

Modelovanje termoelektrane za potrebe upravljanja Q-V karakteristikom VN sabirnica

Jelena Pavlović¹, Tomislav Gajić,¹ Jasna Dragosavac¹, Žarko Janda¹, Sava Dobričić¹, Dušan Arnautović¹

¹Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
jelena.pavlovic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je predstavljen matematički model termoelektrana TENT A i TENT B razvijen za potrebe proučavanja upravljanja naponima i reaktivnim snagama. Model je razvijen u Simulink/Matlab okruženju. Sve važne komponente, generator, blok-transformator, turbina i turbinski regulator, pobudni sistem, automatski regulator napona (ARN) i mreža priključena na sabirnice elektrane, prikazane su modelima potrebne složenosti za proučavanje problematike od interesa. U prvom delu dat je osvrt na hijerarhijsko upravljanje naponima u sistemu, jer se grupni regulator reaktivne snage (GRRS) po karakteristikama odziva mora uklopiti u buduće procese automatizacije upravljanja naponima na višim nivoima i „pametno“ upravljanje u EES. Za potrebe proučavanja problema regulacije napona VN sabirnica i raspodele reaktivnih snaga u elektrani u ručnom i automatskom režimu rada izveden je čitav niz simulacija. Da bi se dokazala validnost razvijenog modela izvršena je verifikacija simulacionog modela. Rezultati ispitivanja su pokazali dobro poklapanje snimljenih i simuliranih odziva.

Ključne reči: modelovanje termoelektrane, Simulink/Matlab, naponsko-reaktivna regulacija VN sabirnica

1. Uvod

Automatizacijom upravljanja naponima i reaktivnim snagama na nivou elektroenergetskog sistema postiže se proširenje nivoa radnih ograničenja sistema, kao i poboljšanje kvaliteta i sigurnosti napajanja.

Grupna regulacija reaktivnih snaga (GRRS) na nivou elektrane je, sa stanovišta troškova, vrlo efikasan način za ispunjavanje zahteva viših hijerarhijskih nivoa i, što je veoma bitno, nezavisna je od stepena automatizacije u ostalim delovima i nivoima EES (decentralizovan pristup).

Uređaj GRRS predstavlja izvršni uređaj za prijem referentne vrednosti napona sabirnica i za slanje informacija o raspoloživim reaktivnim opsezima. Uređaj GRRS svoje dejstvo izvršava delovanjem na automatske regulatore napona (ARN) u elektrani. Učešće različitih generatora u elektrani u raspodeli reaktivne snage treba da obezbedi jednaku udaljenost proizvedene reaktivne snage od maksimalne i minimalne dopuštene reaktivne snage za posmatranu radnu tačku, uzimajući u obzir pogonsku kartu generatora i trenutnu aktivnu snagu.

Za ispitivanje dejstva i mogućnosti uređaja GRRS bilo je potrebno sintetisati model dovoljne složenosti. Složenost modela određena je vremenskim konstantama pojava od interesa.

Vremenske konstante pojava vezanih za regulaciju napona na sabirnicama termoelektrane određene su mestom i funkcijom uređaja GRRS. Prema EES hijerarhijskoj strukturi upravljanja naponima, [1], [2] i [3], GRRS je projektovan na način da se uklopi između primarne i sekundarne naponske regulacije i da obezbedi koordinaciju sa oba nivoa upravljanja da bi se izbegla interferencija sa bilo kojim nivoom upravljanja, Tabela 1.

Ako se primenjuje kao nezavisan uređaj, kontrola reaktivne snage je pod direktnim nadzorom regulatora napona sabirnica, koji je realizovan u okviru GRRS, da bi se obezbedilo održavanje napona sabirnica i potpuno dekoplovanje svih regulacionih petlji.

Tabela 1. Hijerarhijska struktura upravljanja naponima i reaktivnim snagama: vremenska i prostorna dekompozicija [2]

| Nivo upravljanja | Primarna regulacija napona | Sekundarna regulacija napona | Tercijarna regulacija napona |
|---------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Prostorni opseg | Jedan agregat | Jedna zona | Nekoliko zona i cela mreža |
| Vremenska konstanta | 0,5s do 10s | Od jednog do nekoliko minuta | 15 minuta i duže |

Iz Tabele 1 se vidi da odziv GRRS ne sme biti brži od nekoliko sekundi (da bi ostavio dovoljno vremena regulatoru napona da deluje) i njegovo dejstvo se mora završiti do jednog minuta. Ovaj vremenski okvir je definisao izbor složenosti modela. Domen dejstva centralizovane naponsko-reaktivne regulacije je da su svi generatori vezani na jedne sabirnice.

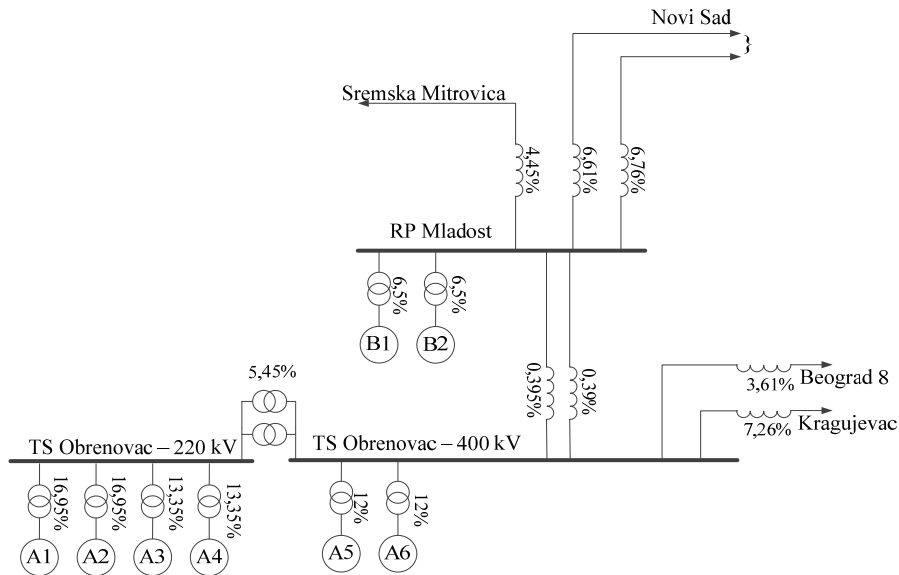
2. Model termoelektrane

Razvijen je model termoelektrane u Simulink/Matlab okruženju za potrebe analize ručnog upravljanja naponima sabirnica i reaktivnim snagama agregata. Modelovane su komponente proizvodnih agregata u termoelektrani koje su od interesa u posmatranoj problematici, kao i mreža na koju je

elektrana povezana. Poređenjem rezultata simulacije sa merenjima na objektu izvršena je provera i potvrđivanje razvijenog modela.

Za formiranje modela korišćeni su podaci iz TENT A i TENT B u kojima su ugrađeni grupni regulatori reaktivne snage. Cilj razvijanja ovog modela je da se za proizvoljnu elektranu, na osnovu raspoloživih podataka, koji su često nepotpuni i neprecizni, i rezultata merenja generiše model koji će davati što vernije odzive potrebne za proučavanje problema naponsko-reaktivne regulacije u zahtevanom vremenskom intervalu.

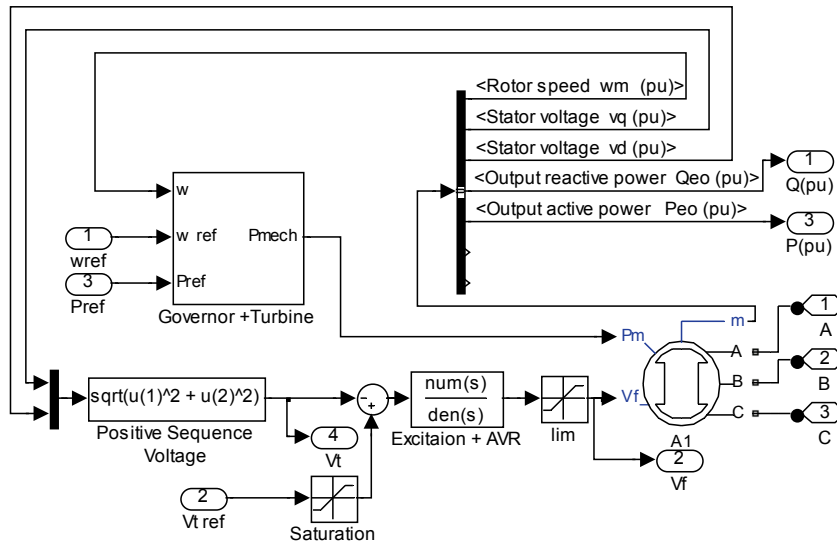
Jednopolna šema TENT A, TENT B, TS „Obrenovac“ i RP „Mladost“ prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Uprošćena jednopolna šema termoelektrana TENT A i TENT B

2.1. Model sinhronog generatora

Sinhroni generator sa cilindričnim rotorom je modelovan detaljnim modelom šestog reda. Za problematiku naponsko-reaktivne regulacije termoelektrane obično se koristi model trećeg reda [4], koji uzima u obzir samo dinamiku rotora. Ovako detaljan matematički model je izabran da bi se iskoristila prednost koju pruža model sinhronne mašine u Simulink Simpowersystem biblioteci. Na Slici 2 prikazan je blok dijagram modela generatora koji je korišćen u simulacijama.

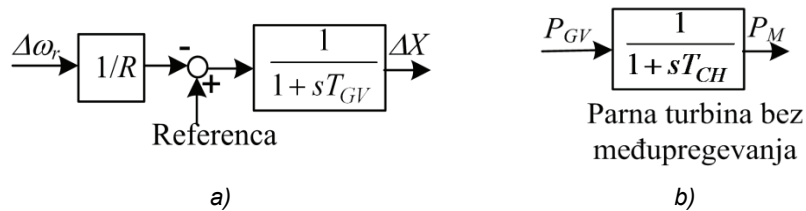


Slika 2. Blok dijagram sinhronog generatora

Model sinhronne mašine u Simulink Simpowersystem biblioteci koristi ekvivalentnu predstavu generatora u referentnom sistemu d-q osa, koji je vezan za rotor. Blok modela generatora ima dva ulaza, mehaničku snagu i napon pobude. Izlazi su statorske struje, statorski naponi, fluksevi i aktivna i reaktivna snaga. Svi parametri generatora dati su u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu snagu generatora. Parametri korišćeni u modelu preuzeti su iz tehničke dokumentacije TENT A i TENT B, a za parametre koji nisu bili dostupni korišćene su vrednosti predložene kao tipične u [1]. Pri modelovanju generatora zanemareno je magnetno zasićenje, dok su otpornosti uzete u obzir.

2.2. Model turbine i turbinskog regulatora

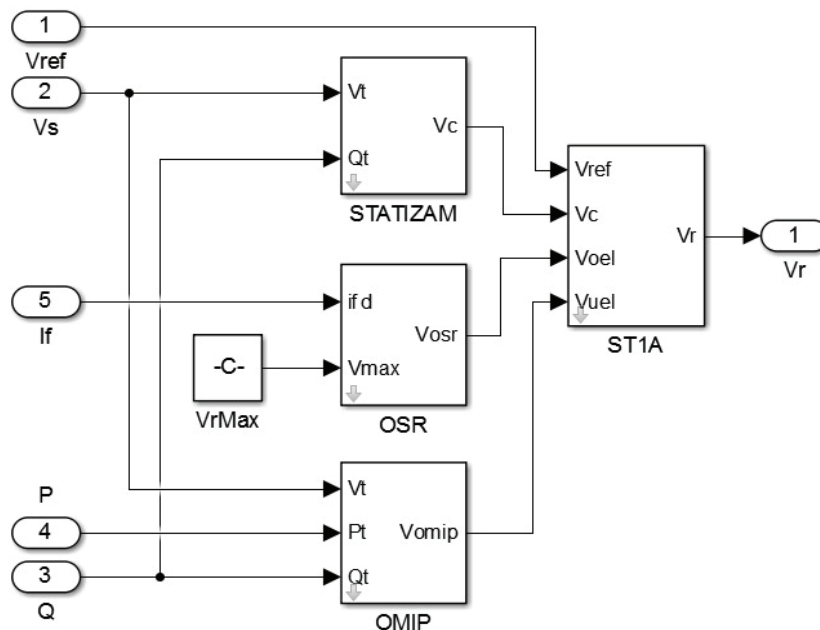
S obzirom na to da turbina i turbinski regulator nisu esencijalni delovi matematičkog modela u proučavanju naponske regulacije, u ovom istraživanju su predstavljeni uprošćenim modelom prema [5]. Turbinski regulator je modelovan statičkom karakteristikom i integratorom. Model turbinskog regulatora je prikazan na Slici 3a). Tipične vrednosti parametara modela su: statizam $R=4\%$, u odnosu na nominalnu snagu generatora i vremenska konstanta $T_{GV}=0,2s$. Turbina je predstavljena kao uprošćena turbina bez međupregrejača pare, kao u referentnoj literaturi. Model turbine preuzet je iz literature [5] i prikazan na Slici 3b). Tipična vrednost vremenske konstante T_{CH} je $0,3s$.



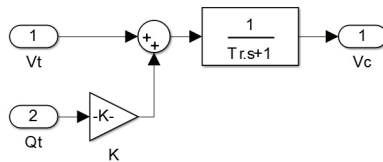
Slika 3a). Model turbinskog regulatora i b) Model parne turbine bez međupregevanja

2.3. Model sistema pobude

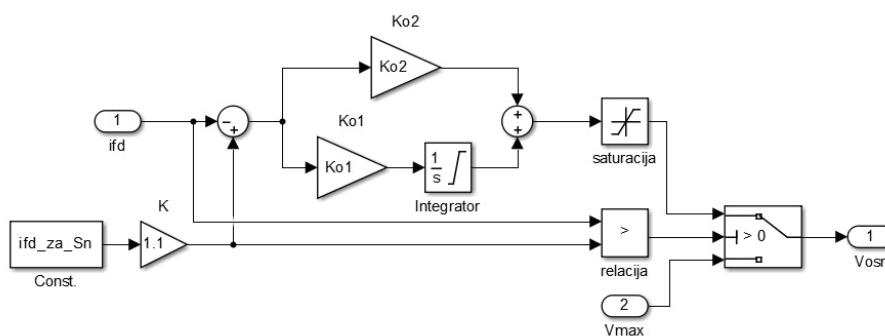
Pobudni sistem i automatski regulator napona (ARN) su osnovni elementi regulacione petlje po reaktivnoj snazi bloka. U simulaciji su korišćeni standardni IEEE modeli, [6], [7] i [8], Slika 4. Za mašine A1, A2, A6, B1, B2 korišćen je ST1A model iz Simulinkove biblioteke modela, a za A3, A4 i A5 model AC7, prema [7]. Podaci iz kojih su izračunate vrednosti parametara modela preuzeti su iz [9].



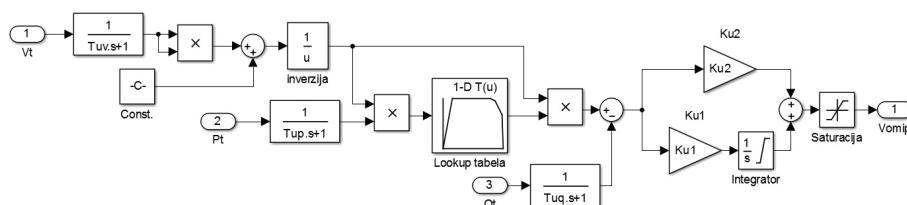
Slika 4a). Uprošćeni model automatskog regulatora pobude u Simulinku – pregled



Slika 4b). Uprošćeni model automatskog regulatora pobude u Simulinku - naponski statizam



Slika 4c). Uprošćeni model automatskog regulatora pobude u Simulinku - OSR



Slika 4d). Uprošćeni model automatskog regulatora pobude u Simulinku - OMIP

2.4. Model transformatora

Model transformatora u Simpowersystem biblioteci podrazumeva korišćenje cele ekvivalentne šeme transformatora. Međutim, za potrebe formiranja modela termoelektrane korišćena je samo impedansa transformatora u r.j. pošto je to bio jedini podatak u tehničkoj dokumentaciji proizvođača.

2.5. Model mreže

Mreža je povezana na sabirnice elektrane, i to za svake sabirnice posebno. Mreža je modelovana Thevenin-ovim ekvivalentnim kolom, koje se sastoji iz Thevenin-ovog napona i ekvivalentne Thevenin-ove impedanse. Thevenin-ov ekvivalentni napon je modelovan kao konstantni naponski izvor. Thevenin-ova impedansa je određena na osnovu snage kratkog spoja posmatranih sabirnica. Otpornosti u VN mreži su zanemarene, u skladu sa odnosom reaktansi i otpornosti. Podužna induktivna otpornost jednostrukih 220 kV i 400 kV vodova iznosi oko 0,4 Ω /km, a podužne otpornosti su oko 11 puta manje za 400 kV vodove, odnosno oko 7 puta manje za 220 kV vodove. Ekvivalentna Thevenin-ova impedansa je procenjena na osnovu snimaka promena napona i odgovarajuće promene odate reaktivne snage na sabirnicama.

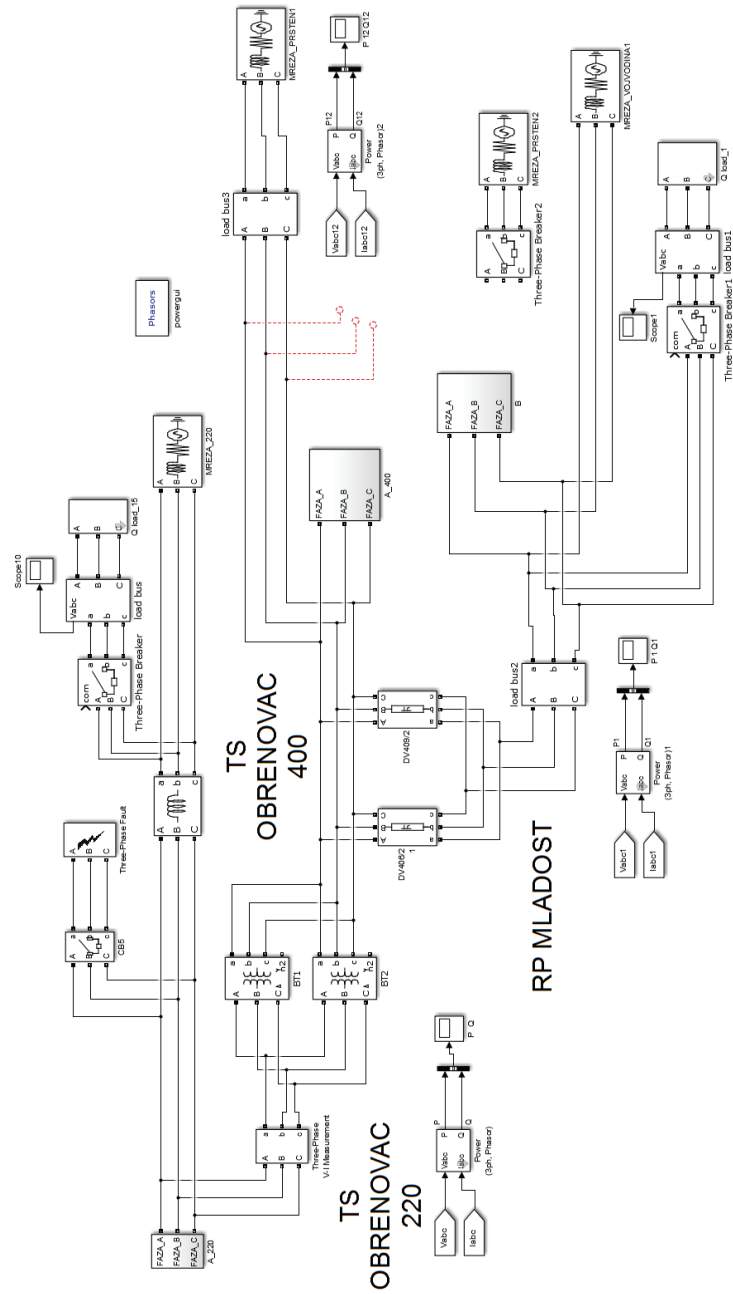
Na Slici 5 prikazan je uprošćeni model TENT A i TENT B realizovan u Simulink/Matlab okruženju.

3. Verifikacija modela TENT A i TENT B

Da bi se dokazala upotrebljivost razvijenog modela rezultati simulacije su poređeni sa odzivima snimljenim u elektrani. Postignuto je vrlo dobro poklapanje rezultata simulacija izvedenih u razvijenom modelu u Simulinku za potrebe proučavanja naponsko-reaktivne regulacije i realnih snimaka na test termoelektrani.

Verifikacija je obuhvatila tri nivoa provere:

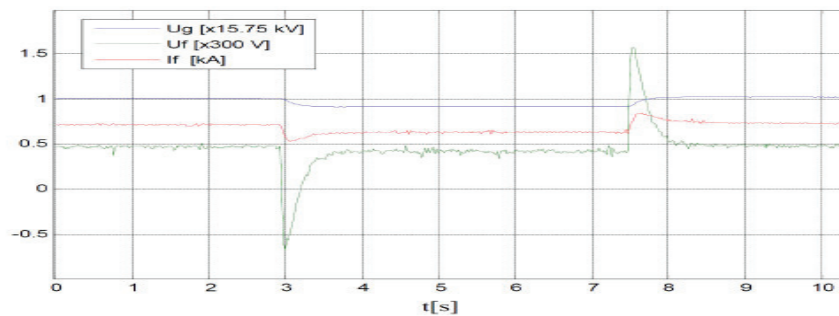
- Prvi nivo obuhvata verifikaciju modela jednog generatora sa pobudom i blok-transformatorom.
- Drugi nivo je jedan stepen iznad i obuhvata verifikaciju modela generatora sa pobudom i blok-transformatorom koji su vezani na sabirnice 220 kV u TENT A.
- Treći nivo predstavlja verifikaciju kompletnog modela TENT A na 220 i 400 kV sa modelovanim mrežama priključenim na 220 kV i 400 kV.



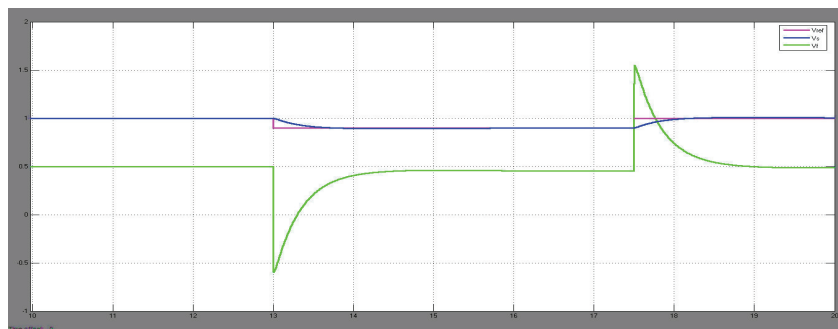
Slika 5. Model TENT A i TENT B u Simulink/Matlab okruženju

3.1. Verifikacija modela generatora sa pobudom

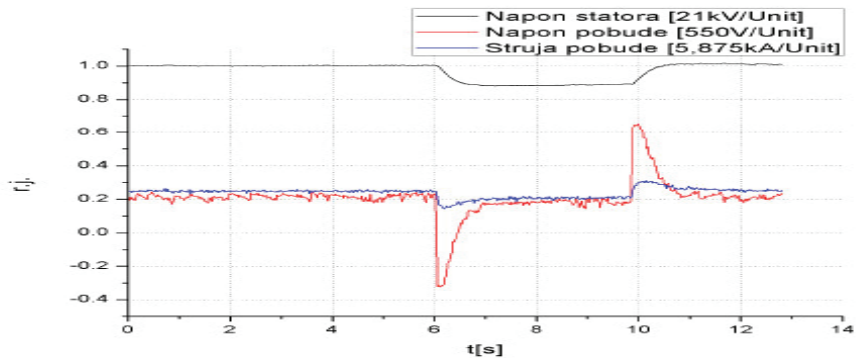
Snimci odziva snimljenih na elektrani upoređeni su sa rezultatima simulacije za sve generatore sa pobudama u TENT A i TENT B i dati su u [9]. Ovde se samo radi ilustracije daju odzivi i simulacije za A1 na Slikama 6a) i 6b) i B1 na Slikama 7a) i 7b). Snimci prikazuju odziv generatora pri odskočnoj promeni referentne vrednosti napona na ARN. Ovaj odziv je značajan za ispitivanje rada GRRS jer GRRS deluje na ARN promenom reference. Promena reference izaziva promenu napona na krajevima statora pa se posledično, kada je generator vezan na mrežu, menja i tok reaktivne snage. Ovim snimcima se proverava odziv bloka koji obuhvata generator sa sistemom regulacije pobude. Odzivi pokazuju dobro poklapanje rezultata simulacije sa odzivima snimljenim na samom objektu. To znači da su modeli generatora i pobude korektno izabrani i parametrisani.



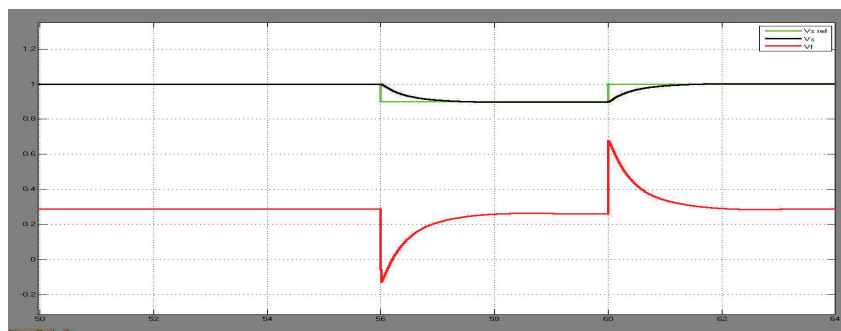
Slika 6a). Odzivi snimljeni na TENT A, generator A1 [9]: If (struja pobude generatora), Ug (napon generatora), Uf (napon pobude generatora)



Slika 6b). Odzivi generatora A1 dobijeni simulacijom: Vs (napon generatora) [r.j.], Vref (referentni napon generatora) [r.j.], Vf (napon pobude generatora) [x300 V]



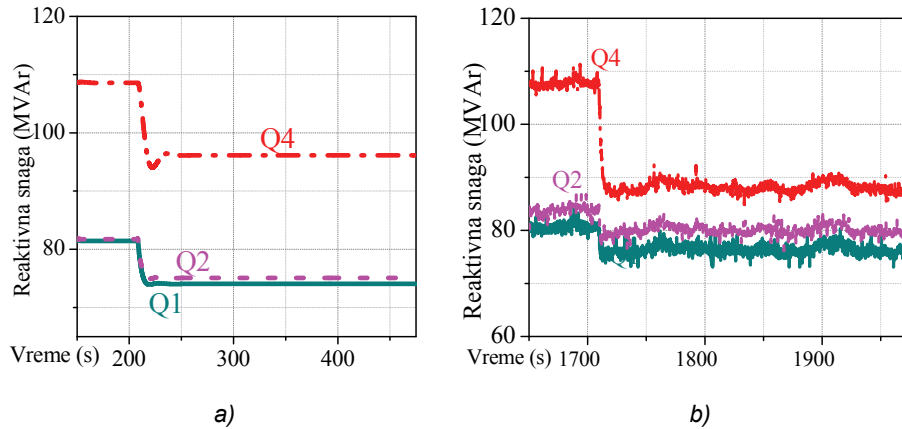
Slika 7a). Odzivi snimljeni na TENT B, generator B1 [9]: I_f (struja pobude generatora), U_g (napon generatora), U_f (napon pobude generatora)



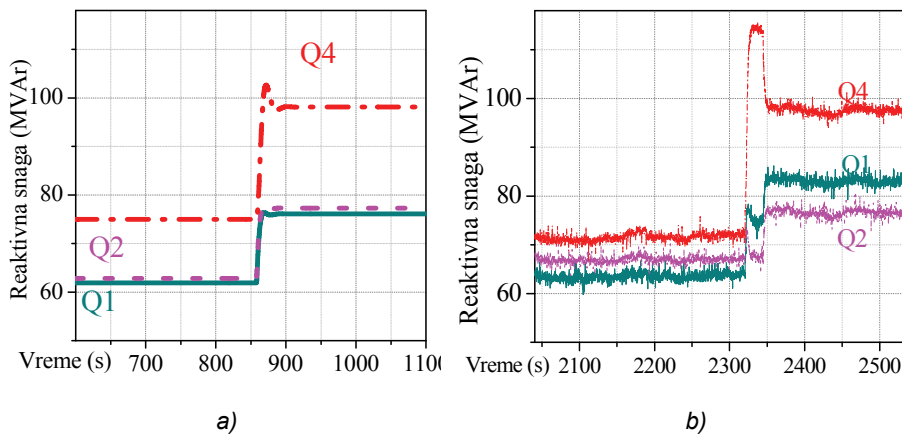
Slika 7b). Odzivi generatora B1 dobijeni simulacijom: V_s (napon generatora) [r.j.], V_s ref (referentni napon generatora) [r.j.], V_f (napon pobude generatora) [x550 V]

3.2. Verifikacija modela generatora sa pobudom i blok-transformatorom koji su vezani na sabirnice 220 kV u TENT A

Rezultati simulacije prikazani su na Slikama 8a) i 9a), dok su snimci odziva na realnoj elektrani prikazani na Slikama 8b) i 9b). Tri od četiri generatora su radila na 220 kV sabirnicama, A1, A2 i A4. Tabela 2 definiše radnu tačku snimljenu na TENT A i daje stvarne proizvedene aktivne snage generatora i odgovarajuće granične vrednosti mogućih reaktivnih snaga za sve generatore prema njihovim pogonskim dijagramima. Snimani su odzivi svih generatora u radu pri odskočnim promenama ukupno zahtevane reaktivne snage. Mala razlika u reaktivnim snagama agregata u realnoj termoelektрани potiče od diskretnog koraka promene reaktivne snage na generatorima, koji je posledica diskretne vrednosti koraka promene reference napona na ARN.



Slika 8. Odskočna promena ukupne reaktivne snage sa 272 MVar na 246 MVar, Reaktivne snage generatora: Q1 (tamno zelena, puna), Q2 (roze, crta-crta), Q4 (crvena, tačka-tačka)
a) rezultati simulacije, b) snimak sa TENT A



Slika 9. Odskočna promena ukupne reaktivne snage sa 200 MVar na 250 MVar Reaktivne snage generatora: Q1 (tamno zelena, puna), Q2 (roze, crta-crta), Q4 (crvena, tačka-tačka)
a) rezultati simulacije, b) snimak sa TENT A

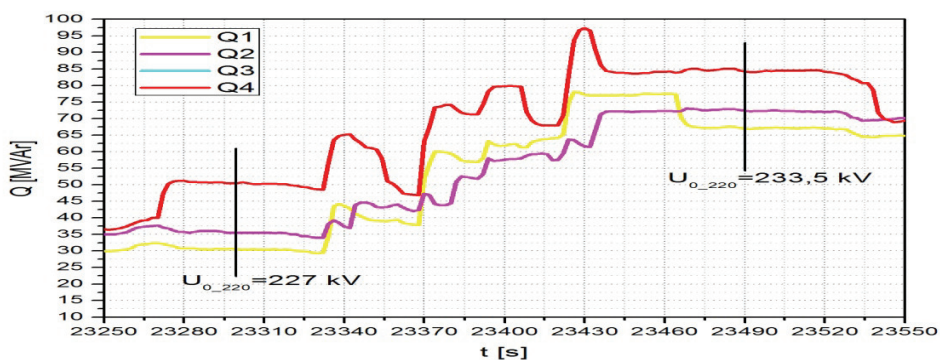
Snimcima na Slikama 8 i 9 se proverava odziv svih generatora vezanih za iste sabirnice. Između generatora postoji međusobno dejstvo zbog tokova reaktivnih snaga. Odzivi pokazuju dobro poklapanje rezultata simulacije sa odzivima snimljenim na samom objektu. To pokazuje da su modeli generatora, pobude, tokovi reaktivnih snaga u elektrani i model mreže priključen na sabirnice korektno izabrani i parametrisani.

Tabela 2. Radna tačka elektrane na 220 kV

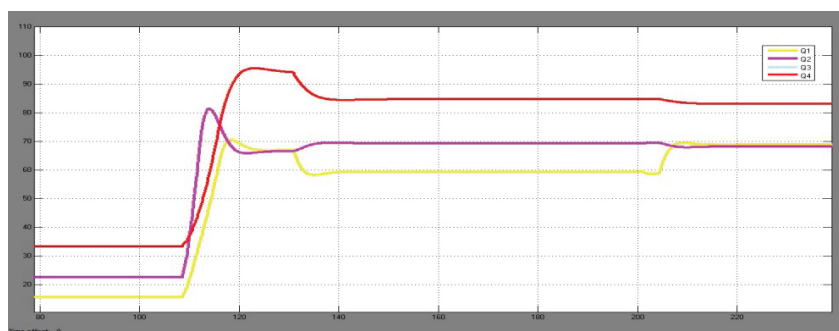
| | P (MW) | Q_{min} (MVar) | Q_{max} (MVar) |
|----|----------|------------------|------------------|
| A1 | 179,7 | -10,3 | 147,4 |
| A2 | 184,1 | -5,9 | 145,9 |
| A3 | 0 | 0 | 0 |
| A4 | 255,7 | -48,1 | 223,9 |

3.3. Verifikacija modela TENT A na 220 kV i na 400 kV

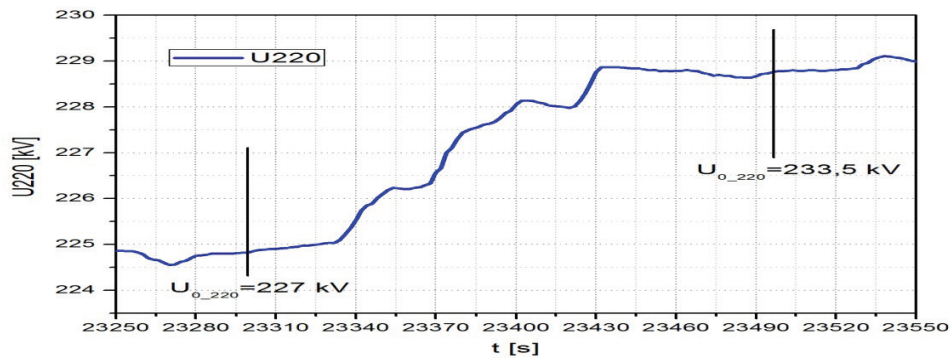
Snimci odziva snimljenih na elektrani prikazani su na Slikama 10a), 11a), 12a) i 13a), dok su rezultati simulacije prikazani na Slikama 10b), 11b), 12b) i 13b). Snimani su odzivi svih generatora u TENT A pri odskočnim promenama



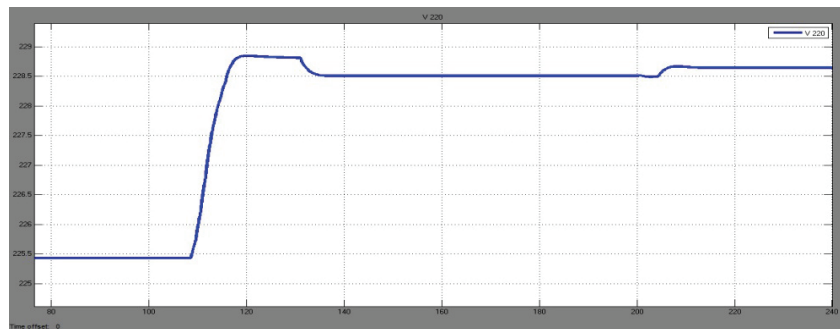
Slika 10a). Odzivi reaktivnih snaga generatora A1, A2, A3 i A4 snimljeni u TENT A



Slika 10b). Odzivi reaktivnih snaga generatora A1, A2, A3 i A4 dobijeni simulacijom



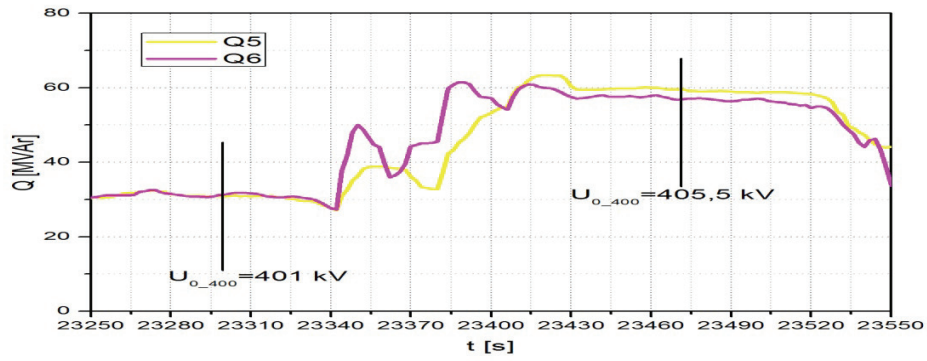
Slika 11a). Odziv napona 220 kV sabirnica snimljen u TENT A



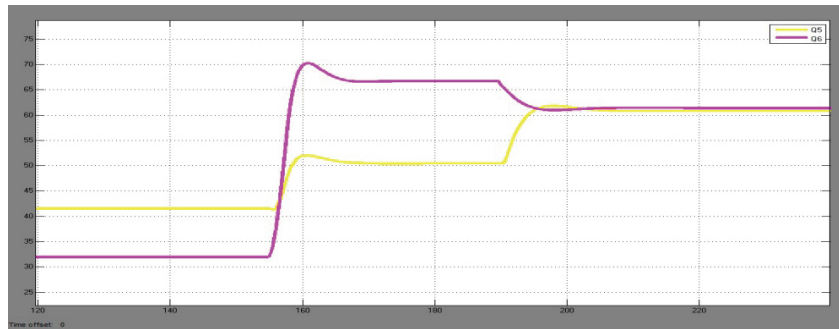
Slika 11b). Odziv napona 220 kV sabirnica dobijen simulacijom

ukupno zahtevane reaktivne snage. Tri od četiri generatora su radila na 220 kV sabirnicama, A1, A2 i A4. Na elektrani je promena ukupno zahtevane reaktivne snage vršena u više koraka. U simulaciji je ta promena zadata odjednom. Mala razlika u reaktivnim snagama agregata između snimaka na realnoj termoelektrani i rezultata simulacija potiče od diskretnog koraka promene reaktivne snage na generatorima, koji je posledica diskretne vrednosti koraka promene reference napona na ARN. Vertikalne linije pokazuju tačke u kojima je vršena validacija modela. Proveravano je poklapanje kako odziva reaktivnih snaga, tako i odziva napona.

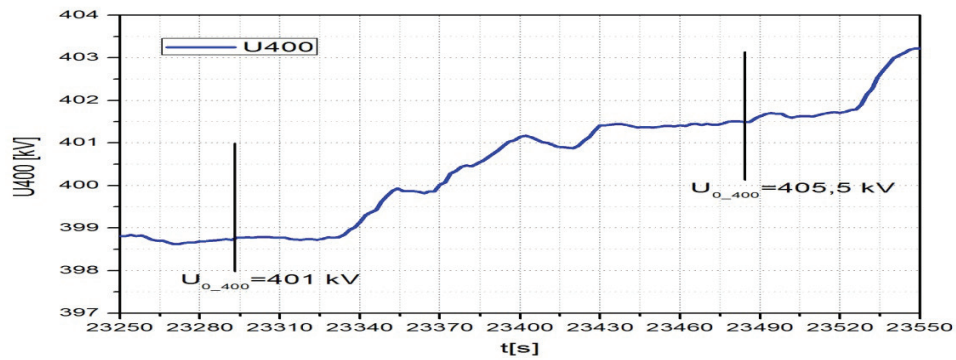
Snimcima na Slikama 10,11,12 i 13 se proverava odziv svih generatora vezanih za iste sabirnice, kao i međusobni uticaj generatora i mreža vezanih za sabirnice različitih naponskih nivoa. Između generatora i mreža postoji međusobno dejstvo zbog tokova reaktivnih snaga. Odzivi pokazuju dobro poklapanje rezultata simulacije sa odzivima snimljenim na samom objektu.



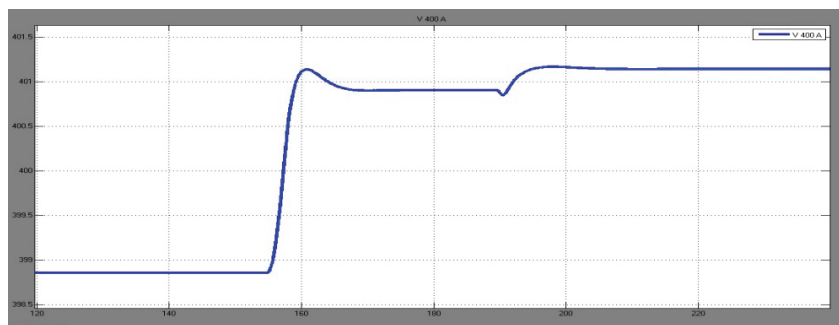
Slika 12a). Odzivi reaktivnih snaga generatora A5 i A6 snimljeni u TENT A



Slika 12b). Odzivi reaktivnih snaga generatora A5 i A6 dobijeni simulacijom



Slika 13a). Odziv napona 400 kV sabirnica snimljen u TENT A



Slika 13b). Odziv napona 400 kV sabirnica dobijen simulacijom

4. Zaključak

U ovom radu prikazan je model termoelektrane razvijen u Matlab/Simulink okruženju za potrebe proučavanja tokova reaktivne snage i naponsko-reaktivne regulacije napona na VN sabirnicama u termoelektrani sa više generatora. Razvijeni model se koristi za ispitivanje međusobnog uticaja generatora vezanih na VN sabirnice različitih naponskih nivoa, zatim za ispitivanje uticaja poremećaja u mreži srednjeg i dugog trajanja. Takođe, model je pogodan za ispitivanje uticaja različitih podešenja statizama po naponu generatora, kao i statizma VN sabirnica. Razvijeni i verifikovani model pokazuje visok nivo slaganja sa snimcima dobijenim iz eksploatacije TENT A i TENT B.

U daljem razvoju potrebno je ispitati ponašanje razvijenog modela u ekstremnim uslovima, kada dolazi do odrade limitera.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TP33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora“, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

5. Literatura

- [1] M. S. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema, Tom 2, Regulacija napona i reaktivnih snaga*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1997.
- [2] N. Rajaković, *Analiza elektroenergetskih sistema II*, Akademska misao, Beograd, 2008.

- [3] M. Čalović, A. Sarić, "An Interactive Procedure for the Coordination of Decoupled VAR/VOLT Control in Radial Distribution Systems", *European Transactions Electrical Power - ETEP*, Vol. 7, No. 3, pp. 191-197, ISSN 1430-144X, 1997.
- [4] *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses*, IEEE Std 1110-1991, March 1991.
- [5] IEEE committee report, "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, No.6, pp.1904-1915, 1973.
- [6] *IEEE Standard definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*, ANSI/IEEE Std 421.1-1986, IEEE, New York, 1986.
- [7] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std P421.5-1992, 1991.
- [8] IEEE Committee Report, Excitation Systems Models for Power System Stability Studies, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981.
- [9] Studija: „I faza – sistemski parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a“, urađeno za JP "Elektroprivreda Srbije", Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, 2013.

Abstract: In this paper, a mathematical model of the thermal power plants TENT A and TENT B, developed for voltage and reactive power control simulation purposes, is presented. The model is developed using the Simulink/Matlab program platform. All important elements, such as synchronous generator, step-up transformer, turbine and governor, excitation system, automatic voltage regulator (ARN) and the network, connected to the power plant's bus bars, are modelled with the complexity level required for studying the problems of interest. In the first part, a review of the hierarchical voltage control in the system is given, because the coordinated reactive power regulator (GRRS) has to be embedded in future processes of voltage control automatization on higher levels and "smart" control in the power system. For the needs of studying the HV bus bars voltage control, as well as reactive power allocation within the power plant in manual and automatic control mode, a series of simulations was performed. For verification purposes, the simulation results are compared to the on-site measurements. An excellent match of simulated and recorded results is achieved.

Keywords: thermal power plant modelling, Simulink/Matlab, HV bus bar Q-V control

Modelling of Thermal Power Plant for the Needs of Q-V Characteristic Control on HV Bus Bars

Rad primljen u uredništvo: 16.10.2015. godine.
Rad prihvaćen: 5.11.2015. godine.

