

## Modeli sistema regulacije pobude generatora u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija

Milan Ivanović, Dragan P.Popović, Đorđe Stojić, Slavko Veinović, Dušan Joksimović, Saša Minić<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu  
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija  
[mivanovic@ieent.org](mailto:mivanovic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu se izlažu modeli sistema regulacije pobude generatora koji se koriste u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. Najpre se daje generalna struktura i funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude, uz presek sadašnjeg stanja ove regulacije u EES Srbije. Zatim, daje se prikaz modela sistema regulacije pobude koji može biti korišćen u analizama kratkotrajne dinamike, u kojima dominiraju analize tranzijentne stabilnosti. Dalje, daje se model koji može biti korišćen u analizama dugotrajne dinamike. Prikazani modeli, uz prethodnu verifikaciju, baziranu na eksperimentalnim merenjima, inkorporirani su u odgovarajuće računarske programe za analize dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. U završnom poglavlju ovog rada dati su neki od karakterističnih primera njihove primene.

**Ključne reči:** model, sistem regulacije, pobuda, generator, kratkotrajna, srednjetrojna i dugotrajna dinamika, EES Srbije

### 1. Uvod

Analize statičke i dinamičke sigurnosti elektroenergetskih sistema (EES), odnosno elektroenergetskih interkonekcija (EI) u kojima se oni nalaze, i dalje imaju jedno od centralnih mesta u savremeno koncipiranim EMS (Energy Management Systems). To je povezano sa obezbeđenjem potrebnog nivoa sigurnosti rada savremenih EI, što i dalje ima izuzetan praktičan značaj i aktuelnost. Fenomenološki, kao i metodološki gledano, analize sigurnosti EES dele se na dve osnovne grupe: statičke i dinamičke.

U analizama statičke sigurnosti, posledice analiziranih poremećaja utvrđuju na se bazi procene postdinamičkih kvazistacionarnih stanja, pomoću

odgovarajućih modela tokova snaga. Ovi modeli samo impliciraju dinamički prelazni proces, koji se neminovno javlja nakon poremećaja. Njihova sposobnost za više ili manje tačnom procenom uspostavljenih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja zavisi od same vrste modela tokova snaga (konvencionalni ili nekonvencionalni) i od načina odgovarajućeg inkorporiranja efekata postojeće sistemske automatike, regulacije i zaštite.

Analize dinamičke sigurnosti, koje su ključni predmet pažnje ovog rada, obuhvataju najpre analize statičke stabilnosti, u kojima se kvantifikuju efekti koji bi nastali nakon tipičnih "malih regularnih poremećaja" (na primer, simultana promena ukupne aktivne i reaktivne snage potrošača za nekoliko procenata). Dalje, u okviru ove grupe analiza obavlja se praćenje toka i efekata kratkotrajnih, brzih dinamičkih procesa trajanja i do 10 s (između ostalog, obuhvaćeni su aspekti tranzijentne (ne)stabilnosti). Zatim, obavlja se praćenje toka i efekata srednjetrojnih (trajanja od 10 s do 60 s) i dugotrajnih (trajanja i do 20 min) dinamičkih procesa.

Problematika adekvatnog matematičkog modelovanja u analizama sigurnosti savremenih EI, jedna je od najznačajnijih i najsloženijih. U pitanju su veoma kompleksni procesi, na koje, u interakciji, neposredan uticaj imaju elementi, odnosno komponente, veoma složene strukture. U okviru analiza sigurnosti savremenih EI, posmatra se i analizira funkcionisanje EI u celini, tako da su predmet pažnje tipovi matematičkih modela koji se uobičajeno koriste za te svrhe, i za koje je, tamo gde je to bilo moguće, izvršena odgovarajuća standardizacija.

Predmet pažnje ovog rada je prikaz matematičkih modela sistema regulacije pobude generatora, koji se uobičajeno koriste u analizama dinamičke sigurnosti savremenih EI. Kada su u pitanju analize statičke sigurnosti, bazirane na odgovarajućim modelima tokova snaga, ključni parametar u modelu sistema regulacije pobude je koeficijent statizma naponske regulacije generatora [1], uz striktno uvažavanje ograničenja po reaktivnoj snazi generatora.

Problematici modelovanja sistema regulacije pobude, u analizama dinamičke sigurnosti, posvećen je veliki broj radova inostranih i domaćih autora, koje nije moguće sve citirati u okviru raspoloživog prostora za ovaj rad. Umesto toga, navodi se referenca [2], u okviru koje su, uz precizno navođenja izvora, izloženi modeli sistema regulacije pobude različite strukture i složenosti, zavisno od vrste analiziranog prelaznog procesa, kao i vrste, cilja i složenosti analiza. Takođe, još se navode i reference [3-20], koje su pomogle u osmišljavanju postavljenog cilja, bez pretenzija da je njima obuhvaćeno sve što je relevantno za ovu temu.

Dalje, u osmišljavanju postavljenog cilja adekvatnog modelovanja sistema regulacije pobude generatora, za potrebe sistemskih analiza, korišćeni su eksperimentalni rezultati studije "*Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a (faza I)*", koju Institut "Nikola Tesla" radi za potrebe Elektroprivrede Srbije. Njen osnovni cilj je da izvrši odgovarajuće provere, snimanja, ispitivanja, podešavanja i analize relevantnih parametara.

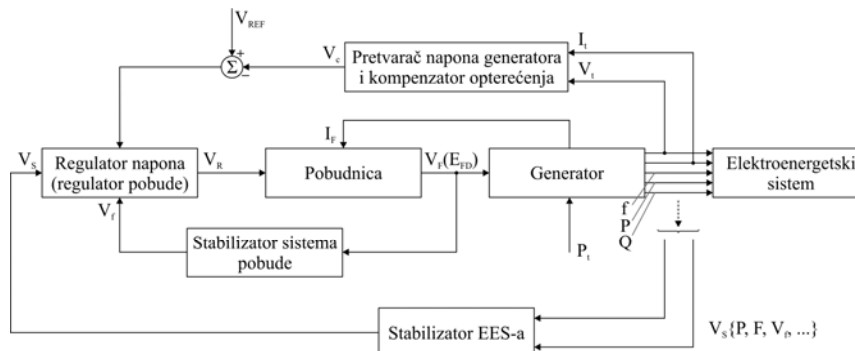
tara sistema regulacije pobude i sistema turbinske regulacije agregata, odnosno blokova, u svim elektranama EPS. Zahvaljujući njenom eksperimentalnom delu, između ostalog, bilo je omogućeno utvrđivanje strukture i relevantnih parametara modela sistema regulacije pobude, prisutnih u EES Srbije.

Prethodno rečeno obrazlaže i objašnjava osnovne motive i razloge za nastanak ovog rada. U njemu je najpre data generalna struktura i funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude, a zatim i presek sadašnjeg stanja ove regulacije u EES Srbije. Dalje, dat je prikaz modela koji se koriste u analizama kratkotrajne dinamike, u kojima dominiraju analize tranzijentne stabilnosti. Ti modeli mogu biti od praktične koristi i u analizama srednjetrojne dinamike. Nakon toga, izložen je model sistema regulacije pobude koji se koristi u analizama dugotrajne dinamike.

Prikazani modeli su, nakon odgovarajuće verifikacije, bazirane na sprovedenim eksperimentalnim ispitivanjima, inkorporirani u odgovarajuće računarske programe za analize dinamičke sigurnosti, koji su razvijeni u Institutu "Nikola Tesla". Neki od karakterističnih primera njihove primene dati su u završnom poglavlju ovoga rada.

## 2. Generalna struktura i funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude generatora

Na slici 1 je data generalna struktura i funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude generatora, u okruženju EES-a, direktno preuzeto iz [2].



Slika 1. Generalna struktura i funkcionalni blok sistema regulacije pobude generatora, u okruženju EES-a

Na slici 1, direktno preuzete iz [2], korišćene su sledeće oznake:

$V_{REF}$  - referentni signal napona na ulazu u sistem za regulaciju pobude;  
 $V_c$  - izlazni signal iz pretvarača napona generatora i kompenzatora opterećenja;

$V_{ERR}$  - naponska greška na ulazu u regulator pobude ( $V_{ERR} = V_{REF} - V_c$ );

$V_R$  - izlazni (upravljački) signal iz regulatora pobude;

$V_f$  - pobudni napon sinhronog generatora;

- $E_{FD}$  - indukovana elektromotorna sila statora, proizvedena pobudnom strujom koja odgovara pobudnom naponu  $V_F$ , pri radnoj temperaturi namotaja rotora, računata po karakteristici medugvožda sinhronog generatora;
- $f$  - učestanost naizmjenične struje u sistemu;
- $V_b, I_t$  - napon i struja na krajevima generatora;
- $I_F$  - pobudna struja generatora;
- $P, Q$  - aktivna i reaktivna snaga na krajevima generatora;
- $V_f$  - izlazni signal iz stabilizatora sistema pobude;
- $V_{S1}$  - dodatni signali koji se koriste kao ulazi u stabilizator elektroenergetskog sistema,  $V_{S1}=f\{P, f, V_F, \dots\}$ ;
- $V_S$  - izlaz iz stabilizatora elektroenergetskog sistema;
- $P_T$  - mehanička snaga pogonske mašine (turbine) na osovini generatora.

Dakle, generalno gledano, svaki sistem regulacije pobude se sastoji od energetskog dela (pobudnica ili budilica) preko koga se energija predaje pobudnom namotaju generatora i regulacionog dela koji vrši upravljanje pretvaračem prema unapred definisanom zakonu. U zavisnosti od tipa sistema pobude, energetski deo (pretvarač) može biti električna mašina - budilica (jednosmerni ili naizmjenični generator), poluprovodnički energetski pretvarač (tiristorski ili diodni most) ili njihova kombinacija.

Intezivna interaktivna sprega sistema regulacije pobude generatora sa veličinama stanja EES je veoma kompleksna. Kvantifikuje se posredstvom odgovarajućih, po pravilu nelinearnih algebarskih i diferencijalnih jednačina, koje nisu mogle da budu predmet ovoga rada, s obzirom na ograničen raspoloživi prostor. Jedan od načina realizacije te sprege, za uslove odvijanja kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa, može se naći u [21].

Generalno gledano, kod simulacije sinhronih generatora u različitim studijama regulacije i stabilnosti EES, neophodno je da se sve komponente, uključujući i sisteme regulacije pobude, modeluju što je moguće jednostavnije, ali sa dovoljno detalja značajnih za konkretnu praktičnu primenu. Imajući u vidu veliki broj različitih realizacija sistema regulacije pobude, u dosadašnjoj praksi se pokazalo neophodnim da se utvrdi definicija pojmova i da se standardizuju terminologija i modeli raznovrsnih sistema pobude koji se najčešće koriste.

Generalno gledano, kod simulacije sinhronih generatora u različitim studijama regulacije i stabilnosti EES, neophodno je sve komponente, uključujući i sisteme regulacije pobude, modelovati što je moguće jednostavnije, ali sa dovoljno detalja značajnih za konkretnu praktičnu primenu. Imajući u vidu veliki broj različitih izvedbi sistema regulacije pobude, u dosadašnjoj praksi se pokazalo neophodnim utvrđivanje definicija pojmova i standardizacija terminologije i modela raznovrsnih sistema pobude koji se najčešće koriste.

O tome, detaljno je bilo reči u referenci [2], u kojoj je dat i istorijski put formiranja ovih standarda, korelisan sa daljim tehnološkim inovacijama u realizaciji sistema regulacije pobude. U [2] je istaknuto, da su, u tom kontekstu, najznačajniji IEC standardi [3] i preporuke američkog IEEE Komiteta za si-

nhrone mašine, publikovanih u šest članaka [4, 5, 6, 7, 8, 9] i standardu [10], u kojima su normirane definicije i modeli sistema pobude, koje se mogu primenjivati u studijama stabilnosti i regulacije EES.

Dakle, za potrebe sistemskih analiza, sa generalnog modela, prikazanog na slici 1, prelazi se na modele različite strukture i složenosti, zavisno od vrste, cilja i složenosti analiza, ali i u skladu sa postojećim stanjem ove regulacije u realnim EES, odnosno EI. Jedan od načina ove dedukcije, za realno stanje ove regulacije u EES Srbije, je predmet ovoga rada.

### **3. Prikaz postojećeg stanja sistema regulacije pobude generatora u EES Srbije**

Klasifikacija sistema pobude prema vrsti izvora pobudne struje, konstrukciji i prema vrsti dejstva, za elektrane u EES Srbije prikazana je u tabeli 1.

U studiji [15] bile su proučavane vrste, osobine i karakteristike sistema pobude, tada (2005. godina) ugrađenih na agregatima i blokovima u EPS. U njoj je sa razlogom naglašeno da pojedini sistemi pobude, kao što su jednosmerni sa generatorima jednosmerne struje, nisu u stanju da odgovore savremenim zahtevima zbog tehničke, tehnološke i funkcionalne zastarelosti. Predloženo je, takođe sa razlogom, da ove sisteme pobude što pre treba zameniti novim, statičkim sistemima pobude sa digitalnim regulatorima. Dalje, u [15] je bilo istaknuto, da je kod naizmeničnih sistema pobude moguće zadržati generatore naizmenične struje, a da se osavremenjavanje izvrši zamenom zastarelih selenskih i diodnih ispravljača savremenim tiristorskim pretvaračima i mikroprocesorskim upravljanjem. Ujedno, istaknuto je da neke od postojećih statičkih sistema pobude, zbog starosti, nedovoljne funkcionalnosti i fleksibilnosti, treba delimično ili potpuno zameniti savremenim sistemima pobude.

Zatim, imajući u vidu starost, konstrukciju i funkcionalne mogućnosti, konstatovano je da bi bilo neophodno zameniti elektromehaničke i elektromagnetne regulatore pobude. Razlog za to je veoma oskudna raspoloživost rezervnih delova za ovu vrstu regulatora, tako da bi u slučaju njihovog kvara bio ugrožen nastavak rada. Takođe je konstatovano da je, zbog starenja elektronskih komponenti, neophodno pripremiti dobar deo analognih elektronskih regulatora za zamenu, odnosno za funkcionalno osavremenjavanje sistema za regulaciju napona.

U međuvremenu, došlo je do značajnih pozitivnih promena u ovoj problematici u nas, kao što se može sagledati iz pokazatelja u tabeli 1. Dakle, sa prethodno navedenih reči prešlo se na dela, uz punu podršku i saradnju Elektroprivrede Srbije. Te promene su navedene u radu [16], u kome su prikazani dosadašnji rezultati rada Instituta "Nikola Tesla" na planu razvoja, projektovanja, proizvodnje i puštanja u rad novih pobudnih sistema u EPS. Pri tom, posebna pažnja je posvećena razvijenim digitalnim automatskim regulatorima napona, u okviru kojih statizam naponske regulacije ima značajnu funkciju.

**Tabela 1.** Osnovne karakteristike sistema regulacije pobude u elektranama u EES Srbije

| Elektrana         | Generatori | Izvor pobudne struje    | Konstrukcija regulatora pobude | Vrsta dejstva regulatora |
|-------------------|------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| TE Nikola Tesla A | 1, 2, 6    | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
|                   | 3          | Naiz., GP + PB (SM)     | AP                             | Prop.                    |
|                   | 4, 5       | Naiz., GP + PB (SM)     | MP                             | Prop, If                 |
| TE Nikola Tesla B | 1, 2       | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| TE Kolubara A     | 1, 2       | JSM, GP + PB (JSM)      | EL.Meh                         | Prop.                    |
|                   | 3, 4       | JSM, GP + PB (Naiz.)    | EL.Mag                         | Prop.                    |
|                   | 5          | JSM, GP + PB (Naiz.)    | MP                             | Prop, If                 |
| TE Morava         | 1          | JSM, GP + PB (100 Hz)   | MP                             | Prop, If                 |
| TE Kostolac A     | 1          | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
|                   | 2          | JSM, GP + PB (400 Hz)   | EL.Mag                         | Prop.                    |
| TE Kostolac B     | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| TETO Novi Sad     | 1, 2       | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| TETO Zrenjanin    | 1          | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| TETO S. Mitrovica | 1          | Rotirajući diodni       | AP                             | Prop.                    |
| HE Đerdap 1       | 1 - 5      | Naizmienični upravljivi | AP                             | Mvar, sil                |
|                   | 6          | Naizmienični upravljivi | MP                             | Mvar, sil                |
| HE Đerdap 2       | 1, 2, 7, 8 | Statički samopobudni    | AP                             | Mvar, stab               |
|                   | 3, 4, 5, 6 | Statički samopobudni    | AP                             | Mvar, sil                |
|                   | 9, 10      | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| HE Bajina Bašta   | 1, 2, 3, 4 | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Zvornik        | 1, 2, 3, 4 | JSM, 1p                 | AP                             | Prop.                    |
| HE Bistrica       | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Potpeć         | 1, 2, 3    | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Kokin Brod     | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Uvac           | 1          | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| HE Pirot          | 1, 2       | Statički samopobudni    | AP                             | Prop.                    |
| HE Vrla 1         | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
|                   | 3, 4       | JSM, 1p                 | AP                             | Prop.                    |
| HE Vrla 2         | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Vrla 3         | 1          | JSM, GP + PB (JSM)      | EL.Meh                         | Prop.                    |
|                   | 2          | JSM, 1p                 | AP                             | Prop.                    |
| HE Vrla 4         | 1          | JSM, GP + PB (JSM)      | EL.Meh                         | Prop.                    |
|                   | 2          | JSM, 1p                 | AP                             | Prop.                    |
| HE Ovčar Banja    | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| HE Međuvršje      | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Prop.                    |
| RHE Bajina Bašta  | 1, 2       | Statički samopobudni    | MP                             | Mvar, stab               |

**Izvor pobudne struje**

Statički samopobudni Statički sis. pobude sa samopobuđivanjem  
 Naiz., GP + PB (SM) Naizm. sis. pobude sa GB i PB (PB je SG sa stalnim magnetima, 150 Hz)  
 JSM, GP + PB (JSM) JSM sis. pobude sa GB i PB (PB je generator JSM struje)  
 JSM, GP + PB (Naiz.) JSM sis. pobude sa GB i PB (PB je generator naizm. struje)  
 JSM, GP + PB (100 H) JSM sis. pobude sa GB i PB (PB je generator naizm. struje, 100 Hz)  
 JSM, GP + PB (400 H) JSM sis. pobude sa GB i PB (PB je generator naizm. struje, 400 Hz)  
 Rotirajući diodni Rotirajuća pobuda sa diodnim ispravljačem  
 Naizmienični upravljiv Naizmienični sistem pobude sa upravljivim energetskim pretvaračem  
 JSM, 1p Jednosmerni sistem pobude sa jednom pobudnicom

**Konstrukcija regulatora pobude**

MP Elektronski (mikroprocesorski)  
 AP Elektronski (analogni poluprovodnički)  
 EL.Meh Elektromehanički  
 EL.Mag Elektromagnetni

**Vrsta dejstva regulatora**

Prop. Proporcionalni  
 Prop, If Proporcionalni, sa povratnom spregom po If  
 Mvar, sil Multivarijabilni (regulator silnog dejstva)  
 Mvar, stab Multivarijabilni (regulator sa stabilizatorom EES)

Kada su u pitanju statički sistemi pobude, najvažniji realizovani projekti Instituta "Nikola Tesla" su obuhvatili sledeće generatore u EES Srbije: A1, A2 i A6 u TE Nikola Tesla A, B1 i B2 u TE Kostolac B, A i B u HE Kokin Brod, A,

B i C u HE Potpeć, A i B u HE Bistrica, A1 i A2 u HE Ovčar Banja i HE Međuvrše i A1 i A2 u HE Vrla I. Rekonstrukcija statičkog sistema pobude izvršena je kod sledećih generatora: A1 u TE Kostolac A i A2 u TE-TO Novi Sad. Rekonstrukcija elektro-mašinskog sistema pobude izvršena je kod sledećih generatora: A5 u TE Kolubara A i generatora u TE Morava.

Pokazatelji u tabeli 1 su usmeravali dalji rad na problematici formiranja adekvatnih modela sistema regulacije pobude generatora, koji su pratili realno stanje ove regulacije u EES Srbije, čime se bavi naredni tekst.

## **4. Modeli sistema regulacije pobude generatora u analizama kratkotrajnih dinamičkih procesa**

### **4.1. Uvodne napomene**

U okviru analiza dinamičke sigurnosti, nezaobilazno je obuhvatanje prelaznih stanja u sistemu regulacije pobude sinhronih generatora, a posebno za analizu kratkotrajnih dinamičkih procesa. U ovim analizama obavlja se praćenje toka i efekata kratkotrajnih, brzih dinamičkih prelaznih procesa trajanja i do 10 s (u prvom redu, obuhvaćeni su aspekti tranzijentne (ne)stabilnosti).

U ranijim periodima rada Instituta "Nikola Tesla", za te svrhe su poslužili standardizovani IEEE modeli sistema regulacije pobude [2-10], koje koriste i računarski programi svetske reputacije PSS/E-29 (Power System Simulator for Engineering) [18] i DlgSILENT Power Factory, *Version 14* [19].

I pored obavljene IEEE standardizacije ovih modela, nije bilo moguće u dovoljnoj meri uvažiti raznovrsnost tipova sistema regulacije pobude, koji postoje u aktuelnoj praksi. Predloženi standardni modeli, uvažavali su tadašnju severnoameričku praksu, pa zbog toga nisu mogli da budu i standardni modeli regulatora, koji bi, bez rezerve, mogli biti korišćeni i u drugim delovima sveta. Iz toga sledi logičan i racionalan zaključak, da je pravi put da se problem modelovanja sistema regulacije pobude generatora razmatra od slučaja do slučaja, uz puno uvažavanje specifičnosti pojedinih konstrukcija regulatora. Upravo to je, kako je već bilo istaknuto, cilj ovog rada. U daljem tekstu izloženo je rešenje problema adekvatnog modelovanja sistema regulacije pobude, uz respektovanje njenog postojećeg stanja u EES Srbije.

U kontekstu prethodnog, trebalo bi naglasiti da se u okviru pomenutih modela ne nalazi model multivarijabilnog, odnosno višeulaznog sistema regulacije pobude, koji postoji u EES Srbije, u HE Đerdap 1 i HE Đerdap 2. Iz tih razloga, posebno je razvijen model multivarijabilnog, odnosno višeulaznog sistema regulacije pobude [22], za potrebe analiza različitih karakterističnih dinamičkih stanja EES Srbije i njegovog okruženja.

Dalje, u toku rada na studiji *"Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a" (faza I)* izvršene su odgovarajuće dopune prethodno formiranog matematičkog modela sistema regulacije

pobude, saglasno rezultatima sprovedenih eksperimenata, u okviru kojih je utvrđena struktura modela i kvantifikovani njegovi relevantni parametri, a sve u cilju što većeg približavanja stvarnom stanju ove regulacije u EES Srbije. *Prva dopuna* se odnosila na uključanje koeficijenta statizma regulacije napona na krajevima generatora, veličine koja je kvantifikovana u okviru sprovedenih eksperimenata. *Druga dopuna* se odnosila na uključanje integralnog dejstva regulatora pobude, *treća dopuna*, na uključivanje forsiranja pobude, a *četvrta dopuna*, na uključanje povratne veze po struji rotora generatora. Naredni tekst se bavi ovim dopunama.

#### 4.2. Uključenje koeficijenta statizma regulacije napona na krajevima generatora

U radu [1] je prikazan način inkorporiranja koeficijenta statizma regulacije napona  $\sigma_g$  u analize statičke sigurnosti. Za potrebe analiza dinamičkih stanja, u okviru modela sistema regulacije pobude, podešenoj, referentnoj vrednosti napona generatora  $V_{REF}$ , pridodata je komponenta vezana za prisutni statizam po naponu generatora  $V_S$  u iznosu:

$$V_S = V_{GN} \sigma_g (Q_G - Q_{GO}) / Q_{GN} \quad (1)$$

gde je:

$V_{GN}$  - nominalni napon generatora;

$\sigma_g$  - koeficijent statizma regulacije napona na krajevima generatora;

$Q_G$  - tekuća vrednost reaktivne snaga generatora;

$Q_{GO}$  - vrednost reaktivne snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju;

$Q_{GN}$  - nominalna reaktivna snaga generatora.

#### 4.3. Uključenje integralnog pojačanja regulatora pobude

Kod novijih digitalnih regulatora pobude sa tiristorskim mostovima, automatska regulacija je, po pravilu, zasnovana na PI (Proporcionalno Integralnom) upravljačkom zakonu. Upravljanje nelinearnim procesom pomoću linearnih regulatora, rezultira različitim kvalitetom regulacije u različitim radnim tačkama. Pri određivanju parametara linearnog regulatora treba voditi računa o zavisnosti parametara objekta upravljanja od radne tačke i o kritičnoj radnoj tački. Zatim, za tu kritičnu radnu tačku treba odrediti parametre regulatora, čime se osigurava stabilnost u svim radnim tačkama [17].

U ovom kontekstu određivanja parametra regulatora, prazan hod sinhronog generatora ima kategoriju kritičnog režima, pošto nema reakcije indukta. Tada sinhroni generator ima najveće vrednosti pojačanja, a vremenska konstanta elektromagnetne inercije pobudnog namotaja pri otvorenom statorskom namotaju generatora ima srazmerno veliku vrednost (nekad prelaze i 10 s).

Generalno gledano, vrednosti parametara regulatora mogu biti određene metodom podešavanja mesta nula karakterističnog polinoma funkcije spregnutog prenosa posmatranog regulacionog sistema. Za podešavanje PI regu-



latora, u praksi se najčešće koristi metoda poništavanja polova [17]. Ova metoda koristi činjenicu da se dinamički efekti pola poništavaju ako u njegovoj blizini postoji nula. PI regulator sadrži jedan pol i jednu nulu. Za primenu metode poništavanja polova potrebno je podesiti pojačanja PI regulatora tako da nula regulatora poništi dominantan pol generatora. U radu [17] je pokazano da poništavanje pola zahteva da integralno pojačanje regulatora  $k_I$  ima sledeću vrednost:

$$k_I = k_{v0} / T'_{d0} \quad (2)$$

gde je:

$k_{v0}$  - pojačanje po nultom izvodu naponskog kanala sistema regulacije pobude, odnosno pojačanje proporcionalnog dejstva regulatora;

$T'_{d0}$  - vremenska konstanta elektromagnetne inercije pobudnog namotaja, pri otvorenim statorskim i ostalim rotorskim konturama.

Dakle, da bi se odredilo pojačanje  $k_I$  najpre treba odrediti pojačanje  $k_{v0}$ . U radu [11] je pokazano da  $k_{v0}$  može biti određeno na osnovu željenog vremena odziva  $t_r$ , odnosno:

$$k_{v0} = \frac{T'_{d0} \cdot \ln 9}{t_r k_G k_E} \quad (3)$$

Međutim, ovako poništavanje polova nije praktično, jer u radnim režimima figuriše vremenska konstanta pobudnog namotaja generatora, pri zatvorenom statorskom namotaju generatora. Odnosno, pri radu generatora na mreži, pol generatora će biti pomeren ulevo, u odnosu na prazan hod, pa se zbog toga nula PI regulatora postavlja sa leve strane pola u praznom hodu [17].

Saglasno prethodno izloženom o značaju integralnog dejstva regulatora pobude, izvršene su odgovarajuće dopune matematičkih modela (i računarskih programa), koji se odnose na simulaciju dinamičkih stanja. Odnosno, za potrebe analiza dinamičkih stanja, u okviru modela pobudnog sistema, uključeno je integralno dejstvo regulatora pobude. Na bazi utvrđenog pojačanja proporcionalnog dejstva regulatora  $k_{v0}$ , dolazi se do pojačanja integralnog dejstva regulatora  $k_I$ , posredstvom relacije (2).

#### 4.4. Uključenje forsiranja pobude

Plafonski napon (ili koeficijent forsiranja po naponu pobude), plafonska struja (ili koeficijent forsiranja po struji pobude) i vreme odziva su parametri od kojih zavisi odziv sistema pobude pri velikim poremećajima u EES. Pomenute veličine mogu bitno da utiču na tranzijentnu (ne)stabilnost pojedinih generatora, odnosno EES u celini.

U postojećim sistemima pobude, za napon generatora  $V_g$  između unapred zadate vrednosti napona  $V_{krG}$  (vrednost  $V_{krG}$  uobičajeno iznosi 70% nominalnog napona generatora) i vrednosti  $V_{krd}$  (vrednost  $V_{krd}$  uobičajeno iznosi 30% nominalnog napona generatora), pobuda prelazi u režim forsiranja. U re-

žimu forsiranja, regulator pobude prelazi u ručnu regulaciju, sa  $k_{fi}$  puta većom referentnom vrednošću struje pobude od nominalne (uobičajena vrednost za koeficijent forsiranja po struji pobude,  $k_{fi}$ , iznosi 1.6).

Za statičke samopobudne sisteme, razvijene u Institutu "Nikola Tesla", važi sledeće:

- kada je ispunjen uslov  $k_{fu}V_g \geq k_{fi}$ , napon pobude ima vrednost  $V_f = k_{fi}V_{fn}$
- kada je ispunjen uslov  $k_{fu}V_g < k_{fi}$ , napon pobude ima vrednost  $V_f = k_{fu}V_{fn}$  gde je  $k_{fu}$  koeficijent forsiranja po naponu pobude.

Forsiranje se nastavlja sve dok napon generatora  $V_g$  ne dostigne vrednost  $V_{krf}$  (vrednost  $V_{krf}$  uobičajeno iznosi oko 100% nominalnog napona generatora), nakon čega regulator izlazi iz režima forsiranja i vraća se u automatsku regulaciju.

Ako se za vreme od  $t_f$  (uobičajena vrednost 10 s) ne povрати nominalni napon generatora, regulator pobude izlazi iz režima forsiranja i ostaje u ručnoj regulaciji. Međutim, ako se za vreme od  $t_f$  povрати nominalni napon generatora, regulator pobude izlazi iz režima forsiranja i prelazi u automatsku regulaciju. Posle izlaska regulatora iz režima forsiranja, onemogućeno je ponovno forsiranje u periodu od 15min.

Saglasno prethodno izloženom, izvršene su odgovarajuće dopune matematičkih modela (i računarskih programa), koji su se odnosili na simulaciju dinamičkih stanja, odnosno, u modele pobudnih sistema uključeno je prethodno opisano forsiranje.

Sve navedene vrednosti, koje određuju prirodu, karakter i trajanje režima forsiranja su u korišćenim računarskim programima ulazne veličine. Sve one spadaju u kategoriju podesivih veličina, odnosno, moguće ih je promeniti, zavisno, pre svega, od rezultata analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa, pri težim kvarovima.

## 5. Uključenje povratne veze po struji rotora generatora

U EES Srbije, povratnu vezu po struji rotora generatora imaju regulatori pobude generatora A4 u TE Nikola Tesla A, A5 u TE Kolubara B i generatora u TE Morava. Saglasno tome, u okviru formiranog modela sistema regulacije pobude generatora, podešenoj, referentnoj vrednosti napona generatora  $V_{REF}$ , pridodata je i komponenta vezana za struju rotora generatora  $V_r$ , koja se formira na sledeći način:

$$V_r = k_{sr} E_q \quad (4)$$

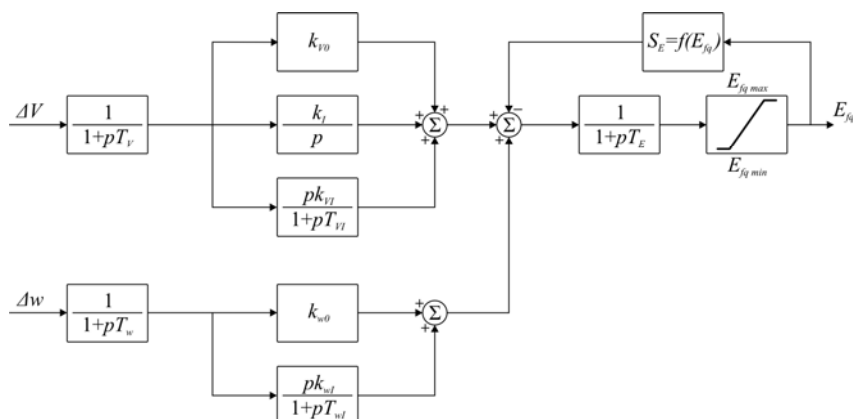
gde je:

$k_{sr}$  - pojačanje povratne veze po struji rotora generatora;

$E_q$  - elektromotorna sila generatora, uslovljena strujom pobudnog kola.

### 5.1. Formirani generalizovani model sistema regulacije pobude generatora

Prethodno izloženo, doprinelo je obogaćivanju posebno razvijenog modela multivarijabilnog sistema regulacije pobude generatora, koji je bio izložen u [22]. Strukturna šema tako formiranog modela prikazana je na slici 2, uz napomenu da model uključuje i forsiranje pobude na prethodno opisani način, što nije bilo moguće eksplicirati u njegovoj prezentaciji.



Slika 2. Strukturna šema multivarijabilnog (višeulaznog) sistema regulacije pobude

Na šemi sa slike 2, ulazna veličina naponskog kanala regulatora pobude ima oblik:

$$\Delta V = V_{REF} + V_S - V_r - V \quad (5)$$

gde je:

- $V_{REF}$  - referentna vrednost napona na krajevima statora generatora;
- $V_S$  - prethodno objašnjenja komponenta vezana za statizam po naponu generatora;
- $V_r$  - prethodno objašnjenja komponenta vezana za povratnu spregu po struji rotora generatora;
- $V$  - tekuća vrednost napona na krajevima generatora;

U strukturnoj šemi sa slike 2, uvedene oznake imaju sledeća značenja:

- $T_v, T_{vI}$  - vremenske konstante kanala napona sistema regulacije pobude;
- $k_{v0}, k_{vI}$  - pojačanja po nultom i prvom izvodu naponskog kanala;
- $k_I$  - integralno pojačanje regulatora;
- $k_{w0}, k_{wI}$  - pojačanja po nultom i prvom izvodu kanala učestanosti;
- $T_w, T_{wI}$  - vremenske konstante kanala učestanosti;
- $T_E$  - vremenska konstanta pobudnog sistema;
- $E_{fq0}$  - elektromotorna sila, srazmerna naponu pobudnog kola u polaznom, stacionarnom stanju;
- $f_{sat}(E_{fq})$  - uticaj zasićenja magnetnog kola, koje samo postoji kod elektromašinskih sistema pobuđivanja.

Ulazne veličine zavise od primenjenog načina regulacija pobude. Prikazana strukturna šema odnosi se na višeulazne, odnosno višeparametarske regulatore pobude, sa regulacijom po nultom i prvom izvodu napona i učestalosti. Takve regulatore u EES Srbije imaju generatori u HE Đerdap 1 i HE Đerdap 2.

Osnovna karakteristika prikazanog modela je fleksibilnost. Naime, njegova generalna forma omogućava da se odgovarajućim izborom parametara izvrši njegovo svođenje (redukovanje) na postojeće, poznate modele, prisutne u praksi. Formirani model u potpunosti je saglasan sa osnovnim karakteristikama sistema regulacije pobude u elektranama u EES Srbije, datim u tabeli 1. Jednostavno se redukuje na model sa proporcionalnom regulacijom po naponu statora, koji poseduju sve elektrane u EES Srbije, osim pomenutih HE Đerdap 1 i HE Đerdap 2, za koje je validna strukturna šema sa slike 2. Prikazani model takođe omogućava uvažavanje zasićenja magnetnog kola (koje postoji kod elektromehaničkih sistema pobude). To je ujedno i objašnjenje zašto u naslovu ovog potpoglavlja figuriše reč modeli, a ne model.

Izlazna veličina prikazanog modela je napon na krajevima pobudnog kola generatora, "preslikan" na stator, odnosno elektromotorna sila  $E_{Tq}$ , koja dalje komunicira sa modelom sinhronog generatora, na način opisan u [21]. Izlazna veličina modela ems  $E_{Tq}$  podvrgava se zadatim tzv. tvrdim ograničenjima (dona i gornja, tzv. plafonska vrednost pobudnog napona, za koju se koristi i termin - stepen forsiranja pobude), s tim što je kod statičkih samopobudnih sistema izlazna veličina u neposrednoj zavisnosti od napona njihovog napajanja (to je po pravilu napon na krajevima generatora, a ređe napon sopstvene potrošnje elektrane).

## **6. Model sistema regulacije pobude generatora u analizama dugotrajnih dinamičkih procesa**

U prilazu Instituta "Nikola Tesla", u analizama dinamičke sigurnosti, konsekventno se modeluju kratkotrajni dinamički procesi, nastali neposredno nakon pojave razmatranog poremećaja, u kojima dominira individualna dinamika sinhronih mašina, kao i dalji tok prelaznog stanja, u kome je već uspostavljena jedinstvena učestanost EES [21]. Prelazak sa jedne na drugu vrstu dinamike, koje se razlikuju po karakteru i trajanju, obavlja se automatski po zadovoljenju unapred zadatih kriterijuma (praktično uspostavljena sinfaznost kretanja rotora angažovanih sinhronih generatora i završetak prelaznih stanja u njihovim sistemima regulacije pobude).

Uvažavajući prirodu, tok i karakteristike dugotrajnih dinamičkih procesa, koji se mogu pratiti sa korakom numeričke integracije oko 1 s, bilo je moguće izvršiti značajna uprošćenja, u odnosu na model sistema regulacije pobude generatora formiranog za potrebe analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa.

U analizama dugotrajnih dinamičkih procesa ne obuhvataju se prelazni procesi u tzv. Q-V konturi, jer su ti procesi praktično završeni, odnosno tada je

praktično obnovljena referentna vrednost napona generatora,  $V_{REF}$ . U tim uslovima, model sistema regulacije pobude, u zajednici sa modelom generatora za uslove dugotrajne dinamike, analizira dostignute performanse pobudnog sistema. Naime, model generatora određuje pobudni napon, koji je potreban za održavanje veličina stanja na njegovim krajevima, dobijenih rešavanjem interkonektivnog modela sistema [21].

Dalje, u model pobudnog sistema ugrađene su prekostrujna i prenaponska zaštita, preko vremenskog relea osetljivog na pobudni napon ili struju, veličine međusobno proporcionalne za definisane uslove dugotrajnih dinamičkih procesa. Za generatore sa uključenim automatskim regulatorima pobude, rele startuje po prekoračenju neke podešene vrednosti pobudnog napona (na primer, prema [20], to iznosi 105% pobudnog napona koji odgovara nominalnom stanju sinhrona mašine). Po isteku zadatog podešenog vremena, prelazi se na tzv. "ručnu" regulaciju pobude.

Za takve slučajeve, kao i za generatore koji su na početku analiza bili predviđeni za rad u "ručnoj" regulaciji pobude, model određuje napon pobude u funkciji uspostavljene jedinstvene učestanosti sistema. S obzirom na nepostojanje nekog standardnog načina uvažavanja ove zavisnosti, a koja se značajno razlikuje od konfiguracije i karakteristika primenjenih pobudnih sistema, zavisnost ems  $E_{fq}$  od učestanosti zadaje se kao ulazni podatak, u formi odgovarajućih tabela [20]. Za dati tip pobudnog sistema, ove tabele sadrže vrednosti ems  $E_{fq}$ , za dovoljno širok opseg promena učestanosti  $((0.9-1.1)f_n)$ . Tada se, u interkonektivnom modelu tokova snaga, menja način predstavljanja takvih generatorskih čvorova, odnosno, impedansi blok-transformatora se dodaje sinhrona reaktansa generatora "iza" koje deluje ems  $E_{fq}$ , čija vrednost, saglasno podacima iz pomenute tabele, odgovara tekućoj vrednosti jedinstvene učestanosti analizirane interkonekcije  $f$ .

## **7. Neki od karakterističnih primera praktične primene koncipiranih modela sistema regulacije pobude generatora**

### **7.1. Uvodne napomene**

Već je prethodno bilo naglašeno da su u osmišljavanju postavljenog cilja adekvatnog modelovanja sistema regulacije pobude generatora EES Srbije, za potrebe sistemskih analiza, korišćeni eksperimentalni rezultati studije "*Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a (faza I)*", koju Institut "Nikola Tesla" radi za potrebe Elektroprivrede Srbije.

U vreme pisanja ovoga rada, obavljena su eksperimentalna ispitivanja sistema pobude sledećih agregata (daju se po hronološkom redu obavljanja): B HE Potpeć (oktobar, 2010. god.), A2 u TE TENTA (maj, 2011. god.), 1 u HE Vrla 1 (avgust, 2011. god.), HE Uvac (avgust, 2011. god.), A1 u TE TENTA

(avgust, 2011. god.), A5 u TE Kolubara (avgust, 2011. god.), B1 u TE Kostolac (septembar, 2011. god.), A1 u TE Kostolac (septembar, 2011. god.), A6 u TE TENTA (septembar, 2011. god.), A4 u HE Đerdap 2 (septembar, 2011. god.), B u HE Kokin Brod (septembar, 2011. god.), A u HE Bistrica (oktobar, 2011. god.), A2 u HE Pirot (novembar, 2011. god.), A5 u TE TENTA (novembar, 2011. god.), B u HE Vrla 2 (decembar, 2011. god.), TE Morava (decembar, 2011. god.), i G4 u HE Vrla 1 (decembar, 2011. god.).

## **7.2. Modeli sistema regulacije pobude u analizama kratkotrajnih dinamičkih prelaznih procesa**

Generalizovani model sistema regulacije pobude, razvijen za potrebe analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa, koji je prikazan na slici 2, inkorporiran je u računarske programe *STATSTAB* (analize statičke stabilnosti) [21], *DINST* (analize tranzijentne stabilnosti) [21], *PRIMCONT* (strože praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, u okviru kojih se, između ostalog, prate rad i efekti primarne regulacije učestanosti) [22]. Svi ovi programi su razvijeni u Institutu "Nikola Tesla", a više detalja o njima nalaze se u [21].

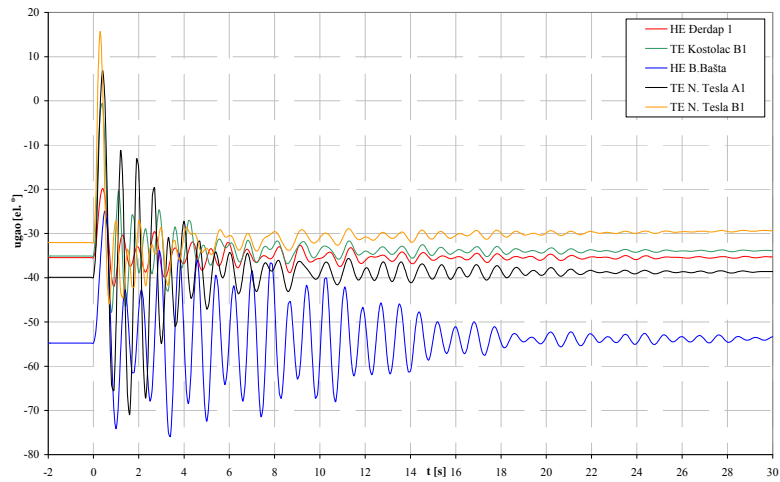
Testiranje ovih računarskih programa obavljeno je, i dalje se obavlja, na formiranom regionalnom modelu mreže, koji uključuje sledeće EES: Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Za eksterne EES, modelovana je mreža naponskih nivoa 400 i 220 kV, a za Grčku i relevantni delovi mreže na naponskom nivou 150 kV. Za EES Srbije, modelovana je kompletna mreža naponskih nivoa 110, 220 i 400 kV. Izvršeno je i odgovarajuće modelovanje ostataka interkonekcije UCTE.

U okviru ovog testiranja, razmatraju se dva relevantna realna stanja mreže EES Srbije u pogledu nivoa opterećenja, saglasno podacima o 15-to minutnim opterećenjima i angažovanju agregata, dobijenih od Elektromreže Srbije (maksimalno stanje, ostvareno 31 decembra 2010. godine u 17:30 h i minimalno stanje, ostvareno 2 maja 2010. godine u 04:15 h). Takođe, razmatraju se i maksimalna i minimalna stanja, koja se očekuju 2015. i 2020. godine.

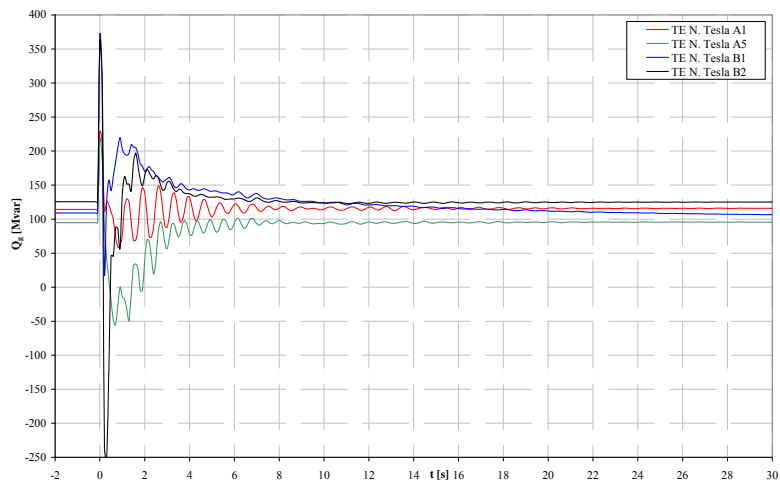
Jedan od karakterističnih primera odnosi se na analize tranzijentne stabilnosti (primena računarskog programa *DINST*), za maksimalno stanje EES Srbije, ostvareno 31 decembra 2010. godine u 17:30 h. Analiziraju se efekti trolnog kratkog spoja na početku dalekovoda 400 kV RP Mladost - Novi Sad 3, trajanja 0.15 s, sa trolnim trajnim isključenjem oba dalekovoda. Ovakvo težak kvar je svesno izabran, sa dužim vremenom trajanja od 0.15 s (savremeni prekidači i distanta zaštita mogu da obezbede vreme eliminacije kvara od 0.09 s). To je učinjeno da bi se sagledale reakcije generatora u EES Srbije (pogotovo generatora koji gravitiraju mestu kvara), sa svojim regulacionim sistemima, u uslovima veoma teških havarijskih i posthavarijskih stanja. Neki od indikativnih rezultata, za razmatrani kvar, grafički su interpretirani na slikama 3, 4, 5, 6 i 7. Slika 3 daje krive oscilovanja selektivno odabranih gene-

ratora, u vremenskom intervalu od 20 s, uz napomenu da je q osa generatora od 1 000 MW u NE Kozlodui (Bugarska) uzeta kao referentna osa. Za razmatrani vremenski period od 20 s, kriva 4 daje promene reaktivnih snaga, a kriva 5, promene napona na krajevima selektivno odabranih generatora (HE Đerdap 1, TE Kostolac B1, HE B.Bašta, TE N. Tesla A1 i TE N. Tesla B1). Promene elektromotornih sila  $E_q$  (srazmerne struji pobude) ovih generatora date su na slici 6, a promene elektromotornih sila  $E_{Tq}$  (srazmerne naponu na krajevima pobudnog namotaja), na slici 7.

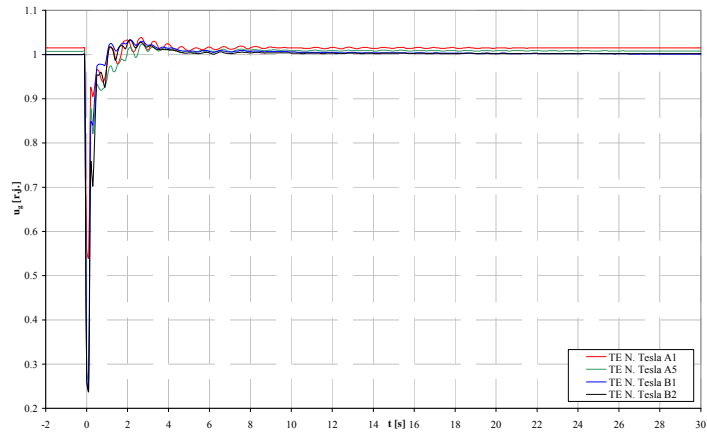
Prikazani rezultati na evidentan način govore o karakteru i toku analiziranog prelaznog procesa, nastalog nakon veoma teškog kvara, odnosno govore o izrazitoj ugaonoj tranzijentnoj stabilnosti EES Srbije, čemu su doprineli, između ostalog, i prisutni sistemi regulacije pobude generatora.



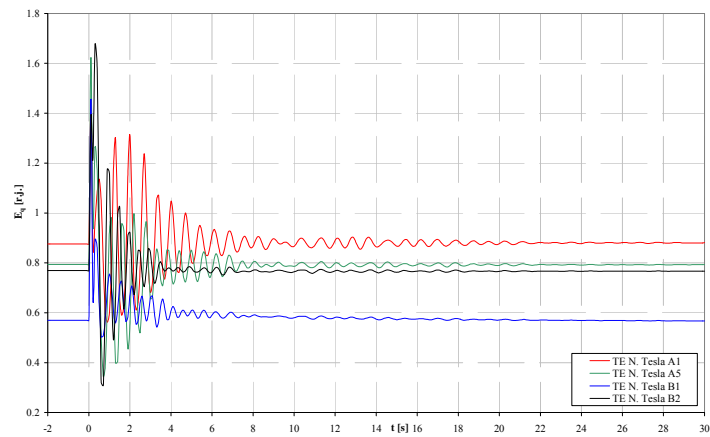
Slika 3. Krive oscilovanja selektivno odabranih generatora



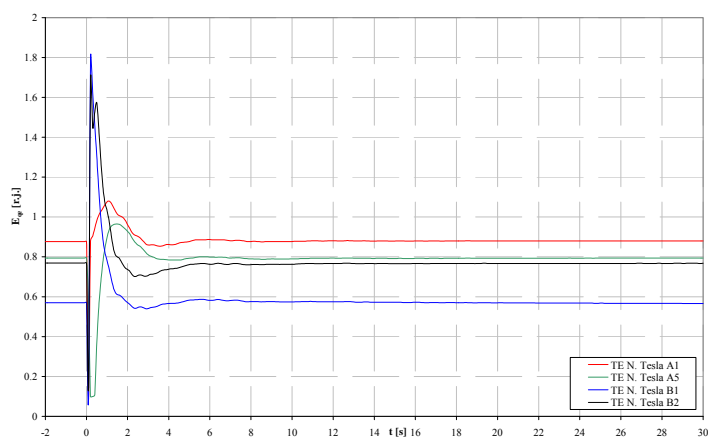
Slika 4. Promene reaktivnih snaga odabranih generatora



Slika 5. Promene napona odabranih generatora



Slika 6. Promene elektromotornih sila  $E_q$  odabranih generatora



Slika 7. Promene elektromotornih sila  $E_{qe}$  odabranih generatora



### 7.3. Model sistema regulacije pobude u analizama dugotrajne dinamike

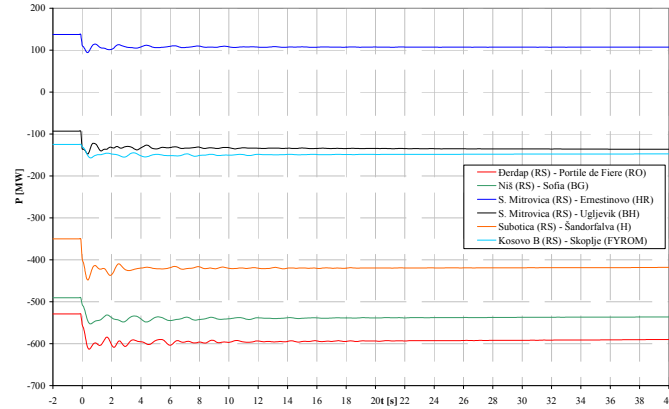
Modeli sistema regulacije pobude, razvijeni za potrebe analiza kratkotrajnih i dugotrajnih dinamičkih procesa, inkorporirani su u računarski program *PRSETECONT* (*PR*imary, *SE*condary and *TE*rtiar *CON*Trol), koji je razvijen u Institutu "Nikola Tesla" [23]. Njegovo testiranje obavljeno je, i dalje se obavlja, na prethodno pomenutom regionalnom modelu mreže. U okviru ovog računarskog programa, analize primarne, sekundarne i tercijarne regulacije učestanosti i snage razmene se obavljaju u prirodnom i logičnom kontinuitetu. Kako je već rečeno, prelazak sa jedne vrste dinamike na drugu se obavlja automatski, po zadovoljenju unapred zadatih kriterijuma (praktično uspostavljena sinfaznost kretanja rotora angažovanih sinhronih generatora i završetak prelaznih stanja u njihovim sistemima regulacije pobude).

Jedan od karakterističnih primera korišćenja modela pobudnog sistema, u uslovima odvijanja dugotrajnih dinamičkih procesa, povezuje se sa slučajem ispada generatora u TE Nikola Tesla B1, tada opterećenog sa 350.0 MW i 142.7 Mvar. Za razmatrani poremećaj, rad sekundarne regulacije učestanosti i snage razmene u EES Srbije, sa karakteristikama i načinom rada opisanim u [30], počinje da pauzira 0.10 s nakon nastanka poremećaja, a nakon isteka 60.10 s, dolazi do blokade njenog rada. Izabrana je opcija rada računarskog programa *PRSETECONT*, pri kojoj se, po konstataciji ove blokade, zaustavlja njegov dalji rad.

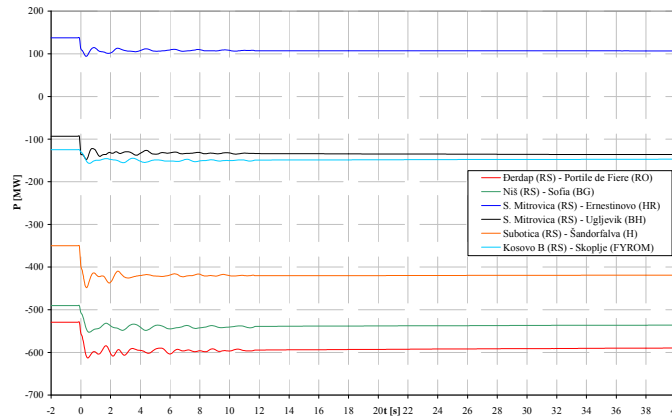
Takođe, unapred je bilo definisano da se prelaz sa kratkotrajne na dugotrajnu dinamiku obavi automatski, kada promene napona na krajevima generatora ne prelaze 1%, u vremenu od 10 s, što ukazuje da je došlo do završetka prelaznih procesa u njihovim sistemima regulacije pobude. Dalje, do tog prelaza dolazi i kada se praktično uspostavi sinfaznost kretanja rotora angažovanih sinhronih generatora, odnosno kada, za isti vremenski period od 10 s, međusobne razlike brzina generatora ne prelaze 1%. Za razmatrani poremećaj, zadati kriterijumi su bili zadovoljeni 11.7 s nakon njegovog nastanka, kada se prešlo na analizu dugotrajne dinamike.

Neki od karakterističnih rezultata, za vremenski period praćenja od 40 s, grafički su interpretirani na slikama 8a, 8b, 9a, 9b, 10a, 10 b, 11a, 11b, 12a i 12 b. Slike, koje imaju dodatnu oznaku *a*, odnose se na slučaj kada je ceo vremenski interval simuliran preko modela kratkotrajne dinamike, a oznaka *b*, kada je nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike.

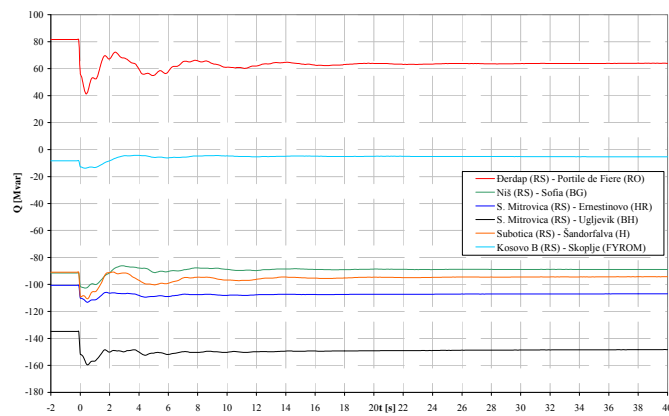
Slike, sa brojem 8, daju tokove aktivnih, a slike sa brojem 9, tokove reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima EES Srbije. Slike, sa brojem 10, daju promene napona na krajevima odabranih generatora, a slike sa brojem 11, promene njihovih reaktivnih snaga. Na kraju, slike sa brojem 12, daju promene elektromotornih sila  $E_{Tq}$  odabranih generatora.



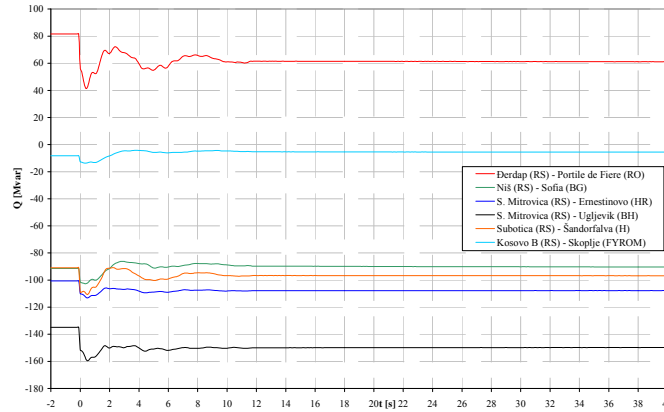
Slika 8a. Tokovi aktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima EES Srbije, dobijeni preko modela kratkotrajne dinamike



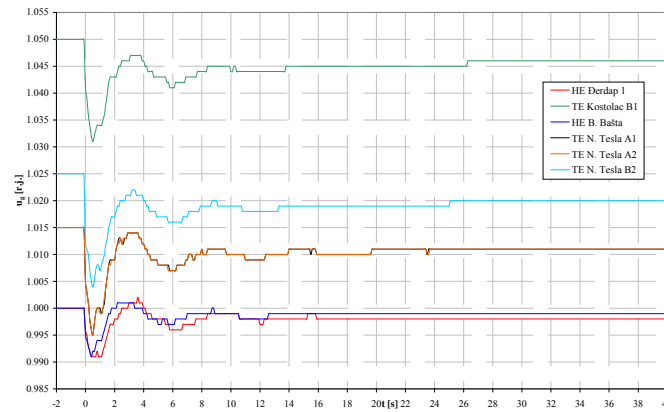
Slika 8b. Tokovi aktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima EES Srbije - nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike



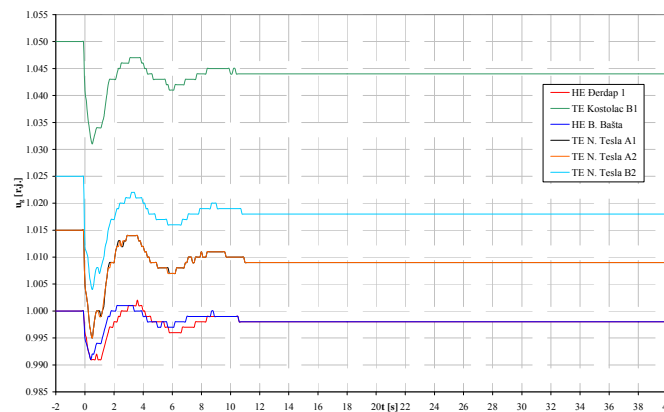
Slika 9a. Tokovi reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima EES Srbije, dobijeni preko modela kratkotrajne dinamike



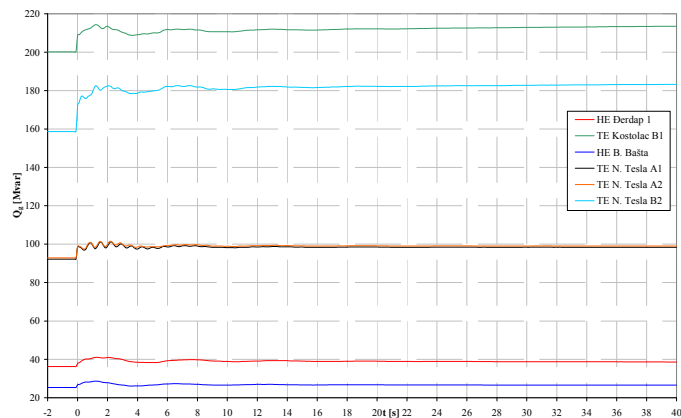
Slika 9b. Tokovi reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima EES Srbije - nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike



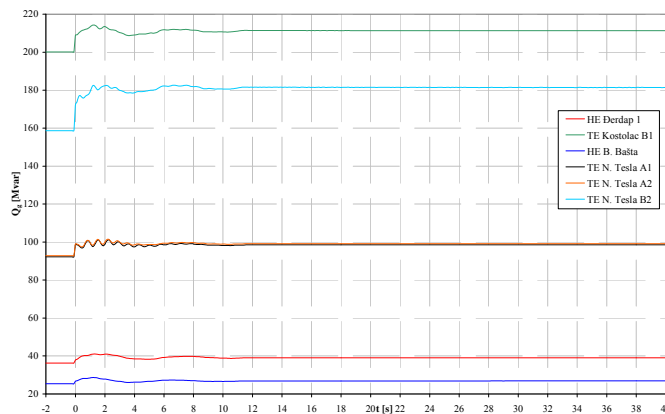
Slika 10a. Promene napona na krajevima odabranih generatora, dobijene preko modela kratkotrajne dinamike



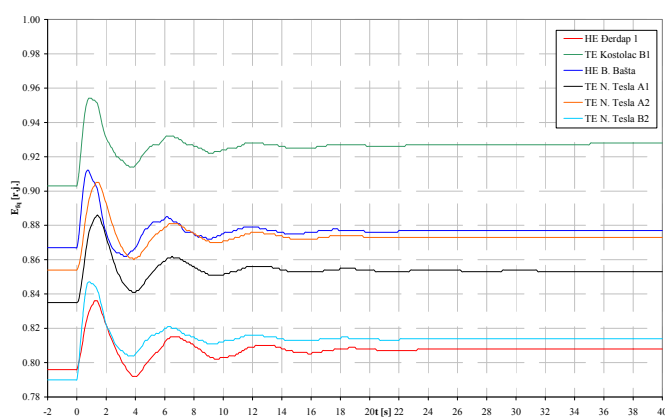
Slika 10b. Promene napona na krajevima odabranih generatora - nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike



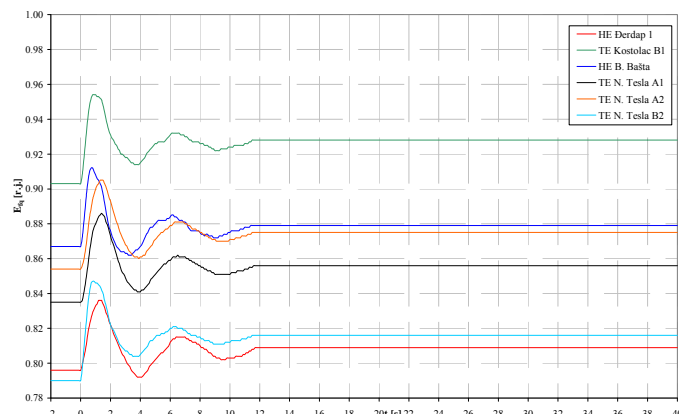
Slika 11a. Promene reaktivnih snaga odabranih generatora, dobijene preko modela kratkotrajne dinamike



Slika 11b. Promene reaktivnih snaga odabranih generatora - nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike



Slika 12a. Promene elektromotornih sila  $E_{fq}$  odabranih generatora, dobijene preko modela kratkotrajne dinamike



Slika 12b. Promene elektromotornih sila  $E_f$  odabranih generatora - nakon 11.7 s od poremećaja, nastupila simulacija dugotrajne dinamike

Prikazani, kao i prethodni rezultati, na evidentan način govore o karakteru i toku analiziranog prelaznog procesa, nastalog nakon razmatranog poremećaja. Ujedno, sagledani su i efekti modela sistema regulacije pobude generatora u analizama dugotrajne dinamike, odnosno pokazana je puna opravdanost njihove praktične primene.

## 8. Zaključci

U radu su izloženi modeli sistema regulacije pobude generatora koji mogu biti korišćeni u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. U njihovom formiranju najpre je korišćena raspoloživa literatura iz ove problematike, kao i detaljni uvid u realno stanje ovih sistema u EES Srbije. Zatim, korišćeni su rezultati do sada sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja na pojedinim elektranama u EES Srbije, u okviru kojih je utvrđena njihova postojeća struktura i relevantni parametri. Na primeru jednog ostvarenog stanja EES Srbije, u njegovom širokom okruženju, demonstrirane su neke od mogućnosti računarskih programa za analize kratkotrajne i dugotrajne dinamike, u okviru kojih su inkorporirani razvijeni modeli sistema regulacije pobude generatora.

## Literatura

- [1] D.P. Popović, M. Ivanović, Đ Stojić., S. Veinović, M. Milinković., D. Arnautović, S. Minić., "Koeficijent statizma regulacije napona generatora i naponsko-reaktivna stanja prenosnih mreža", rad prihvaćen za objavljivanje u časopisu *Elektroprivreda*
- [2] M. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema*; Tom 2 - Regulacija napona i reaktivnih snaga", Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.

- [3] "Rotating Electrical Machines" - Part 16: "Excitation Systems", IEC International Standard, IEC, Geneva, Switzerland, Chapter 1: Definitions - IEC Publ. 34-16-1: 1991., Chapter 2: Models for Power System Studies - IEC Publ. 34-16-2: 1991., Section 3: Dynamic Performance - IEC Publ. 34-16-3: 1996.
- [4] IEEE Committee Report, "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 88, No. 8, August 1969, pp. 1248-1258.
- [5] "IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines", ANSI/IEEE Std. 421.1-1986, The Institute of EEE, New-York, NY, USA, 1986.
- [6] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 6, June 1968, pp. 1460-1464.
- [7] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, pp. 494-509.
- [8] IEEE Committee Report, "Procedures for the Exchange of Power Plant and Load Data for Synchronous Stability Studies", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, July 1981, pp. 3229-3245.
- [9] IEEE Digital Excitation Task Force of the Equipment Working Group Report, Computer Models for Representation of Digital-Based Excitation Systems", IEEE Trans, on Energy Conversion, Vol. EC-11, No. 3, Sept. 1996., pp. 607-615.
- [10] "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Std. 421. 5-1992, IEEE, New-York, NY, USA, 1992.
- [11] C. Young, "Equipment and System Modelling for Large Scale Stability Studies", *IEEE Trans. on Power App. Syst.*, Vol. PAS-91, No 1, Jan/Feb. 1972., pp. 99-109.
- [12] P. M. Anderson., A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [13] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [14] "Matematički modeli objekata elektroenergetskog sistema", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1981.
- [15] "Regulacija napona, odnosno pobudne struje sinhronih generatora u elektranama Elektroprivrede Srbije sa gledišta zahteva sistema", Studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [16] D. Arnautović, Z. Ćirić, Đ. Stojić, N. Miložić, D. Joksimović, M. Milinković, S. Veinović, M. Bakić, V. Pališa, "Modernizacija, rekonstrukcija i razvoj sistema pobude sinhronih generatora", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, knjiga 21, 2011., str. 181-195.
- [17] D. Joksimović, Z. Ćirić., Đ. Stojić, N. Miložić, D. Arnautović, D. Petrović, "Parametri pobudnih sistema", *Elektroprivreda*, br.3. 2011. str.198-206.

- [18] "PSS/E-29 (Power System Simulator for Engineering)", Power Technologies, Inc., October 2002.
- [19] "User's Manual, DIgSILENT Power Factory, *Version 14*", DIgSILENT, GmbH, Gomaringen, Germany, 2008.
- [20] "Long Term Power System Dynamic, phase I, II and III", EPRI Projects, Respectively 90-7-0, June, 1974., 761-1, February, 1977. and 764-2, May, 1982.
- [21] D. P. Popović, *Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija*, monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 255 str., ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008.
- [22] D. P. Popović, "An Approach to the Evaluation of Electromechanical Transient Process in Power Systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 7, No. 2, 1984., pp. 141-151.
- [23] D. P. Popović, S. Mijailović, "An Efficient Methodology for the Analysis of Primary Frequency Control of Electric Power System", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 22, 2000., pp 331-341.
- [24] D. P. Popović, M. Ivanović, S. Minić, "Primarna, sekundarna i tercijarna regulacija učestanosti u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija", rad prihvaćen za objavljivanje u časopisu *Elektroprivreda*

**Abstract.** This paper presents models of generator excitation control systems used in dynamic security analyses of electric power interconnections. The general structure and functional block diagram of generator excitation control systems are given, as well as a review of the current state within the electrical power system of Serbia. The model used for analyses of short-term dynamics where transient stability analyses are dominant, has been presented. The model used in the analyses of long-term dynamics, has also been presented. After verification based on experimental measurements, these models have been incorporated into appropriate computer programs for dynamic security analyses of electric power interconnections. These computer programs have been developed at the "Nikola Tesla" Institute and some typical examples of their application have been provided

**Keywords:** model, excitation system, excitation, control, generator, short, mid and long-term dynamics, primary, Serbian electric power system

## **Models of Generator Excitation Control Systems in Dynamic Security Analyses of Electric Power Interconnections**

