

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

HIBRIDNI POGON KOD MANJIH PLOVILA

Rijeka, ožujak 2019.

Emil Maltar

0069071871

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

HIBRIDNI POGON KOD MANJIH PLOVILA

Mentor: izv. prof. dr. sc. Saša Sladić

Rijeka, ožujak 2019.

Emil Maltar

0069071871

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike

Br.: 602-04/18-14/28

Ur. br.: 2170-15-12-18-1

Rijeka, 19.03.2018.

Z A D A T A K

za završni rad

Pristupnik: Emil Maltar

Matični broj: 0069071871

Lokalni matični broj: 15800038

Naziv zadatka:

HIBRIDNI POGON KOD MANJIH PLOVILA

Title (*English*):

Hybrid Yachts

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika

Grana znanstvenog područja: 2.03.02 elektrostrojarstvo

Opišite različite pogonske koncepte za propulziju brodova. U svojem razmatranju se ograničite na manja plovila tako da snaga pogonskog stroja ne bude veća od 30 kW. Studiju upotpunite simulacijom autonomnog izmjenjivača.

Zadano: 19.3.2018.

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Saša Sladić



Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nino Stojković



Zadatak preuzeo dana: **19.3.2018.**

Emil Maltar



Dostaviti:

Mentor (1x) Evidencija studija (1x) Pristupnik (1x) Predsjednik Povjerenstva(1x)

Izjava

Ja, Emil Maltar izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Hibridni pogon kod manjih plovila“ prema zadatku br. 602-04/18-14/28 u skladu s člankom 9. Pravilnika o završnom radu, završenom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Završni rad izradio sam pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Saše Sladića, dipl. ing.

Emil Maltar _____

ZAHVALE

Veliko hvala mentoru, izv. prof. dr. sc. Saši Sladiću, koji me konstantno poticao za vrijeme pisanje ovog rada kako bi on bio što kvalitetniji.

Posebnu zahvalnost dugujem i Marini Punat, Krk na mogućnosti razgledavanja i vršenja mjerenja na brodici e-Neptun.

Također se zahvaljujem užoj i široj obitelji te bliskim prijateljima na bezuvjetnoj potpori tokom čitavog školovanja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. USPOREDBA PROPULZIJSKIH SUSTAVA	3
2.1. Plovilo na električni pogon.....	8
2.2. Brzina s obzirom na potrošnju energije.....	9
2.3. Hibridni Propulzijski Sustav	10
2.4. Vrste hibridnih propulzijskih sustava.....	11
2.4.1. Serijski hibridni propulzijski sustav	11
2.4.2. Paralelni hibridni propulzijski sustav	12
2.4.3. Serijsko-paralelni hibridni sustav	13
3. AUTONOMNI IZMJENJIVAČ.....	14
3.1. Električni ventili	15
3.3. Modulacija trajanja impulsa	15
3.4. Jednofazni autonomni izmjenjivač s utisnutim naponom.....	21
3.5. Trofazni autonomni izmjenjivač s utisnutim naponom	23
3.6. Smanjivanje harmoničke komponente	25
3.6.1. Metoda uklanjanja harmonika	27
3.6.2. Metoda poništavanja harmonika.....	28
4. NAČELO RADA ELEKTRIČNOG STROJA	30
4.1. Svojstvo elektromagneta	30
4.2. Zakoni protjecanja.....	32
4.3. Momentna karakteristika asinkronog električnog stroja	33
4.4. Nadomjesna shema asinkronog stroja	34
4.5. Izračun impedancije asinkronog stroja.....	35
4.6. Skalarna regulacija	36
5. SPREMNICI ENERGIJE	38
5.1. Sigurnost.....	38
5.2. Učinkovitost	39

5.3. Životni vijek i kapacitet.....	40
6. TEHNIČKI IZRAČUN BRODICE <i>e – Neptun</i>	42
6.1. Osnovni podaci o brodici	42
6.2. Izračun potrebne struje	45
6.3. Izračun baterija brodice	46
6.4. Proračun kapaciteta baterija u odnosu na autonomiju rada	48
6.5. Fotonaponski paneli	50
6.6. Izračun vremena punjenja baterija.....	53
6.7. Ostala elektronika brodice.....	55
7. ZAKLJUČAK	59
8. LITERATURA.....	60
9. SAŽETAK.....	62

1. UVOD

U današnje vrijeme energija ima veliki značaj u transportu, posebice u pomorskom prometu. S obzirom na činjenicu da je pomorski promet istaknut potrošač energije i ispuštanja emisija u okoliš, posebice zbog onečišćenja voda, u posljednjih nekoliko godina teži se smanjenju potrošnje energije i emisija CO₂ u pomorskom prometu [1]. Zabrinjavajuće je da razine stakleničkih plinova rastu te bi se do 2050. mogle udvostručiti, u usporedbi s nedavnim mjerenjima. Pri čemu prometni sektor troši oko 25 % ukupne energije u svijetu, što je četvrtina energije od toga. Isto tako se više od 80 % tereta prevozi morem pri čemu se „ispusti“ više od 30 % ukupne emisije CO₂ iz sektora prijevoza, od kojih čovjek „ispusti“ tek 3 – 4 % [2].

Sve nas to dovodi do jednog cilja, a to je smanjenje potrošnje goriva i emisija pri projektiranju novih generacija brodova. Jedna od vodećih pomorskih transportnih industrija A. P. Moller-Maersk Group izjavljuje kako je smanjila emisije CO₂ za čak 46 % u odnosu na 2007. godinu. Navedena tvrtka posjeduje više od 780 brodova širom svijeta te se kao takva prva posvetila ulaganju u plovila na električni pogon, odnosno svake godine (od 2014. nadalje) ulaže milijardu dolara u razvoj i istraživanje tehnologije s niskom razinom ugljika te želi i druge potaknuti na isto, kako bi se emisije do 2050. smanjile na minimum [3].

Jedan od novijih pristupa koji se sve više koristi, jest zamjena dizelskih motora, hibridnim pogonom kojim se emisije CO₂ smanjuju gotovo na minimum. Hibridni propulzijski sustav temelji se na kombinaciji dvaju izvora energije od kojih je jedan gorivo, koje koristi motor s unutarnjim izgaranjem, a drugi električna energija iz baterija za električni stroj. Ugradnjom baterija produžuje se doseg broda, a emisija neće biti obzirom da baterije napajaju električni stroj koji nema izgaranja. Postoji više vrsta hibridnog propulzijskog sustava od kojih su serijski, paralelni i serijsko-paralelni najčešće izvedbe kod manjih plovila. Prednosti koje takav sustav ima su mnogobrojne, a najznačajnija su visoka učinkovitost, ekološka prihvatljivost, poboljšavanje upravljivosti, smanjenje troškova održavanja te smanjenje buke i vibracija [4]. Hibridni sustav koristi više različitih načina rada koje kapetan može samostalno mijenjati, ovisno o tome kakvu raspodjelu snage i potrošnje želi

ostvariti na plovilu kojim upravlja. Cijeli sustav koristi dva motora, bateriju te ispravljače i izmjenjivače za napajanje cijelog broda.

Ono što je najvažnije, ugradnjom takvog sustava u sve veći broj brodica uvelike će se pomoći ekosustavu znajući da energija u obliku struje ima smanjenu razinu emisije štetnih plinova te je kao takva najprihvatljivija za cijeli ekosustav. Upravo iz tih razloga ovaj se rad posvetio istraživanju koje će biti upotpunjeno simulacijama u programu Plecs kako bih se dokazala djelotvornost hibridnih sustava kao i pomoglo majci Zemlji u smanjenju emisija štetnih plinova.

2. USPOREDBA PROPULZIJSKIH SUSTAVA

Propulzija je mehanizam koji se koristi kod generiranja potiska u svrhu pokretanja vozila. Pogonski sustav sastoji se od mehaničke energije i propulzora, koji pretvaraju snagu u pogonsku silu. Postoji više vrsta propulzije od kojih je jedna propulzija zraka koju koriste avioni, pomorska propulzija koju koriste brodovi, zemacijska propulzija koja se koristi kod automobila, propulzija prostora koja se koristi kod svemirskih letjelica te magnetska propulzija koja se koristi kod brzih vlakova [5].

Još davne 1902. godine napravljen je prvi dizelski propulzijski sustav na brodu koji je predstavljao novu revoluciju pogona nakon parnih strojeva. Dugi su niz godina imali lošiji omjer prostora i snage od parnih strojeva, ali ubrzo dizelski pogon postaje učinkovitiji te nudi bolju djelotvornost. U današnje se vrijeme dizelski motori klasificiraju prema njihovom radnom ciklusu, odnosno dvotaktnom i četverotaktnom radu motora. Postoje unutarnji, kod kojih se motor najčešće nalazi u sredini broda ili vanjski (vanbrodski) kod kojih je moguće skidanje motora s plovila. Također, dizelski se motori klasificiraju i prema brzini vrtnje. Tako postoje niske brzine koje dostižu do 300 okretaja po minuti (min^{-1}) Sporohodni motori su najsnažniji i najveći motori na svijetu. U srednju brzinu dizelskog pogona spadaju oni motori koji imaju raspon između 300 – 1000 okretaja po minuti te se u njih ubrajaju mnoga moderna plovila s četverotaktnim motorom. Naposljetku prisutni su i motori s velikim brzinama, motori s iznad 1000 okretaja po minuti. Kako su moderni brodski propeleri najučinkovitiji pri radnoj brzini, najčešće se koriste sustavi od jednog ili dva propelerska vratila od kojih svaki ima vlastiti motor s izravnim pogonom. Brodovi pogonjeni dizelskim motorima srednje ili velike brzine mogu imati jedan ili dva propelera. Njega pokreće jedan ili dva motora (ponekad i više) svatko na svojoj osovini, ali isto tako mogu biti spojeni na istu osovину čime se preko spojke mogu mijenjati brzine rada bez zaustavljanja propelera. Ipak, nedostatak kod dizelskih motora čini izgaranje koje uvelike onečišćuje okoliš.

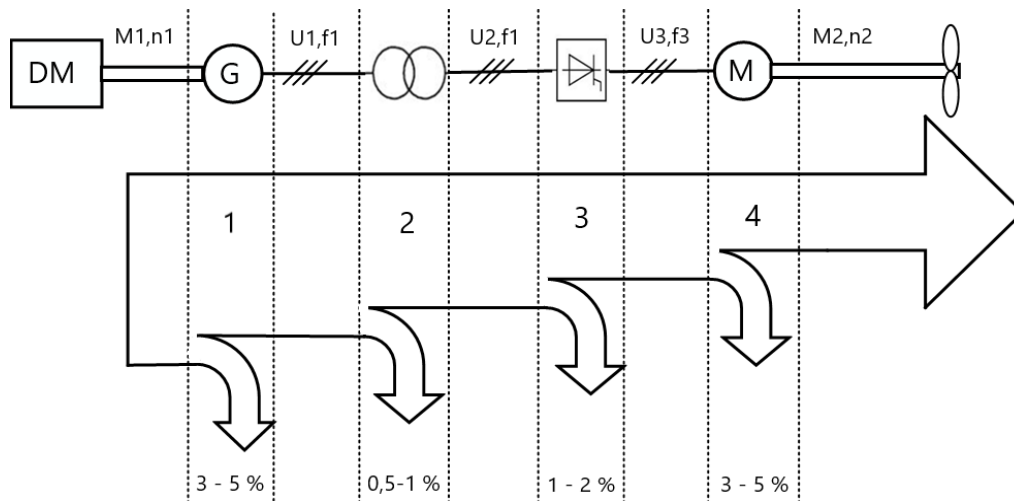
Električni pogon prvi se puta pojavio u drugoj polovici 19. stoljeća te se generirao olovnim akumulatorom kako bi se dobila električna energija za napajanje električnog stroja koji bi pokretao brodski propeler. Početkom 20. stoljeća električni pogon prilagođen je za rad i u podmornicama jer ima veliku prednost nad dizelskim obzirom da mu za njegov rad nije potreban zrak. Prednost

električnih plovila nad dizelskim čini rad propelera u niskoj brzini vrtnje pri čemu se djelotvornost električnog stroja uopće ne smanjuje. Jedna od najvećih prednosti električne propulzije je podešavanje brzine vrtnje uz konstantan moment propelera u samome radu, čime je ostvareno jednostavno upravljanje brzinom plovila. Prijenos snage od generatora do električnog stroja koji pokreće propulzor vrši se pomoću kablova čime se povećava iskorištenost prostora. Također, električni sustav ne koristi vratilo koje zauzima prostor te se oni ne moraju nalaziti u liniji da bi se prenijela energija do propulzora kao što je to slučaj kod dizelskih pogona. Ipak, problem kod električnih plovila čine spremnici energije koji diktiraju koliki će doseg imati neko plovilo, a kako je kapacitet električne energije u baterijama još uvijek ograničen i cijena baterija visoka, on se ne koristi u trgovačkoj mornarici, već samo u manjim plovilima [6].

Izvedba plovila s potpunim instaliranim elektroenergetskim sustavom čini jedna električna centrala s konstantnim naponom i frekvencijom mreže te druga grana koja pomoću pretvarača frekvencije upravlja električnim strojevima na koje je spojen propulzor. Takav prijenos snage od generatora do propulzora svrstava se u četiri stupnja pretvorbe energije:

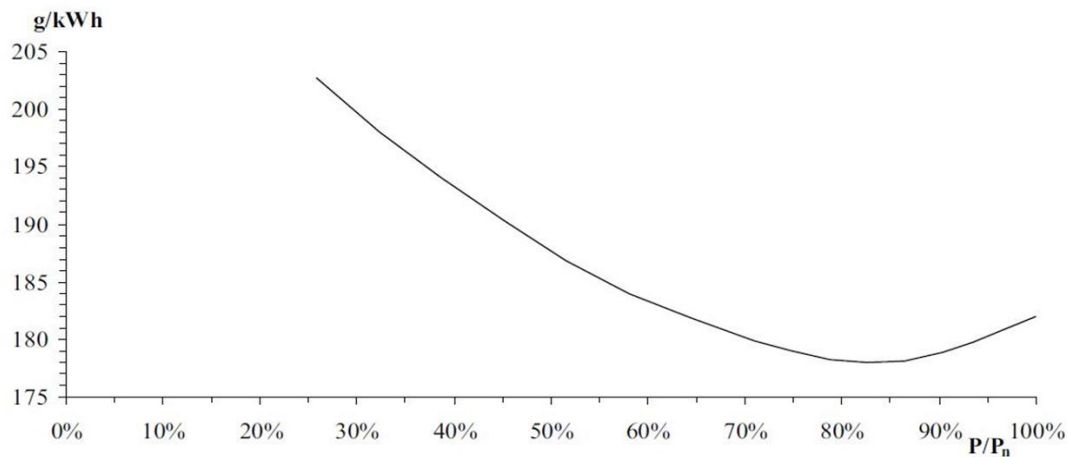
1. Mehaničko – električnu pretvorbu kod sinkronih generatora
2. Transformacija napona na visoki napon
3. Regulacija napona i frekvencije u propulzijskim pretvaračima frekvencije
4. Električno – mehanička pretvorba u propulzijskim električnim strojevima

Kod plovila manje snage ne ubraja se drugi stupanj pretvorbe energije zbog male instalirane snage. Unatoč tome ne koristi se visoki napon. Usprkos nižem naponu i većoj struji koja zagrijava vodiče dobiva se niski stupanj korisnosti generatora što zapravo kvari rad samog propulzijskog sustava [6].



Slika 2.1. – Bilanca snage propulzije s električnim prijenosom

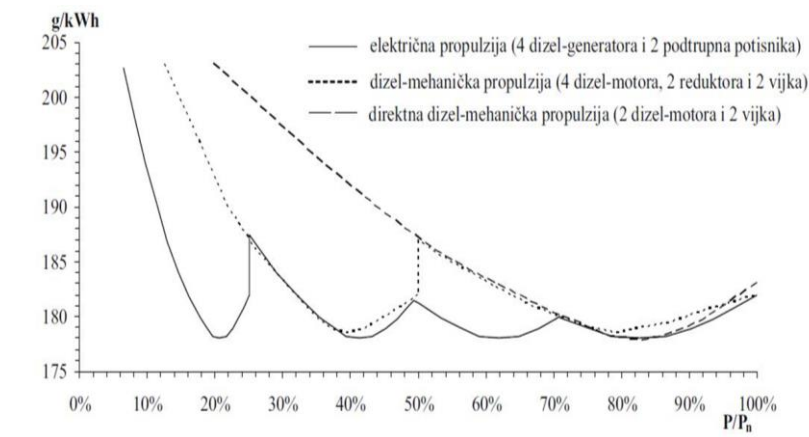
Na slici (2.1.), koja predstavlja ukupnu bilancu snage električnog prijenosa, vidljivo je da unatoč visokom stupnju korisnosti električnih komponenti sustav ipak gubi 8 – 12 % ukupne energije koja se prenosi na propulzor. Kada bi se električni prijenos usporedio s direktnim mehaničkim prijenosom preko osovine koji ujedno zavisi o duljini osovine, brzini vrtnje te korištenosti reduktora, gubi se između 2 – 4 % snage. Električni je prijenos, nesumnjivo sam po sebi lošiji izbor, ali je moguće povećanje stupnja korisnosti na početku i na kraju električnog propulzijskog lanca. Visokim stupnjem korisnosti brodskog vijka i pogonskog stroja postiže se smanjenje gubitaka, a time i ušteda na troškovima goriva. Preciznije definirano, električna propulzija omogućuje veći hidro-dinamički stupanj iskoristivosti te rad pogonskog stroja s konstantnom brzinom vrtnje oko područja optimalnog opterećenja.



Slika 2.2. – *Specifična potrošnja goriva dizel – motora, D. Vučetić i I. Čekada [6]*

Na slici (2.2.) je vidljiv dijagram specifične potrošnje goriva dizel – motora pri čemu se uočava najniža potrošnja kod približno 80 % nazivnog opterećenja te je to ujedno i najviši stupanj iskorištenosti. Gledajući dijagram od minimuma pa sve do 60 % ukupne potrošnje krivulja postaje strmija te se može zaključiti da je u tome području djelotvornost dizel – motora niska. Kod direktne mehaničke propulzije sporohodnih dizelskih motora, smanjenjem brzine vrtnje motor radi u ekonomski nepovoljnim uvjetima. Brzina je kod dizelskih sporohodnih motora smanjena za samo nekoliko čvorova pri čemu se snaga propulzije smanji. Radna točka dizel – motora nalazi se ispod 50 %, uslijed čega mu se specifična potrošnja brže povećava [6].

Metoda kojom bi se smanjila specifična potrošnja broda s električnom propulzijom, radi se na način uključivanja i isključivanja dizel – generatora. Time bi se dobivao željeni poriv kod različitih načina rada brodice uz konstantnu brzinu vrtnje. Ugradnjom većeg broja agregata u sustav broda smanjuje se područje opterećenja čime se ujedno smanjuje specifična potrošnja goriva. Usprkos tome povećava se broj sati rada što dovodi do većih troškova održavanja.



Slika 2.3. – *Specifična potrošnja goriva u zavisnosti od ukupne razvijene snage na osovina dizelskih motora, D. Vučetić i I. Čekada [6]*

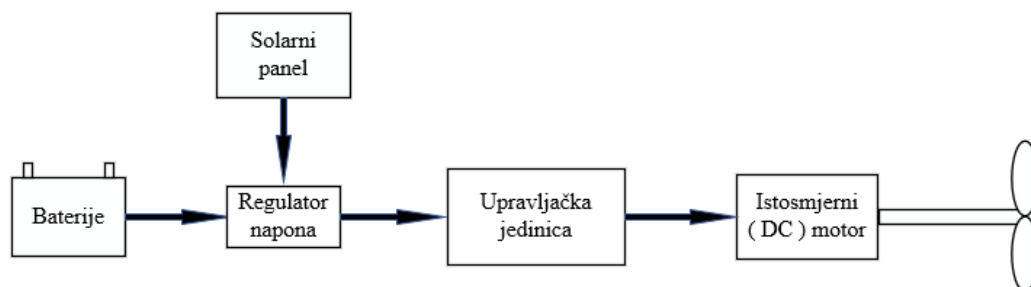
Na slici (2.3.) vidljivi su grafovi kojima se uspoređuju tri različita koncepta broda na dizelski pogon te im se uspoređuje potrošnja goriva u zavisnosti razvijene ukupne snage. Odmah na početku se može vidjeti kako dizelski – generator u kombinaciji s električnim strojem prednjači ispred svih dizelskih konceptata. Već kod 20 % ukupne snage na osovini električnog generatora doseže se njegov minimum specifične potrošnje. Kod 25 % ukupne snage uključuje se drugi generator koji ubrzo povećava snagu na osovini te se karakteristika počinje sjećati drugom karakteristikom dizel-mehaničke propulzije s reduktorom pri čemu oni dostižu svoj maksimum kod 40 % ukupne snage. Uočljivo je da dizel – mehanička propulzija s direktnim prijenosom je najnepovoljnije rješenje te se ono koristi samo kod većih brodova. Dizel – mehanička karakteristika dostiže ove dvije karakteristike tek kod 70 % ukupne snage na osovini te sve tri karakteristike postižu svoj maksimum u granicama od 80 do 90 % ukupne snage na osovini [6].

Može se reći da je ugradnjom većeg broja dizel - generatora u brodove moguće je više izravnati krivulju čime se dobiva veća fleksibilnost pogona što ima prednosti kod različitih uvjeta plovidbe. Još jedna prednost koja se koristi kod električne propulzije jesu permanentni magneti koji se nalaze u električnome stroju. Pomoću njih se omogućuje ušteda uslijed veće hidrodinamičke

djelotvornosti. Dizel – mehanička izvedba svoje propulzore može držati samo u jednome položaju koji ovisi o položaju ugrađenosti dizel motora. Kod električne propulzije bolja je izvedenost broskog vijaka gdje se on zbog svoje dimenzije može postaviti u bolji hidrodinamički položaj čime se stupanj korisnosti povećava.

2.1. Plovilo na električni pogon

Koncept izvedbe plovila na električni pogon sadrži baterije koje zamjenjuju dizel - generatore, koji bi u tome slučaju proizvodili energiju. Takve izvedbe brodova najčešće se koriste u ruralnim mjestima zbog malog doseg a uslijed malog kapaciteta baterija. Osnovni se koncept takvih plovila sastoji od baterija i pretvarača odnosno izmjenjivača gdje se najčešće koristi autonomni izmjenjivač preko kojeg se energija prenosi na električni stroj. Time je omogućeno upravljanje brzinom vrtnje električnog stroja odnosno brzinom samog plovila [7]. Jedan od razloga korištenja električnih plovila u ruralnim mjestima jest ekološka osviještenost uslijed ekološke prihvatljivosti te minimalne buke koju stvara električni stroj. Kako bi se doseg takvim plovilima povećao u koncept izvedbe električnog plovila nerijetko se pridodaju solarni paneli. Oni povećavaju doseg puneći baterije pomoću sunčeve svjetlosti preko regulatora punjenja prema slici (2.4.) :



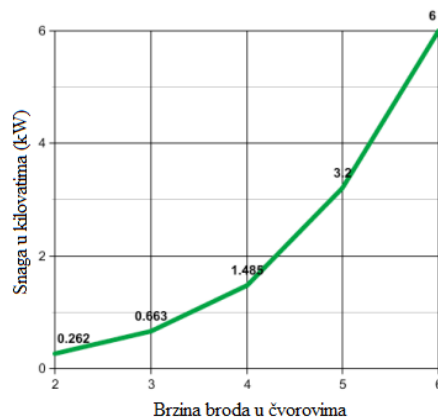
Slika (2.4.) – Blok dijagram potpuno električnog pogona

Veliku ulogu električnog koncepta propulzijskog sustava dobivaju plovila s jedrima kod kojih je vjetar osnovni pogon, a električna propulzija tek sekundarni pogon. Takav pogon uključuje se samo kada nema vjetrova kako bi se plovilo moglo nesmetano kretati dalje. Bitna činjenica kod

plovila jedrom je ta što se električni stroj može postaviti u generatorski način rada čime se pune baterije koje se kasnije mogu iskoristiti u tranzicijskim situacijama. Takav pristup najčešće se koristi za vrijeme dobrog vjetroa pri čemu mu se djelotvornost punjenja srazmjerno povećava do maksimuma [7].

2.2. Brzina s obzirom na potrošnju energije

Već je zaključeno da električna propulzija ima nisku razinu potrošnje energije za niske brzine vrtnje te kao takva ima odlične karakteristike za uplovljavanja ili isplovljavanja kod kojih je nužno imati malu brzinu plovila. Graf na slici (2.5.) prikazuje usporedbu potrošnje energije s brzinom broda. Na početku grafa može se uočiti kako se za svaki čvor snaga minimalno promjeni i tako do 4 čvora, a nakon toga karakteristika postaje sve strmija što znači da je potrebno više uložene energije kako bi se dosegla veća brzina. Iz grafa je još vidljivo kako se brzina svakog čvora dostiže srazmjerno dvostrukoj uloženoj energiji čvora ispod njega, čime krivulja na grafu poprima eksponencijalni oblik.



Slika (2.5.) – Uložena snaga u usporedbi s brzinom broda, Lambden [8]

Doseg električnih plovila je nizak te on ovisi o kapacitetu spremnika energije koji predstavljaju baterije. Usprkos tome plovila s jedrom imaju nedvojbeno veći doseg u usporedbi s bilo kojim tipom električnog plovila. Doseg električnog plovila također ovisi o brzini vrtnje električnog stroja kojim se definira 2000 min^{-1} kao granična vrijednost niske i visoke potrošnje električne energije. Kada bi se želio povećati njegov doseg tada bi se vrijednost brzine vrtnje

električnog stroja upotrebljavala za vrijednosti niže od 2000 min^{-1} uz brže vrijeme dolaska na odredište uz dovoljnu količinu pohranjene energije u baterijama [8].

Doseg plovila ograničen je kapacitetom baterije i strujom pražnjenja. Primjerice, bateriju kapaciteta 100 A/h moguće je teretiti 20 sati koristeći neprekidno 5 A . Uslijed povećavanja struje pražnjenja taj kapacitet se smanjuje što nam dokazuje Peukertov zakon. On opisuje odnos između struje pražnjenja i isporučenog naboja preko određenog raspona struja pražnjenja.

2.3. Hibridni Propulzijski Sustav

Hibridni propulzijski sustav koristi motor s unutarnjim izgaranjem koji je u kombinaciji s električnim strojem na način da se kemijska snaga iz goriva pretvara u električnu energiju iz generatora. Električna energija prolazi kroz regulatore motora i električnog stroja koji se tada rotira pri čemu krilca propelera daju potisak. Motor s unutarnjim izgaranjem osigurava propulziju kod visoke brzine vrtnje pri čemu je potrebna i visoka mehanička učinkovitost. Električni stroj je spojen na istu osovinu preko mjenjača ili izravno na osovinu koja je spojena s brodskim vijkom (propelerom). On se najčešće koristi pri smanjenoj brzini vrtnje pogonskog stroja. Pokretanje motora s unutarnjim izgaranjem pri niskoj brzini vrtnje neučinkovito je te se takav načina djelovanja gotovo i ne koristi. Kada bi se tako pokretala brodica, došlo bi do izgaranja napajanja, točnije spremnika energije koji čine baterije. U sustav se može ugraditi više generatora ili više motora, ali se strogom definicijom to više ne naziva hibridni sustav [9].

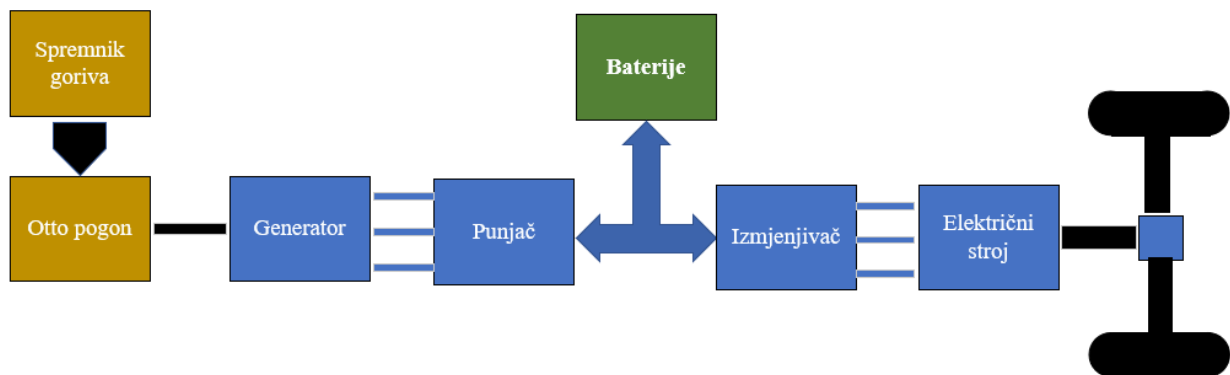
Hibridne sustave dijelimo u tri osnovne skupine:

- serijski hibridni sustav
- paralelni hibridni sustav
- serijsko-paralelni hibridni sustav

2.4. Vrste hibridnih propulzijskih sustava

2.4.1. Serijski hibridni propulzijski sustav

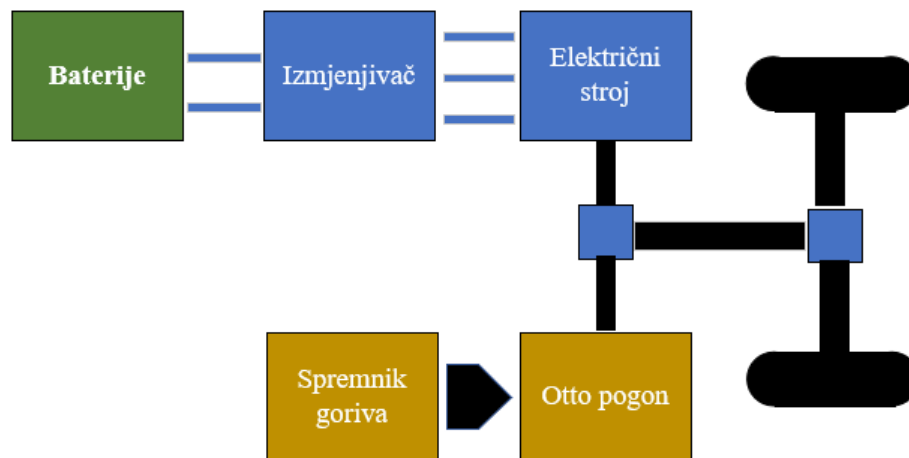
Serijski hibridni pogonski sustav je najjednostavnija hibridna konfiguracija koja se može vidjeti na slici (2.6.). U tom je slučaju električni stroj spojen s propulzorom. Električni stroj dobiva električnu energiju iz baterija ili generatora kojim upravlja dizelski motor. Moguće je pomoću regenerativnog kočenja napuniti bateriju kako bi se kasnije iskoristila u učinkovitijim situacijama odnosno u slučajevima zaustavljanja ili odlaženja iz luke, gdje su benzinski i dizelski motori neučinkoviti. Računalo brodice može se samo prebaciti na napajanje električnog stroja samo iz baterija čime se motor čuva za situacije gdje je učinkovitiji. Električni stroj je kod serijskog pogona obično veći, a baterija je općenito snažnija od one u paralelnom hibridnom sustavu kako bi se osigurale ostale potrebe energije na brodu. Veća baterija zajedno s generatorom, povećava troškove vozila, čineći serijski hibridni sustav skupljim od usporednih hibridnih sustava [10], [11].



Slika (2.6.) - Blokova shema serijskog hibridnog sustava

2.4.2. Paralelni hibridni propulzijski sustav

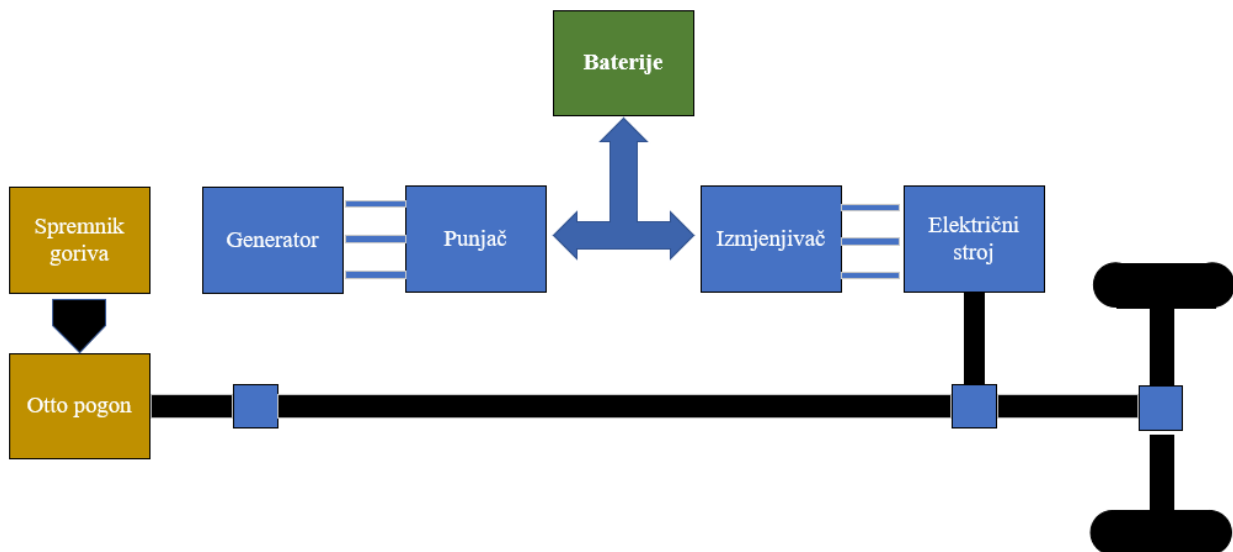
Paralelni hibridni sustav može se vidjeti na slici (2.7.) gdje dizelski motor i električni stroj djeluju zajedno kako bi generirali snagu koja pokreće propulzor. Paralelni hibridi imaju tendenciju da koriste manje baterije od serijskih hibrida, oslanjajući se na regenerativno kočenje kojim se baterija nadopunjava. Kada su zahtjevi snage niski, paralelni hibrid također koristi električni stroj kao generator za dodatno punjenje, slično kao alternator u konvencionalnim automobilima. Budući da je motor izravno povezan s propelerom u paralelnim pogonima, eliminira se neučinkovitost pretvaranja mehaničke snage u struju, povećavajući učinkovitost takvih hibrida u brzim vožnjama. Time se smanjuje, ali ne eliminira učinkovitost korištenja električnog stroja i baterija u zaustavljanju [10], [11].



Slika (2.7.) – Blokowska shema paralelnog hibridnog sustava

2.4.3. Serijsko-paralelni hibridni sustav

Serijsko-paralelni koncept kombinira oba prethodno spomenuta pristupa. U sustavu postoje dva različita motora i ovisno o uvjetima rada, njegova kombinacija se može promijeniti. Takvom povezanošću sustava dopušta se rad paralelnog i serijskog načina rada. Pomoću napredne tehnologije moguće je korištenje samo električnog sustava, koji može biti odvojen te može samostalno raditi. Takav način djelovanja najčešće se koristi u urbanim mjestima kod velikih brzina te na taj način ne zagađuje okoliš. Omjer snage na vratilu može biti od 0 – 100 % u radu motora s unutarnjim izgaranjem ili električnog stroja. U situacijama poput brzog ubrzanja, oba sustava rade zajedno. Takvi sustavi se obično miješaju i koriste prikladne kontrole nadzora pri čemu im je potrošnja u granicama uobičajenog. Za optimalnu hibridizaciju, optimalan udio korištenja električne energije mora se identificirati s dizelskim motorom na način da se koriste optimalne vrijednosti tih pokazatelja u različitim situacijama te se može smanjiti potrošnja goriva i emisija u okoliš [10], [11].

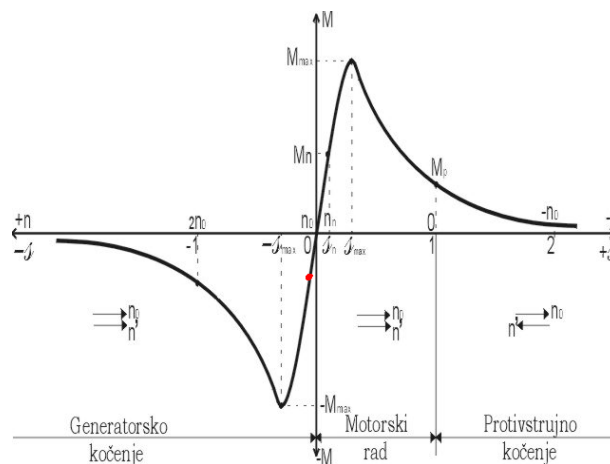


Slika (2.8.) – serijsko-paralelni hibridni sustav

3. AUTONOMNI IZMJENJIVAČ

Izmjenjivač ili inverter je uređaj koji se koristi kod napajanja izmjeničnih trošila pri čemu povezuje istosmjerni i izmjenični električni krug. Tok energije prelazi iz istosmjernog prema izmjeničnome sustavu. Pri takvoj pretvorbi, izmjenjivač može proizvesti napon i frekvenciju točno određenog iznosa. Najčešće izmjenjivač stvara autonomnu izmjeničnu mrežu 230 V i 50 Hz, pa ga i zbog toga nazivamo autonomni izmjenjivač, obzirom da sam stvara autonomnu mrežu na kojoj mogu raditi izmjenična trošila.

Smjer struje u autonomnom izmjenjivaču najčešće teče od istosmjerne prema izmjeničnome krugu. Kada bi se na izlaz autonomnog izmjenjivača spojio električni stroj te bi ga se pokretalo generatorski, smjer struje bi bio okrenut, odnosno, struja bi tekla ka istosmjernome izvoru kojeg čine baterije, uslijed čega bi se na taj način i punile. Zaključno tome izmjenjivač može raditi u 4 kvadranta od kojih su prvi i treći u motorskom načinu rada dok su drugi i četvrti kvadrant određeni za generatorski način rada te im je karakteristika slična kao asinkronom stroju na slici (3.1.). [12]



Slika (3.1.) – momentna karakteristika asinkronog stroja u 4 kvadranta [24]

Sve češće u energetskej elektronici susrećemo autonomne izmjenjivače koji pomažu kod pretvaranja istosmjerne energije u izmjeničnu. Sve češća su upotreba u brodicama koje imaju pogonske baterije i električni stroj za pogon. Autonomnim izmjenjivačem pretvara se istosmjerna struja iz baterija u izmjeničnu, koju koriste izmjenična trošila na brodu. Također istim takvim

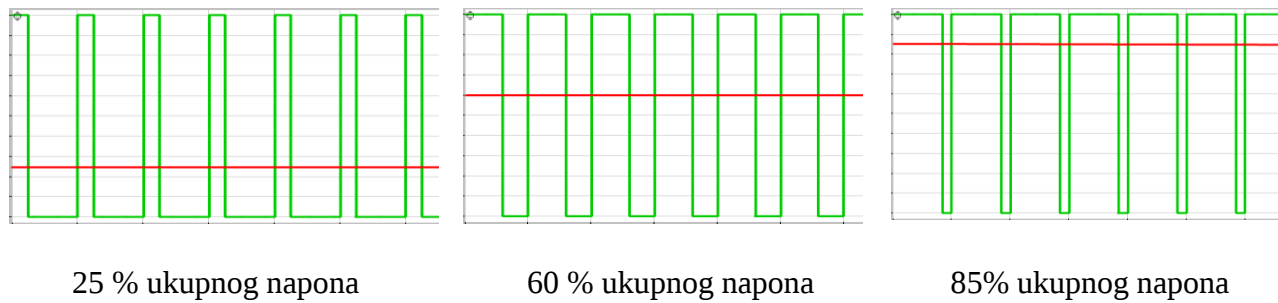
izmjenjivačem može upravljati električni stroj koji u tome slučaju koristimo kao pogonski stroj u motorskom načinu rada. Kako bi se djelotvornost povećala na maksimum, odabire se hibridni paralelni sustav koji okrepljuje cijeli koncept izrade i funkcionalnost energetskog sustava za manja plovila.

3.1. Električni ventili

Podjela električnih ventila vrši se na upravljive i neupravljive pri čemu se upravljivi dijele na one koji se mogu samo uklopiti i one koji se mogu iskllopiti i uklopiti. Kod neupravljivih ventila može se uklapati i isklapati samo glavnim tokom napona i struje koji prolazi kroz njih, dok se kod upravljivih ventila može upravljati pomoću upravljačkog sklopa slabim signalom napona ili struje. Neke upravljive ventile moguće je samo uklopiti dok je za njihovo isklapanje potrebno isključiti glavni strujni krug (primjer je tiristor). Podjela električnih ventila vrši se prema korištenim sklopkama na tranzistorske i tiristorske pretvarače. Tranzistorski spadaju u pretvarače manje snage, a tiristorski u pretvarače veće snage gdje je potrebno propuštanje i upravljanje struja većih iznosa. Kod izmjenjivača se koriste tipično IGBT dok se kao upravljive elektroničke sklopke koriste tranzistori.

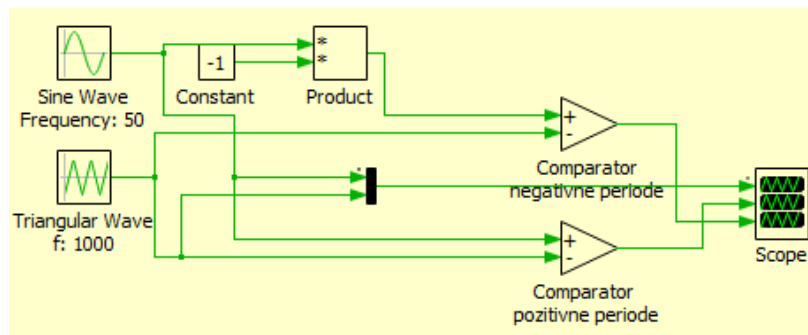
3.3. Modulacija trajanja impulsa

Širinsko impulsna modulacija (eng. *Pulse Width Modulation* ili PWM) je jedna od najčešće korištenih modulacija u energetskoj elektronici kojom se simulira izmjenični napon. Pomoću ove modulacije upravlja se IGBT sklopkom kako bi iz istosmjernog izvora stvorio izmjenični krug na koji se dalje spajaju sva trošila. Modulacija se izvodi na način uzastopnog, ali vremenski promjenjivog uključivanja i isključivanja IGBT sklopke. Srednja vrijednost napona određuje se faktorom opterećenja IGBT-a odnosno površinom ispod linije konstantnog napona.



Slika (3.3.) – Trenutačna srednja vrijednost signala

Kako sklop napaja konstantan istosmjerni izvor ne može se mijenjati napon na njemu, ali može se mijenjati vrijeme uključenosti IGBT sklopke. Sa slike (3.3.) može se vidjeti da je brzina sklapanja konstantna, mijenja se faktor opterećenja. Modulacija radi na način usporedbe dva različita signala što se vrši pomoću komparatora te se na slici (3.4.) može vidjeti i cijeli sklop kojim se upravlja IGBT simuliran u programu Plecs.



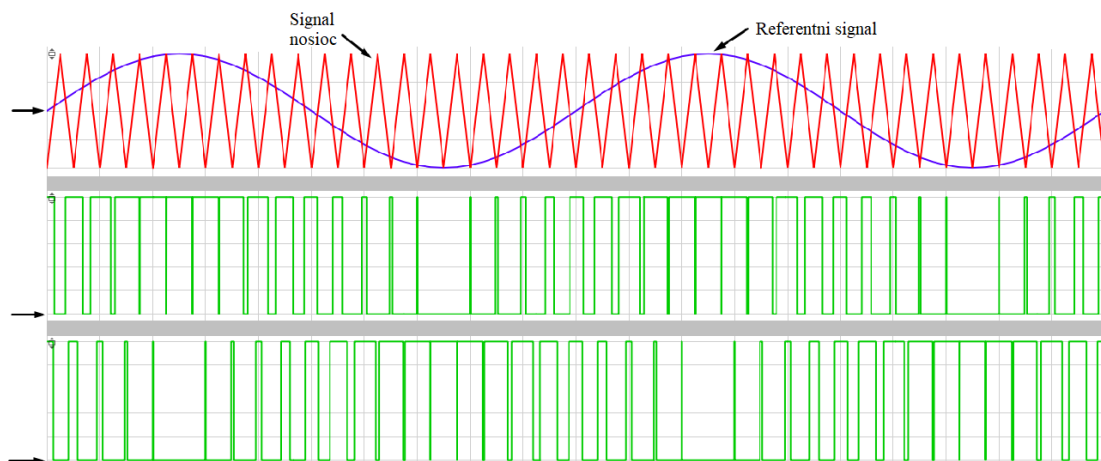
Slika (3.4.) – Logika upravljanja IGBT sklopkama

Na slici (3.5.) mogu se vidjeti valni oblici simulirani u programu Plecs pomoću kojih je moguće istosmjerni napon pretvoriti u izmjenični pomoću IGBT-a. Prvi signal naziva se referentni signal (eng. *carrier*), te će njegova frekvencija biti jednaka frekvenciji izlaznog signala. Kod referentnog signala najčešće se upotrebljava sinusni valni oblik koji je opisan jednadžbom (3-1), ali val nosioc U_{cm} može mijenjati amplitudu kada bi se govorilo o modulaciji amplitude AM (eng. *Amplitude Modulation*). Promjenom frekvencije f_c može se dobiti frekvencijska modulacija FM (eng. *Frequency Modulation*) te promjenom faze φ_c dobiva se fazna modulacija PM (eng. *Phase Modulation*). Amplitudna modulacija je najjednostavnija, ali je podložna smetnjama dok su

frekvencijska i fazna modulacija kvalitetnije te međusobno slične obzirom da se nalaze ispod krivulje sinusnog valnog oblika [16].

$$U_c = U_{cm} \cdot \sin(2\pi f_c + \varphi_c) \quad (3-1)$$

Drugi signal naziva se signal nosioc (eng. *modulator*) koji ima višestruko veću frekvenciju od referentnog signala te služi za njegovo uzorkovanje. Povećanjem frekvencije signala nosioca dobiva se preciznije uzimanje uzoraka odnosno bolja preslika. Previše velika frekvencija signala nosioca nije povoljna zbog pojave izobličenja, odnosno povećanje gubitaka kod sklapanja prilikom izrade izlaznog signala, kod kojeg gornji graf predstavlja pozitivne periode, a donji njegovu suprotnost. Signal nosioc najčešće je trokutastog valnog oblika, a rjeđe sinusnog ili pravokutnog kod kojeg je THD veći usprkos dobivanju kvazi – sinusni signal koji je stepenastog oblika.



Slika (3.5.) – Valni oblici dobiveni simulacijom

Izlaz čini pravokutni valni oblik napona različitog faktora ispunje pri čemu se pojavljuju širine impulsa kombinirane s pauzama (eng. *Duty Cycle*). Jednadžba (3-2) prikazuje izračun amplitudnog indeksa modulacije.

$$m_a = \frac{\vec{U}_{contr}}{\vec{U}_{carr}} \quad (3-2)$$

A frekvencijski indeks u izrazu (3-3) predstavlja omjer između frekvencije sklapanja f_{carr} i frekvencije f_1 koja čini prva harmonička komponenta izlaznog napona, te je određena frekvencijom

referentnog signala f_{contr} pri čemu se može zaključiti da će frekvencija izlaznog signala iznositi jednaku vrijednost kao i frekvencija kontrolnog napona U_{contr} .

$$m_f = \frac{f_{carr}}{f_1} \quad (3-3)$$

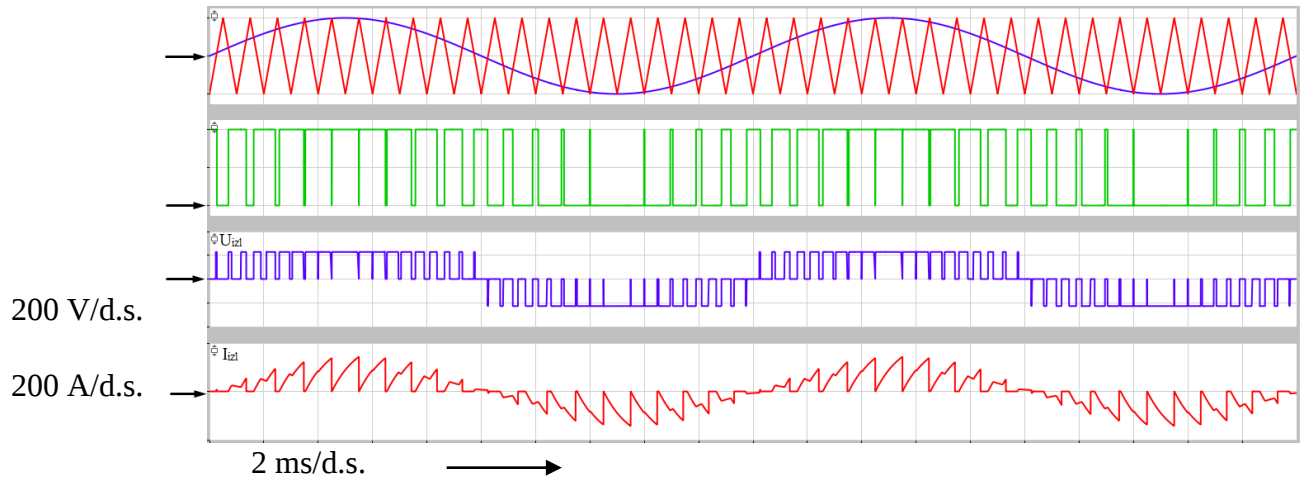
Pomoću izraza (3-4) moguće je zaključiti zašto je kontrolni napon sinusoidaln. Obzirom da će prva harmonička komponenta predstavljati ukupni izlazni napon, te će on također biti sinusoida koja će se mijenjati linearno s promjenom m_a , sve dok je $m_a < 1$.

$$\vec{u}_{izl} = \frac{m_a \cdot u_{ul}}{2} \quad (3-4)$$

Zaključno, može se reći da se više energije prenosi u izmjenični sustav kod dužeg vremena uključenja IGBT sklopke. Frekvencije koje se koriste kod takvih modulacijskih signala su u rasponu od 5kHz do 20kHz [19].

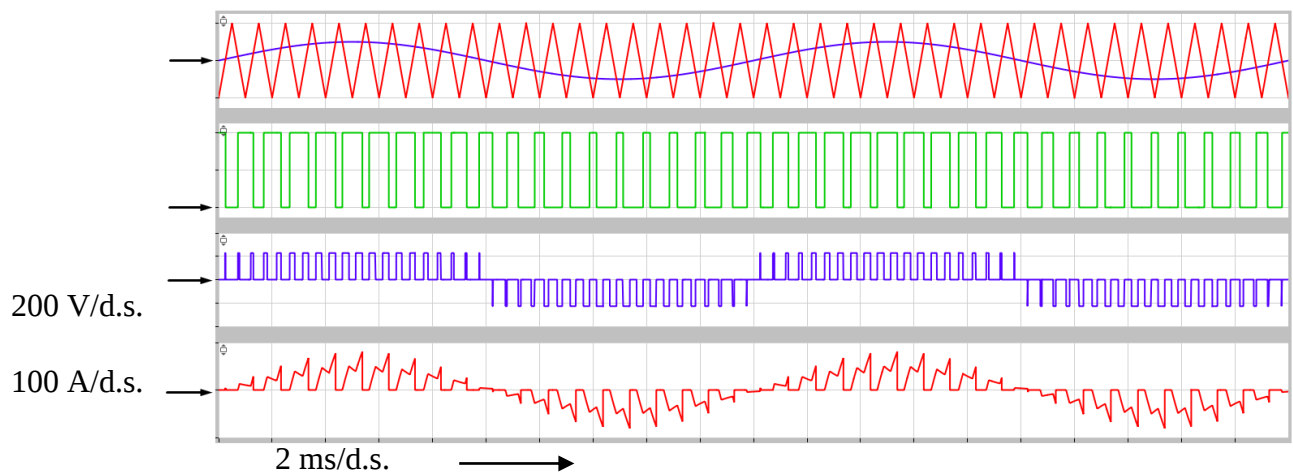
Simulacijama koje slijede izrađene su upotrebom otpornika ($R = 1 \Omega$) i zavojnice ($L = 1 \text{ mH}$) u seriji sa njime koji su spojeni na izlaz pretvarača. Radi preglednosti u simulaciji je korištena frekvencija modulacije vrijednosti 1000 Hz, dok frekvencija signala nosioca iznosi 50 Hz.

Treći graf predstavlja napon koji se nalazi na izlazu (U_{izl}) te on iznosi 230 V, a četvrti graf predstavlja struju (I_{izl}) na trošilu koja doseže vrijednosti 140 A te joj faktor harmonijskog izobličenja iznosi 62 %, a srednja vrijednost jednaka je 59 A.

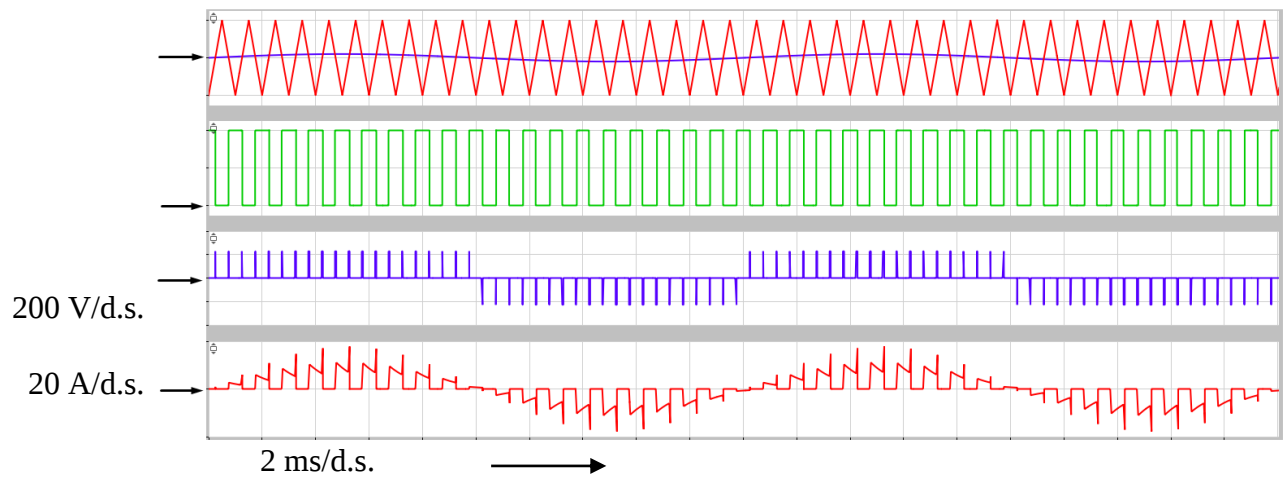


Slika (3.10.) – Signal nosioc jednake amplitude kao i referentni signal

Amplituda signala nosioca i signala modulacije mora biti jednaka, ukoliko je amplituda signala modulacije veća, to će rezultirati smanjenjem rekonstruiranog signala odnosno smanjenjem struje koja prolazi zavojnicom što se i može vidjeti na slici (3.6.). Uzastopnim povećanjem amplitude signala nosioca, smanjuje se struja kroz zavojnicu do minimalnih vrijednosti.

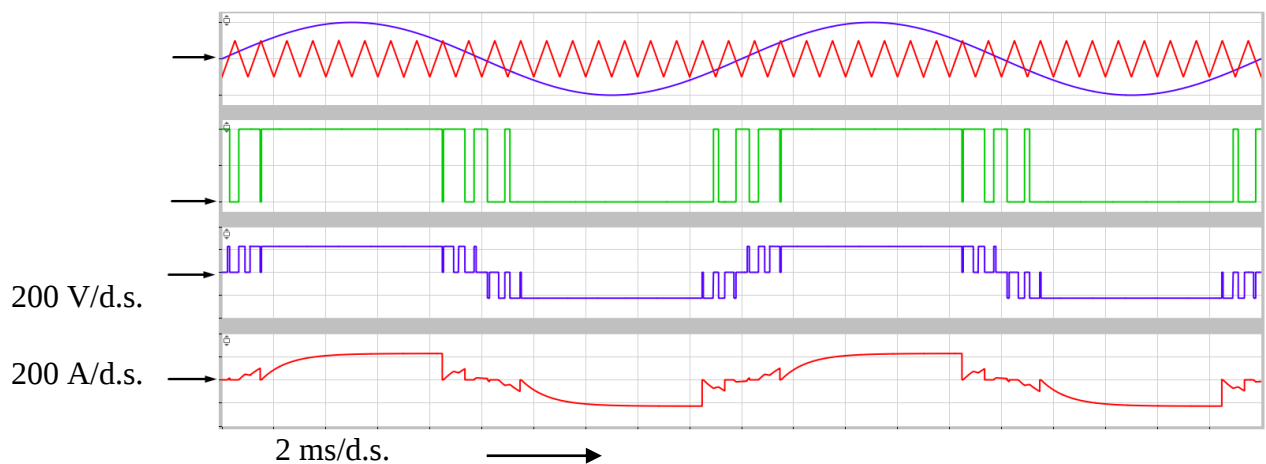


Slika (3.6.) – Signal nosioc s dvostruko većom amplitudom od referentnog signala



Slika (3.7.) – Signal nosioc s deset puta većom amplitudom od referentnog signala

Smanjenjem amplitude signala nosioca povećava se struja kroz zavojnicu, ali samo do vrijednosti napona istosmjernog kruga što se može vidjeti na slici (3.9.).

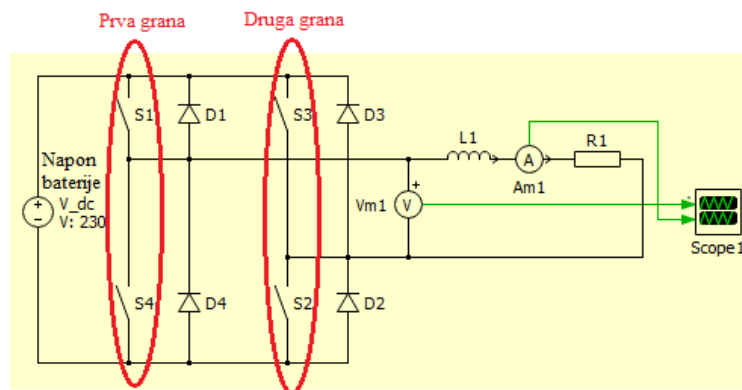


Slika (3.9.) – Signal nosioc dvostruko manje amplitude od referentnog signala

3.4. Jednofazni autonomni izmjenjivač s utisnutim naponom

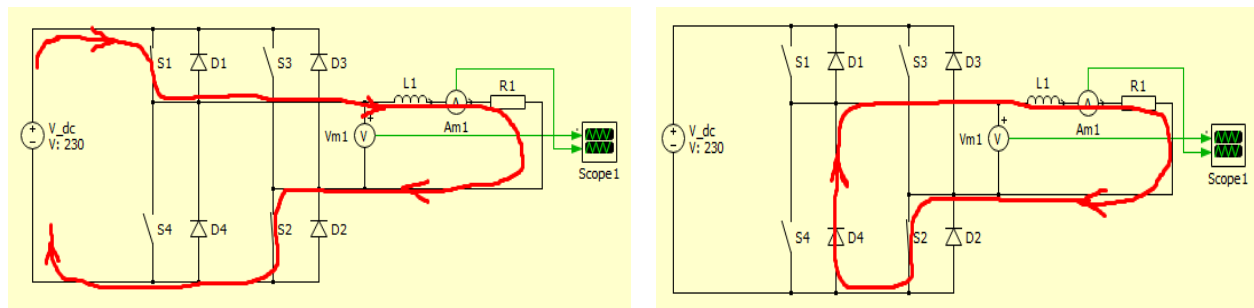
IGBT sklopka se jednostavno uključuje na način „ON“ ili „OFF“ aktiviranjem i deaktiviranjem svojih vrata. Primjenom pozitivnog signala ulaznog napona preko vrata i odašiljača, uređaj će držati "ON" stanje i provoditi će struju kroz svoje druge dvije elektrode. Kada se ulaz vrata dovede na nulu ili negativan signal tada će uređaj prijeći u zatvaranje odnosno u "OFF" stanje. Tada se neće provoditi struju kroz druge dvije elektrode bas kao što je to slučaj kod bipolarnog tranzistora. [15]

Izmjenjivač se sastoji od 4 IGBT sklopke, koje shematski zamjenjujemo sklopkama i nazivamo ih S1, S2, S3, S4. Svaki IGBT može voditi struju u oba smjera što je bitno jer izmjenjivač može raditi i u generatorskome načinu rada. Iz slike (3.6.) može se vidjeti kako sklopke S1 i S4 čine jednu granu, a S2 i S3 drugu granu izmjenjivača. Svakoj sklopki pridružena je povratna dioda, dok je trošilo spojeno između tih dviju grana. Iz priložene sheme vidi se da sklopke S1 i S4 ne smiju biti istovremeno zatvorene obzirom da dolazi do kratkog spoja na bateriji, te isto vrijedi i za sklopke S2 i S3. Da bi se iz istosmjernog napona dobio izmjenični, radi se postupkom širinsko impulsne modulacije (eng. *Pulse Width Modulation*) ili PWM. Napon takve modulacije je visok i iznosi vrijednost nazivnog napona ili nizak te iznosi 0. Širina signala određena je vremenom uklopa, odnosno isklopa IGBT sklopke, a njegova srednja vrijednost signala tvori sinusni valni oblik. To radi na način da kod krajeva jedne polu periode ima kreće vrijeme rada dok na samome vrhu sinusnoga signala IGBT sklopka radi duže. Takvo vrijeme prikazuje se u mili sekundama (ms) i ovisi o željenoj frekvenciji na izlazu sklopa [19].



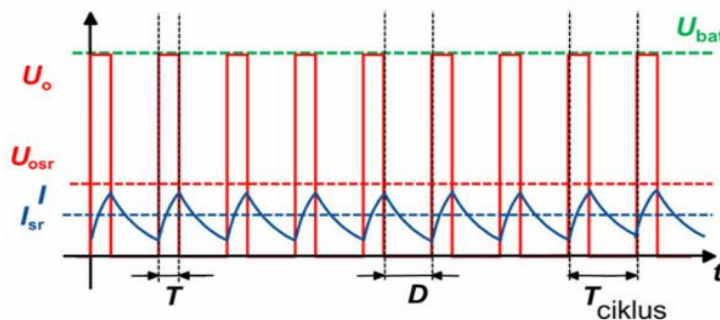
Slika (3.6) – Shema jednofaznog autonomnog izmjenjivača

Izmjenjivač u svome radu koristi 4 IGBT sklopke pri čemu uvijek rade dva para tranzistora. S1 i S2 rade u paru kako bi tvorili pozitivnu polu periodu, a S3 i S4 negativnu polu periodu sinusnog signala. Slika (3.7.) prikazuje smjer struje koja protječe nakon zatvaranja sklopke S1 iz pozitivnog pola baterije te prolazi induktivitetom te trošilom kako bi se preko sklopke S2 vratila prema negativnome polu na bateriji. Takav krug struje aproksimira pozitivnu poluperiodu sinusnog izlaznog napona. Kada se otvori sklopka S1, struja nastavlja teći uslijed prisustva induktiviteta po putu kojeg jedino ima kroz povratnu diodu od sklopke S4. Kako u toj situaciji nema aktivnih izvora, struja počinje padati, a izlazni napon jednak je naponu baterije. Ponovnim uklopom sklopke S1 ponavlja se cijeli krug kojim struja počinje rasti do trenutka kada se S1 otvori pri čemu struja ponovno pada.



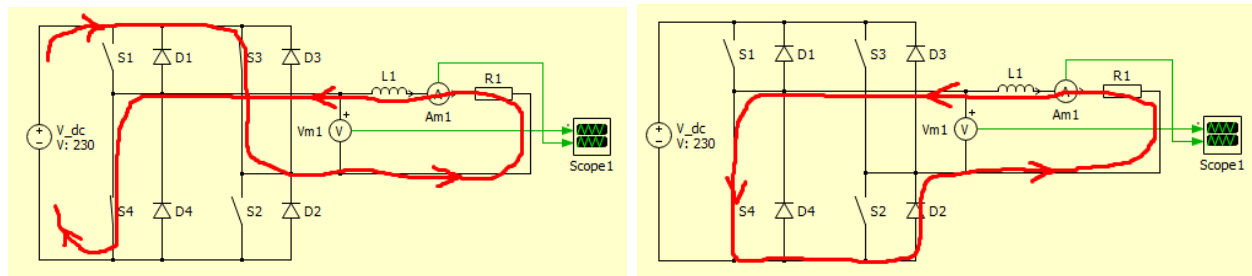
Slika (3.7.) – Smjer struje uslijed modulacije pozitivne polu-periode

Iz slike (3.8.) je moguće vidjeti kako izgleda graf napona i struje uz konstantan iznos trajanja uklopa i isklopa IGBT sklopke čineći tako pozitivnu polu periodu. Oznaka T nam predstavlja vrijeme koliko je IGBT bio upaljen uslijed čega njime proteče struja. D predstavlja vrijeme kada se tranzistor isključuje, a struja uslijed induktiviteta počinje lagano padati do ponovnog uključenja sklopke. T ciklus nam predstavlja zbroj vremena od T i D.



Slika (3.8.) – Izlazni valni oblik generiran konstantnim vremenom uklopa i isklopa

Kako bi se dobila negativna polu perioda sinusnog valnog oblika u funkciju dolaze sklopke S3 i S4. Zatvaranjem tih sklopki propušta se struju u suprotnome smjeru kroz trošilo. Na isti način otvara se sklopka S3 kako bi struja kružila preko povratne diode D2 uslijed induktiviteta na trošilu što se i može vidjeti na slici (3.9.). Kako napon i struja imaju negativan predznak na trošilu, baterija još uvijek zadržava svoj smjer struje.



Slika (3.9.) – Smjer struje uslijed modulacije negativne pulu-periode

3.5. Trofazni autonomni izmjenjivač s utisnutim naponom

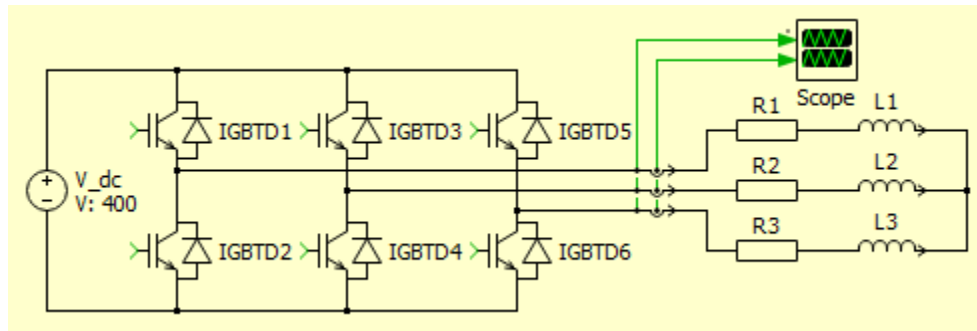
Kao što mu i samo ime kaže ovaj izmjenjivač generira tri sinusna valna oblika koji se koriste za upravljanje trofaznog električnog stroja. Njegov koncept izrade je nešto zahtjevniji od jednofaznog pretvarača pošto kod ovog koncepta istovremeno generiramo tri sinusoide izmjeničnog napona. Kao kod jednofaznog tako i kod trofaznog autonomnog izmjenjivača može se mijenjati proporcionalno napon i frekvencija čime se upravlja brzinu vrtnje električnog stroja uz konstantan moment. Kod trofaznog pretvarača moramo voditi računa da svaka faza bude pomaknuta za 120°el. s obzirom na fazu ispred [21].

Modulacija skalarnog upravljanja služi za upravljanje momentom i brzine vrtnje električnog asinkronog stroja te se ona mora mijenjati proporcionalno kako bi magnetski tok ostao nepromijenjen u suprotnome dolazi do zagrijavanja električnog stroja ili slabljenja momenta. U izrazu (3-5) može se vidjeti jednadžba koja to i dokazuje:

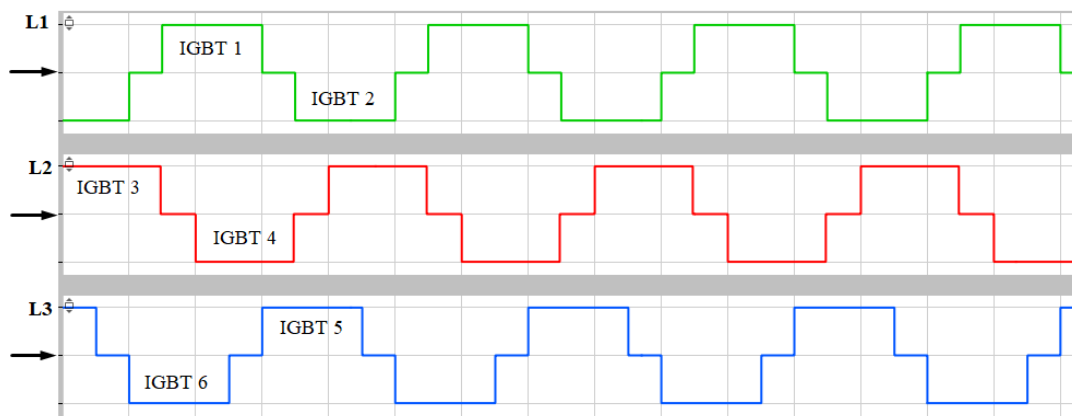
$$\Phi = \frac{U}{f} = \text{konstantno} \quad (3-5)$$

Φ - magnetski tok (Wb), U – napon (V), f – frekvencija (Hz)

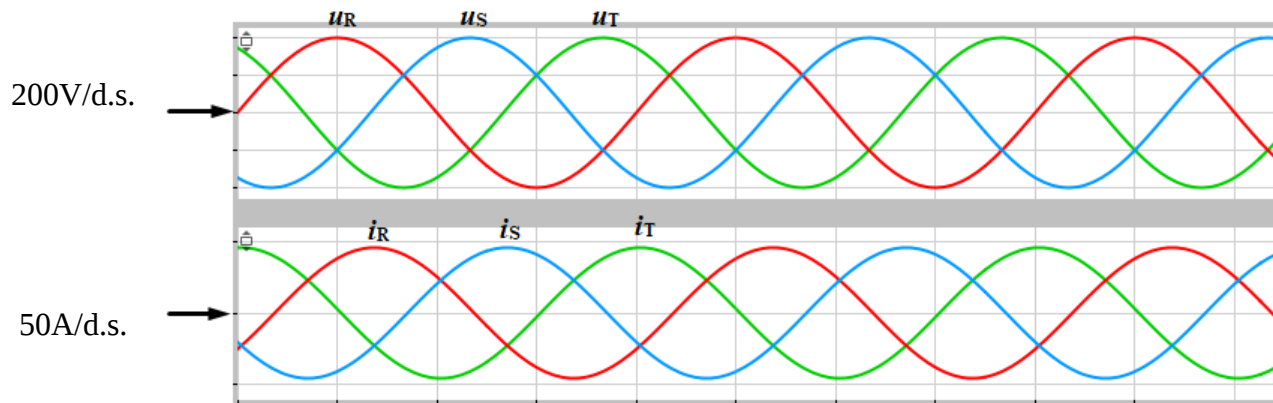
Sa slike (3.10.) vidi se kako je dodana još jedna paralelna grana u usporedbi s jednofaznim ispravljačem te su u granu dodane IGBT sklopke s njima pripadajućim diodama. Tako svaki IGBT vodi 120° el. te su u svakome trenutku uključena tri IGBT-a kroz koje prolazi struja. Ispravljač ukupno sadrži osam stanja pri čemu dva otpadaju zbog kombinacije sva tri gore ili dolje upaljena stanja.



Slika (3.10.) – Shema trofaznog autonomnog izmjenjivača



Slika (3.11.) – simulacija pretvorbe trofaznog sustava

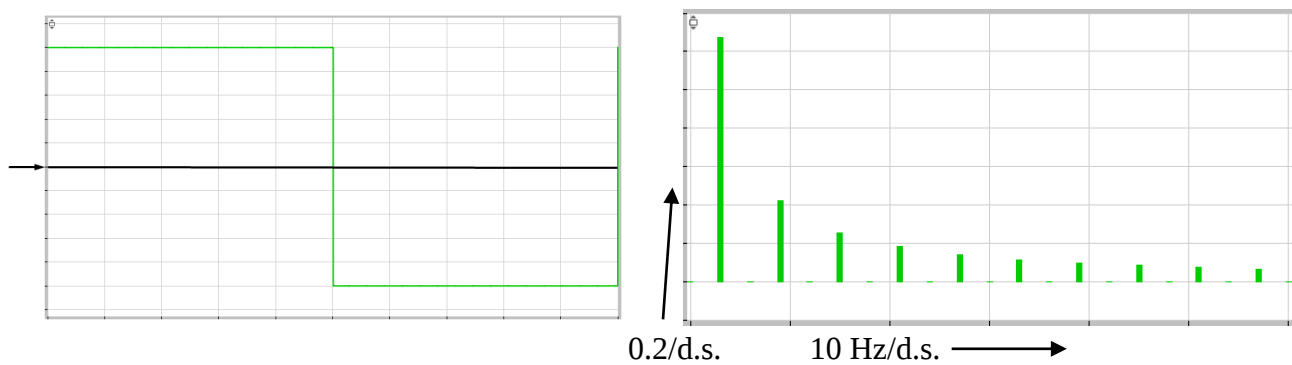


Slika (3.12.) – izlazni valni oblik napona i struje

3.6. Smanjivanje harmoničke komponente

Jedan od najtežih izazova u projektiranju pretvarača je smanjivanje harmoničke komponente. Oni djeluju na frekvenciji koja je cijeli broj te višekratnik osnovne frekvencije. Harmonici loše utječu na sve električne uređaje i ometaju rad čak i vlastitome pretvaraču uslijed čega mu se smanjuje faktor snage. Ako bi se takvim harmonijskim pretvaračem napajao električni stroj, u njemu bi se pobudila mehanička rezonancija što dovodi do akustičke buke samog trošila [14]. U izmjenjivačima se koristi pravokutni signal napona kojim bi se razvijanjem Fourierovog reda moglo dobiti puno harmoničkih komponenti. Kod pravokutnog signala s faktorom ispune 50 % može se detektirati i upotrijebiti čak i stota harmonička komponenta. Gibbsov efekt govori kako se pravokutni signal nikad ne može u potpunosti zamjeniti sumom članova Fourierovog reda [15].

Osnovnu harmoničku komponentu određuje signal koji se promatra, te je iste frekvencije kao analizirani pravokutni napon, a prva harmonička komponenta postaje član dvostruke frekvencije od prvog promatranog signala i tako dalje. Slika (3.13.) prikazuje Fourierjev spektr signala za navedeni pravokutni napon od 1 Hz, faktora ispune 50 %.



Slika (3.13.) – *Harmoničke komponente pravokutnog signala*

Kod Fourierovog spektra harmoničke komponente opadaju s porastom frekvencije. Amplitude kod nižih frekvencija su dosta izraženije usprkos viših frekvencija te one kod viših frekvencija amplitude opadaju znatno sporije. Parnih komponenti nema jer je pravokutna krivulja simetrična u odnosu na x os [21].

Preko izraza (3-6) može se izračunati amplituda osnovne harmoničke komponente kao i osnovni član Fourijerova reda.

$$v_1 = \frac{4 \cdot V_{DC}}{\pi} \quad (3-6)$$

Uvrstivši vrijednosti koje prikazuje slika (3.13.), dobiva se vrijednost 1.274

$$v_1 = \frac{4 \cdot 1}{\pi} = 1.274 \quad (3-7)$$

Kako bi se izračunala amplituda neke n -te harmoničke komponente koristi se sljedeći izraz:

$$v_n = \frac{v_1}{n} = \frac{1.274}{3} = 0.425 \quad (3-8)$$

Dobivena rješenja podudaraju se prema slici (3.13.) koja je izrađena pomoću simulacije, te se ista rješenja mogu izračunati jednadžbom:

$$v_{an} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} u_a(t) \sin n \frac{2\pi}{T} dt \quad (3-9)$$

Da bi se to spriječilo potrebno je ukinuti sve neparne harmoničke komponente. Faktor harmonijskog izobličenja ili (eng. *Total Harmonic Distortion*, THD) nam govori koliko je signal izobličen te se njegova vrijednost izražava u postotcima.

Formula kojom se može izračunavati THD dana je izrazom (3-10).

$$THD = \sqrt{\frac{V_{a\ rms}^2 - V_{ac\ rms}^2}{V_{ac\ rms}^2}} \quad (3-10)$$

Pri čemu je:

$V_{a\ rms}^2$ – efektivna vrijednost osnovne harmoničke komponente napona

$V_{ac\ rms}^2$ – amplituda osnovnog člana Fourierova niza

Napon V_{ac} ima vršnu vrijednost kao i V_{dc} te mu je efektivna vrijednost jednaka:

$$V_{ac\ rms} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (3-11)$$

Postoje dva osnovna načina na koje je moguće smanjiti harmonička izobličenja:

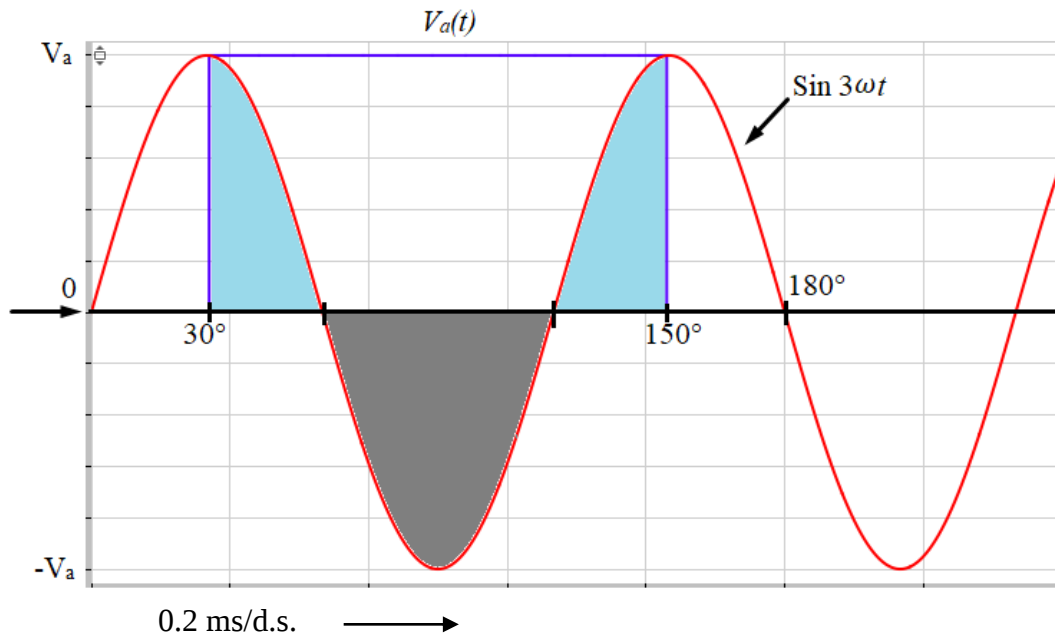
- Metoda uklanjanja harmonika
- Metoda poništavanja harmonika

3.6.1. Metoda uklanjanja harmonika

Uklanjanje harmoničke komponente moguće je regulirati pomoću kuta δ u pretvaraču odnosno, moguće je u potpunosti ukloniti treću harmoničku komponentu. Uklanjanjem treće harmoničke komponente izborom kuta δ ukida se najdominantniji član te u tome slučaju ostaje peta harmonička komponenta kao najniža i najizraženija neparna harmonička komponenta koja izaziva smetnje te izobličuje sinusni signal. Kada bi se sklopke upravljale tako da kut δ bude $-\pi / 6$ odnosno 30° el. tada bi se u potpunosti ukinula treća harmonička komponenta što znači da bi se signal oslobodio harmonika $3n$. U tome slučaju parametar δ je fiksiran i ne može se mijenjati kako bi se njime upravljalo naponom ili snagom na izlazu iz pretvarača [21]. Kada bi kut θ bio jednak nuli amplituda treće harmoničke komponente v_a iznosila bi kao u sljedećem izrazu:

$$V_{a3} = \frac{2V_{dc}}{\pi} \int_{\pi}^{\pi-\delta} \sin(3\omega t) d(\omega t) = \frac{4V_{dc}}{3\pi} \cos(3\delta) \quad (3-12)$$

Grafičko tumačenje integranda integrala prikazuje slika (3.14.) na kojoj se dvije površine, polovične pozitivne poluperiode zbrajaju čineći tako jednaku vrijednost površine negativne poluperiode uslijed čega je uklonjen treći harmonik iz pravokutnog valnog oblika.

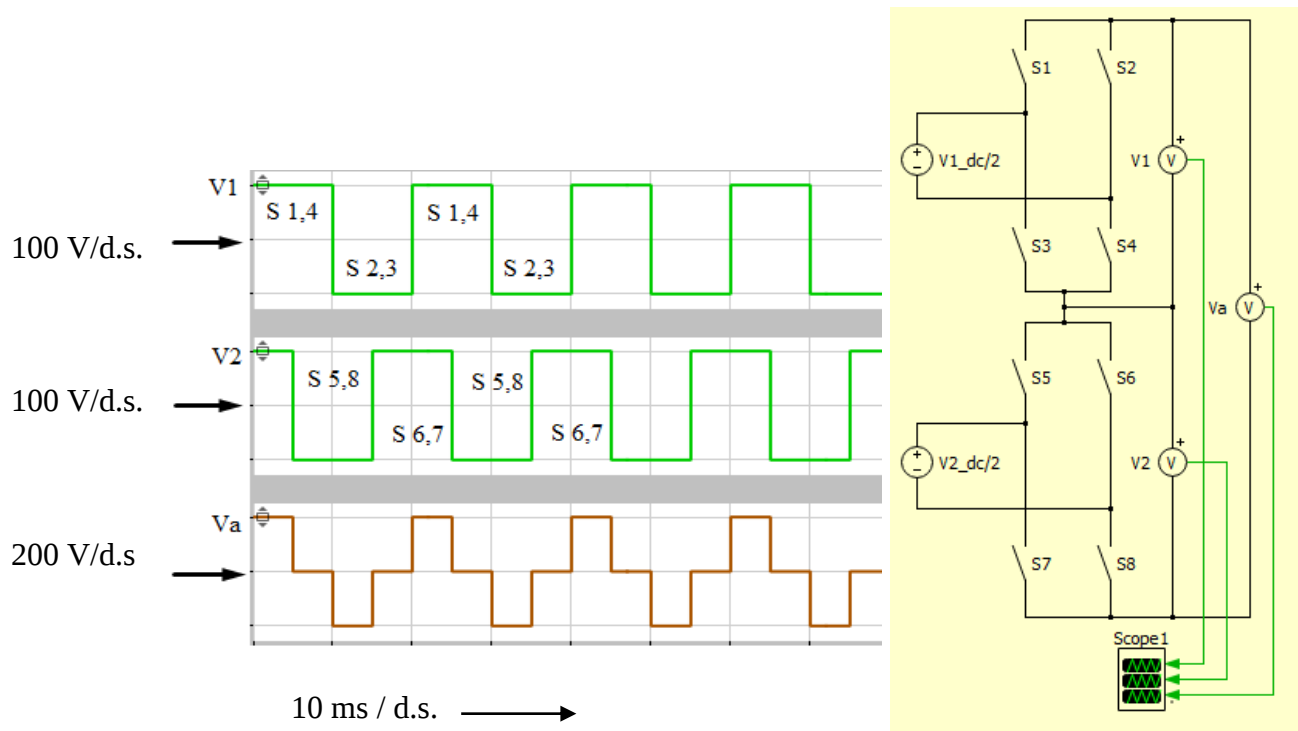


Slika (3.14.) – Grafički prikaz integranda integrala

3.6.2. Metoda poništavanja harmonika

Metoda poništavanja harmoničke komponente dobiva se na način korištenja dva istosmjerna izvora svaki pola nazivne vrijednosti te interpoliranja dva pravokutna valna oblika fazno pomaknutih napona. Izlazni napon oba izmjenjivača daje pravokutni valni oblik koji su fazno pomaknuti za 60° el.. Kada bi se tako upravljalo sklopkama da jedan signal kasni za drugim 60° el. ne bi postojao treća harmonička komponenta. Za ovo se još može reći da se poništavaju dvije harmoničke komponente jednakih frekvencija i amplituda te su fazno pomaknute za $3 \cdot 60^\circ$ el. = 180° el. Kod takvog spoja s dva polovična izvora moramo imati i dvostruko više sklopki kako bi simulirali takav pravokutni signal. Unatoč tome svaka je sklopka opterećena samo polovinom

nazivnog napona što može biti velika prednost kod projektiranja visokih izmjeničnih napona [21]. Zbroj napona v_1 i v_2 daje ukupni izlazni napon v_a što se može vidjeti na slici (3.15.).



Slika (3.15.) – Simulirani valni oblici izlaznog napona dvaju autonomnih jednofaznih izmjenjivača (V_1 , V_2) i poništavanje treće harmoničke komponente V_a

4. NAČELO RADA ELEKTRIČNOG STROJA

4.1. Svojstvo elektromagneta

Zavojnica je električni element koji spada u pasivne komponente pri čemu se njezina vrijednost induktiviteta izražava u henrijima (H). Zavojnica kod istosmjerne struje predstavlja samo kratki spoj pošto se ne događa promjena smjera struje kao što je to primjer kod izmjenične struje. Na njoj se trenutno pojavi napon s druge strane priključka dok struje lagano raste na što ukazuje kako se zavojnica protivi nagloj promjeni magnetskoga toka. Upravo zbog tog učinka ona postaje memorijski element koji se može upotrijebiti u različitim konceptima uređaja. Svaki električni stroj sastoji se od dvije ili više zavojnica pri čemu one postaju glavni element u pretvorbi energije [24]. Regulacijom vremena propuštanja struje kroz nju može se regulirati i sama struja koja prolazi zavojnicom te se uslijed toga može mijenjati i njezin induktivitet koji se računa pomoću sljedeće formule:

$$L = \frac{\Phi_B}{I} \quad (4-1)$$

Gdje je:

L – induktivitet zavojnice u henrijima (H)

Φ_B – ukupni magnetski tok u weberima (Wb)

I – struja koja protječe zavojnicom u amperima (A)

Električni stroj pretvara električnu energiju u mehaničku i obrnuto pri čemu se posljednji način rada naziva generatorski. Svaki električni stroj sastoji se od statora koji čini nepokretan dio i rotora koji čini pokretan dio stroja. Stator se sastoji od statorskog paketa koji je napravljen u obliku šupljeg valjka od prstenastih međusobno izoliranih limova. Uzduž statorskog paketa nalaze se utori u koje se stavlja armaturni namot koji se spaja u trokut ili zvijezdu. Što je stroj veći to je broj armaturnog namota manji i suprotno. U rotorski paket spadaju međusobno izolirani limovi koji su u obliku valjka te se u njemu također nalaze utori u koje se stavlja rotorski namot. Broj faza statora i rotora ne treba uvijek biti jednak, ali zato broj pari polova mora biti jednak inače se ne bi mogla

odvijati elektromagnetska pretvorba energije. Kada bi asinkroni stroj radio u generatorskome načinu rada tada mu se rotor mora vrtjeti brže od sinkrone brzine [22].



Slika (4.1.) – asinkroni električni strojevi

Način djelovanja asinkronog stroja zasniva se na okretnome magnetskome polju, a uvjet tome je postojanje minimalno dva prostorno pomaknuta namota preko koje teku vremenski i fazno pomaknute struje. Broj polova asinkronog stroja diktira statorski namot, a rotor mu se sam prilagodi. Najčešće se izrađuju asinkroni strojevi s tri faze koje na statoru čine tri namota prostorno pomaknuta za 120°el . U svakom trenutku sva tri namota stvaraju zajedničko magnetsko polje uvijek istog intenziteta. Ono neprestano mijenja smjer pa se zato i naziva okretnim magnetskim poljem. To magnetsko polje se uvijek vrti sinkronom brzinom n_s koja je proporcionalna frekvenciji f , a obrnuto proporcionalna broju pari polova p u statorskom namotu [22].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4-2)$$

Rotor kod asinkronih strojeva nikada se ne vrti brzinom okretnog magnetskog polja, nego uvijek ima neko zaostajanje i to nazivamo klizanjem asinkronog stroja koje se izražava u postocima, (4-3). Kod nazivne brzine vrtnje klizanje iznosi 3 – 5 %, a što je električni stroj više opterećen klizanje mu se povećava te se ono računa kao razlika brzine statora i rotora [22]. Klizanje je jednako jedan kod samog pokretanja električnog stroja, a u motorskom načinu rada to klizanje se kreće između 0 i 1.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} [\%] \quad (4-3)$$

n_s - brzina vrtnje statora, n - brzina vrtnje rotora

4.2. Zakoni protjecanja

Kod uklopa stroja na mrežu rotor stoji, silnice okretnog magnetskog polja presijecaju rotorske vodiče u kojima se inducira napon koji kroz njih, obzirom kako su kratko spojeni, protjera struju. Kako na vodiče rotora koji se nalaze u magnetskome polju statora protječe struja, na njih djeluje sila te se javlja moment koji tada počinje ubrzavati rotor. Cijeli ovaj postupak zasniva se na tri temeljna zakona elektrotehnike:

1. Faraday-ev zakon elektromagnetske indukcije $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$
2. Amperov zakon protjecanja $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Theta$
3. Amperov zakon sile na vodič u magnetskom polju $\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$

-Prvi zakon nam govori kako uslijed promjene magnetskog toka Φ u vremenu t stvaramo elektromotornu silu $\mathcal{E}$ u vodljivoj petlji izražavajući je u voltima (V).

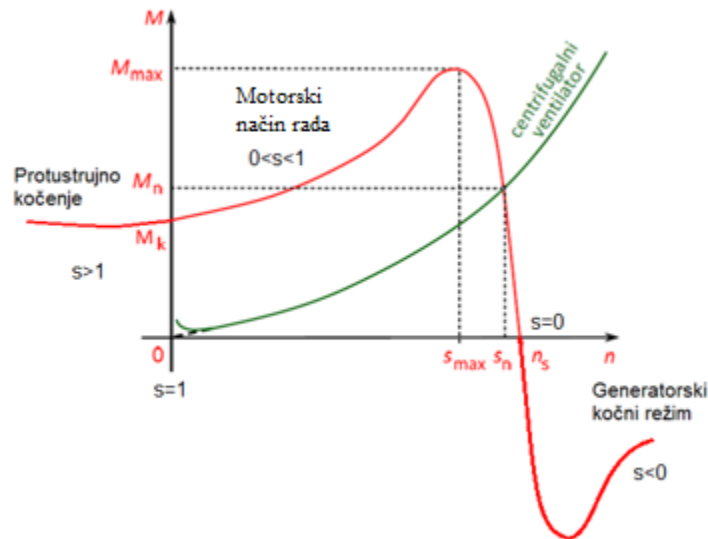
-Drugi zakon povezuje električne struje I i magnetske tokove Θ

-Treći zakon govori kako struja I koja protječe vodičem unutar magnetskog polja na duljinu vodiča l stvara sila F izražavana u njutnmetrima (Nm).

Radni otpor u što spada otpor bakra i željeza ne utječu na frekvenciju mreže te je njihov iznos konstantan, a vrijednosti induktivnog otpora rastu s povećanjem frekvencije te se ukupna impedancija računa kao zbroj vrijednosti modula komponenti:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4-4)$$

4.3. Momentna karakteristika asinkronog električnog stroja



S_n – nazivno klizanje (0,5 – 8%)

S_{max} – klizanje za maksimalni (prekretni) moment (5 – 25%)

M_{max} – prekretni moment
(otprilike 2 – 2,5 M_n)

M_k – potezni moment

Kut opterećenja za maksimalni moment
sa zanemarivim gubicima je 135° el.

Slika (4.2.) – Vanjska momentna karakteristika asinkronog stroja [22]

Slika (4.2.) predstavlja momentnu karakteristiku asinkronog stroja koju karakterizira mali potezni moment M_k . Nakon zaleta karakteristika prelazi maksimalni moment koji nazivamo prekretni moment M_{pr} . Nakon toga stroj radi u području između nazivnog momenta i sinkrone brzine. Kada bi moment tereta bio sve veći tada bi se brzina vrtnje smanjivala i električni stroj bi se zagrijavao sve više jer on sebe najbolje hladi kada radi na nazivnoj brzini vrtnje. Zavrtime li stroj vanjskim momentom preko sinkrone brzine moment postaje negativan, a električni stroj prelazi u generatorsko kočenje i vraća energiju u mrežu. Smjer vrtnje električnog stroja može se promijeniti zamjenom bilo koje dvije od tri faze, ali kada bi se promijenio raspored faza za vrijeme motorskog način rada tada bi se ostvarilo protustrujno kočenje koje razvija relativno mali kočni moment te bi se na električnome stroju pojavilo pregrijavanje koje može oštetiti namote stroja. Iz slike (4.2.) također se može odrediti stabilno područje koje predstavlja kosina između prekretnog klizanja ($s = s_{max}$) i sinkronizma $s = 0$. Najmanji poremećaj kao usporenje ili ubrzanje rotora električnog stroja dovodi do takve promjene momenta koju električni stroj vraća u nazivnu radnu točku. Nestabilno područje bilo bi ono područje gdje momentna krivulja tereta sječe momentnu krivulju električnog stroja gdje je klizanje jednako jedan ili gdje je ono jednako njegovome maksimumu ($s = 1$ ili $s = s_{max}$). Kada bi se električni stroj usporio, moment bi se smanjio u odnosu na moment tereta te on usporava do

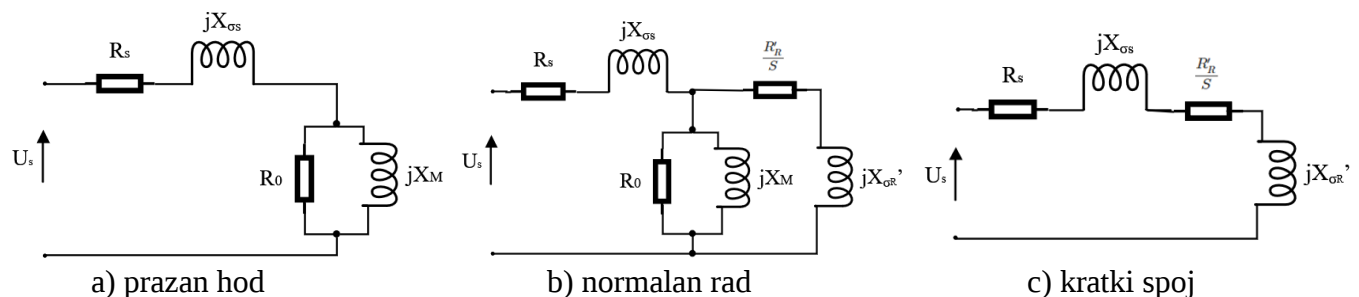
njegovog potpunog zaustavljanja. U tome slučaju se električni stroj više ne vraća sam u nazivnu radnu točku. Također je i točka maksimalnog momenta ujedno i na granici stabilnosti što bi značilo da se električni stroj više ne bi sam prilagođavao teretu promjenom brzine [22].

Tablica (4.1) – Koeficijenti klizanja kod različitog načina djelovanja

$1 > S > 0$	elektromotorni način rada
$S < 0$	generatorski način rada
$S > 1$	protustrujno kočenje
$S = 1$	kratki spoj, potezni moment
$S \approx 0$	idealni prazan hod

4.4. Nadomjesna shema asinkronog stroja

Slika (4.3.) prikazuje sva tri moguća stanja asinkronog stroja koji odgovara principu rada transformatora. Nadomjesna shema praznog hoda asinkronog električnog stroja odgovara principu rada transformatora gdje na izlaz nije priključen nikakav teret u obliku potrošača. Kada bi se na asinkroni stroj postavio teret kojim se moment stroja ne bi mogao savladati tada dolazi do kratkog spoja između rotora i statora čime oštećujemo namot u stroju. Isto to se dešava kod uklopa asinkronog električnog stroja prije nego se rotor počinje vrtjeti te mu nadomjesna shema odgovara shemi transformatora sa sekundarom u kratkom spoju, samo što se između statora i rotora nalazi zračni raspor koji smanjuje prijenos struje iz statora na rotor.



Slika (4.3.) – Nadomjesne sheme asinkronog stroja u sva tri slučaja

Kod normalnog rada asinkronog električnog stroja vrijednosti impedancija rotora reducirane su na statorsku stranu. Kako je riječ o simetričnom trošilu na slici (4.3.) prikazana je jednopolna

shema jer su ostale dvije faze identične te su fazno pomaknute za 120° el.. U praznome hodu električnog stroja rotor se okreće približno sinkronom brzinom, impedancije rotora postaju približno beskonačne i uslijed toga kroz rotor teče vrlo mala struja koja se troši na magnetiziranje jezgre. Rasipni induktivitet javlja se u rotoru uslijed induktivnog otpora te je on jako mali i ne pridonosi radu električnog stroja [22].

4.5. Izračun impedancije asinkronog stroja

Na podlozi nadomjesne sheme 4.3.b moguće je odrediti impedanciju stroja

$$Z = R_s + jX_{\sigma S} + (R_0 \parallel jX_M) \parallel \left(\frac{R_R'}{s} + jX_R' \right) \quad (4-5)$$

$$Z = R_s + jX_{\sigma S} + \frac{R_0 \cdot jX_M}{R_0 + jX_M} \parallel \frac{R_R' + s \cdot jX_R'}{s} \quad (4-6)$$

$$Z = R_s + jX_{\sigma S} + \frac{\frac{R_0 \cdot jX_M}{R_0 + jX_M} \cdot \frac{R_R' + s \cdot jX_R'}{s}}{\frac{R_0 \cdot jX_M}{R_0 + jX_M} + \frac{R_R' + s \cdot jX_R'}{s}} \quad (4-7)$$

$$Z = R_s + jX_{\sigma S} + \frac{\frac{(R_0 \cdot jX_M) \cdot (R_R' + s \cdot jX_R')}{(R_0 + jX_M) \cdot s}}{\frac{(R_0 \cdot jX_M) \cdot s + (R_R' + s \cdot jX_R') \cdot (R_0 + jX_M)}{(R_0 + jX_M) \cdot s}} \quad (4-8)$$

$$Z = R_s + jX_{\sigma S} + \frac{(R_0 \cdot jX_M) \cdot (R_R' + s \cdot jX_R')}{R_0 \cdot jX_M \cdot s + (R_R' + s \cdot jX_R') \cdot (R_0 + jX_M)} \quad (4-9)$$

Opće rješenje:

$$Z = R_s + j\omega L_{\sigma S} + \frac{(R_0 \cdot j\omega L_M) \cdot (R_R' + s \cdot j\omega L_R')}{R_0 \cdot j\omega L_M \cdot s + (R_R' + s \cdot j\omega L_R') \cdot (R_0 + j\omega L_M)} \quad (4-10)$$

Klizanje $s=0$

$$Z = R_s + j\omega L_{\sigma S} + \frac{R_R' \cdot R_0 \cdot j\omega L_M}{R_R' \cdot (R_0 + j\omega L_M)} = R_s + j\omega L_{\sigma S} + \frac{R_0 \cdot j\omega L_M}{R_0 + j\omega L_M} \quad (4-11)$$

Klizanje $s=1$

$$Z = R_s + j\omega L_{\sigma S} + \frac{(R_0 \cdot j\omega L_M) \cdot (R_R' + j\omega L_R')}{R_{Fe} \cdot j\omega L_M + (R_R' + j\omega L_R') \cdot (R_0 + j\omega L_M)} \quad (4-12)$$

Kružna frekvencija ω

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad \text{za } f = 50\text{Hz} \quad \omega = 314,16 \quad (4-13)$$

Ukoliko se frekvencija mreže smanji na nulu tada je riječ o istosmjernome naponu pri čemu će struja poprimiti maksimalne vrijednosti:

$$Z = R_s + 0 + \frac{0}{R_R' \cdot R_0} = R_s \quad \Rightarrow \quad I = \frac{U}{R_s} = I_{MAX} \quad (4-14)$$

Kod izostanka frekvencije a konstantnog napona struja poprima maksimalne vrijednosti, ali uslijed pada frekvencije induktivni otpor više ne postoji što bi značilo da zavojnica predstavlja samo kratki spoj. Jedini otpor u strujnome krugu predstavlja samo omska vrijednost otpora bakra zavojnice.

4.6. Skalarna regulacija

Skalarno upravljanje je proporcionalno mijenjanje naponom i frekvencijom što bi značilo naprimjer ako se napon smanji za 10 % na asinkronom električnom stroju tada je potrebno proporcionalno smanjiti i frekvenciju za 10 % kako bi magnetski tok ostao nepromijenjen. U praksi se skalarno upravlja do 40% nazivne vrijednosti pri čemu se postižu frekvencije od 70 Hz . Kada bi se povećavala frekvencija na statorskim namotima tada bi se i brzina rotora povećala, a da bi moment ostao nepromijenjen povećava se i napon. Povećanjem frekvencije ne mijenjajući napon

dolazi do promjene magnetske indukcije B , odnosno magnetskog toka Φ . Smanjenjem magnetskog toka Φ smanjuje se moment, a povećanjem indukcije B opet nije dozvoljeno zbog zasićenja. Faraday-ev zakon elektromagnetske indukcije kaže kako je elektromotorna sila u zatvorenoj petlji jednaka negativnoj promjeni magnetskog toka kroz tu petlju, što se i može vidjeti u izrazu (4-15).

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad (4-15)$$

Spajanjem asinkronog stroja na krutu mrežu uz zanemarenje rasipnog induktiviteta i statorskog radnog otpora inducirani napon e odgovarao bi naponu krute mreže. Kao posljedica priključenog napona, u električnome stroju se uspostavi magnetski tok ψ . Derivacija u izrazu (4-16) može se prikazati kao umnožak s $j\omega$ ukoliko se sve veličine u fazorskoj domeni te sinusnog valnog oblika, tada Faraday-ev zakon poprima oblik dan izrazom (4-16)

$$e = U_{Mreže} = -j\omega \cdot \psi \quad (4-16)$$

Ako bi se magnetski tok prikazao kao $\psi = \phi \cdot n$ tada bi izraz izgledao:

$$|e| = |U_{Mreže}| = |j\omega \cdot \phi \cdot n| = 2\pi \cdot f \cdot \phi \cdot n = konst \cdot f \cdot \phi \quad (4-18)$$

Iz izraza (4-18) vidi se kako je napon proporcionalan umnošku toka i frekvencije te održavanjem toga omjera između napona i frekvencije održava se i magnetski tok konstantnim. Inducirani napon e približno je jednak naponu na statoru te izraz izgleda kao (4-19)[22].

$$\frac{e_s}{f} \approx \frac{U_s}{f} = konst \quad (4-19)$$

5. SPREMNICI ENERGIJE

Baterija je uređaj koji u sebi sadrži jednu ili više elektrokemijskih stanica pri čemu se glavni sastav baterije dijeli na anodu, katodu i elektrolitnu kemijsku tvar koja reagira s anodom odnosno s katodom. Prilikom ispuštanja električne faze dolazi do prve kemijske reakcije s anodom i elektrolita te pomoću ove reakcije uzrokuje protok elektrona prema katodi gdje se događa druga elektrokemijska reakcija i tako sve u krug. U ovome dijelu razmatraju se sekundarne baterije u što spadaju akumulatori koji se za razliku od primarnih baterija mogu puniti čime povećavamo dugotrajnost korištenja te multifunkcionalnu upotrebu u mnogim električnim sustavima.

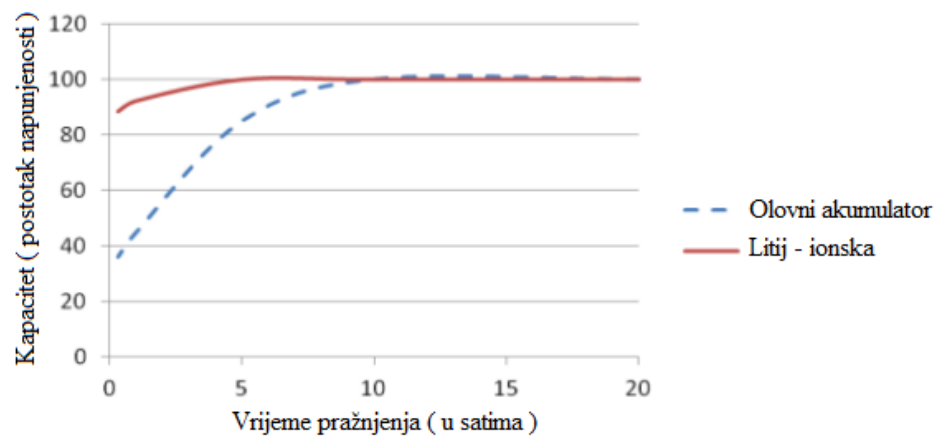
Litij – ionske baterije najpoznatiji su spremnici energije današnjice, s obzirom na njihovu kvalitetu pohrane električne energije te gustoću energije naspram njezinog volumena. Takve baterije svrstavamo u dvije skupine s obzirom na njihov kemijski sastav - litijev željezni sulfat (LiFePO_4) te nikal metal hibridne baterije (NiMH), a rjeđe korištene su u kombinaciji nikal – kobalta i mangana. Druga vrsta često korištenih baterija je olovni akumulator koja ima mogućnost ispuštanja velike struje u kratkome vremenu za što se najčešće koristi kod pokretanja stroja ili kao dodatni izvor napajanja. Sve češća su upotreba kod električnih automobila i viličara gdje je potrebno kratkotrajno terećenje baterija visokim strujama [6].

5.1. Sigurnost

Uspoređujući ove dvije osnovne vrste baterija zamjećujemo kako litij – ionske baterije imaju veću gustoću energije čime sigurnost baterije opada. Razlog tome navode se tri slučaja kod kojih dolazi do potpunog uništenja baterije u što se ubraja mehaničko oštećenje, prekomjerna upotreba električne energije i toplinsko pregrijavanje. Kod mehaničkog opterećenja, uslijed velike količine energije pohranjene u mali prostor dolazi do spajanja ćelija te izazivanja kratkog spoja pri čemu poteku velike struje. One izazivaju visoke temperature koje samim zapaljenjem jedne ćelije serijski proširuju temperaturu i na ostale ćelije što se i navodi kao jedan od glavnih uzročnika eksplozije baterija. Isto tako se navodi i prekomjerno terećenje baterije visokim strujama pri čemu dolazimo do istog procesa samozapaljenja baterije. [8]

5.2. Učinkovitost

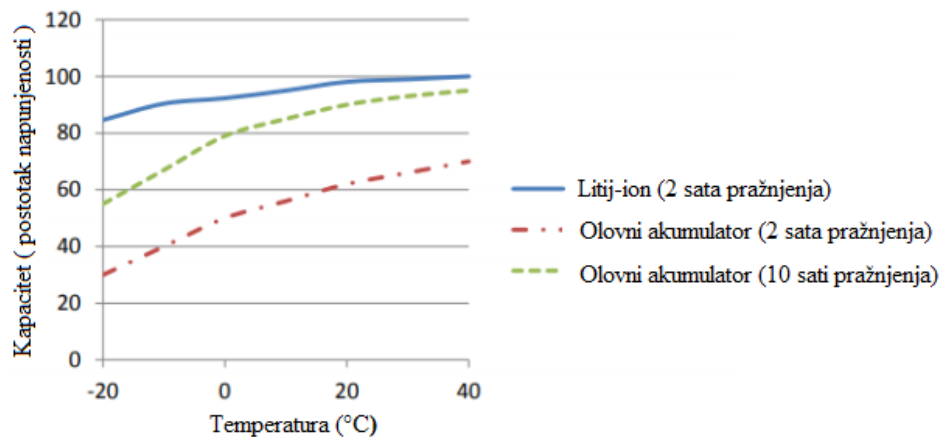
Temperatura okoline baterija jedan je od čimbenika kapaciteta baterija, ukoliko je temperatura okoline niža od njezine dopuštene temperature tada kapacitet baterija opada u njezinom stacionarnom stanju pri čemu se gubi dio korisne energije. Što je kraće vrijeme pražnjenja to je kapacitet baterije manji i obrnuto. Slika (5.1.) prikazuje koliko je vremena potrebno litij – ionskoj bateriji i olovnom akumulatoru da isporuče cjelokupan pohranjeni naboj. Primjećuje se kako litij – ionske baterije predaju svoj puni naboj 100 Ah nakon četiri sata pražnjenja što je u usporedbi s olovnim akumulatorom 80 % predanog kapaciteta za isto pražnjenja.



Slika (5.1.) – Usporedni graf pohranjenog naboja i vremena pražnjenja baterija (Albright i ostali., 2012)[6]

Vidi se kako obje baterije gube kapacitet u hladnim uvjetima, ali može se zaključiti kako se litij – ionskim baterijama gubi manje energije naspram olovnom akumulatoru.

Iz dijagrama na slici (5.2.) može se vidjeti utjecaj temperature na kapacitet baterije uz višesatno pražnjenje baterija te se može zamijetiti kako se kapacitet litij – ionske baterije neznatno mijenja u usporedbi s olovnim akumulatorom. Isprekidana linija s točkicama predstavlja olovni akumulator nakon deset sati pražnjenja što i ukazuje na vrlo nisku učinkovitost te velik raspon kapaciteta baterija s obzirom na promjenu temperature [6].



Slika (5.2) – Usporedni graf temperature i kapaciteta baterija (Albright et al., 2012)[6]

5.3. Životni vijek i kapacitet

Svaka baterija ima svoj vijek trajanja koji definira broj i razina punjenja i pražnjenja do te mjere kada ona više ne može imati kapacitet jednak početnoj vrijednosti nove baterije. Litij - ionske baterije opet prednjače naspram olovnih akumulatora koje imaju manji broj ciklusa. Litij – ionske baterije mogu imati oko 1900 ciklusa u svom životnom vijeku dok se olovni akumulatori mogu puniti do 1000 ciklusa. Trajanje ciklusa može se povećati na način da se temperatura okoline baterije poveća ili da se ograniči brzina pražnjenja baterija. Brzinu pražnjenja baterija najbolje nam pojašnjava Peukertov zakon odnosno njegov eksponent koji ima određene konstante za svaku vrstu baterija. Kada bi Peukertova konstanta bila jednaka 1 tada kapacitet baterije ne bi bio ovisan o struji pražnjenja, ali u realnim slučajevima to nije tako. Kod stvarne baterije ta konstanta k iznosi više od 1, najčešće između 1,1 i 1,3 ovisno o vrsti baterije koja se ispituje. Povećanjem starosti baterija Peukertova konstanta raste što bi značilo da se stanje baterije pogoršava. Korištenjem niske razine

struja pražnjenja mora se uračunati struja samo – pražnjenja kao i uzeti u obzir kako temperatura (koju čini faktor promjene kapaciteta baterije) nije uračunata u Peukertovu jednadžbu koja se može vidjeti u izrazu (5-1).

$$C_p = I^k t \quad (5-1)$$

Gdje je:

C_p – kapacitet izražen preko ispuštanja 1 A energije i izražava se u amper satima (A/h)

I – stvarna struja pražnjenja izražena u amperima (A)

t – stvarno vrijeme pražnjenja baterije izraženo u satima (h)

k – Peukertova konstanta (bezdimenzijska)

Pošto se ova formula rijetko koristi u praksi, koristimo preformuliranu Peukertovu formulu kako bi se odredilo vrijeme rada baterije do njegovog potpunog pražnjenja, pogotovo ako nam je poznata Peukertova konstanta za taj tip baterija. U sljedećem izrazu moguće je vidjeti kako se nazivno (referentno) pražnjenje baterije uračunava u formulu te se oznaka za to upotrebljava H izražena u satima. [15]

$$t = H \left(\frac{C}{IH} \right)^k \quad (5-2)$$

6. TEHNIČKI IZRAČUN BRODICE *e – Neptun*

6.1. Osnovni podaci o brodici

Električna brodica naziva *e – Neptun* nalazi se u marini Punat na otoku Krku. U Marini Punat doznaje se da je ista na remontu. Poznate su osnovne karakteristikama broda koje su potrebne za izračun parametara radnog sustava koji je ugrađen u plovilo.



Slika (6.1.) – Izgled brodica *e – Neptun* izvana

Plovilo je dugačko 6 m i mase 2 tone s ljudima i opremom. Zahtjev za porivnu snagu u kW jednaka je dvostrukoj masi brodice u tonama, što bi u promotrenom slučaju značilo da je za dvije tone mase plovila potrebno ugraditi minimalno 4 kW instalirane snage stroja.

Tablica (6.1.) – *Potrebna snaga električnog stroja prema masi plovila za motorne brodove odnosno jedrilice [17]*

Motorni brod			Jedrilica	
1.000 kg	< 5 m	2.5 kW	< 6 m	2.0 kW
2.000 kg	< 7 m	5 kW	< 9 m	4.0 kW
3.0000 kg	< 9 m	7 kW	< 11m	6.0 kW

Na slici (6.2.) nalazi se asinkroni električni stroj i njegova pločica s nazivnim podacima koji su teško čitljivi: **Končar MES 5AZ 132M-4T** (četveropolni stroj).



Slika (6.2.) – *Asinkroni električni stroj i pločica s nazivnim vrijednostima stroja*

Tablica 2.3. / Table 2.3. / Tabelle 2.3.



2p=4			1500 min ⁻¹			400V / 50Hz					B3	440V/60Hz/1800 min ⁻¹		
P (kW)	Motor type	n (min ⁻¹)	η (%)	cos φ	I _n (A)	I _k / I _n	M _n (Nm)	M _k / M _n	M _{max} / M _n	J (kgm ²)	m (kg)	P (kW)	n (min ⁻¹)	I _n (A)
0.06	5AZ 56A-4	1415	58	0.62	0.25	2.8	0.4	2.1	2.1	0.0001791	3.1	0.06	1700	0.25
0.09	5AZ 56B-4	1400	58	0.6	0.38	2.6	0.6	1.9	1.9	0.0001791	3.1	0.09	1680	0.35
0.12	5AZH 56B-4	1350	58	0.7	0.41	3	0.85	1.9	1.9	0.0001791	3.2	0.12	1620	0.41
0.12	5AZ 63A-4	1360	58	0.75	0.44	3	0.85	2	2.1	0.0002211	3.4	0.12	1630	0.44
0.18	5AZ 63B-4	1370	60	0.72	0.6	3.3	1.3	2.2	2.4	0.0002948	4.2	0.2	1640	0.6
0.25	5AZH 63B-4	1310	59	0.78	0.8	2.7	1.8	1.8	1.8	0.0002948	4.2	0.3	1570	0.8
0.25	5AZ 71A-4	1370	59	0.71	0.82	3.3	1.75	2	2.2	0.0005	4.8	0.3	1640	0.82
0.37	5AZ 71B-4	1370	66	0.73	1.1	3.4	2.5	2	2.2	0.0006	5.6	0.4	1640	1.1
0.55	5AZ 80A-4	1390	70	0.74	1.5	4	3.8	2	2.2	0.0010	8	0.6	1670	1.5
0.75	5AZ 80B-4	1390	72.1	0.75	1.9	4.3	5.1	2.3	2.4	0.0013	9.2	0.8	1670	1.9
1.1	5AZ 90S-4	1385	75	0.81	2.6	4.2	7.6	2.2	2.4	0.0024	11.3	1.2	1660	2.7
1.5	5AZ 90L-4	1380	77.2	0.8	3.5	4.4	10.5	2.1	2.2	0.0032	13.8	1.7	1655	3.5
2.2	5AZH 90LC-4	1410	75.0	0.78	5.4	4.4	15	2.5	2.6	0.0036	16	2.5	1630	5.4
2.2	5AZ 100LA-4	1410	79.7	0.83	4.8	5.2	14.9	2.2	2.7	0.0056	19.5	2.5	1690	4.8
3	5AZ 100LB-4	1410	81.5	0.8	6.6	5.6	20	2.4	2.7	0.0071	23	3.4	1690	6.6
3.5	5AZH 100LB-4	1410	82.0	0.77	8	5.8	25	2.7	2.9	0.0071	23	4	1690	8
4	5AZ 112M-4	1435	83.1	0.8	8.5	6.9	27	2.7	3.1	0.0122	30	4.5	1710	8.5
5.5	5AZH 112M-4	1410	82.0	0.78	12.5	5.5	35	2.7	3	0.0122	30	6.2	1690	12.5
5.5	5AZ 132S-4	1435	84.7	0.85	11	6.1	36.6	2.4	3	0.0202	39	6.2	1720	11.5
7.5	5AZ 132M-4	1440	86	0.76	16.5	6.6	49.7	3.1	3.5	0.0276	48	8.5	1720	16.5
9.5	5AZ 132MA-4	1440	87	0.81	19.5	6.7	63	2.8	3.7	0.0349	56	11	1720	19.5

Slika (6.3.) – izvadak iz Končar MES kataloga s istoimenim tipom asinkronog stroja [18]

Nazivno klizanje takvog stroja iznosi:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04 \rightarrow 4\% \quad (6-1)$$

Preko izlazne snage P_{izl} i korisnosti η može se dobiti ulazna snaga stroja koja iznosi:

$$P_{ul} = \frac{P_{izl}}{\eta} = \frac{7500}{0.86} = 8721 \text{ W} \quad (6-2)$$

Uz dobivenu ulaznu snagu P_{ul} moguće je izračunati gubitke stroja:

$$P_G = P_{ul} - P_{izl} = 8721 - 7500 = 1221 \text{ W} \quad (6-3)$$

Tablica (6.2.) – izračun tehničkih karakteristika asinkronog stroja

Snaga na osovini (P_{izl}):	7.5 kW
Snaga na ulazu (P_{ul}):	8.72 kW
Brzina vrtnje:	1440 min ⁻¹
	Za pogon preko pretvarača s naponom na istosmjernoj sabirnici od 48 V
	Cca. 109 A kod maksimalnog opterećenja
Tip stroja:	Trofazni kavezni asinkroni 4 polni stroj

6.2. Izračun potrebne struje

Vrijednost maksimalne izlazne struje iz baterija iznosi:

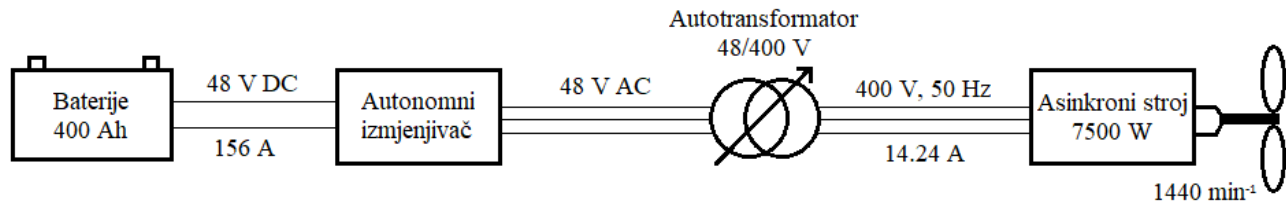
$$P = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{7500}{48} = \mathbf{156\ A} \quad (6-4)$$

Izračunata snaga prema izrazu (6-2), preko kojeg se može doći do struje, pretpostavljajući kako je trošilo spojeno u zvijezdu:

$$U_L = 400\ \text{V}; P_{izl} = 7500\ \text{W}; \cos \varphi = 0.76$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \rightarrow I = \frac{P_{izl}}{U \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}} = \mathbf{14.24\ A} \quad (6-5)$$

Formula za snagu u izrazu (6-2) prikazana je samo za jednu fazu, te se $\sqrt{3}$ dodaje u transformiranoj formuli kako bi se dobila struja za sve 3 faze.



Slika (6.4.) – shema regulacije brzine vrtnje

Tablica (6.3.) – izračun parametara skalarne regulacije

Napon (V)	80	160	240	320	400	480	560
Frekvencija (Hz)	10	20	30	40	50	60	70
Okretno polje statora (min ⁻¹)	300	600	900	1200	1500	1800	2100
Brzina vrtnje rotora (min ⁻¹)	288	576	864	1152	1440	1728	2016
Nazivna struja (A)	71.2	35.6	23.74	17.8	14.24	11.87	10.17

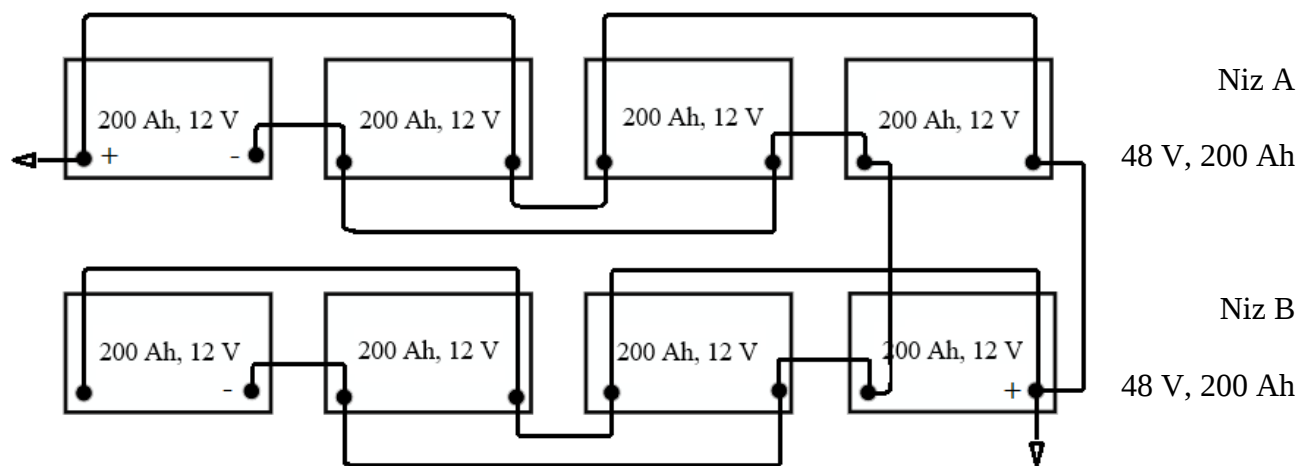
6.3. Izračun baterija brodice

Broдика e – Neptun koristi olovni akumulator od kojih svaka ima nazivni napon od 12 V i kapacitet 200 Ah. One su spojene u dva niza po 4 baterije te se naponi zbrajaju serijski čineći tako $12 \cdot 4 = 48 \text{ V}$ što čini 12 % nazivnog napona asinkronog stroja. Povećanje kapaciteta za duže vrijeme plovidbe, radi se na način paralelnog spajanja baterija pri čemu im se kapaciteti zbrajaju čineći tako ukupni kapacitet od 400 Ah.

Uspoređujući ostale baterije koje se nude na tržištu može se zaključiti koje prednosti ima olovni akumulator.

Ove baterije su:

- Otporne na ekstremno duboka pražnjenja i sulfatizaciju
- Imaju dug životni vijek koji ima 2 – 3 puta više ciklusa punjenja i pražnjenja od AGM baterija, a radi male osjetljivosti na temperaturu i do 5 puta duži vijek trajanja od Gel baterija
- Izvrsne pri radu na visokim i niskim temperaturama
- Sposobne za dugotrajno skladištenje energije bez punjenja
- Ekološki neutralne zbog elektrolita na bazi silicijevog dioksida koji nije otrovan te ne nagriza i nema mirisa.



Slika (6.5.) – Shematski prikaz spajanja baterija

Tablica (6.4.) – nazivne vrijednosti baterije

Serijski: 4 * 12 V =	48 V
Kapacitet spojen paralelno: 200 Ah * 2 =	400 Ah
8 baterija * 66 kg =	528 kg

6.4. Proračun kapaciteta baterija u odnosu na autonomiju rada

Kako bi se odredio kapacitet baterije potrebno je snazi nazivne podatke električnog stroja

Tablica () – nazivne vrijednosti električnog stroja Končar MES

Končar MES	
Nazivna snaga	$P_n = 7500 \text{ W}$
Nazivni napon	$U_n = 400 \text{ V}$
Nazivna struja	$I_n = 16.5 \text{ A}$
Maksimalna struja	$I_{\text{peak}} = 108.9 \text{ A}$

Tablica () – nazivne vrijednosti olovnog akumulatora

Olovni akumulator	
Nazivni napon	$U_n = 48 \text{ V}$
Nazivna struja	$I_n = 50 \text{ A}$
Maksimalna struja	$I_{\text{peak}} = 156 \text{ A}$
Nazivni kapacitet potreban za jedan sat rada ako bateriju praznimo do kraja	$C_n = 50 \text{ Ah}$

Tablica (6.5.) – proračun kapaciteta baterija s obzirom na autonomnost rada

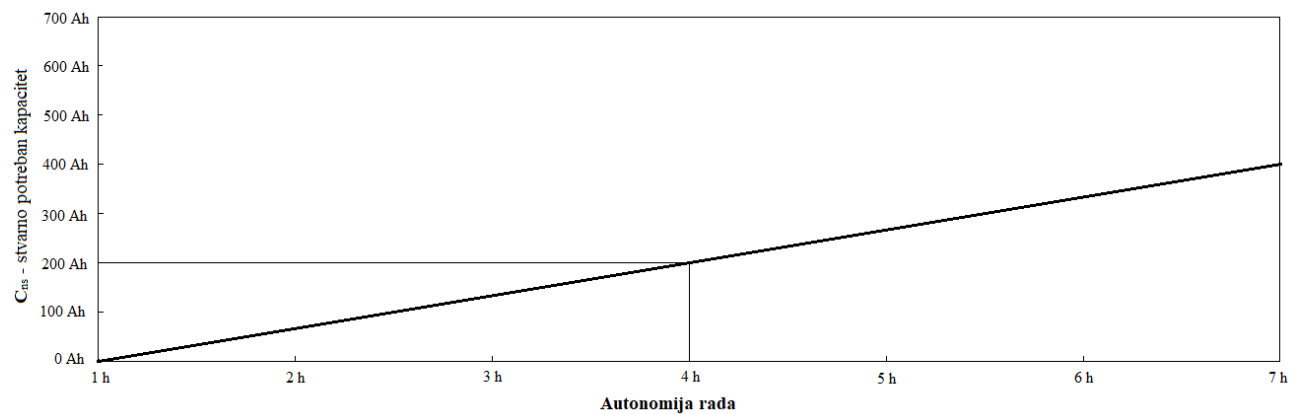
Autonom. Rada	I_n	C_n	f_{pr} (50 % kapaciteta mora ostati u bateriji)	(C_n/f_{pr})
1 h	50 A	50 Ah	0.5	100 Ah
2 h	50 A	100 Ah	0.5	200 Ah
3 h	50 A	150 Ah	0.5	300 Ah
4 h	50 A	200 Ah	0.5	400 Ah

I_n mora biti manja od 50 % kapaciteta baterije. Baterija se ne smije kontinuirano prazniti sa 100 % struje koju može dati, već samo sa 50 %. Drugim riječima kapacitet baterija treba biti dovoljan da 50 % kapaciteta pokrije potrebe za željenom strujom iz baterije [19].

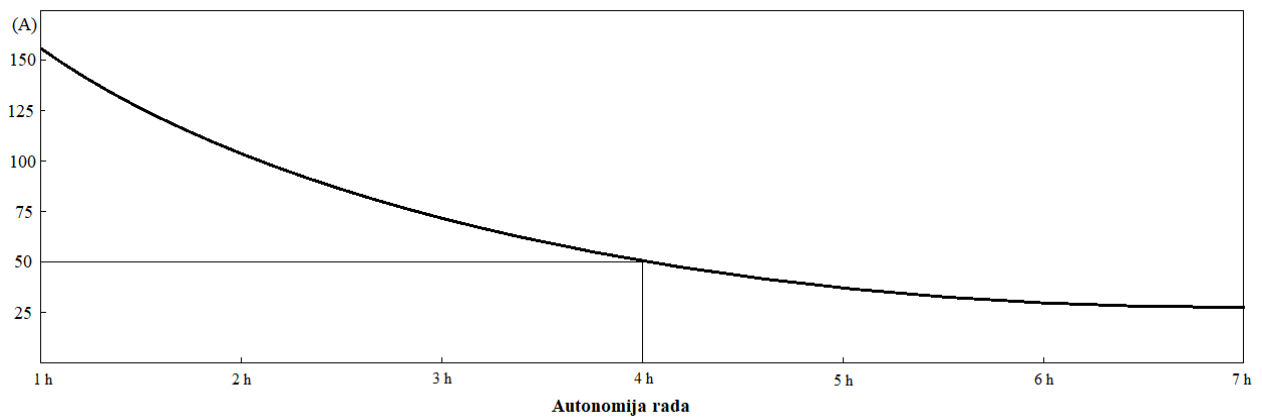
I_{peak} mora biti manja 50 % od struje koja potpuno prazni bateriju. Baterija se ne bi smjela niti pod maksimalnim opterećenjem prazniti sa 100 % struje koje može dati, već samo sa 50 %. Drugim riječima kapacitet baterija treba biti dovoljan da 50 % kapaciteta pokrije potrebu za vršnom strujom.

F_{pr} je faktor pražnjenja, to jest iznos do koje se razine preporuča pražnjenje baterije. Bateriju nije dobro prazniti do kraja jer to znatno smanjuje njen vijek trajanja. On ovisi o tipu baterije, ali ne bi smio biti manji od 50 %, to jest da kod normalnog rada ostaje 50 % naboja u bateriji prije sljedećeg punjenja ($f_{pr} = 0.5$). Ovaj faktor povećava potreban instalirani kapacitet baterija [19].

Na slici (6.5.) vidljiv je graf kapaciteta baterija u donosu na autonomiju rada pri čemu se uzimaju vrijednosti potrošnje električnog stroja od 50 A što čini oko 30 % maksimalne potrošnje. Instaliranim kapacitetom od 400 Ah, čini 8 baterija u dva niza spojene paralelno, pri čemu se može koristiti 200 Ah. Postiže se autonomija rada od 4 h kod brzine od 5 čvorova što čini 9.26 kilometara po satu (km/h). Kod maksimalnog opterećenja baterije od 156 A autonomija rada pala bi na približno sat vremena.



Slika (6.6.) – dijagram kapaciteta baterija u odnosu na autonomiju rada



Slika (6.7.) – dijagram izlazne struje baterija u odnosu na autonomiju rada električnog stroja

6.5. Fotonaponski paneli

Fotonaponska ploča ili solarni panel sastoji se od fotonaponskih članaka kojih najčešće ima 36 povezanih u seriju osiguravajući tako nazivni napon od 12 V. Taj napon dolazi iz Sunčeve svjetlosti izravno pretvorene u električnu energiju pomoću fotoelektričnog efekta. Snaga jednog fotonaponskog članka je relativno mala pa se u praksi više članaka povezuje u grupe čineći tako fotonaponski članak, a više njih čini jedan solarni panel odnosno fotonaponsku ploču. Povezivanjem

više fotonaponskih ploča dobije se polje fotonaponskih ploča koje su sastavni dio solarne fotonaponske elektrane.

Brodica e – Neptun na sebi ima ugrađenih 6 solarnih panela čime se tijekom sunčanog vremena produljuje autonomija rada. Snaga svakog panela iznosi 140 W. Kada bi se to pomnožilo sa 6 dobila bi se vrijednost od 840 W ukupne snage uslijed sunčanog vremena. Na slici (6.6.) mogu se vidjeti nazivni podaci solarnog panela te izgled krova na kojem su postavljeni fotonaponski paneli.

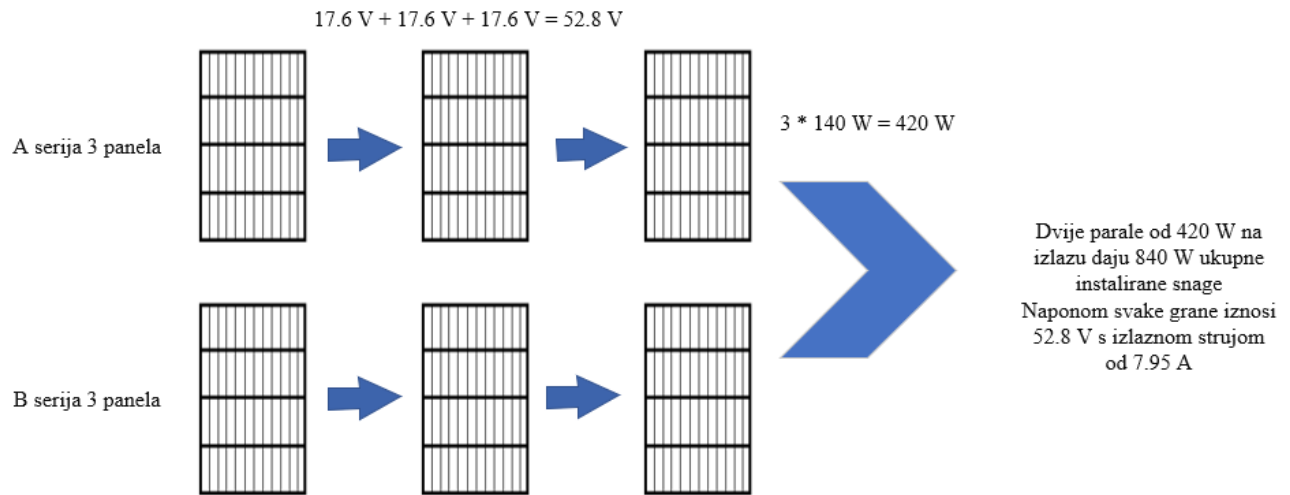


Slika (6.8.) – nazivna pločica i izgled postavljenih fotonaponskih panela

Fotonaponski paneli mogu se spajati serijski i paralelno baš kao i baterije. U našem slučaju moguće je dobiti maksimalni napon od:

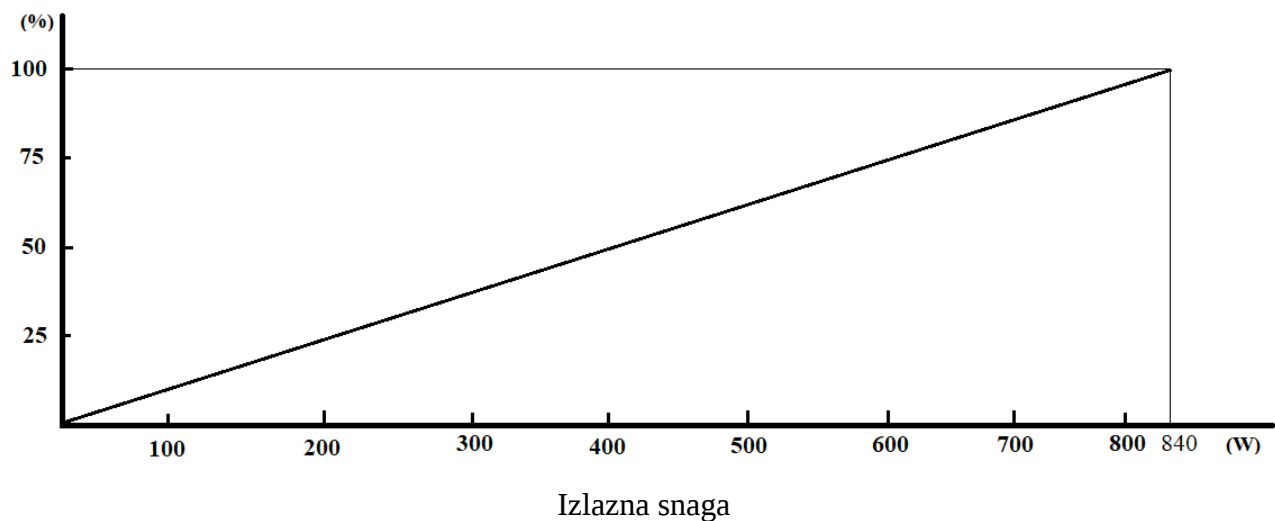
$$V_{MAX} = V_{mp} \cdot 6 = 17.6 \cdot 6 = 105.6 \text{ V} \quad (6-6)$$

Fotonaponski paneli mogu biti spojeni u dva niza po 3 fotonaponska panela spojena serijski za svaku granu. Na taj način bi napon koji je spojen na baterije bio nešto veći od napona baterije, čime se smjer struje definira iz većeg prema nižem potencijalu napona.

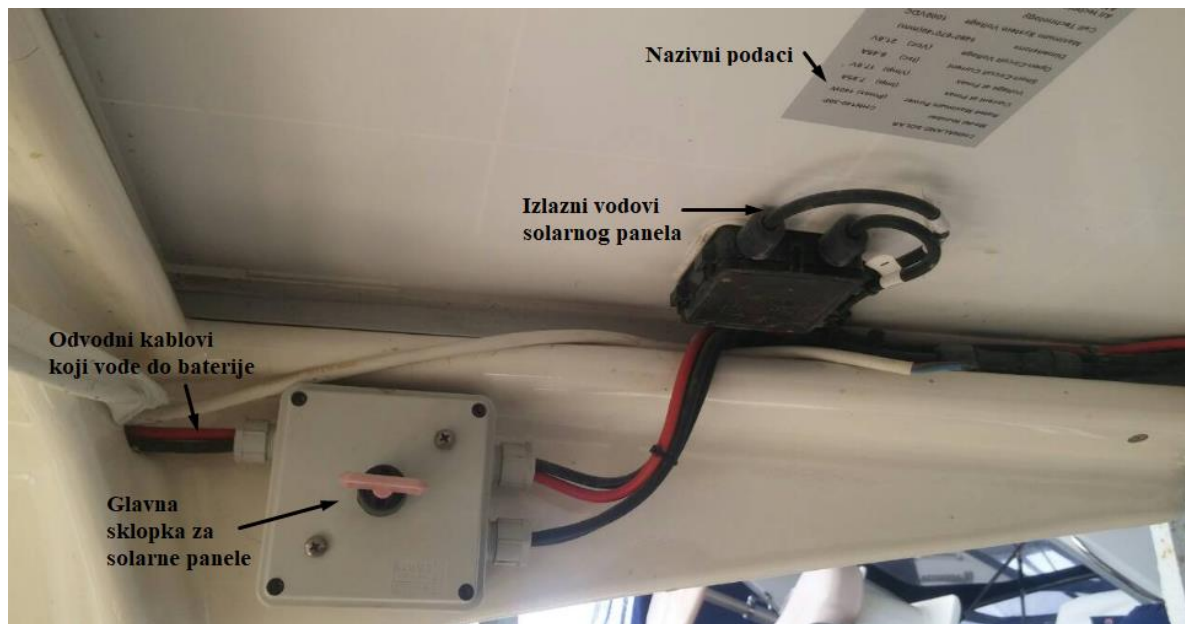


Slika (6.9.) – shematski prikaz spajanja solarnih panela

Jačina svjetlosti



Slika (6.10.) – dijagram izlazne snage panela u usporedbi s postotkom jačine svjetlosti



Slika (6.11.) – Dio unutrašnjosti brodice na kojem se može vidjeti glavna sklopka s dovodnim kabelima od solarnih panela, isključenjem sklopke prekida se dovod struje prema bateriji

Na plovilu postoji MPPT (eng. *Maximum Power Point Tracking*) regulator, koji se koristi kod vjetronaponskih i fotonaponskih sustava kako bi se povećala snaga fotonaponskih panela. Obzirom da se primjenjuje na izvorima s promjenjivom snagom, izlaz iz MPPT regulatora stvara stabilan napon s promjenjivom strujom.

6.6. Izračun vremena punjenja baterija

Izlazni napon punjača određen je sustavom pogona tj. baterija i iznosi 48 V. Koristi se pravilo koje definira da struja punjenja bude tipično 15 – 20 % nazivne struje. Struja punjenja iznosi maksimalno 50 % za gel baterije i 30 % za AGM baterije. Nije isključeno da struja punjenja bude slabija, ali tada punjenje traje duže [20].

Tablica (6.6.) – struje punjenja GEL i AGM baterija

Kapacitet baterija	Napon sustava	Minimalna struja punjenja 15 – 20 %	Maksimalna struja punjenja	
440 Ah	24 V	66 – 88 A	GEL: 246 A (50%)	AGM: 147.6 A (30 %)

Proračun trajanja punjenja baterija može se vidjeti u izrazu (6-3) gdje je:

$$L_t = \frac{C_0 \cdot e_{ff}}{A_t - A_b} + 4h \text{ (h)} \quad (6-7)$$

L_t - vrijeme punjenja (eng. *charging time*)

C_0 - Kapacitet baterije koji treba puniti

e_{ff} - Efikasnost (eng. *efficiency*), (1.1 za GEL baterije; 1.15 za AGM baterije)

A_t - Struja punjenja

A_b - Potrošnja za vrijeme punjenja (ako je nešto uključeno na brodu)

4h - Vrijeme koje treba svakom punjenju odnosno 20 % procesa punjenja traje 4h, tako zvana faza absorpcije

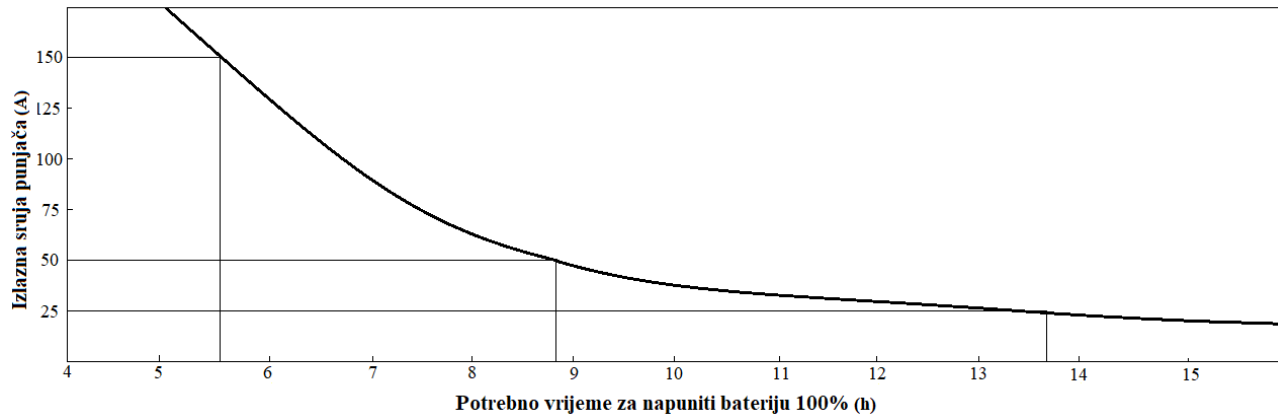
Kako bi se u našem slučaju izračunalo trajanje punjenja za olovni akumulator, uzima se realna vrijednost punjača od 50 A i 48 V, pod pretpostavkom da su baterije prazne 50 %, odnosno da ih treba napuniti:

$$\frac{440 \text{ Ah}}{2} = 220 \text{ Ah} \quad (6-8)$$

Brodice se pune bez solarnih panela, puni ih samo punjač, bez uračunate ikakve potrošnje na brodici tijekom punjenja.

$$L_t = \frac{220 \cdot 1.1}{50 - 0} + 4 = 8.84 \text{ h} \quad (6-9)$$

Drugim riječima potrebno je cca. 9 sati punjenja za 100 % napunjenost baterije. Za slabiji punjač od npr. 35 A trajanje punjenja bi se povećalo te bi iznosilo oko 11 sati.



Slika (6.12) – dijagram izlazne struje punjača u usporedbi s vremenom za 100 % napunjenost baterije

6.7. Ostala elektronika brodice

Na brodici se nalazi DC/DC pretvarač koji služi za napajanje osnovnog akumulatora. Na akumulator je spojena upravljačka jedinica preko koje se mogu koristiti osnovne funkcije brodice poput svijetla u kabini ili izvan plovila, pumpa za ispumpavanje vode iz trupa plovila uslijed kiše, GPS, hladnjak, itd. Istosmjerni pretvarač na ulazu koristi napon koji se nalazi unutar granica propisanih od proizvođača, te na izlazu daje konstantnu vrijednost odabranog napona. Na slici (6.9.) može se vidjeti jedan takav pretvarač marke *Victron energy* uz oznaku crne točkice koja definira radno područje pretvarača. Vidi se kako je ulazno radno područje istosmjernog pretvarača od 30 – 60 V, što je logično jer napon baterija iznosi 48 V što je u granicama ulaznog napona. Orion pretvarač sa slike (6.9.) je snage 200 W čime je moguće izračunati izlaznu struju iz pretvarača prema izrazu (6-6).

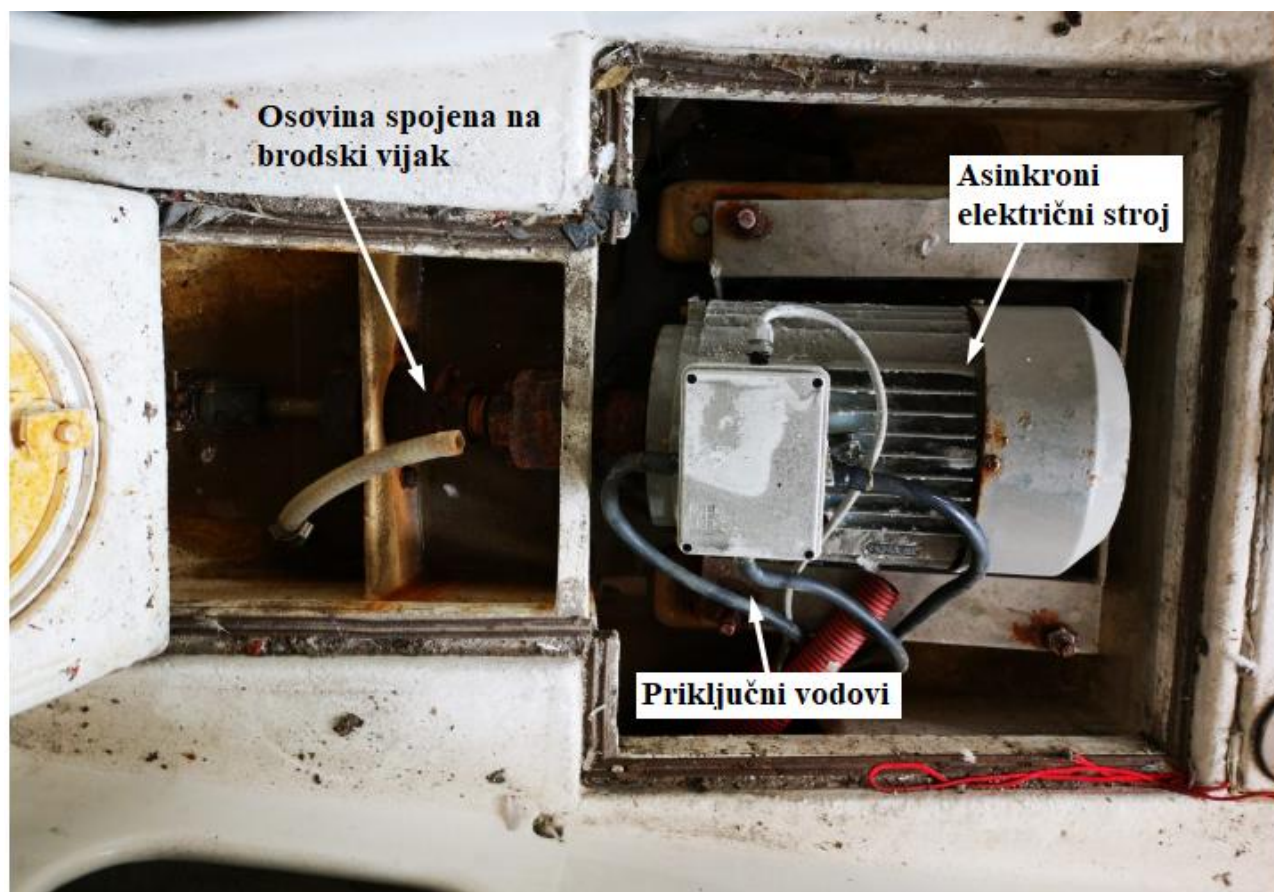
$$I = \frac{P}{U} = \frac{200 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 16.6 \text{ A} \quad (6-10)$$



Slika (6.13.) – Istosmjerni pretvarač za korištenje osnovnih funkcija plovila (30 – 60 V / 12 V_{Dc})

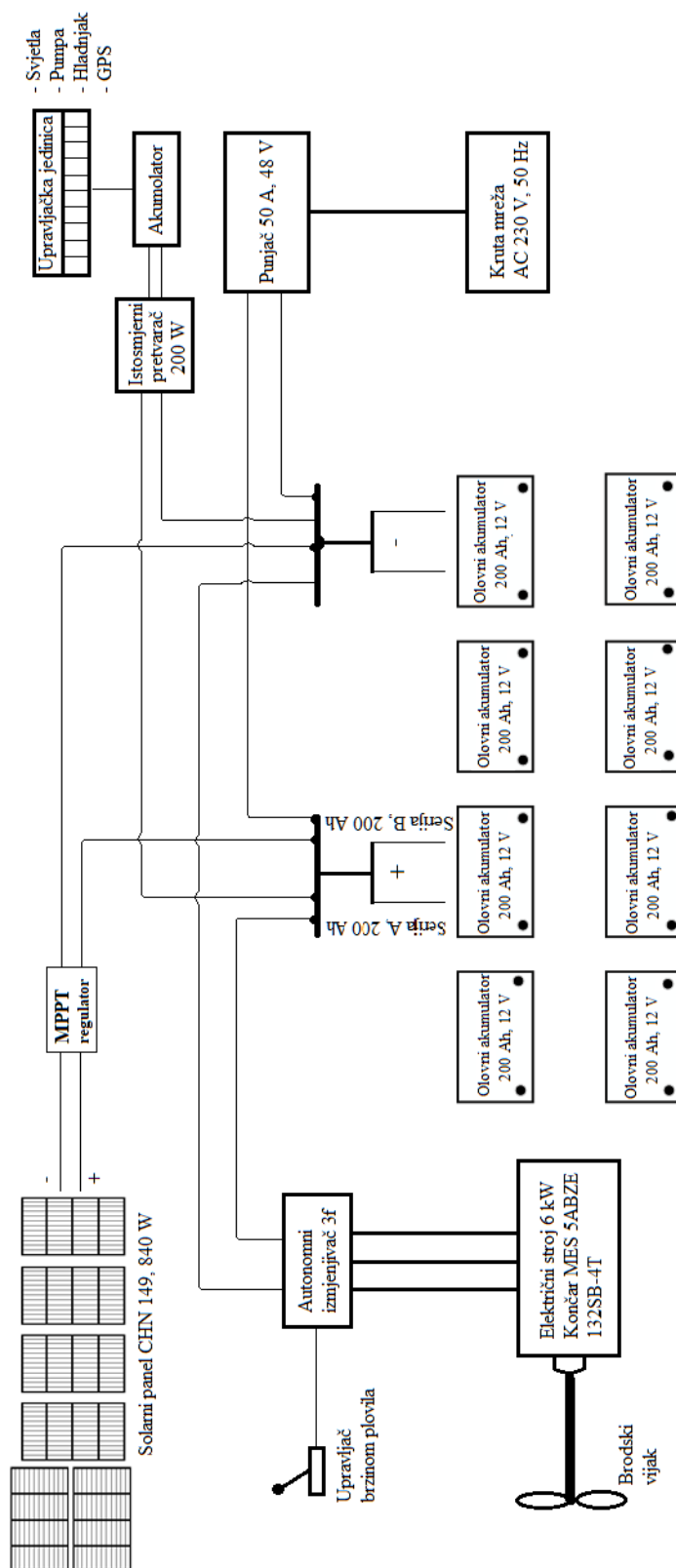


Slika (6.14.) – punjač baterija Atib – HF/Z, 50 A, 48 V, napajan iz krute mreže



Slika (6.15.) – Asinkroni električni stroj spojen na osovину koja vodi do broskog vijka

Pregledna shema brodice e - Neptun



7. ZAKLJUČAK

Hibridna plovila predstavljaju budućnost gradnje brodova ugrađujući električne strojeve kao porivno sredstvo. Upravljanje električnim strojem pomoću autonomnog izmjenjivača višestruko je korisno. Upravljanje električnim strojem pomoću skalarne regulacije jednostavno je upravljanje brzine vrtnje na osovini uz ne promijenjen moment, što daje veliku prednost pred otto motorima koji svoju najveću iskoristivost dostižu tek kod 80 % nazivne brzine vrtnje.

Djelotvornost električnog stroja ovisi o radu autonomnog izmjenjivača koji je po svojoj topologiji jednostavan, ali upravljanje može postati kompleksno ukoliko se na izlazu traži sinusni signal promjenjivih parametara. Poboljšanjem algoritma i dodavanjem negativne povratne veze moguće je reguliranje izlazne frekvencije, napona te faze koja se dovodi do električnog stroja čime se postižu idealni uvjeti rada. Jedan od čimbenika za upravljanje električnim strojem sa što manjim gubicima čini ukidanje i poništavanje neparne harmoničke komponente koja nepovoljno utječu na rad samog električnog stroja. Sve simulacije izrađene su u programu Plecs 4.2.3 čime se potvrđuju sva teorijska saznanja o mosnim izmjenjivačima te njihovo djelovanje uslijed promjene ulaznih parametara signala nosioca i reference.

Kada bi se umjesto olovnih AGM baterija ugradile Litij – ionske baterije jednake zapremine, dobio bi se veći kapacitet obzirom da se u Litij-ionskim baterijama nalazi veća pohranjena energija. To bi značilo da se zamjenom AGM-a sa Litij-ionskom baterijom jednakog kapaciteta može uštedjeti mjesto za skladištenje baterija. Time se povećava cijena rješenja obzirom da su Litij – ionske baterije skuplje.

Na temelju izračuna u plovila e – Neptun može se zaključiti kako je plovilo na višegodišnjoj bazi isplativo za korištenje te se ono može kretati konstantnom brzinom od 5 čvorova s autonomijom rada nešto većom od 3 sata. Ono najbitnije je da to nije maksimum plovila, obzirom da ima mogućnost punjenja baterija preko solarnih panela koji povećavaju doseg plovila tijekom sunčanih dana. Kada bi se plovilo kretalo konstantnom brzinom od 2 čvora uslijed sunčanog vremena, njegov doseg bio bi neograničen.

8. LITERATURA

- [1] Karimpour, R. i Karimpour, M. (2016). Development of Hybrid Propulsion System for Energy Management and Emission Reduction in Maritime Transport System. *Open Journal of Marine Science*, 6, str. 482-497.
- [2] Hybrid Propulsion Systems for Small Ships: Context and Challenges (2016) Preuzeto 9. 10. 2018. iz https://www.researchgate.net/publication/308779563_Hybrid_Propulsion_Systems_for_Small_Ships_Context_and_Challenges
- [3] George, S. (2018). World's biggest container shipper commits to carbon neutrality by 2050. Preuzeto 17. 9. 2018. iz <https://www.edie.net/news/6/World-s-biggest-container-shipper-commits-to-carbon-neutrality-by-2050/?fbclid=IwAR1Mvk8aaUXyCM4KTydP624glsTcxcpSFbNmNc6PlovncXQN7UBnPRz4A3A>
- [4] Pages, Y. (2019). A guide to hybrid yacht propulsion and alternative technologies. Preuzeto 26. 8. 2018. iz <https://www.yachting-pages.com/content/a-guide-to-hybrid-yacht-propulsion-alternative-technologies.html>
- [5] Hall, N. (2015). Welcome to the Beginner's Guide to Propulsion. Preuzeto 7. 10. 2018. iz <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/bgp.html>
- [6] D. Vučetić i I. Čekada (2006). Eksploatacijske prednosti električne propulzije. Preuzeto 13.10. 2018. iz <https://hrcak.srce.hr/file/6579>
- [7] Odengard, A. i Larsson, P. (2018). *Alternative hybrid propulsion on ships: A SWOT analysis of gas turbines and diesel engines combined with batteries*. Gothenburg: Chalmers University of Technology.
- [8] Lambden, J. (2013). *The Electric Boat: A practical, hands on manual for designing, building and owning an electric boat*. Santa Barbara. Preuzeto 7. 9. 2018 iz <http://www.coveyelectricmarine.com/uploads/1/0/1/7/101701188/the-electric-boat.pdf>
- [9] Liu, W. (2013). *Introduction to hybrid vehicle system modeling and control*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [10] Union of Concerned Scientists. (2018). Series vs Parallel vs Series/Parallel Drivetrains. Preuzeto 21. 10. 2018. iz <https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/series-vs-parallel-drivetrains#bf-toc-0>
- [11] Xiong, W. W. i Yin, C. L. (2009). Design of Series-parallel Hybrid Electric Propulsion Systems and Application in City Transit Bus. *WSEAS Transactions on Systems*, 5(8), str. 578-590.

- [12] Radin, J. i Zdenković, J. (2018). Autonomni izmjenjivač (inverter). Preuzeto 5. 1. 2019. iz <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/elektromobilnost/autonomni-izmjenjivac/>
- [13] Gupta, S. (2018). IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor. Preuzeto 17. 11. 2018. iz <https://circuitdigest.com/tutorial/igbt-transistor>
- [14] Shah, N. (2013). *Harmonics in power systems - Causes, effects and control*. Norcross: Siemens Industry.
- [15] All About Lead Acid Batteries. (2019). Peukert's Law And Exponent Explained. Preuzeto 21. 8. 2018. iz <http://all-about-lead-acid-batteries.capnfatz.com/all-about-lead-acid-batteries/lead-acid-battery-fundamentals/peukerts-law-and-exponent-explained/>
- [16] Smith, S. W. (1999). *Digital Signal Processing*. Preuzeto 14. 3. 2019. iz
- [17] Preuzeto 13. 3. 2019. Iz: <https://www.burzanautike.com/hr/savjeti/9>
- [18] Elektromotori - Končar katalog, preuzeto 10. 1. 2019. iz: <http://www.koncar-mes.hr/wp-content/uploads/katalozi/katalog-%20elektromotori-2019-web.pdf>
- [19] Kräutler Electric Motors (2016). Preuzeto 14. 1. 2019. iz: <https://www.kraeutler.at/en/home/>
- [20] Mastervolt: „Powerbook marine systems”, Preuzeto 15. 2. 2019. iz: <https://www.mastervolt.com/powerbook/en/128/>
- [21] Kassakian, J. G., Schlecht, M. F. i Verghese, G. C. (2000). *Osnove energetske elektronike I. dio : topologije i funkcije pretvarača*. Zagreb: Graphis.
- [22] Jurković, J. (1978). Elektromotorni pogoni. Zagreb: Školska knjiga.

9. SAŽETAK

Ovaj se rad bavi analizom različitih koncepata porivnih sustava kod kojih se uspoređuju otto motori s električnim strojevima pri čemu je najveća pozornost posvećena hibridnim pogonima. U ovom se radu teorijski uz simulacije razmatra način djelovanja autonomnog motnog jednofaznog i trofaznog izmjenjivača uz različit odabir ulaznih parametara. Prikazan je način ukidanja i poništavanja neparne harmoničke komponenta oplemenjen izračunom faktora izobličenja, odnosno THD-a uz objašnjenje djelovanja neparnih harmoničkih komponenta na rad električnog asinkronog stroja. Opisan je cijeli postupak rada asinkronog stroja te način reguliranja brzine vrtnje pomoću skalarne regulacije uz konstantan moment. Grafovima je prikazana razlika između Litij – ionskih i olovničkih akumulatora te njene prednosti i nedostaci. Proveden je tehnički izračun brodice e – Neptun sa svim njegovim realnim parametrima.

Ključne riječi: Hibridna plovila, autonomni izmjenjivač, PWM, baterije

ABSTRACT

This paper deals with different concepts of propulsion ice engines were compared to electric motors with the greatest attention paid to hybrid drives. In this paper, the simulation model considers the mode of operation of an autonomous single phase and three phase alternator with different input parameters. The method of eliminating and canceling odd harmonics is illustrated by calculating the distortion factor, (THD) and analysing explaining the effect of odd harmonics during the operation of the electric asynchronous machine itself. The asynchronous machine operation and the speed control were described by means of scalar control at a constant moment. The graphs show the difference between Lithium - ion and lead batteries and all advantages and disadvantages. The technical calculation of the e - Neptun boat with all its real parameters was done.

Key words: Hybrid vessels, autonomous exchanger, PWM, batteries