Energija 5



JDK 621.31 ENJAAC 46 (5) 281 – 352 ISSN 0013-7448 ENERGIJA • GODINA 46 • BROJ 5 • STRANA 281 – 352 • ZAGREB, LISTOPAD 1997. UDK 621.31

Godište 46 (1997)

ISSN 0013-7448

Br. 5

ČASOPIS HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE

energija

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 1997 - 09 - 23

SADRŽAJ

Zagreb 1997

Klecina F: Zahtjevi na energetski informacijski sustav	
(Izvorni znanstveni članak)28	83
Tešnjak S Kuzle I Brezovec M.: Modeliranje hidroelektrana	
(Izvorni znanstveni članak)28	87
Šander M.: Prijedlog načina tehničkog vrednovanja kombi	
i kogeneracijskog postrojenja u TE-TO Zagreb (Stručni	
članak)	99
Matanić R.: Napredne izvedbe nuklearnih reaktora: europski	
tlakovodni reaktor (EPR) (Pregledni članak)	05
Nevečerel D Pavlović P.: Optimizacija tipa i presjeka zaštitnog	
užeta na DV 400 kV Žerjavinec - Heviz (Stručni članak) 3	11
Sabolić D.: Osnove optičkih komunikacija - I. dio: prijenos	
optičkog signala svjetlovodnim vlaknom (Pregledni	
članak)	19
Vijesti iz elektroprivrede	31
Iz strane stručne literature	39

Fotografija na omotnoj stranici

SKUPINA DIESEL AGREGATA U TS 110/35/10 kV VUKOVAR 2



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 pojedince 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.

ojournog oroja a produji bojo

Za inozemstvo \$ 95 godišnje,

Žiro račun kod ZAP, Zagreb – Hrvatska elektroprivreda (za »Energiju«) broj 30101-604-495

Tisak i klišeji - Print: ZRINSKI d.d., Čakovec

Naklada 1000 primjeraka

MODELIRANJE HIDROELEKTRANA

Prof. dr. sc. Sejid Tešnjak - mr. sc. Igor Kuzle, Zagreb - Miljenko Brezovec, Varaždin

UDK 621.311.21.53.072 IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Teorijska analiza dinamike hidroelektrane provodi se pomoću matematičkih i odgovarajućih simulacijskih modela. Tehnike modeliranja stalno se usavršavaju jer suvremeni blokovski orijentirani digitalni simulacijski sustavi omogućavaju zasnivanje sve složenijih i detaljnijih modela. U članku su opisani najčešće korišteni modeli pojedinih elemenata hidroelektrane prikladni za simulacije prijelaznih režima rada.

a na naméra

and the state of the second of

set opposite a spectra

Ključne riječi: matematički i simulacijski model, vodna turbina, turbinski regulator, generator, uzbudni sustav.

1. UVOD

Za svaku hidroelektranu kao dio elektroenergetskog (EE) sustava poželjno je da ima visoku raspoloživost u svim režimima rada i dobre dinamičke karakteristike (stabilnost i elastičnost pri prijelazu iz jednog pogonskog stanja u drugo). Dinamika hidroelektrane u prijelaznim režimima rada utvrđuje se za različite promjene stanja sljedećim postupcima:

- teorijskom analizom matematičkog i simulacijskog modela
- eksperimentalnim istraživanjem na fizičkom modelu
- eksperimentalnim istraživanjem na realnom objektu.

Uz eksperimentalnu analizu vezani su mnogi problemi pa iz toga proizlaze prednosti i važnost teorijske analize. Značajniji razvoj matematičkih modela za potrebe istraživanja dinamičkog ponašanja elemenata EE sustava započeo je 70-tih godina. Razvojem računala omogućava se razvoj sve detaljnijih modela pa se tehnike modeliranja stalno usavršavaju.

U članku se opisuje matematički model hidroelektrane prikladan za istraživanja dinamičkih odnosa u elektrani u prijelaznim režimima rada. Hidroelektrana predstavlja izrazito složen viševeličinski nelinearni dinamički sustav pa je za opis njenog djelovanja potreban opsežan matematički model. Detaljnost matematičkog opisa ovisi o vrsti analize, odnosno o cilju istraživanja koje se provodi. Postupcima linearizacije oko određene radne točke moguće je načiniti linearni model, no kako linearni modeli općenito daju dobre rezultate samo za usko područje oko radne točke, za opis dinamičkih pojava pri većim poremećajima potreban je nelinearni model.

Pojedini elementi takvog sustava modeliraju se za odredena istraživanja više ili manje detaljno, ovisno o utjecaju tog elementa na fizikalno ponašanje sustava u cjelini. Osnovni elementi hidroelektrane kao dinamičkog sustava su turbina, dovodni sustav, turbinski regulator i generator s uzbudnim sustavom (slika 1). Pri modeliranju hidroelektrane obično se polazi od modela tih elemenata.

Djelovanje vodne turbine uvjetovano je karakteristikama

njenog dovodnog sustava, jer zbog tromosti vode promje-

2. VODNA TURBINA



Slika 1. Funkcionalna blok shema hidroelektrane

$$q=g'\sqrt{h}$$

$$P=gh$$
 (10)

(9)

$$\frac{d\Delta q}{dt} = \frac{1}{T} \Delta h \tag{11}$$

gdje je g' idealni otvor sprovodnog aparata (p.u.), P snaga turbine (p.u.) t vrijeme (s). Iz jednadžbe (9) slijedi

$$h = \left(\frac{q}{g'}\right)^2 \tag{12}$$

a jednadžba (11) može se pomoću Laplaceovog operatora zapisati u ovom obliku

$$\frac{q-q_0}{h-h_0} = \frac{1}{T_w s} \tag{13}$$

gdje je q_0 početna vrijednost protoka kroz turbinu (p.u.), h_0 početna vrijednost tlačne visine pred turbinom (p.u.). Mehanička snaga na osovini turbine u relativnim jedinicama je

$$P_{\rm m} = P - P_{\rm g} \tag{14}$$

pri čemu je P snaga turbine (p.u.), P_g stalni gubici turbine (p.u.). Gubici se izražavaju kao

$$P_{\rm g} = q_{\rm NL} h^{-1} \tag{15}$$

gdje je q_{NL} protok kroz turbinu u praznom hodu (p.u.). Prema (10), (14) i (15) mehanička snaga može se zapisati i ovako

$$P_{\rm m} = (q \cdot q_{\rm NL})h \tag{16}$$

U jednadžbama (9) i (12) g' označava idealni otvor sprovodnog aparata tako da je promjena od praznog hoda do



Slika 3. Odnos između idealnog i stvarnog otvora sprovodnog aparata

punog opterećenja jednaka 1 u relativnim jedinicama. Kod stvarnog otvora sprovodnog aparata 1 p.u. predstavlja promjenu od potpuno zatvorene do potpuno otvorene pozicije. Prema slici 3 može se odrediti odnos između stvarnog i idealnog otvora sprovodnog aparata kao

$$g' = A_{p}g \tag{17}$$

pri čemu je A, pojačanje turbine koje se izračunava iz

$$A_{t} = \frac{1}{g_{\mathsf{FL}} - g_{\mathsf{NL}}} \tag{18}$$

gdje je g_{NL} stvarni otvor sprovodnog aparata u praznom hodu (p.u.), g_{FL} stvarni otvor sprovodnog aparata pri punom opterećenju (p.u.). Navedene jednadžbe čine matematički model turbine i dovodnog sustava koji se može prikazati u obliku blok sheme kako je prikazano na slici 4.

3. TURBINSKI REGULATOR

Osnovna funkcija turbinskog regulatora je regulacija brzine vrtnje, odnosno opterećenja agregata. Princip djelovanja turbinskog regulatora temelji se na promjeni protoka kroz turbinu u skladu s regulacijskom greškom koja je posljedica razlike postavne i stvarne vrijednosti brzine vrtnje, odnosno djelatne snage uzrokovane narušavanjem ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne snage u sustavu. Turbinski regulatori svih agregata u sustavu imaju statičku karakteristiku tako da se brzina vrtnje smanjuje s opterećenjem (slika 5). Nagib karakteristike regulatora najčešće se izražava u relativnim jedinicama s obzirom na nazivnu frekvenciju i naziva se statičnost.



Slika 5. Karakteristika turbinskog regulatora



Slika 4. Blok shema nelinearnog modela vodne turbine uz pretpostavku krutog stupca vode

Za svako novo opterećenje frekvencija agregata će se promijeniti. Vraćanje frekvencije na početnu vrijednost uz to novo opterećenje može se postići samo pomicanjem karakteristike regulatora što je crtkano prikazano na slici 5. Podizanje i spuštanje karakteristike ostvaruje se promjenom postavne vrijednosti.

Početna promjena snage vodne turbine je zbog tromosti vode suprotna promjeni otvora sprovodnog aparata pa je u prijelaznom stanju potrebno smanjiti pojačanje regulatora odnosno povećati statičnost. Zato se regulatori vodnih turbina uobičajeno izvode tako da imaju trajnu i prijelaznu statičnost, pri čemu je prijelazna desetak puta veća od trajne.

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.

Na starijim jedinicama regulacijska funkcija ostvarena je korištenjem mehaničkih i hidrauličkih komponenata. Model mehaničko-hidrauličkog turbinskog regulatora s trajnom i prijelaznom statičnošću prikazan je na slici 6. Tipične vrijednosti i opsezi parametara tog klasičnog mehaničko-hidrauličkog regulatora dani su u tablici 1, a tipične vrijednosti ograničenja u tablici 2.

Parametri turbinskog regulatora odabiru se tako da se postigne:

- stabilno djelovanje u slučaju raspada sustava na manje dijelove, odnosno pri otočnom pogonu
- prihvatljiva brzina odziva na promjene opterećenja pri paralelnom radu sa sustavom.

Za stabilno djelovanje u slučaju raspada sustava na manje dijelove, optimalne vrijednosti prijelazne statičnosti δ i vremenske konstane kompenzatora T_{R} mogu se odrediti ako

Tablica 3. Tipične vrijednosti i opsezi vremenskih konstanti Tw i Tw

parametar	tipična vrijednost	opseg
TW(s)	1.9	0.5-5.0
TM(s)	8.0	6.0-12.0

su poznate vremenska konstanta dovodnog sustava T_w i mehanička vremenaska konstanta T_M (tablica 3) prema



Slika 6. Blok shema modela klasičnog turbinskog regulatora za vodne turbine

Tablica 1. Tipične vrijednosti i opsezi parametara klasičnog turbinskog regulatora

parametar	tipična vrijednost	opseg
$T_{p}(s)$	0.05	0.03-0.05
$T_{R}(s)$	5.0	2.5-25.0
K.	5.0	2.5-5.0
δ	0.4	0.2-1.0
σ	0.04	0.03-0.06

Tablica 2. Tipične vrijednosti ograničenja klasičnog turbinskog regulatora

ograničenje		tipična vrijednost
najveći otvor sprovodnog aparata	8 _{max}	1.0
namanji otvor sprovodnog aparata	8 _{min}	0
najveća brzina otva ran ja	dg dt max	0.16
najveća brzina zatvaranja	dg dt mix	-0.16

$$\delta = \left[2.3 - \left(T_w - 1.0\right) 0.15\right] \frac{T_w}{T_w} \tag{19}$$

$$T_{R} = \left[5.0 - \left(T_{w} - 1.0 \right) 0.5 \right] T_{w}$$
(20)

Pojačanje servosustava K_s postavlja se na što veću vrijednost.

Uz takav odabir parametara pri paralelnom radu agregata sa sustavom, odzivi na promjene opterećenja su presperi. Da bi se postigle zadovoljavajuće brzine opterećivanja vremenska konstanta kompenzatora $T_{\rm R}$ treba biti manja od 1.0 s, još bolje ako je bliže 0.5 s.

Ti oprečni zahtjevi mogu se udovoljiti ako se omogući premoštenje kompenzatora:

- ako kompenzator nije premošten parametri odgovaraju zahtjevima za rad u slučajevima raspada sustava na mænje dijelove ili otočni rad ako je kompenzator premošten vremenska konstanta T_R ima smanjenu vrijednost pa su brzine opterećivanja pri paralelnom radu u sustavu prihvatljive.

Kompenzator normalno nije premošten tako da u slučaju otočnog pogona uslijed raspada sustava regulacija brzine vrtnje bude stabilna. Premoštenje kompenzatora izvodi se samo kada se mijenja opterećenje agregata.

Noviji turbinski regulatori izvode se kao elektrohidraulički. Upotreba električkih komponenata omogućava izvedbu regulatora s proporcionalno-integracijsko-derivacijskim (PID) djelovanjem (slika 7). Parametri PID regulatora općenito se odabiru tako da djelovanje bude slično djelovanju klasičnog mehaničko-hidrauličkog regulatora. To se postiže ako vrijede relacije

$$K_{P} = \frac{1}{\delta} \tag{21}$$

$$K_I = \frac{1}{\delta T_e} \tag{22}$$

$$K_D = \frac{k_d}{\delta}$$

gdje je δ prijelazna statičnost regulatora, $T_{\rm R}$ vremenska konstanta kompenzatora (s), $k_{\rm d}$ pojačanje derivacijske povratne veze (ako postoji) kod regulatora s prijelaznom statičnošću. Tipične vrijednosti proporcionalne, integracijske, odnosno derivacijske konstante dane su u tablici 4.

Regulator Kaplan-turbine djeluje tako da zakret lopatica rotora slijedi položaj lopatica sprovodnog aparata kako bi se održala najveća moguća korisnost. Radi očuvanja stabilnosti, pomak lopatica rotora je usporen. Razmatra se turbinski regulator s trajnom i prijelaznom statičnošću s povratnom vezom po pomaku pilot-servomotora (slika 8). Tipične vrijednosti parametara i ograničenja vezanih uz položaj stapa pilot-servomotora, otvor sprovodnog aparata i zakret lopatica rotora dane su u tablicama 5 i 6.

> §Tablica 4. Tipične vrijednosti konstanti PID regulatora

parametar	tipična vrijednost
K	3.0
K,	0.7
K.	0.5



(23)

Slika 7. Blok shema PID regulatora



Slika 8. Blok shema regulatora za Kaplan-turbinu

Tablica 5. Tipične vrijednosti parametara regulatora Kaplan turbine

parametar	tipična vrijednost
$T_{p}(s)$	0.02
$T_{st}(s)$	0.5
$T_{sr}(s)$	4
$T_{\rm g}({\rm s})$	10.0
δ	0.4
σ	0.04

Tablica 6. Tipične vrijednosti ograničenja regulatora Kaplan-turbine

ograničenje	tipična vrijednost
krajnji položaj stapa ili lopatica y	_{Lax} g _{max} φ _{max} 1.0
krajnji položaj stapa ili lopatica y	in Smin Smin O
najveće brzine otvaranja $\frac{dg}{dt}$	$\frac{d\varphi}{dt}$ 0.16
najveće brzine zatvaranja $\frac{dg}{dt}$	$\frac{d\varphi}{dt}\Big _{\min}$ -0.16

4. SINKRONI GENERATOR

Iako je teorija sinkronih strojeva poznata još od samih početaka njihove upotrebe, analiza i modeliranje generatora i dalje su vrlo aktualni. Danas postoji veliki broj modela koji se razlikuju ovisno o vrsti istraživanja, odnosno potrebnoj točnosti.

Djelovanje sinkronog generatora matematički se opisuje sustavom nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Polazi se uglavnom od dvoosne teorije na temelju koje se trofazni namot generatora nadomješta zamišljenim ekvivalentnim dvofaznim namotom preslikanim u uzdužnu (d) i poprečnu (q) os rotora. Taj postupak zamjene varijabli statora (struje, naponi, ulančeni tokovi) poznat je pod nazivom Parkova transformacija. Broj varijabli pri transformaciji

Tablica 7. Modeli generatora prema broju namota u *d* odnosno *q* osi

d on d on	0	1	2	3
0	0d0q			
1	1 <i>d</i> 0q	ldlq		
2		2d1q	2d2q	[
3			3d2q	3d3q

Tablica 8. Standardni parametri generatora

parametar		hidrogenerator	turbogenerator
sinktona reaktancija	.r _d (p.u.)	0.6-1.5	1.0-2.3
sinkrona reaktaneija	$x_p(p.u.)$	0.4-1.0	1.0-2.3
tranzijentna reaktancija	<i>x</i> _d '(p.u.)	0.2-0.5	0.15-0.4
i unzijemna reaktancija	<i>x</i> _q '(p.u.)	-	0.3-1.0
suotranziientna reaktanciia	.x _d "(p.u.)	0.15-0.35	0.12-0.25
sopronzijenina reaktancija	.x _q "(p.u.)	0.20-0.45	0.12-0.25
tranzijentna vremenska	$T_{a0}'(s)$	1,5-9.0	3.0-10.0
konstanta	$T_{qo}(s)$	-	0.5-2.0
suptranzijentna vremenska	$T_{d0}^{-1}(s)$	0.01-0.05	0.02-0.05
konstanta	T _{q0} ''(s)	0.01-0.09	0.02-0.05
statorska rasipna reaktancija	<i>x</i> _i (p.u.)	0.1-0.2	0.1-0.2
statorski djelatni otpor	r,(p.u.)	0.002-0.02	0.0015-0.005

općenito ostaje nepromijenjen jer se nove veličine dobivaju projekcijom stvarnih varijabli na tri osi (uzdužna, poprečna i stacionarna, tj. nulta). Kako se nulti sustav pri analizi generatora ne razmatra, dobiva se pojednostavljen dvoosni prikaz čime se olakšava postavljanje jednadžbi generatora.

Ovisno o broju ekvivalentnih namota u d odnosno q osi dobivaju se različiti modeli - od najjednostavnijeg koji pretpostavlja konstantan ulančeni tok d osi bez ekvivalentnih namota ("constant flux linkage" - model 0dOq) do najsloženijeg s uzbudnim namotom i dva nadomjesna prigušna namota u d osi te tri nadomjesna prigušna namota u q osi (model 3d3q). Od ostalih mogućih kombinacija broja namota u d odnosno q osi razmatraju se samo suvisle, pa se ovisno o traženoj točnosti razvija neki od modela prema tablici 7 [4].

Za modeliranje hidrogeneratora najčešće se koristi model s uzbudnim i jednim prigušnim namotom u d osi te jednim prigušnim namotom u q osi (2d1q). Parametri potrebni za taj model su tzv. standardni parametri generatora koje određuje većina proizvođača. Standardni parametri su reaktancije viđene sa stezaljki pridružene stujama osnovne frekvencije tijekom stacionarnih, tranzijentnih i suptranzijentnih stanja, te pripadne vremenske konstante koje određuju brzinu opadanja struje i napona pri poremećaju. Uz te parametre za modeliranje generatora potrebno je poznavati i konstantnu tromosti. Tipične vrijednosti parametara generatora prema [1] prikazane su u tablicama 8 i 9.

Tablica 9. Tipične vrijednosti konstante tromosti H

vrsta agregata		H(s)
turboagregati	dvopolni četveropolni	2.5-6.0 4.0-10.0
hidroagregati		2.0-4.0

Skup jednadžbi (24) do (32) koji opisuje dinamiku uzbudnog namota i prigušnih namota u d i q osi zasniva se na modelu 2d1q [5]. Otpor statorskog namota pritom se zanemaruje.

$$\frac{dE'_{a}}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \left[E_{fd} - \left(x_{d} - x_{d} \right) I_{d} - E'_{d} \right]$$
(24)

$$\frac{dE''_{g}}{dt} = \frac{1}{T''_{g0}} \left[E'_{g} - \left(x'_{d} - x''_{g} \right) I_{g} - E''_{g} \right] + \frac{dE'_{g}}{dt}$$
(25)

$$\frac{dE_{d}''}{dt} = \frac{1}{T_{q0}''} \left[\left(x_{q} - x_{q}'' \right) I_{q} - E_{d}'' \right]$$
(26)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} \left[P_m - P_c \right] \tag{27}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f_0 \tag{28}$$

$$V_{\rm id} = E_d'' + x_q'' I_q \tag{29}$$

$$V_{iq} = E_{q}'' + x_{d}'' I_{d}$$
(30)

$$V_{i} = \sqrt{\left(V_{id}^{2} + V_{iq}^{2}\right)}$$
(31)

$$P_{\rm e} = V_{\rm td} I_{\rm d} + V_{\rm tq} I_{\rm q} \tag{32}$$



Slika 9. Generator spojen na sabirnice krute mreže preko blok transformatora i spojenog voda

Modeli generatora razlikuju se ovisno o tome kako je generator spojen na mrežu. Najčešće se modelira generator spojen na krutu mrežu preko reaktancije x, kojom se predstavljaju blok-transformator i spojni vod (slika 9). Utjecaj krute mreže modelira se tako da se pretpostave konstantan napon i konstantna frekvencija na sabirnicama. Za promatrani slučaj mogu se postaviti sljedeće jednadžbe:

$$I_{q} = \frac{\left(V_{xd} - E_{d}''\right)}{\left(x_{q}'' + x_{c}\right)}$$
(33)
$$Id = \frac{\left(E_{q}'' - V_{xq}\right)}{\left(x_{d}'' + x_{c}\right)}$$
(34)

U navedenim jednadžbama je V napon stezaljki generatora (p.u.), napon krute mreže (p.u.), E inducirani napon općenito (p.u.), $E_{r_{i}}$ napon uzbude (p.u.), I struja generatora (p.u.), x_e reaktancije općenito (p.u.), x_e ekvivalentna reaktancija spojnog voda i blok-transformatora (p.u.), w brzina vrtnje brzina vrtnje (rad/s), δ kut opterećenja (rad), f frekvencija (Hz), H konstantna tromosti agregata (Ws/VA), $P_{\rm m}$ mehanička snaga (p.u.), $P_{\rm c}$ djelatna snaga generatora (p.u.). Za početne (suptranzijentne) i prijelazne (tranzijentne) napone, struje i reaktancije koriste se uobičajne oznake, dok indeksi "d" odnosno "q" označavaju os na koju se veličina odnosi.

Diferencijalne i algebarske jednadžbe (24) od (32) mogu se linearizirati oko određene radne točke. Nakon odgovarajućih matematičkih postupaka i zanemarenja iz tih lineariziranih jednadžbi dobiva se model generatora u obliku prijenosne funkcije. U izrazima koji slijede sve su varijable definirane u Laplaceovom s području.

> (35) $\Delta E_a'' = g_1(s) \Delta E_{\alpha l} + g_2(s) \Delta \delta$

> (36) $\Delta E''_d = g_3(s) \Delta \delta$

> (37) $\Delta P_c = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E''_a - K_{2d} \Delta E''_d$

$$\Delta V_{*} = K_{*} \Delta \delta + K_{*} \Delta E_{*}^{"} - K_{*,*} \Delta E_{*}^{"}$$
⁽³⁸⁾

Nakon određenih postupaka za prijenosne funkcije g u (35) i (36) dobivaju se sljedeći izrazi:

$$g_{1}(s) = \frac{a(1+T_{a}''s)K_{s}}{(1+aT_{a}''s)(1+K_{s}T_{a}'s)}$$
(39)

$$g_{2}(s) = -K_{23} \frac{\left(1 + cT'_{20}s\right)}{\left(1 + cT''_{20}s\right)}$$
(40)

$$\begin{cases} (1+aI_{J_0}s) (1+K_1I_{J_0}s) \\ K_{I_0} \\ K_{I_0} \end{cases}$$
(41)

$$(41)$$

Koeficijenti iz jednadžbi (35) do (41) izračunavaju se prema

$$\begin{split} & K_{1} = \frac{V_{x0d}^{2}}{\left(x_{e} + x_{d}^{''}\right)} + I_{d0}V_{xq0} + \frac{V_{xd0}^{2}}{\left(x_{e} + x_{q}^{''}\right)} - I_{q0}V_{xd0} \\ & K_{2} = \frac{V_{x0d}^{2}}{x_{e} + x_{d}^{''}} & K_{2} = \frac{V_{xq0}^{2}}{x_{e} + x_{d}^{''}} \\ & K_{3} = \frac{\left(x_{d}^{'} + x_{e}\right)}{\left(x_{d} + x_{e}\right)} & K_{4q} = V_{xq0} \frac{\left(x_{q}^{'} - x_{q}^{''}\right)}{\left(x_{q}^{'} + x_{e}\right)} \\ & K_{5} = \frac{V_{td0}}{V_{t0}} \left\{ \frac{x_{q}^{''}V_{xq0}}{\left(x_{e}^{'} + x_{q}^{''}\right)} \right\} - \frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \left\{ \frac{x_{d}^{''}V_{xd0}}{\left(x_{e}^{'} + x_{d}^{''}\right)} \right\} \\ & K_{6} = \frac{V_{tq0}}{V_{t0}} \frac{x_{e}}{\left(x_{e}^{'} + x_{q}^{''}\right)} & K_{6d} = \frac{V_{td0}}{V_{t0}} - \frac{X_{e}}{\left(x_{e}^{'} + x_{q}^{''}\right)} \\ & a = \frac{\left(x_{d}^{''} + x_{e}\right)}{\left(x_{d}^{'} + x_{e}\right)} & b = \frac{\left(x_{q}^{''} + x_{e}\right)}{\left(x_{q}^{'} + x_{e}\right)} & c = \frac{\left(x_{d}^{'} - x_{d}^{''}\right)}{\left(x_{d}^{'} - x_{d}^{''}\right)} \end{split}$$

Blok shema razvijenog modela generatora prikazana je na slici 10.

5. UZBUDNI SUSTAV

Osnovna funkcija uzbudnog sustava sinkronog generatora je istosmjerno napajanje rotorskog namota. Uz tu osnovnu funkciju, uzbudni sustav preuzima i niz drugih regulacijskih, zaštitnih i sličnih funkcija, čime sudjeluje u poboljšanju pogona EE sustava. Zato se modeliranju uzbudnih sustava pridaje posebna pozornost.

Sastavni dijelovi suvremenog uzbudnog sustava prikazani su na slici 11. Oznake su sljedeće:

 V_{t} napon generatora (p.u.)

struja generatora (p.u.)

- napon uzbude (p.u.)
- struja uzbude (p.u.)
- izlazni napon regulatora napona (p.u.)
- kompenzirani napon stezaljki generatora (p.u.)
- $\begin{matrix} I_{t} \\ E_{fd} \\ V_{R} \\ V_{C} \\ V_{ref} \\ \Delta V \end{matrix}$ refentna vrijednost napona u uzbudnom krugu (p.u.) signal pogreške (p.u.)
 - signal stabilizatora uzbudnog sustava (p.u.)
 - izlazni signal stabilizatora EE sustava (p.u.)
- V_F V_S V_{SI} ulazni signal stabilizatora EE sustava (p.u.)



Slika 10. Model generatora 2d1q - blok shema prijenosne funkcije



Slika 11. Funkcionalna blok shema sustava regulacije uzbude sinkronog generatora



Slika 12. IEEE model AC1A uzbudnog sustava s rotirajućim diodama



Slika 13. IEEE model AC4A uzbudnog sustava s izmjeničnim generatorom i statičkim upravljivim ispravljačima



Slika 14. IEEE model ST1A izmjeničnog uzbudnog sustava sa statičkim upravljivim ispravljačima koji se napaja sa stezaljki generatora

Uzbudni sustavi su tijekom vremena poprimali različite izvedbe. Najčešća je podjela s obzirom na vrstu, odnosno izvor napajanja:

- istosmjerni uzbudni sustavi (tip DC)

- izmjenični uzbudni sustavi (tip AC)

- statički uzbudni sustavi (tip ST).

Tablica	10.	Tipične	vrijednosti	parametara	modela	uzbudnih	susta-
va							

parametar	STIA	AC4A	ACIA
$T_{\rm g}(s)$	1.0	10.0	0
$T_{c}(s)$	1.0	1.0	0
K	210	200	400
$T_{\Lambda}(s)$	0	0.015	0.02
K _F	0	-	0.03
$T_{\rm F}({\rm s})$	0	-	1.0
K _e	-	-	1.0
T _E (s)	-	-	0.8
K _D	-	-	0.38
K _c	0.038	0	0.2
K _{LR}	4.54	-	-
l _{LR} (р.ц.)	4.4	-	-
A _{EX}	-	-	0.001
B _{EX}	-	-	1.657
V _{imax} (p.u.)	-	1.0	-
$V_{imin}(p.u.)$	-	-1.0	-
V _{Rmax} (p.u.)	7.0	5.64	7.3
V _{Rmin} (p.u.)	-6.4	-4.53	-6.6
V _{Amax} (p.u.)	-	-	14.5
V _{Amin} (p.u.)	-	· ·	-14.5

U hidroelekranama se najčešće koriste sljedeći uzbudni sustavi:

- tiristorski sustav nezavisne uzbude s rotacijskim strojem montiranim na osovini agregata
- uzbudní sustav s rotirajućim diodama
- statički sustav tiristorske samouzbude.

Struktura modela ovisi o tipu uzbudnog sustava. Obično se koriste standardizirani modeli uzbudnih sustava u obliku blok shema. Za navedene uzbudne sustave to su sljedeći modeli:

- IEEE model Ac1A uzbudnog sustava s rotirajućim diodama (slika 12)
- IEEE model AC4A uzbudnog sustava s izmjeničnim generatorom i statičkim upravljivim ispravljačima (slika 13)
- IEEE model ST1A izmjeničnog uzbudnog sustava sa statičkim ispravljačima koji se napaja sa stezaljki generatora (slika 14).

Tipične vrijednosti parametara tih modela uzbudnih sustava dane su u tablici 10.

6. SIMULACIJSKI MODELI HIDROELEKTRANA

Struktura modela, odnosno povezanost elemenata hidroelektrane prikazana je na slici 15. Radi se zapravo o jednom agregatu elektrane, odnosno elektrani u kojoj je u pogonu samo jedan agregat. Uzimanje u obzir većeg broja agregata ne predstavlja veći problem, pogotovo ako su oni jednaki, što je najčešći slučaj.

Dinamika elektrane bitno se razlikuje u slučaju otočnog pogona i u slučaju kada elektrana radi paralelno sa sustavom pa su modeli za ta dva načina rada različiti. Razlika



Slika 15. Struktura modela hidroelektrane



Slika 16. Odzivi na skokovite promjene postavne vrijednosti snage

je u prikazu generatora jer je utjecaj sustava najčešće obuhvaćen modelom generatora. Model generatora koji je opisan u ovom članku zasniva se na pretpostavci o konstantnom naponu i konstantnoj frekvenciji na sabirnicama. Modeli su razvijeni pomoću veličina u relativnim jedinicama (p.u.), a radi se uglavnom sa promjenama veličina od stacionarne, odnosno početne vrijednosti. Koriste se i stvarne veličine i to kod nelinearnih modela te kad su postavljeni početni uvjeti. Kod zasnivanja modela treba voditi računa o tom kakvim se veličinama radi, posebno ako se koriste i promjene i stvarne veličine. Izlazne veličine obično se prilagođavaju tako da se dobiju stvarne veličine umjesto promjena, a množenjem s baznom vrijednošću mogu se dobiti veličine u odgovarajućim jedinicama.

Na temelju matematičkih modela mogu se razviti odgovarajući simulacijski modeli. Simulacija nekog dinamičkog sustava provodi se općenito analognim, digitalnim ili hibridnim računalom. Posljednjih godina razvijeno je više blokovski orijentiranih digitalnih simulacijskih sustava, čime je bitno olakšano razvijanje simulacijskih modela. To su npr. programski paketi "MATLAB with SIMULINK", "EASY5x", "MATRIXX", "XANALOG" i drugi.

Na slici 16 prikazani su odzivi dobiveni simulacijskim modelom hidroelektrane razvijenim pomoću programskog paketa "MATLAB with SIMULINK". To su odzivi otvora sprovodnog aparata, promjene kuta opterećenja, brzine vrtnje, mehaničke snage, napona generatora i napona uzbude na skokovite promjene postavne vrijednosti snage (0.05, 0.1 i 0.15 p.u.).

Model pomoću kojeg su provedene te simulacije sastoji se od sljedećih elemenata (prema slici 15):

- turbina nelinearni model prema slici 4
- regulator klasični model prema slici 6
- generator model 2d1q prema slici 10
- uzbudni sustav model tiristirske samouzbude SR1A prema slici 14.

Za razvijanje simulacijskog modela potrebno je raspolagati određenim parametrima sustava koji se modelira. Parametri modela su ili jednaki stvarnim fizikalnim parametrima sustava ili se određuju prema njima. U primjeru koji je opisan, korištene su tipične vrijednosti parametra.

7. ZAKLJUČAK

Hidroelektrana je složen viševeličinski nelinearni dinamički sustav čiji su osnovni elementi turbina, dovodni sustav, turbinski regulator te generator s uzbudnim sustavom. U ovom članku opisani su modeli tih elemenata, na temelju kojih se može razviti odgovarajući model hidroelektrane.

Upotreba razvijenih modela je donekle ograničena iz nekoliko razloga: modeli pojedinih elemenata su više ili manje pojednostavljeni, često nisu poznati svi potrebni parametri i ne mogu se simulirati sve zanimljive pogonske prilike. Daljnji razvoj postojećih modela trebalo bi usmjeriti ka rješavanju tih problema.

Od navedenih elemenata potrebno je u prvom redu detaljnije modelirati Kaplan-turbinu. Trebalo bi na temelju osnovnih karakteristika i topografskih dijagrama za različite zakrete lopatica rotora razviti potpun nelinearan model koji bi točno opisivao ponašanje Kaplan-turbine.

Nepoznavanje parametara, odnosno nemogućnost njihova određivanja predstavlja jedan od najvećih problema pri razvijanju modela. Potrebno je prije svega prikupiti sve raspoložive projektne ili mjerene podatke o konkretnoj elektrani. Suvremeni načini određivanja parametara zasnivaju se na identifikaciji parametara stvarnog sustava koji se modelira.

Modeli koji su razvijeni u ovom radu uglavnom su orijentirani na krugove regulacije brzine vrtnje i djelatne snage. Na postojećim modelima mogu se provesti i odgovarajuće simulacije regulacije napona i jalove snage pa su tu moguće daljnje analize. Glavni nedostatak ovakvog modeliranja elektrane je nemogućnost simuliranja poremećaja u sustavu. Utjecaj sustava obuhvaćen je modelom generatora pri čemu je sustav nadomješten sabirnicom s konstantnim naponom i konstantnom frekvencijom, pa bi za neki drugi slučaj model generatora bio drugačiji. Za simuliranje takvih pognskih prilika potrebno je raspolagati i odgovarajućim modelom sustava.

LITERATURA

- [1] P. KUNDUR: "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994
- [2] IEEE WORKING GROUP: "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", *IEEE Tran*sactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 167-179, February 1992
- [3] 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
- [4] IEEE COMMITTEE REPORT: "Current Usage and Suggested Practices in Power System Stability Simulations for Synehronous Machines", *IEEE Transactions on Energy Conver*sion, Vol. EC-1, No. 1, March 1986
- [5] M. SAIDY, F. M. HUGHES: "Block diagram transfer function model of a generator including damper windings", *IEE Proc.* C, Vol. 141, No. 6, pp. 599-608, November 1994
- [6] IEEE COMMITTEE REPORT: "Excitation system models for power syste stability studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 494-509, February 1981
- [7] P. M. ANDERSON, A. A. FOUAD: "Power System Control and Stability", *IEEE Press*, 1994
- [8] A. W. ORDYS, A. W. PIKE, M. A. JOHNSON, R. M. KATE-BI, M. J. GRIMBLE: "Modeling and simulation of power generation plants", *Springer-Verlag*, 1994
- [9] N. DIZDAREVIĆ, LJ. KUTEROVAC: "Analiza primjenjivih tipova agregata HE Novo Virje s obzirom na zahtjeve stabilnosti i mogućnosti otočnog pogona", studija, FER Zagreb, 1996.
- [10] S. TEŠNJAK: "Teorijska i eksperimentalna analiza dinamike hidroelektrane", doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1984.
- [11] T. TOMIŠA: "Identifikacija parametara dovodnog sustava visokotlačne hidroelektrane", doktoska disertacija, ETF Zagreb, 1995.

HYDRO POWER PLANT MODELLING

Theoretical analysis of the hydro power plant dynamics is realised using the mathematical and corresponding simulation models. Modelling techniques are constantly improving because the current unit-oriented digital simulation systems enable the creation of more complicated and detailed models. Most frequently used models for single hydro power plant elements suitable for the simulation of the transient operation are described in the paper.

DIE MODELIERUNG DER WASSERKRAFTWERKE

Die theoretische Erörterung der Dynamik von Wasserkraftwerken wird mittels mathematischer und entsprecender Nachahmungsmodelle durchgeführt. Moderne blockorientierte digitale Nachahmungssysteme ermöglichen das Entwerfen immer komplizietrer und detaillierter Modelle: so wird die Modelierungstechnik immer vollkommener. Meistbenutzte Modelle einzelner Bestandteile eines Wasserkraftwerkes, welche für die Nachahmung von Arbeitsweisen im Übergangszustand geeignet sind, werden in diesem Artikel beschrieben.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Sejid Tešnjak, dipl. ing. mr. sc. Igor Kuzle, dipl. ing. Fakultet elektrotehnike i računarstva Zavod za visoki napon i energetiku Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska Miljenko Brezovec, dipl. ing. HE Varaždin, Medimurska 26c, 42000 Varaždin, Hrvatska

Uedništvo primilo rukopis: 1997-03-14.