

Ispitivanja sistema pobude generatora u HE "Uvac"

Nemanja Miložić, Zoran Ćirić, Dušan Joksimović, Đorđe Stojić, Milan Milinković, Slavko Veinović

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
nemanja.milozic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je ukratko opisan sistem pobude hidroagregata u HE "Uvac" kao i rezultati ispitivanja sistema pobude izvršenih u cilju obezbeđivanja podataka za određivanje parametara matematičkog modela agregata. Prikazana je oprema sistema pobude, parametri regulatora pobude kao i rezultati dobijeni nakon sprovedenih ispitivanja. Prezentovani rezultati su pokazali da je regulacija ispravno podešena i da je sa aspekta elektroenergetskog sistema sistem pobude u potpunosti funkcionalan i pouzdan.

Ključne reči: statički sistem pobude, regulator pobude, limiteri, statizam regulacije

1. Uvod

U cilju izvršenja računarskih simulacija rada agregata u okviru elektroenergetskog sistema potrebno je poznavati sledeće: matematički model svakog podsistema agregata kao analitički reprezent funkcionalnosti tog podsistema, sve ulazne i izlazne veličine i parametre matematičkog modela. Modelovanje pojedinih sistema sa ulazno-izlaznim veličinama je u najvećem broju slučajeva standardizovano, dok je parametre potrebno eksperimentalno utvrditi merenjima i ispitivanjima.

2. Opis sistema pobude

Sistem pobude sinhronog hidrogeneratora u HE "Uvac", sa osnovnim podacima navedenim u tabeli 1, je statički samopobudni sistem. Jednopolna šema agregata u HE "Uvac" je prikazana na slici 1.

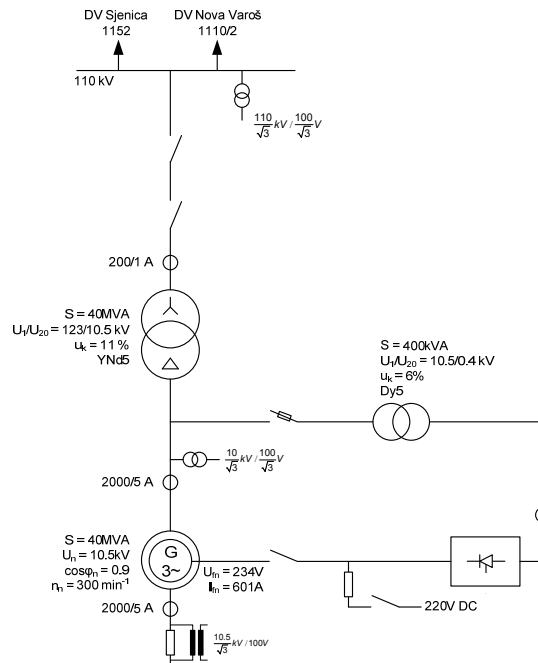
Tabela 1. Osnovni podaci sinhronog generatora

Tip, fabr.br.	S5394-20, No. 13743
Nominalna snaga	40 MVA / 36MW / 17.5MVA _r
Nominalni napon i struja	10.5 kV / 2200 A
Nominalni faktor snage	0.9
Nominalna brzina	300 min ⁻¹
Nominalna napon i struja pobude	234 V / 601 A

Sistem pobude čine elektronski analogni regulator pobude i dva tiristorska mosta u paralelnom radu koji se napajaju preko pobudnog transformatora sa generatorskih šina. U energetskom delu sistema pobude nalaze se još i: oprema prenaponske zaštite na jednosmernoj strani, sklop za početno pobuđivanje iz sopstvene potrošnje elektrane, prekidač i otpornik za demagnetizaciju i merni elementi za merenje napona i struje pobude.

Regulator pobude je elektronski poluprovodnički izrađen u analognoj tehnologiji. Postoji automatski regulator napona generatora (ARP) i ručni regulator struje pobude (RR). ARN se sastoji od osnovne regulacione jedinice koja vrši primarnu regulaciju napona generatora i ograničavača. Postoje sledeći ograničavači: ograničenje minimalne struje pobude, ograničenje maksimalne struje pobude i vremenski zategnuto ograničenje struje pobude. RR je rezervni regulator sistema pobude i funkcioniše u slučaju kvara na ARP. Upravljanje tiristorskim mostovima se vrši preko generatora impulsa, izlaznog pojačavačkog stepena generatora impulsa i impulsnih transformatora. Generator impulsa punog vođenja formira trajne impulse za upravljanje tiristorskim mostovima pri pobuđivanju agregata kao i pri uslovima kada se javljaju simetrična ili nesimetrična sniženja napona pri radu generatora na mreži (forsiranje).

Ispitivanja sistema pobude izvršena su u toku redovnog godišnjeg remonta agregata u HE "Uvac".

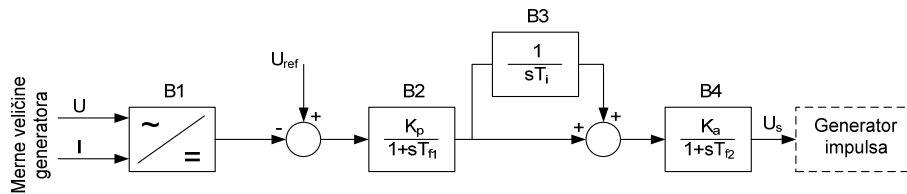


Slika 1. Jednopolna šema agregata u HE "Uvac"

2.1. Automatski regulator sistema pobude - ARP

Automatski regulator sistema pobude - ARP je realizovan u analognoj tehnologiji i ima kao primarnu funkciju regulaciju napona statora generatora. ARP se sastoji od osnovne regulacione jedinice i dodatnih regulacionih uređaja preko kojih su realizovane različite funkcije ograničavanja i sekundarne regulacione funkcije. [1] [3] [4] Na slici 2. je prikazana blok šema automatskog regulatora. Osnovna jedinica je na svom izlazu opremljena jedinicom za prilagođenje regulacije na konkretni pobudnik i ima sledeće glavne funkcije:

- održavanje napona elektroenergetskog sistema konstantnim,
- raspodela reaktivnog opterećenja u odgovarajućem odnosu sinhronih generatora koji rade paralelno,
- aktivno učestvovanje u održavanju visokog nivoa statičke i tranzijentne stabilnosti u elektroenergetskom sistemu.



Slika 2. Blok šema automatskog regulatora pobude

- B1 - Jedinica za merenje napona sa kompenzacijom reaktivne struje
- B2 - Proporcionalni pojačavač sa ulaznim filterom za izbor pojačanja pobudnog sistema
- B3 - Integrator
- B4 - Proporcionalni pojačavač sa ulaznim filtrom za prilagođenje pojačanja na konkretni pobudnik

Vrednosti parametara ARP su:

- $K_p = 30$ pu (napona pobude) / pu (napona generatora) (dinamičko pojačanje)
- $T_{f1} = 0.025$ s Vremenska konstanta ulaznog filtra bloka B2
- $T_i = 2$ s Integraciona vremenska konstanta
- $K_a = 8/K_c = 2$ pojačanje za statički pobudnik (poluprovodnički pretvarač)

K_C je koeficijent forsirnog napona koji se računa prema sledećoj formuli:

$$K_C = \frac{U_f^{fors} [V]}{U_f^{1pu} [V]} = \frac{540V}{127V} = 4.25 \approx 4 \quad (1)$$

gde je U_f^{fors} vrednost napona forsiranja pri nominalnom ulaznom naponu, a U_f^{1pu} bazna vrednost napona pobude.

$T_{f2} = 8/K_c = 0.002$ s Vremenska konstanta ulaznog filtra bloka B4

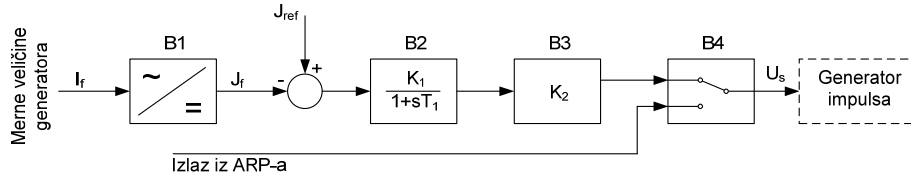
Podešenje bloka reaktivne kompenzacije: 4 %

(tj. ovaj procenat pozitivne reaktivne kompenzacije je ekvivalentno istom tom procentu porasta referentnog napona kada izlazna reaktivna struja generatora poraste za iznos jednak nominalnoj struji generatora)

2.2. Ručni regulator sistema pobude - RR

Ručni (rezervni) regulator je realizovan kao dodatna jedinica pridodata automatskom regulatoru napona. Ručnim regulatorom se direktno, u zatvorenom regulacionom krugu, upravlja strujom pobude sinhronog generatora. Ovaj regulator predstavlja rezervu u slučaju kvara osnovne

jedinice automatskog regulatora ili neke od drugih dodatnih jedinica automatskog regulatora. [1] [3] [4] Blok šema ručnog regulatora je prikazana na slici 3.



Slika 3. Blok šema ručnog (rezervnog) regulatora pobude

- B1 - Jedinica za merenje struje pobude
- B2 - Proporcionalni pojačavač sa ulaznim filterom za prilagođenje pojačanja koeficijentu forsirnog napona
- B3 - Pojačalo snage konstantnog pojačanja
- B4 - Relejni sklop

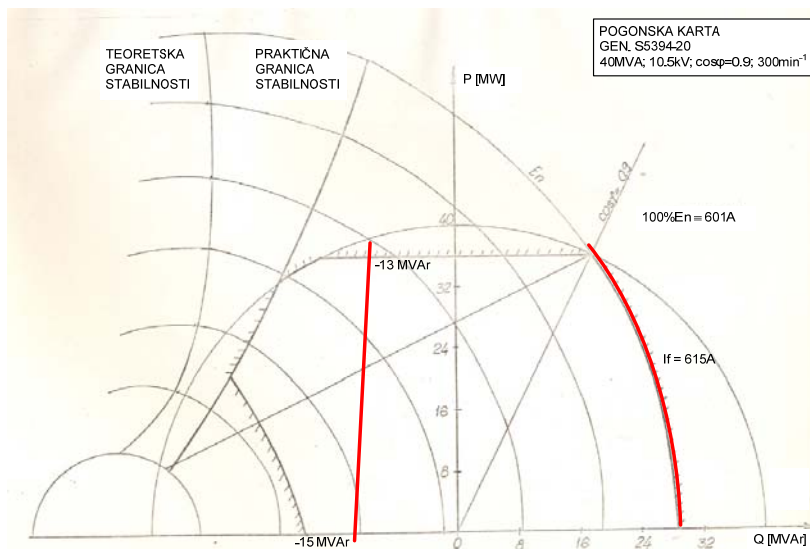
Vrednosti parametara RR su:

- $K1 = 2 \cdot 1.8 \cdot 3.0 = 10.8$ pu (napona pobude) / pu (napona generatora)
(dinamičko pojačanje)
- $T1 = 0.02$ s Vremenska konstanta ulaznog filtra
- $K2 = 1.5$ Pojačanje pojačala snage

2.3. Ograničavačke jedinice (limiteri) i forsiranje

Kao dodatni regulacioni elementi, uz ARP i RR, u sistemu pobude su realizovane i sledeće ograničavačke funkcije:

- **trenutno ograničenje struje pobude**
Ovo ograničenje struje pobude je aktivno u režimu forsiranja pobude. (Slika 4)
Podešenje ograničenja:
 $I_{TO} = 2 \cdot I_{fn} \sim 1202A$ u trajanju $t = 5$ s
- **vremenski zategnuto ograničenje struje pobude**
Ovo ograničenje predstavlja limiter maksimalne struje pobude u normalnom radu.
Podešenje limitera:
 $I_{VZO} = 615A \sim 1.024 \cdot I_{fn}$ u trajanju $t = 15$ min
- **ograničenje minimalne struje pobude**
Ovo ograničenje je prikazano pravom u oblasti pogonskog dijagrama podpobuđenog generatora. (Slika 4)



Slika 4. Pogonski dijagram generatora sa naznačenim realizovanim limiterima

Forsiranje sistema pobude se vrši u slučaju da dodje do simetričnog ili nesimetričnog pada napona generatora na vrednost ispod 70% nominalne vrednosti.

Koeficijent forsiranja po naponu pobude je:

$$K_U = \frac{U_{f\max}}{U_{fn}} = \frac{540V}{234V} = 2.3 \quad (2)$$

gde je $U_{f\max}$ maksimalni forsirni napon pobude, a U_{fn} nominalni napon pobude.

Koeficijent forsiranja po struji pobude je:

$$K_I = \frac{I_{f\max}}{I_{fn}} = \frac{1202A}{601A} = 2 \quad (3)$$

gde je $I_{f\max}$ maksimalna forsirna struja pobude, a I_{fn} nominalna struja pobude.

2.4. Spoj ispravljača sistema pobude (tiristorski most)

Jednosmerni napon se reguliše promenom ugla upravljanja α , a sa time se menja i trenutak otpočinjanja komutacije struje sa jedne faze na drugu. Područje regulacije se prostire od pozitivne maksimalne vrednosti, preko nule,

do iste maksimalne negativne vrednosti. Ugao upravljanja α se definiše kao ugaona razlika između trenutka paljenja tiristora sa vremenskim kašnjenjem i vremena paljenja koje odgovara maksimalnom jednosmernom naponu. [3]

Statička karakteristika tiristorskog ispravljača je:

$$U_d = U_{di0} \cdot \cos \alpha - (U_{Xn} - U_{Rn}) \cdot \frac{I_d}{I_{dn}} - 2 \cdot U_{th} \quad (4)$$

gde je:

U_d	jednosmerni napon na izlazu ispravljača
U_{di0}	maksimalni jednosmerni napon praznog hoda tiristorskog ispravljača
α	ugao upravljanja
U_{Xn}	induktivni (reaktivni) pad jednosmernog napona kod nominalne struje
U_{Rn}	otporni (aktivni) pad jednosmernog napona kod nominalne struje
I_d	jednosmerna struja na izlazu ispravljača
I_{dn}	nominalna jednosmerna struja na izlazu ispravljača
U_{th}	pad napona u propusnom smeru tiristora

Veza između upravljačkog signala U_S i ugla upravljanja α je:

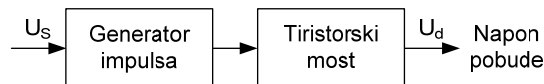
$$U_S = U_{Smax} \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

gde je:

U_S	upravljački signal na izlazu regulacione jedinice
U_{Smax}	maksimalna vrednost upravljačkog signala

Kombinacijom prethodne dve jednakosti dobija se statička karakteristika tiristorskog ispravljača kao linearna veza između jednosmernog napona ispravljača i dovedenog upravljačkog signala na generatoru impulsa:

$$U_d = \frac{U_{di0}}{U_{Smax}} \cdot U_S - R_i \cdot I_d - 2 \cdot U_{th} \quad (6)$$



Slika 5. Blok šema izlaznog ispravljačkog bloka sistema pobude

Ako se zanemare navedeni padovi napona, za konkretni primer, prenosna funkcija se može izraziti u obliku:

$$U_d = \frac{K}{1 + \tau s} \cdot U_s \quad (7)$$

gde je $K = 67.5$, a $\tau = 0.0011$ s

2.5. Statizam regulacije sistema pobude

Automatski regulatori sistema pobude moraju da zadovolje određene statičke i dinamičke karakteristike. Statička karakteristika regulacije podrazumeva zavisnost regulisane veličine od veličine koja je uzrok njene promene u stacionarnom stanju dok dinamička karakteristika definiše tok prelaznog procesa u sistemu regulacije pri prelasku iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Stepen zavisnosti promene regulisane veličine (napon generatora) od promene njenog uzroka (reaktivna snaga) se naziva koeficijent ili stepen statizma i predstavlja nagib statičke karakteristike regulacije u odnosu na apcisnu osu. [2]

Merenje koeficijenta statizma je vršeno direktno, tj. povezujući generator na elektroenergetsku mrežu i merenjem napona generatora i mreže i odate reaktivne snage uz približno nultu aktivnu snagu agregata.

Prenosni odnosi naponskih mernih transformatora:

$$\frac{10.5}{\sqrt{3}} \text{ kV} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} - \text{ za napon generatora}$$

$$\frac{110}{\sqrt{3}} \text{ kV} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} - \text{ za napon mreže}$$

Prenosni odnos blok transformatora je 10.5 kV / 123 kV

Generator povezan na mrežu:

$P \sim 2.7$ MW	
$Q = 16.6$ Mvar	
$U_G'' = 97.05$ V	$\rightarrow U_G = 9.705$ kV
$U_M'' = 98.21$ V	$\rightarrow U_M = 108.031$ kV (stvarni mereni napon mreže u postrojenju 110 kV)

Generator u praznom hodu (nakon isključenja prekidača bloka):

$$P = 0 \text{ MW}$$

$$Q = 0 \text{ Mvar}$$

$$U_G'' = 94.82 \text{ V}$$

$$\rightarrow U_G = 9.482 \text{ kV}$$

$\rightarrow U_M = 111.075 \text{ kV}$ (kada se napon generatora preslika na 110kV stranu blok transformatora)

$$U_M'' = 96.35 \text{ V}$$

$\rightarrow U_M = 105.985 \text{ kV}$ (stvarni mereni napon mreže u postrojenju 110 kV)

Statizam regulacije pobude na šinama generatora:

$$\delta_G = \frac{\frac{\Delta U_G}{U_n}}{\frac{\Delta Q}{Q_n}} = \frac{\frac{0.223}{10.5}}{\frac{16.6}{17.5}} \cdot 100 = 2.24\% \quad (8)$$

Statizam regulacije pobude na mreži, tj. VN strani blok transformatora:

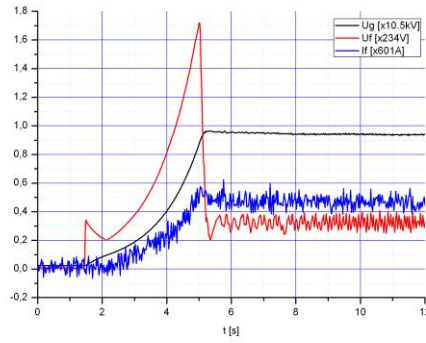
$$\delta_M = \frac{\frac{\Delta U_M}{U_n}}{\frac{\Delta Q}{Q_n}} = \frac{\frac{-3.044}{110}}{\frac{16.6}{17.5}} \cdot 100 = -2.92\% \quad (9)$$

Mrežni statizam treba da ima negativnu vrednost, što govori da se pri većem mrežnom naponu smanjuje odata reaktivna snaga i obratno.

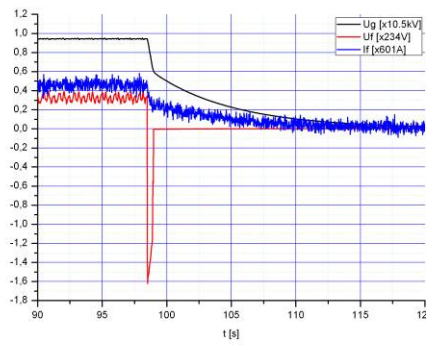
3. Snimci dinamičkih odziva sistema pobude

Digitalnim sistemom akvizicije signala je izvršeno registrovanje karakterističnih odziva u sistemu pobude. Od interesa su sledeći snimci sa kojih se može oceniti kvalitet regulacije i identifikovati neki parametri dinamičkog odziva u sistemu pobude:

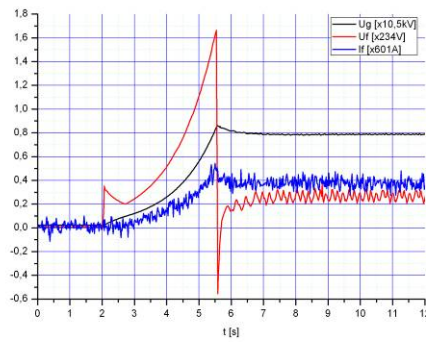
- pobuđivanje i razbuđivanje generatora u automatskoj regulaciji
- pobuđivanje i razbuđivanje generatora u rezervnoj regulaciji
- razbuđivanje generatora delovanjem na prekidač za demagnetizaciju
- step poremećaj zadat regulatoru u praznom hodu
- prelazak ARP-RR



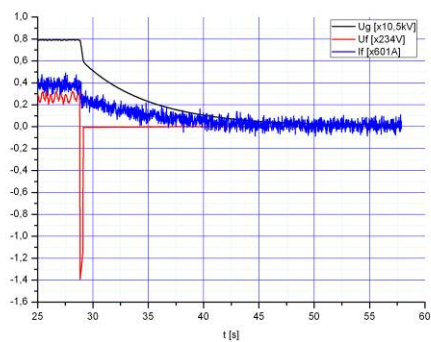
Slika 6. Pobuđivanje generatora u automatskom režimu. Nakon procesa početnog pobuđivanja, sistem pobude prelazi u automatsku regulaciju i generator se pobuđuje na napon praznog hoda



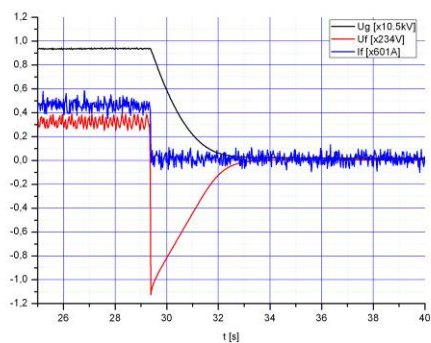
Slika 7. Razbuđivanje generatora u automatskom režimu. Razbuđivanje se vrši invertovanjem tiristorskog pretvarača



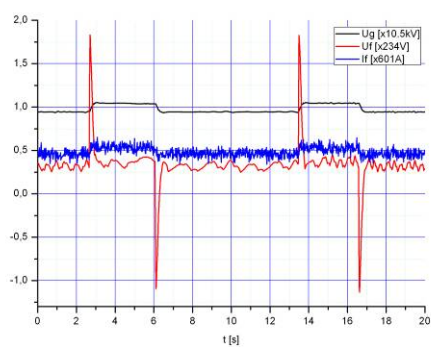
Slika 8. Pobuđivanje generatora u ručnom režimu



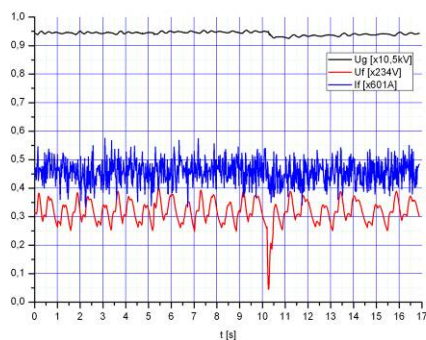
Slika 9. Razbuđivanje generatora u ručnom režimu



Slika 10. Razbuđivanje generatora delovanjem na prekidač za demagnetizaciju. Razbuđivanje se vrši disipacijom energije u otporniku za demagnetizaciju



Slika 11. Step poremećaj ARP-a u praznom hodu. Na zadati step poremećaj automatskog regulatora napona generatora sistem pobude se pravilno i brzo odaziva, što garantuje dobro ponašanje u slučaju pojave poremećaja u sistemu.



Slika 12. Prelazak ARP-RR-ARP u praznom hodu. Ne opažaju se poremećaji u naponu generatora prilikom prelaska sa automatske na rezervnu regulaciju i obratno, što potvrđuje da je međusobno prećenje regulatora dobro podešeno.

4. Zaključak

U prethodnom izlaganju je ukratko prikazan deo rezultata dobijen ispitivanjem sistema pobude agregata u HE "Uvac". Na osnovu upoređivanja rezultata ispitivanja sa prvobitnim podešenjima i na osnovu instrukcija proizvođača generatora i sistema pobude utvrđen je ispravan rad pobudnog sistema sa stanovišta normalnog pogona i redovne eksploatacije. Takođe, podaci koji su dobijeni su neophodni za formiranje matematičkog modela pobudnog sistema konkretnog agregata u cilju sprovođenja daljih analiza i uklapanja tako dobijenog modela sistema pobude generatora u HE "Uvac" u jedinstveni simulacioni model EES Republike Srbije.

Literatura

- [1] И. И. Соловьёв - Автоматические регуляторы синхронных генераторов, Энергоиздат, Москва, 1981.
- [2] I. Stevanović, Z. Ćirić, D. Arnautović - Regulacija napona odnosno pobudne struje sinhronih generatora u elektranama Elektroprivrede Srbije sa gledišta zahteva sistema - Studija 205029, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [3] А. А. Юрганов, В.А. Кожевников - Регулирование возбуждения синхронных генераторов, Наука, Санкт-Петербург, 1996.

- [4] IEEE Std. 421.5 - 2005 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies

Abstract: The excitation system of hydro unit in HPP "Uvac" and results of testings of excitation system performed for achieving of unit's mathematical model are presented in this paper. Description of excitation system equipment, parameters of regulators and results obtained after testings are presented. The presented results showed that the regulators are properly adjusted and that the excitation system is completely functional and reliable.

Key words: static excitation system, excitation system regulator, limiters, regulator statism

Excitation System Testing in HPP "Uvac"

Rad primljen u uredništvo 9.09.2011. godine

Rad prihvaćen 10.10.2011. godine