

Rafaela Beus
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.
rafaela.beus@hops.hr

Mateo Beus
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
mateo.beus@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
hrvoje.pandzic@fer.hr

Igor Kuzle
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u zagrebu
igor.kuzle@fer.hr

PRIMJENA ALGORITMA MODELSKO PREDIKTIVNOG UPRAVLJANJA ZA REGULACIJU BRZINE VRTNJE PELTON TURBINE LABORATORIJSKE HIDROELEKTRANE

SAŽETAK

Turbinski regulatori u hidroelektranama uglavnom se temelje na primjeni klasičnih proporcionalno-integracijsko-derivacijskih regulatora. Glavni nedostatak klasičnih regulatora je njihov dizajn baziran na linearnom modelu postrojenja te uporabi fiksnih parametara regulatora. To znači da klasični regulatori mogu osigurati optimalno ponašanje sustava samo u okolini radne točke za koju su projektirani. Budući da su hidroelektrane izrazito nelinearni sustavi, potrebno je razmotriti alternativne upravljačke pristupe bazirane na primjeni adaptivnih parametara regulatora u ovisnosti o trenutnoj radnoj točki. U tom smislu, u sklopu ovog rada predstavljen je algoritam modelskog prediktivnog upravljanja koji se koristi za regulaciju brzine vrtnje turbine laboratorijske hidroelektrane.

Ključne riječi: regulacija brzine vrtnje hidroturbine, turbinska regulacija, laboratorij za napredne elektroenergetske mreže, otočni pogon

APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL ALGORITHM FOR PELTON TURBINE SPEED CONTROL OF THE LABORATORY HYDRO POWER PLANT

ABSTRACT

Nowadays, hydro turbine governors in the hydro power plants are mainly based on the application of the classical proportional-integral-derivative controllers. The main disadvantage of this type of controllers is their design based on linear plant models and the use of fixed parameters of controllers. This means that conventional controllers can ensure optimal system behavior only in the vicinity of the operating point for which they are designed. Since hydro power plant are highly non-linear systems, it is necessary to consider alternative control approaches based on the application of adaptive parameters of the controller

depending on the current operating point. In that regard, as a part of this paper, a model predictive control algorithm used to control the speed of rotation of a laboratory hydro power plant's turbine is presented.

Key words: speed control, hydro turbine governor, smart grid laboratory, islanded mode of operation

1. UVOD

Zbog svoje jednostavnosti klasični Proporcionalno-Integracijsko-Derivacijski (PID) regulatori se trenutno u praksi najčešće koriste za izvedbu sustava turbinske regulacije u hidroelektranama [1]. Međutim, glavni nedostatak PID regulatora s fiksnim parametrima leži u odabiru parametra regulatora koji se zasniva na korištenju linearnih modela hidroelektrane. Naime, hidroelektrane su izrazito nelinearni sustavi što implicira da primjena PID regulatora s fiksnim parametrima može osigurati optimalne upravljačke performanse samo u okolini radne točke za koju su određeni parametri PID regulatora korištenjem linearnog modela hidroelektrane.

Glavne komponente svakog turbinskog regulatora su: regulator brzine vrtnje i regulator snage [2]. Regulator brzine vrtnje je aktivan kada agregat hidroelektrane radi u otočnom pogonu ili je u procesu sinkronizacije na mrežu. Glavna zadaća regulatora brzine vrtnje je regulacija brzine vrtnje turbine. Nadalje, regulator snage se aktivira kada se agregat sinkronizira na mrežu. Glavna zadaća regulatora snage je da regulira izlaznu djelatnu snagu agregata kao i da sudjeluje u pružanju primarne regulacije frekvencije.

Široka primjena PID regulatora u izvedbi sustava turbinske regulacije hidroelektrane implicira da se ovakav tip regulatora pokazao efikasnim u praktičnim primjenama. Dostupna je velika količina relevantne stručne i znanstvene literature u kojoj se analizira izvedba turbinskog regulatora hidroelektrane korištenjem PID regulatora. U tom smislu, referenca [3] prikazuje pregled literature vezane uz razvoj modela hidroelektrane kao i njihovog sustava upravljanja, dok je u referenci [4] za određivanje parametara PID regulatora turbinskog regulatora hidroelektrane korištena metodologija zasnovana na specifikacijama granice osjetljivosti. Nadalje, u [5] autori su predstavili metodologiju za izvedbu PID turbinskog regulatora hidroelektrane čiji parametri se mijenjaju u ovisnosti o trenutnoj radnoj točki.

Učinkovit pogon hidroelektrane kao nelinearnog sustava poziva na primjenu naprednih upravljačkih metoda koje uzimaju u obzir ograničenja sustava kao i više-varijabilne efekte. U tom smislu potrebno je naglasiti da je dostupna velika količina znanstvene i stručne literature koja razmatra napredne upravljačke metode. U [6-9] autori razmatraju primjenu kliznog režima upravljanja (engl. sliding mode control) kod izvedbe turbinskog regulatora hidroelektrane, dok je u [10-13] razmatrana primjena evolucijskih algoritama kod izvedbe turbinskog regulatora. Nadalje, u [14-15] razmatrani su robusni algoritmi upravljanja za određivanje parametara turbinskog regulatora u klasičnoj PID izvedbi.

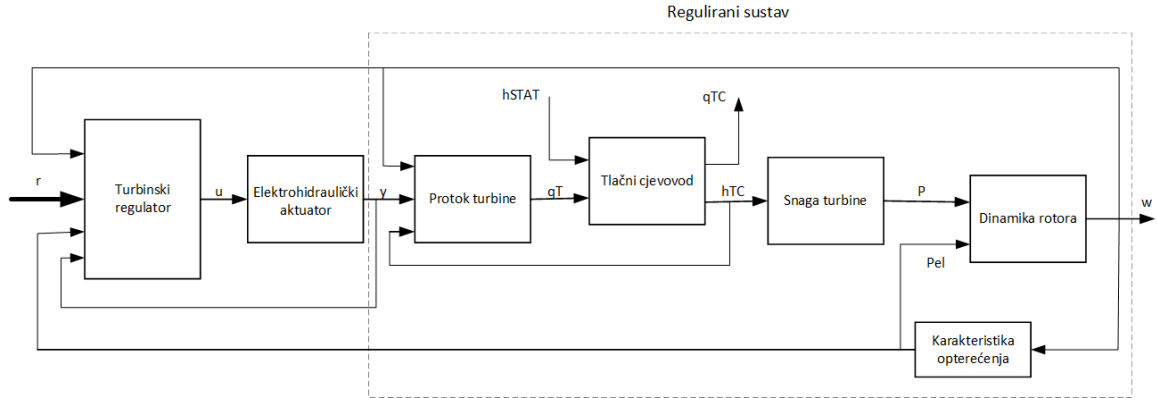
Prilikom analize naprednih upravljačkih tehnika koje su primijenjene za razvoj turbinskog regulatora hidroelektrane posebno mjesto je rezervirano za prediktivne upravljačke algoritme. U tom smislu, u [16-17] autori uvode algoritme modelskog prediktivnog upravljanja (engl. model predictive control - MPC) čiji parametri linearnog predikcijskog modela hidroelektrane se ažuriraju u ovisnosti o trenutnoj radnoj točki. U [18] je predstavljen turbinski regulator koji je projektiran korištenjem algoritma prediktivnog upravljanja zasnovanog na primjeni neuronskih mreža. Dosadašnja primjena MPC algoritama je uglavnom usmjerena za regulaciju snage hidroelektrana koje su sinkronizirane na mrežu. Iako postoji određena količina stručne i znanstvene literature koja pokriva primjenu MPC algoritama u regulaciji frekvencije otočnih mikromreža, npr. [19-21], određena nepokrivenost znanstvene i stručne literature je identificirana u kontekstu primjena MPC algoritma za izvedbu regulatora brzine vrtnje turbine koji je sastavni dio svakog turbinskog regulatora hidroelektrane.

U ovom referatu analizira se mogućnost primjene MPC algoritma za izvedbu regulatora brzine vrtnje. Nadalje, u radu je još prikazana i usporedba upravljačkih performansi regulatora brzine vrtnje koji se zasniva na primjeni MPC upravljačkog algoritma s upravljačkim performansama regulatora brzine vrtnje izvedenim korištenjem klasičnog PID regulatora. U slučaju primjene oba tipa regulatora korišten je isti nelinearni simulacijski model laboratorijske hidroelektrane.

Ostatak referata je organiziran kako slijedi. U poglavlju II opisan je model laboratorijske hidroelektrane, dok je poglavlju III predstavljena formulacija primijenjenog MPC algoritma. U poglavlju IV predstavljeni su simulacijski rezultati, dok su zaključna razmatranja dana u poglavlju V.

2. MODEL HIDROELEKTANE

U cilju razvoja i validacije regulatora brzine zasnovanog na primjeni MPC algoritma korišten je nelinearni simulacijski model hidroelektrane dostupne u sklopu Laboratorija za napredne elektroenergetske mreže (SGLab) [22] na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Slika 1. prikazuje glavne komponente laboratorijske hidroelektrane: tlačni cjevovod, Pelton turbina, elektrohidraulički aktuator te sinkroni generator.



Slika 1 Blok shema hidroelektrane

Dinamika tlačnog cjevovoda je opisana kako slijedi:

$$\frac{dq_{TC}}{dt} = -\frac{1}{T_w}(h_{TC} - h_{STAT} + h_{GTC}) [p. u.] \quad (1)$$

$$\frac{dh_{TC}}{dt} = -\kappa(q_T - q_{TC}) [p. u.] \quad (2)$$

gdje je h_{TC} dinamički tlak na izlazu iz tlačnog cjevovoda, q_T je protok vode kroz turbinu tj. protok vode na izlazu tlačnog cjevovoda, q_{TC} je protok vode na ulazu u tlačni cjevovod, h_{STAT} je statički tlak (visina vode), h_{GTC} predstavlja pad tlaka zbog gubitaka u cjevovodu dok T_w predstavlja vremensku konstantu ubrzanja vodenog stupca u cjevovodu. Budući da laboratorijska hidroelektrana ima veoma kratak tlačni cjevovod opravdano je koristiti pojednostavljenu prijenosnu funkciju koja opisuje dinamičko ponašanje cjevovoda.

$$\frac{\Delta h_{TC}(s)}{\Delta q_T(s)} = -T_w s [p. u.] \quad (3)$$

Nelinearni model Pelton turbine je izveden u jednadžbama (4) i (5). Ove jednadžbe opisuju protok vode kroz turbinu i izlaznu mehaničku snagu turbine [23]:

$$q_T = y\sqrt{h_{TC}} [p. u.], \quad (4)$$

$$P = A_t(q_T - q_{NL})h_{TC} - D_a y \Delta w [p. u.]. \quad (5)$$

U (4) i (5), koeficijent A_t predstavlja pojačanje s obzirom odnosa bazne snage turbine i generatora, q_{NL} je protok vode kroz turbine u praznom hodu (agregat je sinkroniziran na mrežu i izlazna snage je 0 kW), D_a je koeficijent prigušenja turbine, dok Δw predstavlja odmak brzine vrtnje turbine od radne točke.

Budući da je model Pelton turbine nelinearan nužno je napraviti linearizaciju jednadžbi (4) i (5). U tom smislu sljedeće jednadžbe su korištene za linearizaciju modela turbine:

$$\Delta q_T = k_{11}\Delta h_{TC} + k_{12}\Delta w_N + k_{13}\Delta y, \quad (6)$$

$$\Delta P = k_{21}\Delta h_{TC} + k_{22}\Delta w_N + k_{23}\Delta y. \quad (7)$$

Jednadžbe (6) i (7) definiraju koeficijente k_{1i} i k_{2i} ($i = 1,2,3$):

$$k_{11} = \frac{\partial q_T}{\partial h_{TC}}, \quad k_{12} = \frac{\partial q_T}{\partial w_N}, \quad k_{13} = \frac{\partial q_T}{\partial y}, \quad (8)$$

$$k_{21} = \frac{\partial P}{\partial h_{TC}}, \quad k_{22} = \frac{\partial P}{\partial w_N}, \quad k_{23} = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (9)$$

Linearni model hidroelektrane je dobiven za sljedeću radnu točku:

$$h_{TC} = w_N = Y_0 = 1 \text{ [p. u.]} \quad (10)$$

Budući da analiziramo performanse regulatora brzine pretpostavka je da agregat hidroelektrane radi u otočnom pogonu što zahtjeva uzimanje u obzir i dinamike rotora sinkronog generatora kod kreiranja modela hidroelektrane. Dinamika rotora je opisana kako slijedi:

$$\frac{dw_N}{dt} = -\frac{1}{T_m w_N} (P - P_{el}) \text{ [p. u.]}, \quad (11)$$

gdje su: P – mehanička snaga, P_{el} – električno opterećenje, T_m – mehanička vremenska konstanta agregata izražena u sekundama. U kontekstu regulacije brzine vrtnje turbine električno opterećenje predstavlja poremećaj koji djeluje na upravljački sustav. Električno opterećenje je opisano kako slijedi:

$$P_{el} = P_L + D_p \Delta w \text{ [p. u.]} \quad (12)$$

gdje su: P_L – promjena opterećenja koju uzrokuju različiti potrošači, D_p – koeficijent prigušenja električne mreže.

Nakon linearizacije jednadžbi (11) i (12) te njihovim kombiniranjem s jednadžbama (3), (6) i (7) dobiva se prijenosna funkcija koja predstavlja brzinu vrtnje turbine kao funkciju upravljačkog signala, tj. položaja igle koji upravlja protokom vode kroz turbinu:

$$\frac{\Delta w}{\Delta y} = \frac{k_{23} - (k_{13}k_{21} - k_{11}k_{23})T_w s}{(D_p - k_{22}) + (T_m + (k_{12}k_{21} + (D_p - k_{22})T_w s) + k_{11}T_m T_w s^2)} \quad (13)$$

Dodatno, promjena položaja igle Δy se odvija koristeći hidraulički aktuator čija prijenosna funkcija je definirana kako slijedi:

$$\frac{\Delta y}{u} = \frac{1}{T_a s + 1} \quad (14)$$

gdje je T_a vremenska konstanta koja opisuje dinamiku elektrohidrauličkog aktuatora dok je u upravljački signal regulatora.

Klasični PID regulator korišten u simulacijske svrhe ima sljedeću prijenosnu funkciju:

$$u = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) (r - w) \quad (15)$$

gdje su: r – postavna vrijednost brzine vrtnje, w – mjerenje brzine vrtnje.

3. FORMULACIJA MPC ALGORITMA

MPC kao upravljačka tehnika ima veoma raširenu primjenu u današnje vrijeme. Zbog poboljšanih performansi mikrokontrolera kao i programibilnih logički kontrolera MPC kao upravljačka tehnika je pronašla svoje mjesto u različitim industrijskim aplikacijama. Općenito govoreći ideja koja stoji iza MPC algoritma je jednostavna. Algoritam izračunava optimalnu upravljačku sekvencu koristeći predviđanje odziva postrojenja rješavajući optimizacijski problem. Optimizacijski problem uključuje različite tipove ograničenja, kao što su ograničenja brzine promjene upravljačkog signala ili amplitude upravljačkog signala. Na ovaj način MPC algoritam ima sposobnost da prirodno djeluje na ograničenja reguliranog sustava što nije slučaj kod primjene klasičnih linearnih upravljačkih metoda. U nastavku ovog odjeljka prikazana je formulacija MPC algoritma koji se koristio za regulaciju brzine vrtnje.

Kvadratna funkcija cilja korištena u formulaciji definirana je kako slijedi:

$$J = \sum_{j=1}^N [W_*(k + j/k) - R_s(k + j)]^2 \mathbf{Q} + \sum_{j=1}^{N_c} [\Delta u(tjj - 1)]^2 \mathbf{R}, \quad (16)$$

gdje su: W_* - predikcijski odziv postrojenja, R_s – postavna vrijednost brzine, N – predikcijski horizont, N_c – upravljački horizont. Prvi član u funkciji cilja predstavlja odstupanje brzine vrtnje rotora od postavne vrijednosti, dok drugi član u funkciji cilja predstavlja upravljački napor. \mathbf{Q} i \mathbf{R} su matrice koje na cijelom horizontu penaliziraju odstupanja predikcijskog odziv brzine vrtnje od postavne vrijednosti kao i brzinu promjene upravljačkog signala. Diskretni predikcijski model laboratorijske hidroelektrane je dobiven diskretizirajući jednadžbu (13) korištenjem vremena uzrokovanja od 100 ms.

Jednadžba u nastavku opisuje diskretni model hidroelektrane:

$$a(z)\Delta W_*(k) = b(z)\Delta u(k), \quad (17)$$

gdje je: $a(z)$ – polinom koji predstavlja nazivnik prijenosne funkcije, $b(z)$ - polinom koji predstavlja brojnik prijenosne funkcije. Nadalje, ovo polinomi su definirani kako slijedi:

$$a(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}, \quad a(z)\Delta = A(z) \quad (18)$$

$$b(z) = b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \quad (19)$$

U cilju izbjegavanja korištenja rekurzije predikcija odziva brzine vrtnje se može izračunati koristeći sljedeći matrični zapis:

$$w_{k+1 \rightarrow} = \mathbf{H}\Delta u_{k \rightarrow} + \mathbf{P}\Delta u_{k-1 \leftarrow} + \mathbf{Q}w_{k \leftarrow} \quad (20)$$

U jednadžbi (20) vektor \underline{w}_{*k+1} predstavlja predikcijski odziv brzine vrtnje hidroelektrane dok vektor $\underline{\Delta U}_k$ predstavlja upravljačku sekvencu, tj. promjene položaja igle. Ovi vektori su definirani kako slijedi:

$$\underline{w}_{*k+1} = [W_*(k + 1) \ W_*(k + 2) \ \dots \ W_*(k + N)]^T, \quad (21)$$

$$\underline{\Delta U}_k = [\Delta U(k) \ \Delta U(k + 1) \ \dots \ \Delta U(k + N_c - 1)]^T \quad (22)$$

Nadalje, zainteresirani čitatelj može pronaći detaljnu formulaciju matrica \mathbf{H} , \mathbf{P} i \mathbf{Q} u literaturi [24].

Korištena formulacija MPC algoritma uključuje i ograničenja na upravljački signal, tj. ograničenja brzine promjene upravljačkog signala kao i amplitude upravljačkog signala. Ova ograničenja su formulirana na sljedeći način:

$$\Delta U^{min} \leq \Delta U \leq \Delta U^{max} \quad (23)$$

$$U^{min} \leq U \leq U^{max} \quad (24)$$

Ograničenje (23) definira dopuštenu brzinu promjene upravljačke veličine, dok ograničenje (24) predstavlja dopušteni raspon vrijednosti upravljačke veličine.

Budući da je MPC formulacija u ovom referatu definirana tako da se inkrement upravljačkog signala, tj. inkrement položaja igle u mlaznici, računa u svakom vremenskom trenutku upravljački signal regulatora na osnovu inkrementa upravljačke veličine računa se na sljedeći način:

$$U(k) = U(k - 1) + \Delta U(k) \quad (25)$$

4. REZULTATI I DISKUSIJA

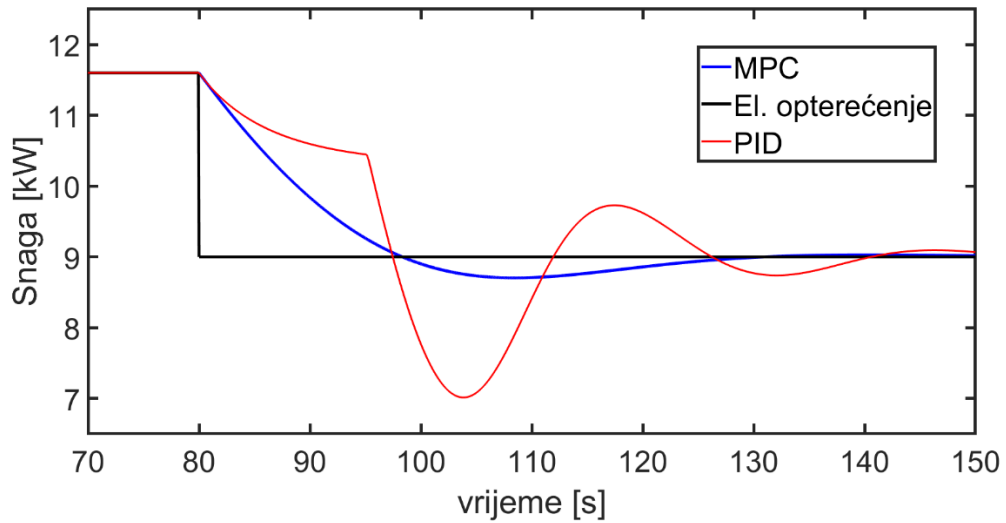
Učinkovitost predloženog MPC regulatora validirana je kroz simulacijski slučaj u kojem je tijekom otočnog pogona laboratorijske hidroelektrane promijenjeno električno opterećenje za 2.6 kW. Simulacije su izvedene koristeći Matlab/Simulink (R2021a). Parametri laboratorijske hidroelektrane korišteni u simulaciji predstavljeni su u Tablici 1. Odziv MPC-a je uspoređen s odzivom klasičnog PID regulatora. U cilju usporedbe upravljačkih performansi nadvišenje/propad frekvencije je promatrano kao kriterij za usporedbu. Tablica 2. prikazuje postavke regulatora korištenih u simulaciji. Nadalje, potrebno je istaknuti da su parametri PID regulatora određeni koristeći metodologiju postavljanja polova kako je definirano u [5].

Tablica 1. Parametri hidroelektrane u SGLab-u

Broj agregata	1
Tip turbine	Pelton
Nazivna snaga	11.6 kW
Nazivna brzina	1000 okr/min
Nazivni protok	0.022 m ³ /s
Neto pad	64 m
Duljina cjevovoda	2 m
Vremenska konstanta ubrzanja vodenog stupca	0.004 s
Koeficijent At	1.0819
Promjer cjevovoda	0.15 m

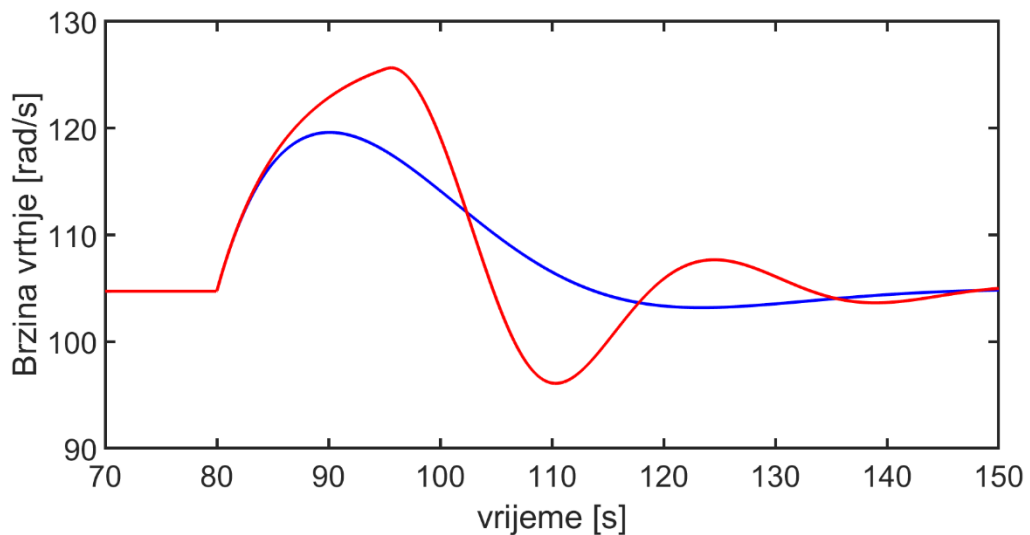
Tablica 2. Postavke regulatora

Regulator	Postavke	
MPC	$N=6$	$N_c=3$
	$u^{max} = 65 \%$	$u^{min} = 8 \%$
	$\Delta u^{max} = 0.1 \%$	$\Delta u^{min} = -0.1 \%$
	$Q = 650$	$R = 1$
PID	$K_d = 0.01$	
	$K_p = 0.01$	$K_i = 0.2$

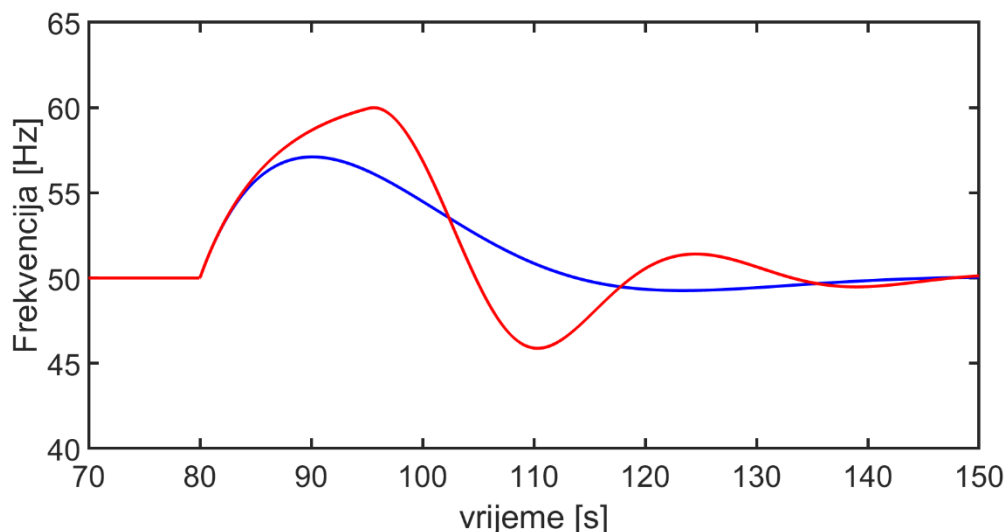


Slika 2. Odziv snage

Crna linija na Slici 2. predstavlja električno opterećenje. Plava linija predstavlja odziv snage hidroelektrane kada je MPC regulator aktivan, dok crvena linija predstavlja odziv snage kada je korišten PID regulator. Tijekom prvih 80 s hidroelektrana je radila u otočnom pogonu proizvodeći 11.6 kW pri radnoj točki ($h_{TC} = 6.4 \text{ bar}$, $w = 104.79 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $y = 65 \%$). U trenutku $t = 80 \text{ s}$ došlo je do skokovitog pada električnog opterećenja u iznosu od 2.6 kW što je dovelo do toga da regulator brzine vrtnje agregata prilagodi izlaznu snagu hidroelektrane na 9 kW s ciljem očuvanja brzine vrtnje agregata/frekvencije unutar nazivnih vrijednosti. Međutim, tijekom ove tranzicije proizvodnja hidroelektrane je bila viša nego potrošnja što je dovelo do povećanja brzine vrtnje agregata/frekvencije. Ovi odzivi su prikazani na Slici 3. i Slici 4.



Slika 3. Odziv brzine vrtnje agregata



Slika 4. Odziv frekvencije

Crvena linija na Slici 3. i Slici 4. predstavlja brzinu vrtnje agregata i frekvenciju kada je korišten PID regulator, dok plava linija predstavlja odzive kada je korišten MPC regulator. Tijekom prvih 80 s hidroelektrana je radila na nazivnoj snazi te je brzina vrtnje agregata i frekvencija u slučaju oba regulatora bila 104.78 rad/s ili 50 Hz budući da laboratorijska hidroelektrana ima sinkroni generator s tri para istaknutih polova. U trenutku $t = 80 \text{ s}$ došlo je do skokovite promjene/smanjenja električnog opterećenja. Ovaj poremećaj je uzrokovao povećanje brzine vrtnje agregata i frekvencije. Međutim, kako je vidljivo na Slici 3. brzina vrtnje agregata u slučaju primjene MPC-a se povećala na 119 rad/s dok je u slučaju primjene PID regulatora brzina vrtnje agregata dosegla 129 rad/s . Ovo implicira da je u slučaju primjene MPC-a dolazi do manjeg povećanja frekvencije u usporedbi s PID regulatorom. Kao što je vidljivo na Slici 4. u slučaju primjene MPC-a frekvencija je porasla na 57 Hz u usporedbi s povećanjem frekvencije na 60 Hz kod primjene PID-a. Ovi odzivi jasno pokazuju mogućnost primjene MPC-a za izvedbu regulatora brzine vrtnje.

ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovoga referata bio je pokazati mogućnost izvedbe regulatora brzine vrtnje u sklopu turbinskog regulatora hidroelektrane korištenjem MPC algoritma. Linearizirani model laboratorijske hidroelektrane korišten je kao osnova za izvedbu predikcijskog modela postrojenja, dok su simulacije izvedene korištenjem nelinearnog simulacijskog modela laboratorijske hidroelektrane. Rezultat usporedbe između klasičnog PID i MPC regulatora pokazuju da primjena prediktivnog upravljanja može poboljšati upravljačke performanse turbinskog regulatora. Simulacijski rezultati jasno pokazuju da MPC regulator demonstrira superiorne performanse u kontekstu regulacije odstupanja frekvencije. Daljnje istraživanje u ovom smislu bit će usmjereno na praktičnu implementaciju i primjenu predloženog MPC algoritma na laboratorijskoj hidroelektrani dostupnoj u Laboratoriju za napredne elektroenergetske mreže (SGLab) na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

ZAHVALA

Ovo istraživanje provedeno je u sklopu projekta **Fleksibilnost mikromreža s visokim udjelom pretvarača - FLEXIBASE** koji je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ-a) pod ugovorom PZS-2019-02-7747.

LITERATURA

- [1] N. Kishor, R.P. Saini, S.P. Singh: A review on hydropower plant models and control, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 11., no 5. 2007., pp. 776-796
- [2] ABB, Hydro power – Intelligent solutions for hydro governors, 2016
- [3] R. Kumari, K. Desingu, T.R. Chelliah, S.V.A. Sharma: Development Trends and Future Prospects of Hydro-Turbine Control Systems, *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2019., pp. 1-10
- [4] P. Husek: PID controller design for hydraulic turbine based on sensitivity margin specifications, *Electrical Power and Energy Systems*, vol 55., 2014., pp. 460-466
- [5] B. Strah, O. Kuljača, Z. Vukić: Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 20., no 3., 2005., pp. 424-434
- [6] C. Xu, D. Qian: Governor Design for a Hydropower Plant with an Upstream Surge Tank by GA-Based Fuzzy Reduced-Order Sliding Mode, *Energies*, vol 8., 2015., pp. 13442-13457
- [7] X. Yuan, Z. Chen, Y. Yuan, Y. Huang: Design of fuzzy sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system via input state feedback linearization method, *Energy*, vol 93. part 1, 2015., pp. 173-187
- [8] D. Qian, J. Yi, X. Liu: Design of Reduced Order Sliding Mode Governor for Hydro-turbines, *2011 American Control Conference (ACC2011)*, 2015., San Francisco, USA
- [9] Z. Chen, X. Yuan, Y. Yuan, X. Lei, B. Zhang: Parameter estimation of fuzzy sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system based on HICA algorithm, *Renewable Energy*, vol 133., 2019., pp. 551-565
- [10] C. Jiang, Y. Ma, Z. Wang: PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing system using deterministic-chaotic-mutation evolutionary programming (DCMEP), *Energy Conversion and Management*, vol 47., issues 9-10, 2005., pp. 1222-1230
- [11] H. Fang, L. Chen, Z. Shem: Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor, *Energy Conversion and Management*, vol 52., issue 4, 2011., pp. 1763-1770
- [12] C. Gonggui, D. Yangwei, G. Yanyan, H. Shanwai, L. Lilan: PID Parameters Optimization Research for Hydro Turbine Governor by an Improved Fuzzy Particle Swarm Optimization Algorithm, *The Open Electrical Electronic Engineering Journal*, vol 10., 2016., pp. 101-117
- [13] H.E. Mostafa, M.A. El-Sharkawy, A.A. Emary, K. Yassin: Design and allocation of power system stabilizers using the particle swarm optimization technique for an interconnected power system, *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol 34., issue 1, 2012., pp. 57-65
- [14] H.N. Villegas Pico, et al.: Analysis of Hydro-Coupled Power Plants and Design of Robust Control to Damp Oscillatory Modes, *IEEE Transactions on Power System*, vol 30., no 2., 2015., pp. 632-643
- [15] J. Liang, X. Yuan, Y. Yuan, Z. Chen, L. Yuangzheng: Nonlinear dynamic analysis and robust controller design for Francis hydraulic turbine regulating system with a straight-tube surge tank, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol 85., 2017., pp. 927-946
- [16] M. Beus, H. Pandžić: Application of an adaptive model predictive control algorithm on the Pelton Turbine governor control, *IET Renewable Power Generation*, vol 14. issue 10, 2020., pp. 1720-1727
- [17] M. Beus, H. Pandžić: Practical Implementation of a Hydro Power Unit Active Power Regulation Based on an MPC Algorithm, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 37., no. 1, 2022., pp 243-253
- [18] Z. Xiao, S. Meng, N. Lu, O. P. Malik: One-Step-Ahead Predictive Control for Hydroturbine Governor, *Mathematical Problems in Engineering*, vol 2015.
- [19] M. Kayalvizhi, D.M. Vinod Kumar: Load Frequency Control of an Isolated Micro Grid Using Fuzzy Adaptive Model Predictive Control, *IEEE Access*, vol 5. 2017., pp. 16241-16251
- [20] U. Tamrakar, T.M. Hansen, R. Tonkoski, D.A. Copp: Model Predictive Frequency Control of Low Inertia Microgrids, *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2019., pp. 2111-2116
- [21] F. Alex Navas, J.S. Gomez, J. Lianos, E. Rute, D. Saez, M. Sumner: Distributed Predictive Control Strategy for Frequency Restoration of Microgrids Considering Optimal Dispatch, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 4, 2021., pp. 2748-2759

- [22] dostupno na poveznici: <http://www.sglab.fer.hr>
- [23] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies: Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, 1992., pp. 167-179
- [24] J.A. Rossiter: *A First Course in Predictive Control*, Taylor and Francis Group, Second Edition, 2018.