

## TIRISTORSKI SISTEM POBUDE SA ELEKTRIČNIM KOČENJEM I DIGITALNIM AUTOMATSKIM REGULATOROM POBUDE U HE "BISTRICA"

Ilija Stevanović, Đorđe Stojić, Zoran Ćirić  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

**Sadržaj:** U radu je dat opis statičkih sistema pobude ugrađenih na dva agregata u HE "Bistrica" snage 54 MVA. Data je struktura sistema pobude u koju je, pored osnovne regulacione opreme, uključena i oprema za električno kočenje agregata. Detaljno je prikazana realizacija prvog domaćeg mikroprocesorskog regulatora pobude koja obuhvata hardversku strukturu i regulacione i upravljačke funkcije. Takođe su dati odzivi sistema regulacije pobude pri velikim i malim poremećajima, kao i dijagrami zaustavljanja agregata pri električnom kočenju.

**Ključne reči:** sistem pobude / mikroprocesorski regulator pobude / električno kočenje / dinamičke karakteristike.

### 1. UVOD

U HE "Bistrica" je 2000. godine izvršena zamena postojećeg elektromašinskog sistema pobude novim statičkim sistemom pobude [1]. Energetsko kolo sistema pobude je realizovano pomoću dva tiristorska pretvarača koji rade paralelno jedan drugom, a sva oprema je dimenzionisana da može da ostvari faktor forsiranja 2 i po naponu i po struji [2].

U novom sistemu pobude je ugrađen prvi domaći digitalni automatski regulator pobude koji je razvijen i proizveden u Institutu "Nikola Tesla" [3]. Mikroprocesorski regulator je realizovan tako da, pored obavljanja svih regulacionih i upravljačkih zadataka, vrši faznu regulaciju i upravljanje tiristorskim mostovima.

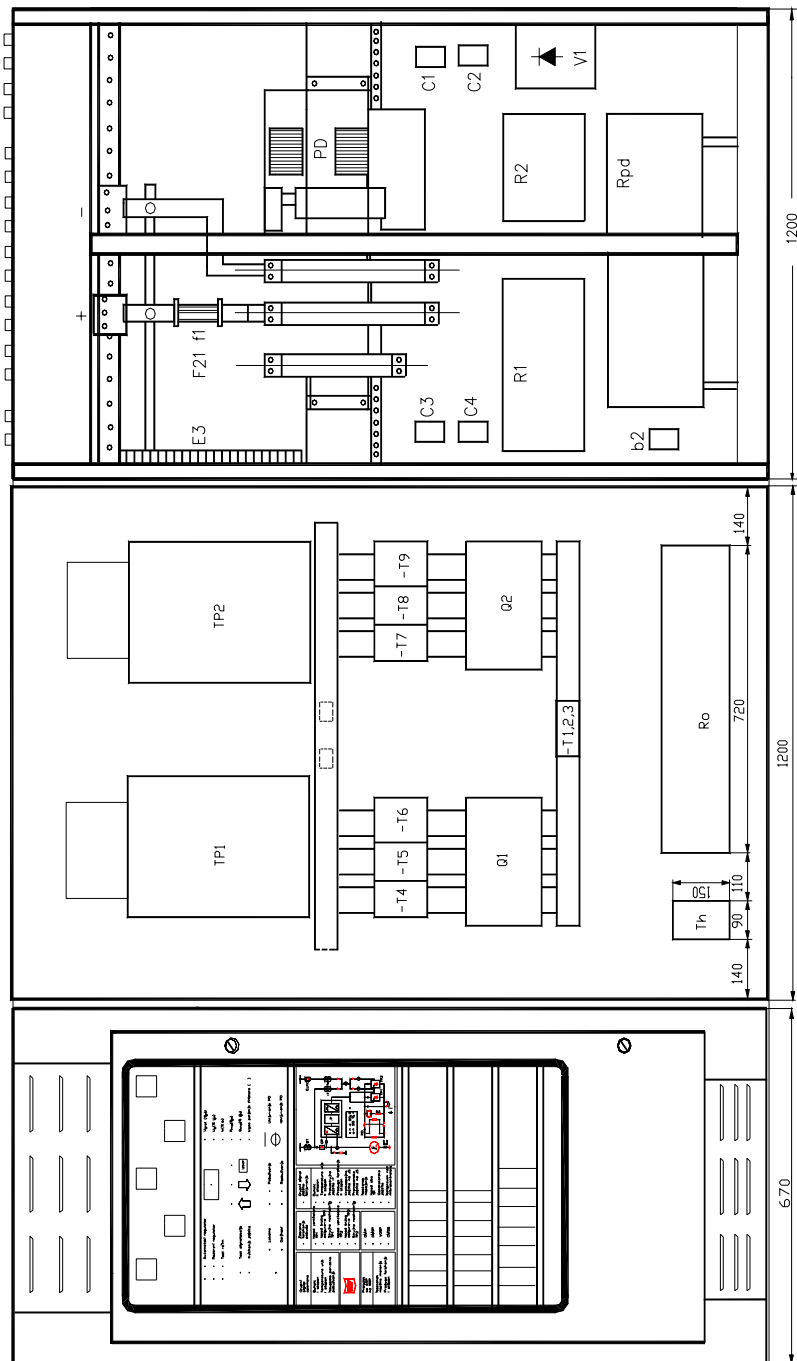
Naknadno je u sistemu pobude 2003. godine dograđena oprema za električno kočenje agregata [4]. Električno kočenje je realizovano bez dodatnog otpornika, a za napajanje sistema pobude je iskorišćen postojeći pobudni transformator. Upravljački algoritam je ostvaren proširenjem postojeće hardverske i softverske platforme digitalnog regulatora pobude.

### 2. STRUKTURA ENERGETSKOG KOLA SISTEMA POBUDE

Šema sistema regulacije pobude je odabrana tako da se pobuđivanje generatora ostvaruje u samopobudi sa početnom pobudom napojenom iz jednosmernog razvoda ili nezavisno kada su tiristorski mostovi napojeni iz mreže preko ispravljačkog transformatora. Prednost ovakve šeme sistema pobude je što omogućava sigurno pobuđivanje u svim uslovima rada. Takođe, pogon je ekonomičan zbog toga što se ispravljački transformator koristi i kao transformator za električno kočenje. Principijelna šema ovog statičkog sistema pobude data je na slici 1.

Napajanje pobudnog namotaja generatora vrši se iz uljnog pobudnog transformatora preko dva šestopulsna punoupravljava tiristorska pretvarača u paralelnom





Slika 2. Fizički razmeštaj opreme za sistem pobude u HE "Bistrica".

radu. Nesimetrično vođenje tiristora koji rade paralelno kontroliše se zaštitom od nesimetrije tiristorskih mostova. Tiristorski pretvarači imaju prinudno vazdušno hlađenje ostvareno pomoću dva ventilatora. Upravljanje energetskim pretvaračima se vrši preko 12 upravljačkih signala, koji se vode na gejtove tiristora dva ispravljačka tiristorska mosta. Upravljanje se vrši faznom regulacijom koja omogućava realizovanje kontrolisane izlazne vrednosti napona tiristorskih mostova u opsegu 0 – 540 VDC.

Početno pobuđivanje agregata je ostvareno iz razvoda akumulatorskih baterija (nakon porasta napona statora pobuđivanje preuzimaju tiristorski mostovi). Vreme trajanja početnog pobuđivanja vremenski je ograničeno. Ukoliko za to vreme nije dostignuto 80% referentne vrednosti napona praznog hoda generiše se signal opomene uz razbuđivanje sistema.

Prenaponska zaštita u jednosmernom kolu pobude generatora ostvarena je pomoću dva antiparalelna tiristora i linearnog otpornika.

Sklop za demagnetizaciju se sastoji od prekidača za demagnetizaciju koji ima dva glavna radna kontakta za prekidanje jednosmerne struje i jedan mirni kontakt za zatvaranje pobudnog namotaja preko otpornika za demagnetizaciju u isključenom stanju prekidača.

Pri električnom kočenju vrši se kratko spajanje izvoda generatora pomoću posebnog prekidača za električno kočenje (a2).

Upravljanje naponom agregata u praznom hodu vrši se u fazi sinhronizacije sa mrežom. Tada pobudni sistem prati napon mreže, čime učestvuje u procesu sinhronizacije agregata u odnosu na mrežu.

U cilju postizanja što je moguće veće brzine odziva digitalnog upravljačkog sistema i ostvarenja što direktnije kontrole upravljačkog programa nad resursima mikroprocesora, realizovan je upravljački sistem bez operativnog sistema.

### 3. DIMENZIONISANJE ENERGETSKE OPREME

Statički sistemi pobude za hidrogeneratore u HE “Bistrica“ su dimenzionisani na osnovu podataka datih u tabeli I. Rezultati proračuna i izbora opreme za statičke sisteme pobude u HE “Bistrica” dati su u tabeli II.

Tabela I. Tehnički podaci o generatorima u HE “Bistrica”.

R.b.	Nominalni parametar	Vrednost
1	prividna snaga generatora	$S_n=54$ MVA
2	napon statora generatora	$U_n=10,5$ kV
3	struja statora	$I_n=2970$ A
4	faktor snage	$\cos\phi_n=0,95$
5	frekvencija	$f_n=50$ Hz
6	sinhrona uzdužna nezasićena reaktansa	$x_d=102\%$
7	sinhrona poprečna nezasićena reaktansa	$x_q=72\%$
8	tranzijentna uzdužna nezasićena reaktansa	$x_d'=23\%$
9	otpornost namotaja statora pri 20 <sup>0</sup> C	$R_s=0,0044$ Ω
10	otpornost namotaja rotora pri 20 <sup>0</sup> C	$R_f=0,142$ Ω
11	napon pobude	$U_{fn}=162$ V
12	struja pobude	$I_{fn}=849$ A
13	napon pobude u praznom hodu	$U_{f0}=94$ V
14	struja pobude u praznom hodu	$I_{f0}=545$ A
15	faktor forsiranja po naponu	$k_{fu}=2$
16	faktor forsiranja po struji	$k_{fi}=2$

R.b.	Nominalni parametar	Vrednost
17	vremenska konstanta pri otvorenom kolu statora i sa prigušnim namotajem	$T_{do}'=5,78$ s
18	vremenska konstanta prigušnog namotaja	$T_{kd}=0,02$ s
19	tranzijentna vremenska konstanta	$T_d'=1,3$ s

Tabela II. Karakteristike energetske opreme za statičke sisteme pobude u HE "Bistrica".

R.b.	Naziv opreme	Osnovni podaci
1	pobudni transformator (uljni)	630 kVA, 10/0,42 kV/kV, 36,4/866 A/A, 50 Hz, Dyn5, $u_k=4\%$
2	tiristorski most (2 kom)	B6C 500/670-1140F-KO.17F- 6T718N16TOF, 500 VAC, 670 VDC, 1140 ADC, prinudno vazdušno hlađenje 50 lit/s
3	brzi osigurači	700 A AC, 660 V AC
4	prenap. zaštita u mostu	4,7 $\Omega$ , 78 k $\Omega$ , 10 W, 8 $\mu$ F, 850 VDC, D6A/160V
5	strujni merni transf.	1000/5 A/A, kl. 1, n=5, 30 VA, 0,6 kV, 40/5 A/A, n = 10, 30 VA, 12 kV
6	ulazni rastavljač-prek.	690 VAC, 1000 AAC
7	prekidač za gašenje polja	600 VDC, 1500 ADC, 1500 V <sub>pr</sub> , 8000 A <sub>pr</sub> , 60 ms
8	otpornik za gašenje polja	0,8 $\Omega$ , 160 A, 1300 V, 700 kW <sub>s</sub> , 0,5 s
9	prenaponska zaštita na jednosm. strani pretvarača	W1C T718N16TOFK0.17F, 0,8 $\Omega$ , 160 A, 1300 V, 700 kW <sub>s</sub> , 0,5 s
10	sklop za početno pobuđivanje	8x0,75=0,6 $\Omega$ , 60A, 220 VDC, 6x0,8=0,48 $\Omega$ , 5A, 220VDC, 150A <sub>V1</sub> , 220V <sub>V1</sub>

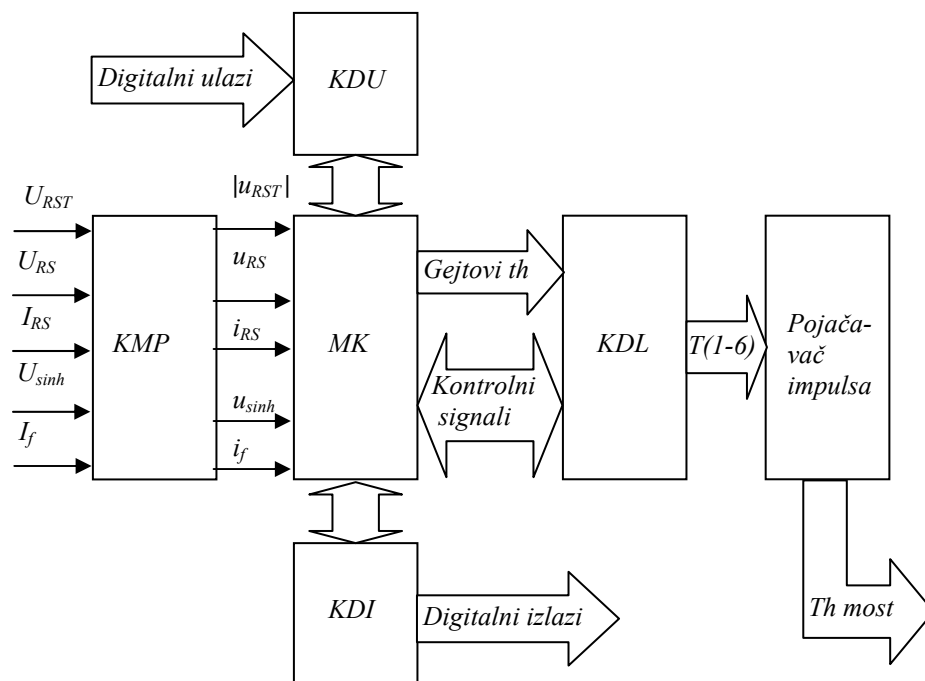
#### 4. DISPOZICIJA OPREME

Fizički razmeštaj opreme za sistem pobude dat je na slici 2. Sva oprema je smeštena u tri ormana. U prvom E1 ormanu nalazi se oprema za regulaciju, upravljanje, zaštitu, merenja i signalizaciju. U sledećem E2 ormanu smešteni su: naizmernični razvod za napajanje tiristorskih mostova, rastavljači na naizmerničnoj strani tiristorskih mostova, strujni transformatori, tiristorski mostovi sa ventilatorima i prenaponska zaštita na jednosmernim sabirnicama (antiparalelni tiristori i otpornik). Orman E3 služi za smeštaj prekidača za demagnetizaciju, otpornika za demagnetizaciju i sklopa za početno pobuđivanje.

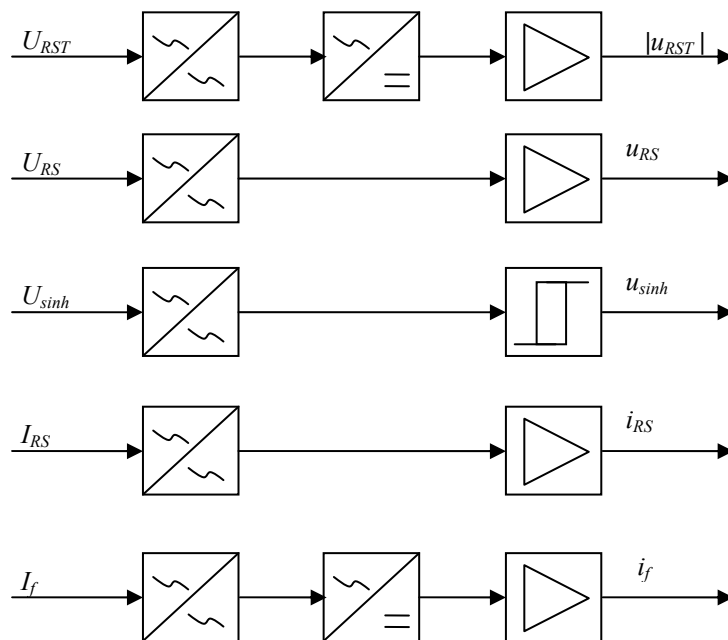
#### 5. STRUKTURA DIGITALNOG REGULATORA POBUDE

Osnovna namena *digitalnog regulatora pobude (DARP)* sastoji se u realizaciji automatske regulacije napona generatora. Pomenuta upravljačka funkcija implementirana je korišćenjem više modula, realizovanih u kombinovanoj analognoj i digitalnoj tehnici. Kompaktnost i modularnost rešenja obezbeđeni su korišćenjem mikroprocesorskih komponenti, koje povećavaju pouzdanost uređaja i omogućavaju jednostavnu izmenu i kontrolu rada upravljačkog algoritma.

Upravljačke funkcije DARP-a realizovane su korišćenjem sledećih modula: kartica mernih pretvarača (KMP), mikrokontrolerska kartica (MK), kartica digitalne logike (KDL), kartica digitalnih izlaza (KDI), kartica digitalnih ulaza (KDU). Blok šema povezivanja elektronskih kartica upravljačkog dela DARP-a data je na slici 3.



Slika 3. Blok šema upravljačke elektronike.



Slika 4. Kartica mernih pretvarača.

Blok šema *kartice mernih pretvarača* data je na slici 4. Funkcija kartice mernih pretvarača sastoji se u galvanskoj izolaciji i prilagođenju nivoa mernih signala ulaznim karakteristikama A/D konvertora. Signali  $U_{RS}$  i  $I_{RS}$  predstavljaju međufazni napon i međufaznu struju statora generatora, čija se merenja galvanski izoluju korišćenjem mernih transformatora. Signali  $U_R$ ,  $U_S$  i  $U_T$  predstavljaju fazne napone, na osnovu kojih se određuje efektivna vrednost statorskog napona generatora. Signali sa sekundara mernih transformatora se, korišćenjem odgovarajućih pojačavačkih kola, prilagođavaju naponskim nivoima mernih ulaza mikrokontrolera (dozvoljeni ulazni opseg je 0-5V).

Na ulaze A/D konvertora mikrokontrolera dovode se signali  $|u_{RST}|$ ,  $u_{RS}$  i  $i_{RS}$ , koji predstavljaju ispravljeni signal trofaznog napona, neispravljeni pretpojačani signal međufaznog napona i neispravljeni pretpojačani signal međufazne struje, respektivno. Na osnovu merenja  $|u_{RST}|$  se u mikrokontroleru određuje efektivna vrednost napona generatora, dok se pomoću  $u_{RS}$  i  $i_{RS}$  određuju trenutne vrednosti aktivne i reaktivne snage generatora.

Signal  $U_{sinh}$  predstavlja međufazni napon  $U_{RS}$ , kojim se napajaju odgovarajuće grane tiristorskog mosta. Njegovo merenje galvanski se izoluje korišćenjem mernog transformatora. Signal sa sekundara transformatora propušta se kroz Šmitovo uobličivačko kolo, čime se dobija  $u_{sinh}$  koji nosi informacije o fazi napona  $U_{RS}$ , potrebnu prilikom sinhronizacije upravljačkih signala za paljenje tiristora u mostu.

Signal  $I_f$  predstavlja trenutnu vrednost struje pobude i meri se na naizmjeničnoj strani tiristorskih mostova. Pomenuti signal se koristi za generisanje ograničenja maksimalne struje pobude i prilikom rada rezervnog regulatora pobude.

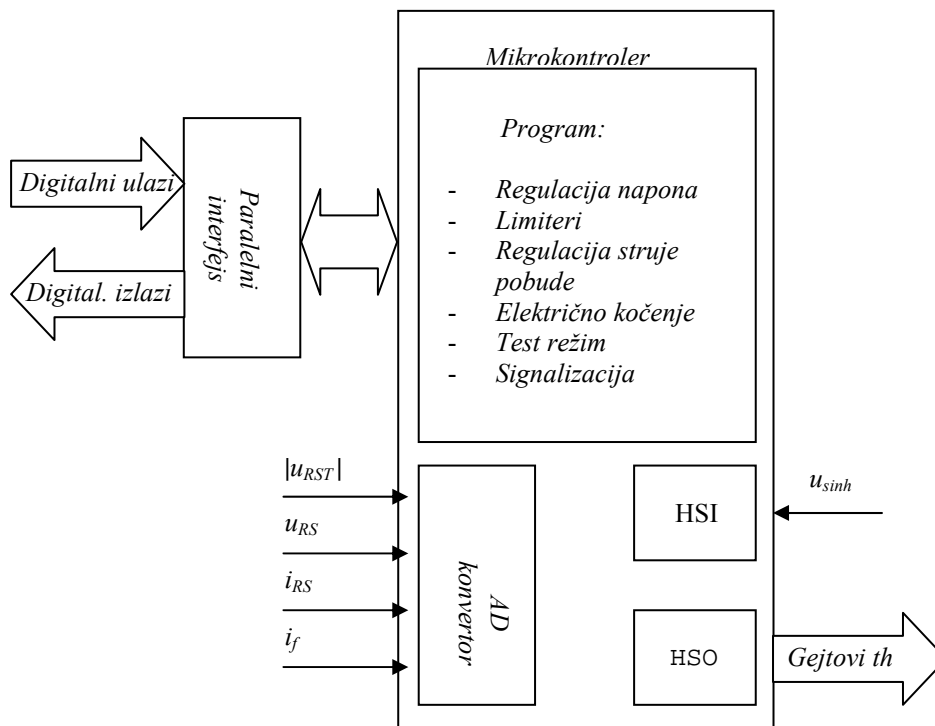
*Mikrokontrolerska kartica* MK služi za realizaciju upravljačkih funkcija pobude generatora. Upravljanje se vrši obradom ulaznih analognih i digitalnih signala, i generisanjem izlaznih upravljačkih signala za paljenje tiristora ispravljačkih mostova i za pobudu izvršnih releja. Blok šema MK data je na slici 5. Od analognih ulaznih signala mere se  $|u_{RST}|$ ,  $u_{RS}$ ,  $i_{RS}$  i  $i_f$  gde se za merenje signala koriste A/D konvertori ugrađeni u mikrokontroleru. Mikroprocesorski modul baziran je na mikrokontroleru Intel 80C196KC20. Program mikrokontrolera nalazi se u EPROM memoriji kapaciteta 32 kB, dok je radna RAM memorija modula kapaciteta 2kB. Mikrokontroler radi na radnoj učestanosti od 16 MHz. Pobudni sistem može da se veže sa nadređenim računarskim sistemom korišćenjem serijske veze.

Na rad regulatora napona, pored analognih merenja, utiču i digitalni kontrolni signali. Digitalne signale mikrokontroler čita korišćenjem perifernih portova i pomoću specijalizovanog PIA čipa. Kontrolni digitalni signali očitavaju se na tastaturi na uređaju i na kontaktima relejne signalizacije generatora. Na izlazu kartice MK generišu se analogni naponski signal  $V_{D/A}$ , koji se vodi na displej i digitalni komandni signali za paljenje tiristora, za pobudu izlaznih izvršnih releja i za signalizaciju.

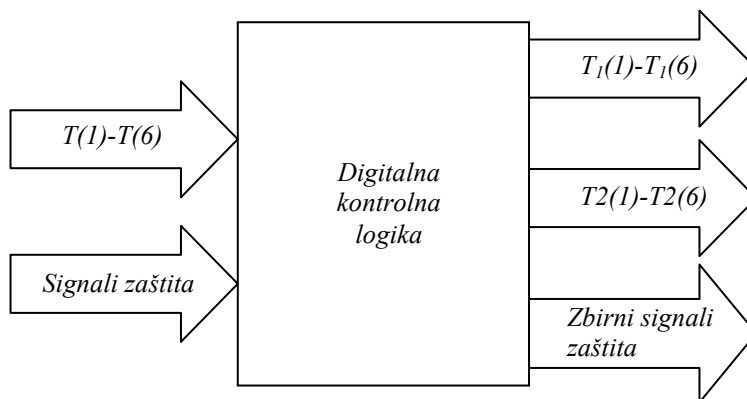
Komandni signali za paljenje tiristora, T(1)-T(6) vode se na *karticu digitalne logike* KDL. Blok šema kartice digitalne logike data je na slici 6. Osnovna funkcija modula KDL sastoji se u generisanju signala ispravnosti rada upravljačke jedinice MK, generisanju zbirnih signala zaštita i u generisanju upravljačkih signala za paljenje tiristora.

Posle obrade, zbirni komandni signali za paljenje tiristorskih mostova vode se na *pojačavač impulsa*, a zatim i na ispravljačke mostove. Signali pobude izlaznih releja vode se na *karticu digitalnih izlaza* (KDI), na kojoj se pojačavaju i služe za pobuđivanje izvršnih releja, kao i za pobuđivanje signalnih led dioda. Ova kartica je realizovana sa ukupno 40 kontaktnih izlaza.

Kartica *digitalnih ulaza* služi za očitavanje stanja kontakata signalnih releja i tastere za komandovanje na uređaju i realizovana je sa ukupno 40 ulaznih signala.



Slika 5. Funkcionalna blok šema mikrokontrolerske kartice.

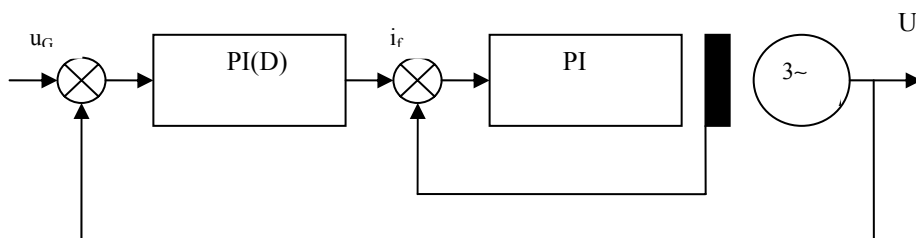


Slika 6. Blok šema kartice digitalne logike.

## 6. REGULACIONE I UPRAVLJAČKE FUNKCIJE

Regulacija statorskog napona sinhronog generatora realizovana je korišćenjem PI(D) regulacionog dejstva. Regulacija se vrši po signalu greške napona statora  $\Delta U_g$ . U uređaju je omogućeno podešavanje parametara regulacije u opsegu standardizovanih parametara  $K_p \in [10 - 100]$  pu/pu,  $T_i \in [0.1 - 5]$  s i  $T_d \in [0.01 - 0.5]$  s.  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$  su parametri proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva, respektivno. Opseg regulacije napona statora je 80-120% sa tačnošću regulacije od 0.5%.





Slika 7. Blok šema sistema regulacije pobude sinhronog generatora.

Rezervna regulacija struje rotora generatora realizovana je korišćenjem PI regulacionog dejstva. Regulacija se vrši po signalu greške struje rotora  $\Delta I_f$ . U uređaju je omogućeno podešavanje parametara regulacije u opsegu standardizovanih parametara  $K_p \in [10 - 100]$  pu/pu,  $T_i \in [0.1 - 5]$  s. Opseg regulacije rotorske struje je 0-200%, sa tačnošću regulacije od 0.5%. Blok šema sistema regulacije pobude sinhronog generatora data je na slici 7.

U regulatoru su realizovani sledeći *limiteri pobude*: (a) limiter maksimalne struje pobude, (b) limiter minimalne struje pobude, (c) limiter maksimalne struje statora, (d) vremensko ograničenje maksimalne struje pobude i (e) limiter statorskog napona. *Limiter maksimalne struje pobude* ograničava najveću moguću struju koju rotor može da izdrži u određenom vremenskom periodu, i realizovan je kao nelinearni blok koji limitira pobudu u trenutku kada se premaši zadata vrednost. *Limiter minimalne struje pobude* definisan je pravom u kapacitivnom području pogonskog dijagrama generatora. U slučaju da radna tačka generatora uđe dublje u kapacitivno područje od karakteristike limitera, sprečava se dalje smanjivanje pobude. *Limiter maksimalne struje statora* definisan je polukružnicom u pogonskom dijagramu, koja definiše parove maksimalnih vrednosti aktivne i reaktivne snage. U slučaju da tačka režima rada ode izvan zadate polukružnice, sprečava se dalji porast pobude generatora. *Limiter vremenski ograničene maksimalne struje pobude* postaje aktivan nakon forsiranja, gde se sprečava naredno forsiranje, u vremenskom periodu od 15 minuta nakon prethodnog. *Limiter statorskog napona* ograničava struju pobude u cilju onemogućenja prekomernog povećanja statorskog napona pri pobegu mašine ili drugim neregularnim režimima.

U režim forsiranja može se ući u režimu rada generatora na mreži, ukoliko napon generatora padne ispod 70 % nominalne vrednosti. U režimu forsiranja prelazi se u regulaciju po struji pobude (rezervna regulacija), gde se za referencu rotorske struje zadaje nominalna vrednost struje pobude sa faktorom 2.

U mikrokontrolerskoj kartici su, pored navedenih, programski ostvarene i upravljačke funkcije električnog kočenja. Električno kočenje sinhronog generatora se vrši pobuđivanjem sinhronog generatora sa kratko spojenim statorom. Pobuđivanje generatora se vrši tako da se u kratko spojenom statoru agregata postigne nominalna vrednost struje generatora. Trajanje procesa električnog kočenja vremenski je ograničeno. Ukoliko se u zadatom vremenskom periodu ne dostigne 1% nominalne brzine agregata, proces električnog kočenja se prekida i proces zaustavljanja se nastavlja mehaničkim kočenjem agregata do mirovanja.

Funkcije pobuđivanja i razbuđivanja realizovane su u vidu sekvencijalnog automata za praćenje relejne signalizacije i za pobuđivanje izlaznih izvršnih releja, sve u cilju ostvarivanja regularnih režima uključivanja i isključenja generatora.

Algoritam upravljanja radom pobude sinhronog generatora definisan je *sekvencijalnim automatom*, na čiji se tok može uticati preko komandnih tastatura, i

promenom stanja prekidača u pogonu sinhronne mašine. Trenutni režim rada postrojenja može se pratiti na signalizaciji, realizovanoj na sistemu pobude.

Komandne tastature i signalizacija uređaja podeljeni su na daljinsku ploču (koja se nalazi u komandnoj sali) i na lokalnu ploču (koja se nalazi u ormanu E1 pobudnog sistema). Izbor mesta sa koga se mogu zadavati komande uređaja vrši se pomoću preklopke *Lokalno/Daljinski*, koja se nalazi u ormanu E1.

Rad uređaja definisan je sa tri režima: Automatski, Rezervni i Test režim. Da bi se ušlo u bilo koji od režima rada, neophodno je da prekidač za demagnetizaciju bude uključen. Uključenje predikača za demagnetizaciju može se izvršiti istovremeno i sa lokalne i sa daljinske komande, nezavisno od izbora mesta upravljanja kao sigurnosna mera, u slučaju potrebe za trenutnim isključenjem uređaja. Izbor režima rada vrši se pritiskom na odgovarajući taster u ormanu E1. Signalizacija režima rada postoji i na lokalnoj i na daljinskoj ploči.

*Automatski režim* predstavlja realizaciju naponskog regulatora sinhronne mašine, i to je režim koji je podešen kao osnovni režim rada uređaja. Nakon uključenja prekidača za demagnetizaciju, automatski režim rada uređaja moguće je pokrenuti ako su ispunjena sledeća dva uslova: (a) ako je dostignuta brzina rotora 88% od nominalne, i (b) ako je isključen generatorski prekidač. U tom slučaju moguće je započeti pobuđivanje generatora, pritiskom na taster *Pobuđivanje* (taster postoji i na daljinskoj i na lokalnoj ploči). Pritiskom na taster *Pobuđivanje* započinje proces početnog pobuđivanja, koji traje 10 sekundi. Početno pobuđivanje može se vršiti sa nezavisnom pobudom i sa samopobuđivanjem. U nezavisnoj pobudi isključen je generatorski prekidač. Prekidač 220 kV je uključen, kako bi se preko ispravljačkog transformatora napojili ispravljački mostovi. U samopobudi isključen je prekidač 220 kV zajedno sa generatorskim prekidačem drugog generatora u HE. Generatorski prekidač generatora koji se pobuđuje mora da bude uključen kako bi se omogućilo napajanje tiristorskih mostova samopobuđivanjem sa statorskog napona pobuđene sinhronne mašine. U slučaju samopobuđivanja, početna energija za pobuđivanje generatora se dobija iz jednosmernog 220 V razvoda u HE. Ukoliko, tokom početnog pobuđivanja, napon generatora ne dostigne 80 % nominalne vrednosti, proces pobuđivanja se završava razbuđivanjem generatora, nakon čega se generiše signal opomene "Neuspelo početno pobuđivanje". Ovaj signal opomene nemoguće je kvitirati, već se njegovo poništavanje može izvršiti samo ponovnim pobuđivanjem generatora. Tokom početnog pobuđivanja referenca statorskog napona generatora je trenutna vrednost napona mreže.

Nakon uspelog početnog pobuđivanja, generator će se nalaziti u praznom hodu i vrednost statorskog napona će biti jednaka trenutnoj vrednosti napona mreže. Ukoliko postoji potreba, operator može da izvrši korekcije statorskog napona, pritiskom na tastere *više* i *niže*. Pošto je generator pripremljen u praznom hodu, moguće je izvršiti sinhronizaciju generatora na mrežu, uključenjem 220 kV prekidača. Nakon ulaska na mrežu, naponski regulator generiše signal reference koji odgovara trenutnoj vrednosti reaktivne snage, definisanoj na naponsko-reaktivnoj karakteristici (kriva statizma). U trenutku ulaska na mrežu kriva statizma prolazi kroz tačku koja odgovara trenutnoj vrednosti mrežnog napona i nultoj vrednosti reaktivne snage. Pritiskom na tastere *više* i *niže* (dok je generator na mreži) podiže se i spušta kriva statizma, što za posledicu ima povećavanje i smanjivanje reaktivne snage i napona generatora. Tokom rada generatora na mreži onemogućeno je razbuđivanje generatora i isključenje prekidača za demagnetizaciju. Ove dve funkcije je moguće izvršiti tek nakon isključenja generatorskog prekidača ili prekidača 220 kV (odnosno nakon izlaska generatora sa mreže).

Pored Automatskog režima rada, u sistemu pobude su definisani i Rezervni i Test režimi. U *Rezervni režim* može se ući automatski (u slučaju pojave odgovarajućih uslova), ili namerno, pritiskom tastera za izbor Rezervnog režima. Moguće je preći u Rezervni režim i u praznom hodu i tokom rada na mreži, ali tek nakon uspešno izvršenog početnog pobuđivanja. Prilikom rada rezervnog regulatora, vrši se direktno upravljanje strujom pobude pritiskom tastera Više i Niže, kojima se povećava ili smanjuje referenca rotorske struje.

*Test režim* predstavlja vid upravljanja, karakterističan za statičke sisteme pobude. Naime, u test režimu je moguće direktno zadavati komandu ugla paljenja tiristorskih mostova. U Test režim je moguće ući na razbuđenoj mašini sekvencijalnim isključenjem i uključenjem prekidača za demagnetizaciju. Pritiskom na tastere Više i Niže direktno se menja vrednost ugla paljenja tiriskorskog mosta (što se može pratiti na displeju u ormanu E1, ukoliko je izvršen izbor veličine Ugao paljenja, pritiskom na taster Izbor). Treba voditi računa da ugao paljenja od  $0^\circ$  odgovara maksimalnoj vrednosti napona pobude (540 V), ugao  $90^\circ$  odgovara naponu pobude od 0 V, a ugao  $120^\circ$  odgovara potpuno zatvorenom tiristorskom mostu.

Tokom rada uređaja, moguće je na displeju u ormanu E1 pratiti trenutne vrednosti merenih veličina značajnih za rad uređaja. Pritiskom na taster Izbor, u zavisnosti od diode koja svetli vrši se pregled neke od sledećih vrednosti: napon generatora, referenca napona generatora, struja pobude, aktivna snaga, reaktivna snaga i ugao paljenja tiristora u tiristorskim mostovima. Sve veličine, osim poslednje, date su u procentima u odnosu na nominalnu vrednost.

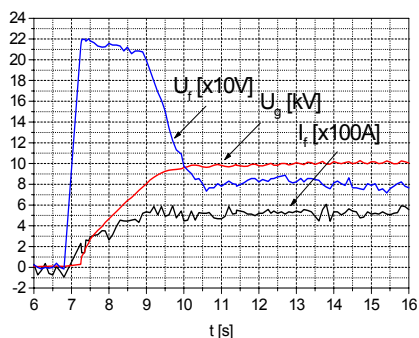
## 7. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE SISTEMA REGULACIJE POBUDE

Odzivi sistema regulacije pobude generatora A pri velikim poremećajima (pobuđivanje i razbuđivanje) u automatskoj regulaciji dati su na slikama 8 i 9. Sa slike 8 se vidi da sistem regulacije ima aperiodičan odziv sa vremenom uspona koje iznosi 2,2 s i vremenom smirenja od 3,6 s. Pri razbuđivanju generatora invertovanjem (slika 9) vremenska konstanta razbuđivanja iznosi 1,2 s, a pri razbuđivanju prekidačem za demagnetizaciju (slika 10) njena vrednost je 1,3 s. U ručnoj regulaciji prikazanoj na slici 11 sistem regulacije ima vreme uspona 2,3 s, vreme smirenja 3,7 s i vremensku konstantu razbuđivanja 1,2 s. Odziv sistema regulacije napona generatora pri malim poremećajima (step poremećaj  $\pm 10\%$ ) dat je na slici 12. Zbacivanje tereta je izvršeno pri snazi 20 MW i 20 MVAR. Uočljivo je sa slike 13 da se, posle prelaznog procesa, napon generatora smiruje na vrednošću jednako veličini napona mreže u tom trenutku.

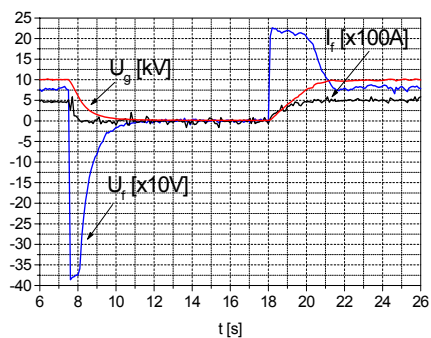
Slika 14 ilustruje rezultate proračuna vremena zaustavljanja agregata sa i bez dodatnog otpornika čija otpornost iznosi  $0.015322 \Omega$ , a snaga 405.47 kW. Vreme električnog kočenja od  $70\% n_s$  do zaustavljanja agregata pri struji generatora jednako nominalnoj sa dodatnim otpornikom iznosi 103.36 s, a bez otpornika 225.19 s. Istovremeno ukupno vreme zaustavljanja agregata uz upotrebu otpornika se smanjuje sa 280.41 s na 158.58 s. Pošto vreme zaustavljanja agregata bez otpornika nije kritično, a otpornik znatno poskupljuje rešenje, odabrano je da realizacija električnog kočenja bude bez otpornika.

Na slici 15 su prikazana ukupna vremena zaustavljanja agregata sa električnim kočenjem pri merenju (362 s), pri proračunu (386 s) i pri mehaničkom kočenju - ferodne kočnice (499 s) pri početku kočenja od  $30\% n_s$  i struji kočenja od  $88\% I_n$ .

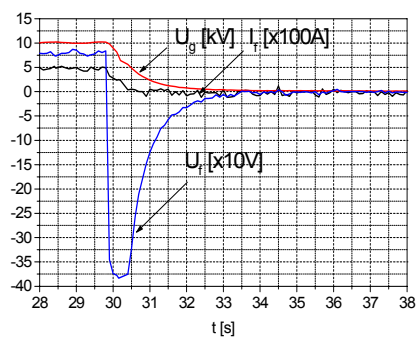
Poredeći rezultate dobijene merenjem pri mehaničkom i električnom kočenju pri početku kočenja od iste brzine dobije se da je trajanje električnog kočenja 2.14 puta kraće od trajanja mehaničkog kočenja.



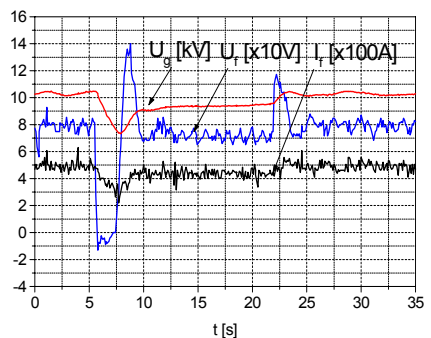
Slika 8. Pobuđivanje generatora A pri automatskoj regulaciji.



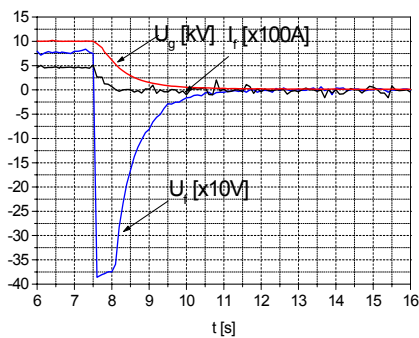
Slika 11. Razbuđivanje i pobuđivanje generatora A u ručnoj regulaciji.



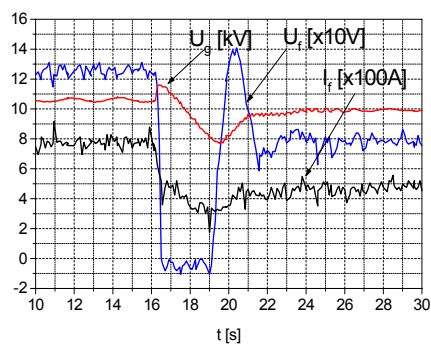
Slika 9. Razbuđivanje generatora A invertovanjem pri automatskoj regulaciji.



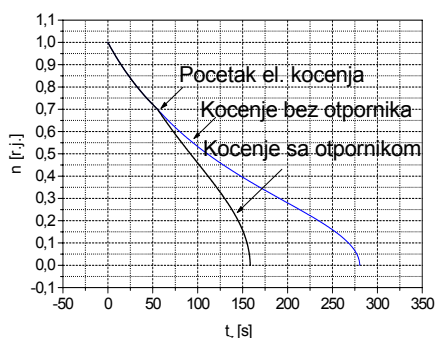
Slika 12. Step poremećaj na generatoru A pri automatskoj regulaciji.



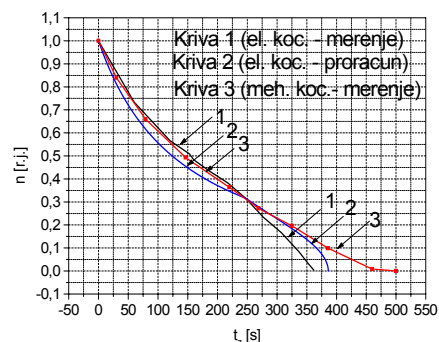
Slika 10. Razbuđivanje generatora A prekidačem za demagnetizaciju.



Slika 13. Zbacivanje tereta generatora A sa 20 MW i 20 MVar.



Slika 14. Zaustavljanje agregata pri električnom kočenju od  $n_k=0.7n_s$  i  $I_k=1.0I_n$ .



Slika 15. Zaustavljanje agregata pri električnim i mehaničkim kočenjem.

## 8. ZAKLJUČAK

Razvoj i primena savremenih tehničkih i tehnoloških rešenja dovela je i u oblasti elektroenergetike do realizacije fleksibilnih uređaja koji omogućavaju realizaciju širokog spektra regulacionih, upravljačkih i zaštitnih funkcija. Jedan od takvih kompleksnih uređaja je i tiristorski sistem pobude sa digitalnim mikroprocesorskim regulatorom i električnim kočenjem koji je razvijen i primenjen na dva agregata u HE "Bistrica".

Energetski deo sistema pobude je sastavljen od dva tiristorska pretvarača, prekidača za demagnetizaciju, prenaponske zaštite na jednosmernoj strani tiristorskih mostova i uljnog pobudnog transformatora. Ugrađena oprema je najkvalitetnije rešenje poznatih svetskih i domaćih proizvođača pojedinačnih komponenti.

Za regulacioni i upravljački deo sistema pobude razvijen je i napravljen mikroprocesorski regulator pobude na bazi INTEL-ovog procesora 80C196KC20. U mikroprocesoru je realizovano i fazno upravljanje tiristorskim pretvaračima. Regulator poseduje 5 analognih i 40 digitalnih ulaza, kao i 12 PWM i 40 digitalnih izlaza.

Električno kočenje je ostvareno kao nadgradnja već urađenom sistemu pobude. Urađeno je bez dodatnog otpornika i bez dodatnog transformatora za električno kočenje zahvaljujući pogodnoj postojećoj koncepciji napajanja u statičkom sistemu pobude.

Razvoj i praktična primena ovakvog jednog uređaja korišćenjem znanja domaćih stručnjaka ostvarene su višestruke uštede u investiranju i njegovom kasnijem održavanju.

## LITERATURA

- [1] Z. Ćirić, I. Stevanović, Đ. Stojić, J. Dragosavac, S. Josifović, *Tiristorski sistem pobude za sinhronne generatore A i B snage 54 MVA u HE "Bistrica"*, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2001.
- [2] Z. Ćirić, I. Stevanović, Đ. Stojić, "Dimenzionisanje energetske opreme za statičke sisteme pobude", 26. *Savetovanje JUKO CIGRE*, Teslić, 2003, R11-05.
- [3] Đ. Stojić, Z. Ćirić, I. Stevanović, "Digitalni automatski regulator pobude sinhronog generatora", *Elektroprivreda*, 2003/4.

- [4] I. Stevanović, Z. Ćirić, Đ. Stojić, “Određivanje osnovnih pokazatelja kvaliteta elektrodinamičkog kočenja hidrogeneratora”, 26. *Savetovanje JUKO CIGRE*, Teslić, 2003, R11-04.

**Abstract:** In this paper, the static excitation systems implemented on two generators in hydropower plant “Bistrica” are described. The structure of the excitation system is presented, together with the additional equipment used for the electric braking of generator. Realization of the first domestic microprocessor’s automatic voltage regulator is described in detail, including all implemented hardware and control functions. In addition, the responses of excitation system for the small and large disturbance experiments are presented.

**THYRISTOR’S EXCITATION SYSTEM WITH ELECTRICAL BRAKING  
AND DIGITAL AUTOMATIC REGULATOR IN HYDROPOWER PLANT  
“BISTRICA”**

Ilija Stevanović, Đorđe Stojić, Zoran Ćirić