

# RAZVOJ PRETVARAČA FREKVENCIJE ZA VISOKOBRZINSKE GENERATORE S PERMANENTNIM MAGNETIMA U KOGENERACIJSKIM POSTROJENJIMA

## FREQUENCY CONVERTER DESIGN FOR HIGH SPEED PERMANENT MAGNET GENERATORS IN COGENERATION PLANTS

*Božo Terzić, Marin Despalatović, Goran Majić, Marijan Stergulc, Ante Kriletić, Krste Šormaz*

Stručni članak

**Sažetak:** U ovom radu opisan je razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima koji se koriste u kogeneracijskim postrojenjima. Specifičan zahtjev pretvarača je promjenljiva visoka frekvencija osnovnog harmonika napona. Stoga su razmatrane dvije varijante pretvarača u kojima je mrežni pretvarač potpuno isti za obje strukture, dok se na generatorskoj strani jedne varijante primjenjuje pretvarač temeljen na diodnom ispravljaju i uzlaznom istosmjernom pretvaraču, a u drugoj varijanti je na generatorskoj strani trofazni izmjenjivač s IGBT tranzistorima jednake strukture kao i mrežni izmjenjivač. U radu su prvo opisane strukture energetskih i upravljačkih krugova pretvarača frekvencije, a nakon toga i osnovne značajke konstrukcije energetskog dijela trofaznog IGBT izmjenjivača kao i upravljačke elektroničke pločice koje su razvijene i testirane. Također, dane su osnovne značajke visokobrzinske motor generator grupe koja služi za testiranje razvijenih pretvarača frekvencije. Na kraju su prikazani rezultati mjerenja na laboratorijskoj maketi pretvarača frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem.

t

**Cljučne riječi:** pretvarač frekvencije, generator s permanentnim magnetima, visokobrzinski električni strojevi

Professional paper

**Abstract:** This paper describes the development of the frequency converter for high speed generators with permanent magnets used in cogeneration plants. A specific requirement of the converter is variable high frequency of fundamental voltage harmonic. Therefore two variants of the frequency converter are considered in which the grid converter is the same for both structures, while on the generator side in one embodiment the converter based on a diode rectifier and step-up DC converter is used. The second version on the generator side is the three-phase inverter with IGBT transistors with same structure as a grid converter. The paper first describes the structure of power and control circuits of the frequency inverter, then the basic characteristics of the mechanical design of the power circuit of the three-phase IGBT inverter, as well as the control electronic boards that have been developed and tested. The paper also describes the basic features of high speed motor generator group that serves to test the developed frequency converter. Finally, the results of measurements on the laboratory model of the frequency converter with a diode bridge and step-up DC / DC converter are presented.

**Key words:** frequency converter, permanent magnet generator, high speed electric machines

### 1. UVOD

U okviru Operativnog programa Regionalna konkurentnost (2007.-2013.), financiranog iz strukturnih fondova EU, realizira se projekt „Sigurnija i učinkovitija kogeneracijska/ trigeneracijska postrojenja“. Prijavitelj i nositelj projekta je Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, a partner firma je Banko d.o.o. iz Splita.

Kogeneracijska postrojenja pretvaraju toplinu iz različitih izvora u električnu energiju i korisnu toplinsku energiju u jedinstvenom termodinamičkom i elektrostrojarskom procesu, dok se u trigeneracijskim postrojenjima taj proces proširuje i na proizvodnju rashladne energije. Pri pretvorbi toplinske u električnu

energiju danas se preferiraju visokobrzinske turbine s generatorima na istoj osovine i pretvaračima frekvencije između generatora i električne mreže. Zbog visoke brzine generatora (preko  $10000 \text{ min}^{-1}$ ) frekvencija njegova napona je višestruko veća od mrežne frekvencije, što zahtjeva primjenu pretvarača frekvencije s visokom ulaznom frekvencijom osnovnog harmonika (čak i do 1000 Hz) da bi se proizvedena energija s generatora plasirala u električnu mrežu frekvencije 50 Hz.

U okviru ovog projekta jedan od ciljeva je razvoj pretvarača frekvencije za spoj visokobrzinskih generatora s permanentnim magnetima na rotoru (PM generator) na električnu mrežu. Zbog visoke frekvencije PM generatora razmatraju se dvije strukture pretvarača frekvencije u kojima je mrežni pretvarač potpuno isti za

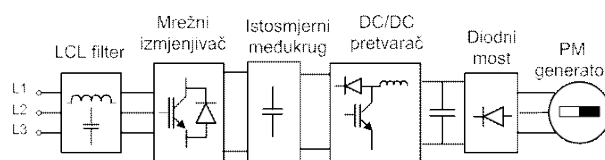
obje strukture, dok se na generatorskoj strani primjenjuju različiti pretvarači: (1) pretvarač temeljen na diodnom ispravljaču i uzlaznom istosmjernom (DC/DC) pretvaraču, (2) trofazni izmjenjivač s IGBT tranzistorima jednake strukture kao i mrežni izmjenjivač.

U ovom radu opisane su obje strukture i osnovne karakteristike pretvarača frekvencije, prikazane su osnovne značajke konstrukcije energetske kruga i upravljačke elektronike trofaznog izmjenjivača s IGBT tranzistorima koji je sastavni dio obje strukture pretvarača, opisana je visokobrzinska motor-generator grupa za testiranje pretvarača, te su na kraju dani rezultati mjerenja na laboratorijskoj maketi pretvarača frekvencije temeljenog na uzlaznom DC/DC pretvaraču.

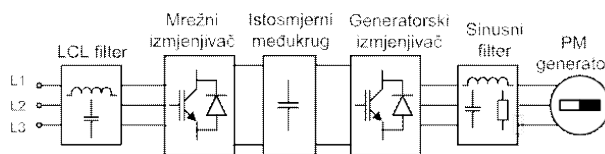
## 2. OSNOVNE STRUKTURE ENERGETSKIH I UPRAVLJAČKIH KRUGOVA PRETVARAČA FREKVENCIJE

Na slici 1 prikazana je blokovska struktura pretvarača frekvencije temeljena na generatorskom pretvaraču s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem, a na slici 2 struktura pretvarača frekvencije s jednakim mrežnim i generatorskim trofaznim IGBT izmjenjivačem. Oba pretvarača frekvencije na mrežnoj strani imaju jednaki pretvarač koji se sastoji se od trofaznog izmjenjivača s IGBT tranzistorima i LCL filtera. Uz osnovnu funkciju prijenosa električne energije iz istosmjernog međukruga u izmjeničnu električnu mrežu odlikuje ga praktički sinusni valni oblik struje mreže ( $THD_1 < 5\%$ ), te mogućnost postavljanja željenog faktora snage ( $\cos \varphi$ ) ovisno o naponskim prilikama i potrebama za jalovom energijom na mjestu priključka pretvarača na mrežu.

Prednosti pretvarača s diodnim mostom na generatorskoj strani je jednostavniji sustav upravljanja s uzlaznim DC/DC pretvaračem, koji je neovisan o frekvenciji napona PM generatora pa stoga nije ograničena ni maksimalna brzina generatora. Osnovni nedostatak ove strukture su izrazito nesinusne struje generatora čiji viši harmonici stvaraju dodatne gubitke, povećavaju temperaturu i smanjuju korisnost generatora. S druge strane pretvarač frekvencije s trofaznim IGBT izmjenjivačem i sinusnim filterom na generatorskoj strani ima praktički sinusne struje s malim pulzacijama, ali i značajno kompleksniji sustav vektorskog upravljanja PM generatorom s različitim ograničenjima uslijed visokih frekvencija generatora i prisutnosti sinusnog filtera između pretvarača i generatora. Upravljanje s PM generatorom je klasično vektorsko upravljanje u rotirajućem  $dq$  sustavu kojemu se  $d$ -os poklapa s magnetskom osi rotora, a koristi se već dugo praktički u svim servo pogonima gdje dominiraju motori s permanentnim magnetima. Zbog toga se taj sustav upravljanja u ovom radu neće opisivati, već će se opisati sustav upravljanja pretvaračem frekvencije koji se temelji na diodnom mostu i uzlaznom DC/DC pretvaraču, a koji predstavlja jedno netipično rješenje koje je moguće primijeniti samo kod generatora s permanentnim magnetima na rotoru.



Slika 1. Blokovska struktura pretvarača frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem na strani generatora



Slika 2. Blokovska struktura pretvarača frekvencije s jednakim mrežnim i generatorskim izmjenjivačem

Na slici 3 prikazana je blokovska struktura upravljanja pretvaračem frekvencije sa slike 1. Upravljanje mrežnim izmjenjivačem i uzlaznim DC/DC pretvaračem praktički je odvojeno. Sustav upravljanja mrežnim izmjenjivačem osigurava konstantan napon istosmjernog međukruga, a proizvedena energija od PM generatora se preko uzlaznog DC/DC pretvarača, istosmjernog međukruga i mrežnog izmjenjivača prenosi u električnu mrežu. Upravljanje uzlaznim DC/DC pretvaračem osigurava transfer energije za široki raspon brzina PM generatora, tj. za promjenljivi izlazni istosmjerni napon diodnog mosta koji je proporcionalan brzini generatora.

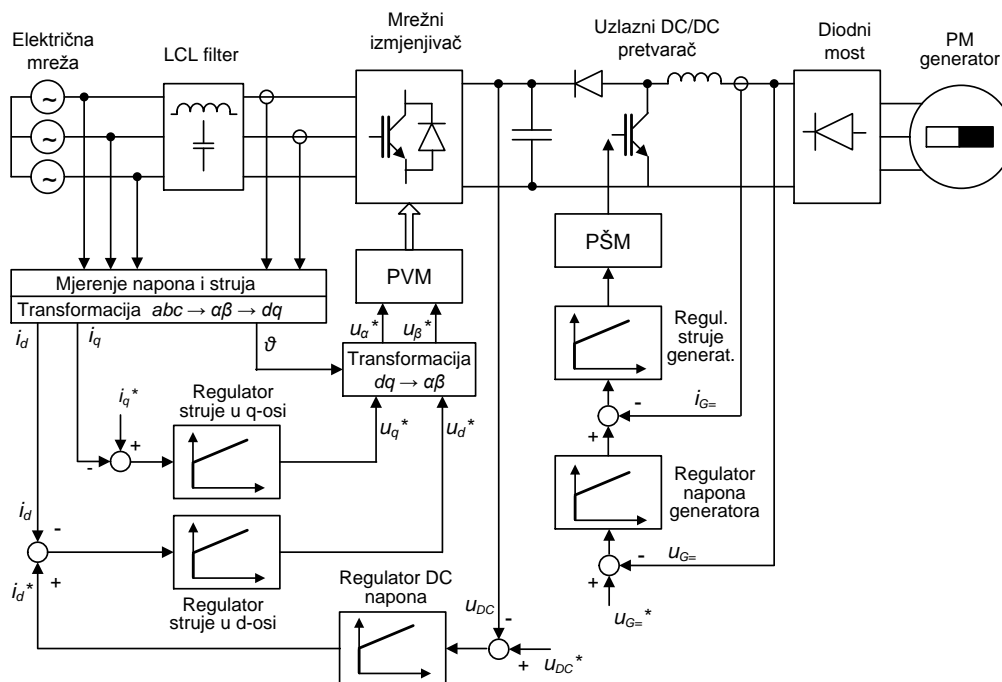
Sustav upravljanja mrežnim izmjenjivačem temelji se na metodi vektorske regulacije u sinkrono rotirajućem  $dq$  sustavu kojemu se  $d$ -os poklapa s vektorom napona mreže [3]. Na taj se način omogućuje regulacija po  $d$ - i  $q$ -komponentama struje koje su proporcionalne radnoj i jalovoj snazi. Struktura sustava je kaskadnog tipa s dvije regulacijske petlje po struji. Regulacijska petlja po struji u  $d$ -osi je unutrašnja petlja koja referentnu vrijednost ( $i_d^*$ ) dobiva od PI regulatora istosmjernog napona na kondenzatoru ( $u_{DC}$ ), što znači da je u kaskadnoj strukturi vanjska petlja izvedena po istosmjernom naponu koji se mjeri na kondenzatoru. Napon istosmjernog međukruga je 10-15% veći od maksimalne vrijednosti linijskog mrežnog napona, što je moguće postići zahvaljujući prigušnicama u LCL filtru. Drugim riječima ovaj trofazni pretvarač na neki način ima karakteristike uzlaznog pretvarača.

Regulacijska petlja po struji u  $q$ -osi je neovisna o regulaciji istosmjernog napona, pa se njena referenca ( $i_q^*$ ) postavlja fiksno ovisno o željenom  $\cos \varphi$ . Mjereni naponi i struje u  $d$ - i  $q$ -osi dobivaju se iz mjerenja trenutnih faznih napona i struja, nakon čega se vrši transformacija u dva koraka. Prvo se transformiraju fazne veličine iz  $abc$ -sustava u mirujući  $\alpha\beta$ -sustav, a nakon toga se, uz korištenje kuta rotacije  $\theta = \omega t$ , izvršava transformacija iz  $\alpha\beta$ -sustava u rotirajući  $dq$ -sustav. Kod upravljanja trofaznim IGBT izmjenjivačem koristi se inverzna transformacija, tj. željene referentne vrijednosti

napona pretvarača u dq-sustavu ( $u_d^*$ ,  $u_q^*$ ) transformiraju se u referentne vrijednosti u  $\alpha\beta$ -sustavu ( $u_\alpha^*$ ,  $u_\beta^*$ ), pri čemu se za transformaciju koristi isti kut rotacije  $\theta$  kao i kod transformacije mjenjenih veličina. Za upravljanje mrežnim izmjenjivačem koristi se metoda prostorno vektorske modulacije (PVM).

Struktura upravljanja uzlaznim DC/DC pretvaračem je također kaskadna s unutarnjom petljom po struji generatora ( $i_{g-}$ ), te vanjskom petljom po naponu generatora ( $u_{g-}$ ). Premda su napon i struja generatora izmjenične veličine, u ovoj regulacijskoj strukturi koriste se mjerenja na istosmjernoj strani diodnog mosta gdje su srednje vrijednosti napona i struje proporcionalne

efektivnim vrijednostima na izmjeničnoj strani. Za upravljanje tranzistorom unutar DC/DC pretvarača koristi se metoda pulsno širinske modulacije (PŠM). Tijekom upravljanja izlazni napon na kondenzatoru je konstantan (održava ga sustav upravljanja mrežnim izmjenjivačem), a mijenja se izlazni napon diodnog mosta. Budući je taj napon proporcionalan naponu generatora, a kod PM generatora taj napon je praktički proporcionalan brzini vrtnje, ovakvim sustavom upravljanja može se regulirati brzina generatora što je i konačni cilj u kogeneracijskom postrojenju.



Slika 3. Blokvska struktura upravljanja mrežnim izmjenjivačem i uzlaznim DC/DC pretvaračem

### 3. RAZVOJ PROTOTIPOVA PRETVARAČA FREKVENCije

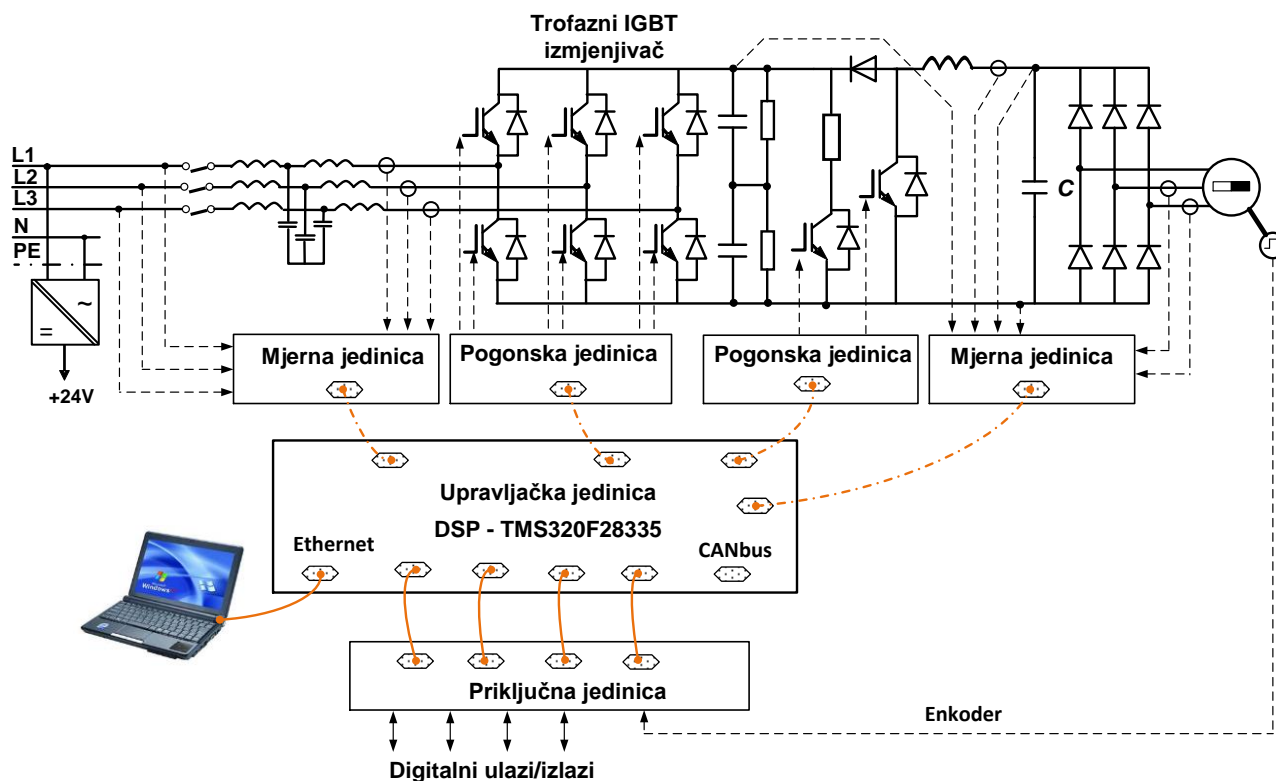
U okviru projekta razvijaju se prototipovi obje strukture pretvarača frekvencije, a u ovom odjeljku opisat će se osnovne značajke i konstrukcija energetskog kruga trofaznog IGBT izmjenjivača, te njegova upravljačka elektronika.

Na slici 4 prikazana je osnovna shema energetskog kruga i blokovski prikaz upravljačkih jedinica za pretvarač frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem. U odnosu na prikazanu strukturu na slici 3 u istosmjernom međukrugu je ugrađen kočni sklop koji se sastoji od serijskog spoja otpornika i IGBT-a. Taj se IGBT uključi samo u slučaju ako poraste napon istosmjernog međukruga iznad dozvoljene granice što se može dogoditi kada nestane napajanje sa strane mreže, pa se proizvedena energija u jednom kratkom periodu troši na otporniku, jer bi u protivnom došlo do nekontroliranog porasta napona istosmjernog međukruga.

Trofazni IGBT izmjenjivač koji se sastoji od 6 IGBT tranzistora i antiparalelno spojenih dioda temeljen je na IGBT energetskom modulu, proizvođača Infineon, tip FF900R12IE4, maksimalnog napona 1200 V i struje 900 A. Energetska shema ovog modula uključuje jednu granu trofaznog izmjenjivača s 2 IGBT tranzistora i 2 diode (slika 4), što znači da trofazni izmjenjivač sadrži 3 IGBT modula koji se montiraju na rebrasti hladnjak koji se zračno hladi pomoću ventilatora. Na 3 IGBT modula direktno je na upravljačke elektrode montirana elektronička pločica sa 6-kanalnim pogonskim sklopom (pogonska jedinica na slici 4) koji prenosi upravljačke signale koje generira mikroprocesorska upravljačka jedinica. Pogonski sklop oblikuje i galvanski odvaja upravljačke signale, a u okviru njega realizirana je i zaštita od kratkog spoja IGBT modula na principu mjerenja napona kolektor-emiter tijekom stanja vođenja. Iznad pogonskog sklopa montirane su istosmjerne plus-minus sabirnice u obliku bakrenih ploča debljine 3 mm, a između njih je postavljen i izolacijski materijal debljine 3 mm. Na bakrene ploče je spojen i kondenzatorski blok istosmjernog međukruga koji se sastoji od serijsko-

paralelne kombinacije elektrolitskih kondenzatora, te otpora za jednoliku raspodjelu napona na serijski spojenim kondenzatorima. Konstrukcijsko rješenje istosmjernih sabirnica zahtijeva što veću površinu sabirnica, minimalnu debljinu i minimalni razmak između pozitivne i negativne sabirnice, a uvjetovano je zahtjevom da paraziti inductiviteti između kondenzatora i IGBT modula budu minimalni. Naime, zbog izrazito brzih promjena struje IGBT-ova tijekom njihova

sklapanja, na parazitnim inductivitetima dolazi do velikih prenapona koje se prenose na IGBT module te ih mogu i uništiti. U tu svrhu se, osim minimiziranja parazitnih inductiviteta, postavljaju i zaštitni blok kondenzatori. Na slici 5 prikazana je fotografija trofaznog IGBT izmjenjivača na kojemu su vidljiva i 3 strujna LEM senzora tipa HAT600 za mjerenje struja koje prolaze izmjenične sabirnice s IGBT modula.



**Slika 4.** Energetska shema i blokovski prikaz upravljačkih sklopova pretvarača frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem

Osim pogonskog sklopa, za upravljanje izmjenjivačem razvijene su i izrađene još 3 elektroničke pločice koje su prikazane na slici 5:

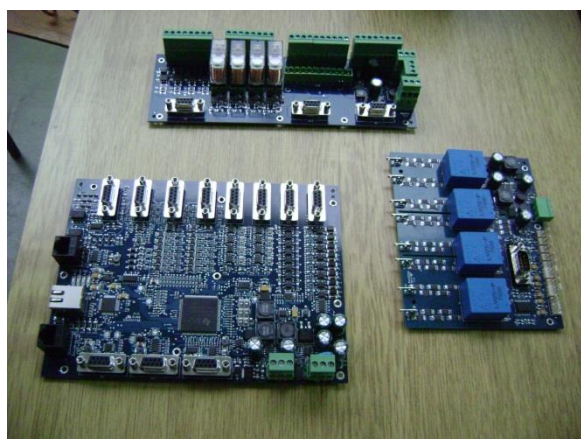
- **Upravljačka jedinica** je 6-slojna pločica realizirana u SMD tehnologiji, a temelji se na digitalnom signal procesoru (DSP) tipa TMS320F28335, proizvođača Texas Instruments. Osim DSP-a, u kojem su realizirani svi upravljačko-regulacijski algoritmi, u okviru upravljačke jedinice kondicioniraju se analogni mjerni signali (16 AI), kao i ulazno/izlazni digitalni signali (8 DI, 8 DO, 12 PWM), a pločica ima i nekoliko komunikacijskih kanala (CANbus, RS485, RS232, Ethernet ...).
- **Mjerna jedinica** obrađuje analogne signale za 4-kanalno mjerenje napona, 3-kanalno mjerenje struja i jednokanalno mjerenje temperature IGBT modula. Za mjerenje napona koriste se naponski LEM senzori tipa LV25 koji su ugrađeni na mjernoj pločici, a mjerenje struje provodi se pomoću prethodno spomenuta 3 strujna LEM senzora (prikazani na slici

4) koji su s mjernom jedinicom povezani 4-žičnim kablom. U okviru svakog IGBT modula postoji otpornički senzor temperature (NTC termistor). Na mjernoj jedinici elektronički sklop obrađuje temperaturne signale sa sva tri IGBT modula na način da se formira jedan izlazni analogni signal koji je proporcionalan temperaturi najtoplijeg od tri modula. Svih 8 mjernih signala se s mjerne jedinice preko 9-žičnog oklopljenog kabela prenosi na upravljačku jedinicu.

- **Priključna jedinica** predstavlja klasično žičano sučelje pretvarača prema procesu i nadređenom sustavu upravljanja, a preko nje se priključuje i enkoder za mjerenje brzine i položaja rotora PM generatora.



Slika 5. Fotografija energetskog kruga trofaznog IGBT izmjenjivača



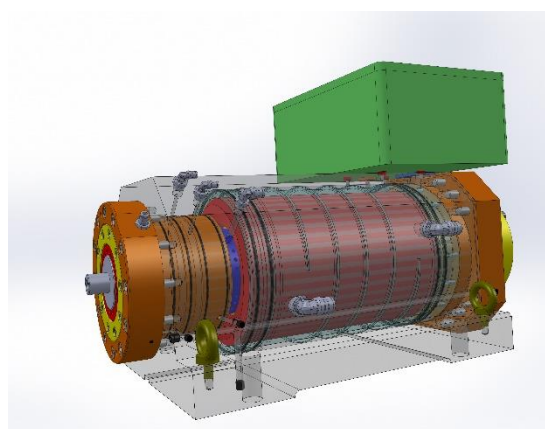
Slika 6. Upravljačka, mjerna i priključna jedinica

#### 4. VISOKOBRZINSKA MOTOR GENERATOR GRUPA

Za testiranje razvijenih pretvarača frekvencije nabavljena je motor-generator grupa koja se sastoji od asinkronog kaveznog stroja i sinkronog stroja s permanentnim magnetima na rotoru. Nazivni podaci strojeva približno su isti, a definirani su za sinusne struje:  $P = 100 \text{ kW}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $I = 166 \text{ A}$ ,  $n = 20000 \text{ min}^{-1}$ ,  $M = 48 \text{ Nm}$ . Na slici 7 je prikazana 3D skica asinkronog kaveznog stroja u varijanti kada su vidljivi kanali za vodeno hlađenje, a na slici 8 fotografija motor generator grupe. Strojevi su projektirani i izrađeni u firmi HSTec iz Zadra kojoj je osnovna djelatnost projektiranje i izrada visokobrzinskih motornih vretena za alatne strojeve. Strojevi za motor-generator grupu su projektirani i izrađeni na način da su statorski paketi s namotajima i rotoru nabavljeni od specijaliziranog inozemnog proizvođača visokobrzinskih električnih strojeva, a u HSTec-u su izrađeni ili nabavljeni ostali sastavni dijelovi, kao što su rotorska osovina, statorsko kućište od lijevanog željeza s kanalima za vodeno hlađenje, četiri keramička ležaja za svaki motor, inkrementalni enkoder za mjerenje brzine i položaja rotora, dvije temperaturne sonde u statorskom namotaju, priključna kutija. Nakon zahtjevne i precizne montaže sastavnih dijelova, strojevi su u HSTec-u testirani u režimu praznog hoda pri

nazivnoj brzini pri čemu su kontrolirane temperature i vibracije. Nakon toga su oba stroja montirani na zajedničko postolje, a njihove osovine su spojene fleksibilnom spojkom. U oba stroja su na nepogonskoj strani ugrađeni inkrementalni enkoderi s 256 impulsa po okretaju, s tim da jedan enkoder ima 5V TTL izlazne signale, a drugi sinusne/kosinusne signale s amplitudom od  $1 \text{ V}_{pp}$ .

Za podmazivanje keramičkih ležajeva uz motor-generator grupu instaliran je agregat za podmazivanje uljem u struji zraka, proizvođača SKF. Agregat za podmazivanje ulje-zrak podmazuje ukupno 8 ležajeva pri čemu ubrizgava količinu od oko  $20 \text{ mm}^3$  ulja u plastične dovodne cijevi sustava pomoću zraka pod tlakom (6 bar). Impuls uljnog podmazivanja se okida svakih 6 minuta. Struja zraka uzrokuje dodatan učinak hlađenja za svaki ležaj.



Slika 7. 3D model asinkronog kaveznog stroja

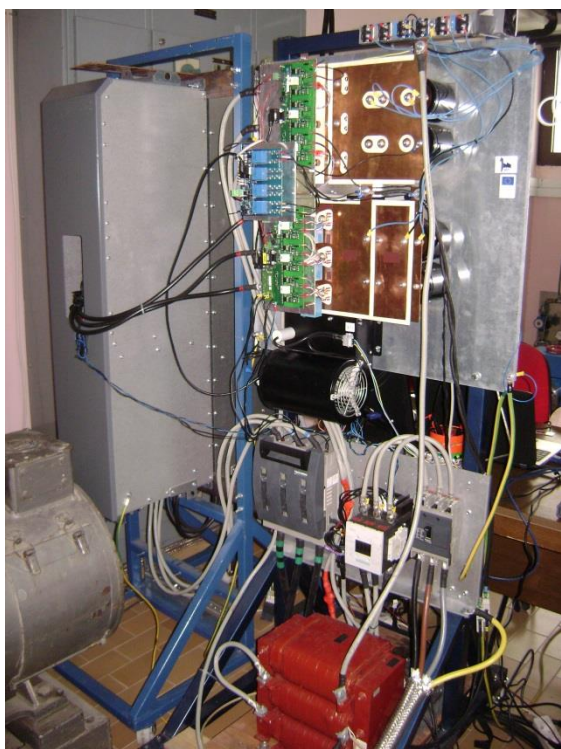


Slika 8. Visokobrzinska motor-generator grupa s uljnim agregatom i rashladnim sustavom.

Zbog vodenog hlađenja strojeva instaliran je hidraulični rashladni sustav koji osigurava stalan protok rashladne vode s aditivima protiv korozije. Zahtijevani protok je 16 l/min, ulazna temperatura može biti u granicama od 10-40°C, a maksimalno povećanje temperature rashladnog sredstva pri nazivno opterećenim strojevima je 10°C.

## 5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

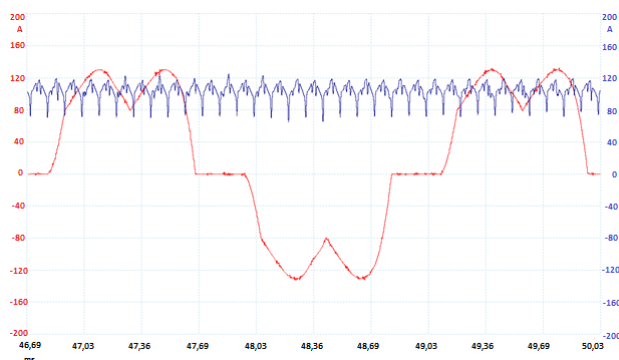
Mjerenja su provedena na laboratorijskoj maketi pretvarača frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem na strani generatora (struktura na slici 4). Ova maketa je prikazana na slici 9, a izgrađena je prije završetka konačnog prototipa pretvarača frekvencije koji uključuje trofazne IGBT izmjenjivače na strani mreže i generatora. Osim testiranja rada pretvarača frekvencije s uzlaznim DC/DC pretvaračem ovim pokusima je prvi put testirana i motor generator grupa s 50% nazivne struje motora i brzine vrtnje oko 13000 rpm. Tijekom testiranja asinkroni stroj je u motorskom režimu pogonjen jednokvadratnim pretvaračem frekvencije tipa VACON NXP0300, a PM sinkroni stroj je radio u generatorskom režimu priključen na razvijeni pretvarač frekvencije opisane strukture.



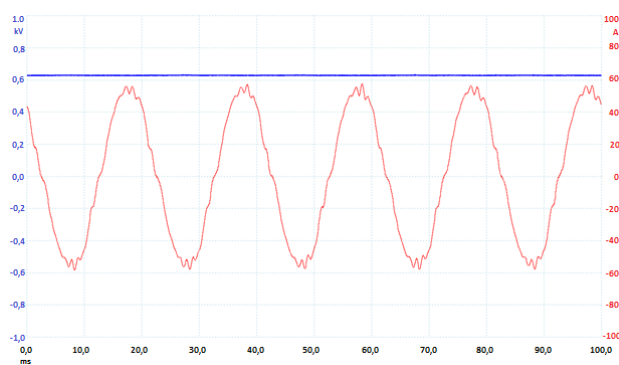
**Slika 9.** Laboratorijska maketa pretvarača frekvencije s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem

Na slici 10 prikazani su valni oblici struje PM generatora (crveno) i struje prigušnice DC/DC pretvarača (plavo) u stacionarnom stanju. Zbog diodnog mosta struja generatora je nesinusnog valnog oblika što predstavlja problem sa stanovišta dodatnog zagrijavanja i pulzirajuće komponente u momentu PM generatora. Struja prigušnice osim istosmjerne vrijednosti (oko 100 A) ima i pulzirajuću komponentu koja je posljedica

sklopnog režima rada IGBT tranzistora u uzlaznom DC/DC pretvaraču. Frekvencija pulzacija određena je frekvencijom sklapanja tranzistora i iznosi 10 kHz. Na slici 11 za istu radnu točku prikazana je struja mreže (crveno) i napon istosmjernog međukruga (plavo). Struja mreže je približno sinusnog valnog oblika s malim pulzacijama u području maksimalnih vrijednosti, a napon istosmjernog međukruga ima konstantnu vrijednost od približno 630 V, što je oko 12% veća vrijednost od maksimalne vrijednosti linijskog mrežnog napona ( $\sqrt{2} \cdot 400V$ ).



**Slika 10.** Struja PM generatora (crveno) i struja prigušnice DC/DC pretvarača (plavo)



**Slika 11.** Struja mreže (crveno) i napon istosmjernog međukruga (plavo)

## 6. ZAKLJUČAK

Razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima koji se koriste u kogeneracijskim postrojenjima je specifičan sa stanovišta visokih frekvencija osnovnog harmonika napona generatora. Zbog toga se može primijeniti rješenje klasičnog pretvarača frekvencije koji se koristi u četverokvadratnim elektromotornim pogonima s dva trofazna IGBT izmjenjivača, s tim da se kao glavni problem pojavljuje visoka frekvencija osnovnog harmonika koja za sobom povlači i visoku sklopnu frekvenciju trofaznog IGBT izmjenjivača na strani generatora. S druge strane, jednostavnije rješenje s diodnim mostom i uzlaznim DC/DC pretvaračem nema problema s visokim frekvencijama napona generatora, ali struje generatora su izrazito nesinusne što uzrokuje dodatno zagrijavanje i pulzirajuće momente generatora.

## 7. LITERATURA

- [1] Muhammad H. Rashid: Power Electronics – circuits, devices and applications, Pearson Prentice Hall, USA, 2004.
- [2] I. Flegar: Elektronički energetska pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.
- [3] Terzić, B.; Majić, G.; Slutej, A.: Stability Analysis of Three-Phase PWM Converter with LCL Filter by Means of Nonlinear Model, *Automatika - Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 51 (2010) , 3; 221-231
- [4] Jadrić, M.; Terzić, B.; Despalatović, M.; Majić, G.; Slutej, A.; Šimić, T.: Identification of Rotor Resistance and Transient Inductance of Induction Motors Using Frequency Selection Criterion // *Proceedings of the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines / Marseille, Francuska, 2012.*, 978-984.
- [5] Terzić, B.; Jadrić, M.: Design and Implementation of the Extended Kalman Filter for the Speed and Rotor Position Estimation of Brushless DC Motor. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 48 (2001) , 6; 1065-1073.
- [6] <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-module/igbt-module-1200v/channel.html>
- [7] <https://www.ti.com/product/tms320f28335>
- [8] Korisnički priručnik Motorno vreteno HSE130SE-B05-LC70-00, HSTec d.d., Zadar, 2015.
- [9] Application Manual Power Semiconductors, published by SEMIKRON International GmbH, 2011.

### **Kontakt autora:**

#### **Božo Terzić, prof. dr. sc.**

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje,  
Sveučilište u Splitu  
Ruđera Boškovića 32  
21000 Split  
Tel.: 021 305609  
e-mail: bterzic@fesb.hr