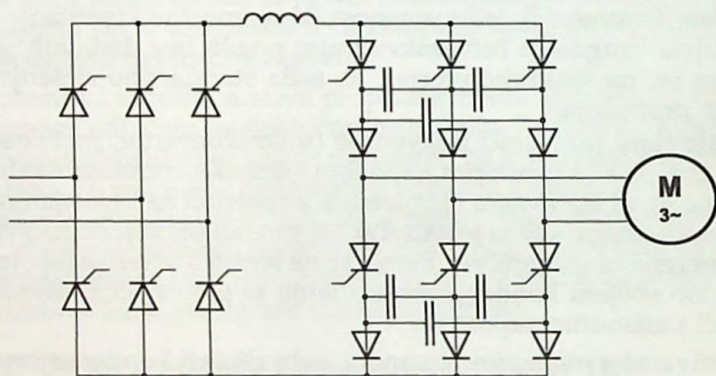


Slika 2. Pretvarač frekvencije s utisnutim naponom – pojednostavnjeni prikaz bez komutacijskih krugova

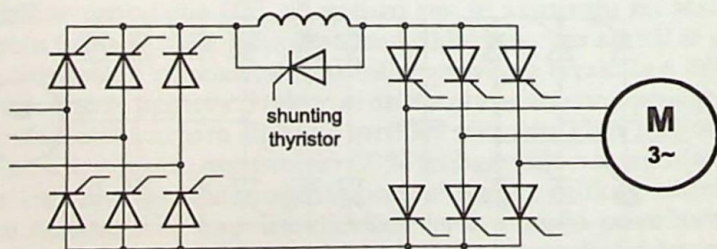
izmjenjivača koriste serijske ili paralelne komutacijske LC krugove s pomoćnim tiristorima i diodama, što uvelike komplicira i poskupljuje uređaj. Oblik izlaznog napona je kvazipravokutan pa su i u naponu i u struji jako izraženi viši harmonici (5,7,11,13,17,19...). Pretvarači s utisnutim naponom danas se rade za snage do 2 MVA [1]. Primjenom hibridnih punoupvaljivih elektroničkih ventila u izmjenjivaču, pretvarač se može znatno pojednostavniti i poboljšati.

Pretvarač s utisnutom strujom ima, zahvaljujući prigušnici, tijekom komutacije tiristora izmjenjivača praktično konstantnu struju u istosmjernom međukrugu (slika 3.). Komutacijski krugovi sastoje se od kondenzatora i dioda. Pretvarač s utisnutom strujom nema pomoćnih tiristora pa je stoga jednostavniji i jeftiniji od pretvarača s utisnutim naponom, ali mora biti prilagođen parametrima elektromotora, što kod jednomotornih pogona, poput električne propulzije, ne predstavlja veći problem. Izlazna struja ima kvazipravokutni oblik, a napon je gotovo sinusoidalan, ali s komutacijskim vrhovima. Maksimalna snaga kreće se oko 1MVA [1].

Sinkrokonverter je indirektni pretvarač frekvencije s utisnutom strujom, koji se u osnovi sastoji od dva dvosmjerna tiristorska punovalna mostna ispravljača povezana na istosmjernoj strani (slika 4.). U starijoj literaturi može ga se naći pod nazivom "pretvarač frekvencije s utisnutom strujom vođen sinkronim motorom" [10]. Kao i ciklokonverter, sinkrokonvertor može raditi u sva četiri



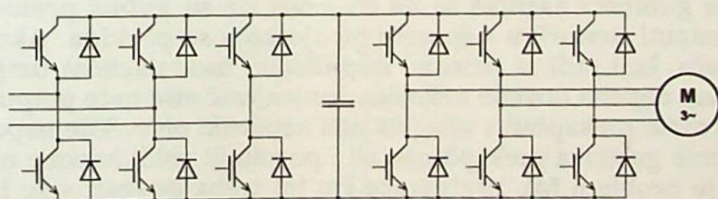
Slika 3. Pretvarač frekvencije s utisnutom strujom



Slika 4. Sinkrokonvertor

kvadranta. U motorskom radu most spojen na mrežu radi u ispravljačkom, a most spojen na motor u izmjenjivačkom režimu rada. U generatorskom radu mostovi mijenjaju uloge. Tiristori oba ispravljačka mosta imaju "mrežnu" komutaciju. Tiristori mosta spojenog na mrežu komutiraju zahvaljujući promjenama mrežnog napona, a tiristori mosta spojenog na motor zahvaljujući promjenama induciraniog napona sinkronog motora. Problemi nastaju pri pokretanju i malim brzinama (do 10% nazivne brzine) kada je inducirani napon u statorskim namotajima sinkronog motora premalen za gašenje tiristora. Sinkrokonverter tada radi u tzv. pulsnom režimu, što se postiže komplementnim gašenjem mrežnog ispravljačkog mosta svaki put kada se žele komutirati tiristori motorskog ispravljačkog mosta. Kod 10% nazivne brzine propelera snaga poriva je gotovo zanemariva, tako da sinkrokonverter radi u pulsnom modu samo tijekom zaleta. Sinkrokonverter ima ukupno 12 tiristora (13 ako je ugrađen shunting tiristor) i predstavlja efikasan i razmjerno jeftin pretvarač koji se često koristi u sustavima električne propulzije. Budući da također koristi tiristore, najveća granična snaga mu je otprilike jednaka onoj ciklokonvertora i sasvim dovoljna i za najteže propulzijske elektromotore. Nedostatak sinkrokonvertera je kvazipravokutni oblik izlazne struje s izraženim višim harmonicima (5, 7, 11, 13... harmonici). Kao i kod svakog drugog pretvarača frekvencije namijenjenog napajanju sinkronog motora, i sinkrokonverter treba na početku zaleta sinkronizirati s položajem rotora [8].

Širinsko impulsno modulirani (ŠIM) pretvarači posebna su podvrsta pretvarača frekvencije s utisnutim naponom. Od standardnih pretvarača s utisnutim naponom razlikuju se po tome što umjesto tiristora koriste punoupravljive ventile – tranzistore, IGBT i GTO tiristore, koji ne trebaju komutacijske krugove i mogu raditi s mnogo višim frekvencijama prekapčanja [7]. Antiparalelno glavnim ventilima spojene su diode kako bi omogućile nesmetan kontinuirani protok struje tako da uz 12 punoupravljivih, ŠIM konverter mora imati i 12 neupravljivih ventila (slika 5.). Zahvaljujući visokoj frekvenciji prekapčanja, ŠIM pretvarač daje na izlazu gotovo sinusoidalni napon. Što je frekvencija prekapčanja viša, napon je kvalitetniji i sadržaj viših harmonika manji. Na nesreću, sa snagom punoupravljivog ventila pada njegova maksimalna dopuštena frekvencija prekapčanja. S druge strane, veća frekvencija prekapčanja daje kvalitetniji napon, manje gubitke u motoru i manje vibracije, ali istodobno povećava gubitke u pretvaraču i tako mu smanjuje korisnost. Kod velikih snaga, kakve se traže u električnoj propulziji, vrlo je važno optimirati frekvenciju prekapčanja kako bi ukupni gubici bili najmanji. Zahvaljujući složenom algoritmu



Slika 5. Širinski impulsno modulirani pretvarač frekvencije

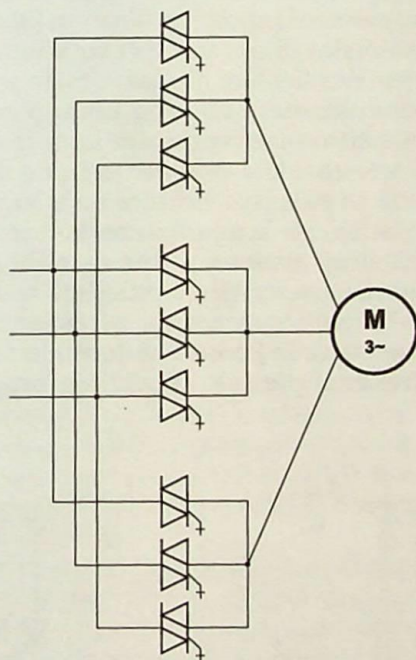
upravljanja ventilima, današnji ŠIM pretvarači ne samo da daju kvalitetan napon na izlazu, već uzimaju iz mreže sinusoidalnu struju uz  $\cos\phi=1$ . Šim pretvarači mogu se kao aktivni filtri koristiti i za popravljavanje kvalitete energije u elektroenergetskom sustavu [1]. Snažniji ŠIM pretvarači koriste diodni ispravljač i rade u samo dva kvadranta, što znači da mogu reverzirati elektromotorni pogon, ali nemaju mogućnost vraćanja energije u mrežu tijekom kočenja. Ugradnjom dodatnog mrežno komutiranog tiristorskog ispravljača koji radi u izmjenjivačkom režimu, a spojen je antiparalelno, diodnom ispravljaču može se omogućiti četverokvadratni pogon [7]. Treba, međutim, istaknuti da se samo upotrebom ŠIM pretvarača s punoupravljivim ventilima koji rade s visokom frekvencijom prekapčanja na oba mosta mogu postići prije spomenuti pozitivni efekti na mrežnoj strani. Maksimalna snaga ŠIM pretvarača frekvencije danas je ograničena na 2MVA sa IGBT, odnosno 6MVA sa GTO tiristorima [1].

Rezonantni pretvarači frekvencije su inačica ŠIM pretvarača proizašla iz tendencije smanjenja gubitaka gašenja ventila koji su u većini aplikacija po veličini otprilike jednaki gubicima vođenja [4]. Gubici gašenja ventila gotovo se eliminiraju korištenjem rezonantnih krugova s pomoćnim ventilima, koji djeluju slično kao i komutacijski krugovi klasičnih tiristorskih izmjenjivača s utisnutim naponom, samo što cijeli sklop radi na mnogo višoj frekvenciji tako da skladišta energije (kondenzatori i prigušnice) u pomoćnim krugovima trebaju preuzeti struju tereta u trajanju od svega desetak mikrosekundi, dok se klasični komutacijski krugovi tiristorskih pretvarača dimenzioniraju za komutaciju u trajanju od nekoliko milisekundi [9]. Zbog toga je energetska kapacitet pa tako i veličina, masa i cijena kondenzatora i prigušnica u rezonantnim pomoćnim krugovima mnogo manja nego u komutacijskim krugovima tiristorskih izmjenjivača. Glavni ventili gase se u trenutku prolaska struje kroz nulu, tako da su gubici gašenja nastali u samom ventilu zanemarivi. Eliminacijom gubitaka iskapčanja mogu se gotovo udvostručiti gubici vođenja, odnosno nazivna snaga pretvarača uz istodobno povećanje stupnja korisnosti. Također, s drastično smanjenim gubicima prekapčanja, sklop može raditi na još višim frekvencijama, što omogućuje daljnje povećanje ionako visoke kvalitete energije na motorskoj, ali i na mrežnoj strani ŠIM pretvarača frekvencije [2]. Jedini nedostatak rezonantnih pretvarača su dodatni komutacijski krugovi s kondenzatorima, prigušnicama i pomoćnim ventilima, što sve zajedno, zbog većeg broja elemenata, komplicira upravljanje, smanjuje pouzdanost uređaja i generira nove gubitke energije, koji su, međutim, ipak mnogo manji od gubitaka gašenja ventila koje su eliminirali.

ML pretvarači (Multi Level converters) također smanjuju gubitke prekapčanja, ali ni izdaleka tako uspješno kao rezonantni pretvarači. Ideja za smanjenje gubitaka zasniva se na činjenici da su gubici prekidanja struje proporcionalni umnošku napona i struje koja se prekida. Ako se na ulaz izmjenjivača, koji radi sa širinsko impulsnom modulacijom umjesto jednog istosmjernog napona dovede nekoliko, izmjenjivač više neće potpuno prekidati struju već samo prekapčati s višeg na niži naponski nivo. Više naponskih nivoa znači i manje gubitaka prekapčanja, ali i povoljniji oblik napona na izlazu [5]). Osnovni je problem ML pretvarača što im treba dovesti više istosmjernih naponskih nivoa, što zahtijeva transformator i velik broj dioda. Zbog odsutnosti punoupravljivih elemenata u ispravljačkom dijelu, sigurno je da će takvi pretvarači imati negativan utjecaj na faktor snage i kvalitetu električne energije na

primarnoj strani. Unatoč svemu, ML pretvarači ne eliminiraju gubitke prekapčanja, već ih samo smanjuju. Doda li se tome i velik broj potrebnih ventila, čini se da ML pretvarači već na početku gube trku s rezonantnim pretvaračima.

Matrički pretvarač frekvencije (Matrix converter) novija je vrsta pretvarača koji još nije u komercijalnoj upotrebi, ali postoji nekoliko prototipova koji se koriste za ispitivanje. Matrički pretvarač je, kao i ciklokonvertor, direktni pretvarač frekvencije. Nema istosmjerni međukrug, a izlazni napon gradi na načelima širinsko impulsne modulacije od segmenata ulaznog napona koristeći sve tri faze [1]. Svaka ulazna faza spojena je sa svakom izlaznom fazom dvosmjernim punoupravljujivim elektroničkim ventilom (slika 6). Iz konstrukcije pretvarača proizlaze i njegovi nedostaci. Najveći je problem što se za sada ne proizvode dvosmjerni punoupravljujivi elektronički ventili. Probni uređaji umjesto jednog dvosmjernog ventila koriste sklopove sastavljene od standardnih jednosmjernih ventila, što rezultira velikim brojem elemenata i većim padom napona odnosno gubicima. Drugi je nedostatak što je najveći izlazni napon mnogo niži od ulaznog (50% u temeljnoj koncepciji, a 86,6% uz korištenje napona trećeg harmonika) [5], što je velik problem kod većine elektromotornih pogona jer onemogućuje primjenu standardnog napona, odnosno standardnog motora. Kada je riječ o električnoj propulziji, taj je problem nešto manje izražen jer se veliki sporohodni motori i onako ne rade u velikim serijama. Treći je problem što upravljanje ventilima mora biti vrlo precizno i pouzdano jer svaka greška u upravljanju uzrokuje kratki spoj izvora napajanja.

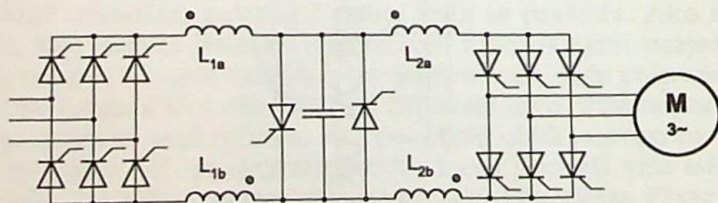


Slika 6. Matrički pretvarač frekvencije

Kada se jednom pojave na tržištu odgovarajući dvosmjerni punoupravljivi ventili, matički pretvarači moći će izraziti i svoje prednosti:

1. Za rad matičkog pretvarača ne trebaju prigušnice i kondenzatori, ali ni transformatori, što ga znatno pojeftinjuje te, a to je posebno važno za električnu propulziju, smanjuje ukupnu težinu opreme.
2. Od svih pretvarača frekvencije, matični pretvarači će trebati najmanji broj ventila. Sa samo devet dvosmjernih punoupravljivih ventila, dobiva se puni četverokvadrantni pogon. Današnje eksperimentalne varijante matičkih pretvarača koriste umjesto jednog dvosmjernog ventila u jednoj varijanti jedan jednosmjerni punoupravljivi i četiri diode (ukupno 9 punoupravljivih ventila i 36 dioda), a u drugoj varijanti dva jednosmjerna punoupravljiva ventila i dvije diode (ukupno 18 punoupravljivih ventila i 18 dioda) [4].
3. Na cijelom području brzina, može se održavati željeni faktor snage.
4. Izlazni napon i ulazna struja imaju oblik sinusoida s praktički zanemarivim utjecajem viših harmonika.

Zadnjih je godina predstavljena i jedna potpuno nova vrsta pretvarača, koja radi drukčije od svih dosadašnjih. Riječ je o MPI (Multi-Port Inversion) pretvaraču koji predstavlja evoluiranu varijantu SCD (Sequential Capacitive Discharge) pretvarača [4]. MPI pretvarač samo na prvi pogled slični pretvaraču frekvencije s utisnutim naponom budući da je građen od ulaznog i izlaznog mosta i "istosmjernog međukruga" s paralelno spojenim kondenzatorom (slika 7.). Kod MPI pretvarača, međutim, kao i kod SCD pretvarača, izlazne stezaljke niti u jednom trenutku nisu galvanski spojene s ulaznim [9]. Sveukupna snaga prelazi s mrežne strane na motorsku ili obrnuto preko kondenzatora. Kondenzator se najprije puni okidanjem dva tiristora na ulaznom (mrežnom) mostu. Titrajni krug sastavljen od međuinuktiviteta ulaznog kruga i zajedničkog kondenzatora započne oscilirati vlastitom frekvencijom koja je naravno mnogo veća od frekvencije mreže. U trenutku kad se kondenzator nabije, struja padne na nulu i tiristori se ugase. Sada se pale dva tiristora na izlaznom mostu i na identično građenom izlaznom titrajnom krugu prazne kondenzator kroz teret. Kada se kondenzator isprazni, struja tiristora padne na nulu i oni se ugase pa se ciklus ponavlja. Složeni algoritam upravljanja određuje redoslijed i trenutak paljenja tiristora i tako upravlja protokom energije, frekvencijom, naponom i strujom. Pretvarač je svestran jer se može koristiti za dvosmjerno pretvaranje istosmjerne i izmjenične električne energije čak i različitog broja faza na ulazu i izlazu.



Slika 7. MPI pretvarač frekvencije

Zahvaljujući rezonantnoj komutaciji i višoj frekvenciji rada, pretvarač ima mali sadržaj viših harmonika na ulaznoj i izlaznoj strani. Veličina potrebnog kondenzatora raste s nazivnom snagom, ali pada s frekvencijom rezonantnih krugova. Ako se pretvarač pokaže uspješnim, mogao bi se u budućnosti poboljšati primjenom punoupvrljivih ventila s ciljem povećanja frekvencije kao što je to učinjeno kod rezonantnih pretvarača. Time bi se dobila još bolja kvaliteta energije na mrežnoj i motorskoj strani i, što je za velike snage također važno, smanjio kondenzator. Iako se na prvi pogled čini da je primjereniji malim snagama jer je teško zamisliti prenošenje velike snage na sekundarni krug isključivo preko kondenzatora, uz visoku radnu frekvenciju kondenzator ipak ne mora biti prevelik. Uz to, zahvaljujući tehnološkom napretku, kondenzatori postaju sve manji, jeftiniji i pouzdaniji. Proboj izolacije kod današnjih kondenzatora ne znači više nužno i njihovo uništenje, već samo neznatan gubitak kapaciteta pa se starenje kondenzatora može kontrolirati povremenim mjerenjem kapaciteta. Preliminarna istraživanja pokazuju da bi MPI pretvarač snage 20MVA za sustav električne propulzije zauzimao manje od 9 m<sup>3</sup> brodskog prostora [9], što je mnogo manje od bilo kojega postojećeg rješenja.

## 5. ZAKLJUČAK

Na području električne propulzije trgovačkih brodova danas dominiraju pretvarači frekvencije s mrežnom komutacijom tiristora: ciklokonvertor i sinkrokonvertor. Mrežna komutacija daje im jednostavnost, ali istodobno trajno ograničava mogućnost značajnijeg poboljšanja kvalitete energije na mrežnoj i motorskoj strani. Dok niska kvaliteta električne energije na izlazu pretvarača smanjuje korisnost te povećava vibracije i buku propulzijskog motora, dotle distorzija primarnog napona kao posljedica nesinusoidalne struje koju pretvarač vuče iz mreže, te komutacijskih propada i komutacijskih prenapona, uz današnji trend izgradnje sustava propulzije integriranih u elektroenergetski sustav broda (IFEP), još pogubnije djeluje na gotovo cijeli električni uređaj broda. U sustavu električne propulzije sa sinkrokonvertorom za popravljavanje kvalitete električne energije ugrađuju se pasivni filtri, dok zbog promjenljivog spektra viših harmonika u slučaju ciklokonvertora mogu efikasno djelovati samo mnogo složeniji aktivni filtri. Uz filtre, mrežna komutacija zahtijeva i prigušnice i/ili transformatore za smanjenje struje kratkog spoja pri komutaciji struje ispravljača s jedne faze na drugu. Nizak faktor snage dodatno opterećuje sustav, posebno generator i smanjuje faktor korisnosti sustava propulzije. Sve to povećava brodske troškove, masu i cijenu ugrađene električne opreme, i tako smanjuje rentabilnost broda. Iako je mrežna komutacija prirodna i kao takva ne stvara gubitke u ventilu tijekom gašenja, ipak će s vremenom i u području najvećih snaga morati ustupiti mjesto modernijim rješenjima koja mogu dati visoku kvalitetu električne energije za napajanje propulzijskog motora, uz istodobno očuvanje kvalitete električne energije na mrežnoj strani pretvarača.

Prekidanje struje s pomoću punoupvrljivih elektroničkih ventila poput IGBT-a i MCT-a, omogućuje relativno visoke frekvencije rada i time ostvarenje zahtjeva kvalitete energije na ulaznoj i izlaznoj strani uz  $\cos\phi=1$  (ŠIM pretvarači frekvencije). Na žalost, budući da se ne radi o prirodnoj već o prisilnoj komutaciji, otvara se problem znatnih gubitaka prekapčanja koji rastu s povećanjem frekvencije rada, pa proizvođači pretvarača optimirajući radnu frekvenciju

pronalaze kompromis između kvalitete energije i faktora korisnosti. Može se stoga zaključiti da je i prisilno prekidanje struje korištenjem punoupravljivih ventila, baš kao i mrežna komutacija, dugoročno gledano, neperspektivno rješenje. Dok mrežnu komutaciju ograničava kvaliteta energije i gubici uzrokovani višim harmonicima, dotle klasične ŠIM pretvarače ograničavaju gubici prekapčanja.

Rezonantno gašenje punoupravljivih ventila, koje se temelji na prirodnoj komutaciji po principima komutacijskih krugova tiristorskih izmjenjivača i čopera, ali uz korištenje punoupravljivih ventila, nema konstrukcijskih ograničenja jer rezonantni pretvarači mogu raditi na relativno visokim frekvencijama uz vrlo male gubitke prekapčanja. Rezonantni pretvarači postižu  $\cos\phi=1$  i odličnu kvalitetu električne energije na mrežnoj i na motorskoj strani pretvarača. Razvojem elektroničkih punoupravljivih ventila rezonantni pretvarači će zbog povećanja frekvencije rada postajati sve manji, zbog smanjenja snage upravljačkih krugova sve jednostavniji, a zbog smanjenja pada napona na ventilima sve efikasniji, pa se mogu opravdano svrstati među perspektivna rješenja.

Matrički pretvarač također nema konstrukcijskih ograničenja po frekvenciji. Gubici gašenja punoupravljivih dvosmjernih ventila vjerojatno će se moći riješiti ugradnjom rezonantnih krugova, dok se gubici vođenja uvijek mogu smanjiti tehnološkim razvojem ventila. Zbog toga se i matrički pretvarač može smatrati konfiguracijom vrijednom daljnjeg istraživanja.

MPI pretvarač, zahvaljujući prirodnom rezonantnom gašenju ventila, trebao bi imati minimalne gubitke prekapčanja, a zahvaljujući visokoj frekvenciji rada visoku kvalitetu električne energije i male dimenzije. Njegov razvoj je na samom početku i lako su moguće izmjene u osnovnoj konfiguraciji sklopa, kao što se to već dogodilo napuštanjem SCD pretvarača. Zbog galvanske odvojenosti ulaznih i izlaznih strujnih krugova, MPI pretvarači s pouzdanim specijalno razvijenim ventilima i posebnim mjerama sigurnosti u upravljačkim algoritmima mogli bi u budućnosti zamijeniti transformatore.

## LITERATURA

- [1] R. W. G. Bucknall, K. P. Doherty, N. A. Haines, The Matrix Converter: The Ultimate Electric Drive Technology, *Trans IMarE*, 109, 2, pp.161-183.
- [2] J. O. Flower, H. Pollock, Properties and Design of Series-Parallel Load-Resonant Converters: Their Potential in Marine-Related Applications, *Trans IMarE*, 110, 2, pp.95-118.
- [3] C. G. Hodge, D. J. Mattik, The Electric Warship II, *Trans IMarE*, 109, 2, pp.127-144.
- [4] C. G. Hodge, D. J. Mattik, The Electric Warship III, *Trans IMarE*, 110, 2, pp.119-134.
- [5] C. G. Hodge, D. J. Mattik, The Electric Warship V, *Trans IMarE*, 112, 1, pp.27-39.
- [6] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, George C. Verghese, Principles of Power Electronics, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1991.
- [7] W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, Berlin 1985.

- [8] M. Mehmedović, N. Jurković, P. Marinčić, Ponašanje sinkronog stroja tokom zaleta pomoću statičkog pretvarača frekvencije, *Automatika*, 21, 3-4, str. 117-121.
- [9] J. M. Newell, D. J. Mattik, C. G. Hodge, The Electric Warship IV, *Trans IMarE*, 111, 1, pp.25-39.
- [10] B. Rajković, Stanje i tendencije u razvoju reguliranih elektromotornih pogona s izmjeničnim strojevima, *Automatika*, 21, 3-4, str. 77-89.
- [11] L. Ran, K. S. Smith, R. Yacamini, Cycloconverter Configurations and Controllers for Marine Propulsion Applications, *Trans IMarE*, 107, 2, pp.83-99.
- [12] P. Stefani, G. Zanolla, Cruise Liners Diesel Electric Propulsion Cyclo or Synchroconverter? The Shipyard Opinion.
- [13] S. Štefanko, Svojstva kaveznih asinkronih motora napajanih iz poluvodičkih pretvarača frekvencije, *Automatika*, 21, 3-4, str. 91-98.
- [14] I. Vlahinić, Električni sistemi plovnih objekata, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1988.

#### Summary

### DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE STATIC FREQUENCY CONVERTERS FOR ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

*The development possibilities of frequency converters for electric propulsion system are analyzed in this paper. The classification of power electronic devices in general, as well as the principles and basic characteristics of the most important hybrid power electronic devices (IGBT, MCT, ETO, IGCT, MTO, ETO) are exposed. The required converter characteristics and particularities in the application of the electric propulsion system are discussed too. Considering the application in electric propulsion systems, the basic principles of the known frequency converter types are explained and their characteristics evaluated. Due to limitations of line commutation, synchroconverters and cycloconverters, regardless their actual domination in electric propulsion systems, are not classified as long-term solutions, as well as converters using forced commutation and limited with high switching losses. Resonant, matrix and MPI converters, having the possibility to be continuously improved by the technological development of power electronic devices, are evaluated as promising solutions.*

*Key words: electric propulsion, power electronics, frequency converter, ship*