



# SAVREMENA DIGITALNA REALIZACIJA POBUDNIH SISTEMA ZA MALE SINHRONE MAŠINE – J<sup>3</sup>

Jasna Dragosavac, Marko Janković, Žarko Janda.  
Elektrotehnički institut «Nikola Tesla», Beograd, Srbija i Crna Gora

**Sadržaj:** Prikazan je mikroprocesorski sistem za regulaciju napona male sinhronne mašine na bazi mikrokontrolera. Energetski deo uređaja je realizovan kao čoper spuštač napona u IGBT tehnologiji. Ovakva realizacija je pogodna za primenu kako kod sinhronih generatora tako i kod sinhronih motora malih snaga. Sinhrona mašina je modelovana na PC računaru. Uređaj za automatsku regulaciju pobude tipa J<sup>3</sup> predstavlja novu generaciju svojih prethodnika tipa ARP 95 i ARRP prilagođenu strukturi postojećeg sistema za regulaciju pobude. Funkcionalno novi uređaj se potpuno oslanja na koncepciju svojih prethodnika, dok je strukturno izmenjen. Upravljački deo regulatora realizovan je primenom PLC-a, a izlazni stepen povećane snage preuzet je iz prethodne generacije tipa ARP. Ranija rešenja bila su realizovana korišćenjem redukovanog BUCK konvertora u bipolarnoj tranzistorskoj tehnologiji. U radu je predstavljeno unapređeno rešenje kod koga je izvršni organ ARP realizovan primenom celovite BUCK strukture u IGBT tehnologiji. Prednosti ovakve realizacije su sledeće: primena IGBT tranzistora omogućava rad sa višim izlaznim naponima čime je omogućena primena istog uređaja u pobudnim sistemima sinhronih generatora u širem opsegu izlaznih snaga; primenom celovite Buck strukture potpuno su otklonjene elektromagnetne smetnje koje su u ranijim realizacijama bile izrazite. U radu je pokazano da i izmenjena struktura izlaznog stepena ne utiče na promene dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude.

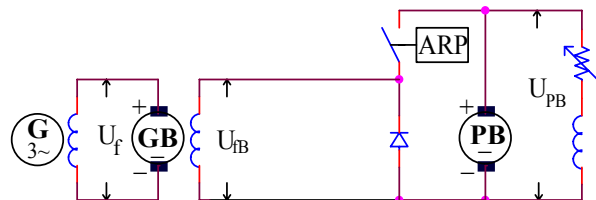
**Ključne reči:** Sinhroni generator, pobuda, buck konvertor

## 1. UVOD

Prema [1] sistem za regulaciju pobude sinhronog generatora obuhvata sinhroni generator (objekt upravljanja) i sistem pobude. Sinhroni generator (SG) i pobudni sistem vezani su negativnom povratnom spregom radi obezbeđenja automatske regulacije napona na krajevima generatora. Regulacija napona na krajevima SG realizuje se posrednim putem, preko regulacije indukovane elektromotorne sile (EMS) statora, promenom struje pobude. Sistem pobude SG predstavlja izvor struje pobude potrebne za održavanje napona na krajevima generatora i uključuje elemente za proizvodnju struje pobude (pobudnica), regulaciju

pobude (ručni i/ili automatski regulator pobude) i uređaje za upravljanje, merenje i zaštitu u pobudnom kolu sinhronne mašine. Regulator pobude SG povezuje izlazne promenljive SG sa ulazom u pobudnicu (upravljački signal) u cilju regulisanja izlaznih promenljivih sinhronog generatora.

U ovom radu je prikazan jednosmerni (DC) sistem za regulaciju pobude SG (sl. 1). Struja pobude SG ovde se proizvodi pomoću jednosmernog generatora sa nezavisnom pobudom (GB). Jednosmerni generator se pobuđuje pomoćnom pobudnicom (jednosmerni generator sa sopstvenom pobudom – PB). Regulacija pobudne struje SG vrši se regulacijom struje pobude glavne budilice ručno, pomoću otpornika za ručnu regulaciju ili automatski, pomoću automatskog regulatora pobude.



Sl. 1. Rekonstruisani sistem za regulaciju pobude sa ARP

S obzirom da dinamičke i statičke karakteristike sistema regulacije pobude pojedinih generatora određuju ponašanje celog EES-a, ekonomska računica pokazuje da kod SG male snage ukoliko je budilica u dobrom stanju, nije isplativo ugrađivati statičke sisteme pobude. Kod takvih SG delimično poboljšanje statičkih i dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude postiže se ugradnjom predloženog pobudnog sistema.

## 2. PREDNOSTI DIGITALNE REALIZACIJE

Zadatak upravljanja pobudom sinhronne mašine obuhvata upravljanje efektivnom vrednošću terminalnih napona ili reaktivnih snaga. Kao upravljačke veličine koriste pobudna struja, odnosno pobudni fluks, kada se upravlja efektivnom vrednošću napona. Pod pretpostavkom da je sistem raspregnut ili, što je realno očekivati slabo spregnut, upravljanje je moguće ostvariti konvencionalnim PI i PID regulatorima. S obzirom da je sinhrona mašina izrazito nelinearni objekat upravljanja,

potrebno je menjati vrednosti parametara regulatora u zavisnosti od radne tačke kako bi se ostvarilo optimalno upravljanje. Primenom upravljačke strukture bazirane na mikrokontroleru ostvarena je promena parametara regulatora i na taj način ostvareno optimalno upravljanje u celom radnom opsegu.

Razvojem digitalne tehnike, mikroprocesora i mikrokontrolera stižu se novi uslovi za upravljanje procesima. Prednosti digitalnog upravljanja su dobro poznate (fleksibilnost, cena, pouzdanost i td.), pri čemu je mogućnost prosleđivanja upravljačkih promenljivih sa viših nivoa upravljanja, akvizicija, obrada i memorisanje merenja od velikog značaja kada se imaju u vidu savremeni zahtevi za upravljanje objektima u elektroprivredi. Kod njih znatno manje dolaze do izražaja problemi vezani za starenje komponenti jer nakon diskretizacije signal postaje potpuno imun na promene karakteristika korišćenih komponenti.

Digitalni regulatori ne predstavljaju prostu zamenu analognih regulatora novim tehnologijama s obzirom da su funkcije analognog regulatora znatno unapređene, uz realizaciju nekoliko novih značajnih funkcija. Uređaj J<sup>3</sup> omogućava realizaciju sledećih standardnih funkcija:

- Regulator napona sa PID upravljačkim algoritmom
- Interne digitalne reference
- Funkcija mekog starta
- Kompenzacija po reaktivnoj snazi
- Limiteri (dV/df, minimalna struja pobude, maksimalna struja pobude - sa trostepenim vremenskim zatezanjem, maksimalna struja statora - sa trostepenim vremenskim zatezanjem)
- Detekcija asinhronog rada (kod primene za sinhronu motore)
- "Forsiranje" struje pobude u slučaju detekcije podnapona, radi održanja stabilnosti
- Prelaz na regulaciju po reaktivnoj komponenti struje generatora (sa PI upravljačkim algoritmom) u slučaju detekcije kratkog spoja u mreži
- Regulacija  $\cos \varphi$  (u slučaju primene kod sinhronog motora)
- Upravljanje po struji pobude generatora (ručno upravljanje)
- Kontrola napona na krajevima sinhronu mašine u otvorenoj petlji u test režimu rada
- Vođenje pobude sinhronog motora u toku asinhronog zaleta i pravilno uključenje pobude
- Estimacija srednje temperature namota rotora u toku rada
- Detekcija međuzavojnog kratkog spoja na statoru (na bazi simetrije reaktivnih komponenti struja statora)
- Alarmi

I ranije su sistemi pobude bili snabdeveni nekim od navedenih funkcija, koje su bile realizovane u čitavom nizu različitih uređaja. To je uticalo na povećanje cene sistema pobude pri čemu između pojedinih celina nije postojala nikakva komunikacija. Digitalni regulatori pobude objedinjuju sve ove funkcije u jednu celinu pa je time obezbeđena komunikacija između pojedinih delova, a preko serijske veze i sa "spoljnim svetom". Fleksibilnost strukture digitalnih sistema je neuporedivo

veća nego kod analognih, pa se relativno lako mogu dodavati funkcije, vršiti različita prepođešenja parametara i izvoditi druge izmene. Sasvim je jasno da se digitalni regulatori odlikuju povećanom pouzdanošću (dodatna sigurnost se postiže upotrebom "rezervnih" procesora), znatno nižom cenom i znatno manjim dimenzijama. Znatno unapređene funkcije zaštite i ograničenja rada omogućavaju rad mašine bliže njenim projektovanim granicama, čuvaju mašinu, produžavaju vek trajanja mašine i smanjuju troškove održavanja.

Opciona funkcija je:

- Sinhronizacija generatora na mrežu
- Komunikacija sa nadređenim računarom se obavlja preko izolovane RS-485 veze. Nadređeni računar se koristi za parametrisiranje i nadzor uređaja.

### 3. REALIZACIJA ARP SA IZLAZNIM STEPENOM U IGBT TEHNOLOGIJI

Ranija rešenja bila su realizovana sa tranzistorskim izlaznim stepenom i ugrađivana su u pobudne sisteme sa nominalnim naponima pobude budilice do 100 V i struje pobude budilice do 10 A. Kao izvršni organ (prekidač) u ARRPa korišćen je bipolarni tranzistor tipa BUV 98A. Kao osnova za projektovanje su uzete karakteristike i zahtevi sistema pobude u HE "Potpeć". One su zahtevale povećanje nominalnih vrednosti napona i struje tj, ukupne snage izlaznog stepena ARP-a. Radna vrednost napona pomoćne budilice, u čije kolo se ARP vezuje, iznosi 300V. Pri pobegu od 36,5% nominalne brzine obrtanja (granica odrade centrifugalnog klatna) napon pomoćne budilice raste na 500 V. Pri tome udarna struja pomoćne budilice iznosi 35A. Ove, znatno više vrednosti radnih napona i struja u kolima pobude budilice pokazuju da se ranije korišćeni tranzistor tipa BUV 98A ovde ne može primenjivati.

#### 3.1 Struktura izlaznog stepena

Izlazni stepen ARP-a, izveden kao dc-dc spuštač napona, vezuje se u pobudno kolo glavne budilice (sl. 1). Koncepcija izlaznog stepena (nepotpuna BUCK struktura) preuzeta je iz prethodnih realizacija [4].

U ovakvoj konfiguraciji pretvarača napon na otvorenom prekidaču jednak je naponu pomoćne budilice. Pri izboru prekidača mora se voditi računa da pri gašenju tranzistora napon u jednosmernom razvodu raste iznad nominalnih vrednosti (komutacioni prenaponi) kao posledica induktivnosti opterećenja i/ili induktivnosti samih veza ( $L_{stray} \cdot di/dt$ ). U ovom konkretnom slučaju to znači da u jednosmernom kolu prekidača naponi dostižu vrednosti iznad 500V. Ovako visoke vrednosti napona uz odgovarajuću struju uslovile su prelazak sa bipolarne na IGBT tehnologiju. Kao prekidač u izlaznom stepenu izabran je IGBT SKM 75GAL ( $V_{CES}=1200V, I_{CM}=75A$ ). Izabrani IGBT sa stanovišta podnosivog napona u potpunosti zadovoljava radne uslove. Sa stanovišta strujnog opterećenja bilo je neophodno proveriti da li se odgovarajućim hladnjakom bez ventilatora može obezbeđiti efikasno hlađenje.

Poznato je da sa stanovišta dozvoljenog strujnog opterećenja IGBT-a osnovni ograničavajući faktor je, kao i kod većine poluprovodničkih elemenata, maksimalna dozvoljena temperatura spoja.

Problem visoke disipacije, nastao povećanjem snage izlaznog stepena, rešen je jednostavno bez ugradnje dodatnih ventilatora, snižavanjem izlazne frekvencije sa 20 kHz na 10 kHz.

Dalje povećanje snage izlaznog stepena može se postići snižavanjem nivoa komutacionih prenapona. Na taj način se omogućava primena iste prekidačke komponente u jednosmernim razvodima viših napona i smanjuju gubici tokom komutacije. Sniženje komutacionih prenapona ostvaruje se na dva načina: pravilnim izborom prenaponske zaštite IGBTa i pravilnim izborom karakteristika upaljača za IGBT.

### 3.2 Karakteristike upaljača SKHI 10

S obzirom da je kontrolni parametar za IGBT ulazni napon gej-t-emiter, upaljač iz prethodne verzije zamenjen je upaljačem za IGBT tipa SKHI 10. Upaljač SKHI 10 u sebi ima objedinjene sledeće funkcije:

- dc-dc pretvarač kojim je izbegnuta upotreba dodatnog posebnog napajanja za izlazni stepen, čime se ujedno obezbeđuje i izolovanost istog;
- Na samom modulu je obezbeđena detekcija poremećaja napona napajanja,
- Izolacija izlaznog stepena realizovana je korišćenjem feritnih transformatora umesto ranije korišćenih optokaplera.
- Zaštita od kratkog spoja vrši se merenjem napona kolektor emiter pomoću kola za  $V_{CE}$  monitoring
- Detekcijom kratkog spoja ili poremećaja u napajanju aktivira se signal greške koji blokira paljenje IGBT.

Ovaj upaljač karakteriše i dodatna funkcija u kolu zaštite od kratkog spoja IGBT tranzistora, soft turnoff. Prilikom detekcije kratkog spoja automatski se produžava vreme gašenja IGBT-a smanjenjem vrednosti  $di/dt$  (povećanjem  $R_{goff}$ ) i smanjuje veličina prenapona.

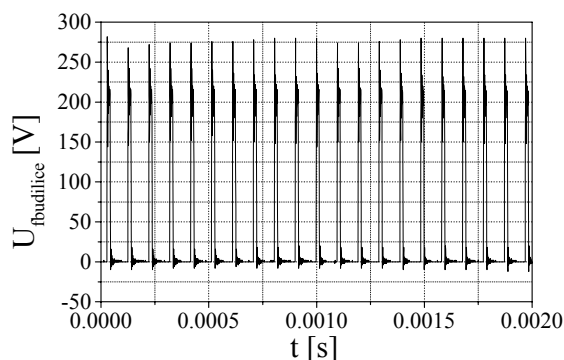
Time je omogućena upotreba istih IGBT-a u kolima sa višim jednosmernim naponom što rezultuje u povećanju ukupne izlazne snage.

Na ovaj način se smanjuje preskok napona pri gašenju IGBT-a u kritičnim situacijama (prevelika struja) i sa druge strane omogućava brzo gašenje u normalnom radu.

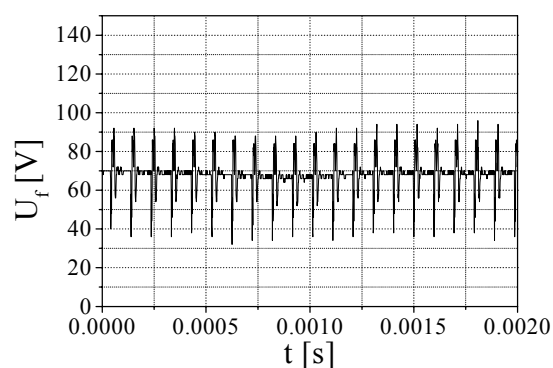
### 3.3 Rezultati ispitivanja

Nakon realizacije i podešavanja parametara regulatora izvršena su laboratorijska ispitivanja. Sama brzina odziva elektromašinskih sistema pobude budilice i samog generatora tako da se brzim statičkim regulatorom može samo delimično kompenzovati električna tromost budilice.

Međutim, tokom laboratorijskih ispitivanja konstatovano je postojanje visokog nivoa elektromagnetnih smetnji koje su posledica oblika napona u kolima sistema pobude, koje se manifestovalo uticajem na rad drugih uređaja u laboratoriji.

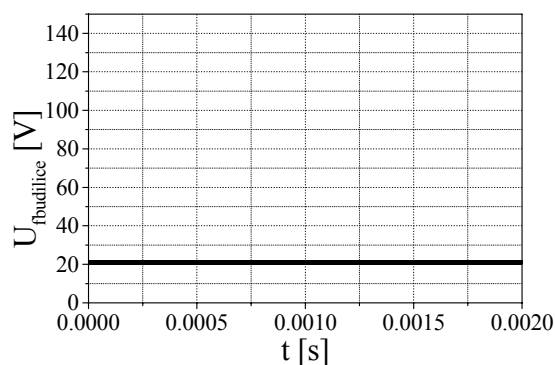


Sl. 2. Napon pobude budilice u režimu automatske regulacije sa ARP bez LC filtera



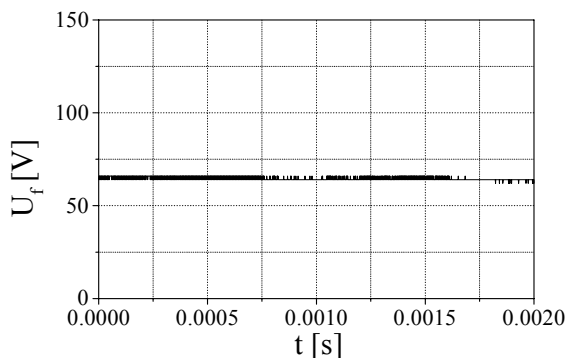
Sl. 3. Napon pobude generatora u režimu automatske regulacije sa ARP bez LC filtera

Ovakvu situaciju dodatno otežava činjenica da se u praksi ne može izbeći da se energetske kablove na pojedinim deonicama vode paralelno sa mernim kablovima.



Sl. 4. Napon pobude budilice u režimu ručne regulacije

U cilju detekcije i otklanjanja uočenih smetnji prvo su osciloskopom snimljeni oblici napona pobude glavne budilice i napona pobude generatora u režimima ručne i automatske regulacije (sl. 2, 3, 4 i 5). Na slikama se jasno uočava kako se prekidački rad izlaznog stepena (sl. 2) preslikavao i na napon pobude SG (sl. 3).



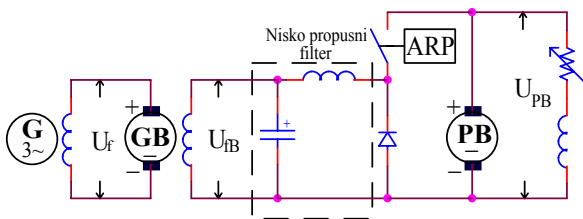
Sl. 5. Napon pobude generatora u režimu ručne regulacije

Fluktuacije napona pobude budilice u automatskoj regulaciji kretale su se u granicama od 0 do 250V (sl. 2). Vrednost ovog napona u režimu ručne regulacije, za nominalni radni režim generatora, je konstantna i iznosi 22V (sl. 4). Snimljene fluktuacije napona osim izrazitih elektromagnetnih smetnji imaju za posledicu i dodatno naprezanje izolacije pobudnog namotaja što drastično utiče na njeno brže starenje. S obzirom da ovakav oblik napona pobude generatora i budilice nije poželjan neophodno je bilo preduzeti mere za njegovu korekciju. Fluktuacije izlaznog napona mogu se znatno ublažiti ugradnjom niskopropusnog LC filtera [5] (sl. 6).

#### 4. REALIZACIJA ARP SA BUCK IZLAZNIM STEPENOM

U cilju korigovanja nastalih smetnji na izlazu dc-dc spuštača napona ugrađen je nisko propusni LC filter čime je ostvarena celovita BUCK struktura [5]. Mali filter u izlaznom delu dc-dc pretvarača ima i ulogu integralnog člana. S obzirom da LC kola unose par konjugovano kompleksnih polova u prenosnu funkciju sistema bilo je neophodno simulacijom proveriti odziv sistema za regulaciju pobude.

U simulaciji su parametri regulatora izabrani prema stvarno podešenim vrednostima. Pošto parametri budilice i generatora nisu bili dostupni,

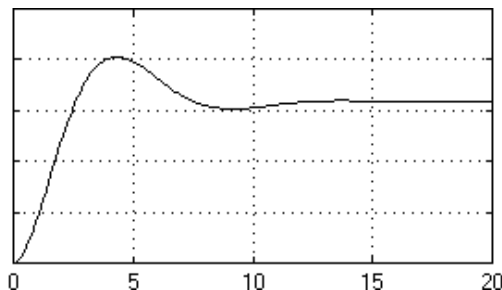


Sl. 6. Rekonstruisani sistem za regulaciju pobude sa ARP sa ugrađenim filterom

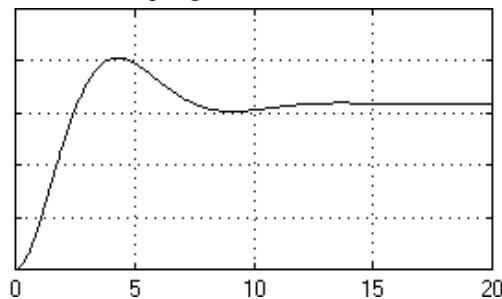
korišćeni su parametri za hidrogenator prema [6]. Filter je projektovan prema učestanosti PWM tako da nivo oscilacija napona na njegovom izlazu bude u okviru dozvoljenih granica. Granična učestanost filtera je za više redova veličina pomena u odnosu na propusni opseg sistema za regulaciju pobude tako da filter nema uticaja na dinamiku sistema. Prenosna funkcija filtera data je u bloku koji je prikazan isprekidanom linijom. Simulacija odziva na step pobudni signal izvršena je za dva slučaja, sa i bez filtera, a rezultati su dati na slikama

7 i 8. Rezultati simulacije pokazuju da nema promena u dinamici sistema.

Prema zahtevu da talasnost napona pobude ne prelazi vrednost 2% izabrani su sledeći parametri filtera:  $C=2000\mu\text{F}$ ,  $L=1\text{mH}$ , pri čemu granična učestanost iznosi  $f_c=112\text{Hz}$ . Zbog diskretnih vrednosti pasivnih komponenti koje su korišćene u izradi filtera projektovan je filter koji na 10kHz unosi slabljenje 0,016.



Sl. 7. Simulacija odziva sistema za regulaciju pobude na step signal sa ARP sa LC



Sl. 8. Simulacija odziva sistema za regulaciju pobude na step signal sa ARP bez LC

#### 4.1 Rezultati ispitivanja

Nakon izvršene modifikacije osciloskopom su snimljeni naponi pobude generatora i budilice kada je laboratorijski generator radio u automatskom režimu. Željeni efekat, otklanjanje fluktuacija napona pobude, je postignut. Praktično, oblik napona pobude budilice i generatora identičan je u režimu ručne i automatske regulacije (sl. 4 i 5).

Otklanjanjem fluktuacija napona smanjen je i nivo smetnji, kako izvan uređaja tako i u samom uređaju. Tokom laboratorijskih ispitivanja ARP izvedeno je više eksperimenata u cilju određivanja kvaliteta ponašanja sistema za regulaciju pobude pri raznim radnim režimima, kao što su prazan hod i rad generatora na mreži. S obzirom da je laboratorijski SG spregnut paralelno sa povezanim elektroenergetskim sistemom njegov radni režim i parametri spoljnog sistema znatno utiču na performanse sistema za regulaciju pobude.

#### 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan statički automatski regulator pobude SG realizovan primenom celovite BUCK strukture u IGBT tehnologiji. Cilj je dizajn uređaja za pokrivanje što većeg broja mogućih realizacija pobudnih i zaštitnih sistema sinhronih generatora i motora. Korišćenjem IGBT tranzistora i odgovarajućeg upaljača povećan je opseg izlaznih napona i snaga ARPa, a samim tim i opseg snaga pobudnih sistema kod kojih se ovakav uređaj može koristiti.

Visok nivo elektromagnetnih smetnji zahtevao je i izmene u strukturi izlaznog stepena. Ugradnjom niskopropusnog pasivnog LC filtera realizovana je celovita BUCK struktura. Primenom BUCK konvertora potpuno su smanjene elektromagnetne smetnje izvan uređaja. Talasnost napona je svedena u granice 2% čime je u potpunosti izbegnuto nepotrebno naprezanje izolacije pobudnog namotaja budilice.

U radu je pokazano da se pravilnim izborom parametara LC filtera može izbeći svaki uticaj na dinamiku i kvalitet odziva sistema za regulaciju pobude SG.

Na osnovu dobijenih rezultata možemo zaključiti da je izmenjena struktura izlaznog stepena ARP apsolutno poželjna prilikom realizacije jednosmernih sistema za regulaciju pobude SG kao i kod generatora malih snaga kod kojih se celokupna struja pobude može obezbediti pomoću ARP.

## PRILOG 1

TABELA I Sinhroni generator

Snaga	20 000kVA
Napon	8800 V
Struja	1310 A
cosφ	0,9

TABELA II Glavna i pomoćna budilica

	Glavna budilica	Pomoćna budilica
Trajna snaga	120 kW	3,9 kW
Trajni napon	150 V	230 V
Trajna struja	790 A	17 A
Udarna snaga	330 kW	8,0 kW
Udarni napon	250 V	230 V
Udarna struja	1320 A	35 A

## 6. LITERATURA

- [1] "IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines", IEEE Std 421, 1986.
- [2] "Automatski regulator pobude tipa ARP 95", Ćirić Z., Stevanović I., Dragosavac J., Arnautović D., Elektroprivreda, br. 4, Beograd, 1998.
- [3] "Rekonstrukcija sistema pobude u Vlasinskim HE", Stevanović I., Ćirić Z., Dragosavac J., Arnautović D., Elektroprivreda, br. 1, Beograd, 2000.
- [4] "Transistor-Spannungsregler Reg V 921-5, 22'2", Siemens.

[5] "Power electronics", Mohan N., John Wiley&sons, 1995.

[6] "Dinamičke karakteristike automatskog regulatora pobude sa tranzistorskim izlaznim stepenom", Stevanović I., Ćirić Z., Dragosavac J., JUKO CIGRE, Herceg Novi, 1997.

## MODERN DIGITAL BASED EXCITATION SYSTEM INTENDED FOR SMALL SYNCHRONOUS MACHINES - J<sup>3</sup>

**Abstract:** *The improved microprocessor based automatic voltage control regulator is presented in the paper. The power part of regulator is built as buck converter employing the IGBT power transistor technology. The proposed construction is preferable for small synchronous generators as well as motors. By function, the proposed AVR is based on the previously reported and used approaches, but the control part is implemented on a PLC, while the output power converter is adopted from the previous versions. The previous solutions were realized by utilization of the reduced BUCK converter in the bipolar transistor technology. The paper deals with an advanced solution, where the power converter of ARP was realized by application of the whole BUCK structure in IGBT technology. The advantage of such realization were as follows: application of IGBT enables operation with higher output voltages, thereby enabling the broad range of applications; by application of the complete buck structure, significant electromagnetic disturbances from the previous realizations were completely suppressed. The paper shows that the changed structure of converter does not affect the dynamic performances of the excitation system. By using the standard industrial PLC the delivery time is significantly reduced and maintenance is simplified. Moreover, implementation of PLC enables easy integration of the excitation system with the other technological processes in the plant. Also, implementation of various optimization algorithms can be done comfortably and it does not require additional investment in hardware.*

**Key Words:** *static excitation system, synchronous generator, PLC based control.*