

Turbinski regulator za dvošobno turbino Pelton

Primož Bergoč¹, Borut Zupančič²

¹Soške elektrarne Nova Gorica d.o.o., Erjavčeva 20, 5000 Nova Gorica

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
primoz.bergoc@seng.si, borut.zupancic@fe.uni-lj.si

Turbine controller for two needle Pelton turbine

The paper deals with turbine controller for two needle Pelton turbine in hydropower plant with synchronous generator. Turbine controller maintains the set point which depends on selected mode of hydro machine operation. To achieve this it controls opening of two needles and deflector. Turbine controller consists of the following parts: speed controller which acts during free run, level controller, load controller, opening controller and frequency controller when the hydro machine is connected on the grid. For turbine controller design a mathematical model of hydropower plant was developed. It consists of five sub-models: the model of upper reservoir, the penstock model including the water hammer effect, the turbine model, the model of hydraulic solenoid valves and servomotors and the simplified model of synchronous machine. Using the model the control algorithms were designed and tested.

Keywords: Turbine controller, Pelton turbine, hydro power plant modeling, water hammer

Kratek pregled prispevka:

V članku predstavljamo razvoj turbinskega regulatorja za dvošobno turbino Pelton hidroelektrarne s sinhronskim generatorjem. Turbinski regulator z ustreznim reguliranjem odprtja dveh igel in odrezala vzdržuje turbino v željeni delovni točki glede na izbran režim obratovanja. Vsebuje naslednje regulatorje: regulator obratov v prostem teku, regulator nivoja zajetja, regulator po delovni moči, regulator odprtja in regulator frekvence. Zadnji štirje regulatorji se uporabljajo, ko je agregat priključen na električno omrežje, pri čemer se regulator frekvence uporablja v primeru otočnega obratovanja elektrarne. Za potrebe testiranja turbinskega regulatorja smo izdelali matematični model hidroelektrarne, ki ga sestavlja model zajetja, model tlačnega cevovoda z upoštevanjem vodnega udara, model turbine z vztrajnostnim momentom agregata, model proporcionalnih hidravličnih ventilov in servomotorjev ter poenostavljeni model sinhronskega generatorja. Z modelom smo načrtali in testirali ustrezno regulacijo.

Ključne besede: turbinski regulator, turbina Pelton, modeliranje hidroelektrarne, vodni udar

1. Uvod

Pomemben člen vsakega agregata v hidroelektrarni je turbinski regulator, ki skrbi za pravilno delovanje turbine in agregata v prostem teku in po priključitvi na električno omrežje. Turbinski regulator mora najprej zagotavljati pravilno delovanje agregata glede na posebnosti celotnega hidro sistema (zajetje, cevovod, turbina, generator itd.) nato pa tudi zahtevam, ki jih narekuje zakonodaja priključitve hidroelektrarne na električno omrežje.

Turbinski regulatorji so se skozi zgodovino razvoja hidroelektrarn tehnološko zelo razvili. Od prvih povsem mehanskih do kombinacije analogne tehnike in elektromehanike ter današnjih, ki so kombinacija digitalne tehnike in elektromehanike. Sodobni turbinski regulatorji so sestavljeni iz aplikativne programske opreme regulatorja, ki je realizirana na programirljivih logičnih krmilnikih (PLK) ali na namenskih elektronskih napravah [15] in iz elektromagnetnih ventilov ter hidravličnih servomotorjev.

V članku je predstavljen razvoj turbinskega regulatorja za dvošobno turbino Pelton. Turbinski regulator vsebuje regulator vrtljajev, nivoja zgornjega zajetja, frekvence, delovne moči in regulator odprtja izvršnih členov turbine. Aplikativna programska oprema turbinskega regulatorja je izvedena v programskem okolju STEP 7 proizvajalca Siemens in je primerna za programirljive logične krmilnike proizvajalca Siemens in VIPA.

V fazi razvoja aplikativne programske opreme turbinskega regulatorja je le to nemogoče testirati na realnem sistemu. Zato smo za potrebe testiranja izdelali v realnem času delujoči matematični model hidroelektrarne, ki vključuje vse glavne sklope realnega sistema: zajetje, cevovod, turbina, elektromagnetne ventile in servomotorje ter generator. Z modelom smo načrtali in testirali ustrezno regulacijo.

2. Matematični model

Za namen razvoja in testiranja turbinskega regulatorja smo razvili matematični model hidroelektrarne v realnem času. Model je izdelan v programskem okolju Matlab na osebem računalniku. Za izmenjavo podatkov med modelom in PLK-jem, na katerem se izvaja aplikativna programska oprema turbinskega regulatorja, smo uporabili odprto kodno knjižnico Snap7 [11], ki preko mrežne povezave uporablja Siemensov komunikacijski protokol »S7 Protocol«.

Ker je hidroelektrarna sestavljena iz več podsistemov, je tudi matematični model sestavljen iz petih modelov, in sicer modela zajetja, modela cevovoda z upoštevanjem vodnega udara, modela rotirajočih se delov agregata, modela proporcionalnih elektromagnetnih ventilov in servomotorjev ter modela sinhronskega generatorja.

Model zgornjega zajetja

Količina vode, ki je na razpolago hidroelektrarni, se zbira v zgornjem zajetju. Uporabni nivo zajetja H_z je definiran kot globina vode nad ustjem cevi cevovoda in je odvisen od količine vode, ki priteka v akumulacijo in količine vode, ki odteka skozi cevovod. Opisan prehodni pojav opisuje naslednja enačba

$$\frac{dH_z}{dt} = \frac{1}{A_z} (Q_{dot} - Q_{cev}) \quad (1)$$

pri čemer je A_z površina zajetja, Q_{dot} je volumski dotok vode v zajetje in Q_{cev} volumski pretok vode skozi cevovod. Enačba (1) predstavlja matematični model zajetja, pri čemer se je predpostavilo, da je površina zajetja konstantna čez celoten uporabni nivo zajetja. Ta predpostavka je dovolj dobra za testiranje turbinskega regulatorja.

Model tlačnega cevovoda z upoštevanjem vodnega udara

Turbine Pelton se uporabljajo na hidroelektrarnah z visokimi bruto padci (nad 100 m) in nizkimi pretoki. Pri dolgih tlačnih cevovodih je zelo pomembna pravilna

nastavitev zapiralnih časov zapornih organov turbine (iglasti ventili in kroglasti zasuni), da je vpliv vodnega udara čim manjši.

Vodni udar je definiran [2] kot spreminjanje tlačne višine H z razdaljo x in s časom t pri spremembah pretoka. Nastopi lahko v vseh tlačnih cevovodih ob spremembah pretoka (npr. ob spremembi neto padca, ob zapiranju ali odpiranju vodilnika oz. iglastih ventilov). Vodni udar lahko povzroči velike nadtlake in podtlake v cevovodu, kar ima za posledice trajne deformacije cevovoda in velike sile na temelje samega cevovoda in turbine.

Matematični model cevovoda z upoštevanjem vodnega udara [1] in [2] opisujeta dve parcialni diferencialni enačbi, in sicer dinamična enačba (2) in kontinuitetna enačba (3).

$$\frac{1}{A_{Cev}} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{A_{Cev}^2} \frac{Q|Q|}{2D} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g A_{Cev}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

kjer je H tlačna višina, Q volumski pretok vode, A_{Cev} notranji presek cevovoda, D notranji premer cevovoda, a hitrost vodnega udara, g gravitacijski pospešek, f koeficient trenja cevovoda, x razdalja v smeri dolžine cevovoda in t je čas.

Izdelava matematičnega modela tlačnega cevovoda z upoštevanjem vodnega udara v programskem okolju Matlab zahteva uporabo ustrezne numerične metode reševanja nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb. Nelinearni parcialni diferencialni enačbi (2) in (3) se rešujeta z uporabo metode karakteristik [1] in [2]. Metoda karakteristik transformira parcialne diferencialne enačbe v navadne diferencialne enačbe, ki se jih lažje numerično rešuje. Rešitev problema vodnega udara je določitev odvisnih spremenljivk H (tlačna višina) in Q (volumski pretok vode) v vsakem profilu x in v vsakem času t [2].

Model rotirajočih delov agregata

Model sestavljajo vsi rotirajoči se deli agregata, kamor spadajo turbina, vztrajnik, os in rotor generatorja. V modelu se je modeliralo dvošobno turbino Pelton z odrezračem. Skozi

šobe oz. iglaste ventile (»igle«) se dovaja voda na tekač, ki je pri turbini Pelton sestavljen iz lopatic v obliki skodelice. Za natančno regulacijo vrtljajev se uporablja odrezač, da odvečen del vode skozi iglaste ventile preusmeri mimo tekača. Turbina je preko osi povezana na vztrajnik, ki blaži kratkotrajne prehodne pojave na mreži ali pri odpiranju igel in preprečuje nenadno spremembo vrtljajev. Os tekača in vztrajnika je preko toge ali elastične sklopke povezana na os rotorja generatorja.

Izpeljava matematičnega modela rotirajočih se mas agregata temelji na enačbi za dinamični vrtilni navor, ki pravi, da vsaka sprememba vsote vseh navorov M povzroči spremembo kotne hitrosti ω .

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum M = M_h - M_D - M_Z - M_e \quad (4)$$

J je vztrajnostni moment celotnega sistema, M_h je hidravlični navor, do katerega pride, ko voda trči v tekač, M_D je dušilni navor (izgube vseh rotirajočih se mas zaradi trenja in ventilacije), M_Z je zavorni navor, ki ga povzroči aktivna zavora pri zaustavitvi agregata, ko vrtljaji padejo pod določen prag (običajno pod 30 %) in M_e je električni navor, ki nastane, ko je generator priključen na električno omrežje.

Naprej definiramo relativno spremembo hitrosti φ , pri čemer velja $\omega = 2\pi n$, kjer je ω_r je nazivna kotna hitrost in n_r nazivni vrtljaji

$$\varphi = \frac{\omega}{\omega_r} - 1 = \frac{n}{n_r} - 1 \quad (5)$$

Če enačbo (5) vstavimo v enačbo (4) in celotno enačbo delimo z nazivnim navorom $M_r = S_r/\omega_r$, dobimo enačbo za dinamični vrtilni navor v »pu« obliki

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} = m_h - m_D - m_Z - m_e \quad (6)$$

pri čemer je T_a časovna konstanta sistema in nam pove koliko časa potrebuje sistem, da se zavrti iz mirovanja do nazivnih vrtljajev, če mu dovedemo maksimalni navor oz. v primeru hidro turbine nazivni pretok vode na tekač

$$T_a = \frac{J\omega_r}{M_r} \quad (7)$$

Glede na [5] se T_a za hidroelektrarne giblje med 4 in 8 s.

Hidravlični navor je definiran kot produkt sile vode na tekač F_h in ročice sile, ki je enaka polmeru tekača D_K [6], [7] in [8]

$$m_h = \frac{M_h}{M_r} = \frac{1}{M_r} F_h \frac{D_K}{2} \eta \quad (8)$$

pri čemer je hidravlična sila vode F_h definirana z naslednjo enačbo [6] in [8]

$$F_h = 2\rho Q_m (V_m - u) \quad (9)$$

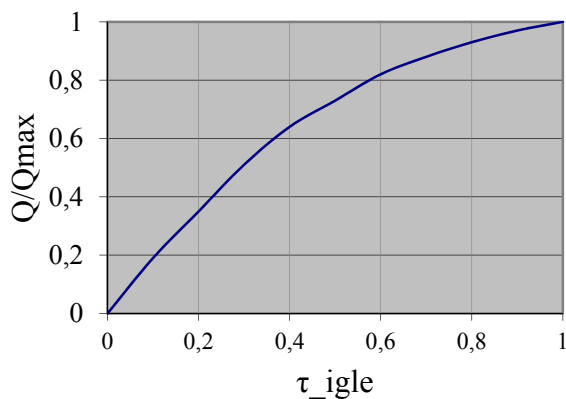
kjer je Q_m pretok vode na tekač, to je pretok, ki teče mimo odrezača, u je obodna hitrost tekača definirana z enačbo

$$u = \frac{D_K}{2} \omega_r (\varphi + 1) \quad (10)$$

V_m je hitrost vodnega curka, ki je konstantna za katerokoli odprtje iglastega ventila. Odvisna je le od neto tlačne višine pred ventilom H_n in izgub ventila zaradi trenja ($0,96 \leq K_f \leq 0,99$).

$$V_m = K_f \sqrt{2gH_n} \quad (11)$$

Pri izračunu pretokov skozi iglo Q in mimo odrezača Q_m je potrebno upoštevati nelinearni karakteristiki igle (slika 1) in odrezača (slika 2).

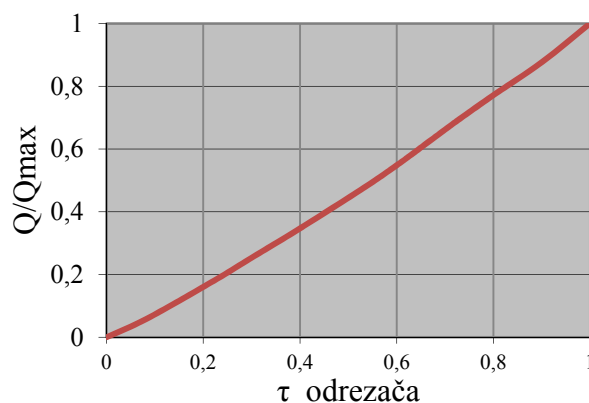


Slika 1: Karakteristika igle

Dušilni navor m_D je premo sorazmeren s kvadratom spremembe hitrosti [6]

$$m_D = \frac{M_D}{M_r} = \frac{1}{M_r} K_D n_r^2 (\varphi + 1)^2 \quad (12)$$

kjer je K_D dušilna konstanta, ki se jo določi eksperimentalno ali pa iz meritev na samem sistemu.



Slika 2: Karakteristika odrezača

Zavorni navor m_Z je navor ustvarjen z zavoro, da zaustavi vrtenje agregata. Modeliralo se je zavoro izvedeno s čeljustjo, ki pritisne na obod vztrajnika. Čeljust je povezana na hidravlični cilinder, ki jo pritisne na obod vztrajnika s silo F_Z .

$$m_Z = \frac{1}{M_r} F_Z \frac{D_K}{2} \quad (13)$$

Zadnji izmed navorov v enačbi (6) je elektromagnetni navor m_e , ki ga ustvari generator, ko je priključen na električno omrežje

$$m_e = \frac{M_e}{M_r} = \frac{P_e}{S_r} \quad (14)$$

kjer je P_e trenutna delovna moč generatorja in S_r nazivna navidezna moč generatorja.

Vstavimo zgornje enačbe za posamezne napore v enačbo (6) in jo uredimo

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{T_a} (K_1 \varphi^2 + K_2 \varphi + K_3) \quad (15)$$

Konstante K_1 , K_2 in K_3 so naslednje

$$K_1 = -\frac{K_D n_r^2}{M_r} \quad (16)$$

$$K_2 = -\left(\frac{D_K^2 \rho Q_m \omega_r \eta}{2M_r} + \frac{2K_D n_r^2}{M_r} \right) \quad (17)$$

$$K_3 = \frac{D_K \rho Q_m \eta}{M_r} \left(V_m - \frac{D_K \omega_r}{2} \right) - \frac{K_D n_r^2}{M_r} - \frac{D_K F_Z}{2M_r} - \frac{P_e}{S_r} \quad (18)$$

Model sinhronskega generatorja

V modelu hidroelektrarne smo uporabili poenostavljen matematični model sinhronskega generatorja, pri katerem smo modelirali samo delovno moč P_e , ki je odvisna od kolesnega kota δ

$$P_e = \frac{U_L U_G \sin \delta}{X_S}, \quad (19)$$

kjer je U_L napetost mreže, U_G napetost generatorja in X_S sinhronska reaktanca. Kolesni kot δ je definiran kot razlika med dejansko kotno hitrostjo in sinhronsko oz. nazivno kotno hitrostjo

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r \varphi \quad (20)$$

Model proporcionalnih elektromagnetnih ventilov

Iglasta ventila in odrezač so krmiljeni s proporcionalnimi elektromagnetnimi ventili (EMV), ki jih modeliramo s sistemom prvega reda z ojačenjem 1 in s časovno konstanto T_y

$$\frac{dy_{izh}}{dt} = \frac{1}{T_y} (y_{zel} - y_{izh}), \quad (21)$$

kjer sta y_{izh} dejansko odprtje EMV-ja in y_{zel} zeleno odprtje (referenčni signal na EMV).

3. Turbinski regulator

Aplikativna programska oprema turbinskega regulatorja je izdelana v programskem okolju Simatic STEP 7 proizvajalca Siemens in je primerna za PLK-je serije S7-300 in S7-400 proizvajalca Siemens in CPU300S proizvajalca VIPA.

Turbinski regulator sestavljajo štirje moduli:

- modul za generiranje začetnih pogojev, hitre zapore, alarmov in opozoril,
- modul za zagon in zaustavitev turbine,
- modul izbire upravljanja in obratovanja turbine,
- modul turbinskega regulatorja, kjer se izvajajo vsi regulatorji in izhodni gonilnik pozicije servomotorjev.

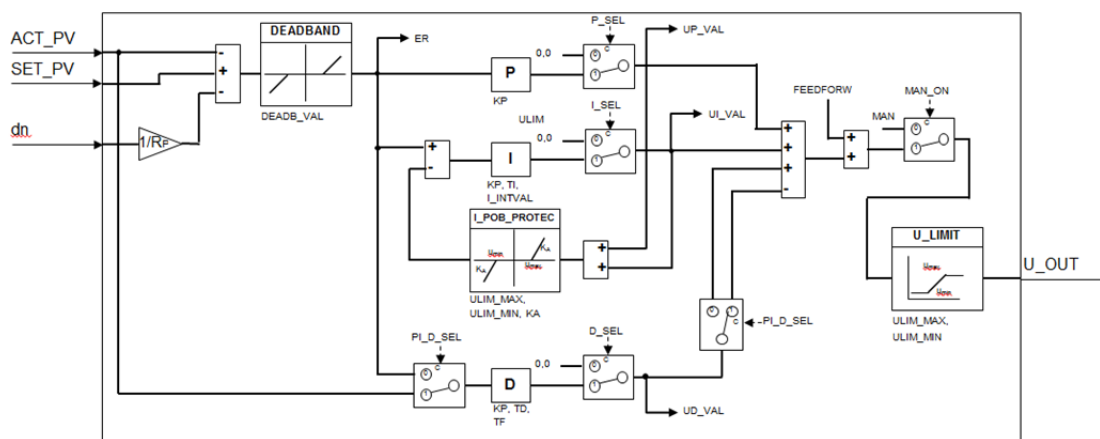
Modul turbinskega regulatorja vsebuje naslednje regulatorje:

- **regulator vrtljajev** – uporablja se za regulacijo vrtljajev turbine v prostem teku agregata (agregat ni priključen na električno omrežje),
- **regulator nivoja** – uporablja se za regulacijo nivoja zgornjega zajetja (agregat priključen na električno omrežje),
- **regulator po moči** – uporablja se za regulacijo zelene delovne moči (agregat priključen na električno omrežje),
- **regulator frekvence** – uporablja se za vzdrževanje frekvence mreže 50 Hz (agregat priključen na šibko električno omrežje – otočno obratovanje),
- **regulator odprtja** – uporablja se za regulacijo zelenega odprtja izvršnih členov turbine (agregat v prostem teku ali pa priključen na električno omrežje).

Istočasno je lahko aktiven le eden izmed zgoraj navedenih regulatorjev. Za preprečitev večjih prehodnih pojavov povezanih z vodnim udarom ima gonilnik pozicije vgrajeno možnost odpiranja/zapiranja izvršnih členov po rampi, ki je nastavljiva za vsak režim obratovanja posebej. Poleg tega gonilnik pozicije odpira/zapira obe igli po kulisi, saj se s tem zaradi nelinearne karakteristike igel (slika 1) doseže maksimalni izkoristek turbine.

Turbinski regulator ima vgrajeno tudi možnost obratovanja po statiki, ki je pri hidroelektrarnah običajno 4 - 5 %.

Vse regulatorje turbinskega regulatorja smo razvili z algoritmom PID (slika 3). Regulator PID je parametrski regulator [12] (vsebuje 20 različnih parametrov), saj lahko z ustrezno izbiro parametrov običajni regulator PID spremenimo v katerokoli izvedenko od P do PI_D s poljubnimi parametri posameznega člena. Regulator ima vgrajeno tudi zaščito pred integralskim pobegom, mrtvo cono pogreška, omejilnik izhodne veličine in ročno obratovanje.



Slika 3: Bločna shema regulatorja PID

Regulator PID je sestavljen iz treh osnovnih členov z naslednjimi prenosnimi funkcijami:

- proporcionalni člen:

$$P = K_P \quad (22)$$

- integrirni člen:

$$I = \frac{K_P}{T_I s} \quad (23)$$

- diferencirni člen:

$$D = \frac{K_P T_D s}{T_f s + 1} \quad T_f = (0,1 \dots 0,3) T_D \quad (24)$$

Če enačbe (22), (23) in (24) združimo in zapišemo v diskretni obliki [12] in [13], dobimo diskretno obliko regulatorja PID, ki je primerna za uporabo v aplikativni programski opremi turbinskega regulatorja

$$u(k) = K_P \left[e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T_0} (e_f(k) - e_f(k-1)) \right] \quad (25)$$

k je diskretni časovni korak in T_0 čas vzorčenja. V enačbi (25) je potrebno izpeljati še diskretno obliko zakasnjene pogreška diferencirnega člena

$$e_f = (1 - a)e_f(k-1) + ae(k), \quad (26)$$

kjer je

$$a = \frac{T_0}{T_f + T_0} \quad (27)$$

4. Rezultati

Aplikativno programsko opremo turbinskega regulatorja smo testirali na PLK-ju CPU 313SC (serija CPU300S) proizvajalca VIPA Elektronik-Systeme [14], za vmesnik človek stroj (ang. HMI – Human Machine Interface) smo uporabili operaterski panel WOP-2070T proizvajalca Advantech. Matematični model hidroelektrarne v realnem času se je izvajal na osebem računalniku. Naprave so si med seboj izmenjevale podatke preko mrežne povezave.

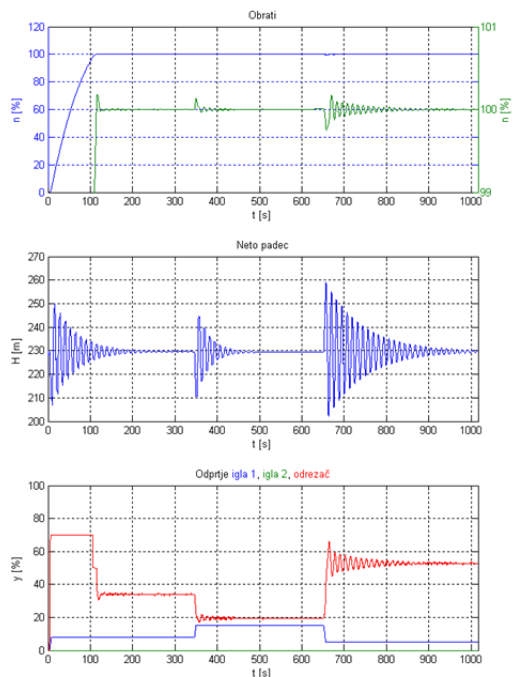
Zaradi velikega števila parametrov modela bomo tu navedli le osnovne:

- dvošobna turbina Pelton z odrezračem
- površina zajetja (A_Z) 252 m²
- globina zajetja (H_Z) 2 m
- dolžina cevovoda (L) 3548 m
- bruto padeč (H_b) 230 m
- nazivni pretok (Q_n) 0,43 m³/s
- navidezna moč gen. (S_n) 810 kVA

Naprej smo preizkusili zagon turbine in delovanje regulatorja vrtljajev v prostem teku. Regulator vrtljajev vzdržuje nazivne vrtljaje samo z odpiranjem in zapiranjem odrezala. Iglasta ventila ostaneta cel čas na enakem odprtju.

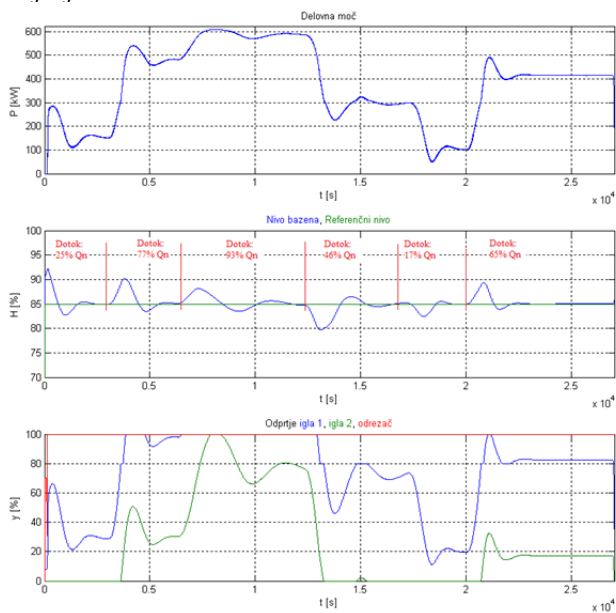
Slika 4 prikazuje zagon agregata in odziv regulatorja vrtljajev na dve stopničasti spremembi odprtja igle. Prvi graf prikazuje vrtljaje v razponu 0 – 120 % in obrate v razponu 99 – 101 %, na drugem grafu je lepo razvidno, kako se spreminja tlak v cevovodu (vodni udar)

ob spremembi odprtja in na zadnjem grafu so odprtja izvršnih členov.



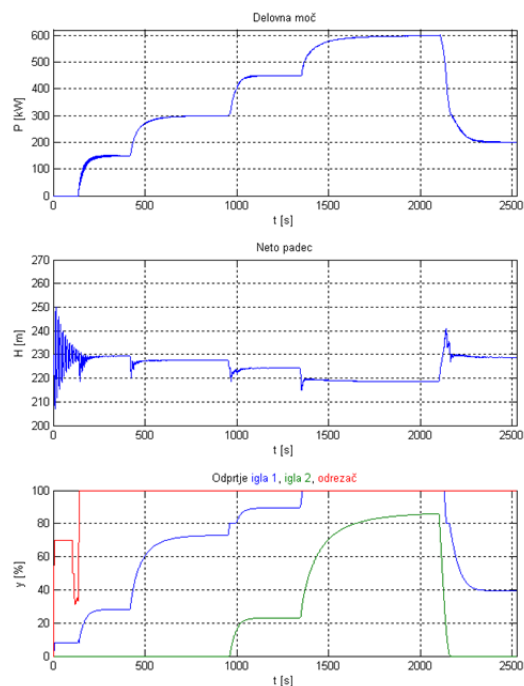
Slika 4: Zagon in prosti tek agregata

Po sinhronizaciji na omrežje turbinski regulator preklopi iz regulacije vrtljajev v regulacijo nivoja, če je regulacija nivoja izbrana. Slika 5 prikazuje odziv regulatorja nivoja pri vzdrževanju 85 % referenčne vrednosti nivoja in spreminjanju dotoka v zajetje.



Slika 5: Regulacija nivoja pri spreminjanju dotoka v zgornje zajetje

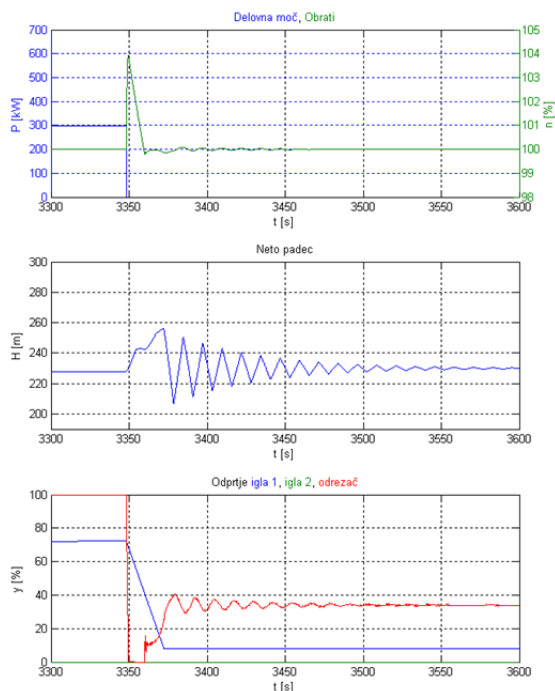
V primeru, da je pri obratovanju na mreži izbran regulator po moči, turbinski regulator vzdržuje nastavljeno referenčno delovno moč. Slika 6 prikazuje odzive regulatorja delovne moči na spreminjanje reference delovne moči. Referenca se je spreminjala po 150 kW korakih, na koncu pa se je iz 600 kW spremenila na 200 kW.



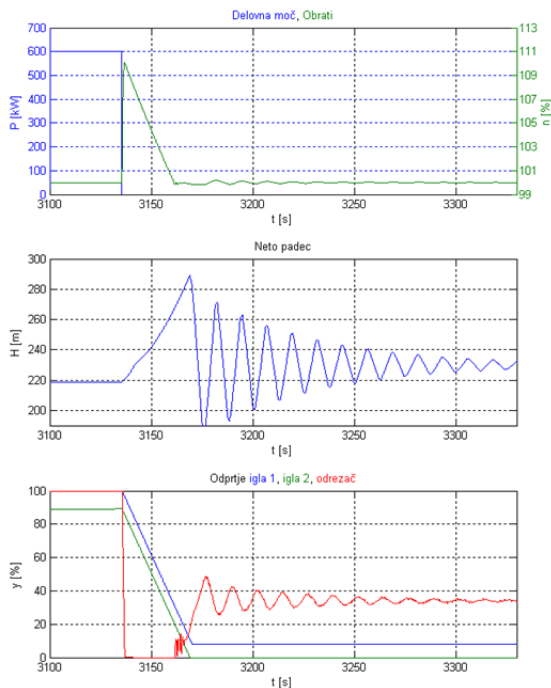
Slika 6: Odziv regulacije delovne moči na spremembe reference

Pomemben test turbinskega regulatorja je odziv na razbremenitve agregata iz različnih delovnih moči. Običajno se izvede teste razbremenitve iz 25 %, 50 %, 75 % in 100 % nazivne delovne moči agregata. Ti testi so še posebej pomembni pri hidroelektrarnah s tlačnimi cevovodi, kjer mora biti turbinski regulator dovolj hiter, da prepeči pobeg agregata (preveliko povišanje obratov), na drugi strani pa počasen, da ne pride do prevelike spremembe tlaka v cevovodu. Pri turbini Pelton turbinski regulator prvi problem rešuje s hitrim zapiranjem odrezala, drugega pa z ustrezno dolgimi zapiralnimi časi igel. Pri razbremenitvi se mora turbinski regulator odzvati, tako da varno pripelje agregat na nazivne vrtljaje in ga na nazivnih obratih obdržati. Slika 7 in 8 prikazujeta odziv turbinskega regulatorja na razbremenitve iz 300 kW in polne delovne moči (600 kW). Na obeh slikah prvi graf prikazuje

spremembo vrtljajev, drugi graf porast tlaka v cevovodu in tretji graf odprtja izvršnih členov.



Slika 7: Razbremenitev iz moči 300 kW



Slika 8: Razbremenitev iz moči 600 kW

5. Sklep

Matematični model se je izkazal kot odličen pripomoček pri razvoju turbinskega regulatorja.

Z njim smo testirali različne režime obratovanja in prehodne pojave, tudi take, ki se jih na realnem sistemu raje izognemo oz. jih izvedemo z določenim strahom, saj lahko povzročijo poškodbe na objektu in napravah.

Tako matematični model kot turbinski regulator sta dobra osnova za nadaljnji razvoj turbinskih regulatorjev za ostale vrste turbin in hidroelektrarn.

6. Literatura

- [1] E. B. Wylie, V. L. Streeter, *Fluid transients*, New York: McGraw-Hill, 1978.
- [2] R. Rajar, *Hidravlika nestalnega toka*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1980.
- [3] L. A. L. Tenorio, *Hydro Turbine and Governor Modelling*, Master's thesis, School of Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2010.
- [4] A. R. Lohrasbi, R. Attarnejad, *Water Hammer Analysis by Characteristic Method*, American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (4): 287-294, 2008.
- [5] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1993.
- [6] U. Karadžić, A. Bergant, P. Vukoslavčević, *A Novel Pelton Turbine Model for Water Hammer Analysis*, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 55, 369-380, 2009.
- [7] U. Karadžić, A. Bergant, P. Vukoslavčević, *Water Hammer Effects During Pelton turbine Load Rejection*, 3rd IAHR Czech Republic, 2009.
- [8] M. N. Shesha Prakash, *Hydraulic turbines*, VTU Learning, Dosegljivo: http://elearning.vtu.ac.in/P6/enotes/CV44/Pel_Whe-MNSP.pdf
- [9] D. Miljavec, P. Jereb, *Električni stroji*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2005.
- [10] I. N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, G. Musiol, H. Mühlig, *Matematični priročnik*, Ljubljana: Tehnična založba Slovenije, 1997.
- [11] D. Nardella, *Snap7 Reference Manual*, Dosegljivo: <http://snap7.sourceforge.net/>, 2013.
- [12] B. Zupančič, *Zvezni regulacijski sistemi, 1. in 2. del*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, dosegljivo <http://msc.fe.uni-lj.si/Download/Zupancic/ZRS1.pdf>, 2010.
- [13] D. Matko, *Računalniško vodenje procesov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 1995.
- [14] *SPEED7-CPU SC 313-5BF13 Manual*, Rev. 12/50, December 2012, Dosegljivo: www.vipa.at.
- [15] *505 Digital Governor for Hydraulic Turbines Manual*, Woodward, 2011.