

Analiza i rješavanje problema oscilacija izlazne snage generatora 2 na maloj hidroelektrani Ružnovac

Mladen Banjanin

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba

Velibor Crnovčić

Inter-Energo d.o.o.

Gornji Vakuf/Uskoplje, Bosna i Hercegovina

velibor.crnovic@interenergo.ba

Sažetak—U ovom radu su analizirani problemi oscilacija izlazne aktivne snage generatora 2 u maloj hidroelektrani Ružnovac. Prezentovani rezultati imaju stručni karakter, a značajni su za inženjere koji se u eksploataciji hidroelektrana sreću sa sličnim problemima. Izvršena su mjerenja odgovarajućih električnih veličina oba generatora kako bi se detektovao uzrok navedenog problema. Prikazani su rezultati većeg broja mjerenja u slučajevima kada oscilacije izlazne snage generatora postoje i kada one ne postoje. Problem oscilacije izlazne snage generatora je riješen adekvatnim podešavanjem regulatora pobude generatora 2.

Ključne riječi—generator, mala hidroelektrana; oscilacije snage; pobuda; regulator.

I. UVOD

Mala hidroelektrana (MHE) Ružnovac spada u grupu protočnih derivacionih elektrana. Elektrana je izgrađena na gornjem toku rijeke Vrbas, u opštini Gornji Vakuf-Uskoplje. Elektrana ima dva generatora prividne snage 475 kVA, nazivne struje 686 A, nazivnog napona 400 V, nazivnog broja obrtaja 1000 ob/min. Dužina cjevovoda elektrane iznosi 1859 m, prečnik cjevovoda je jednak 1 m, a bruto pad iznosi 51 m. Namotaji statora oba generatora su spregnuti u zvijezdu, a isti su spojeni paralelno na 0,4 kV naponskom nivou. Generatori su na kablovsku srednjenaponsku mrežu spojeni preko energetskog transformatora nazivne prividne snage 1000 kVA, nazivnog prenosnog odnosa 20/0,4 kV/kV. Generatore pokreću Francisove turbine, pojedinačne snage 658 kW.

U toku eksploatacije MHE Ružnovac je uočeno da njena izlazna snaga u pojedinim vremenskim periodima izraženo osciluje. Ova pojava se povremeno dešava i na drugim hidroelektranama, a najčešći uzroci su joj: elektromehaničke oscilacije sistema turbina-generator, hidraulične oscilacije unutar cjevovoda i turbine, niskofrekventne oscilacije koje dolaze iz elektroenergetske mreže, pobudni sistem generatora itd [1]-[6]. U radu [1], koji je publikovan 1940. godine, je navedeno da su problemi sa oscilacijama izlazne snage hidroelektrana uočeni još davne 1912. godine.

U [2],[3] su analizirane oscilacije snage protočne derivacione hidroelektrane Dubrava (Hrvatska) instalisane snage 79,78 MW. Pokazano je da se u nekim režimima rada elektrane učestanost prirodnih elektromehaničkih oscilacija sistema turbina-generator približi učestanosti obrtanja rotora, što uzrokuje elektromehaničku rezonanciju koja dovodi do

značajnog pojačanja malih oscilacija snage koje postoje kod svake turbine, a u ovom slučaju su uzrokovane kavitacijom na lopaticama turbine. Pošto se oscilacije snage ne dešavaju uvijek, nego periodično, zaključeno je da ih pokreće značajniji poremećaj momenta turbine. Razmatrani su i drugi mogući električni uzroci oscilacija snage elektrane, prije svega problemi sa sistemom automatske regulacije napona (AVR – Automatic Voltage Regulator). Detaljnim ispitivanjima je utvrđeno da uzrok navedenih oscilacija snage nije u sistemu pobude generatora, kao ni u drugim električnim faktorima, nego u prethodno navedenim mehaničkim faktorima. Prigušenje oscilacija snage elektrane je vršeno modifikacijama upravljačkog algoritma mikroprocesorskog digitalnog regulatora napona, i to dodavanjem PSS funkcije (PSS – Power System Stabilizer). Na taj način su oscilacije izlazne aktivne snage elektrane prigušene, ali problem nije eliminisan. Takođe je istaknuto da oscilacije snage ne postoje na hidroelektrani Čakovec instalisane snage 77,44 MW, koja je praktično identična hidroelektrani Dubrava.

U [4],[5] su analizirane oscilacije električne snage hidroelektrane u kojoj se nalaze Francisove turbine. Iskustva pokazuju da se oscilacije izlazne snage generatora najčešće javljaju upravo u hidroelektranama koje koriste Francisove turbine, što je slučaj i kod MHE Ružnovac, ali su problemi uočeni i u elektranama koje koriste Kaplanove turbine, Peltonove turbine, cijevne turbine itd [2]. U [5] je pokazano da su oscilacije izlazne snage generatora uočene pri različitim izlaznim snagama generatora, tj. i pri relativno manjim snagama ali i pri većim snagama koje su približno jednake nazivnoj snazi generatora. Pokazano je da su uzrok oscilacija izlazne snage generatora hidraulične oscilacije koje se javljaju u određenim radnim uslovima turbine, što dalje uzrokuje mehaničke oscilacije snage turbine i posljedično oscilacije izlazne snage generatora.

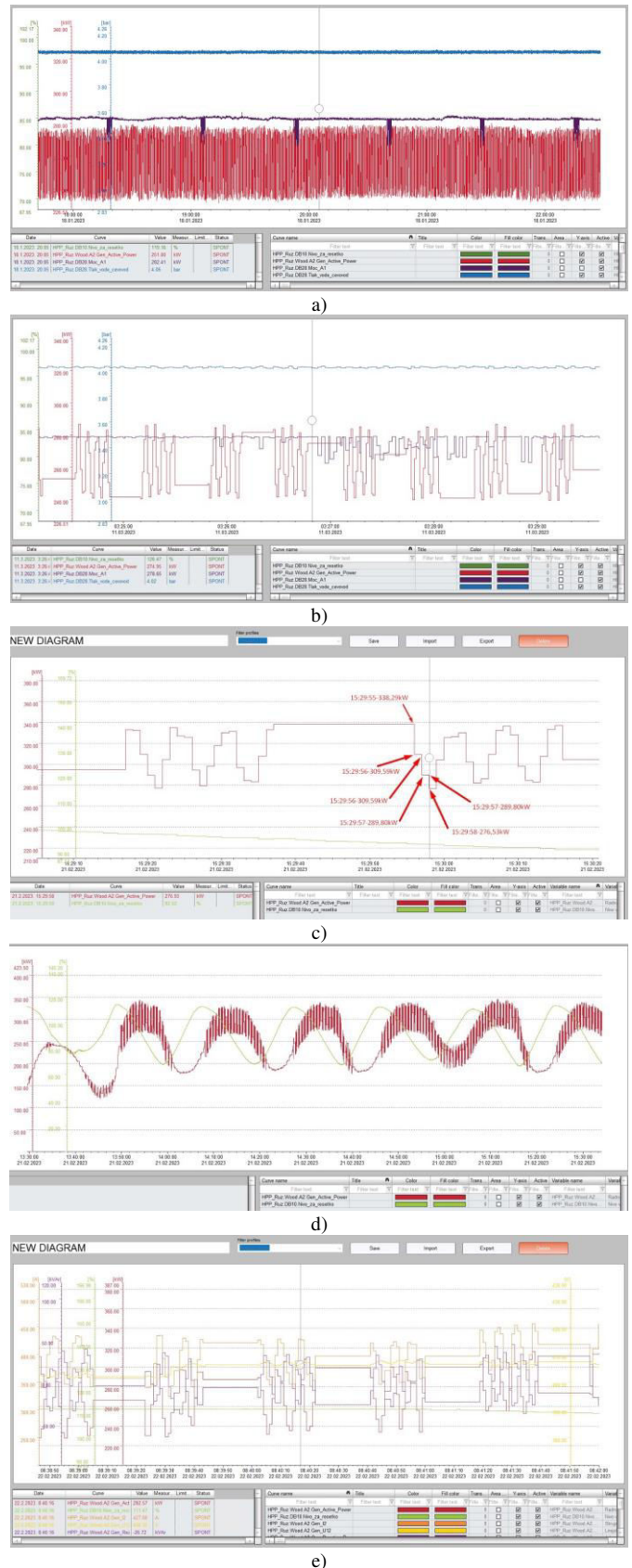
Na bazi analize raspoložive literature i na bazi iskustava sa drugih hidroelektrana zaključeno je da uzrok oscilacija izlazne snage MHE Ružnovac mogu biti: hidraulične oscilacije vode unutar cjevovoda i turbine, mehaničke oscilacije snage turbine, uticaj elektrodistributivne mreže na pojavu oscilacija snage, ili problemi u pobudnom sistemu sinhronog generatora. Prilikom rješavanja ovog problema nije bila poznata istorija održavanja generatora niti potencijalni uzrok uočenog problema, kao ni vrijeme kada se problem pojavio.

II. REZULTATI MJERENJA

Na MHE Ružnovac je na bazi SCADA sistema realizovan sistem daljinskog mjerenja električnih, hidrauličnih i drugih parametara od interesa. Pored ovih mjerenja, za potrebe dijagnostike uočenog problema dodatno su urađena precizna mjerenja primjenom adekvatne ispitne opreme.

Rezultati mjerenja sa SCADA sistema elektrane koji opisuju uočeni problem su prikazani na slici 1. Objašnjenje prikazanih rezultata je sljedeće:

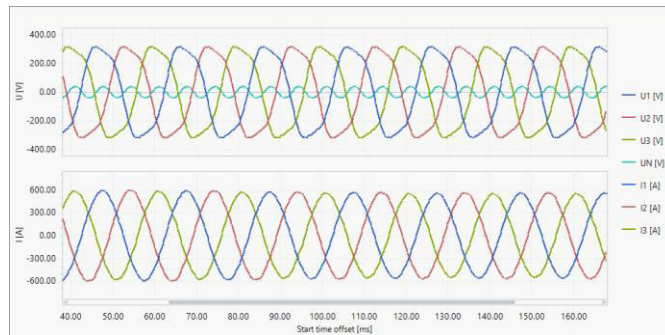
- Slika 1 a) – prikazane su oscilacije izlazne aktivne snage oba generatora pri konstantnom pritisku vode (plava linija). Uočava se da je oscilacija aktivne snage generatora 2 (crvena linija) mnogo veća i permanentna, a u ovom slučaju amplituda oscilacija iznosi oko 50 kW. Oscilacija aktivne izlazne snage generatora 1 (ljubičasta linija) je mnogo manja, ali se povremeno javljaju izražene kratkotrajne oscilacije snage amplitude do 20 kW. Ove izražene oscilacije snage se javljaju periodično, sa matematički jednakim vremenskim razmacima. Pokazano je da su ove oscilacije uzrokovane problemima sa mjernom i komunikacionom opremom te da u realnosti ne postoje, što će biti objašnjeno na kraju rada.
- Slika 1 b) – uvećano su prikazane veličine koje su prikazane i na slici 1 a). Jasno se uočavaju izražene oscilacije izlazne aktivne snage generatora 2. Bitno je primjetiti da u pojedinim slučajevima i izlazna aktivna snaga generatora 1 blago osciluje, ali osjetno manje nego u slučaju generatora 2.
- Slika 1 c) – uvećano je prikazana promjena aktivne snage generatora 2 (crvena linija) za približno konstantan pritisak vode (zeleno linija). Odabiranje vrijednosti snage je vršeno sa vremenskom rezolucijom od 1 s.
- Slika 1 d) – prikazane su oscilacije aktivne snage generatora 2 (crvena linija) pri promjenjivom pritisku vode (zeleno linija). Uočava se da promjena srednje vrijednosti aktivne izlazne snage generatora 2 prati promjenu pritiska vode, tj. promjenu mehaničke snage turbine, uz određeno vremensko kašnjenje, što je normalno. Oscilacije snage postoje i u ovom režimu rada.
- Slika 1 e) – Prikazane su promjene struje (žuta linija), reaktivne snage (ljubičasta linija), aktivne snage (crvena linija) i nivoa vode generatora 2 (zeleno linija). Bitno je uočiti da je pritisak vode približno konstantan, ali da mjerene električne veličine osciluju.



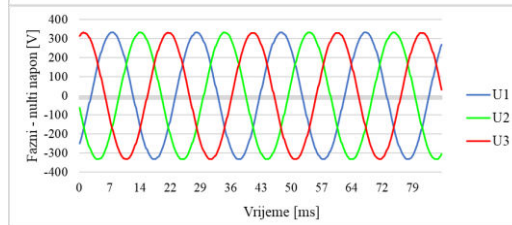
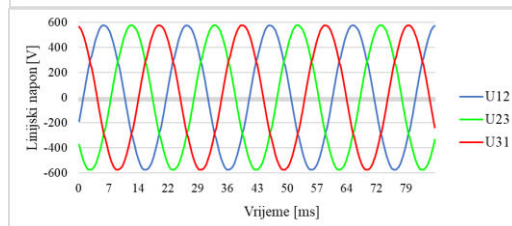
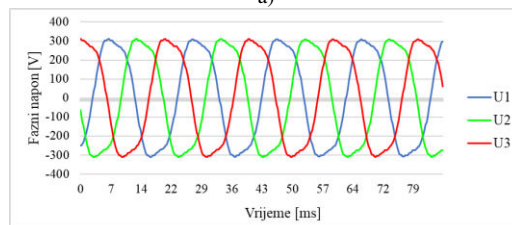
Slika 1 – Trendovi promjene mjerenih veličina koji su uočeni na SCADA sistemu elektrane

Dana 21.03.2023. godine vršena su dijagnostička mjerenja električnih parametara oba generatora. Na slici 2 su prikazani izmjereni talasni oblici napona i struje generatora 2. Talasni oblici za oba generatora su slični, te nisu uočena značajnija odstupanja, osim kada je u pitanju struja pobude. Objašnjenje prikazanih rezultata je sljedeće:

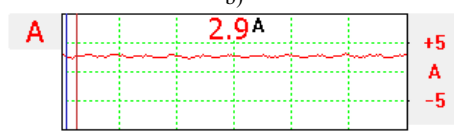
generatora sa vrijednosti od oko 200 kW na vrijednost između 300 kW i 350 kW.



➤ Slika 2 a) – prikazani su talasni oblici tri fazna napona i tri fazne struje, kao i nultog napona u zvjezdištu generatora. Blago izobličenje talasnog oblika faznog napona u okolini maksimalne vrijednosti uzrokuje postojanje nultog napona u zvjezdištu generatora, što je normalna pojava. Ovaj napon je posljedica činjenice da generator nije simetrično opterećen, da njegovo magnetno kolo nije simetrično i nije linearno, da fazni naponi mreže nisu simetrični itd. Uticaj na vrijednost ovog napona imaju i vrijednost opterećenja generatora, korak namotaja generatora, te dozemne kapacitivnosti namotaja generatora [7]. Nulti napon u zvjezdištu generatora osciluje na frekvenciji od 150 Hz (treći harmonik), dok su ostali harmonici, uključujući i osnovni, zanemarivi. Struja generatora je praktično prostoperiodična, bez značajnije nesimetrije između pojedinih faza.



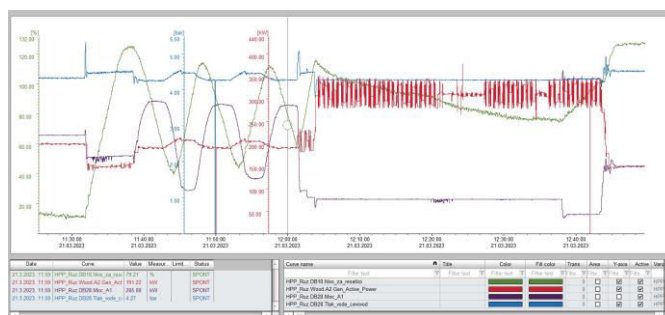
➤ Slika 2 b) – prikazani su talasni oblici tri izmjerena fazna napona (gore), te tri proračunata linijska napona (u sredini) i tri proračunata fazna napona iz kojih je uklonjen nulti napon (dole). Linijski naponi su proračunati kao razlika izmjerenih faznih napona. Linijski naponi i fazni naponi iz kojih je uklonjen nulti napon su praktično prostoperiodični. Time je pokazano da je izobličenje faznih napona na slici 3 a) direktno povezano sa postojanjem nultog napona u zvjezdištu generatora.



➤ Slika 2 c) – prikazan je talasni oblik pobudne struje generatora 2. Uočeno je da je talasni oblik struje generatora 1 približno konstantan, kako pri manjim tako i pri većim vrijednostima izlazne snage. U slučaju generatora 2 je uočeno da je pobudna struja približno konstantna za manje vrijednosti izlazne snage generatora, ali da pri višim vrijednostima izlazne snage generatora pobudna struja, u nekim slučajevima, počinje da osciluje. Takođe je uspostavljena korelacija između izraženih oscilacija pobudne struje i izraženih oscilacije izlazne snage generatora. Stoga je zaključeno da je najvjerovatniji uzrok problema sa oscilacijama izlazne snage generatora 2 pobuda ovog generatora. Uticaj pobudne struje na stabilnost rada sinhronih generatora je poznata i analizirana je u literaturi, npr. [6].

Slika 2 – Izmjereni talasni oblici napona i struja generatora 2

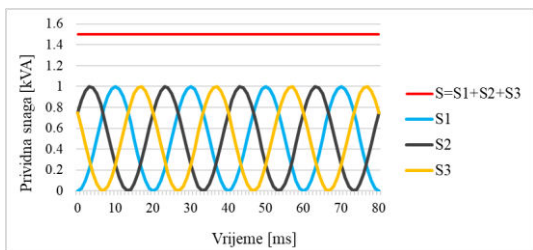
➤ Slika 3 – prikazan je slučaj pojave oscilacija izlazne aktivne snage generatora 2 (crvena linija) prilikom podizanja snage ovog generatora. Naime, na početku izvođenja mjerenja oscilacije izlazne snage generatora 2 nisu postojale, te je bilo neophodno da se one izazovu kako bi se mogao ispitati uzrok njihovog nastanka. Podsticanje pojave oscilacija izlazne snage generatora 2 je izvršeno podizanjem izlazne aktivne snage ovog



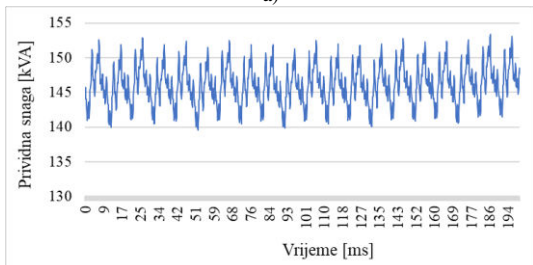
Slika 3 – Podsticanje pojave oscilacija izlazne aktivne snage generatora 2 podizanjem njegove izlazne aktivne snage

Na bazi izmjerenih vrijednosti napona i struje proračunate su vrijednosti trenutne snage generatora 1 i generatora 2 [$S(t)=u(t)\cdot i(t)$]. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 4, a tumačenje rezultata je sljedeće:

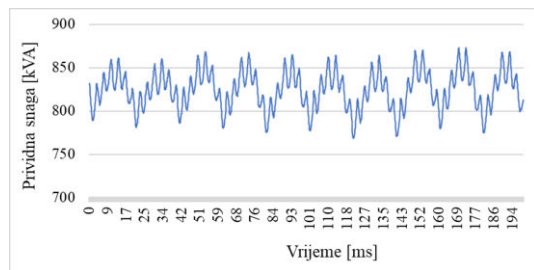
- Slika 4 a) – prikazana je promjena trenutne snage proizvoljnog idealnog generatora. Uočava se da je u idealnom slučaju zbir tri fazne trenutne snage generatora ($S=S_1+S_2+S_3$) vremenski konstantan.
- Slika 4 b) – prikazana je promjena trenutne izlazne snage generatora 1. Zbir tri fazne trenutne snage generatora 1 u nije konstantan, nego je promjenljiv, prvenstveno zbog nesimetrije faznih napona i struja, ali i zbog uticaja viših harmonika. Ovim je pokazano da i snaga generatora 1 osciluje, ali manje nego generatora 2.
- Slika 4 c) – prikazana je promjena trenutne izlazne snage generatora na MHE Miljacka [8], na kojoj ne postoje problemi uzrokovani oscilacijama izlazne snage generatora. Uočava se da i na toj elektrani postoje oscilacije izlazne vrijednosti trenutne snage koje su slične izmjerenim oscilacijama izlazne snage generatora 1. Može se zaključiti da su ove oscilacije normalna pojava, a posljedica su nesimetrije faznih napona i struja i uticaja viših harmonika.
- Slika 4 d) – prikazana je promjena trenutne izlazne snage generatora 2. U ovom slučaju, pored oscilacija snage koje su uočene i na slikama 4 b) i 4 c), dodatno postoji „ljudljanje“ snage generatora. Zbog toga izlazna snaga generatora 2 ne osciluje oko konstantne srednje vrijednosti kao što je to slučaj na slikama 4 b) i 4 c), nego se oscilacije dešavaju oko promjenjive srednje vrijednosti izlazne snage generatora 2.



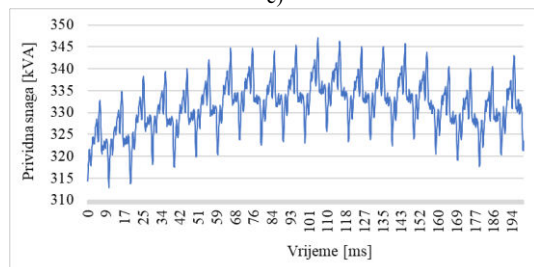
a)



b)



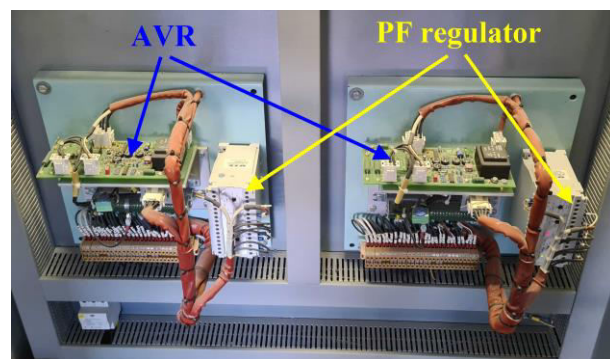
c)



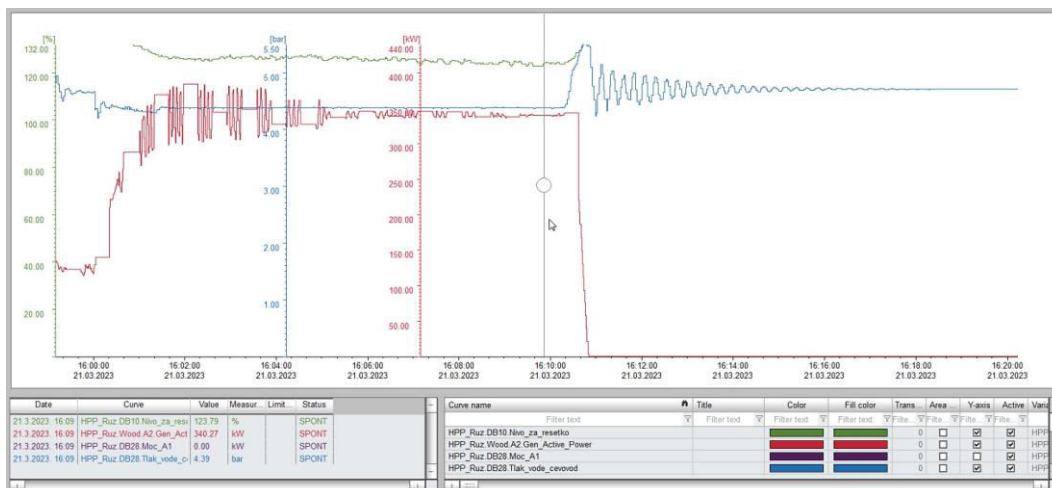
d)

Slika 4 – Vrijednosti trenutne izlazne snage različitih hidrogenatora

Pošto je kroz prethodno opisana mjerenja ustanovljeno da oscilacije izlazne snage generatora 2 najverovatnije potiču od pobudnog sistema generatora, odlučeno je da se izvrši njegovo testiranje. AVR (automatski regulator napona) i PF regulator (regulator faktora snage) generatora 1 i generatora 2 su prikazani na slici 5. Pošto su generatori identični i pobudni sistemi su im identični, te su regulatori bili identično podešeni. Sinhroni generatori su sa rotirajućom pobudom (samopobudni kompaundni sinhroni generatori).



Slika 5 – Automatski regulator napona (AVR) i regulator faktora snage (PF regulator) u sistemima pobude generatora 1 i generatora 2

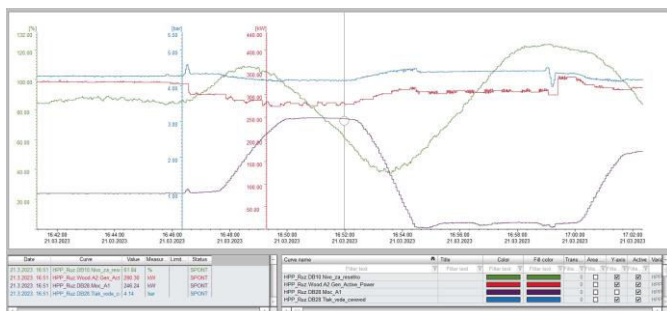


Slika 6 – Promjena izlazne aktivne snage generatora 2 prilikom podešavanja PI regulatora AVR-a

Detaljnim ispitivanjima sistema regulacije pobude generatora 1 i generatora 2, te međusobnim poređenjem njihovih radnih karakteristika, utvrđeno je da uzrok problema sa oscilacijama izlazne snage generatora 2 nije PF regulator, nego da je to AVR generatora 2. Prigušenje oscilacija izlazne snage generatora 2 je izvršeno adekvatnim smanjenjem proporcionalnog i integralnog dejstva PI regulatora AVR-a generatora 2. Promjena izlazne aktivne snage generatora 2 u toku podešavanja PI regulatora AVR-a je označena crvenom bojom na slici 6. Jasno se uočava smanjenje oscilacija izlazne aktivne snage generatora 2. Na kraju ispitivanja generator je isključen ručnom komandom. Ovim je problem sa oscilacijama snage generatora 2 riješen.

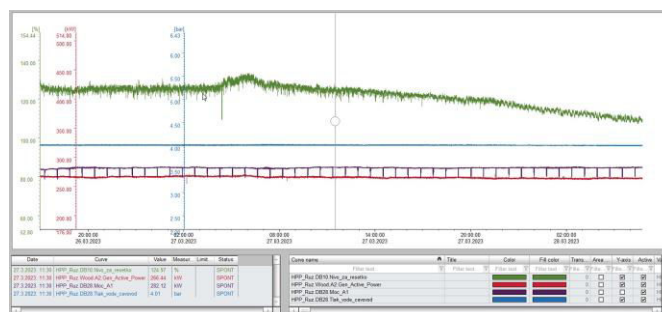
III. MJERENJA NAKON PODEŠAVANJA REGULATORA POBUDE

Na slici 7 su prikazani trendovi promjene izlazne aktivne snage generatora 1 (ljubičasta linija) i generatora 2 (crvena linija) pri promjenljivom pritisku vode (zeleno linija), a neposredno nakon podešavanja PI regulatora AVR-a generatora 2. Uočava se da je eliminisana oscilacija izlazne aktivne snage generatora 2 koja je ranije postojala. Testiranje je vršeno pri vrijednostima izlazne aktivne snage generatora 2 u opsegu od 270 kW do 340 kW, što je ranije bio kritičan radni režim generatora 2 pri kome se obavezno pojavljuju oscilacije njegove izlazne aktivne snage, slika 3.



Slika 7 – Izlazna aktivna snaga generatora 1 i generatora 2 nakon podešavanja PI regulatora AVR-a generatora 2

Na slici 8 su prikazane promjene aktivne izlazne snage generatora 1 (ljubičasta boja) i generatora 2 (crvena boja) pri relativno stabilnom pritisku vode (zeleno linija) i u normalnom pogonu hidroelektrane, a za dane 26, 27. i 28. mart 2023. godine. Uočava se da je izlazna aktivna snaga elektrane stabilna i da više ne postoje problematične oscilacije izlazne aktivne snage generatora 2, kakve su ilustrovane na slici 1 i slici 3.



Slika 8 – Izlazna aktivna snaga generatora 1 i generatora 2 dana 26, 27. i 28. marta 2023. godine nakon podešavanja PI regulatora generatora 2

Oscilacije izlazne snage generatora 1 koje su označene ljubičastom bojom na slici 8 i slici 9 a) imaju matematički tačnu periodičnost, te je pretpostavljeno da su uzrokovane problemima sa mjerno-komunikacionom opremom. Ugradnjom nove mjerne opreme ovaj problem je riješen, što se jasno vidi poređenjem rezultata sa slike 9 a) i slike 9 b). Sa slike 9 se dodatno može uočiti da ni u vremenskom periodu od 30.04.2023. godine do 08.05.2023. godine ne postoje oscilacije izlazne aktivne snage generatora 2 (crvena linija).

LITERATURA

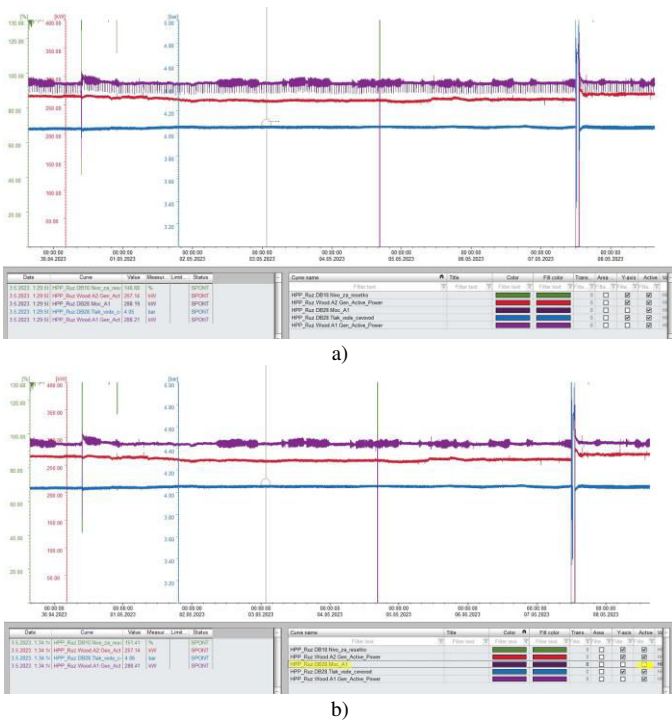
- [1] W. J. Rheingans, Power Swings in Hydroelectric Power Plants, Transactions on the ASME, Vol. 62, No. 3, April 1940.
- [2] M. Brezovec, I. Kuzle, M. Krpan, N. Holjevac, Analysis and treatment of power oscillations in hydropower plant Dubrava, IET Renewable Power Generation, Special Section: Medpower 2018 Selected Papers, Vol. 14, Iss. 1, pp. 80-89, 2020.
- [3] M. Brezovec, B. Brkljac, I. Kuzle, Influence of Operating Conditions on Hydrunit Power Oscillations, EuroCon 2013, 1-4 July 2013, Zagreb, Croatia.
- [4] T. B. Ng, Unsteady operation of the Francis turbine, PhD thesis, University of Tasmania, 2007.
- [5] V. David, A. Presas, E. Egusquiza, C. Valero, M. Egusquiza, M. Bossio, Power Swing Generated in Francis Turbines by Part Load and Overload Instabilities, Energies, Vol. 10, no. 12: 2124, 2017.
- [6] F. P. Demello, C. Concordia, Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, pp. 316-329, April 1969.
- [7] M. Fulczyk, Voltage 3rd harmonic in generator stator winding at changes in generator load conditions, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03., pp. 1476-1482, vol.3, USA, 2003.
- [8] M. Banjanin, M. Ikić, M. Timotija, S. Makljenović, L. Gluhović, Mjerenje i analiza parametara kvaliteta električne energije u tački priključenja MHE Miljacka na 10 kV elektrodistributivnu mrežu, 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 15-17. mart 2023.

ABSTRACT

In this paper, the problems of oscillation of the output active power of generator 2 in the small hydropower plant Ružnovac are analyzed. The presented results are of a professional nature and are significant for engineers who encounter similar problems in the exploitation of hydroelectric power plants. Measurements were made of the corresponding electrical quantities of both generators in order to discover the cause of the mentioned problem. The results of a large number of measurements are shown in cases where generator output power oscillations exist and when they do not exist. The problem of oscillation of the output power of the generator is solved by an adequate adjustment of the excitation regulator of the generator 2.

ANALYSIS AND SOLUTION OF THE OUTPUT POWER OSCILLATION OF GENERATOR 2 AT THE SMALL HYDROPOWER PLANT RUŽNOVAC

Mladen Banjanin, Velibor Crnovčić



Slika 9 – Eliminisanje virtuelnih oscilacija izlazne snage generatora 1 koje su posljedica problema sa mjereno-komunikacionom opremom: a) oscilacije snage postoje ukoliko se mjerenje vrši primjenom stare opreme, b) oscilacije snage ne postoje ukoliko se mjerenje vrši primjenom nove opreme

IV. ZAKLJUČAK

Blage oscilacije izlazne aktivne snage generatora u malim hidroelektranama su relativno česta pojava. Ipak, u nekim slučajevima te oscilacije postaju prevelike. Oscilacije izlazne snage generatora 2 na MHE Ružnovac su bile prevelike, te ih je bilo neophodno prigušiti kako bi se spriječila havarija generatora ili druge opreme na hidroelektrani. Mjerenjima je utvrđeno da oscilacije izlazne snage generatora 2 imaju uzrok u pobudnom sistemu generatora 2. Adekvatnim podešavanjem PI regulatora AVR-a generatora 2 je izvršeno prigušenje oscilacija izlazne snage generatora 2 na prihvatljivo mali nivo.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju kompaniji Inter-Energo d.o.o. iz Gornjeg Vakufa/Uskoplje, Bosna i Hercegovina, koja je finansijski podržala istraživanje čiji rezultati su prikazani u ovom radu.