



A1 01

## PARALELAN RAD GRUPNIH REGULATORA POBUDE I REAKTIVNE SNAGE U DVE BLISKE ELEKTRANE

J. Dragosavac, Ž. Janda, T. Gajić, S. Dobričić, J. Pavlović, D. Arnautović\*

Dušan Ivanić, B. Radojičić \*\*

\*Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Univerzitet u Beogradu  
BEOGRAD

\*\*PD Termoelektrane “Nikola Tesla”  
OBRENOVAC

SRBIJA

**Kratak sadržaj** — U radu je prikazan paralelan rad dva uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivne snage (GRPRS) koji su instalirani u dve najveće termoelektrane (TE) u Srbiji, TE „Nikola Tesla A“ i TE “Nikola Tesla B”. Osnovna namena uređaja GRPRS je da vrši sporu regulaciju napona na sabirnicama na koje je elektrana priključena automatskim podešavanjem nivoa generisanih reaktivnih snaga generatora. Svrha primene uređaja GRPRS je: i) ravnomerno odazivanje agregata na promene u EES, ii) sprečavanje rada generatora u delovima pogonske karte u kojima može doći npr. do pregrevanja (i vremenom oštećenja) krajnjih paketa limova statora, iii) vraćanje radne tačke generatora nakon poremećaja u radnu tačku pre poremećaja. Paralelan rad dva uređaja predstavlja kritični režim rada sa aspekta mogućeg preliivanja reaktivne snage između elektrana pa je testiran na simulacionom polju koje je razvijeno za ove potrebe. Simulaciono polje obuhvata simulator u kome su modelovani svi blokovi i delovi mreže priključeni na 400kV-ni nivo u trafostanici „Obrenovac“ i razvodno postrojenje „Mladost“. Ispitivanja su pokazala da su ispunjeni uslovi za paralelan rad uređaja GRPRS i pri tome je dobijen stabilan odziv u uslovima koji odgovaraju realnoj eksploataciji.

**Ključne reči** — reaktivna snaga - grupna regulacija pobude - sinhroni generator.

### 1 UVOD

U uslovima deregulacije tržišta električne energije, javlja se snažna tendencija za korišćenjem prenosnih i proizvodnih kapaciteta na granicama njihovih projektovanih vrednosti. To nameće snažnu potrebu za boljom kontrolom naponskih prilika u sistemu, boljim održavanjem naponskih profila,

---

\* jasna.dragosavac@ieent.org

odnosno za maksimizaciju propusne moći i vodova za potrebe prenosa aktivne snage minimizacijom tokova reaktivne snage. Grupni regulator pobude i reaktivnih snaga ([1],[2] i [3]) vrši sporu regulaciju napona na sabirnicama na koje je elektrana priključena automatskim pode-avanjem nivoa generisanih reaktivnih snaga. Prednosti primene uređaja GRPRS su:

- GRPRS vrši automatsko, jednovremeno i efikasno upravljanje reaktivnim režimom elektrane (održava zadato  $Q$ ) i obezbeđuje raspodelu reaktivnog opterećenja među paralelno vezanim sinhronim generatorima (SG) preko blok transformatora,
- Time se postiže ravnomerna raspodela  $Q$  među generatorima, a prema mogućnostima koje određuju pogonske karte i dodatnim tehničkim ograničenjima,
- GRPRS održava naponsko-reaktivnu karakteristiku sabirnica elektrane (U- $Q$  regulacija),
- Svrha grupne regulacije je ravnomerno odazivanje agregata na promene u elektroenergetski sistem (EES) i rad u okviru pogonskog dijagrama pri raznim uslovima.

Grupnu regulaciju agregata u okviru elektrane potrebno je realizovati kako bi se uravnotežila eksploatacija agregata:

- GRPRS sprečava rad generatora izvan dozvoljenih vrednosti napona i reaktivnih snaga, odnosno van pogonske karte agregata.
- GRPRS omogućava rukovaocu agregata da pri postojanju dodatnih tehničkih ograničenja (npr. kvar na pojedinim delovima opreme kao što je rashladni sistem blok-transformatora) ograniči vrednost proizvedene reaktivne snage u okviru fleljenog opsega.
- Na ovaj način se sprečava rad generatora u delovima pogonske karte u kojima može doći i npr. do pregrevanja (i vremenom oštećenja) krajnjih paketa statora ili pregrevanja blok transformatora.

Uređaj za GRPRS u TENT A je u trajnom radu od maja 2011. godine. U TENT B je isporučen uređaj GRPRS 2014. godine. S obzirom da su TENT A i TENT B najveće termoelektrane u Srbiji bilo je potrebno ispitati odziv uređaja u paralelnom radu pre puštanja uređaja GRPRS na TENT B u rad. Fabrika ispitivanja uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga GRPRS izvršena su radi demonstracije postignutih projektovanih performansi uređaja u TENT B.

### 1.1 Razvoj simulacionog polja za potrebe ispitivanja uređaja GRPRS

Za potrebe ispitivanja paralelnog rada napravljeno je simulaciono polje. Simulaciono polje treba da omogući ispitivanje i parametrizaciju uređaja GRPRS, proveru paralelnog rada grupnog regulatora reaktivnih snaga (GRPRS) u TENT A i GRPRS u TENT B.

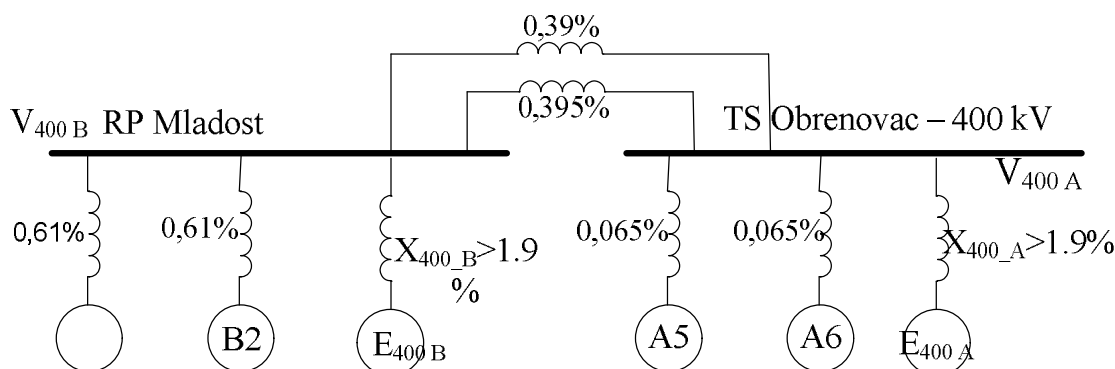
Simulaciono polje obuhvata Simulator u kome su modelovani blokovi A5 i A6 u TENT A i B1 i B2 u TENT B, vodovi izmeću trafostanice (TS) šobrenovac i razvodnog postrojenja (RP) šmlost, elektroenergetska mreža priključena na TS šobrenovac i mreža priključena na RP šmlost, Sl. 1.

Ograničenja prema pogonskim kartama blokova B1 i B2, su uneta u kontrolni program GRPRS. Napravljen je simulator grupnog regulatora reaktivnih snaga i napona sabirnica u TENT A za generatore A5 i A6, nazvan GRPRS\_A. Simulator je identične strukture kao jedan od regulacionih programabilnih logičkih kontrolera (PLC) koji je korišten u uređaju GRPRS na TENT A. Komunikacija između uređaja GRPRS i GRPRS\_A nije uspostavljena tako da ispitivanja odgovaraju radu ova dva uređaja kada nema međusobne komunikacije.

Cilj ovih ispitivanja je da omogući testiranje uređaja GRPRS i da ta nije inicijalno pode-avanje njegovih parametara, kao i da se izvrši provera rada dva uređaja u uslovima kada nije moguće ostvariti paralelan rad generatora A5 i A6 u TENT A i B1 i B2 u TENT B na mreži. Uz pomoć simulacionog polja moguće je reprodukovati različite režime rada TENT B kao što su noćni rad i rad sa aktivnom snagom bliskom nominalnoj. Zahvaljujući tome, u toku fabričkih ispitivanja, predstavnici TENT B su predložili nekoliko radnih režima za test i demonstriran je rad uređaja GRPRS pod zadatim uslovima.

## 1.2 Simulator dela EES između TENT A i TENT B

Model tokova reaktivnih snaga za termoelektranu (simulator) razvijen je za potrebe ispijavanja i parametrizaciju uređaja GRPRS u laboratoriji i na samoj elektrani. Simulator u sebi uključuje modele sinhronog generatora, pobudnog sistema, blok-transformatora, statiku karakteristiku blok-transformatora i generatora kada je generator regulisan pomoću automatskog regulatora napona (ARN). Sinteza simulatora izvršena je na osnovu snimaka rezultata eksperimenata izvedenih na elektrani. Parametri generatora i ARN su procenjeni na osnovu odziva snimljenih na samoj elektrani. Simljene su prenosne funkcije od interesa: odzivi napona i struja generatora ili reaktivne snage pri odskočnoj promeni reference ARN pošto GRPRS ostvaruje svoje dejstvo kroz ulaz za promenu reference i to putem male odskočne promene reference [4]. Dalje, da bi se dobio kompletan model termoelektrane, u model su uključene i reaktanse blok-transformatora i mreže. Tako je izvršena korekcija tokova generisanih reaktivnih snaga generatora zbog uticaja tokova aktivnih snaga. Kontinualni matematički model je diskretizovan i implementiran na standardnoj PLC platformi. PLC platforma je izabrana kao pouzdana oprema sa potrebnim industrijskim sertifikatima za primenu na elektrani i adekvatno rešenom elektromagnetnom kompatibilnošću. Razvijeni simulator proveren je nizom eksperimenata izvedenih u laboratoriji.



Sl. 1 Uprošćena jednopolna šema TS "Obrenovac", RP "Mladost", TS TENT A i RP TENT B

## 1.3 Model pobude i automatskog regulatora napona

Pobudni sistem i automatski regulator napona (ARN) su osnovni elementi regulacione petlje po reaktivnoj snazi generatora. Zbog toga su u modelu korišćeni podaci dobijeni iz odziva snimljenih na elektranama TENT A i TENT B. Snimljene su prenosne funkcije od interesa: odziv reaktivne snage ili napona i struja generatora pri odskočnoj promeni reference ARN-a pošto GRPRS ostvaruje svoje dejstvo kroz ulaz za promenu reference, i to putem promene reference u malim koracima [4]. Prenosne funkcije su date izrazom (1), a koeficijenti su dati u tabeli I u relativnim jedinicama (r.j.).

$$G(s) = \frac{b_1 \cdot s + b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (1)$$

TABELA I Koeficijenti prenosne funkcije ARN

|           | $a_2$  | $a_1$  | $a_0$  | $b_1$  | $b_0$   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| <b>B1</b> | 1,5052 | 1,6185 | 1,6562 | 0,892  | 1,6333  |
| <b>B2</b> | 5,0874 | 2,0478 | 1,253  | 2,4661 | 0,978   |
| <b>A5</b> | 49,999 | 21,401 | 1,8276 | 14,388 | 1,351   |
| <b>A6</b> | 3,15   | 44,058 | 17,331 | 6,75   | 18,2448 |

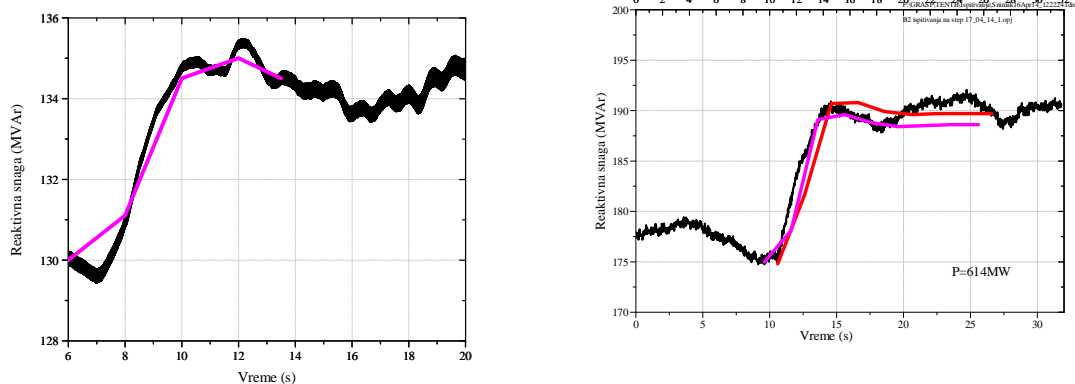
TABELA II PARAMETRI BLOK-TRANSFORMATORA

|               | $S_n$  | $U1/U2$    | Sprega | uk    |
|---------------|--------|------------|--------|-------|
| <b>B1-1AT</b> | 725MVA | 21kV/410kV | Ynd5   | 13,1% |
| <b>B2-2AT</b> | 725MVA | 21kV/410kV | Ynd5   | 13,1% |

Na slici 2 prikazan je postignuti odziv generatora kao osnovne jedinice razvijenog PLC simulatora. Provera i potvrđivanje je urađeno za generatore B1 i B2. Procenjeni odzivi generatora vrlo dobro su se poklopili sa odgovarajućim rezultatima merenja na termoelektrani, sl. 2.

#### 1.4 Model transformatora

U modelu je korišćena samo impedansa transformatora u r.j. pošto je to bio jedini podatak u tehničkoj dokumentaciji proizvođača. Nominalni parametri blok-transformatora dati su u tabeli II.



Sl. 2 Odziv reaktivne snage generatora B1 (levo) i B2 (desno) na odskočnu promenu reference ARN kada generator radi na mreži: Snimljeno na test elektrani sa akvizicionim sistemom (crna linija), procenjen odziv (crvena i roze linija)

#### 1.5 Model mreže

Mreža povezana na sabirnice elektrane, i to za svake sabirnice posebno, je modelovana Theveninovim ekvivalentnim kolom koje se sastoji iz Thevenin-ovog napona i ekvivalentne Thevenin-ove impedanse. Thevenin-ova impedansa je određena na osnovu snage kratkog spoja posmatranih sabirnica. Otpornosti u VN mreži su zanemarene. Podufna induktivna otpornost jednostrukih 400kV-nih vodova iznosi oko 0,4  $\Omega$ /km, a podufne otpornosti su oko 13 puta manje za 400 kV-ne vodove.

#### 1.6 Model TENT A i TENT B

Uprošteni model tokova reaktivnih snaga u TENT A i TENT B, korišćen u simulatoru prikazan je na Sl. 1, [4], [5].

## 2 DIZAJN SIMULATORA REALIZOVANOG NA PLC-u

Za potrebe praktične realizacije simulatora (sl. 4) tokova reaktivnih snaga termoelektrane izabrana je PLC platforma zbog kompaktnosti, jednostavnog povezivanja sa okolnom opremom u toku ispitivanja u laboratoriji i elektrani i imunosti na elektromagnetne smetnje koje su na elektrani uvek izrađene. Prednosti upotrebe PLC platforme ogledaju se u tome što su lako dostupne, konfigurabilne (jednostavno se mogu dodavati različiti moduli, ulazno-izlazni digitalni i analogni, komunikacioni itd), vrlo pouzdane, kompaktne i transparentne za primenu različitih komunikacionih protokola i mreža i imaju potrebne industrijske sertifikate što ih dodatno čini povoljnim i za druge primene na elektrani. Takođe, za prenos mernih signala su realizovane strujne petlje 4÷20mA na analognim izlazima simulatora, tako da su u orman GRPRS TENT B uvedeni isti signali koji će biti korišćeni na objektu TENT B.

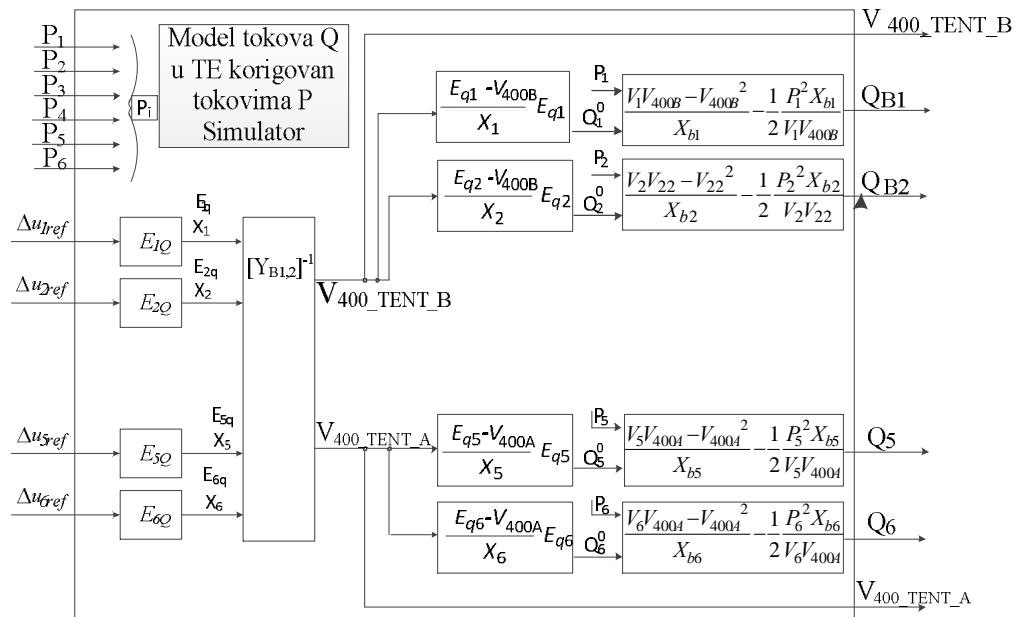
### 3 OPIS NAČINA POVEZIVANJA GRPRS TENT A I GRPRS TENT B

Predlog je da se grupni regulatori reaktivne snage -GRPRS na TENT A i TENT B, povežu u jedinstven sistem komandovanja radi optimalne raspodele rezervi reaktivne snage i održavanja fiksiranih naponsko-reaktivnih karakteristika vora RP šMladost i TS šObrenovac. Zato je neophodno ostvariti komunikaciju između uređaja GRPRS u realnom vremenu. Uređaji GRPRS na TENT A i TENT B su komunikaciono povezani preko Intranet mreže. Pošto se korporativna mreža za prenos podataka koristi dominantno za poslovne potrebe i pošto obim saobraćaja u ovoj mreži ne može da se potpuno predvidi, u određenim momentima pri komunikaciji između GRPRS na TENT A i TENT B može doći do promjenljivog kašnjenja u razmeni informacija. Najgori slučaj bi bio potpuni prekid komunikacije i taj slučaj je detaljno proveren u toku ispitivanja.

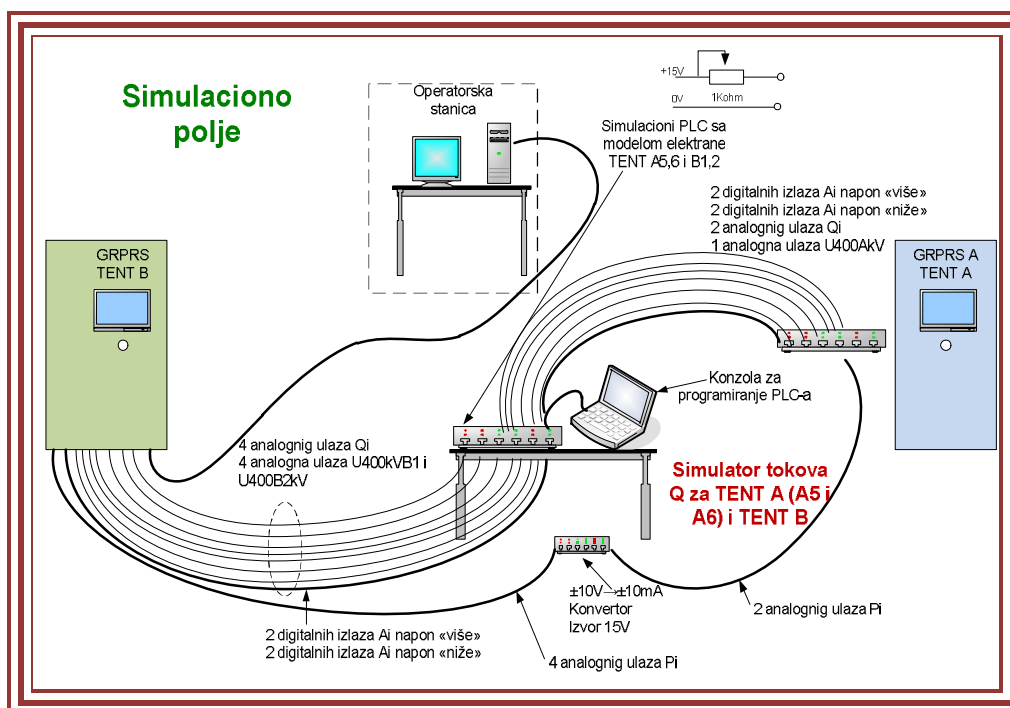
### 4 SIMULACIJA PARALELANOG RADA GRPRS TENT A I GRPRS TENT B

Najosetljivija tačka u toku ispitivanja uređaja GRPRS je paralelan rad ovog uređaja kada istovremeno radi GRPRS A. Na sl. 1 se uočava da je ukupna reaktansa spojnih vodova TS šObrenovac i RP šMladost 0,196%. To znači da generatori A5 i A6 i B1 i B2 regulišu dve električne bliske tačke. U isto vreme snaga generatora A5 i A6 je znatno manja od snage B1 i B2. Podeljenjem statizama sabirница umerava se šdoprinos različitih generatora iz dve elektrane prema njihovim raspoloživim reaktivnim snagama. Slike 5 i 6 ilustruju paralelan rad uređaja GRPRS A i B. Simulaciono polje nije bilo osposobljeno za skupljanje podataka sa GRPRS A, tako da su prikazani odzivi blokova B1 i B2.

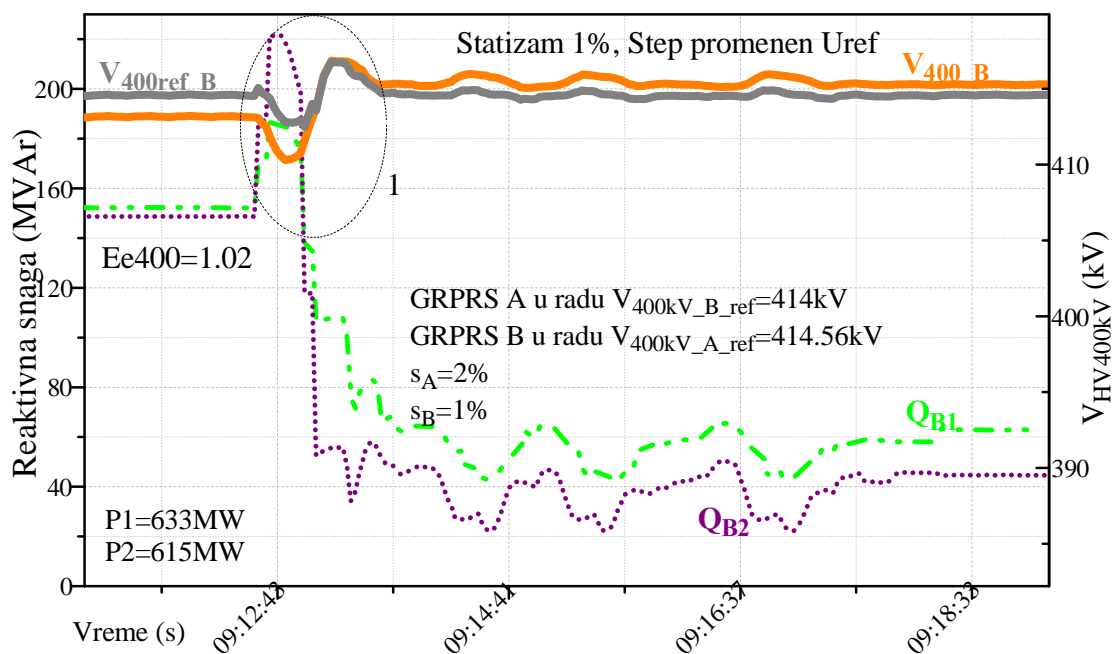
Sl. 5 pokazuje da nakon poremećaja i promene uslova u mreži GRPRS normalno održava statiku Q-V karakteristiku. U 09:12:43 promenjena je Thevenin-ov napon sa 1,01 r.j. na 0,99 r.j. i potom na 1,02 r.j. Nakon poremećaja i dejstva automatskih regulatora napona u okviru pobude, GRPRS A i GRPRS B prilagođavaju nivo generisanih reaktivnih snaga generatora i postavljaju radnu tačku elektrane u polovinu pre poremećaja.



Sl. 3 Model tokova snaga u TENT A i TENT B korišćen u simulaciji  
 $E_{iq}$  i  $X_i$  su ekvivalentni Thevenin-ovog napona i ekvivalentne Thevenin-ove impedanse

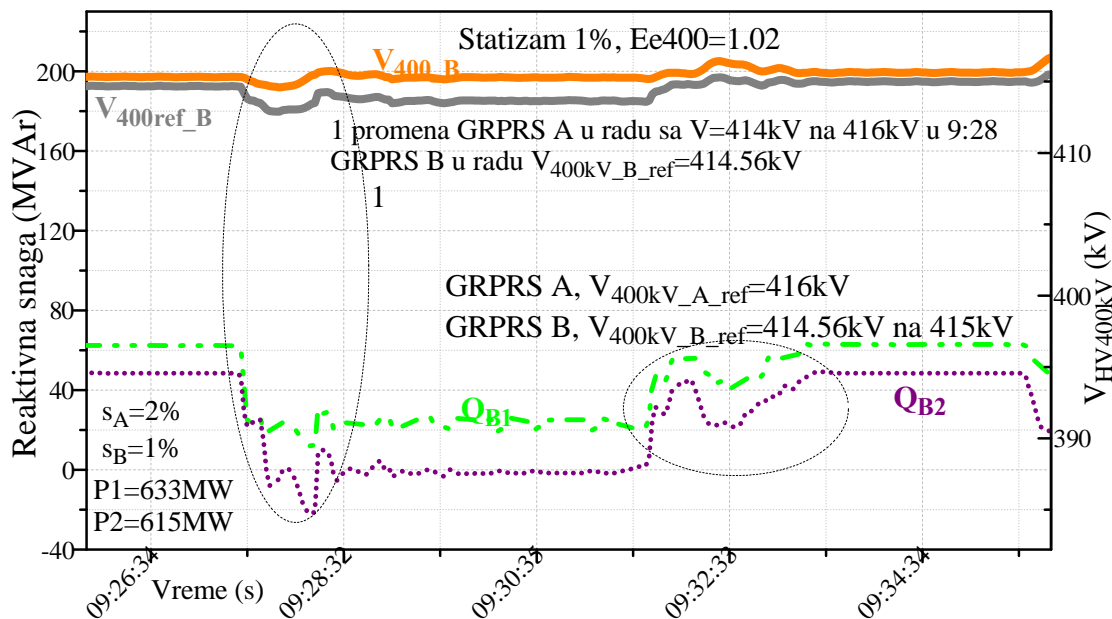


Sl. 4 Blok šema Simulacionog polja za ispitivanja GRPRS



Sl. 5 Paralelan rad GRPRS TENT A i GRPRS TENT B nakon poremećaja i promene uslova u mreži-simulacija

**Error! Reference source not found.** ilustruje uslove u kojima GRPRS A i GRPRS B menjaju nezavisno vrednosti referentnih napona. Prelazni proces traje od 1 min do 2 min bez značajnijeg preliivanja reaktivne snage. U zavisnosti od postavljenih referentnih vrednosti  $V_{Hvref}$  jedna ili druga elektrana održava napon na 400kV. Regulacija je stabilna i radne tačke obe elektrane se nalaze na fleljenim naponsko-reaktivnim karakteristikama.



Sl. 6 Paralelan rad GRPRS TENT A i GRPRS TENT B- simulacija

## 5 ZAKLJUČAK

Ispitivanja uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) su izvršena u laboratoriji Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" u cilju dokazivanja ispunjenosti projektnih zahteva. Zbog potrebe da se ispita paralelan rad bliskih termoelektrana uključenih u grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga napravljeno je ispitno simulaciono polje.

GRPRS uspešno izvršava sve projektnim zadatkom definisane funkcije sa potrebnom tačnošću u regulaciji: i) uspešno održava napon visokonaponskih sabirnica sa zadatom statikom karakteristikom, ii) nivo generisanih reaktivnih snaga automatski prilagođava nivou generisanih aktivnih snaga, što je bitno za određivanje reaktivne rezerve blokova koji ulaze u sekundarnu regulaciju u stanosti i rade sa brzo promenljivom aktivnom snagom, iii) sprečava ulazak radne tačke generatora u nedozvoljene oblasti rada. GRPRS omogućava rukovaocu agregata da pri postojanju dodatnih tehničkih ograničenja (npr. kvar na pojedinim delovima opreme kao što je rashladni sistem blok-transformatora) ograniči vrednost proizvedene reaktivne snage u okviru fleljenog opsega. Na ovaj način se sprečava rad generatora u delovima pogonske karte u kojima može doći i npr. do pregrevanja (i vremenom oštećenja) krajnjih paketa statora ili pregrevanja blok transformatora.

Proveren je i paralelan rad uređaja GRPRS u TENT A i u TENT B kada rade kao nezavisni uređaji bez komunikacije među njima. Prelazni proces traje do 2 minuta i uvek se postigne stabilna radna tačka, u skladu sa teorijskim modelom pojave, koji definiše prihvatljive vrednosti parametara oba uređaja. Grupna regulacija agregata koji su vezani na 400kV sabirnice omogućava jednostavno umeravanje veličine odziva svakog agregata. Pri tome se naponi sabirnica održavaju kontinualno u vremenu. Pri promeni podešenja referentnih vrednosti napona ne dolazi do preliivanja reaktivnih snaga s obzirom na upotrebljeni koncept simultane promene referentnih signala. Nakon pojave poremećaja u elektroenergetskom sistemu GRPRS uspešno vraća napon na sabirnicama na vrednost pre poremećaja, prilagođava reaktivne snage generisane u generatorima i tako povoljno utiče na povećanje naponske stabilnosti. Ispitivanja uređaja za GRPRS omogućila su po etno podešavanje parametara GRPRS. Konačno podešavanje je izvršeno na objektu TENT-B nakon ostvarivanja mogućnosti za paralelan rad agregata. Praktično prikazan koncept međusobne koordinacije uređaja GRPRS primenljiv je i u slučaju višesusednih elektrana koje su opremljene sa ovakvim uređajima, bilo povezanim u mrežu, bilo nezavisno upravljanim sa tercijarnog nivoa. Na taj način bi bilo omogućeno koordinisano održavanje naponskih prilika u delu EES, odnosno u pripadajućoj zoni uticaja pri čemu se reaktivna

snaga raspodeljuje izme u elektrana u skladu sa njihovim mogu nostima u datom trenutku realnog vremena.

## 7 ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, šPove anje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i ure aja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnolo-kog razvoja Republike Srbije.

## 8 LITERATURA

- [1] R. Milijanovi , šGrupno upravljanje agregatima u elektrani, Monografija, Elektrotehni ki institut šNikola Tesla, Beograd, 1986.
- [2] J. Dragosavac, fi. Janda, T. Gaji , S. Dobri i , J. Pavlovi , D. Arnautovi , šGrupna regulacija pobude i reaktivnih snaga u elektrani, *Zbornik radova EI "Nikola Tesla"*, 23, p.85-98 Beograd 2013.
- [3] D. Arnautovi , J. Dragosavac, fi. Janda, T. J. Milanovi , Lj. Mihajlovi , šDefinisanje uslova za rad ure aja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) u sistemu automatskog upravljanja naponima u mreži, *Zbornik radova EI "Nikola Tesla"*, knjiga 24, str. 1-14, Beograd 2014
- [4] J. Dragosavac, fi. Janda, T. Gaji , J.Pavlovi , D.Arnautovi , Lj.Mihajlovi „Realizacija simulatora reaktivne snage elektane TENT A radi ispitivanja grupnog regulatora reaktivne snage, *Zbornik radova EI "Nikola Tesla"*, 19.p.157-168, Beograd 2010
- [5] Yao-nan Yu šElectric power system dynamics, Academic press, New York, 1983.

### PARALLEL OPERATION OF TWO JOINT EXCITATION AND REACTIVE POWER CONTROLLERS (JEQC) INSTALLED IN THE TWO CLOSE STEAM POWER PLANTS

J. Dragosavac, Ž. Janda, T. Gajić, S. Dobričić, J. Pavlović, D. Arnautović\*  
Dušan Ivanić, B. Radojčić \*\*

\*Electrical engineering Institute “Nikola Tesla”, University of Belgrade  
BELGRADE

\*\*Steam Power Plant “Nikola Tesla”  
OBRENOVAC

**Abstract—** The paper presents the case of parallel operation of two nearby installed joint excitation and reactive power controllers (JEQC) in two largest steam power plants (SPP) in Serbia, SPP "Nikola Tesla A" and "Nikola Tesla B". The main purpose of the JEQC is to perform a slow voltage control of busbars by automatically adjusting the levels of generated reactive powers of the generators. The purpose of the proposed JEQC application is: i) to achieve the uniform responses of all generators to the power system disturbances, ii) to prevent generator operation in forbidden areas of the capability chart where overheating of stator core can occur, iii) to restore operating point of the generator after a major disturbance to the pre-fault value. The parallel operation is a critical operation in terms of a possible exchange of reactive power between the nearby power plants and that ability has been tested on a simulation setup that was developed for this purpose. The simulation setup includes simulator which



models all the necessary blocks and parts of networks connected to the 400kV level in the power substation "Obrenovac" and switchyard "Mladost". Tests conducted have shown the full satisfaction of all necessary conditions for parallel operation of two JEQC devices and the stable responses have been demonstrated in all practical scenarios.

*Key words* — Reactive Power, Joint Excitation and Reactive Power Control, Synchronous generator.