

## IZRADA I PUŠTANJE U POGON STATIČKIH SISTEMA POBUDE SINHRONIH GENERATORA U HE "BOČAC"

Zoran Ćirić, Đorđe Stojić, Nemanja Milojević, Milan Milinković, Dušan Joksimović,  
Dušan Arnautović

*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Kratak sadržaj:** U radu je opisana izrada i puštanje u pogon sistema pobude sinhronih generatora sa električnim kočenjem u HE "Bočac" u okviru remonta agregata 2009. godine. Predstavljene su osnovni parametri sistema pobude, opisan je energetska deo, regulacija sistema pobude, upravljanje tiristorima, algoritam električnog kočenja agregata, akvizicioni sistem, zaštite, upravljanje, merenja i signalizacija. Prikazani su osnovni dinamički odzivi relevantni za rad sistema pobude.

**Ključne reči:** pobudni sistem, tiristorski most, električno kočenje, digitalni automatski regulator pobude

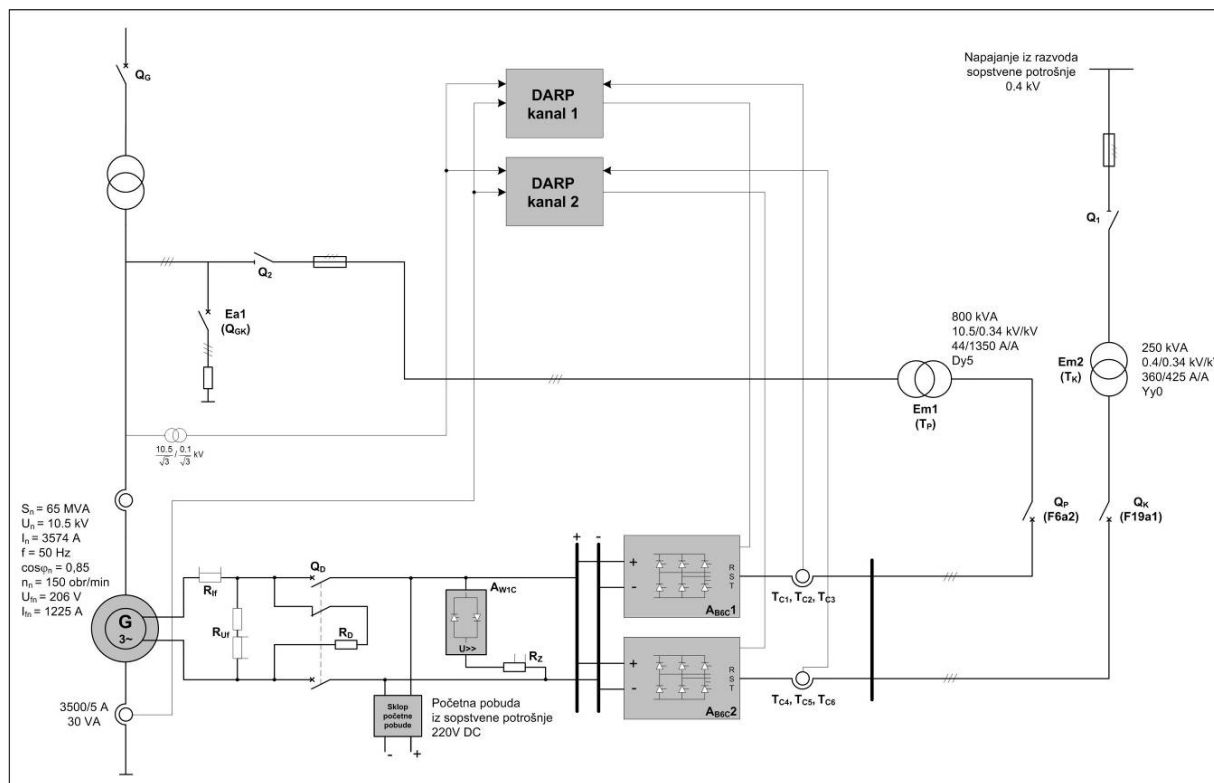
### 1. UVOD

Postojeći sistemi pobude generatora G1 i G2 u HE "Bočac", čija je zamena predmet projekta o kome je reč u ovom radu, su statički sistemi pobude sa analognim regulatorima pobude i realizovanim električnim kočenjem agregata. Izgled starog sistema pobude generatora G1 je prikazan na slici 1. Regulator pobude je analogni jednokanalni, a glavni energetska deo sistema pobude sačinjavaju tri punoupravljljiva, prinudno hladena tiristorska mosta koji rade paralelno.



Slika 1. Stari sistem pobude generatora G1

Izrada novih sistema pobude obuhvata zamenu razvodnih ormara sistema pobude sa kompletnom upravljačkom i energetska opremom. Kao sistem za monitoring sistema pobude implementiran je digitalni sistem akvizicije digitalnih i analognih signala. Jednopolna šema novog sistema pobude data je na slici 2.



Slika 2. Blok šema sistema pobude generatora G1 i G2 u HE "Bočac"

## 2. OSNOVNE FUNKCIJE SISTEMA POBUDE

Sistem pobude obezbeđuje sledeće funkcije:

- napajanje pobudnog namotaja (namotaja rotora) sinhronog generatora potrebnom pobudnom strujom u svim dozvoljenim režimima rada generatora,
- automatska regulacija napona na izvodima u svim režimima rada generatora uz kompenzaciju po reaktivnom opterećenju, odnosno regulacija napona generatora po naponsko-reaktivnoj karakteristici sa podešenim statizmom regulacije,
- automatsko ograničenje rada generatora u oblasti dozvoljenih termičkih napreznja statora i rotora prema pogonskoj karti sinhronog generatora,
- ručna regulacija struje pobude,
- automatski prelaz sa automatske na ručnu regulaciju pobude,
- test režim,
- automatski prelaz sa jednog na drugi pobudni kanal,
- forsiranje pobude sa zadatim koeficijentima forsiranja po naponu i po struji pobude, pri sniženju napona na sabirnicama generatora usled poremećaja u sistemu,
- razbuđivanje generatora invertovanjem tiristora pri normalnom zaustavljanju,
- gašenje polja generatora u havarijskim režimima prekidačem za demagnetizaciju,
- mogućnost uvođenja dodatnih regulacionih i upravljačkih funkcija (grupna regulacija pobude),
- lokalno i daljinsko upravljanje sistemom pobude (iz komandne sale elektrane),
- zaštite,
- merenja (napona generatora, struje generatora, struje i napona pobude),
- signalizacija (na lokalnom i daljinskom nivou)

## 3. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SISTEMA POBUDE

Sistem pobude ima sledeće osnovne parametre:

- |   |                |
|---|----------------|
| • Nominalna pobudna struja generatora:                        | 1225 A         |
| • Nominalni pobudni napon generatora:                         | 206 V          |
| • Napon napajanja tiristorских mostova:                       | 340V, 50Hz     |
| • Opseg podešenja napona generatora u praznom hodu:           | 85% - 115%     |
| • Opseg podešenja statizma naponsko-reaktivne karakteristike: | -10% - +10%    |
| • Koeficijent forsiranja po struji:                           | 1,6            |
| • Dozvoljeno vreme trajanja forsiranja:                       | < 20s          |
| • Maksimalna pobudna struja generatora u režimu forsiranja:   | 1960 A         |
| • Pobudni napon generatora u režimu forsiranja:               | 330 V          |
| • Jednosmerni napon napajanja sopstvene potrošnje:            | 220 V          |
| • Invertorski napon napajanja sopstvene potrošnje:            | 230 V          |
| • Naizmenični napon napajanja sopstvene potrošnje:            | 3 x 400 V/50Hz |

Izgled novougrađenog sistema pobude prikazana je na slici 3.



*Slika 3. Sistem pobude generatora G1*

#### 4. OPIS I KARAKTERISTIKE ELEMENATA SISTEMA POBUDE

##### 4.1. Prekidači $Q_P$ i $Q_K$

Na naizmjeničnoj strani energetskeg dela sistema pobude se nalaze prekidači  $Q_P$  i  $Q_K$ . Prekidač  $Q_P$  se nalazi na naizmjeničnom dovodu ka energetskeg delu sistema pobude i služi za napajanje tiristorskih mostova u redovnom pogonu sa sekundara pobudnog transformatora Em1. U režimu električnog kočenja agregata napajanje tiristorskih mostova sa pobudnog transformatora se ukida isključenjem prekidača  $Q_P$ , a uključuje se prekidač  $Q_K$  i napajanje na tiristorske mostove se dovodi preko transformatora za električno kočenje Em2. Komandovanje ovim prekidačima (preko ugrađenih kalema za uključenje i isključenje) je automatsko iz PLC-a za kontrolu procesa električnog kočenja, a mogućnost istovremenog automatskog uključjenja je onemogućena. Prekidači su izvlačivi i poseduju motorne pogone za navijanje opruge za uključjenje kao i zaštitni modul sa podešenjem zaštite od preopterećenja i kratkog spoja. U TEST režimu rada sistema pobude ovim prekidačima se manipuliše ručno prema odgovarajućoj proceduri za rad u TEST režimu.

Osnovni podaci ovih niskonaponskih kompaktnih prekidača su:

- Nominalna struja: 1250 A
- Nazivni napon: 690V, 50Hz
- Prekidna moć (415 V),  $I_{cu}$ : 65 kA
- Prekidna moć (1 s),  $I_{cw}$ : 55 kA
- Podešenje termičke zaštite: 1250 A
- Podešenje kratkospojne zaštite: 5000 A



*Slika 4. Prekidači QP i QK u ormaru naizmjeničnih dovoda*



*Slika 5. Tiristorski most, naizmjenični dovod i jednosmerni odvod*

Tiristorski mostovi (slika 5.) predstavljaju izvršni organ u regulaciji pobude generatora. Promenom ugla upravljanja tiristora od strane regulatora regulišu se napon i struja pobude generatora, a posredno i statorski napon generatora.

Ugrađena su dva tiristorska mosta kao nezavisne celine, svaki tiristorski most u okviru svog pobudnog kanala sistema pobude. Pobudni kanal sistema pobude čine jedan tiristorski most i jedan digitalni automatski regulator pobude. Ovakva izvedba pobudnog sistema sa dva nezavisna pobudna kanala je u cilju povećanja pouzdanosti rada čitavog pobudnog sistema. U slučaju kvara ili problema na bilo kom od dva pobudna kanala vrši se automatski prelazak na drugi pobudni kanal koji je u režimu praćenja aktivnog kanala.

Tiristorski mostovi su trofazni, punoupravljivi sa mogućnošću rada u ispravljačkoj i invertorskoj oblasti. Mostovi su dimenzionisani tako da jedan most može da zadovolji sve potrebne režime rada sistema pobude, uključujući i forsiranje pobude pri havarijskim režimima sa unapred definisanim koeficijentom forsiranja.

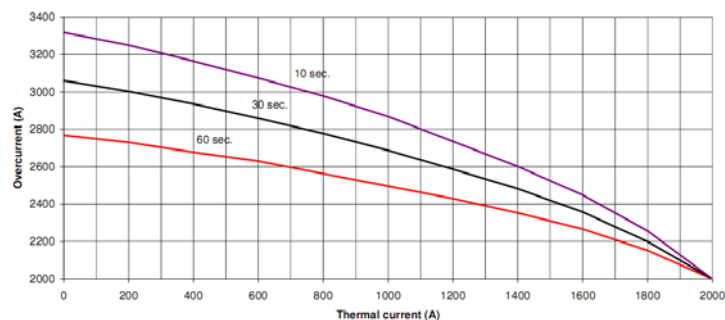
Osnovni podaci tiristorskih mostova su:

- Nominalni napon: 340 V  $\pm$  10 %
- Nominalna struja: 1890 A

Sastavni delovi tiristorskog mosta su: tiristor (6 kom.) , brzi osigurač 1400A / 690V / 200kA / 370kA<sup>2</sup>s (6 kom.), RC zaštita (3 kom.) 51 $\Omega$ /200W i 0.22 $\mu$ F/1200V AC, sklop ventilatora (1 kom.), termički prekidač (3 kom.) NC/95°C

Za merenje struja na naizmjeničnoj strani tiristorskog mosta koriste se tri strujna transformatora 1500/5 A, 20VA, kl.0.5

Karakteristike preopterećenja tiristorskog mosta za temperaturu ambijenta 40°C su date na slici 5. Sa slike se vidi da je za nominalnu struju pobude generatora  $I_{fn} = 1225$  A, moguće kratkotrajno preopterećenje od približno 2700A u trajanju 10 sec.



Slika 5. Karakteristika preopterećenja tiristorskog mosta

Preko glavnih radnih kontakata prekidača za demagnetizaciju  $Q_D$  se prenosi jednosmerna struja ka pobudnom namotaju generatora. Mirni kontakt prekidača za demagnetizaciju služi da se preko njega pri brzom razbuđivanju paralelno pobudnom namotaju, pre isključenja glavnih radnih kontakata, poveže nelinearni otpornik za demagnetizaciju  $R_D$  (slika 6). To sprečava pojavu prenapona pri prekidu pobudne struje koja prolazi kroz veliku induktivnost pobudnog namotaja.

Osnovni podaci prekidača za demagnetizaciju sistema pobude generatora G1 su:

- Nominalna struja,  $I_{th}$ : 1500 A
- Nominalni napon,  $U_e$ : 600 V DC

Osnovni podaci prekidača za demagnetizaciju sistema pobude generatora G2 su:

- Nominalna struja,  $I_{th}$ : 2000 A
- Nominalni napon,  $U_e$ : 1000 V DC



Slika 6. Prekidač i otpornik za demagnetizaciju generatora G1



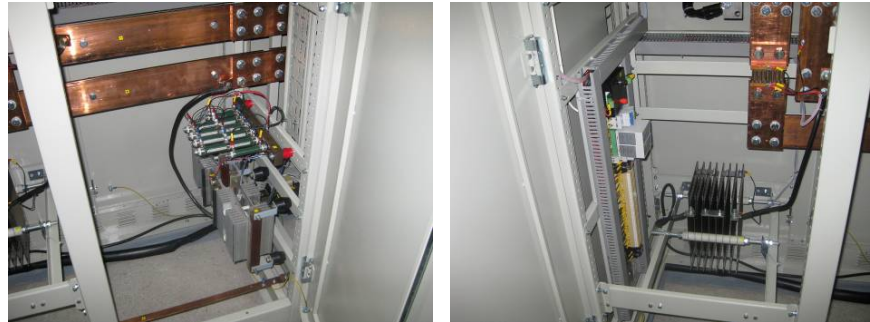
Slika 7. Sklop početne pobude

Davanjem naloga za pobuđivanje aktivira se sklop početne pobude, prikazan na slici 7, kojeg čine: kontaktor, dioda i otpornik za ograničenje struje pri početnom pobuđivanju.

Prenaponska zaštita deluje na isključenje sistema pobude i brzo razbuđivanje generatora u slučajevima pojave prenapona na pobudnom namotaju usled poremećaja na strani statora i ispada iz sinhronizma generatora. Odrada prenaponske zaštite je podešena na 1200 V. Sklop prenaponske zaštite je prikazan na slici 8 i njega čine:

- Blok antiparalelnih tiristora
- Naponski razdelnik 4 x 1k $\Omega$  / 2 x 50 $\Omega$
- Izvršno rele prenaponske zaštite

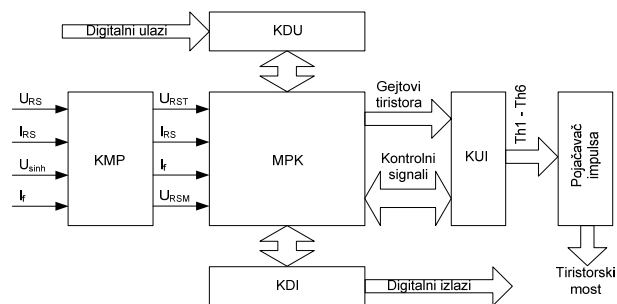
- Elektronska kartica za prenaponsku zaštitu
- Otpornik za prenaponsku zaštitu



Slika 8. Sklop prenaponske zaštite pobudnog namotaja

### Regulator pobude

Upravljanje sistemom pobude realizovano je u okviru digitalnog regulatora pobude, kojim upravlja DSP mikrokontroler. Blok šema sistema pobude je predstavljena na slici 9. Mikrokontroler omogućava objedinjavanje širokog spektra upravljačkih funkcija, funkcija zaštite, merenja i signalizacije. U cilju povećanja pouzdanosti rada digitalnog regulatora pobude koriste se dva digitalna regulatora pobude sa identičnim funkcijama pri čemu je jedan u radu, a drugi je rezerva. Sistem je realizovan modularno, čime je povećana pouzdanost uređaja i olakšan proces održavanja pogona u eksploataciji.



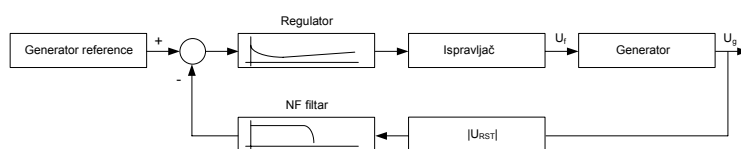
Slika 9. Blok šema regulatora pobude

Osnovni elementi koji čine regulator pobude su:

- Kartice napajanja regulatora,
- Kartice mernih pretvarača (KMP),
- Kartica digitalnih ulaza (KDU),
- Mikroprocesorska kartica (MK),
- Panel regulatora sa komandnom tastaturom, displejem i drugim signalnim elementima,
- Kartica digitalnih izlaza (KDI),
- Kartica upravljačkih izlaza (KUI).

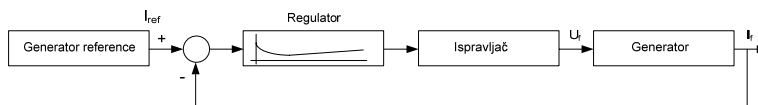
U okviru programa mikroprocesora realizovane su sledeće funkcije: pobuđivanje i razbuđivanje generatora, automatska regulacija po naponu generatora i prema podešenoj naponsko-reaktivnoj karakteristici, rezervna regulacija po struji pobude generatora, praćenje aktivnog kanala regulatora, forsiranje, test režim, limiteri pobude i upravljanje i signalizacija na panelu regulatora.

Automatska regulacija napona generatora (slika 10) uz kompenzaciju reaktivne snage se vrši pomoću PID upravljačkog zakona, pri čemu se referenca napona određuje na osnovu podešene naponsko-reaktivne karakteristike. Nagib ove karakteristike se menja promenom statizma regulacije na panelu regulatora. Zadavanjem komandi VIŠE ili NIŽE naponsko-reaktivna karakteristika se pomera na više ili na niže.



Slika 10. Šema regulacione konture u režimu automatske regulacije

Rezervna regulacija struje pobude generatora (slika 11) se vrši po PI upravljačkom zakonu. U režim rezervne regulacije se može ući ručno sa panela regulatora ili automatski usled gubitka signala merenja napona statora generatora. Zadavanjem komandi VIŠE ili NIŽE menja se referenca struje pobude.



Slika 11. Šema regulacione konture u režimu rezervne regulacije

U okviru regulatora pobude realizovani su sledeći limiteri: limiter maksimalne struje pobude, limiter minimalne struje pobude i limiter maksimalne struje statora. Limiter maksimalne struje pobude sprečava povećanje struje pobude iznad podešene vrednosti, koja je određena trajno dozvoljenom strujom rotora. Limiter minimalne struje pobude sprečava smanjenje struje pobude ispod vrednosti određene pogonskim P-Q dijagramom generatora u kapacitivnom režimu rada. Limiter maksimalne struje statora smanjuje struju pobude u slučaju da se radna tačka nađe van pogonskog P-Q dijagrama generatora.

## 5. OPIS PROCESA ELEKTRIČNOG KOČENJA

Proces električnog kočenja agregata započinje kada brzina agregata padne ispod 50% nominalne brzine pri normalnom zaustavljanju. U slučaju zaustavljanja delovanjem električnih zaštita dolazi do isključenja prekidača za demagnetizaciju i samim tim je električno kočenje onemogućeno.

Algoritam procesa električnog kočenja se sastoji od sledećih koraka:

1. Proveravaju se uslovi za otpočinjanje električnog kočenja (prekidač QD uključen, generatorski prekidač isključen, sprovodni aparat zatvoren, brzina agregata manja od 50% nominalne)



2. Priprema rasklopne opreme za proces električnog kočenja (isključenje  $Q_P$ , uključenje  $Q_K$ , uključenje prekidača za formiranje kratkog spoja na izvodima generatora  $Q_{GK}$ )
3. Blokada mehaničkih kočnica i blokada diferencijalne zaštite generatora
4. Pobuđivanje generatora na vrednost pobudne struje koja odgovara približno nominalnoj vrednosti struje statora generatora
5. Kada brzina agregata opadne ispod 2-3% nominalne brzine vrši se razbuđivanje, deblokiraju se mehaničke kočnice kao i diferencijalna zaštita generatora
6. Vršiti se vraćanje rasklopne opreme u stanje za normalni pogon agregata i novo pokretanje (uključenje  $Q_P$ , isključenje  $Q_K$ , isključenje prekidača  $Q_{GK}$ )
7. Kada se agregat zaustavi gasi se napajanje PLC-a i sistem pobude ostaje spreman za novo pokretanje agregata

U slučaju da pre, u toku i nakon otpočinjanja procesa električnog kočenja dođe do nekih problema koji onemogućavaju električno kočenje izdaje se signal "Električno kočenje NEUSPEŠNO" i deblokiraju se mehaničke kočnice.

U toku električnog kočenja realizovana je dodatna prekostrujna zaštita transformatora Em2 za električno kočenje.

## 6. OPIS SISTEMA AKVIZICIJE ANALOGNIH I DIGITALNIH SIGNALA U SISTEMU POBUDE

Glavni delovi sistema akvizicije signala su:

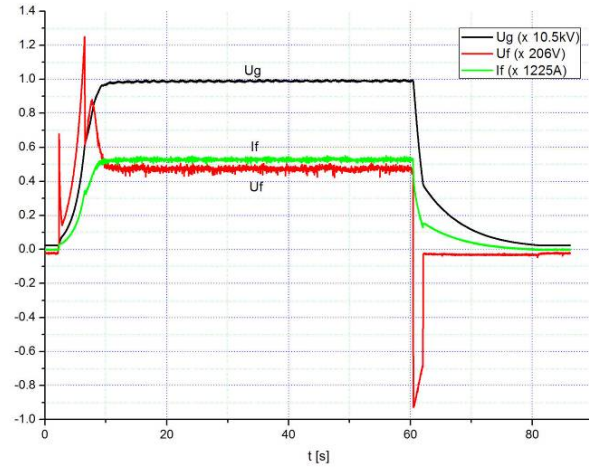
- Industrijski Panel-PC računar sa ekranom osetljivim na dodir sa aplikativnim softverom za prikaz signala iz sistema pobude
- Akviziciono kućište sa USB interfejsom cDAQ-9172
- Akvizicioni modul za prihvatanje 8 analognih strujnih signala u opsegu  $\pm 20\text{mA}$  - cDAQ-9203 (2 kom)
- Akvizicioni modul za prihvatanje 32 digitalna signala je naponskog nivoa 24V DC cDAQ-9425 (2 kom)
- Merni pretvarači za galvansko odvajanje i prilagođenje analognih signala sistemu akvizicije

Aplikativni softver sistema za akviziciju je razvijen u razvojnom okruženju LabView. Komunikacija sa korisnikom je omogućena preko ekrana osetljivog na dodir panel PC računara. Softver za akviziciju omogućava grafički prikaz trenutnih ili efektivnih vrednosti faznih napona i struja generatora kao i struja pobude, napone i struje pobude generatora kao i aktivnu, reaktivnu i prividnu snagu generatora.

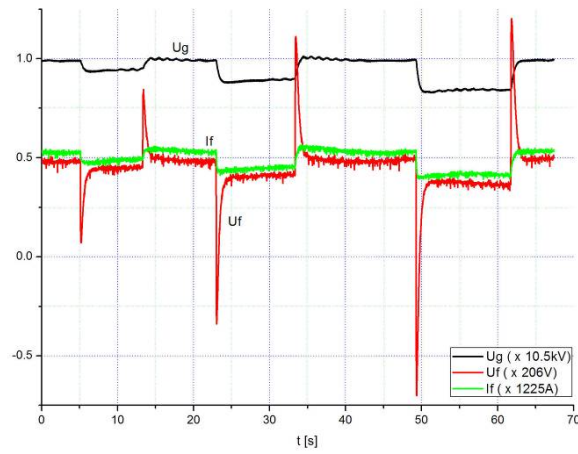
Digitalni signali se prikazuju u obliku hronološke liste događaja. Ova lista se snima u fajl koji je moguće otvoriti u bilo kom programu za tabelarni prikaz radi kasnije analize. Softver za akviziciju omogućava i snimanje svih analognih veličina, sa frekvencijom odabiranja od 1kHz, u poseban fajl pri pojavi tzv. triger. Triger može da aktivira promena vrednosti neke od analognih veličina iznad podešenog parametra trigerovanja ili promena nekog od predefinisanih digitalnih signala.

## 7. DINAMIČKI ODZIVI SISTEMA POBUDE

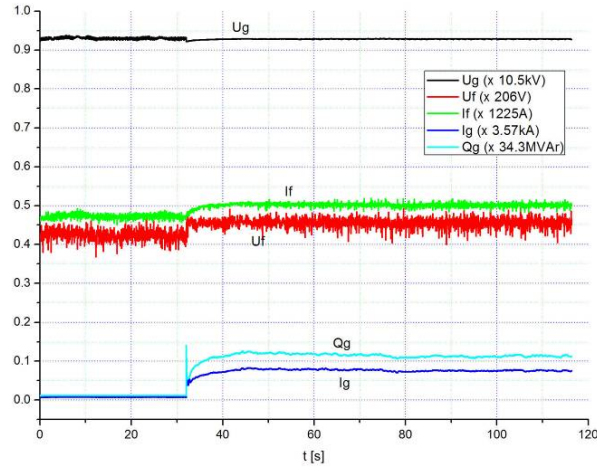
Na slikama koje slede su prikazani snimci dinamičkih odziva sistema pobude generatora G1 načinjeni u toku puštanja sistema pobude u pogon i probni rad.



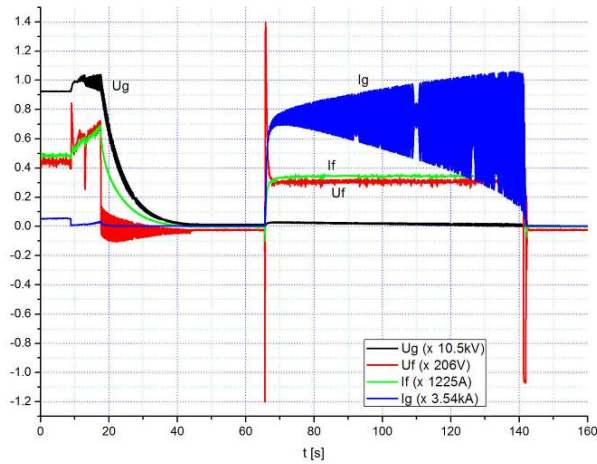
Slika 12. Pobuđivanje i razbuđivanje generatora u automatskom režimu rada pobude



Slika 13. Step poremećaj 5%, 10% i 15% u naponu generatora u automatskom režimu regulacije pobude



Slika 14. Odziv sistema pobude pri sinhronizaciji generatora na mrežu



Slika 15. Normalno zaustavljanje agregata sa električnim kočenjem

## 8. ZAKLJUČAK

Zamenom postojećih sistema pobude sa analognim regulatorom pobude, novim sistemima sa digitalnim regulatorom pobude povećana je pouzdanost rada sistema pobude implementacijom konfiguracije sa potpunom redundacijom kako u regulacionom tako i u energetsom delu sistema pobude. Novougrađeni sistem pobude pruža visoku fleksibilnost u smislu budućih redovnih ispitivanja i održavanja. Akvizicioni sistem koji je uveden kao

bitna novina u odnosu na stari pobudni sistem pruža mogućnost kontinualnog praćenja i dijagnostikovanja stanja sistema pobude.

#### LITERATURA

- [1] D.B. Arnautović, Z.N. Ćirić, Đ.M. Stojić, D.S. Joksimović i N.S. Miložčić - "Modernizacija, rekonstrukcija i razvoj statičkih sistema pobude generatora", Elektrane 2008 - Vrnjačka Banja, 2008.
- [2] Ćirić, Z. N., Stojić, Đ. M., Joksimović, D. S., Miložčić, N. S., Arnautović, D. B. - Rekonstrukcija sistema pobude bloka 4 u "Nikola Tesla A", Institut "Nikola Tesla", Proceedings Vol. 18, str.125-142, Beograd, 2007.
- [3] А. А. Бурмистров, А. Г. Логинов, В .А. Хлямов, Сборник Електросила - Выбор параметров регулятора напряжения и системного стабилизатора по частотным характеристикам, 2001.
- [4] Ćirić Z., Janković M., Stevanović I., Arnautović D., Kostić S., Mitić M.: Dogradnja električnog kočenja za generatore G1 i G2 u HE "Pirof", 27. savetovanje YUKO CIGRE, Zlatibor, 2005.
- [5] IEC 34-1: Rotating electrical machines, Geneve, Suisse, 1983.

**Abstract:** Manufacturing and commissioning of the excitation systems with electrical braking for synchronous generators in HPP "Bocac", which were performed in the time of machine repair in 2009, are described in this paper. The main parameters of excitation system, exciter, voltage regulator, thyristor ignition, electrical braking algorithm, data acquisition system, protection functions, measurements and signaling are described. Dynamic responses recorded at the time of system set-up, which are relevant for excitation system work are presented.

**Key words:** *excitation system, thyristor bridge, electrical braking, digital automatic voltage regulator*

#### MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF STATIC EXCITATION SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS GENERATORS AT HPP "BOČAC"

Zoran Ćirić, Đorđe Stojić, Nemanja Miložčić, Milan Milinković, Dušan Joksimović,  
Dušan Arnautović  
*Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade*