

## OGRANIČENJA RADA SINHRONOG GENERATORA POMOĆU LIMITERA U AUTOMATSKOM REGULATORU POBUDE

Jasna Dragosavac, dipl.ing, Mr Ilija Stevanović, dipl.ing,  
Zoran Čirić, dipl.ing, Dr Dušan Arnautović, dipl.ing,  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

**Sadržaj:** Obzirom na potrebe elektroenergetskog sistema, sinhroni generatori često rade u režimima koji se razlikuju od nominalnih. Stoga automatski regulator pobude mora biti projektovan tako da omoguću pouzdan rad generatora u čitavom području pogonskog dijagrama i to u stacionarnom i dinamičkom stanju. Zbog toga se automatski regulator pobude oprema dodatnim jedinicama - limiterima, koji onemogućavaju rad generatora izvan definisanog područja.

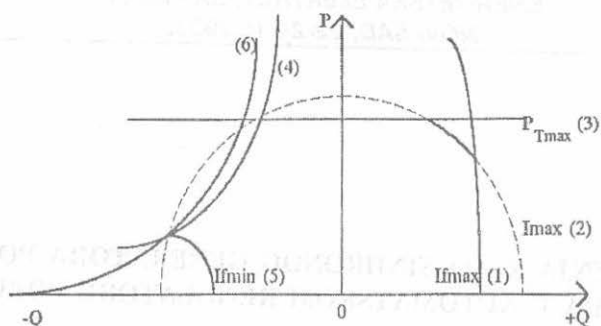
U ovom radu dat je opis limitera koji se danas koriste u elektranama u Jugoslaviji, kao i kriterijumi za njihovo podešenje. Posebna pažnja je posvećena limiterima ugrađenim u automatski regulator pobude sa tranzistorskim izlaznim stepenom za hidrogeneratore male snage, njihovom izboru, praktičnom podešenju i postignutim zaštitnim karakteristikama. Konkretni rezultati dati su za ugrađeni automatski regulator pobude na generatoru u HE "Ovčar Banja".

**Ključne reči:** pobudni sistem / automatski regulator pobude / limiteri / statička stabilnost EES-a.

### 1. UVOD

Osnovna funkcija automatskog regulatora pobude je da održava zadati napon generatora. Savremeni elektronski regulatori pobude imaju realizovane i dodatne funkcije, pomoću posebnih jedinica u regulatoru, koje se nazivaju limiterima. Limiteri predstavljaju važne elemente u savremenim pobudnim sistemima. Oni ograničavaju vrednosti pojedinih promenljivih sistema na unapred zadate vrednosti. Kada neka od ovih promenljivih premaši unapred određenu vrednost, izlazni signal iz regulatora pobude dominantno je određen vrednošću izlaznog signala iz odgovarajućeg limitera. Na taj način oni znatno doprinose kvalitetnijem i ekonomičnijem radu elektroenergetskog sistema (EES) jer sprečavaju nepotrebne prekide u radu sinhronih generatora usled dejstva odgovarajućih zaštitnih uređaja. Savremeni pobudni sistemi imaju značajnu ulogu u poboljšanju statičke i dinamičke stabilnosti EES-a. To podrazumeva promene pobudne struje pri malim i velikim poremećajima, što ima za posledicu da se vrednosti promenljivih, značajnih za rad generatora, razlikuju od nominalnih. Limiteri ograničavaju rad generatora u okviru dozvoljenih granica na pogonskoj karti.

Pogonska karta sinhronne mašine (sl. 1) pokazuje koliku reaktivnu snagu generator može da razvije pri zadatoj aktivnoj snazi [1]. Sa pogonske karte se istovremeno vidi da li se aktivna i reaktivna snaga generatora nalaze u dozvoljenoj zoni rada. Oblast dozvoljenog rada sinhronog generatora ograničena je sledećim krivama: maksimalna dozvoljena struja pobude  $I_{fmax}$  (1), dozvoljena struja statora  $I_{max}$  (2), maksimalna snaga turbine  $P_{Tmax}$  (3), maksimalno zagrevanje magnetnog kola statora (4), minimalna struja pobude  $I_{fmin}$  (5), praktična granica statičke stabilnosti (6).



Sl. 1. Pogonska karta generatora

Danas su u elektranama Elektroprivrede Srbije najčešće u eksploataciji pobudni sistemi sa sledećim limiterima: vremenski zategnuto ograničenje maksimalne struje rotora, trenutno ograničenje maksimalne struje rotora, vremenski zategnuto ograničenje maksimalne struje statora, ograničenje minimalne struje pobude, ograničenje ugla opterećenja  $\delta$ . Da bi se limiteri pravilno podesili potrebno je poznavati pogonski dijagram mašine, karakteristike samih limitera, kao i karakteristike zaštitnih uređaja. Limiteri treba podesiti tako da omoguće prigušenje poremećaja u sistemu, a zaštitne uređaje tako da s jedne strane sigurno štite mašinu, a s druge strane moraju omogućiti limiterima dovoljno prostora za odradu pre nego što isključe mašinu sa mreže.

## 2. KRATAK OPIS LIMITERA

*Vremenski zategnuto ograničenje struje statora.* Ovaj limiter dozvoljava kratkotrajan porast struje statora iznad maksimalno trajno dozvoljene vrednosti u cilju održavanja napona u okviru zadatih granica i održanja stabilnosti u toku različitih prelaznih procesa u mreži. Porast struje ne sme termički ugroziti mašinu. Obzirom na tromost mašine u pogledu zagrevanja, dozvoljava se utoliko duže trajanje struje ukoliko je njeno previšenje iznad nominalne vrednosti manje. Stoga se ovo ograničenje izvodi kao inverzno vremenski zategnuto.

*Vremenski zategnuto ograničenje struje rotora (pobude).* Ovo ograničenje ima posebnu značajnu ulogu kod forsiranja pobude pri brzim promenama režima rada, kada je pobudna struja dosta veća od nominalne. Kao i kod prethodnog ograničenja, zbog mogućnosti generatora da bude kratkotrajno preopterećen, a da se pri tom ne predu termička ograničenja rotorskog namotaja, ograničenje struje rotora se radi kao vremenski zategnuto. Ova osobina limitera znatno doprinosi boljem odzivu generatora u nekim neregularnim režimima (npr. porast struje pobude pri dugotrajnom sniženju napona u mreži). Vremensko zatezanje i kod ograničenja struje rotora ima inverznu karakteristiku tj. dejstvo je utoliko brže ukoliko je porast struje veći.

*Trenutno ograničenje maksimalne struje rotora.* Ova vrsta limitera ugrađuje se kod mašina sa statičkom pobudom i kao prethodno ograničenje, odnosno ograničenje maksimalne struje rotora veoma je značajno pri forsiranju pobude. Zbog izuzetno male vrednosti termičke vremanske konstantne elemenata koji su ugrađeni u ispravljačke mostove, čak i njihovo kratkotrajno preopterećenje može dovesti do njihovog ispada. Zato se ovo ograničenje izvodi kao trenutno.

*Ograničenje minimalne struje pobude.* Do smanjenja vrednosti pobudne struje dolazi u slučaju visokih naponskih prilika u mreži. Ograničenjem minimalne struje pobude se ograničava tok reaktivne snage ka mašini. Prevratno sniženje pobudne struje može dovesti do:

- ulaska sinhronog generatora u oblast statičke nestabilnosti,

Termičkog preopterećenja čeonih delova paketa statorskog namotaja u režimima podpobude

Kao posledica ispada generatora iz sinhronizma javljaju se ozbiljna mehanička i električna naprezanja mašine, dok pregrevanje statora dovodi do znatnog sniženja životnog veka generatora. Kritičniji uslov od ova dva uzima se kao granica za podešenje minimalne struje pobude [2].

*Ograničenje ugla opterećenja generatora  $\delta$ .* Na osnovu podataka o naponu i struji generatora određuje se ugao opterećenja  $\delta$ . Ako je ovaj ugao veći od zadatog graničnog ugla opterećenja  $\delta_{gr}$ , generator je u opasnosti da izgubi sinhronizam. Zbog toga, u ovakvim situacijama izlazni signal iz ovog limitera trenutno deluje na povećanje pobudne struje generatora, odnosno elektromotorne sile, čime se smanjuje ugao opterećenja  $\delta$ .

### 3. PODEŠENJA LIMITERA

*Vremenski zategnuto ograničenje struje statora.* Ograničenje struje statora podešava se tako da bude jednako maksimalno dozvoljenoj trajnoj struji u statorskom namotaju.

Kod mašina koje su opremljene sa dva medijuma za hlađenje postoji mogućnost izbora nivoa ograničenja. Viša struja statora se dozvoljava kada se koristi medijum kojim se ostvaruje bolje hlađenje.

Vremensko zatezanje se izvodi kao inverzno s tim što se karakteristike zatezanja razlikuju u zavisnosti od proizvođača. Kod jedne vrste limitera karakteristika je eksponencijalna. Kod druge vrste postoji vremenski zategnuto delovanje u periodu  $t_{zategnuto}$  i nakon toga trenutno delovanje u dužem periodu  $t_{trenutno}$ . Ovo trenutno delovanje sprečava ponovljeno preopterećivanje namotaja statora koje bi moglo da dovede do njegovog pregrevanja iznad dozvoljenih granica. Trajanje vremenskog zatezanja određuje se na osnovu uputstva koje daje proizvođač generatora tako da sledeća vremena služe samo kao ilustracija za moguća podešenja  $t_{zategnuto} = 2+5s$ ,  $t_{trenutno} = 5+30min$ .

*Vremenski zategnuto ograničenje struje rotora.* Vrednost ograničenja struje rotora jednako je maksimalno dozvoljenoj trajnoj struji u namotaju rotora. Za podešenje ovog limitera treba se obavezno pridržavati uputstva proizvođača generatora. Vremensko zatezanje se najčešće podešava tako da za  $1.1+1.2I_n$  vreme odrade iznosi 30s. Kod ove kao i kod vremenski zategnutog ograničenja struje statora mora se voditi računa da trenutna prorada ovih limitera bude za oko 10% niže podešena od odgovarajućih zaštita da nebi došlo do preklapanja oblasti njihovog delovanja [3].

Prilikom forsiranja pobude dozvoljava se znatni porast struje rotora. Zbog toga se vremensko zatezanje podešava tako da reagovanje bude trenutno za struje između 150% i 200% nominalne struje rotora. Kod većine pobudnih sistema koji su danas u eksploataciji, 15min nakon forsiranja ne dozvoljava se ni najmanje povećanje pobudne struje.

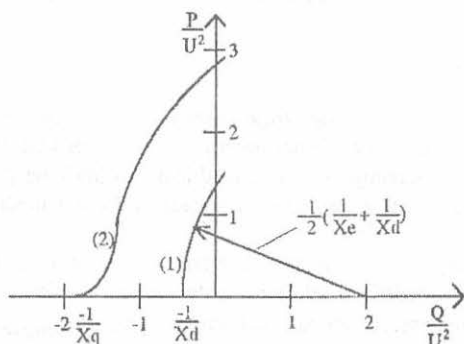
*Trenutno ograničenje struje rotora.* Podešenje trenutnog ograničenja struje rotora bira se tako da struja nikad ne prede maksimalno dozvoljenu struju ispravljačkog mosta. Limiteri pojedinih proizvođača su snabdeveni sa dva stepena ograničenja od kojih se jedan podešava na vrednost nižu od napred navedene. Na ovaj način ispravljački most se štiti u nekim neregularnim režimima, npr. pri pojavi nesimetrije.

*Ograničenje minimalne struje pobude.* U upotrebi se danas nalazi više tipova ove vrste limitera. U zavisnosti od tipa, karakteristika prorade može biti krug, prava ili dve prave koje se seku. Bez obzira na vrstu karakteristike, za podešenje limitera neophodno je poznavati pogonski dijagram mašine. Nakon toga se prema instrukcijama koje daje proizvođač, proračunavaju centar i prečnik kružnice ili tačka preseka i nagib prave ograničenja.

Na sledećoj pogonskoj karti (sl. 2) prikazana je proradna karakteristika ograničenja minimalne pobude kada je kritičan uslov statička stabilnost generatora. Kriva 1 se odnosi na turbogenerator, a kriva 2 na hidrogenerator.

Obzirom na različite konstrukcije mašina, proračun podešenja ograničenja minimalne struje pobude za turbogeneratore i hidrogeneratore se razlikuje. Kod turbogeneratorsa granica statičke stabilnosti zavisi samo od reaktanse generatora  $X_d$  i reaktanse dalekovoda  $X_e$  koji povezuje mašinu sa mrežom beskonačne snage [4]. Poluprečnik kružnice određen je izrazom:

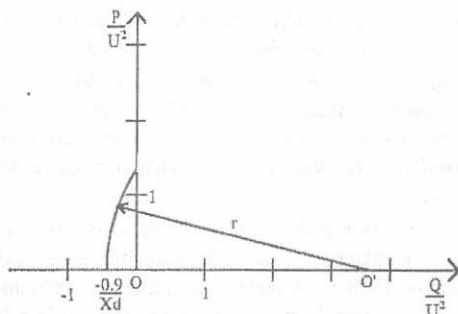
$$r = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (1)$$



Sl. 2. Karakteristika statičke stabilnosti generatora

Granica stabilnosti za  $P = 0$  MW nalazi se u preseku krive koja predstavlja karakteristiku statičke stabilnosti i  $Q/U^2$  ose (sl. 3). Udaljenost ove tačke od centra koordinatnog sistema određena je samo sinhronom reaktansom i iznosi  $1/X_d$ . Za podešenje zaštitne karakteristike proizvođač daje preporuku za izbor poluprečnika  $r$  i centra zaštitne kružnice  $O'$ . Presek zaštitnog kruga i  $Q/U^2$  ose treba da se nalazi u tački  $0.9/X_d$  (radi rezerve u sigurnosti umesto  $1/X_d$  bira se  $0.9/X_d$ ). Za  $r$  se uzima vrednost 5 r.j. jer se kod turbogeneratorsa bira maksimalni dozvoljeni poluprečnik. Centar kruga  $O'$  tada je određen jednačinom:

$$OO' = r - \frac{0.9}{X_d} = 5 - \frac{0.9}{X_d} \quad (2)$$



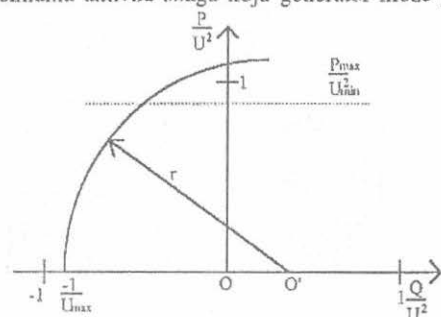
Sl. 3. Podešenje karakteristike ograničenja minimalne pobude kod turbogeneratorsa

Za hidrogeneratore se poluprečnik kružnice statičke stabilnosti može odrediti analogno jednačini (1) zamenom  $X_d$  sa  $X_q$ . Obzirom da je  $X_q$  kod hidrogeneratorsa manje od jedan, granici

stabilnosti izabranoj po ovom kriterijumu, odgovarala bi struja generatora znatno veća od nominalne pa se stoga izbor parametara vrši za uslove koji su različiti od onih kod turbogeneratora. Granica stabilnosti za  $P=0$  MW određena je tačkom  $-1/U_{min}$  na  $Q/U^2$  osi, gde je  $U_{min}$  minimalni dozvoljeni napon kada je generator podpobuden. Centar i poluprečnik kružnice se biraju tako da je zadovoljena relacija:

$$r - OO' = \frac{I_{max}}{U_{max}} \quad (3)$$

pri čemu je  $I_{max}$  maksimalna trajno dozvoljena struja statora pri  $P=0$  MW kada je generator podpobuden, a  $U_{max}$  maksimalni dozvoljeni napon generatora kada je generator podpobuden (sl. 4). Zbog mogućih lokalnih pregrevanja magnetnog kola rotora  $I_{max}$  se bira da bude manje od 1 r.j, prema uputstvu proizvođača generatora. Vrednost  $OO'$  se bira tako da karakteristika seče  $P/U^2$  osu znatno iznad vrednosti  $P_{max}/U_{min}^2$ . Ovakvo se postupa da ne bi došlo do reagovanja limitera u trenucima kada je mašina nadpobudena tj. da bi prava  $P_{max}/U_{min}^2$  ostala unutar karakteristike.  $P_{max}$  je maksimalna aktivna snaga koju generator može proizvesti.



Sl. 4. Podešenje karakteristike ograničenja minimalne struje pobude kod hidrogeneratora

Kod limitera čija je karakteristika prorade prava linija, neophodno je odrediti nagib prave i tačku preseka karakteristike i  $Q/U^2$  ose. Ova tačka preseka predstavlja reaktivnu energiju koju mašina uzima iz mreže pri  $P=0$  MW i ona se najčešće postavlja da bude između 60% i 90% nominalne prividne snage. Nagib se određuje tako da se karakteristika nalazi unutar krivih koje su određene snagom mašine i njenom statičkom stabilnošću (sl. 8).

*Ograničenje ugla opterećenja  $\delta$  generatora.* Vrednosti podešenja prorade ograničenja ugla opterećenja  $\delta$  se razlikuju kod hidrogeneratora i turbogeneratora. Pošto je kod turbo generatora maksimalni ugao  $\delta$  pri kojem generator zadržava sinhronizam jednak  $90^\circ$  onda se  $\delta_{gr}$  bira da ne bude veće od  $80^\circ$ . Kod hidrogeneratora maksimalni ugao  $\delta$  se nalazi između  $70^\circ$  i  $80^\circ$  pa se kod limitera  $\delta_{gr}$  podešava između  $60^\circ$  i  $70^\circ$ .

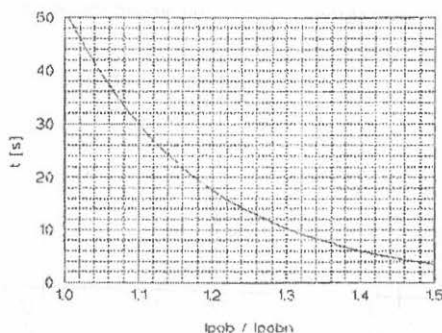
#### 4. LIMITERI UGRAĐENI U AUTOMATSKI REGULATOR POBUDE U HE "OVČAR BANJA"

Zbog zastarelosti opreme za regulaciju napona u HE "Ovčar Banja" za generator snage 5.6 MVA ugrađen je tranzistorski automatski regulator pobude uz zadržavanje postojećeg pobudnog generatora [5]. Regulator je snabdeven dodatnim jedinicama radi obezbeđenja rada generatora u oblasti dozvoljenih opterećenja statora i rotora, a u oblasti statičke stabilnosti agregata. Obzirom da se radi o generatoru male snage sa budilicom, u automatski regulator

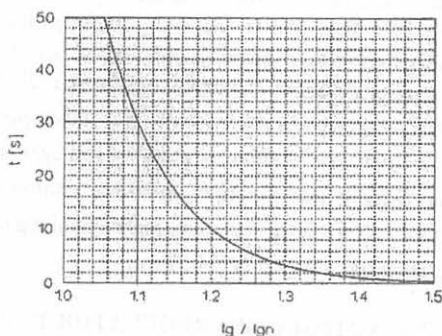
pobude su ugrađeni sledeći limiteri: ograničenje minimalne struje pobude, vremenski zategnuto ograničenje struje statora i vremenski zategnuto ograničenje struje rotora.

*Vremenski zategnuto ograničenje struje rotora.* Ograničenje struje pobude podešeno je tako da za pobudnu struju  $1.1I_n = 319A$  ( $I_n=290A$ ) ograničenje odraduje sa vremenskim zatezanjem od 30s. Vremensko zatezanje je obrnuto srazmerno porastu struje rotora iznad nominalne vrednosti. Ukoliko struja rotora dostigne dvostruku nominalnu vrednost ograničenje deluje bez zatezanja. Proradna karakteristika kod ovog rešenja je eksponencijalna, a tačnost podešavanja granične vrednosti struje i vremena zatezanja je oko 5%. Karakteristika vremenski zategnutog ograničenja struje pobude prikazana je na slici 5.

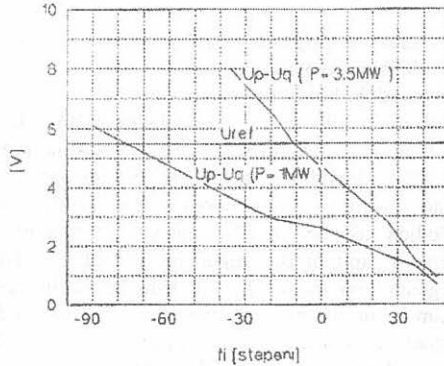
*Vremenski zategnuto ograničenje struje statora.* I kod ovog limitera vremensko zatezanje je podešeno tako da pri struji statora od  $1.1I_n = 561A$  ( $I_n=510A$ ) kašnjenje odrade iznosi 30s. Tačnost podešavanja i delovanja bloka ograničenja je oko 5%. Vremensko zatezanje odrade ograničenja struje statora u funkciji struje statora prikazano je na slici 6.



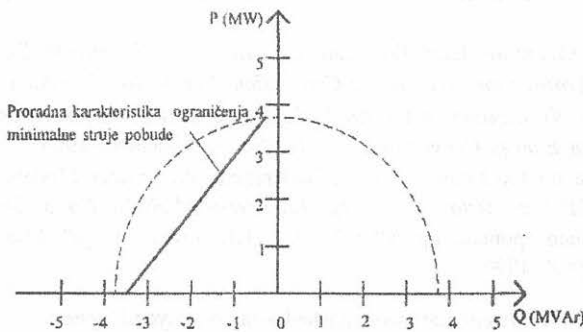
Sl. 5. Vremenski zategnuto ograničenje struje rotora agregata B u HE "Ovčar Banja"



Sl. 6. Vremenski zategnuto ograničenje struje statora agregata B u HE "Ovčar Banja"



Sl. 7. Karakteristika prorade ograničenja minimalne pobude agregata B u HE "Ovčar Banja"



Sl. 8. Ograničenje minimalne struje pobude

**Ograničenje minimalne struje pobude.** Proradna karakteristika kod ovog uređaja je jedna prava linija. Na modulu ograničenja minimalne struje pobude podešenje parametara izvršeno je tako da pri dozvoljenoj aktivnoj snazi  $P=3,5$  MW proraduje za malu vrednost reaktivne snage  $\cos\varphi=-0,98$  jer hidrogenerator uglavnom ne radi u kapacitivnim režimima. Karakteristike ograničenja minimalne struje pobude su određene za snage  $P=1$  MW i  $P=3,5$  MW i prikazane su na slici 7 gde  $u_p, u_q$  nose informaciju o veličini aktivne i reaktivne snage, a  $u_{ref}$  je referentna vrednost iznad koje dolazi do prorade limitera. Na slici 8 je, u P-Q ravni, za dobijene presečne tačke, prikazana karakteristika prorade ograničenja minimalne pobude.

## 5. ZAKLJUČAK

Limiteri su funkcionalni deo pobudnog sistema sinhronog generatora koji obezbeđuju:

- pouzdaniji rad EES jer poboljšavaju odziv mašine na poremećaje u sistemu,
- ograničenje rada generatora u oblasti dozvoljenih termičkih naprežanja statora i rotora i pune statičke stabilnosti.

Zahvaljujući limiterima koji sprečavaju nepotreban ispad mašina prilikom poremećaja u sistemu, povećava se stabilnost kako pojedinih manjih delova sistema tako i celokupnog sistema. Limiteri, takođe, mogu pomoći održavanju generatora u ostrvskom radu u manjoj mreži pri eventualnom raspadu tog dela sistema.

Za ispravno ostvarivanje prethodnih funkcija neophodno je dobro podesiti limitere uz poštovanje:

-instrukcija proizvođača u pogledu karakteristika mašina (smanjuje se nepotrebno habanje prilikom ispada i produžava životni vek),

-podešenja zaštitnih uređaja koji štite generator.

Limiteri treba uvek da deluju pre odgovarajućih zaštita. U slučaju loše koordinacije između limitera i zaštitnih uređaja može doći do prorade zaštita pre nego što limiteri uopšte počnu da reaguju. Prorada zaštita dovodi do isključenja mašine što izaziva povećanje postojećih poremećaja u mreži, umesto da mašina promenom svojih izlaznih veličina utiče na njihovo smanjenje. Ovo ima za posledicu još veće ugrožavanje već uzdrmanog sistema.

Ugradnjom limitera u automatski regulator pobude u HE "Elektromorava"-Čačak ostvaren je pouzdaniji rad generatora na mreži. Pre zamene starih elektromehaničkih regulatora pobude novim elektronskim automatskim regulatorima, ispad jednog agregata je često prouzrokovao nepotrebne ispade ostalih agregata i raspade lokalne mreže. Sa novim regulatorom pobude omogućen je ostrvski rad generatora u lokalnoj mreži.

## LITERATURA

- [1] I. A. Glebov, V. V. Dombrovskii, A. A. Dukštai, *Gidrogeneratori*, Energoizdat, Lenjingrad, 1982.
- [2] J. R. Ribeiro, Minimum Excitation Limiter Effects on Generator Response to System Disturbances, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 1, March 1991.
- [3] George K. Girgis, Verification of Limiter Performance in Modern Excitation Control Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995
- [4] IEEE Task Force on Excitation Limiters, Underexcitation Limiter Models for Power System Stability Studies, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [5] Automatski regulator pobude tip ARP 95/01 u HE "Ovčar Banja", Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 1996.

Abstract: When a power system has been pushed near or beyond operating limits, synchronous machines are urged to operate in conditions that are different from the nominal. In order to obtain better dynamic and transient stability of the power system, automatic voltage regulator is designed to provide varying of the machines quantities. Therefore, automatic voltage regulator is equipped with additional protective devices-limiters.

The limiters that are used in powerplants of Yugoslavia are presented in this paper. Limiter applications, criteria for their adjusting and achieved characteristics of the limiters that are employed on small hydrogenerators, are also discussed. The results are given for the automatic voltage regulator that has been implemented in hydroplant "Ovcar Banja".

Key words: excitation system / automatic voltage regulator / limiter / dynamic stability.

## THE LIMITING FUNCTIONS OF SYNCHRONOUS MACHINE AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

Jasna Dragosavac, dipl.ing, Mr Ilija Stevanović, dipl.ing,  
Zoran Čirić, dipl.ing, Dr Dušan Arnautović, dipl.ing,