energija 5

ČASOPIS HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE



UDK 621.31 ENJAAC 47 (5) 333 – 440 ISSN 0013-7448 ENERGIJA • GODINA 47 • BROJ 5 • STRANA 333 – 440 • ZAGREB, LISTOPAD 1998. UDK 621.31

ENJAAC 47 (5) - (1998) - 333-440

Godištc 47 (1998)

ISSN 0013-7448

Br. 5

ČASOPIS HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE



IZDAVAČI – PUBLISHER

Hrvatska elektroprivreda

POMOĆ U IZDAVANJU

Ministarstvo znanosti, tehnologije i informatike

IZDAVAČKI SAVJET – THE PUBLISHING COUNCIL

Mr. sc. Branko *Grgić*, dipl. ing. (predsjednik), HEP Split – Adrijano *Fišer*, dipl. ing., HEP Rijeka – Marijan *Kalea*, dipl. ing., HEP Osijek – Damir *Karavidović*, dipl. ing., HEP Osijek – Mr. sc. Mladen *Mandić*, dipl. oec., HEP Zagreb – dr. sc. Vladimir *Mikuličić*, dipl. ing., FER Zagreb – dr. sc. Niko *Malbaša*, dipl. ing., Ekonerg, Zagreb

UREDNIČKI ODBOR - EDITORIAL BOARD

Glavni urednik – Editor-in-chief: dr. sc. Zorko *Cvetković*, dipl. inž. Urednik - Editor: Zdenka *Jelić*, prof.

Urednici rubrika – Contributing Editors: "Energetski sistemi", dr. sc. Goran Granić, dipl. ing. – "Hidroelektrane", Vladimir Prizl, dipl. ing. – "Termoelektrane i toplane", Ivan Vučetić, dipl. ing. – "Prijenos električne energije", mr. sc. Zdenko Tonković, dipl. ing. – "Razvoj, distribucija i potrošnja električne energije", Mladen Ježić, dipl. ing. i Dasenko Baldasari, dipl. ing. – "Ekonomsko poslovanje i tarifna politika", dr. sc. Jure Šimović, dipl. ecc., mr. sc. Mladen Mandić, dipl. ecc. i Marijan Magdić, dipl. ecc. – "Ekologija", dr. sc. Niko Malbaša, dipl. ing. – "Informatika", Nikola Lastrić, dipl. ing. – Tehnički urednik – Technical Editor: Branko Mališ – Lektor – Lingvistic Adviser: Šimun Čagalj, prof. – Metrološka recenzija – Metrologic review: mr. sc. Mladen Zeljko, dipl. ing.

Redakcija završena 1998 - 12 - 15

SADRŽAJ

Zagreb 1998

Zeljko M.: Suradnja Republike Hrvatske i Međunarodne
agencije za atomsku energiju (IAEA) na području
planiranja energetskog sektora (Pregledni članak)
Brezovec M. – Kuzle I. – Tešnjak S.: Matematički model
hidroagregata s dvostruko reguliranom turbinom (Izvorni
znanstveni članak)
Barbalić N. – Marijan G. – Jelavić V.: Razvoj teorijskog
predloška za procjenu uvjeta o kakvoći zraka za nove
termoelektrane na ugljen (Izvorni znanstveni članak) 357
Matanić R.: Pregled stanja razvoja naprednih termičkih
reaktora s naglaskom na tehničke i sigurnosne
karakteristike (Pregledni članak)
Sabolić D.: Temelji pokretnih radiokomunikacija – I. dio:
Površinsko širenje elektromagnetskih valova i svojstva
prijamnog polja (Pregledni članak) 393
Javornik Vončina S.: Generičko kabliranje poslovnih zgrada
prema međunarodnoj normi ISO/IEC 11801
(Prethodno priopćenje)
Vijesti iz elektroprivrede
Iz strane stručne literature
Savjetovanja i konferencije

Fotografija na omotnoj stranici ZAGREB POD SNIJEGOM

> Časopis je ubilježen u Ministarstvu kulture i prosvjete – Sektor informiranja pod brojem 161 od 12. 11. 1992, a prema mišljenju istog ministarstva oslobođen je plaćanja poreza na promet (rješenje 532-03-1/5-92 od 3. studenoga 1992).

Uredništvo i uprava:

Zagreb, Ulica grada Vukovara 37

Telefoni 6125-641 i 6125-111/641, telefax 6170-438

Godišnje izlazi 6 brojeva. Godišnja pretplata za pojedinec iznosi 300,00 kn, a za poduzeća i ustanove 480,00 kn (za studente 70,00 kn).

Cijena pojedinog broja u prodaji 50,00 kn.

Za inozemstvo \$ 95 godišnje,

Žiro računi kod ZAP, Zagreb - Hrvatska elektropriveda (za "Energiju") broj 30101-604-495

> Tisak: TIVA – Tiskara Varaždin Naklada 1000 primjeraka

MATEMATIČKI MODEL HIDROAGREGATA S DVOSTRUKO **REGULIRANOM TURBINOM**

Miljenko B r e z o v e c, Varaždin – mr. sc. Igor K u z I e – prof. dr. sc. Sejid T e š nj a k, Zagreb

UDK 621.311.21.1 IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Pri modeliranju hidroagregata s dvostruko reguliranom turbinom mora se poći od činjenice da se regulacija protoka vode kroz turbinu provodi i pomoću lopatica sprovodnog aparata i pomoću lopatica rotora što znatno otežava razvoj modela. U radu je opisan detaljan nelinearni model dvostruko regulirane turbine. Da bi se nelinearnost elemenata opisala na zadovoljavajući način korištena je metoda linearizacije po dijelovima. S obzirom da su protok i korisnost funkcije dvije varijable (otvor sprovodnog aparata, zakret lopatica rotora) ta je metoda proširena i na funkcije dvije varijable. Posebna pozornost je posvećena modeliranju kulise, a opisan je i matematički model turbinskog regulatora za dvostruko regulirane vodne turbine. Razvijeni matematički model je testiran i pokazao je zadovoljavajuće rezultate. Parametri potrebni za provođenje simulacija određeni su uglavnom na osnovi raspoloživih podataka o agregatima HE Dubrava koji su predočeni u Dodatku. Odzivi dobiveni simulacijom usporedeni su s odzivima snimljenim prigodom ispitivanja agregata, nakon puštanja elektrane u pogon, i uočena je velika sličnost.

Ključne riječi: hidroagregat (hydrounit), turbinski regulator (turbine governor), pomične lopatice rotora (adjustable runner vanes), lopatice sprovodnog aparata (guide vanes), dvostruko regulirane turbine (double regulated turbines), topografski dijagram (hill diagram), kulisa (cam), linearizacija po dijelovima (linearization by parts), protok (flow).

1. UVOD

Hidroagregat predstavlja izrazito složen viševeličinski nelinearni dinamički sustav pa je za opis njegovog djelovanja potreban opsežan matematički model. Detaljnost matematičkog opisa ovisi o vrsti analize, odnosno o cilju istraživanja koje se provodi. Osnovni elementi hidroagregata kao dinamičkog sustava su vodna turbina s dovodnim sustavom, turbinski regulator i generator s uzbudnim sustavom. Pri modeliranju hidroagregata obično se polazi od modela tih elemenata. Pojedini elementi takvog sustava modeliraju se za odredena istraživanja više ili manje detaljno, ovisno o utjecaju tog elementa na fizikalno ponašanje sustava u cielini.

Vodne turbine s pomičnim lopaticama rotora imaju visoku korisnost u širokom rasponu protoka (snaga) jer se lopatice rotora zakreću tako da se što bolje prilagode uvjetima strujanja za određeni protok kroz turbinu. Takve dvostruko regulirane turbine najčešće se nazivaju Kaplan-turbinama. Danas međutim postoje različite izvedbe dvostruko reguliranih turbina s različitim nazivima pa se Kaplan-turbinama obično nazivaju samo dvostruko regulirane turbine s vertikal-

nom osovinom, dok se za ostale izvedbe koriste drugi nazivi (razne cijevne turbine, Straflo turbine, dijagonalne Deriaz turbine).

Pri modeliranju hidroagregata s dvostruko reguliranom turbinom mora se poći od činjenice da se regulacija protoka vode kroz turbinu provodi i pomoću lopatica sprovodnog aparata i pomoću lopatica rotora što znatno otežava razvoj modela:

U ovom radu predstavljen je detaljan nelinearni model dvostruko regulirane turbine. Za relizaciju odgovarajućeg simulacijskog modela potrebni su modeli i ostalih elemenata u regulacijskom krugu, prije svega turbinskog regulatora. Opisan je stoga i matematički model turbinskog regulatora za dvostruko regulirane vodne turbine.

2. MATEMATIČKI MODEL DVOSTRUKO REGULIRANE VODNE TURBINE

Vodna turbina je općenito izrazito nelinearni element zbog nelinearníh odnosa izmedu mehaničke snage. protoka kroz turbinu, brzine vrtnje, tlaka pred turbinom, zakreta lopatica privodnog (i radnog) kola tur-

囊

Energija, god. 47 (1998) 5, 345-356

7

ć

s k

k

bine. Linearizirani se model turbine može koristiti samo ako se promatraju male promjene oko odredene radne točke. Kada se promatraju velike promjene treba uzeti u obzir da karakteristične veličine (npr. jedinične vrijednosti protoka i brzine vrtnje) nisu konstantne, nego se mijenjaju u skladu s karakteristikama turbine.

Pri razvijanju modela potrebno je matematički opisati eksperimentalno dobivene trodimenzionalne karakteristike turbine. Najčešće se koristi metoda interpolacije tako da se karakteristike za područje oko nazivne radne točke aproksimiraju pravcima ili parabolama [1,2]. Da bi se međutim karakteristike turbine dovoljno točno opisale u čitavom području djelovanja potrebno je primjeniti složenije matematičke alate. Jedna od metoda koja omogućava precizno opisivanje karakteristika turbina je linearizacija po dijelovima [3].

2.1. Linearni model

Protok kroz turbinu i moment turbine kod dvostruko reguliranih turbina su općenito složene nelinearne funkcije 4 varijable:

$$q = q (h, \omega, y_W, y_R)$$

$$m = m (h, \omega, y_W, y_R)$$
(1)

gdje je q protok kroz turbinu (p.u.), m moment turbine (p.u.), h tlak pred turbinom (p.u.), ω brzina vrtnje (p.u.), $y_{\mu\nu}$ položaj stapa servomotora statorskih lopatica koji odgovara otvoru sprovodnog aparata (p.u.), y_R položaj stapa servomotora rotorskih lopatica koji odgovara njihovom zakretu (p.u.).

Za male promjene oko stacionarne radne točke te se funkcije mogu linearizirati, tako da vrijedi:

$$\Delta q = a_{11} \Delta h + a_{12} \Delta \omega + a_{13} \Delta y_W + a_{14} \Delta y_R$$

$$\Delta m = a_{21} \Delta h + a_{22} \Delta \omega + a_{23} \Delta y_W + a_{24} \Delta y_R$$
 (2)

gdje su a_{ij} odgovarajuće parcijalne derivacije u radnoj točki određene prema

$$a_{11} = \frac{\partial q}{\partial h} \quad a_{12} = \frac{\partial q}{\partial \omega} \quad a_{13} = \frac{\partial q}{\partial y_{W}} \quad a_{14} = \frac{\partial q}{\partial y_{R}}$$

$$a_{21} = \frac{\partial m}{\partial h} \quad a_{22} = \frac{\partial m}{\partial 0} \quad a_{23} = \frac{\partial m}{\partial y_W} \quad a_{34} = \frac{\partial m}{\partial y_R} \quad (3)$$

Hidroelektrane s dvostruko reguliranim turbinama imaju kratak dovodni sustav, pa se pretpostavlja nestlačivost vode i stijenki sustava za dovod vode, tj. kruti stupac vode, tako da vrijedi jednadžba

$$\frac{\Delta h}{\Delta q} = -T_{w}s \tag{4}$$

koja u Laplaceovom s području predstavlja impedancijsku funkciju dovodnog sustava, gdje je T_{μ} vremenska konstanta dovodnog sustava kojom se uzima u obzir tromost vodene mase u dovodu pred turbinom.

Jednadžba (2) zajedno s jednadžbom (4) predstavlja osnovni linearni model dvostruko regulirane turbine koji općenito vrijedi za male promjene oko radne točke za koju su određene potrebne parcijalne derivacije kao parametri. Parcijalne derivacije određuju se kao funkcije zakreta lopatica rotora i otvora sprovodnog aparata prema podacima dobivenim ispitivanjima na fizičkim modelima turbina.

Pri većim poremećajima parcijalne derivacije brzo odstupaju od vrijednosti određenih za polaznu radnu točku pa takav linearan model brzo postaje netočan. Za takve slučajeve parcijalne derivacije definiraju se kao funkcije zakreta lopatica rotora i otvora sporovodnog aparata [4]:

$$\frac{\partial q}{\partial y_{g}} = f_{1i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial q}{\partial h} = f_{1i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial q}{\partial \omega} = f_{1i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial q}{\partial \omega} = f_{1i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial q}{\partial y_{u}} = f_{1i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial q}{\partial \omega} = f_{2i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial m}{\partial h} = f_{2i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial m}{\partial \omega} = f_{2i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial m}{\partial y_{u}} = f_{2i}(y_{w}, y_{g}) \frac{\partial m}{\partial h}$$
(5)

Svaka funkcija je linearna po y_{W} i y_{R} i valjana u području oko radne točke. Grafički je to ekvivalentno aproksimaciji dijela površine koja predstavlja parcijalnu derivaciju ravninom. Takvo predstavljanje parcijalnih derivacija vodi na nelinearni model.

2.2. Karakteristike vodnih turbina

Za promatranje dinamičkih pojava pri većim poremećajima snage, odnosno protoka kroz turbinu treba uzeti u obzir nelinearne značajke turbine, jer su parcijalne derivacije (3) nelinearne funkcije, tako da opis ponašanja turbine kod većih poremećaja nužno vodi na nelinearni model turbine.

Jedini način da se matematički opiše nelinearno ponašanje vodne turbine je poznavanje osnovnih karakteristika turbine, tj. ovisnosti mehaničke snage, mehaničkog momenta, odnosno protoka i stupnja korisnog djelovanja o otvoru sprovodnog aparata, zakretu lopatica rotora te o brzini vrtnje pri zadanom padu. Za potrebe matematičkog modeliranja turbine koriste se podaci proizvodača, obično dobiveni mjerenjima na fizičkim modelima, koji se dopunjuju eksperimentalnim podacima dobivenim mjerenjima na realnim turbinama.

Ti se podaci obično daju u obliku topografskog (školjkastog) dijagrama u određenom koordinatnom sustavu. Kako kod dvostruko reguliranih turbina oblik topografskog dijagrama ovisi o zakretu lopatica rotora mogao bi se za svaki kut zakreta lopatica nacrtati poseban topografski dijagram. To bi dovelo do velikog broja dijagrama i nepreglednosti, pa se pogonska svojstva takvih turbina prikazuju u jednom topografskom dijagramu s podacima za optimalni otvor sprovodnog aparata i za optimalni zaktret lopatica rotora, tj. za najveći mogući stupanj korisnosti.

u ob-

tavlja

rbine

ločke

e kao

lunk-

apa-

i na

od-

idnu

ičan.

u se

vod-

(5)

ičju

ksi-

eri-

nih

reba

ci-

)IS

ทล

in ih e,

)-(-

n u

۰.

-

1

n,

3

Odredivanje optimalnih radnih točaka prikazano je na slici 1. Za određeni pad H=konst. mogu se nacrtati krivulje $\eta(Q)$ za različite y_R . Nacrta li se anvelopa tih krivulja, dobiva se krivulja $\eta_{opt}(Q)$ jer se za vrijeme po-

$\eta \stackrel{\blacktriangle}{\models} H = konst.$



Slika 1. Odredivanje optimalnog stupnja djelovanja η_{opt} optimalog otvora sprovodnog aparata y_{wopt} i optimalnog zakreta lopatica rotora y_{Ropt} ovisno o protoku Q, a za H = konst.

gona mijenja kut zakreta lopatica rotora. S druge strane, svakom položaju lopatica rotora odgovara neki otvor sprovodnog aparata. Unese li se u dijagram na slici 1b) ovisnost otvora sprovodnog aparata o protoku Q za y_R =konst. (crtkane krivulje), mogu se odrediti točke optimalnog otvora sprovodnog aparata za svaki y_R koji odgovara optimalnom stupnju djelovanja. Spajanjem točaka optimalnog otvora sprovodnog aparata na slici 1b) dobiva se krivulja $y_{Hopt}(Q)$. Osim toga pomoću podataka iz dijagrama na slici 1a) dolazi se do ovisnosti optimalnog položaja lopatica y_{Ropt} o protoku Q, što je predočeno na slici 1c).

Ponavljanjem tog postupka za višepadova II, dobivaju se podaci H, Q, y_{Ropt}, y_{Wopt} i η_{opt} , prema kojima se može nacrtati topografski dijagram dvostruko regulirane turbine u koordinatnom sustavu (Q, H). Na slici 2 prikazan je topografski dijagram agregata 1 HE Dubrava. Topografski dijagrami izvedenih turbina dobivaju se zapravo preračunavanjem iz topografskih dijagrama agregata. Kod snimanja karakteristika izvedene turbine snaga turbine izračunava se tako da se od snage generatora ili blok transformatora oduzmu gubici. Slično je i s preračunavanjem pada - mjerenje netto pada često je otežano, pa se mjeri brutto pad (razlika između gornje i donje vode), a zatim se oduzimaju gubici. Topografski dijagrami i ostale karakteristike agregata i turbine su kvalitativno vrlo slični. Veću praktičnu primjenu ima topografski dijagram agregata jer daje ovisnost snage i korisnosti agregata o protoku i brutto padu, dok topografski dijagram turbine daje ovisnost snage i korisnosti turbine o protoku i netto padu. U oba topografska dijagrama obično se nalaze i podaci o pripadnim otvorima privodnog i radnog kola.

Svakom padu na turbini odgovara druga ovisnost otvora sprovodnog aparata i kuta zakreta lopatica rotora. Ta ovisnost se izračunava iz topografskog dijagrama. Da bi se postigli optimalni uvjeti pogona agregata, potrebno je izvesti takvu turbinsku regulaciju da se u svim prilikama ostvari najveći mogući stupanj djelovanja, odnosno da se osigura međusobna veza između y_{ikopt} .



Slika 2. HE Dubrava, agregat 1 - topografski dijagram

2.3. Nelinearni model

Pri razvijanju nelinearnog modela potrebno je aproksimirati odnosno matematički opisati karakteristike turbine. Takav pristup vodi na potpuni model turbine, no potrebno je raspolagati mnoštvom podataka odnosno navedenim karakteristikama turbine u čitavom radnom području.

Razvijeno je nekoliko metoda pomoću kojih se eksperimentalno dobivene karakteristike prilagođavaju tako da se pretvore u odgovarajuće oblike koji se mogu matematički opisati. Ovdje se koristi metoda linearizacije po dijelovima koja se zasniva na tome da se određena karakteristika opiše s odgovarajućim brojem segmenata, tj. da se dijelovi krivulje aproksimiraju dijelovima pravaca. Kako su međutim protok i korisnost funkcije dvije varijable (otvor sprovodnog aparata, zakret lopatica rotora) ta je metoda proširena i na funkcije dvije varijable. Za metodu linearizacije po dijelovima potrebno je ulazne podatke pripremiti u tabličnom obliku pa se koriste i određeni pomoćni matematički alati za obradu eksperimentalnih rezultata. Uz pretpostavku krutog stupca vode (krute stijenke dovodnog sustava, voda nestlačiva) osnovne hidrodinamičke jednadžbe u relativnim jedinicama su

$$p = \eta \ q \ h \tag{6}$$

$$\frac{d\Delta q}{dt} = -\frac{l}{T_w} \quad \Delta h \tag{7}$$

gdje je p snaga turbine (p.u.), η stupanj korisnog djelovanja turbine, q protok kroz turbinu (p.u.), h tlak pred turbinom (p.u.), $T_{\rm B'}$ vremenska konstanta dovodnog sustava (s), t vrijeme (s). Umjesto snage turbine ponekad se računa snaga agregata pa se tada u (6) uvrštavaju korisnost agregata i brutto pad.

Jednadžba (7) može se pomoću Laplaceovog operatora zapisati u ovom obliku

$$\frac{q-q_n}{h-h_0} = -\frac{I}{T_w s} \tag{8}$$

gdje je q_0 početna vrijednost protoka kroz turbinu (p.u.), h_0 početna vrijednost tlaka pred turbinom (p.u.). Karakteristike turbine obično su dane za neki određeni pad $h = h_0$. Moment turbine i protok kroz turbinu mogu se za različite padove, tj. tlakove pred turbinom izraziti kao

$$q = q \left(y_{W'}, y_{R}, \omega \right) \sqrt{h_{n} + h}$$

$$m = m \left(y_{W'}, y_{R}, \omega \right) \left(h_{n} + h \right)$$
(9)



Slika 3. Blok shema modela dvostruko regulirane vodne turbine

U većini slučajeva mogu se zanemariti promjene brzine vrtnje (posebno kada agregat radi paralelno s EE sus. tavom) pa se tada funkcijska ovisnost $q(y_{11}, y_{16}, \omega)$ reducira u $q(y_{11}, y_{16})$.

Jednadžbe (6), (7) i (9) zajedno s $q(y_{10}, y_R)$ i $\eta(y_{10}, y_R)$ predstavljaju nelinearni model dvostruko regulirane turbine koji se može prikazati u obliku blok sheme kao na slici 3. Ako se koriste podaci za korisnost agregata i brutto pad, tada se kao rezultat dobiva snaga agregata umjesto snage turbine.

2.3.1. Ovisnost protoka o otvoru sprovodnog aparata i zakretu lopatica rotora

Protok kroz turbinu ovisi općenito o otvoru sprovodnog aparata. Kod dvostruko regulirane turbine protok znatno ovisi i o zakretu lopatica rotora, pa se karakteristike daju za različite kuteve zakreta. Za potrebe analize jednostruko reguliranih turbina često se polazi od pretpostavke da se protok povećava linearno s povećanjem otvora sprovodnog aparata tako da se krivulja $q(y_w)$ aproksimira pravcem koji prolazi kroz nazivnu radnu točku. Kod modeliranja dvostruko regulirane turbine ta pretpostavka ne vrijedi ni uz konstantane kuteve zakreta lopatica rotora. Mnogo toćnije ta se ovisnost može matematički opisati pomoću funkcije

$$q(\mathbf{y}_w) = a_q \cdot \mathbf{y}_w^{b_q} \tag{10}$$

gdje su q protok kroz turbinu (p.u.), y_{ur} položaj stapa servomotora koji odgovara otvoru sprovodnog aparata (p.u.), a_q i b_q koeficijenti koji se empirijski određuju za konkretnu turbinu.

Ovisnost protoka o zakretu lopatica rotora je složena i teško se može precizno matematički opisati. Dobri rezultati u usporedbi sa snimljenim karakteristikama turbina HE Dubrava dobiveni su korištenjem aproksimacije

$$q(y_R) = e_q y_R + I \tag{11}$$

gdje je y_R položaj stapa servomotora koja odgovara zakretu lopatica rotora (p.u.), a e_q koeficijent koji linearno ovisi o otvoru sprovodnog aparata tj.

$$e_q = c_q y_W + d_q \tag{12}$$

gdje su c_q i d_q također empirijski određeni koeficijenti.

Objedinjavanjem izraza (10), (11) i (12) dobiva se sljedeći izraz za izračunavnaje protoka za zadani otvor sprovodnog aparata i zakret lopatica rotora:

$$q(y_{W}, y_{R}) = a_{q} \cdot y_{W}^{bq} \cdot \left(\left(c_{q} \cdot y_{W} + d_{q} \right) y_{R} + 1 \right)$$
(13)

Prikaže li se grafički ta funkcija dviju varijabli dobiva se površina u prostoru čiji je oblik prikazan na slici 4.

zinc susedu-

 (y_R) ane kao ata i

gata

i odtok cralod

S se ΟZ unse))

a a

a i 1

Unese li se u dijagram na slici 1b) ovisnost otvora $y_{\rm ur}$ o protoku Q za y_{R} =konst. (crtkane krivulje), mogu se

odrediti točke optimalnog otvora sprovodnog aparata za svaki položaj y_k koji odgovara optimalnom stupnju djelovanja. Tako se dobiva ovisnost protoka o otvoru sprovodnog aparata uz pretpostavku da turbinska regulacija djeluje tako da je zakret lopatica u stacionarnom stanju jednak optimalnom za određeni otvor sprovodnog aparata.

Slika 4. Ovisnost protoka o otvoru sprovodnog aparata i

zakretu lopatica rotora

Na slici 4 prikazana je ovisnost protoka o otvoru sprovodnog aparata za nekoliko zakreta lopatica rotora, a za svaki položaj unesene su točke optimuma. Spajanjem tih točaka dobiva se prikaz ovisnosti protoka o otvoru sprovodnog aparata uz pretpostavku da je za svaki otvor sprovodnog aparata pripadni zakret lopatica rotora optimalan.

2.3.2. Ovisnost stupnja korisnosti o otvoru sprovodnog aparata i zakretu lopatica rotora

Stupanj korisnosti vodnih turbina jako ovisi o protoku. Kod dvostruko reguliranih turbina lopatice rotora se zakreću tako da se što bolje prilagode uvjetima strujanja pa se zbog toga postiže visok stupanj korisnosti u širokom rasponu protoka, a ne samo u području oko nazivnog protoka. Princip određivanja optimalnog stupnja korisnosti dvostruko reguliranih turbina objašnjen je slikom 1.

Problem opisa ovisnosti stupnja korisnosti o protoku svodi se na određivanje ovisnosti stupnja korisnosti o otvoru sprovodnog aparata i zakretu lopatica rotora, analogno kao za protok. Najprije se određuje stupanj korisnosti u ovisnosti o protoku za konstantne zakrete lopatica rotora. Ta se ovisnost dovoljno točno možc matematički opisati parabolom:

$$\eta(q) = -a_{\eta} \left(q - q_{opt} \right)^2 + \eta_{opt}$$
(14)

gdje je η stupanj korisnosti turbine, η_{out} optimalni stupanj korisnosti za određeni zakret lopatica rotora, q protok (p.u.), qopt optimalni protok kod danog zakreta lopatica rotora, a_n koeficijent koji se određuje prema karakteristikama konkretne turbine. Parametri q_{opt} i non određuju se za određene zakrete lopatica rotora metodom linearizacije po dijelovima prema točkama $(q_{oot,i}, \eta_{oot,i})$ koje se za dane položaje lopatica rotora y_{R_1} određuju prema rezultatima ispitivanja provednim na konkretnim turbinama (slika 1). Za različite kuteve zakreta lopatica rotora dobiva se niz parabola $\eta(q, v_n)$. Koeficijent $a \eta$ određuje se iz podataka za dvije radne točke - optimum (q_{upp}, η_{opt}) i prazni hod $(q_{PH}, \eta_{PH} = 0)$

$$\eta(q_{PH}) = -a_{\eta}(q_{PH} - q_{opt})^{2} + \eta_{opt} = 0 \quad (15)$$

$$a_{\eta} = \frac{\eta_{opt}}{(q_{PH} - q_{opt})^2}$$
(16)

Kako se protok obično daje kao funkcija otvora sporovodnog aparata i zakreta lopatica rotora $q(y_m, y_R)$, može se i korisnost izraziti kao funkcija tih dviju varijabli $\eta(y_{11}, y_{12})$. Tako dobivena funkcijska ovisnost predstavlja površinu koja je prikazana na slici 5 tako da su točke iste korisnosti označene istom bojom. Iz dvodimenzionalnog prikaza očito je kako treba djelovati kulisa tj. kako se trebaju zakrenuti lopatice rotora da bi se za određeni otvor sprovodnog aparata postigla najveća moguća korisnost.

3. MATEMATIČKI MODEL REGULATORA DVOSTRUKO REGULIRANE VODNE TURBINE

Frekvencija elektroenergetskog sustava ovisna je o ravnoteži proizvodnje i potrošnje električne snage pa se prizvodnja pojedinih agregata uobičajno prilagođava potrebama sustava (regulacija frekvencije i djelatne snage). Princip djelovanja turbinskog regulatora temelji se na promjeni protoka kroz turbinu u skladu s regulacijskom pogreškom koja je posljedica razlike postavne i stvarne (mjerene) vrijednosti brzine vrtnje, odnosno djelatne snage, uzrokovane narušavanjem ravnoteže između proizvodnje i potrošnje snage u sustavu. Turbinski regulator djeluje u smislu izjednačavanja snage proizvodnje i potrošnje, odnosno održanja frekvencije sustava.



 Δc

 Δr

Н

sι

St

n

U

Ċ

ľ

Ì.

Sι

Κ

e

g

L

ĝ

;

j

d

b



Slika 5. Ovisnost korisnosti o otvoru sprovodnog aparata i zakreta lopatica rotora

Turbinski regulator se u osnovi sastoji od mjernog i izvršnog dijela. Mjerni dio može biti elektromehanički ili elektronički, a izvršni dio čine hidraulički razvodnici i servomotori. Kako turbinski regulator mora djelovati na promjenu protoka fluida kroz turbinu, izvršni dio regulatora djeluje na pomak stapa glavnog servomotora, odonosno na otvor sprovodnog aparata kojim je određen protok kroz turbinu. Mjerni dio regulatora formira signal proporcionalan brzini vrtnje ω , odnosno snazi *P*, agregata koji se uspoređuje sa signalom postavne vrijednosti ω_{ref} odnosno *P*_{ref}.

U stacionarnom stanju turbinski regulatori imaju tzv. statičku karakteristiku koja daje ovisnost brzine vrtnje o opterećenju. To je pravac čiji nagib odgovara relativnoj promjeni frekvencije koja se obično naziva statičnost regulatora. Promjenom postavne vrijednosti brzine vrtnje, odnosno snage, karakteristika regulatora pomiče se tako da zadanom opterećenju odgovara nazivna brzina vrtnje.

Pri otočnom radu promjena postavne vrijednosti uzrokuje promjenu brzine vrtnje agregata; s druge strane, pri paralelnom radu sa sustavom promjena postavne vrijednosti uzrokuje promjenu snage agregata.

Zbog karakteristika vodnih turbina poželjno je da regulator u prijelaznom stanju ima veliku statičnost (malo pojačanje), a u stacionarnom stanju malu statičnost (veliko pojačanje). Za regulaciju vodnih turbina uglavnom se koriste akcelerotahimetrijski regulatori s proporcionalno-integracijskim (PI) djelovanjem koji uz stalnu imaju i prijelaznu povratnu vezu.

Uporaba električkih komponenata omogućava izvedbu regulatora s proporcionalno-integracijskoderivacijskim (PID) djelovanjem. Time se osiguravaju potrebne promjene statičnosti i pojačanja u prijelaznom odnosno stacionarnom stanju pa su postižu brži odzivi. Parametri PID regulatora odabiru se općenito različito za otočni pogon i paralelni rad sa sustavom. To se u prvom redu odnosi na derivacijsku konstantu koja je za otočni pogon obično znatno veća.

Regulatori dvostruko reguliranih turbina moraju osigurati kombinatornu vezu između otvora sprovodnog aparata i zakreta lopatica rotora tako da se ostvari optimalno djelovanje turbine (agregata). Element kojim se osigurava takvo međudjelovanje obično se naziva kulisa. Ovisnost zakreta lopatica rotora o otvoru sprovodnog aparata ovisi o padu, tako da kulisa iz podataka o otvoru sprovodnog aparata i padu određuje opimalni zakret lopatica rotora.

Uz mjerni (elektronički) dio regulator dvostruko regulirane turbine ima i dvije hidrauličke upravljačke jedinice (za privodno i radno kolo) koje se obično sastoje od elektromehaničkog pretvarača, pomoćnog servomotora, razvodnog ventila s mehanizmom i glavnog servomotora.

Kod razvijanja matematičkog modela turbinskog regulatora pojedini elementi se opisuju uglavnom odgovarajućim prijenosnim funkcijama. Modelom čija je blok shema prikazana na slici 6 obuhvaćena su i ograničenja vezana uz brzine pomaka stapova servomotora. Korištene su sljedeće oznake:

- *y*_B položaj stapa servomotora privodnog kola tj. otvor sprovodnog aparata (p.u.)
- y_R položaj stapa servomotora radnog kola, tj. zakret lopatica rotora (p.u.),
- e_p statičnost
- b_{gd} derivacijska konstanta regulatora
- b_{gi} integracijska konstanta regulatora
- b_{gp} proporcionalna konstanta regulatora
- T_p vremenska konstanta elektromehaničkog pretvarača (s)
- $Ty_{\mu\nu}$ vrem, konstanta razvodnog ventila i glavnog servomotora privodnog kola (s)
- Ty_R vremenska konstanta razvodnog ventila i glavnog servomotora radnog kola (s)
- K_w pojačanje elektromehaničkog pretvarača privodnog kola
- K_R pojačanje elektromehaničkog radnog kola.

45.356

i sta-

dnih

rijski

dje-

atnu

iz-

sko-

vaju rije-

tižu

se

i sa

sku

ća,

aju

od-

ari

<0-

na-

ru

0-

ijе

U-

li-

je

()-

)g

1-

n

а

i

۱.



Slika 6. Blok shema modela regulatora dvostruko regulirane turbine

4. SIMULACIJSKI MODEL HIDROAGREGATA S DVOSTRUKO REGULIRANOM TURBINOM

Hidroagregat se razmatra kao dinamički sustav koji je sastavljen od sljedećih elemenata:

– vodna turbina s dovodnim sustavom

- turbinski regulator

- generator s uzbudnim sustavom.

Struktura modela hidroagregata odnosno, povezanost navedenih elemenata prikazana je na slici 7.

U elektroenergetskom sustavu agregat je samo jedan od izvora energije s relativno malim udjelom u ukupnoj proizvodnji pa su promjene brzine vrtnje zanemarive. Pri zasnivanju modela agregata koji radi paralelno sa sustavom uobičajeno se polazi od te pretpostavke. Karakteristike sustava, odnosno način na koji je generator spojen na sustav uključuju se najčešće u model generatora.

U nastavku će biti opisan simulacijski model hidroagregata s dvostruko reguliranom turbinom, prema po-

agregatima HE dacima 0 Dubrava. U poglavlju 2 detaljno je opisan matematički model dvostruko regulirane vodne turbine, a u poglavlju 3 je predstavljen matematički model pripadnog turbinskog regulatora. Izgradnja simulacijskog modela temelji se na tim matematičkim modelima. Kao model generatora korišten je model 2d1q (prigušni i uzbudni namot u d osi, prigušni namot u q osi) koji se uobičajno upotrebljava kod modeliranja hidroagregata [5]. Modeli uzbudnih sustava razlikuju se bitno

ovisno o vrsti uzbudnog sustava. Generatori HE Dubrava imaju uzbudne sustave s rotirajućim diodama pa je korišten IEEE model AC1A koji se uobićajno koristi za modeliranje takvih uzbudnih sustava [6,7].

4.1. Parametri modela

Kod zasnivanja simulacijskog modela potrebno je poznavati parametre sustava koji se modelira. Parametri modela su ili jednaki stvarnim fizikalnim parametrima sustava ili se određuju prema njima. U svakom slučaju potrebno je raspolagati određenim parametrima sustava. Nepoznavanje parametara. odnosno nemogućanost njihovog

određivanja predstavlja jedan od najvećih problema pri razvijanju modela.

Parametri potrebni za provođenje simulacija pomoću modela koji je razvijen određeni su uglavnom na osnovi raspoloživih podataka o agregatima HE Dubrava (dodatak).

HE Dubrava je posljednja izgrađena elektrana na rijeci Dravi (u pogon je puštena 1989. godine). To je derivacijska hidroelektrana s dvije proizvodne jedinice. Agregati su cijevni - cijevna Kaplan turbina s horizontalnom osovinom i generator koji je smješten u "kruški" (eng. *bulb turbine*).

Turbinska regulacija izvedena je turbinskim regulatorom ATE-10 (LITOSTROJ). Regulator čine elektronički i mehaničko-hidraulički dio s elektromotornim pretvaračem. Elektronički dio regulatora izveden je digitalnim i analognim integriranim krugovima. U elektroničkom dijelu izvedeni su regulacijski krugovi po broju okretaja i po snazi te ograničenje otvora. Mjerenje broja okretaja (frekvencije) izvodi se preko



Slika 7. Osnovni elementi modela hidroagregata

pretvarača frekvencije u napon. Regulacija se izvodi PID regulatorom koji koristi dva seta parametara - za prazni hod i za paralelni rad. Zamjena parametara obavlja se prilikom uklapanja/isklapanja generatorskog prekidača. Elektromotorni pretvarač pretvara električni signal u mehanički hod. Sastoji se od istosmjernog motora, tahometra, jednostrukog zupčanog prijenosa, vretena i čahure koja se pomiče zajedno s maticom vretena. Mehaničko-hidraulički dio regulatora sastoji se od glavnog razvodnog ventila s mehanizmom i hidrauličkog cilindra (servomotora). Izlaz iz elektromotornog pretvarača preko polužnog mehanizma upravlja razvodni ventil hidrauličkog cilindra. Povratna veza po hodu hidrauličkog cilindra vodi se čeličnim užetom na mehanizam razvodnog ventila gdje se oduzima od ulaznog signala.

Za određivanje karakteristika turbine (agregata) korišteni su rezultati ispitivanja [8] koja su provedena na agregatima HE Dubrava nakon njezinog puštanja u pogon.

U tablici 1 dane su vrijednosti otvora sprovodnog aparata, pripadnog optimalnog zakreta lopatica rotora, odgovarajućeg protoka i korisnosti za nekoliko karakterističnih točaka. Podaci se odnose na agregat 1, kod brutto pada 18.4 m, a sve veličine su izražene u relativnim jedinicama (p.u.).

Tablica 1. Vrijednosti karakterističnih veličina za nekoliko radnih točaka

y _w	0.52	0.61	0.68	0.74	0.79	0.83	0.87	0.9
y_R	0	0.12	0.26	0.4	0.54	0.68	0.85	1
q	0.312	0.383	0.467	0.555	0.647	0.741	0.856	0.961
η	0.888	0.989	0.906	0.908	0.907	0.903	0.878	0.840

Položaji lopatica privodnog i radnog kola normalno se izražavaju u relativnim jedinicama, dok je za preračunavanje protoka u relativne jedinice odabran bazni protok od 300 m³/s (to je najveći mogući protok kroz sprovodni aparat).

Odabrane radne točke nalaze se u području dvostruke regulacije jer u području jednostruke regulacije, gdje se regulacija protoka provodi samo pomoću sprovodnog aparata, agregati normalno ne rade. U ovom slučaju dvostruka regulacija započinje kod otvora sprovodnog aparata 0.52 p.u. – do te radne točke kut zakreta lopatica rotora se ne mijenja i minimalan je, što odgovara položaju stapa servomotora 0. Na slici 8 grafički su prikazani podaci za nekoliko radnih točaka prema tablici 1.

Analizom rezultata ispitivanja određeni su koeficijenti za izraz (13):

 $a_{q} = 0.405$ $b_{q} = 0.4$ $c_{q} = 0.6774$ $d_{q} = 0.8645$





Slika 8. Grafički prikaz vrijednosti iz tablice 1

Protok u praznom hodu iznosi 0.17 p.u., a podaci za optimalnu radnu točku su u prvom stupcu tablice 1. Prema tome za izračunavanje koeficijenta a_{γ} korišteni su ovi podaci:

$$q_{PH} = 0.17$$

 $q_{opt} = 0.312$
 $\eta_{opt} = 0.888$

Uvrštavanjem tih vrijednosti u (16) dobiva se

$$a_{\rm n} = 67.74$$

Tako su određeni parametri za protok (13) i korisnost (14) kao funkcije otvora sprovodnog aparata i zakreta lopatica rotora.

352

<u>M. B</u>.

٥٢

y ... (p.u.)

-- S

4.2. Rezultati simulacija

345-356

).u.)

а

i

Simulacija nekog dinamičkog sustava provodi se općenito analognim, digitalnim ili hibridnim računalom. U ovom istraživanju su simulirani uobičajni prijelazni režimi prigodom opterećivanja agregata sa snage 0 MW (nakon sinkronizacije) na nazivnu snagu. Slika 9 prikazuje odzive koji su dobiveni kao rezultat simulacije provedene pomoću tako razvijenog simulacijskog modela. Prikazane su ove karakteristične veličine:

- snaga agregata (MW)
- protok kroz turbinu (m³/s),
- položaj stapa servomotora privodnog kola tj. otvor sprovodnog aparata (p.u.)
- položaj stapa servomotora radnog kola tj. zakret lopatica rotora (p.u.).

Usporedba dobivenih odziva s odzivima koji su snimljeni prilikom ispitivanja agregata koja su provedena nakon puštanja elektrane u pogon pokazuje da su odzivi vrlo slični. Time je na neki način verificiran ovakav matematički i simulacijski model hidroagregata.

5. ZAKLJUČAK

U dostupnoj liferaturi prevladavaju linearni modeli dvostruko reguliranih turbina koji su upotrebljivi samo za istraživanje dinamike agregata u bližoj okolini radne točke. Da bi se omogućilo istraživanje dinamike hidroagregata u većini pogonskih režima rada bilo je potrebno razviti kvalitetan i detaljan nelinearni model takvih turbina što je i prezentirano u ovom radu. Precizan opis značajki turbine ostvaren je korištenjem metode linearizacije po dijelovima. S obzirom da su protok i korisnost funkcije dvije varijable (otvor sprovodnog aparata, zakret lopatica rotora) ta je metoda proširena i na funkcije dvije varijable. Posebna pozornost je posvećena modeliranju kulise.

Da bi se ispitala kvaliteta i točnost razvijenog matematičkog modela, model je testiran i pokazao je zadovoljavajuće rezultate. Parametri potrebni za provođenje simulacija određeni su uglavnom na osnovi raspoloživih podataka o agregatima HE Dubrava koji su predočeni u Dodatku. Odzivi dobiveni simulacijom uspoređeni su sa odzivima snimljenim prilikom ispiti-



Slika 9. Opterećivanje agregata

М

T

vanja agregata, nakon puštanja elektrane u pogon, i uočena je velika sličnost.

Modeliranje pojava koje nastaju prilikom pokretanja i zaustavljanja (kao i pri različitim prijelaznim režimima rada) agregata je otežano jer se te operacije odvijaju po utvrđenim programima koji zapravo određuju djelovanje sustava regulacije u tim režimima rada. Zbog toga je potrebno razvijeni matematički model i dalje usavršavati da bi se obuhvatili i takvi pogonski događaji.

LITERATURA

- [1] G. JASMIN, A. LEROUX, D. MUKHEDKAR: "Electronic Simulation of a Hydro-turbine with its Penstock, Speed Regulator and Damping Unit", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, pp. 3023-3030, September 1983
- [2] T. TOMIŠA: "Identifikacija parametara dovodnog sustava visokotlačne hidroelektrane", doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1995.
- [3] D. ARNAUTOVIĆ, R. MILJANOVIĆ: "An Approach to the Analysis of Large Perturbations in Hydro-electric Plants with Kaplan Turbines", Electric Power System Research, Vol. 9, No.2, pp. 115-121, 1985
- [4] P. SCHNITER, L. WOZNIAK: "Efficiency Based Optimal Control of Kaplan Hydrogenerators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 348-353, June 1995
- [5] M. SAIDY, F.M. HUGHES: "Block diagram transfer function model of a generator including damper windings", IEE Proceedings C – Transmission, Generation and Distribution, Vol. 141, No. 6, pp. 599-608, November 1994

- [6] IEEE Committee Report: "Excitation system models for power system stability studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 494-509, February 1981
- [7] N. DIZDAREVIĆ, Lj. KUTEROVAC: "Analiza primjenjivih tipova agregata HE Novo Virje s obzirom na zahtjeve stabilnosti i mogućnosti otočnog pogona", studija, FER Zagreb, 1996.
- [8] "HE Dubrava ispitivanja energetskih i dinamičkih karakteristika hidroelektrane", TURBOINŠTITUT Ljubljana, 1989.
- [9] "Izvještaj o ispitivanjima karakteristika turbinske regulacije agregata 1 na HE Dubrava", LITOSTROJ Ljubljana, 1989.
- [10] S. TEŠNJAK, I. KUZLE, M. BREZOVEC: "Modeliranje hidroelektrana", Energija br. 5, Zagreb, Listopad 1997, pp 287-298
- [11] H. POŽAR: "Osnove energetike 2", Školska knjiga Zagreb, 1992.
- [12] S. TEŠNJAK: "Teorijska i eksperimentalna analiza dinamike hidroelektrane", doktorska disertacija. ETF Zagreb, 1984.
- [13] IEEE Working Group: "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 167-179, February 1992
- [14] P. KUNDUR: "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994
- [15] P.M. ANDERSON, A.A. FOUAD: "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1994
- [16] A.W. ORDYS, A.W. PIKE, M.A. JOHNSON, R.M. KATEBI, M.J. GRIMBLE: "Modeling and simulation of power generation plants", Springer-Verlag, 1994

DODATAK A

Tablica A1. Osnovní tehničkí podaci HE Dubrava

tip proizvodnih grupa	cijevne
broj jedinica	2
nazivna snaga turbina (MW)	40.3
nazivni protok (m ³ /s)	250
nazivni netto pad (m)	17.5
nazivna snaga generatora (MVA)	42
nazivni napon generatora (kV)	6.3
nazivna snaga blok-transformatora (MVA)	43
nazivni napon blok-transformatora (kV)	6.3/115
vrsta uzbude	rotirajuća
napon uzbude (V)	281
struja uzbude (A)	1185
promjer radnog kola (m)	5.4
promjer rotora (m)	4.6

Tablica A2. Podaci o turbini

vremenska konstanta dovodnog sustava $T_{\rm irr}({ m s})$	1.7
zamašni moment generatora (tm ²)	1160
zamašni moment turbine (tm²)	400
zamašni moment vodene mase (tm ²)	700
vremenska komstanta rotirajučih masa T_{y} (s)	2.4
vrijeme zatvaranja privodnog kola (s)	15
vrijeme otvaranja privodnog kola (s)	30
vrijeme prigušivanja privodnog kola (s)	17
otvor prigušivanja (°6)	30
vrijeme zatvaranja radnog kola (s)	100
vrijeme otvaranja radnog kola (s)	50

.345-356

M. Brezovec – I. Kuzle – S. Tešnjak: Matematički model hidroagregata ...

nodels actions No. 2,

. .

primom na ", stu-

ničkih ITUT

regu-

-jubl-

odeliopad

a Za-

a di-₹Za-

bine EEE

pp. rof",

lem

.М.

tion

Tablica A3. Osnovni tehnički podaci regulatora ATE-10 mogućnost podešavanja broja okretaja (%) ± 10 $0 \div 10$ proporcionalna konstanta integracijska konstanta b_{ei} (1/s) $0 \div 1(5)$ derivacijska konstanta $b_{st}(s)$ $0 \div 10$ $0 \div 10$ statičnost e_n (%) neosjetljivost regulatora na izlazu (%) 0.05 ograničenje otvora (%) $0 \div 100$ napajanje regulatora (V_{pc}) 110 ili 220 -20 do +10 dopušteno odstupanje napona (%) maksimalna potrošnja (W) 220

Tablica A4. Parametri elektronskog regulatora ATE-10

	prazni hod	paralelni rad
proporcionalna konstanta b _{sp}	0.8	1.0
integracijska konstanta b _{si} (1/s)	0.1	0.2
derivacijska konstanta b_{st} (s)	0.5	0.2
statičnost $e_p(\%)$	4	10

Tablica A5. Vrem. konst. elemenata hidrauličke upravljačke jedinice

elektromehanički pretvarač s pomoćnim servomotorom T_{μ} (s)	0.15
razvodni ventil privodnog kola sa servomotorom $T_{\mu\nu}(s)$	0.3
razvodni ventil radnog kola sa servomotorom $T_{_{SR}}(s)$	0.5

Tablica A6. Parametri generatora HE Dubrava

Parametar	Oznaka	G1 i G2
Nazivna prividna snaga	S_a (MVA)	42.0
Nazivni napon i opseg regulacije	U_{n} (kV)	6.3
Nazivna struja	$I_{n}(\mathbf{A})$	3850
Nazivni faktor snage	cos "	0.95
Sinkrona reaktancija u uzdužnoj d-osi	<i>x_d</i> (p.u.)	1.350
Tranzijentna reaktancija u uzdužnoj d-osi	x_d ' (p.u.)	0.446
Suptranzijentna reaktancija u uzdužnoj d-osi	x_d " (p.u.)	0.330
Sinkrona reaktancija u poprečnoj q-osi	x_{q} (p.u.)	0.940
Suptranzijentna reaktancija u poprečnoj q-osi	$x_q^{"}(p.u.)$	0.370
Statorski djelatni otpor	<i>r_a</i> (p.u.)	0.0025
Statorska rasipna reaktancija	$x_t(p.u.)$	0.243
Tranzijentna vrem, konst. kratkospojnog kruga u d-osi	$T_{d}'(s)$	0.550
Suptranzijentna vrem, konst. kratkospojnog kruga u d-osi	$T_d^{(n)}(\mathbf{s})$	0.029
Tranzijentna vrem, konst. kratkospojnog kruga u q-osi	$T_q^{"}(s)$	0.035

Tablica A7. Tipične vrijednosti parametara modela uzbudnog sustava AC1A

Parametar	Oznaka	AC1A
Koeficijent pojačanja regulatora napona	K _A (pu/pu)	400.000
Vremenska konstanta kašnjenja drugog stupnja regulatora	$T_{B}(\mathbf{s})$	0.000
Konstanta koja je funkcija komutacijske reaktancije	K _c	0.200
Vremenska konstanta prethođenja drugog stupnja regulatora	$T_{c}(s)$	0.000
Demagnetizacijski član ovisan o sinkronim i tranzijentnim reaktancijama uzbudnog izmjeničnog generatora	K _p	0.380
Konstanta samouzbude uzbudnika pri punom naponu uzbude	K_{E} (pu/pu)	1.000
Vremenska konstanta uzbudnika	$T_{E}(\mathbf{s})$	0.800
Pojačanje stabilizacijskog kruga uzbudnog sustava	K _r (pu/pu)	0.030
Vremenska konstanta stabilizacijskog kruga uzbudnog sustava	$T_{F}(\mathbf{s})$	1.000
Derivirana konstanta zasićenja za rotirajuće uzbudnike	$A_{i,i}$	0.001
Derivirana konstanta zasićenja za rotirajuće uzbudnike	B_{IN}	1.657
Maksimalni izlazni signal regulatora	V_{RMAX} (pu)	7.300
Minimalni izlazni signal regulatora	V _{RMN} (pu)	-6.600
Maksimalni iznos unutarnjeg napona regulatora	$V_{AMAX}(pu)$	14.500
Minimalni iznos unutarnjeg napona regulatora	V _{IMIN} (pu)	-14.500

MATHEMATICAL HYDROUNIT MODEL WITH DOUBLE TURBINE REGULATION

By hydrounit modeling with double turbine regulation, the starting point should be the fact that the flow regulation through the turbine is realized by guide and runner vanes. that makes the development of the model very difficult. This work describes in detail the non-linear model of the double regulated turbine is described. To describe the non-linearity of the elements in an acceptable way, the method of nonlinearization by parts has been used. As the flow and the efficiency represent a two-variable function (guide opening. position of the runner vanes), this method is increased on functions of the two variables. Special emphasis is paid to the cam modeling, and the mathematical model of the turbine governor for double water turbine regulation is described. The developed model has been tested and the results are satisfactory. Parameters needed to make the simulation have been determined on the data of HPP Dubrava, included in the Annex. The simulation results are compared with those obtained during the tests at the site. after the plant start of operation and there is a good correspondence.

MATHEMATISCHES MODELL DES WASSERKRAFTSATZES MIT DOPPELT REGULIERTER TURBINE

Beim Modelieren des Wasserkraftsatzes mit doppelt regulierter Turbine ist von der Regelvorgangsdruchführung sowohl mit Leitradschauffeln als auch mit Läuferschaufein vorauszugehen, wodurch die Modellentwicklung wesentlich erschwert wird. In dieser Arbeit ist ein nichtlineares Modell doppelt regulierter Turbine ausführlich beschrieben. Um die Nichtlinearität einzelner Teile zufriedenstellend zu beschreiben wurde die Methode der Nishtlinearisierung an diese Teile angewandt. Da Durchfluss und Wirkungsgrad Funktionen zweier Variablen sind (der Öffnung des Leitsatzes und des Schwenkwinkels der Laufradschauffeln) wurde diese Methode auf Funktionen zweier Variablen zusätzlich erweiter. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei dem Modelieren der Kurbelschleife gewidmet und danach ist das mathematische Modell des Turbinenreglers doppelt geregelter Wasserturbinen nachgebildet. Die Nachprüfung dieses mathematischen Modells zeigte zufriedenstellende Ergebnisse. Die für die Durchführung der Simulation notwendigen Parameter und Eingangsfunktionen sind hauptsächlich aus verfügbarer im Anhang angeführter Angaben für die Sätze des Wasserkraftwerkes "Dubrava" entnommen. Mittels Simulation erzeugte Antwortfunktionen sind mit jenen, bei der Abnahmenprüfung der Kraftsätze aufgenommenen verglichen; dabei zeigte sich deren beachtenswerte Übereinstimmung.

Naslov pisaca:

Miljenko Brezovec, dipl. ing. HEP PP Sjever – Varaždin, Međimurska 26 c 42000 Varaždin, Hrvatska

mr. sc. Igor Kuzle, dipl. ing. prof. dr. sc. Sejid Tešnjak, dipl. ing. Fakultet elektrotehnike i računarstva Unska 3 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis: 1997-03-17.