

## Modeli hidropostrojenja u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija

Milan Ivanović, Dragan P. Popović, Dušan Arnautović,  
Slobodan Bogdanović, Dane Džepčeski, Jasna Dragosavac,  
Jelena Pavlović, 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 hidropostrojenja koji se koriste u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. Najpre se daje generalna struktura i funkcionalni blok dijagram hidropostrojenja, uz presek sadašnjeg stanja hidropostrojenja u EES Srbije. Zatim, daje se prikaz modela hidropostrojenja koji se može koristiti u analizama kratkotrajne dinamike, u kojima dominiraju analize tranzijentne stabilnosti. Dalje, daje se model hidropostrojenja koji može biti korišćen u analizama dugotrajne dinamike, čime se, između ostalog, omogućava sagledavanje uloge i efekata hidropostrojenja, koja bi bila uključena u sekundarnu i tercijarnu regulaciju učestanosti i snage razmene. Prikazani modeli su, uz prethodnu verifikaciju, baziranu na eksperimentalnim merenjima, inkorporirani u odgovarajuće računarske programe za analize dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. U završnom poglavlju rada dati su neki od karakterističnih primera njihove primene.

**Ključne reči:** model, hidropostrojenje, regulacija, kratkotrajna, srednjetrajna i dugotrajna dinamika, primarna, sekundarna i tercijarna regulacija učestanosti

### 1. Uvod

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

Druga grupa (analize dinamičke sigurnosti), koja je ključni predmet pažnje ovog rada, obuhvata 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 prate se tok i efekti kratkotrajnih, brzih dinamičkih procesa trajanja i do 10 s (između ostalog, obuhvaćeni su aspekti tranzijentne (ne)stabilnosti). Zatim, prate se tok i efekti srednjotrajnih (od 10 s do 60 s) i dugotrajnih (i do 20 min) dinamičkih procesa.

Problematika adekvatnog matematičkog modelovanja u analizama dinamičke sigurnosti savremenih EES, odnosno interkonekcija u kojima se oni nalaze, jedna je od najznačajnijih i najsloženijih. U pitanju su veoma kompleksni procesi, na koje, u interakciji, neposredno utiču elementi, odnosno komponente, takođe veoma složene strukture. U okviru analiza dinamičke sigurnosti savremenih EES, posmatra se i analizira funkcionisanje EES u celini, tako da su predmet pažnje matematički modeli koji se uobičajeno koriste za te svrhe, i za koje je izvršena odgovarajuća standardizacija.

Predmet pažnje ovog rada je prikaz matematičkih modela hidropostrojenja koji se uobičajeno koriste u sistemskim analizama. Značaj adekvatnog modelovanja hidropostrojenja je tim veći, jer su oni, po pravilu, uključujući u automatsku sekundarnu regulaciju učestanosti i snage razmene, kao i u tercijarnu regulaciju učestanosti.

Ovoj problematici je posvećen veliki broj radova, koje nije moguće sve citirati u okviru raspoloživog prostora za ovaj rad. Umesto toga, navodi se referenca [1], u okviru koje su, uz navođenje izvora, izloženi modeli različite strukture i složenosti, zavisno od vrste analiziranog prelaznog procesa, kao i vrste, cilja i složenosti analiza. Takođe, navode se i reference [2-14], koje su pomogle u osmišljavanju postavljenog cilja, bez pretenzija da je obuhvaćeno sve što je relevantno za ovu temu. Trebal istaći reference [2, 3], u okviru kojih je Radna grupa za performanse sistema IEEE Komiteta za EES dala preporuke za standardizaciju modela hidrauličnih turbina i njihove regulacije.

Dalje, u osmišljavanju postavljenog cilja adekvatnog modelovanja hidropostrojenja, za potrebe sistemskih analiza, korišćeni su eksperimentalni rezultati studije "*Sistemski 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 sistema regulacije pobude i sistema turbinske regulacije agregata, odnosno blokova u svim elektranama EPS. Zahvaljući njenom eksperimentalnom delu, između ostalog je bilo omogućeno utvrđivanje strukture i relevantnih parametara modela hidropostrojenja, prisutnih u EES Srbije.

Prethodno rečeno objašnjava osnovne motive i razloge za nastanak ovog rada. U njemu je najpre data generalna struktura i funkcionalni blok dijagram hidropostrojenja, uz objašnjenje uvedenih pretpostavki i uprošćenja kod formiranja njihovih modela za potrebe sistemskih analiza. Zatim, daje se presek sadašnjeg stanja hidropostrojenja u EES Srbije.

Dalje, daje se prikaz modela hidropostrojenja koji se koriste u analizama kratkotrajne dinamike, u kojima dominiraju analize tranzijentne stabilnosti. Ti modeli mogu da budu od praktične koristi i u analizama srednjetrojne dinamike, u čije okvire spadaju i analize primarne regulacije učestanosti.

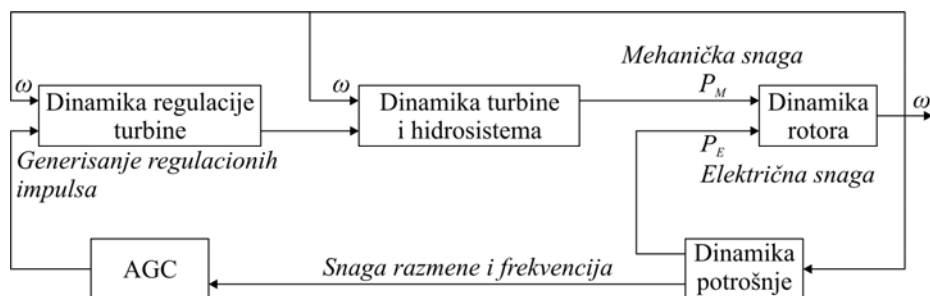
Nakon toga, izlaže se model hidropostrojenja koji se koristi u analizama dugotrajne dinamike, čime se, između ostalog, omogućuje sagledavanje uloge i efekata hidropostrojenja, koje je uključeno u automatsku sekundarnu regulaciju učestanosti i snage razmene.

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. Struktura i funkcionalni blok dijagram hidropostrojenja

### 2.1. Generalni aspekti

Na slici 1 data je struktura i funkcionalni blok dijagram hidropostrojenja, u okruženju EES-a, koja je direktno preuzeta iz [3].



Slika 1. Struktura i funkcionalni blok hidropostrojenja, u okruženju EES-a

Generalno gledano, matematički model hidropostrojenja sastoji se od modela objekta regulacije (hidrosistem i hidroturbina) i uređaja za upravljanje objektom (sistema turbinske regulacije). Modeli hidroelektrane (bez generatora), koji se uobičajeno koriste u sistemskim analizama, sadrže submodule hidrauličkih instalacija, hidroturbine i sistema turbinske regulacije. Model sistema regulacije turbine obuhvata motor varijatora brzine (ili motor referentnog opterećenja), sam regulator turbine, mehanizam upravljanja (servomotor) i usmerni aparat.

Veličine, koje su na "ulazu" modela hidropostrojenja su promena učestanosti  $\Delta\omega$  (sopstvene, kod analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa i uspostavljene jedinstvene učestanosti, kod analiza dugotrajnih dinamičkih procesa) i

tzv. spoljna veličina (zahtev)  $P_{ro}$ . Ona može da se podešava "ručno" i automatski, za generatore uključene u sistem automatske sekundarne i tercijarne regulacije učestanosti i snaga razmene. "Izlazna" veličina modela hidropostrojenja je mehanička snaga na vratilu hidrogeneratora  $P_m$ , koja zajedno sa električnom snagom  $P_e$ , definiše prirodu kretanja rotora hidrogeneratora.

Za potrebe sistemskih analiza, sa ovog generalnog modela (slika 1), prelazi se na modele različite strukture i složenosti, zavisno od vrste, cilja i složenosti analiza. Tome prethodi uvođenje niza uprošćenja i pretpostavki, koje su primerene postavljenom cilju, o čemu govori naredni tekst.

## **2.2. Uvedena uprošćenja i pretpostavke kod formiranja modela hidropostrojenja**

U analizama dinamičke sigurnosti složenih EES, odnosno elektroenergetskih interkonekcija u kojima se oni nalaze, hidroelektrane predstavljaju samo jedan element sistema. Saglasno prirodi, karakteru i ciljevima analiza dinamičke sigurnosti, ne zahteva se rigorozna tačnost modelovanja hidroelektrane, kao u slučajevima njihovog izolovanog rada, pri krupnim poremećajima (na primer, pri potpunom zbacivanju opterećenja). Time je bio otvoren put ka formiranju uprošćenih modela hidropostrojenja, primerenih vrsti i karakteru analiziranih prelaznih procesa u analizama dinamičke sigurnosti. Kod formiranja modela hidropostrojenja za potrebe sistemskih analiza, osnovna pretpostavka je da će, za prirodu i karakter razmatranih poremećaja, reakcija hidropostrojenja biti u okvirima i granicama linearizovanih karakteristika. Da bi se do toga došlo, bilo je potrebno prethodno proučiti tzv. izvorne modele, sa svim prisutnim nelinearnostima, kako bi bio precizno opisan put ka njihovoj linearizaciji.

Tako, na primer, u radu [10] dat je pregled matematičkih modela hidrauličkih sistema hidroelektrana, koji se razlikuju po svojoj složenosti i po pretpostavkama koje se uvode pri njihovom izvođenju. Polazna osnova je opšti nelinearni model hidrauličnog sistema, koji obuhvata dve osnovne jednačine koje opisuju prelazne pojave pri protoku fluida: jednačinu kretanja i jednačinu kontinuiteta. Izložen je pregled različitih metoda za rešavanje ovih jednačina, sa posebnim osvrtom na metodu karakteristika, kao najčešće korišćenu metodu za analize nestacionarnih protoka fluida. Dalje, u radu [10] je naglašeno da se često koristi model zasnovan na teoriji elastičnog vodenog udara, a najčešće, model zasnovan na teoriji krutog vodenog udara. Pregled karakteristika ovih metoda i analiza uticaja elastičnosti vode na tačnost rezultata proračuna hidrauličkog udara, izloženi u [10] omogućili su određivanje oblasti primenljivosti ovih modela.

Za potrebe sistemskih analiza, uobičajena pretpostavka je zanemarenje hidrauličnih prelaznih procesa u tunelu i vodostanu. Zatim, uvodi se pretpostavka o nestišljivosti vode i krutosti cevovoda, što omogućava korišćenje pomenute teorije krutog vodenog udara, odnosno pretpostavlja se da je sprovodni organ hidrauličkog postrojenja (tunel ili cevovod) dovoljno krut da ne dolazi do promena njegovih dimenzija.

Strogo uzevši, hidro turbine su izrazito nelinearni elementi, čije se zavisnosti prikazuju preko odgovarajućih parametarskih krivih, odnosno školjkastih dijagrama. Za potrebe sistemskih analiza, prelazne karakteristike hidro turbine definisane su dinamikom vode u cevovodu, uz zanemarenje gubitaka u njemu. Stoga, dinamičke performanse hidro turbine, tretirane kao "idealne", opisuju se linerizovanim jednačinama.

Saglasno prethodnom, ključni parametar u modelima hidrauličkih instalacija i hidroturbine je vremenska konstanta cevovoda  $T_w$ , koja se vezuje za hidraulički prelazni proces putovanja talasa vode od brane do preturbinskog zatvarača. Praktično je reč o vremenu ubrzanja vode u cevovodu između turbinskog otvora i nivoa gornje vode.

Vremenska konstanta cevovoda  $T_w(s)$ , za koju se koristi i termin - vreme startovanja vode, definisana je dužinom i poprečnim presekom cevovoda, protokom i padom, odnosno sledećom relacijom, izvorno prenetom iz [2]:

$$T_w = \frac{L \cdot V}{g \cdot H} \quad (1)$$

gde je:

$V$  - brzina vode;

$H$  - neto pad vode pri početnom opterećenju;

$L$  - srednja dužina cevovoda i spiralnog sprovodnog organa do zatvarača;

$g$  - gravitaciono ubrzanje Zemlje.

Iz relacije (1) se uočava da ova konstanta neposredno zavisi od brzine vode, dimenzija cevovoda i neto pada pri početnom opterećenju, tako da su njene konkretne vrednosti direktno korelisane sa razmatranim radnim režimom hidroelektrane. Imajući u vidu da je dinamičko pojačanje hidropostrojenja, u delu hidrauličkih instalacija, određeno ovom vremenskom konstantom, poželjno je raspolagati njenom što tačnijom vrednošću. Ili preciznije, sa nekoliko njenih karakterističnih vrednosti (zavisno od pada i protoka).

Dalje, poznato je da na Kaplanovim turbinama postoje dva izvršna organa sa posebnim regulatorima položaja, koji su, u cilju optimalnog korišćenja potencijala vode, međusobno povezani kombinatornom karakteristikom, kako je to pokazano u [11]. Međutim, bitno je napomenuti da se dvojna regulacija, koja je prisutna kod Kaplanovih turbina, zanemaruje u slučaju sistemskih analiza, jer je uticaj zakretanja lopatica sa stanovišta EES zanemarljiv. Otuda u svim raspoloživim modelima hidropostrojenja, prvenstveno namenjenih sistemskim analizama [1-6], nije uvažen uticaj zakretanja lopatica kod Kaplanovih turbina.

### 3. Prikaz postojećeg stanja hidropostrojenja u EES Srbije

U tabeli 1 je dat prikaz sadašnjeg stanja hidropostrojenja u EES Srbije, kroz prikaz vrsta hidroturbina i njihovih regulatora.

**Tabela 1.** Prikaz postojećeg stanja hidropostrojenja u EES Srbije

Hidroelektrana	Vrsta turbine	Vrsta regulatora
Đerdap 1, ag. 1 -5	Kaplan	elektrohidraulički
Đerdap 1, ag. 6	Kaplan	digitalni elektrohidraulički
Đerdap 2	Kaplan	digitalni elektrohidraulički
HE Bajna Bašta	Francis	digitalni elektrohidraulički
HE Zvornik, ag. A, B	Kaplan	mehaničkohidraulički
HE Zvornik, ag. C, D	Kaplan	elektrohidraulički
HE Bistrica	Francis	elektrohidraulički
HE Potpeć	Francis	digitalni elektrohidraulički
HE Kokin Brod	Francis	digitalni elektrohidraulički
HE Uvac	Francis	mehaničkohidraulički
HE Pirot	Francis	elektrohidraulički
HE Vrla 1	Pelton	mehaničkohidraulički
HE Vrla 2	Francis	mehaničkohidraulički
HE Vrla 3	Francis	mehaničkohidraulički
HE Vrla 4	Francis	mehaničkohidraulički
HE Ovčar Banja	Kaplan	digitalni elektrohidraulički
HE Međuvršje	Kaplan	digitalni elektrohidraulički
RHE Bajina Bašta	Francis	digitalni elektrohidraulički

Sagledavajući dati prikaz, potrebno je apostrofirati da su u proteklom periodu nastupile brojne i značajne promene u pristupu projektovanju i mogućnostima tehničke realizacije turbinskih regulatora. U hidroelektranama EPS, već od početka osamdesetih godina, u eksploataciji su elektrohidraulički regulatori u čijem je električnom delu realizovan (tada u analognoj tehnologiji) PID (Proporcionalni, Integralni, Diferencijalni) algoritam. Na izlazu električnog dela turbinskog regulatora, formira se signal zadatog položaja izvršnog organa, koji se izvršava u hidrauličkom delu turbinskog regulatora, u okviru regulacije položaja izvršnog organa, sa ili bez lokalnih povratnih veza, što je karakteristično za HE Bistrica, HE Đerdap 2 i HE Pirot.

Krajem devedestih godina, u skladu sa ostvarenim napretkom u domenu izrade turbinskih regulatora, dolazi do izmene tehničkih standarda za projektovanje i ispitivanje turbinskih regulatora u kojima se navode prethodno opisane strukture električnog dela turbinskog regulatora. U novim standardima dolazi i do izmene nekih termina iz oblasti regulisanja hidrauličkih turbina.

Ujedno, krajem devedesetih godina razvijaju se digitalni turbinski regulatori, kod kojih je pregledno formirano PID dejstvo u električnom delu turbinskog regulatora, koje se dalje predaje hidrauličkom delu turbinskog regulatora na izvršenje. To je ostvareno kod agregata u HE Kokin Brod, HE Đerdap 2, HE Potpeć, HE i RHE Bajina Bašta, HE Ovčar Banja, HE Međuvršje i kod revitalizovanog agregata 6 u HE Đerdap 1.

Prethodno izloženo obavezivalo je autore ovog rada, da u koncipiranju modela hidropostrojenja uvažavaju postojeće stanje u EES Srbije, uz posebno respektovane činjenice, vezane za pomenute novine kod turbinskih regulatora. Način na koji je to urađeno opisan je u narednom tekstu, u kome je data i hronologija u formiranju modela hidropostrojenja.

## 4. Model hidropostrojenja u analizama kratkotrajnih dinamičkih procesa

### 4.1. Uvodne napomene

U okviru analiza kratkotrajne dinamike, kako je to već bilo rečeno, 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).

Istorijski gledano, u hronološkom redu, za te svrhe, kao standardni IEEE model regulatora hidrauličkih turbina vrlo često je korišćen *Hoveyev* model [1, 2], čija je strukturna šema u suštini odgovarala šemi regulatora sa prolaznim statizmom, o kome će dalje biti reči. U referenci [2], kao standardni model za regulatore hidroturbina takođe je bilo predloženo da se primenjuje taj model, bez obzira na to da li se radi o tada prisutnim, mehaničko-hidrauličkim ili elektrohidrauličkim regulatorima.

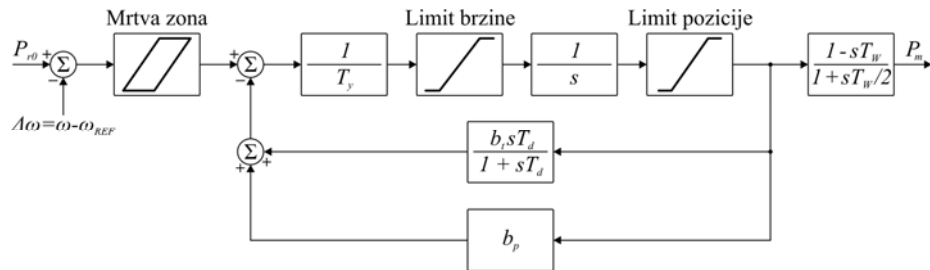
Naravno, i pored obavljene IEEE standardizacije modela regulatora hidrauličkih turbina, nije bilo moguće u dovoljnoj meri uvažiti raznovrsnost tipova turbinskih regulatora, koji postoje u aktuelnoj praksi. To bi sigurno trebalo imati u vidu kod izbora, a posebno kod formiranja novih modela turbinskih regulatora hidroturbina, saglasno potrebama raznovrsnih sistemskih studija. Model predložen u [2], uvažavao je tadašnju severnoameričku praksu. Iz tih razloga, on sigurno nije mogao biti standardni model regulatora za hidroturbine, koji bi, bez rezerve, dalje bio korišćen i u drugim delovima sveta. Iz toga sledi logičan zaključak, da je pravi put da se problem modelovanja regulatora hidrauličkih turbina razmatra od slučaja do slučaja, uz puno poštovanje specifičnosti pojedinih konstrukcija regulatora. A to je upravo, kako je to već bilo istaknuto, i cilj ovog rada. U njegovom daljem tekstu je izložen način na koji je rešen problem adekvatnog modelovanja regulatora hidrauličkih turbina, respektujući njeno postojeće stanje u EES Srbije.

### 4.2. Klasični model regulatora hidro turbine sa prolaznim statizmom

U rešavanju postavljenog problema, u Institutu "Nikola Tesla", prvobitno je formiran model hidropostrojenja, za potrebe i ciljeve analiza kratkotrajnih dinamičkih prelaznih procesa. Njegova strukturna šema data je na slici 2a [15]. On je bio baziran na modelu, datom u [2], uz uvođenje mrtve zone regulatora i opravdanog zanemarenja vremenske konstante pomoćnog servomatora.

Prikazani model, koji se u literaturi naziva *model turbinskog regulatora sa prolaznim statizmom*, sadrži blokove sa stalnim statizmom  $b_p$  i glavnim servomotorom, sa vremenskom konstantom  $T_y$  (uticaj pomoćnog servomotora opravdano zanemaren). Sadrži i prolazni statizam  $b_t$ , sa odgovarajućom vremenskom konstantom  $T_d$ , veličine koje su karakteristične samo za regulaciju hidro turbine. Nagle promene snage hidro turbine mogu izazvati oštećenja kao

što je krivljenje lopatica usled kavitacije, pa se pribegava prigušivanju, odnosno usporavanju reakcije turbinskog regulatora preko njegovog prolaznog statizma  $b_t$  (statizma u tranzijentnom periodu). Zbog toga je prolazni statizam  $b_t$  za red veličine veći od stalnog statizma  $b_p$ .



Slika 2a. Strukturna šema modela hidropostrojenja za analize kratkotrajne dinamike

Oznake na slici 2a imaju sledeće značenje:

$T_y$  - vremenska konstanta servomotora usmernog aparata hidroturbine;

$b_p$  - stalni statizam sistema regulacije hidroturbine;

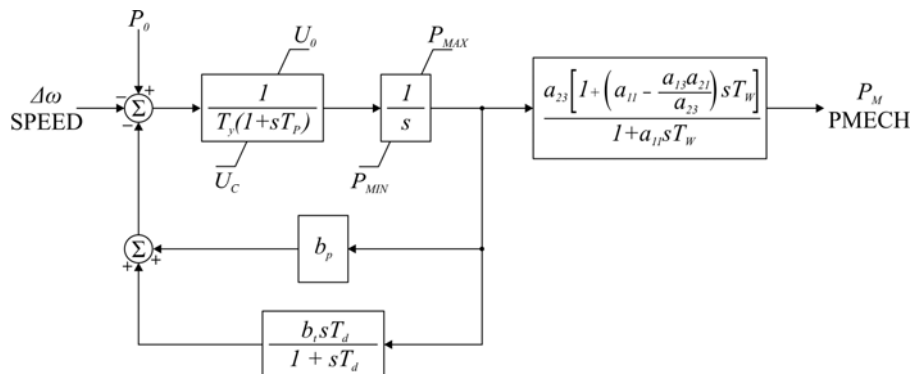
$b_t$  - prolazni statizam sistema regulacije hidroturbine;

$T_d$  - vremenska konstanta prigušivača turbinskog regulatora (*dashpot time constant*);

$T_w$  - vremenska konstanta cevovoda hidroelektrane, odnosno "vreme startovanja vode" (*water starting time*).

Već je bilo naglašeno da je u novim standardima došlo do izmene nekih termina, kao i oznaka u oblasti regulisanja hidrauličkih turbina. Stalni statizam sistema regulacije hidroturbine ( $\sigma$ ) dobija novu oznaku  $b_p$ , a prolazni statizam ( $\delta$ ), novu oznaku  $b_t$ .

U referencama [13, 14], za većinu hidroelektrana sa malim padom i Francisovim, Kaplanovim i cevnim turbinama, preporučena je upotreba modela *IEEEG3*, koji je razvijen po *IEEE* standardu. On je prikazan na slici 2b, koja je preuzeta iz [13].



Slika 2a. Blok dijagram *IEEEG3* modela hidro turbine sa turbinskim regulatorom

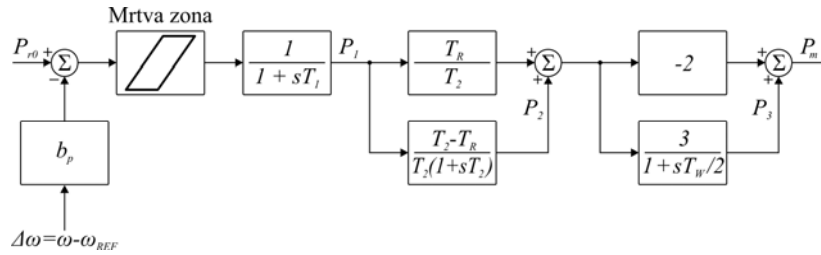


Model hidro turbine, dat na slici 2b, kao i na prethodnoj slici 2a, predstavljen je u linearizovanom obliku. Pri tome, prisutni "a" parametri se biraju tako ( $a_{11}=0.5$ ,  $a_{13}=a_{23}=1$  i  $a_{21}=1.5$ ) [13], da uvek daju prenosnu funkciju oblika:

$$W(s) = \frac{1 - sT_w}{1 + s \frac{T_w}{2}} \quad (2)$$

Dakle, model hidropostrojenja, prikazan na slici 2a, je u potpunosti saglasan sa modelom koji se koristi u računarskim programima svetske reputacije PSS/E-29 (Power System Simulator for Engineering) [13] i DlgSILENT Power Factory, *Version 14* [14], koji je prikazan na slici 2b. Jedina, ali bitna razlika u odnosu na model sa slike 2a, je što u modelu sa slike 2b, ne figuriše mrtva zona turbinskog regulatora, koja je veoma važan parametar, jer može bitno da utiče na odvijanje kako primarne, tako i sekundarne regulacije učestanosti.

Dalje, u Institutu "Nikola Tesla", polazeći od modela sa slike 2a, izvršena je njegova odgovarajuća transformacija, koja je dovela do modela, čija je strukturna šema data na slici 3.



Slika 3. Strukturna šema transformisanog modela hidropostrojenja

Vremenske konstante  $T_1$  i  $T_2$ , koje figurišu na slici 3, imaju oblik [2]:

$$T_1 = \frac{T_B}{2} + \sqrt{\left(\frac{T_B}{2}\right)^2 - T_A} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{T_B}{2} - \sqrt{\left(\frac{T_B}{2}\right)^2 - T_A} \quad (4)$$

gde je:

$$T_A = \frac{T_y T_d}{b_p} \quad (5)$$

$$T_B = \frac{(b_p + b_t) T_d + T_y}{b_p} \quad (6)$$

U referenci [4] je izvršeno poređenje performansi modela sa slika 2b i 3, pomoću Bodeovih logaritamskih dijagrama slabljenja i faze, za slučaj jedne mašine vezane za mrežu beskonačne snage. Utvrđeno je da među ovim modelima postoji dobra saglasnost u opsegu perturbacionih frekvencija manjih od 3.0 rad/s [1].

U skladu sa oznakama na slici 3, kratkotrajni dinamički procesi u hidropostrojenju, obuhvaćeni su preko sledećeg sistema simultanih diferencijalnih jednačina prvoga reda [15]:

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{P_1}{T_1} + \frac{P_{r0} - \Delta\omega/\sigma}{T_1} \quad (7)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{T_2 - T_1}{T_2^2} P_1 - \frac{P_2}{T_2} \quad (8)$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{6T_R}{T_2 T_W} P_1 + \frac{6}{T_W} P_2 - \frac{2}{T_W} P_3 \quad (9)$$

Pozicija servomotora usmernog aparata  $P_a$ , koja se podvrgava zadatim ograničenjima, kao i njegova brzina kretanja  $dP_a/dt$ , ima oblik:

$$P_a = \frac{T_R}{T_2} P_1 + P_2 \quad (10)$$

Pomenuta ograničenja postoje i uvažena su, iako nisu eksplicitno označena na slici 3. Na kraju, izlazna veličina modela hidropostrojenja, mehanička snaga  $P_m$ , izražava se na sledeći način:

$$P_m = -2 \left( \frac{T_R}{T_2} P_1 + P_2 \right) + P_3 \quad (11)$$

### 4.3. Model PID regulatora hidroturbine

Novije IEEE preporuke [3] daju dva standardna modela turbinskih regulatora hidrauličkih turbina. To su, prethodno elaboriran proporcionalni regulator sa prolaznim statizmom i opšti PI, ili PID regulator [1].

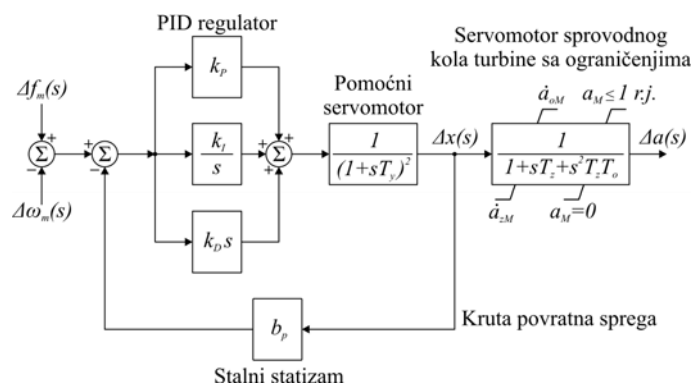
Sagledavajući postojeće stanje hidropostrojenja u EES Srbije, koje je bilo izloženo u poglavlju 3 ovog rada, konstatovano je da su u eksploataciji elektrohidraulički regulatori, u čijem električnom delu je realizovan savremeni PID regulator. Respektujući prethodno rečeno, formiran je model PID turbinskog regulatora hidrauličkih turbina, saglasno izloženom u [3], koji je dat na slici 4.

Generalno gledano, PID regulatori omogućavaju veće brzine odziva, jer se adekvatnim podešavanjem njihovih slobodnih parametara mogu istovremeno ostvariti prelazno smanjenje i povećanje pojačanja [1]. Diferencijalno de-

jstvo je povoljno pri radu agregata na izolovanu mrežu, a posebno u slučaju agregata sa visokim vrednostima vremenske konstante cevovoda ( $T_W > 3$  s). Tipične vrednosti podešavanja PID regulatora su  $k_P = 3,0$  r.j.;  $k_I = 0,7$  r.j./s i  $k_D = 0,5$  r.j.s [1].

Međutim, korišćenje visoke vrednosti diferencijalnog pojačanja ili porasta prolaznog pojačanja regulatora rezultovalo bi oscilatornim prelaznim procesima velikih amplituda oscilacija i dugog trajanja. To bi u pojedinim situacijama moglo voditi u nestabilnost sistema, čak i kada je agregat u paralelnom radu sa nekom moćnom mrežom.

Često se zbog toga diferencijalno pojačanje PID regulatora podešava na nulu, što znači da se on svodi na PI regulator, ekvivalentan standardnim regulatorima hidrauličkih turbina, sa prolaznim statizmom. Kako je to naglašeno u [1], adekvatnim izborom proporcionalnog i integralnog pojačanja može se realizovati željeni odziv, kao i kod standardnih regulatora hidroagregata sa prolaznim statizmom. U slučaju PI turbinskog regulatora, koeficijent proporcionalnog pojačanja jednak je recipročnoj vrednosti prolaznog statizma ( $k_P = 1/b_i$ ), a odnos  $k_P/k_I$  je ekvivalentan vremenskoj konstanti  $T_d$ .



Slika 4. Strukturna šema PID modela regulatora hidro turbine

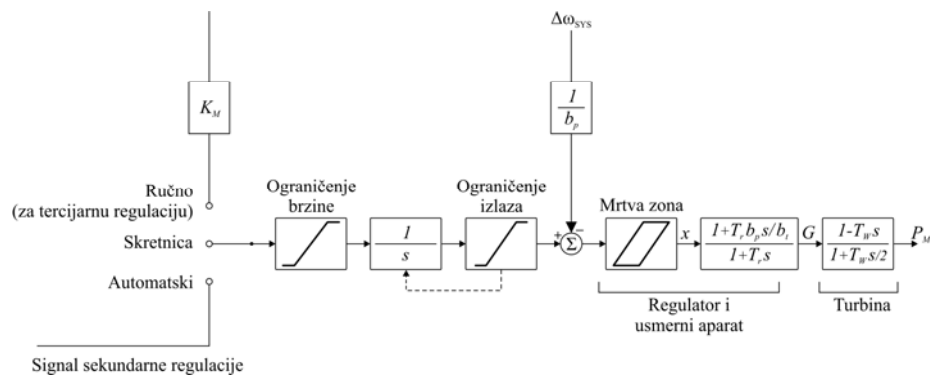
Modeli hidropostrojenja sa slike 3 i model PID turbinske regulacije sa slike 4, kome je pridodat prikazani model hidro turbine i hidrauličkih instalacija, inkorporirani su u niz računarskih programa, razvijenih u Institutu "Nikola Tesla". Oni obavljaju analize statičke i tranzijentne stabilnosti, strože i uprošćeno praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, u okviru kojih se, između ostalog, prate rad i efekti primarne regulacije učestanosti. O tome će biti više reči u narednom delu teksta.

## 5. Model hidropostrojenja u analizama dugotrajnih dinamičkih procesa

Uvažavajući prirodu, tok i karakteristike dugotrajnih dinamičkih procesa, a koji se mogu pratiti sa korakom numeričke integracije oko 1 s, bilo je moguće izvršiti odgovarajuća uprošćenja, u odnosu na model hidropostrojenja, formi-

ranog za potrebe analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa. U praksi je vremenska konstanta servomotora  $T_y$  znatno manja od vremenske konstante prolaznog statizma  $T_d$ , ( $T_d \gg T_y$ ) koja diktira ponašanje celog regulatora. Odnosno, to su veličine različitog reda, kao i statizmi  $b_p$  i  $b_t$ . ( $b_t \gg b_p$ ).

Imajući u vidu prethodno rečeno, za relativno spore prelazne procese u EES, svojstvene dugotrajnoj dinamici, formiran je model hidropostrojenja, saglasno izloženom u [7], čija je strukturna šema data na slici 5.



Slika 5. Strukturna šema modela hidropostrojenja za analize dugotrajne dinamike

Posebna karakteristika prikazanog modela je mogućnost uvažavanja tercijarne regulacije učestanosti, "ručnim" delovanjem na spoljnu veličinu (zahtev)  $P_{ro}$ . Isto to je bilo omogućeno i kod modela sa slika 4 i 5.

Funkcije tercijarne regulacije učestanosti obuhvaćene su posebnim modulom (TERC - *TERTiary Control*) računarskog programa *PRSETECONT* (*PR*imary, *SE*condary and *TERT*ialy *CON*Trol) [16]. Pri tome je u potpunosti uvaženo da ova regulacija, po svojoj suštini i karakteru, spada u kategoriju dispečerskih akcija. U razvoju modula TERC, u potpunosti su respektovani zahtevi iz dokumenata [17, 18], koji su se odnosili na ovu vrstu regulacije.

U posebnoj ulaznoj datoteci, specificiraju se *dve* grupe generatora, koji će se nalaziti u pripremi za učešće u tercijarnoj regulaciji. U *prvoj* grupi su generatori, koji su već angažovani, a u *drugoj* grupi, generatori koji nisu u pogonu, ali bi bili spremni da "uskoče", kada to bude potrebno. Za svaki od ovih generatora se specificira indeks prioriteta, na bazi kojih se formira redosled aktiviranja.

Modul TERC se automatski uključuje u *dva* slučaja. U *prvom* slučaju, kada se tokom praćenja prelaznog stanja i regularnog rada AGC utvrdi da regulaciona greška nije u potpunosti neutralisana. U *drugom*, kada je došlo do blokade (suspenzije) rada AGC (kada je regulaciona greška ACE bila veća od  $\pm 200$  MW duže od 60 sekundi). Pri tome, veličine rotacionih rezervi koje figurišu u relaciji (9) utvrđuju se u momentu koji prethodi automatskom uključanju modula TERC.

Veličina utvrđene nekompenzovane regulacione greške diktira iznos potrebne nove snage generisanja. Nove snage se aktiviraju, saglasno utvrđenoj listi prioriteta angažovanja, sve do momenta kada se u potpunosti ne obavi praktična kompenzacija regulacione greške. Ako do željene kompenzacije regulacione greške ne dođe, usled nedostatka snage u raspoloživim resursima, to se konstatuje, i računarski program nastavlja da radi, sa raspoloživom rezervom u tercijarnoj regulaciji.

## **6. Način utvrđivanja i verifikacije modela hidroturbina**

### **6.1. Sadržaj i cilj eksperimentalnog ispitivanja turbinskih regulatora**

Već je prethodno bilo naglašeno, da su u osmišljavanju postavljenog cilja adekvatnog modelovanja hidropostrojenja, 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 turbinskih regulatora kod sledećih agregata: C u HE Potpeć [19], HE Đerdap 2 [20], A1 u HE Piroć [21] i A6 u HE Đerdap 1 [22]. Ona su izvršena u cilju sagledavanja karaktera i mogućnosti učešća ovih agregata u primarnoj regulaciji učestanosti. Takođe, ova eksperimentalna ispitivanja su imala za cilj i određivanje relevantnih parametara sistema turbinske regulacije analiziranih agregata, koji će dalje biti korišćeni za formiranje linearizovanih matematičkih modela sistema turbinske regulacije, saglasno zahtevima programskog zadatka prethodno pomenute studije. Pomenuta eksperimentalna ispitivanja su urađena, respektujući aktuelnu regulativu koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti, kojom se ukratko bavi naredno potpoglavlje 6.2.

U okviru elaborata o ispitivanju turbinskih regulatora [19 - 22], dati su rezultati ispitivanja, koji se sastoje iz dva dela.

*Prvi* deo se odnosi na proveru rada agregata u primarnoj regulaciji učestanosti. To je urađeno preko formiranog odziva agregata pri odskočnoj promeni učestanosti od 200 mHz, formirane statičke karakteristike regulatora, uz proveru zone neosetljivosti i mrtve zona regulatora. Daje se i tačnost merenja učestanosti i snage, kao i trajanje mernog ciklusa (vreme odabiranja i vreme potrebno za digitalno filtriranje mernog signala). *Drugi* deo se odnosi na određivanje sledećih parametara turbinskog regulatora: koeficijenta proporcionalnog i diferencijalnog pojačanja, vremenske konstante diferencijalnog dejstva, ukupnog vremena kašnjenja sistema, ograničenja otvora usmernog aparata po padu i vremena otvaranja i zatvaranja izvršnog organa.

Nakon zaključaka, zahvaljući obradi sprovedenih eksperimenata, dat je kratak pregled relevantnih parametara i karakteristika analiziranih turbinskih regulatora, koji su od značaja za odvijanje primarne regulacije učestanosti, kao i za formiranje matematičkih modela regulatora.

U ovom radu, na primeru agregata A6 u HE Đerdap 1, biće pokazan način utvrđivanja i verifikacije modela hidropostrojenja, koji je primenjen i u slučaju agregata u HE Potpeć, HE Đerdap 2 i A1 u HE Piroć, za koje su do sada izvršena eksperimentalna ispitivanja.

## **6.2. Aktuelna regulativa koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti**

Aktuelna važeća regulativa koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti u EPS (kriterijumi, zahtevi, standardi i procedure) definisana je u dokumentu [17] i njegovim izmenama i dopunama [18], koji su usaglašeni sa aktuelnim i važećim dokumentom UCTE [23]. Pri tome, potrebno je napomenuti da je asocijacija UCTE prestala da funkcioniše 1. jula 2009. godine, kada je sve svoje nadležnosti i funkcije prenela na novoformiranu asocijaciju ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Stoga je postojeća UCTE regulativa i dalje validna.

Saglasno iznetom u [17, 18], sve generatorske jedinice koje učestvuju u primarnoj regulaciji učestanosti moraju imati opseg primarne regulacije  $\pm 2\%$   $P_{nom}$ , a da karakteristika aktivna snaga - frekvencija uređaja za primarnu regulaciju mora biti podesiva u opsegu 4-6%. Međutim, potrebno je napomenuti da je precizniji termin za karakteristiku aktivna snaga - frekvencija - (stalni) statizam turbinske regulacije, koji se uobičajeno koristi u praksi. Ovo je veoma bitna veličina, jer spada u kategoriju osnovnih faktora od uticaja na vrednost odstupanja učestanosti u uspostavljenom kvazistacionarnom stanju.

Dalje, u kontekstu definisanja uslova za sve generatorske jedinice koje učestvuju u primarnoj regulaciji, za ostale veličine propisuju se sledeće vrednosti, doslovno preneto iz [17, 18]:

- vreme aktiviranja primarne regulacije: najviše 15 sekundi nakon poremećaja za aktiviranje 50% ili manje od ukupne rezerve primarne regulacije, a za aktiviranje 50% do 100% maksimalno vreme se linearno povećava do 30 sekundi;
- operativna iskoristivost: primarna rezerva mora biti u potpunosti aktivirana za odstupanje frekvencije kvazistacionarnog stanja od  $\pm 200$  mHz;
- neosetljivost regulatora ne bi trebalo da pređe  $\pm 10$  mHz.

## **6.3. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja agregata A6 u HE Đerdap 1**

### **6.3.1 Uvodne napomene**

Ispitivanja turbinskog regulatora na revitalizovanom agregatu A6 u HE Đerdap 1 izvršena su u drugoj polovini novembra 2011. godine [22]. Obavljena su prema odredbama tehničkog standarda za ispitivanje turbinskih regulatora hidrauličnih turbina IEC 60308 i standarda za specifikaciju parametara turbinskih regulatora hidrauličnih turbina IEC 61632. Cilj ovog eksperimentalnog ispitivanja je bio provera kvaliteta rada ovog agregata u primarnoj regulaciji

učestanosti, a ujedno su rezultati merenja parametara turbinskog regulatora dali osnovu za izračunavanje relevantnih parametara matematičkog modela turbinskog regulatora, kao elementa EES.

Ispitivanje kvaliteta rada agregata u sekundarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene nije bilo moguće izvršiti zato što ovaj agregat tada nije bio uključen u sistem za sekundarnu regulaciju. Potrebna oprema za ostvarivanje funkcije sekundarne regulacije je ugrađena u sistem upravljanja agregatom, ali do perioda vremena u kome su izvršena predmetna ispitivanja navedena oprema nije bila puštena u rad.

### 6.3.2 Određivanje vrednosti stalnog statizma $b_p$

Na osnovu rezultata merenja određena je veličina stalnog statizma turbinskog regulatora  $b_p$ , prema definiciji, kao nagib karakteristike promene učestanosti, odnosno brzine obrtanja agregata, u zavisnosti od promene položaja klipa servomotora usmernog aparata, odnosno otvora usmernog aparata turbine (saglasno standardu IEC61362, s.2.4.7.).

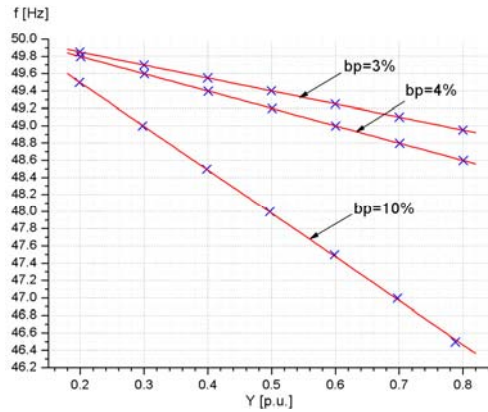
Na zaustavljenom agregatu izvršena je simulacija rada agregata u praznom hodu. Na kanal merenja učestanosti obrtanja agregata doveden je sinusoidalni signal promenljive učestanosti sa togeneratora. Učestanost je menjana u sukcesivnim koracima od 150 mHz, 200 mHz i 500 mHz, redom. Svaka naredna promena učestanosti vršena je nakon uspostavljanja kvazistacionarnog stanja. To je urađeno za tri postavljene veličine stalnog statizma  $b_p$  u iznosu 3%, 4% i 10% (raspoloživi opseg podešenja stalnog statizma regulatora je 0÷10%). Izmerene vrednosti stalnog statizma su iznosile 2.998%, 4.000% i 10.112%. Na osnovu dobijenih rezultata ogleđa, formirana je statička karakteristika agregata, koja je prikazana na slici 6 [22].

Dakle, izmerene vrednosti stalnog statizma u odnosu na postavljene vrednosti odstupaju u granicama koje su dozvoljene standardom IEC61362, s.2.4.7. Ova važna konstacija o bliskosti podešenih i izmerenih vrednosti statizma je veoma bitna, jer omogućava njegovo pouzdano i dovoljno tačno podešavanje, odnosno usklađivanje, saglasno utvrđenim zahtevima EES Srbije, u pogledu kvalitetnog odvijanja njegove primarne regulacije učestanosti.

### 6.3.3 Odziv agregata pri odskočnoj promeni učestanosti od 200 mHz

Mogućnost rada agregata A6 u HE Đerdap 1 u primarnoj regulaciji učestanosti sagledana je na osnovu registrovanog odziva pri odskočnoj promeni učestanosti od 200 mHz, na ulazu u programski blok za regulaciju, pri radu agregata na mreži. Vrednost promene merene učestanosti mreže zadavana je u cifarskom obliku, putem interfejsa na personalnom računaru, uređaju za programiranje regulatora.

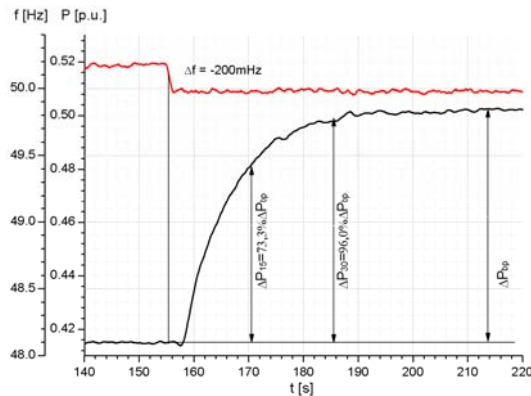
Odskočna promena učestanosti od -200 mHz, u odnosu na mrežnu učestanost, načinjena je pri ostvarenoj snazi agregata od približno 0,4  $P_n$  i postavljenoj vrednosti stalnog statizma  $b_p = 4\%$ . Koeficijent proporcionalnog pojačanja je iznosio  $k_p = 0,34$ , a vremenska konstanta integralnog dejstva  $T_i = 0.5$  s.



Slika 6. Statičke karakteristike agregata A6 u HE Đerdap 1, za postavljene vrednosti stalnog statizma od 3%, 4% i 10%

Zona neosetljivosti regulatora je određivana kada je agregat bio u stanju mirovanja. Zadavana je promena učestanosti po kanalu merenja brzine agregata iz signala sa naponskog mernog transformatora generatora. Promena učestanosti je zadavana u koracima od 1 mHz. Merenjem je ustanovljeno je da je zona neosetljivosti turbinskog regulatora manja od 2 mHz ( $i_x < 0,005\%$ ).

Električni deo turbinskog regulatora agregata A6 u HE Đerdap 1 ima podešivu veličinu mrtve zone po učestanosti (5 - 100 mHz). Podešena mrtva zona regulatora u toku sprovođenja eksperimenata je iznosila  $\pm 20$  mHz.



Slika 7. Eksperimentalno utvrđeni odziv agregata A6 u HE Đerdap 1 pri odskočnoj promeni učestanosti od -200mHz

Rezultati oglada prikazani su na slici 7 [22]. Na njoj,  $\Delta P_{bp}$  je veličina aktivirane rezerve u primarnoj regulaciji, i iznosi 19.32 MW ( $0.102 P_n$ ). Veličina  $\Delta P_{15}$  je promena snage nakon 15 s, dok je  $\Delta P_{30}$  promena snage agregata ostvarena 30 s od trenutka nastanka poremećaja. Sa slike 7 vidi se da se 15 s nakon odskočne promene učestanosti, aktivna snaga promenila za



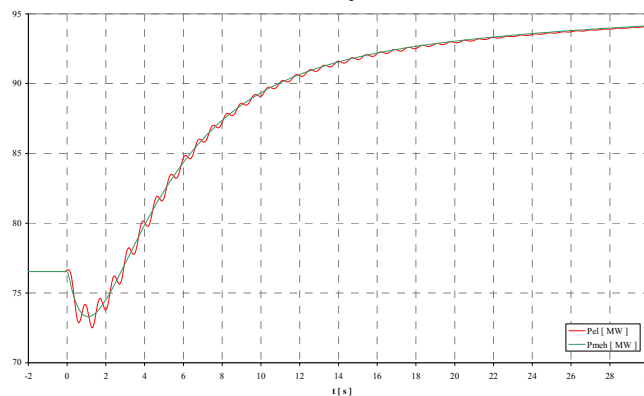
73.3% $\Delta P_{bp}$ , a da se nakon 30 s nakon odskočne promene učestanosti, aktivna snaga promenila za iznos od 96.0%  $\Delta P_{bp}$ .

Dakle, u potpunosti je zadovoljen zahtev iz aktuelne regulative, da najviše 15 s nakon poremećaja bude aktivirano 50% ili manje od ukupne rezerve primarne regulacije, a da se za aktiviranje 50% do 100% te rezerve, maksimalno vreme linearno povećava do 30 sekundi.

#### 6.4. Rezultati simulacija odziva agregata A6 u HE Đerdap 1

Utvrđivanje i verifikacija modela hidropostrojenja zahtevalo je odgovarajuća proširenja računarskih programa *DINST* [15] i *PRIMCONT* [24]. Ta proširenja su omogućila obuhvatanje odskočne promene učestanosti, saglasno uslovima u kojima su obavljena prethodno pomenuta eksperimentalna ispitivanja. Za maksimalno stanje EES Srbije, ostvareno 31. decembra 2010. godine u 17:30 h, izvršeno je uspešno testiranje uvedenih dopuna u računarske programe *DINST* i *PRIMCONT*, na primerima agregata C u HE Potpeć, A6 u HE Đerdap 2, A1 u HE Pirot i A6 u HE Đerdap 1.

U ovom radu, dati su rezultati za agregat A6 u HE Đerdap 1, kao dobra ilustracija postavljenog cilja. Na slici 8 je prikazan odziv agregata A6 u HE Đerdap 1 (preko promena električne  $P_{el}$  i mehaničke  $P_{meh}$  snage) pri odskočnoj promeni učestanosti od -200mHz, koji je simulaciono utvrđen primenom računarskog programa *PRIMCONT*. Podešene vrednosti parametara digitalnog regulatora odgovarale su vrednostima dobijenim eksperimentalnim putem, a vremenska konstanta cevovoda iznosila je 2.72 s.



Slika 8. Simulaciono utvrđeni odziv agregata A6 u HE Đerdap 1 pri odskočnoj promeni učestanosti od -200mHz

Sa slike 8 se uočava da se 15 s nakon odskočne promene učestanosti od -200mHz, aktivna snaga od svoje početne vrednosti od 76.5 MW ( $0.403 P_n$ ) promenila za 15.2 MW, odnosno 78.7 %  $\Delta P_{bp}$ . Nakon 30 s od odskočne promene učestanosti, aktivna snaga se promenila za 17.6 MW i dostigla vrednost od 94.1 MW, odnosno 91,0 %  $\Delta P_{bp}$ . Poredeći rezultate sa slikom 7 i 8, uočavaju se male razlike (1.8 %) u vrednostima aktivne snage u dostignutom postdina-

mičkom kvazistacionarnom stanju (95.85 MW eksperimentalno, 94.09 MW simulaciono). Dakle, podudarnost sa rezultatima eksperimentalnog ispitivanja je dobra.

## **7. Neki od karakterističnih primera praktične primene koncipiranih modela hidropostrojenja**

### **7.1. Model hidropostrojenja u analizama kratkotrajnih dinamičkih prelaznih procesa**

Prikazani modeli hidropostrojenja, koji su razvijeni za potrebe analiza kratkotrajnih dinamičkih procesa, datih na slikama 3 i 4, inkorporirani su u računarske programe *STATSTAB* (analize statičke stabilnosti) [15], *DINST* (analize tranzijentne stabilnosti) [15], *PRIMCONT* (strože praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, u okviru kojih se, između ostalog, prate rad i efekti primarne regulacije učestanosti) [24] i *PRIMFAST* (uprošćeno praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja) [25]. Svi ovi računarski programi su razvijeni u Institutu "Nikola Tesla", a više detalja o njima nalaze se u [15].

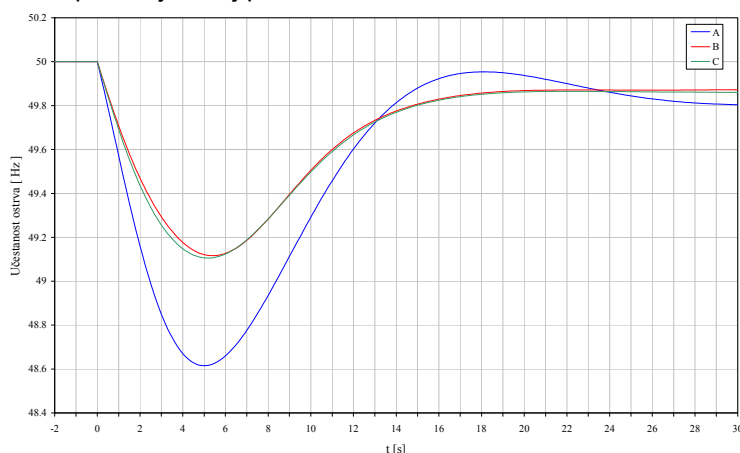
Karakterističan primer, koji se odnosi na primenu razvijenog modela hidropostrojenja, za potrebe analiza kratkotrajne dinamike, odnosi se na preliminarno sagledavanje ostrvskog rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik, što je urađeno u okviru studije [26]. Od niza mogućih scenarija dezintegracije EES Srbije, kao dobra ilustracija za postavljeni cilj, odabran je scenario gde je HE Zvornik ostala u "ostrvskom" radu, sa dalekovodima 110 kV HE Zvornik - Loznica, HE Zvornik - Loznica 2 i HE Zvornik - Ljubovija i TS 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija. Razmatrano je maksimalno stanje, koje se očekuje 2020. godine. Opterećenja TS 110/X kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija su iznosila: 35.1 MW, 13.8 Mvar, 18.4 MW, 6.9 Mvar i 8.2 MW, 3.0 Mvar, respektivno.

Agregati u HE Zvornik su imali predložene nominalne parametre generatora i blok-transformatora (nominalni faktor snage generatora u iznosu 0.90; fiksna vrednost prenosnih odnosa blok-transformatora u iznosu  $U_{gn}/121$  kV/kV). Vremenske konstante inercije agregata su iznosile 6.0 s, a vrednosti zasićenih podužnih tranzijentnih reaktansi generatora su iznosile 0.40 r.j. Dalje, razmatrano je da su revitalizovani generatori u HE Zvornik opremljeni statičkim poluprovodničkim (tiristorskim) samopobudnim sistemima, sa elektronskim (digitalno-mikroprocesorskim) regulatorom pobude, čija se regulaciona greška u osnovi formira na bazi otklona napona na krajevima generatora ("proporcionalna" regulacija). Stepen forsiranja pobude je iznosio 1.0. Takođe, razmatrano je da revitalizovani generatori u HE Zvornik imaju savremene elektrohidraulične (digitalno-mikroprocesorske) PID turbinske regulatore, sa statnim statizmom od 5% i mrtvom zonom od  $\pm 10$  mHz. Vremenska konstanta cevovoda nakon revitalizacije iznosila je 1.37 s.

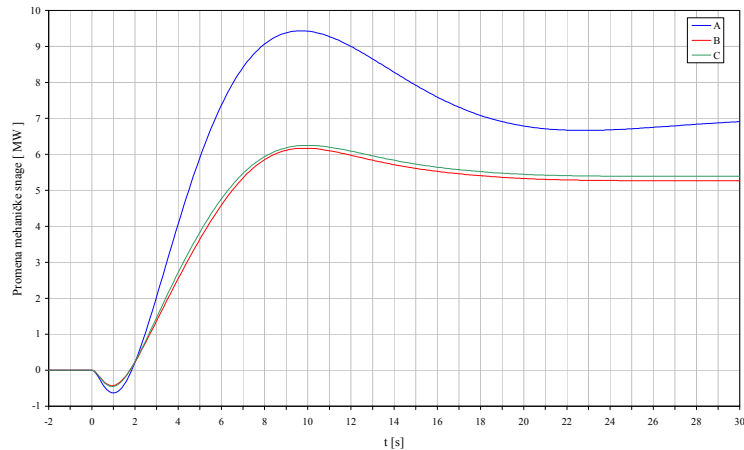
Poznato je da karakteristike potrošača (njihove zavisnosti od napona i učestanosti) mogu imati znatno veći uticaj na odvijanje prelaznih stanja i na dostignuto kvazistacionarno stanje, u uslovima "ostrvskog" rada, nego što je taj uticaj, u uslovima rada jedinstvenog EES, u okviru interkonekcije, u kojoj participira. Iz toga razloga, obuhvaćeni su sledeći načini modelovanja potrošača:

- A) aktivne i reaktivne snaga su konstantne veličine;
- B) aktivne i reaktivne snage su linerano zavisne od napona i učestanosti;
- C) aktivne snage su linerano zavisne od napona i učestanosti, a reaktivne snage su linerano zavisne od učestanosti, a kvadratno zavisne od napona.

Simultano (hipotetičko) povećanje, odnosno smanjenje aktivne i reaktivne snage potrošača u transformatorskim stanicama 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija za 10%, je uvršćeno kao karakteristični poremećaj. Traženi odzivi agregata u HE Zvornik, u dovoljno dugom vremenskom periodu nakon ovih poremećaja, dobijeni su primenom prethodno pomenutog računarskog programa *PRIMCONT*. Grafička interpretacija rezultata, a koji su indikativni za postavljeni cilj preliminarnih analiza, dati su na slikama 9 - 12.

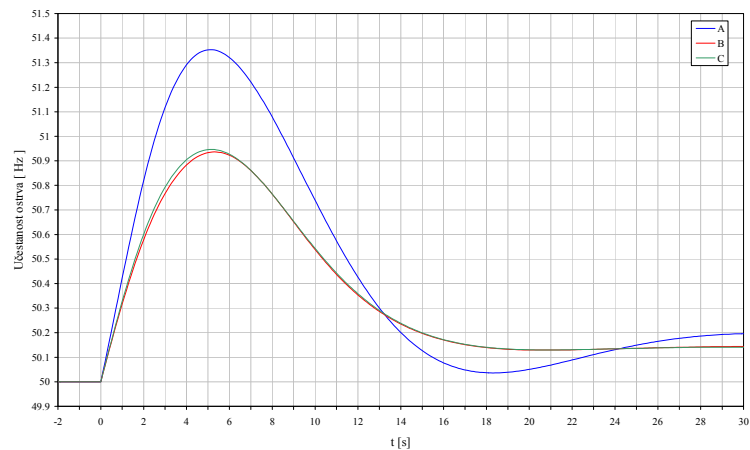


Slika 9. Dinamika promene učestanosti nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%

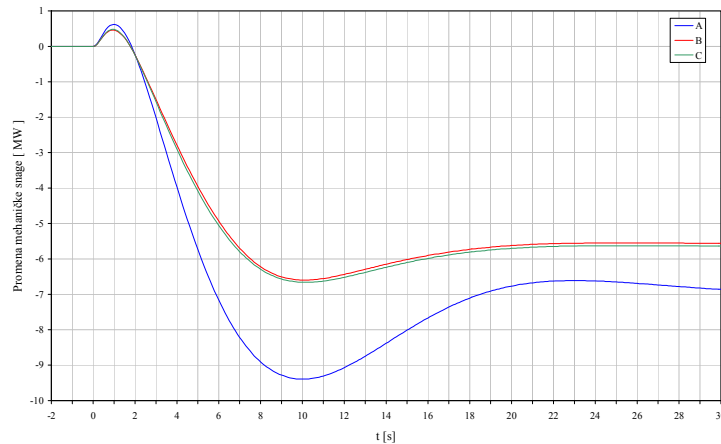


Slika 10. Dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%

Na slici 9 je data dinamika promene učestanosti u razmatranom "ostrvu", nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača u TS 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija za 10% (ukupni porast je iznosio 6.2 MW i 2.4 Mvar). Na slici 10 je data dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik, za razmatrani simultani porast potrošnje. Na slici 11 je data dinamika promene učestanosti u razmatranom "ostrvu", nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača u ovim TS 110/35 kV/kV, a slika 12 prikazuje dinamiku promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik, za razmatrani simultani "pad" za 10% potrošnje. Na ovim slikama, jedinice upotrebljene za A, B i C govore koje su karakteristike potrošača razmatrane.



Slika 11. Dinamika promene učestanosti nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%



Slika 12. Dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%

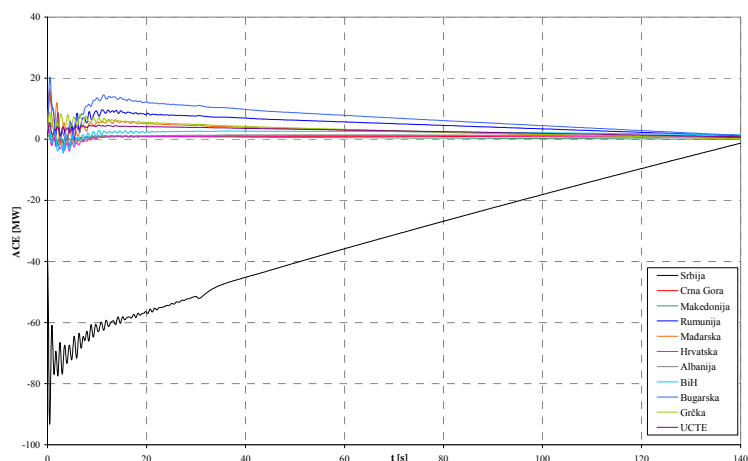
Prikazani rezultati, uz ilustraciju rada turbinske regulacije, saglasno modelu sa slike 4, govore o sposobnosti "ostrvskog" rada HE Zvornik, za jedan razmatrani, od velikog niza mogućih scenarija. To se uočava preko relativno brze obnove vrednosti učestanosti (za vreme do 30 s), nastale nakon odgovarajućih promena mehaničke snage agregata u HE Zvornik. Takođe, uočava se i značajan uticaj karakteristika potrošača na sam tok i ishod prelaznih stanja, nastalih nakon razmatranih poremećaja.

Međutim, kako je to bilo istaknuto u [26, 27], bilo bi neophodno da se ova veoma kompleksna problematika "ostrvskog" rada mnogo šire obradi, u okviru posebne studije, koja bi se bavila, između ostalog, i detaljnom kvantitativnom ocenom sposobnosti "ostrvskog" rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik. U okviru nje, poseban akcenat bio bi dat turbinskoj regulaciji HE Zvornik, sa utvrđivanjem najpovoljnijeg podešenja parametara ove regulacije, koji spadaju u kategoriju podesivih veličina. Tome bi prethodila analiza toka moguće dezintegracije EES Srbije i formiranja niza "ostrva", a zatim i analiza mogućnosti efikasne obnove pogona, kada se vrši sinhronizacija "ostrva", uz prethodnu proveru ispunjenosti relevantnih uslova za to. U okviru ove obnove pogona, posebno bi se analizirali relevantni aspekti i mogućnosti tzv. "black" starta agregata u HE Zvornik.

## 7.2. Model hidropostrojenja u analizama dugotrajne dinamike

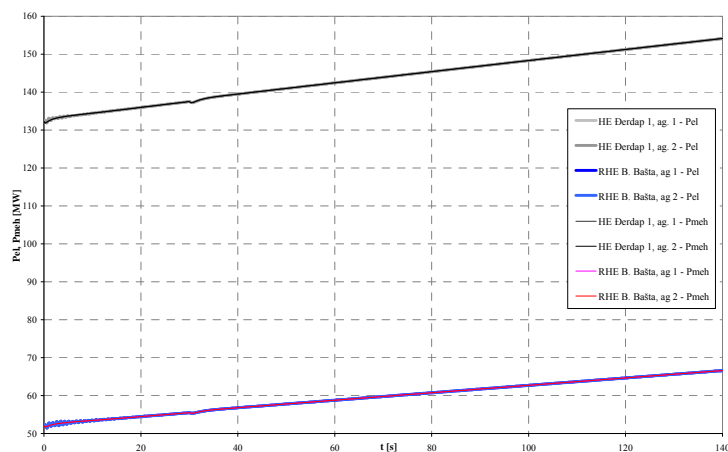
Prikazani model hidropostrojenja, formiran za potrebe analiza dugotrajnih dinamičkih procesa, inkorporiran je u računarski program *PRSETECONT* (*PR*imary, *SE*condary and *TE*rtiar *CON*Trol), koji je razvijen u Institutu "Nikola Tesla". Testiranje ovog računarskog programa obavljeno je, i dalje se 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 napo-

nskih 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 ostatka interkonekcije UCTE.

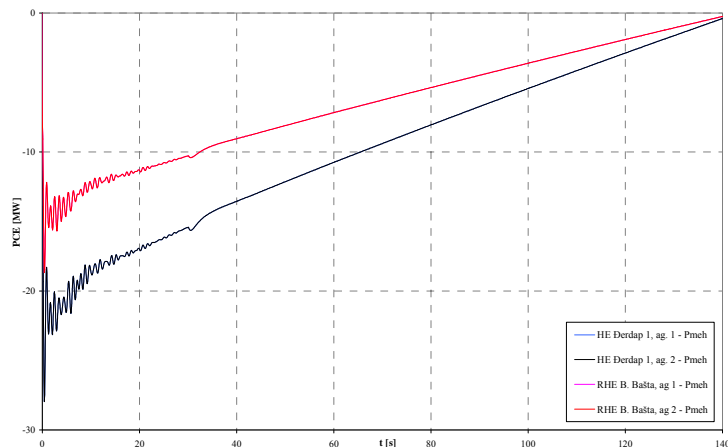


Slika 13. Promene regulacionih grešaka EES u razmatranoj interkonekciji

Od niza razmatranih varijanti, navodi se varijanta koja se odnosi na praćenje regularnog rada sekundarne regulacije učestanosti i snage razmene, nakon simultanog povećanja ukupne snage potrošača u EES Srbije za 1.0% (76.1 MW i 19.4 Mvar) [16]. Neki od rezultata, za *autonomni* način rada SMM (Serbia, Macedonia, Montenegro) regulacionog bloka, dati su na slikama 13, 14 i 15. Slika 13 prikazuje promene regulacionih grešaka EES-a u razmatranoj interkonekciji ( $ACE$ ). Promene električnih ( $P_e$ ) i mehaničkih ( $P_m$ ) snaga regulacionih elektrana u EES Srbije dati su na slici 14, a slika 15 prikazuje promene regulacionih grešaka regulacionih elektrana u EES Srbije ( $PCE$ ).



Slika 14. Promene električnih i mehaničkih snaga regulacionih elektrana u EES Srbije



Slika 15. Promene regulacionih grešaka regulacionih elektrana u EES Srbije

Rezultati prikazani na slikama 13, 14 i 15 u potpunosti koincidiraju sa činjenicom da su, za razmatrani slučaj, u potpunosti bili ostvareni potrebni i dovoljni uslovi za nesmetani rad AGC, tako da njihov poseban komentar nije neophodan. Ujedno, one na odgovarajući način pokazuju efekte modela hidropostrojenja, datog na slici 5.

## 8. Zaključci

U radu su izloženi modeli hidropostrojenja koji mogu da se koriste u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. U njihovom formiranju najpre je korišćena raspoloživa literatura iz ove problematike, kao i detaljan uvid u realno stanje ovih postrojenja u EES Srbije. Zatim, korišćeni su rezultati do sada sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja na pojedinim hidro elektranama u EES Srbije, u okviru kojih je utvrđena njihova postojeća struktura i relevantni parametri.

## Literatura

- [1] M. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema; Tom 1-Regulacija učestanosti i aktivnih snaga*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.
- [2] "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbine in Power System Studies", IEEE Committee Report, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol.PAS-92, Dec.1972. pp. 1904-1915.
- [3] "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", IEEE Working Group Report, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol.7, No.1, February 1992., pp.167-179

- [4] D.G. Ramey, J.W. Scooglund, "Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS- 89, No. 1., Jan. 1970., pp.106-112.
- [5] Young C., "Equipment and System Modelling for Large Scale Stability Studies", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-91, No 1, Jan/Feb. 1972., pp. 99-109.
- [6] T. Foord, "Step Response of a Governed Hydrogenerator", *Proc. IEE*, Vol. 125, No 11, Nov. 1978.
- [7] "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.
- [8] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [9] "Matematički modeli objekata elektroenergetskog sistema", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1981.
- [10] D. Arnautović, "Modelovanje hidrauličnog udara u cevovodima hidroelektrana", *Elektroprivreda*, br.2, 2005., str.31-40.
- [11] D. Arnautović, R. Milijanović, "An Approach to the Analysis of Large Perturbations in Hidro-electric Plants with Kaplan Turbines", *Electric Power Systems Research*, No.9, 1985., pp.115-121.
- [12] R. Milijanović, D. Arnautović, B. Ignjatović, "Analysis of Transient Processes for Bulb Turbine Governor Systems", *Proc. from 13 th Symposium*, Montreal, Kanada, 1986., paper No 28.
- [13] "PSS/E-29 (Power System Simulator for Engineering)", Power Technologies, Inc., October 2002.
- [14] "User's Manual, DIgSILENT Power Factory, *Version 14*", DIgSILENT, GmbH, Gomaringen, Germany, 2008.
- [15] D.P. Popović, *Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija*, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 255 str., ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008.
- [16] D.P. Popović, M. Ivanović, S. Minić, "Primarna, sekundarna i tercijarna regulacija u analizama dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija" rad prihvaćen za objavljivanje u časopisu *Elektroprivreda*
- [17] "Pravila o radu prenosnog sistema", Elektromreža Srbije, Verzija 1.0, april 2008.
- [18] "Pravila o radu prenosnog sistema" JP EMS, Dokumentat: Izmene i dopine", Službeni glasnik Republike Srbije br. 3/2012. od 18.01.2012.
- [19] "Ispitivanje turbinskog regulatora agregata C u HE Potpeć", Elaborat br.210020, Institut "Nikola Tesla", Beograd, oktobar, 2010.
- [20] "Ispitivanje turbinskog regulatora u HE Đerdap 2", Elaborat br. 210041, Institut "Nikola Tesla", decembar, 2010.



- [21] "Ispitivanje turbinskog regulatora agregata A1 u HE Pirot", Elaborat br. 211046, Institut "Nikola Tesla", septembar, 2011.
- [22] "Ispitivanje turbinskog regulatora u HE Đerdap 1- agregat A6", Elaborat br. 211078, Institut "Nikola Tesla", decembar, 2010.
- [23] "UCTE Operation Handbook, Policy 1: Load- Frequency Control and Performance; A. Primary Control", Final Version (approved by SC on 19 March 2009)
- [24] 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.
- [25] D.P. Popović, "Jedna metoda za brzu ocenu toka i efekata primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih interkonekcija", *Elektroprivreda*, br.2, 2001., str.3-15.
- [26] "Definisanje najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika revitalizovanih agregata u HE Zvornik priključenih na prenosnu mrežu 110 kV sa aspekta zahteva EES-a Srbije", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2011.
- [27] M. Ivanović, D.P. Popović, S. Minić, "Ocena mogućnosti revitalizovanih agregata u HE Zvornik u uslovima ostrvskog rada", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 21, 2011., str.79-88.

**Abstract.** This paper presents hydropower plant models used in dynamic security analyses of electric power interconnections. The general structure and functional block diagram of a hydropower plant are given, as well as a review of the current state of hydropower plants within the electrical power system of Serbia. A hydropower plant model used for analyses of short-term dynamics, where transient stability analyses are dominant, is presented. Additionally, a hydropower plant model used for the analyses of long-term dynamics is presented, providing insight into the role and effects of a hydropower plant, which would be included in the secondary and tertiary load-frequency control. Following verification based on experimental measurements, all these models have been incorporated into appropriate computer programs for dynamic security analyses of electric power interconnections. The computer programs mentioned have been developed at the Institute "Nikola Tesla" and some typical examples of their application have been provided.

**Keywords:** model, hydro power plant, control, short, mid and long-term dynamics, primary, secondary and tertiary load frequency control

## **Models of Hydro Power Plant in Dynamic Security Analyses of Electric Power Interconnections**