

## Regulacija proizvodnje vetrogeneratora u sopstvenoj mreži

---

U radu je ispitana mogućnost održavanja bilansa snage sistema vetrogeneratora u radu na sopstvenu mrežu pomoću kontrole ugla elisa vetroturbine. Do narušenja bilansa snage u sistemu može doći promenom snage proizvodnje, na koju utiče promenljivost vetra, ili promenom snage koju konzumiraju priključeni potrošači. Sistem je modelovan u MATLAB Simulink okruženju, i na njemu su upoređene performanse tri kontrolera P, PI i PID. Koeficijenti svih kontrolera određeni su Zigler-Nikolovom metodom. Kontroleri su upoređeni na osnovu četiri kriterijuma: vremena uzdizanja, maksimalnog procenta premašivanja referentne vrednosti, vremena smirivanja i greške stabilizovanog signala, pri čemu je pobuda izazvana promenom brzine vetra. Upoređivanjem vrednosti pomenutih kriterijuma zaključeno je da se korišćenjem PID kontrolera ostvaruju najbolji rezultati upravljanja.

---

### Uvod

Poslednjih decenija obnovljivi izvori energije imaju sve veći udeo u ukupnoj proizvodnji električne energije. Pogodnosti ovakvih izvora energije koje ih čine atraktivnim i dovode do sve veće zastupljenosti su minimalno zagađenje i njihov nepresušni izvor. Do 2015. godine proizvodnja električne energije samo iz vetrogeneratora na globalnom nivou bila je preko 432 GW (Asensio *et al.* 2018).

Iako su vetrogeneratori često grupisani u veće proizvodne jedinice priključene na elektroenergetski sistem, takođe su pogodni i za

napajanje izolovanih mreža. Takve mreže napajaju same sebe, a izgrađene su bez namere da se nekada povežu na elektroenergetski sistem. U ovom radu biće opisan vetrogenerator koji napaja izolovanu mrežu, odnosno, vetrogenerator u radu na sopstvenu mrežu.

U svakom elektroenergetskom sistemu neophodno je održavati bilans energije, odnosno odnos proizvedene i potrošene energije. Održanje bilansa energije svodi se na održanje bilansa snage u svakom diskretnom trenutku, jer je energija definisana kao proizvod snage i vremena. Jedna od mana vetra je njegova promenljivost, gde usled promene vremenskih uslova dolazi do promene proizvedene energije. Zato je u sistemu vetrogeneratora u radu na sopstvenu mrežu potrebno obezbediti određenu vrstu regulacije. Bilans se najčešće održava dodavanjem sistema za skladištenje energije, dodatnog izvora energije, ili korišćenjem rezistivnog potrošača (Asensio *et al.* 2018). U ovom radu iskorišćen je alternativan način održanja bilansa snage, kontrolom ugla elisa.

Kontrolna veličina u sistemu je ugaona brzina rotora na generatoru, pošto je to veličina koja može da ukaže na debalans snaga u sistemu. Kako bi se bilans snaga u sistemu zadovoljio, u svakom trenutku potrebno je, u skladu sa frekvencijom sistema i parametrima generatora, održavati brzinu rotora na nominalnoj vrednosti koja za odabrani generator iznosi 153 rad/s. Promena brzine vetra utiče na promenu brzine turbine koja dovodi do promene brzine generatora.

---

Jelena Marinković (2000), Kragujevac, Dedinja 57, učenica 3. razreda Prve kragujevačke gimnazije

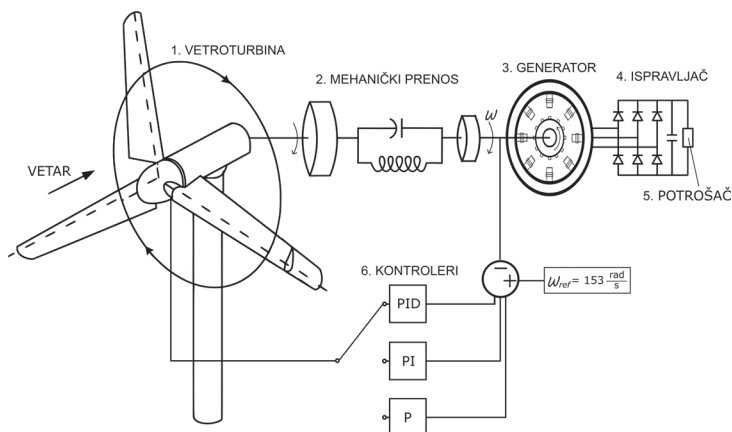
Milena Mičić (2000), Beograd, Tučepska 3, učenica 3. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

#### MENTORI:

Lazar Timotić, Schneider Electric DMS, Novi Sad

Đorđe Marjanović, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Nemanja Filipović, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu



Slika 1. Šematski prikaz elemenata simuliranog sistema

Figure 1. Schematic representation of the elements of the simulated system

1. Wind turbine
2. Two mass drive-train
3. Generator
4. AC/DC converter
5. Electrical Load
6. Controllers

Kontrolom ugla elisa turbine, utiče se na njenu brzinu, i samim tim na brzinu rotora.

U radu će biti ispitivana efikasnost P, PI i PID kontrolera kako bi se odredio najpogodniji za kontrolu ugla elisa u cilju održavanja bilansa snaga. Šematski prikaz simuliranog sistema dat je na slici 1.

## Aparatura i metod

Za izradu projekta korišćeni su programski jezik MATLAB i grafičko programsko okruženje Simulink, koje služi za modelovanje i simuliranje dinamičkih sistema. Korišćene su komponente energetske elektronike, kao i modeli turbine i generatora koji se nalaze u Simscape Power System toolbox-u (MathWorks 2006), a njihov kratak pregled je dat u nastavku.

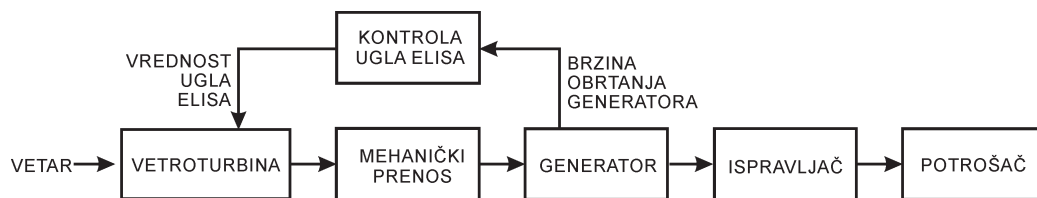
Sistem se sastoji iz vetroturbine sa horizontalnom osovinom, mehaničkog prenosa i generatora. Izlazni trofazni naizmenični napon iz generatora dovodi se na mostni ispravljač, gde se vrši konverzija u jednosmerni napon kojim se napaja potrošač. Kako vetrogenerator nije po-

vezan na elektroenergetski sistem, a cilj rada je poređenje performansi kontrolera ugla elisa, uzeto je da sistem napaja jednosmerni potrošač. Time se izbegava modelovanje invertora kojim bi se jednosmerni napon konvertovao nazad u naizmenični, što pojednostavljuje model sistema.

Ispitivanje kontrolera ugla elisa vršeno je na Simulink modelu sistema čiji je blok dijagram prikazan na slici 2.

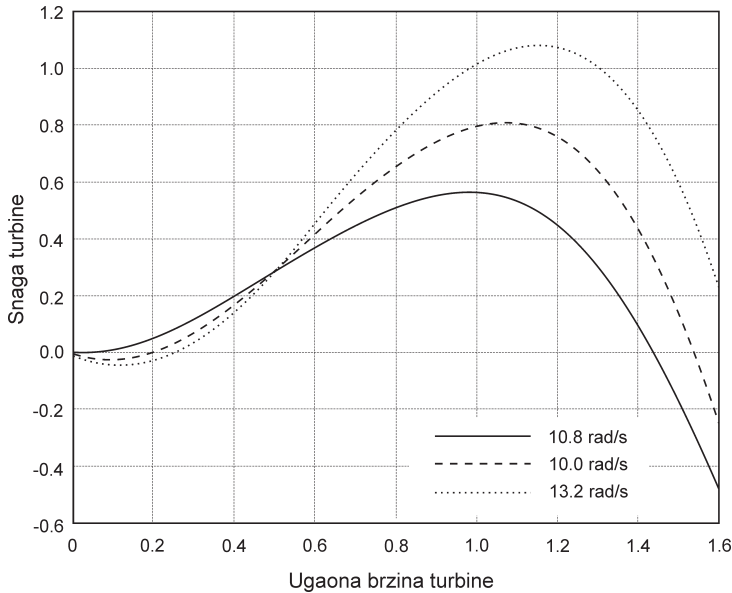
Cilj je održati bilans snaga proizvodnje i potrošnje u sistemu pri bilo kojoj promeni brzine vetra (što dovodi do promene snage proizvodnje), ili pri promeni snage potrošnje. Kako je odstupanje brzine rotora generatora od referentne pokazatelj debalansa u sistemu, kontroler na osnovu tog odstupanja određuje novi ugao elisa vetroturbine čime utiče na snagu proizvodnje.

Ispitivana su tri različita kontrolera, pri budi u vidu promene brzine vetra i promene snage potrošnje: proporcionalni (P), proporcionalno-integralni (PI) i proporcionalno-integralno-diferencijalni kontroler (PID). Pored PID



Slika 2. Blok šema sistema

Figure 2. System block schematics



Slika 3. Snaga turbine u zavisnosti od njenih parametara (MathWorks 2006)

Figure 3. Turbine Power Characteristics (MathWorks 2006)

kontrolera (Behera *et al.* 2016) često se za kontrolu ugla elisa koristi fuzzy logic kontrola (Sun *et al.* 2015). Ona ima brži odziv od PID kontrolera, ali može biti neprecizna (Zaeri *et al.* 2012). Iz tog razloga, kao i radi jednostavnosti, nije implementirana u radu.

## Vetroturbina

Vetroturbina je deo sistema zaslužan za prevaranje energije vetra u kinetičku energiju rotacije. U industriji se vetroturbine dele u dve kategorije, u zavisnosti od položaja ose rotacije: vetroturbine sa horizontalnom osom i vetroturbine sa vertikalnom osom. U radu je korišćena vetroturbina sa horizontalnom osovinom, zato što se ovakve turbine mogu pokrenuti isključivo uticajem vetra, kao i zbog generalno veće efikasnosti na manjim visinama gde je brzina vetra manja (Hao 2014). Snaga vetroturbine zavisi od njenih dimenzija, gustine vazduha, brzine vetra, ugaone brzine turbine i ugla elisa (jednačina 1). Ugaon elisa predstavlja ugaoni pomeraj pri rotiranju elise oko svoje ose simetrije u odnosu na njen početni položaj.

Snaga vetroturbine data je sledećom jednačinom (Slootweg *et al.* 2003):

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 C_p(\lambda, \beta)$$

gde je  $\rho$  gustina vazduha,  $A$  površina koju prebrišu elise,  $C_p$  koeficijent snage,  $\beta$  ugaon elisa,  $\lambda$  količnik linearne brzine vrha elisa i brzine vetra, koji se dobija jednačinom:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

gde je  $\omega$  ugaona brzina turbine,  $R$  dužina elise. Koeficijent snage određen je jednačinom 1 i zavisi od ugla elisa  $\beta$ , što ukazuje na mogućnost da se snaga turbine kontroliše menjanjem ugla elisa:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068 \lambda \quad (1)$$

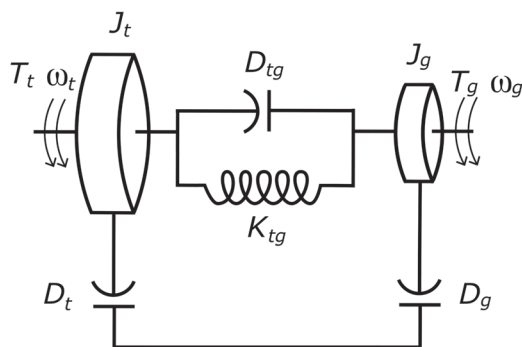
gde je  $\lambda_i$  dato jednačinom:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} + \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Grafik mehaničke snage  $P_m$  kao funkcije brzine generatora, za različite brzine vetra, pri uglu elisa od  $0^\circ$  dat je na slici 3. Na grafiku je prikazana zavisnost izlazne snage od ugaone brzine generatora. Može se uočiti da se najveća snaga dobija pri nominalnim brzinama generatora, kao i pri većim brzinama vetra.

## Mehanički prenos

Usled promenljivog i nestalnog vetra dolazi do nestalne i brzo pomenljive frekvencije rotiranja osovine vetroturbine. Ukoliko bi takva osovina bila direktno vezana za generator, osim toga što bi generator imao manju efikasnost, povećao bi se rizik od raznih kvarova usled mehaničkog naprezanja. Mehanički prenos sa zupčanicima, zanemarljive inercije, u ovom slučaju takođe ne bi bio optimalan, jer bi samo povećao moment sile koji bi i dalje ostao nestabilan. Iz tog razloga modelovan je dvomaseni oscilatorni mehanički prenos (slika 4) između turbine i generatora, po uzoru na fleksibilne spojnice. Njegova uloga je da priguši oscilacije momenta sile i smanji vibracije sistema (Bajpai *et al.* 2015).



Slika 4. Šema modela dvomasenog oscilatornog mehaničkog prenosa

Figure 4. Schematic of a two mass drive-train model

Opisan je sledećim jednačinama (Bajpai *et al.* 2015):

$$T_t - T_k = (J_t s + D_t) \omega_t$$

$$T_k - T_g = (J_g s + D_g) \omega_g$$

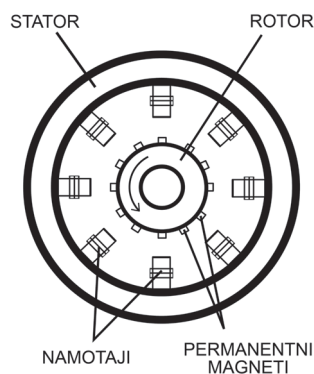
$$T_k = \left( \frac{K_{tg}}{s} + D_{tg} \right) (\omega_t - \omega_g)$$

gde su  $T_t$ ,  $T_k$ ,  $T_g$  momenti sile turbine, spojnice i generatora respektivno,  $D_t$ ,  $D_g$  koeficijenti prigušenja na osi turbine i generatora,  $\omega_t$ ,  $\omega_g$  ugaone brzine osovine turbine i generatora,  $J_t$ ,  $J_g$  momenti inercije turbine i generatora, a  $K_{tg}$ ,  $D_{tg}$  koeficijenti čvrstine i trenja spojnice.

## Generator

Različiti sinhroni i asinhroni generatori se mogu koristiti u sistemima vetrogeneratora. Najčešće korišćeni i najefikasniji su PMSG (permanent magnet synchronous generator) i DFIG (doubly-fed induction generator). Kako sistemi koji napajaju sopstvenu mrežu najčešće zahtevaju manje snage, pokazalo se da je PMSG u ovakvim sistemima pogodniji (Asensio *et al.* 2018).

Sinhroni generator se, kao i asinhroni, sastoji od statora i rotora. Strujno kolo statora sastoji se iz tri faze. Svaka faza je dobijena rednim vezivanjem većeg broja navoja koji su raspoređeni u žlebovima statora. Ulazni priključci svake faze vezani su za trofazni izlaz, dok su izlazni vezani međusobno. Rotor se sastoji iz permanentnih magneta (slika 5).

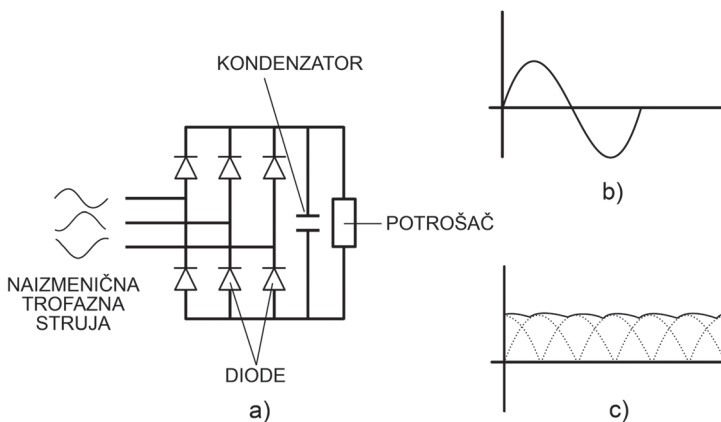


Slika 5. Šema sinhronog generatora sa stalnim magnetima

Figure 5. Schematic of a Permanent Magnet Synchronous Generator

Mehaničkom rotacijom rotora se na trofazno namotanom statoru indukuju elektromotorne sile istih jačina, ali međusobno vremenski pomerene za po trećinu periode. Kroz svaki namotaj statora teći će struje efektivnih vrednosti  $I_1, I_2, I_3$ , takođe međusobno vremenski pomerene za trećinu periode. Na taj način se javlja obrtno (Teslino) magnetno polje koje se obrće istom brzinom kao i rotor, zbog čega se ovakvi generatori zovu sinhroni.

Njihova prednost u odnosu na druge sinhronne generatore, koji imaju namotaj na rotoru umesto permanentnih magneta, je u tome što im nije



Slika 6.  
 a) Dijagram ispravljačkog električnog kola  
 b) Jedna od tri faze naizmjenične struje  
 c) Izlazni napon

Figure 6.  
 a) Circuit diagram for AC/DC converter  
 b) One out of three alternating current phases  
 c) Output voltage

potrebna pobudna struja. Pobudna struja predstavlja struju koju treba propustiti kroz namotaj na rotoru kako bi se indukovalo magnetno polje rotora. PMSG-u ta struja nije potrebna, već magnetno polje stvara stalni magnet. S druge strane, permanentni magneti se mogu lako razmagnetisati pod stalnim uticajem snažnih magnetnih sila u generatoru. Kako se prave od retkih metala, veoma su skupi i stoga na duge staze nepraktični za održavanje.

## Ispravljač

Za konverziju trofaznog naizmjeničnog napona izlaza generatora u jednosmerni napon upotrebljen je trofazni diodni mostni ispravljač. Sastoji se iz šest dioda i kondenzatora na izlazu (slika 6). Kondenzator se koristi kao filter izlaznog signala kako bi smanjila talasnost jednosmernog napona. Dok napon na ulazu ispravljača raste, kondenzator se puni, da bi se praznio kada napon na ulazu u ispravljač počne da opada.

Srednja vrednost izlaznog jednosmernog napona data je sledećom jednačinom (Thatoi 2015):

$$V_{DC} = \frac{3V_L}{\pi}$$

gde je  $V_L$  maksimalna vrednost linijskog napona na ulazu.

## Potrošač

Električni potrošač je komponenta električnog kola koja konzumira nastalu snagu u sistemu. Potrošači se mogu modelovati na različite načine u zavisnosti od toga kakav potrošač iz

realnog sveta se modeluje. Najčešće korišćeni modeli potrošača su: potrošač konstantne snage, potrošač konstantne impedanse, potrošač konstantne struje i polinomijalni ZIP potrošač koji je kombinacija svojstava prethodna tri. Matematički modeli potrošača konstantne snage (2), konstantne impedanse (3) i potrošač konstantne struje (4) date su redom sledećim jednačinama (Lindén *et al.* 1992):

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^0 = 1 \quad (2)$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 \quad (3)$$

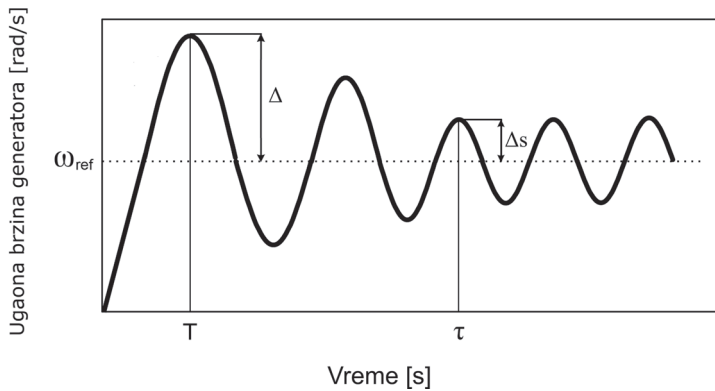
$$\frac{P}{P_0} = \frac{U}{U_0} \quad (4)$$

gde su  $P_0$  i  $U_0$  nominalna snaga i napon potrošača, respektivno.

Korišćen je model potrošača konstantne impedanse, kako bi se predstavio jednostavan model potrošača u domaćinstvu. Predstavljen je kao paralelno vezan otpornik, otpornosti  $60 \Omega$ , takve da se održava balans potrošnje i proizvodnje snage kada je ugao elisa  $13.5^\circ$ , što predstavlja srednju vrednost ugla elisa.

## Kontroler ugla elisa

Uzroci debalansa snage proizvodnje i potrošnje mogu biti promena brzine vetra i promena konzumirane snage od strane potrošača. Kako bi se bilans snage održao korišćen je kon-



Slika 7. Primer signala sa naznačenim kriterijuma poređenja kontrolera, gde je:  $\omega_{ref}$  – referentna brzina [rad/s]  $T$  – vreme uzdizanja [s]  $\Delta$  – procenat premašivanja [%]  $\tau$  – vreme smirivanja [s]  $\Delta s$  – greška stabilizovanog signala [rad/s]

Figure 7. Example of a signal with criteria used for controller comparison, where:

- $\omega_{ref}$  – reference speed [rad/s]
- $T$  – rise time [s]
- $\Delta$  – maximum error [%]
- $\tau$  – time to get to the steady state [s]
- $\Delta s$  – the error of the steady state signal [rad/s]

troler ugla elisa kojim se promenom ugla elisa brzina generatora održava na referentnoj.

Poređena su tri kontrolera: P, PI i PID. PID je proporcionalno-integralno-diferencijalni kontroler. PID iterativno na proračunatu grešku primenjuje korekciju na osnovu proporcionalnih, integralnih i diferencijalnih uslova. Matematička formula PID kontrolera data je sledećom jednačinom:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t') dt' + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

gde su  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  proporcionalni, integralni i diferencijalni koeficijenti, redom;  $e(t)$  je greška, odnosno razlika trenutne i referentne vrednosti kontrolne veličine.

Kontrolna veličina u sistemu je ugaona brzina rotora generatora. Referentna brzina generatora je nepromenljiva i zadata kao nominalna brzina generatora, koja u skladu sa modelovanim generatorom iznosi 153 rad/s.

Poređeni su kontroler sa proporcionalnom komponentom (P), kontroler sa proporcionalnom i integralnom komponentom (PI) i kontroler sa sve tri komponente (PID). Pri čemu se formule za P i PI kontroler dobijaju iz jednačine 5 kada su vrednosti koeficijenata  $K_i$  i  $K_d$ , odnosno koeficijenta  $K_d$  jednake nuli.

Koeficijenti  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  određeni su Ziegler-Nicholsovom metodom, i upoređeni na osnovu sledeća četiri kriterijuma: vreme uzdizanja, procenat premašivanja, vreme smirivanja i greška

stabilizovanog signala. Vreme uzdizanja je vreme za koje brzina generatora dostigne najveće odstupanje od referentne. Procenat premašivanja referentne brzine generatora je maksimalni odnos najvećeg odstupanja i referentne brzine. Vreme smirivanja je vreme za koje greška ugaone brzine postane manja od 1% referentne vrednosti. Greška stabilizovanog signala je razlika odstupanja i referentne brzine, kada je brzina stabilizovana. Kriterijumi su prikazani na primeru odziva na slici 7.

## Rezultati

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju implementirana su tri kontrolera P, PI, PID i poređena po navedenim kriterijumima. U tabeli 1 nalaze se vrednosti ispitivanih kriterijuma za svaki od tri korišćena kontrolera pri promeni brzine vetra.

Tabela 1. Vrednosti ispitivanih kriterijuma za svaki kontroler pri promeni brzine vetra

Kriterijum	Kontroler		
	P	PI	PID
Vreme uzdizanja (s)	3.11	3.3	3.15
Maksimalni premašaj (%)	2.4	2.31	2.38
Vreme smirivanja (s)	4.54	4.67	4.5
Greška stabilizacije (rad/s)	0.3	0.25	0.22

U tabeli 2 se nalaze vrednosti ispitivanih kriterijuma za svaki kontroler pri promeni snage potrošnje.

Tabela 2. Vrednosti ispitivanih kriterijuma za svaki kontroler pri promeni snage potrošnje

Kriterijum	Kontroler		
	P	PI	PID
Vreme uzdizanja (s)	2.7	3.1	2.85
Maksimalni premašaj (%)	3.7	3.36	3.4
Vreme smirivanja (s)	3.9	4.4	4
Greška stabilizacije (rad/s)	0.3	0.23	0.21

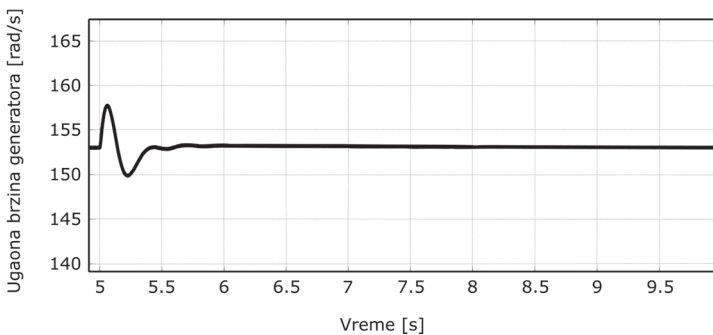
Iz prikazanih podataka može se zaključiti da PID kontroler ima najmanji premašaj i najmanju grešku stabilizacije. P kontroler ima najkraće vreme uzdizanja, kao i najkraće vreme smirivanja, koje je nešto manje od vremena smirivanja PID kontrolera. Takođe se može zaključiti da PI kontroler ima najlošije performanse.

Kako je uloga kontrolera u ovom radu da smanji promenljivost snage proizvodnje, može

se reći da su najbitniji kriterijumi greška stabilizacije i premašaj. Zbog toga je PID kontroler odabran kao najbolji i grafički su prikazani odzivi PID kontrolera u tri situacije: pri promeni brzine vetra (slika 8), promeni snage potrošnje (slika 9) i pri realnoj promeni brzine vetra (slika 10).

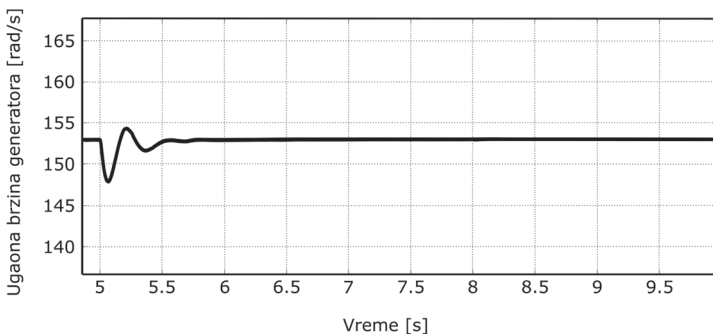
Sva merenja izvršena su na simulaciji u trajanju od 10 sekundi, sa referentnom brzinom generatora od 153 rad/s. U korišćenom modelu vetroturbine inicijalna vrednost brzine vetra, pre pokretanja simulacije, jednaka je nuli. Iz tog razloga, pri pokretanju simulacije, kako se brzina vetra promeni na zadatu početnu brzinu vetra, dolazi do turbulencija u nultoj sekundi. Radi preglednosti i lakšeg uočavanja odziva kontrolera pri promeni brzine vetra ili promeni snage potrošnje, grafici su prikazani sa početkom između treće i pete sekunde.

U prvom slučaju prikazan je odziv kontrolera pri promeni brzine vetra. Ona je, kao i pri ispitivanju karakteristika u tabeli 1, modelovana kao odskočni signal sa 12 m/s na 15 m/s u petoj sekundi. Na slici 8 grafički je prikazan odziv PID kontrolera pri opisanim uslovima, u skladu sa kolonom PID u tabeli 1.



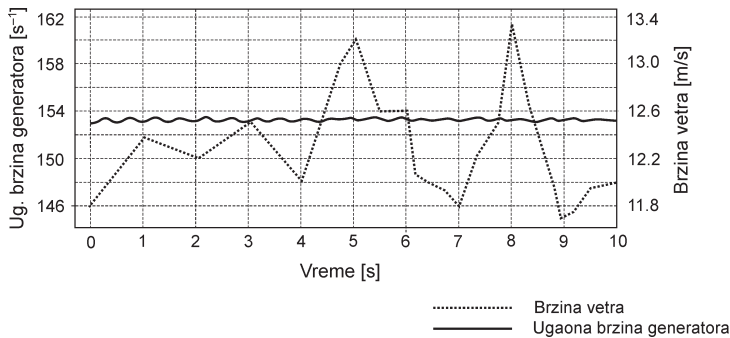
Slika 8. Zavisnost ugaone brzine generatora od vremena, kada se brzina vetra naglo promeni u petoj sekundi

Figure 8. Wind generator speed through time in the case where wind speed abruptly changes in fifth the second



Slika 9. Zavisnosti ugaone brzine generatora od vremena kada se otpornost potrošača naglo promeni u petoj sekundi

Figure 9. Wind generator speed through time in the case where load resistance abruptly changes in fifth the second



Slika 10. Zavisnost ugaone brzine generatora od vremena kada se brzina vetra menja na način koji aproksimira realne okolnosti

Figure 10. Wind generator speed through time in the case where wind speed changes accordingly to a function that approximates real circumstances (dotted line – wind speed, full line – angular speed of the generator).

U drugom slučaju, prikazan je odziv kontrolera pri promeni snage potrošnje. Na slici 9 prikazan je odziv PID kontrolera kada se u petoj sekundi promeni otpor potrošača sa  $70\Omega$  na  $50\Omega$ , čime se menja i snaga potrošnje obzirom da je u pitanju potrošač konstantne impedanse.

Kako bi se dobila predstava o tome kako bi ovakav sistem radio u realnim uslovima, modelovana je promena brzine vetra tokom vremena. Odziv PID kontrolera pri realnoj promeni brzine vetra, kao i promena brzine vetra prikazani su na slici 10.

cijenata, uzimajući u obzir da bi odstupanja bila veća sa većom promenom brzine vetra, kao i drugačijim modelom mehaničkog prenosa.

Turbulencije ugaone brzine generatora oko njegove nominalne brzine, kada je vrednost brzine vetra nominalna u početnom trenutku mogu se rešiti drugačijim modelom vetroturbine u kojoj bi inicijalna vrednost brzine vetra bila ista kao brzina u trenutku nula.

## Diskusija

Poređenjem rezultata prikazanih u tabelama 1 i 2, koji su dobijeni nakon podešavanja koeficijenata kontrolera Ziegler-Nicholsovom metodom, može se zaključiti da su performanse kontrolera slične. U slučaju odabira neadekvatnih vrednosti koeficijenata kontrolera razlike između performansi pojedinih kontrolera bile bi veće. S druge strane, da bi se dobile veće razlike, neophodno je modelovati veću promenu brzine vetra, što ne predstavlja realan scenario. Takođe, vrednosti maksimalnog premašaja nisu velike, ali su u skladu sa promenom brzine vetra modelovanom u simulaciji koja je ispitivana (3 m/s). Kako su greška stabilizacije i vreme smirivanja PID kontrolera najmanji, on je odabran za dalje ispitivanje. Vrednosti pomenutih kriterijuma za PID kontroler su vreme uzdizanja – 3.15 s, maksimalni premašaj – 2.38%, vreme stabilizacije – 4.5 s i greška stabilizovanog signala – 0.22 rad/s.

Pri promeni brzine vetra, prikazanoj na slici 7, nijedno odstupanje od referentne brzine nije veće od 5% referentne brzine. Razlog za to je odabir adekvatnog kontrolera i njegovih koefi-

## Zaključak

Cilj rada je bio da se reguliše snaga električne struje proizvedene u sistemu vetrogeneratora, tako da bilans snage u sistemu sa izolovanim potrošačem bude zadovoljen. Ugaona brzina je uspešno održavana na referentnoj, čime je bilans snage održan i potrošač se regularno napajao.

Upoređivanjem tri kontrolera, P, PI, PID primećeno je da imaju približne performanse, ali da se poslednji u ovakvom sistemu najbolje ponaša. Ispitana je njegova reakcija na realnoj promeni brzine vetra tokom 10 s i njegov odziv je u tom slučaju zadovoljavajući.

U opisanom sistemu fokus je na održanju konstantne ugaone brzine generatora, time bilansa u sistemu, ne obraćajući pažnju na to da ekstraktovana snaga vetra bude najveća moguća u datom trenutku. U daljem istraživanju mogao bi se ispitati modifikovani sistem u kome bi bio implementiran neki od algoritama za ekstrakciju maksimalne snage MPPT (Maximum Power Point Tracking), što bi unelo dodatnu složenost u vidu komponenti energetske elektronike kao i baterije za čuvanje energije koju potrošač ne iskoristi. Pored toga, radilo bi se na implementaciji fuzzy logic kontrolera kao kontrolera ugaone brzine. Iako može imati manju preciznost u nekim slučajevima, brzina kojom se njim dobija pot-



rebna ugaona brzina je veća. Takođe, s obzirom na to da je opseg ugla elisa fizički ograničen za različite vetroturbine, ispitivalo bi se koji opseg je za specifičan sistem dovoljan tako da je moguće vršiti regulaciju u svim očekivanim slučajevima.

---

## Literatura

Sun H., Luo X., Wang J. 2015. Feasibility study of a hybrid wind turbine system – Integration with compressed air energy storage. *Applied Energy*, **137**: 617.

Behera S., Subudhi B., Pati B. B. 2016. Design of PI controller in pitch control of wind turbine: A Comparison of PSO and PS algorithm. *International Journal of Renewable Energy Research*, **6** (1): 271.

Zaeri R., Ghanbarzadeh A., Attaran B., Zaeri Z. 2012. Fuzzy Logic Controller based pitch control of aircraft tuned with Bees Algorithm. *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, Shiraz, Iran*. IEEE, str. 705-10.

Slootweg J. G., de Haan S. W. H., Polinder H., Kling W. L. 2003. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE Transactions on Power Systems*, **18** (1): 144.

Hao S. 2014. Research on a new hybrid wind turbine system. PhD thesis. University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK

Asensio A. P., Gómez S. A., Rodriguez-Amenedo J. L., Plaza M. G., Eloy-García Carrasco J., Alonso-Martínez de las Morenas J. M. 2018. A voltage and frequency control strategy for stand-alone full converter wind energy conversion systems. *Energies*, **11** (3): 474.

Bajpai R. S., Megha Goyal, Rajesh Gupta 2015. Modeling and control of variable speed wind turbine using laboratory simulator. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **7**: 053127.

Thatoi D. 2015. Design, control and simulation of PMSG based stand-alone wind energy conversion

system. Dual degree thesis (B.Tech/M.Tech). Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India

Lindén K., Segerqvist I. 1992. Modelling of Load Devices and Studying Load/System Characteristics. Technical Report No. 131L. Department of Electrical Power Systems, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

The MathWorks 2006 [online] Dostupno na: [https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/power\\_sys/ref/synchronousmachine.html](https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/power_sys/ref/synchronousmachine.html)

The MathWorks 2006 [online] Dostupno na: [https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/power\\_sys/ref/windturbine.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/power_sys/ref/windturbine.html?s_tid=doc_ta)

---

*Jelena Marinković and Milena Mičić*

## Regulation of Produced Power in Stand-Alone Wind Energy Conversion System

In this paper, the possibility of maintaining the power balance of a wind turbine using pitch angle control is proposed. The imbalance of power in a system can occur due to the change of the produced power, which occurs because of the intermittence of the wind speed, or due to the change of the consumed power. P, PI and PID controllers were compared on a small-scale wind turbine system, modelled in MATLAB Simulink. All of the controller parameters were found using the Ziegler-Nichols method. Controllers were compared based on the following criteria: rise time, maximum error, time to get to the steady state and the error of the steady state signal, where the input signal is modelled as a step function of wind speed.

Comparison of the values given by the mentioned criteria has shown that the system using the PID controller gives the best results. 