

MOGUĆNOST POBOLJŠANJA UPRAVLJANJA VETROELEKTRANOM U CILJU POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

I. Tasić - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
V. Katić - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
Z. Ivanović - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
M. Vekić - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija

UVOD

Usled sve manjih zaliha fosilnih goriva i globalnih klimatskih promena, korišćenje energije vetra nameće se kao ekonomski opravdano i ekološki čisto rešenje za zadovoljenje dela energetske potrebe. U razvijenim zemljama (Danska, SAD, Nemačka i dr.) se već duže vremena radi da se znatnije poveća udeo energije vetra u ukupnoj proizvodnji električne energije, a to znači rapidno povećanje instaliranih kapaciteta vetroelektrana. Farme vetrenjača u svetu proizvode više od 94.000 MW električne energije godišnje. Najviše se koriste u Nemačkoj, Danskoj, SAD, Španiji i Kini, koje su na taj način uštedele oko 25 milijardi evra. U zemljama EU planirano je da do 2020. godine bude instalirano 180 GW kapaciteta vetroelektrana, od čega oko 35 GW u blizini morske obale. Cilj je da se tada dobija 20% energije iz obnovljivih izvora, a najveći deo iz energije vetra. Procenjuje se da bi proizvodnja električne energije iz kapaciteta vetroelektrana iznosila oko 477 TWh, a da bi se na taj način sprečila emisija 328 Mt ugljen-dioksida u atmosferu, što je ekvivalentno emisiji izduvnih gasova 165 miliona automobila, te da bi oko 107 miliona domaćinstava zadovoljavala svoje potrebe za električnom energijom [4].

Efikasnost pogona vetroelektrane u najvećoj meri zavisi od kvalitetnog upravljanja sklopom turbina-generator-energetski pretvarači. Cilj ovog rada je da se pokaže kako se energija vetra može maksimalno iskoristiti u raznim slučajevima ulaznog intenziteta vetra. Analiza stabilnosti elektrane zavisi od modela brzine promene strujanja vetra. Promena brzine vetra može biti linearna, udarna i šumna, što takođe utiče na odzive karakterističnih veličina vetroelektrane. „Silu vetra“ moguće je kontrolisati aktivnom, pasivnom i regulacijom zakrenutosti ugla krilaca. Pri tome je potrebno očuvati stabilnost, korigovati faktor snage i smanjiti gubitke snage i energije.

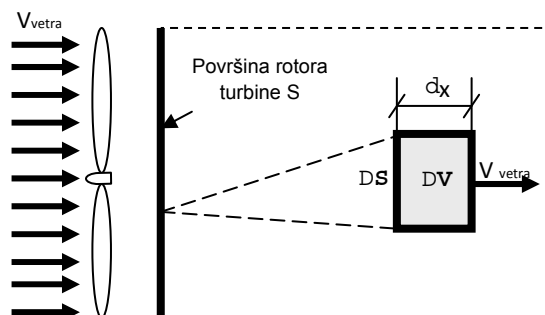
U radu je prikazan razvijen matematički model vetroelektrane sa ulaznim modelom za različite pomenute slučajeve vetra. Upravljački model je postavljen tako da se u svakoj situaciji dobija maksimalno iskorišćenje vetra. Radi što realnijeg prikaza korišćeni su podaci o kvalitetu vetra sa pojedinih lokacija u Srbiji, kao i raspoloživi parametri turbine, generatora i pretvarača jednog poznatog

proizvođača opreme za vetroelektrane. U tom slučaju su razmatrane mogućnosti unapređenja upravljanja. Time su postavljene osnove za realne procene dometa primene vetroelektrana na izabranim lokacijama.

MODELOVANJE VETRA

Energija vetra sadržana je u masi vazduha koja se kreće (sl.1.). Kinetička energija elementarne zapremine vazduha u vazdušnoj struji je data sa:

$$E_k = 0.5 \cdot m_{\text{vazduha}} \cdot (V_{\text{vetra}})^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot (V_{\text{vetra}})^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot \Delta S \cdot \delta x \cdot (V_{\text{vetra}})^2 \quad (1)$$



Sl.1. Protok vazduha kroz turbinsko kolo

Snaga elementa zapremine vazduha u vremenu δt iznosi:

$$\delta(E_k) = 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot (V_{\text{vetra}})^3 \cdot \delta t \quad (2)$$

Sumiranje svih elemenata po površini rotorskog kola S daje ukupnu promenu kinetičke energije kroz površinu turbinskog kola S , a kada priraštaj vremena δt teži nuli dobija se izraz za snagu vetra koji glasi:

$$P_{\text{vetra}} = 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot (V_{\text{vetra}})^3 \quad (3)$$

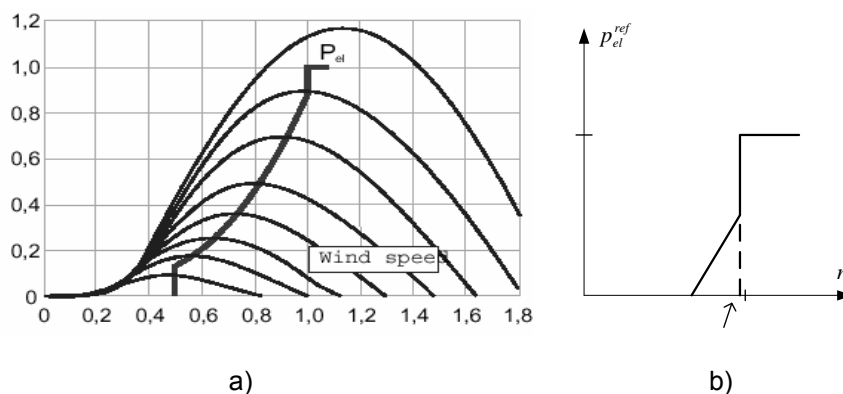
Uočava se da snaga vetra najviše zavisi od brzine i to sa trećim stepenom. Prilikom interakcije vetra i turbine snaga se preko turbine predaje generatoru. Ta snaga turbine može se odrediti na osnovu normalizovanog izraza:

$$p_{\text{TURBINE}} = C_p(\lambda, \beta) \cdot (V_{\text{vetra}})^3 \text{ [p.u.]} \quad (4)$$

Koeficijent $C_p(\lambda)$ je koeficijent snage turbine, a λ odnos periferne brzine turbine i brzine vetra. U cilju lakšeg razmatranja pojava koje se dešavaju u vetroelektrani izvršena je normalizacija izraza za snagu turbine. Vrednost koeficijenta $C_p(\lambda)$ zavisi od konstrukcionih svojstava turbine, a najviše od broja lopatica. Što je broj lopatica manji vazduh će lakše prolaziti kroz zamišljenu kružnicu koju opisuju vrhovi elisa i snaga koja može da se upotrebi iz vetra biće relativno mala. Danas se najviše koriste turbine sa tri lopatice. Koeficijent snage turbine $C_p(\lambda, \beta)$ obično se zadaje za nulti ugao zakrenutosti elisa ($\beta=0$) [7].

Težnja je da se koeficijent $C_p(\lambda)$ uvek drži na maksimalnoj vrednosti kako bi se očuvalo optimalno upravljanje.

Sl.2.a) predstavlja geometrijsko mesto tačaka maksimalne iskoristivosti snage za pojedine brzine vetra. Prva oblast jeste kada su brzine vetra male i tada se vetroelektrana isključuje, jer je njena iskoristivost relativno mala. Druga oblast jeste oblast optimizacije snage, gde se u zavisnosti od brzine vetra reguliše brzina obrtanja turbine, odnosno generatora uz uslov prenosa maksimalne moguće snage. Treća oblast jeste oblast ograničenja snage na konstantnu vrednost koja odgovara brzinama većim od nominalne. U cilju jednostavnijeg modelovanja vrši se aproksimacija optimalne radne karakteristike oblikom datim na sl.2.b).



Sl.2. a) Normalizovana snaga na rotoru turbine u zavisnosti od normalizovane brzine obrtanja;
b) Aproksimirana karakteristika

$$P_{meh}/P_{nom}$$

REGULACIJA SNAGE VETROELEKTRANE

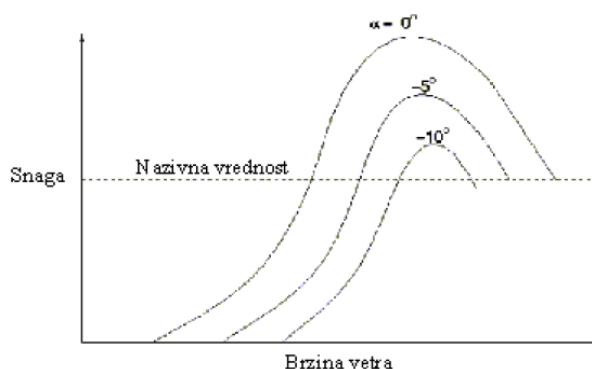
Osnovni razlog potrebe za regulacijom snage je promenljiva brzina vetra, koja se ne može kontrolisati, kao i nemogućnost uskladištenja nastalog viška energije u okviru same turbine. Prema regulaciji snage postoje tri rešenja:

1. pasivna regulacija (stall regulation),
2. aktivna regulacija (active stall regulation) i
3. regulacija zakrenutosti krilaca (pitch regulation) koja je dala najbolje rezultate za iskorišćenje energije vetra.

Bez obzira na to koji način regulacije se koristi, sama regulacija je neophodna makar i kao način zaštite od odlaska turbine u pobeg, tj. zaštite od velikih brzina.

Koncept regulacije snage zasniva se na nekoliko osnovnih zahteva. Prvo, zadovoljiti optimizaciju snage i ograničenje snage. Drugo, obezbediti kvalitet proizvedene električne energije. Na kraju važno je i minimiziranje veličina pri dinamičkim pojavama (naprezanje materijala, kratkotrajna, ali velika mehanička opterećenja i sl.) kako bi se produžio vek trajanja same turbine. Ukoliko generator radi sa promenljivom brzinom obrtanja, frekvencija struja i napona samog generatora nije stalna, pa je nezavisna od mrežne frekvencije [6].

Danas je najzastupljeniji metod regulacije ugla zakrenutosti krilaca, kod koje se krilca mogu jednostavno pomerati u pravcu vetra ili suprotno kako izlazna snaga postaje prevelika ili premala. Tako postoje dve metode ovakve regulacije i to: smanjivanje ili povećavanje ugla zakretanja (sl.3).



Sl.3. Ilustracija regulacije zakrenutosti ugla krilaca

Ovde nema problema prilikom pokretanja. Ovakva regulacija vrši se istovremeno sa obrtanjem rotora. Kod turbine sa ovom regulacijom elektronski kontroler proverava izlaznu snagu turbine nekoliko puta u sekundi. Kada izlazna snaga postane previsoka on daje signal pitch mehanizmu na elisi da odmah zakrene elisu malo od pravca vetra. Važi i obrnuto: elisa treba da se okrene ka vetru kada brzina vetra opadne. Konstruisanje ovakvog načina regulacije zahteva vrlo inteligentno projektovanje kako bi se elisa zakrenula za tačno potreban ugao. Kompjuterom kontrolisani mehanizam će pokušati da zakrene elise za nekoliko stepeni svaki put kada se brzina vetra promeni u cilju maksimiziranja proizvedene snage pri svim brzinama vetra. Ovaj mehanizam je uglavnom upravljani hidrauličkom [1]. Danas je regulacija ugla krilaca neophodan vid regulacije kod vetroelektrana čija je snaga veća od 1 MW.

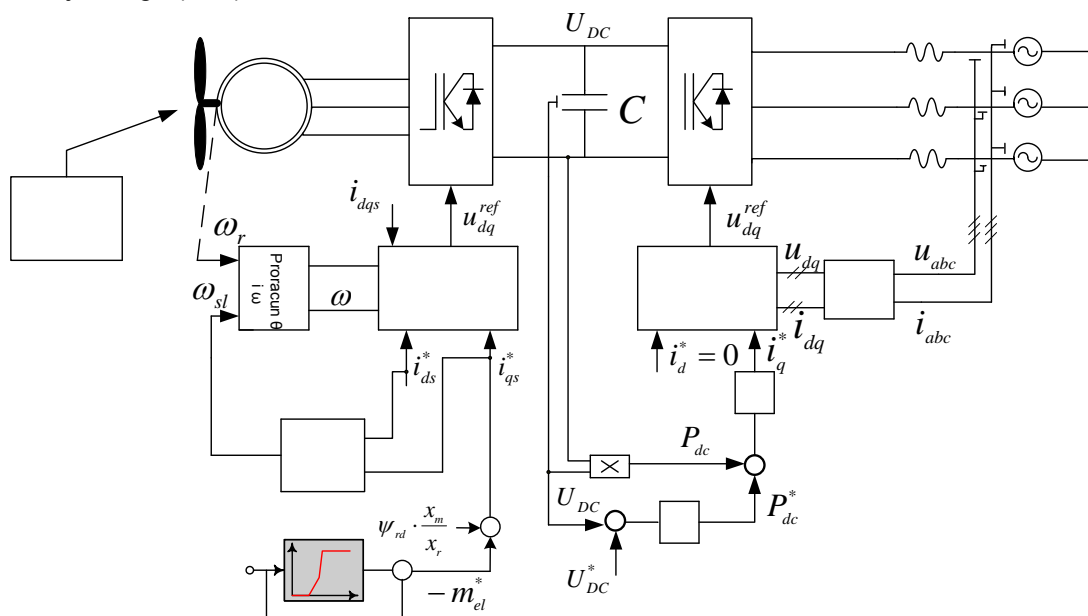
Razlog tome svakako jesu relativno velike vibracije koje proizvodi pasivna regulacija. Upravo je iz svih ovih razloga u modelu vetroelektrane koji je predstavljen u ovom radu korišćena regulacija ugla krilaca.

Mana ove regulacije je složenost mehanizma za zakretanje krilaca i samog regulatora, kao i velike promene u snazi pri velikim brzinama vetra.

Za sve turbine postoji gornje teoretsko Lanchester-Betz-ovo ograničenje energetske efikasnosti od 16/27 ili 59%, ali realni (industrijski) modeli vetroturbina mogu praktično da ostvare oko 43%.

MODEL VETROELEKTRANE

Pogon vetroelektrane sastoji se od vetrogeneratora i dvostrukog pretvarača. Vetroturbina zahvata silu vetra. Kao rezultat toga javlja se moment, koji se preko reduktora (multiplikatora) za prilagođavanje (povećavanje) brzine turbine brzini generatora, prenosi na vratilo asinhronog generatora. Dvostruki pretvarač se sastoji iz dva pretvarača: pretvarač prema generatoru (ispravljač) i pretvarač prema mreži (inverter), koji reguliše protok aktivne i reaktivne snage prema mreži. Ova dva pretvarača su povezana jednosmernim međukolom. Jednosmerno međukolo frekvencijski raspoređe elektroenergetski sistem od sistema vetroelektrane [2]. Regulacijom napona jednosmernog međukola postiže se maksimalno iskorišćenje snage (sl.4.).



Sl. 4. Blok šema vetroelektrane

Matematički model asinhronog generatora je petog reda. U cilju računarske analize ovaj model se piše u prostoru stanja. Asinhrona mašina je vektorski upravljana u cilju nezavisnog upravljanja momentom i fluksom, kao što je to slučaj kod jednosmerne mašine. Da bi se to izvelo potrebno je u svakom trenutku poznavati položaj i amplitudu fazora rotorskog fluksa (u zavisnosti od izbora koordinatnog sistema) u odnosu na statorski koordinatni sistem, jer se novi sinhroni koordinatni sistem definiše u odnosu na taj polifazor. Sledeće jednačine opisuju vektorsko upravljanje asinhronom mašinom:

$$T_r \cdot \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rd} = M \cdot i_{sd} \quad \text{VG} \quad (5)$$

$$\omega_r \cdot T_r \cdot \psi_{rd} = M \cdot i_{sq} \quad (6)$$

Moment vektorski upravljane mašine direktno je proporcionalan podužnoj komponenti fluksa rotora i poprečnoj komponenti struje statora koja postaje referenca momenta. Amplituda rotorskog fluksa određena je isključivo podužnom komponentom struje statora. Parametri PI regulatora određuju se pravilom modulnog optimuma. Efikasnost opisanog pogona zavisi u najvećoj meri od kvalitetnog upravljanja sklopom turbina-generatora i elektroenergetski pretvarači [3].

Regulacija ugla krilaca se ovde primenjuje i ovaj mehanizam regulacije se koristi u dva slučaja. Prvo, usled ograničenja snage dolazi do razlike između električnog i mehaničkog momenta i generator

Vektorsko
upravljanje sa
dekuplovanjem

počinje naglo da ubrzava. Drugo, ukoliko se desi da kada su krilca zakrenuta dođe do promene brzine vetra, tj. vetar opadne ispod nominalne vrednosti, potrebno je zakrenuti krilca da ne bi bilo pada u prenosu snage. To se radi zbog različitog nagiba krive date na sl. 2. za vrednosti brzine iznad i ispod nominalne [1].

REALNI PARAMETRI

U tabelama 1-3 predstavljeni su realni podaci o kvalitetu vetra u mestu Banatski Karlovac, kao i realni parametri linearnih i udarnih promena brzine vetra korišćeni u simulacijama. Ovi podaci o kvalitetu vetra dobijeni su od Hidrometeorološkog zavoda Srbije, a čuvaju se u elektronskoj bazi podataka na FTN-u u Novom Sadu. U tabeli 1 jsu date prosečne vrednosti zabeležene tokom 10 sati merenja jednog vetrovitog, novembarskog dana. U tabeli 2 mogu se uočiti linearne promene brzine vetra, dok u tabeli 3, udarne.

TABELA 1-Podaci o kvalitetu vetra za Banatski Karlovac

Vreme [h]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Brzina vetra [m/s]	9.6	8.7	8.4	9.8	10.4	10.6	11.0	11.1	11.2	9.9	9.9

TABELA 2-Primećene linearne promene vetra

Vreme [h]	0	1	2	3	4
Brzina vetra [m/s]	9.5	10.9	12.1	11.9	12.0

TABELA 3-Uočene udarne promene vetra

Vreme [h]	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Brzina vetra [m/s]	9.6	9.7	13.5	9.9	9.6	9.5	9.6

Za simulaciju upotrebljenog generatora korišćeni su realni parametri dobijeni od proizvođača. Uzet je primer asinhronog-kliznokolutnog vetro generatora snage 2MW. U nastavku su dati najvažniji parametri ovog generatora:

$P_n = 2000 \text{ kW}$; $U_n = 6000 \text{ V}$; $I_n = 220,3 \text{ A}$; $p = 4$; $\cos\varphi = 0,9162$; $s_n = 0,8172\%$; $\eta_n = 0,9534$;
 $J = 430 \text{ kgm}^2$; $f_n = 50 \text{ Hz}$; $R_s = 0,12094 \Omega$; $R_r = 0,140784 \Omega$; $X_{ls} = 1,33774 \Omega$; $X_{lr} = 0,98214 \Omega$;
 $X_m = 54,58 \Omega$.

Za ostale veličine korišćeni su sledeći parametri:

Parametri električne mreže: $R=0,1\Omega$; $L=1000 \text{ mH}$.

Parametri jednosmernog međukola: $C=100\mu\text{F}$; $U_{DC}=10800\text{V}$.

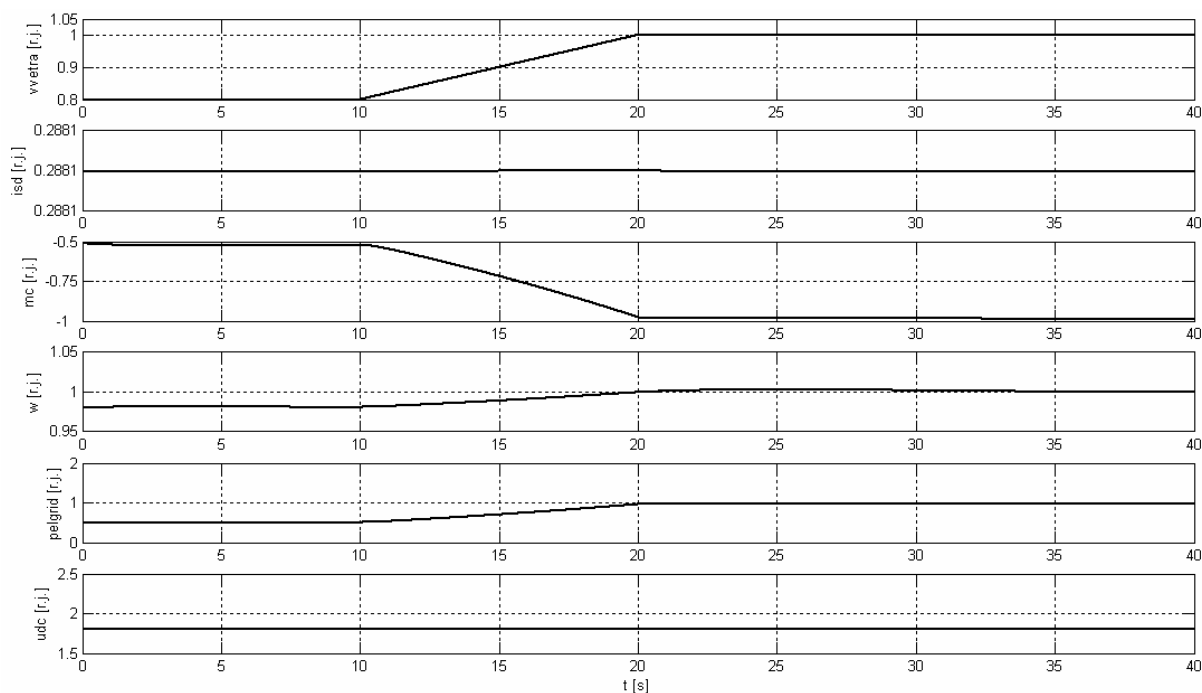
REZULTATI SIMULACIJA

Urađene su računarske simulacije za linearnu i udarnu promenu brzine vetra, kao i provera matematičkog modela na realne parametre vetra. Rezultati su dati na slikama 5-7, gde su prikazani odzivi karakterističnih veličina: podužne komponente struje statora, momenta konverzije, brzine obrtanja, aktivne snage koja se predaje mreži i napona jednosmernog međukola na linearnu promenu brzine vetra. Važno je da se energija vetra maksimalno iskoristi pri linearnoj promeni brzine vetra.

Linearna promena brzine vetra, prikazana na sl.5, započinje u trenutku $T_{1R} = 10 \text{ s}$ i traje idućih $T_R = 10 \text{ s}$. Po isteku perioda linearne promene, srednja brzina vetra se na poslednjoj postignutoj vrednosti drži još 20 s tako da je ukupno vreme posmatranja odziva 40 s . Kao što se vidi moment konverzije direktno zavisi brzine vetra i to na isti (približan) linearan način. Moment konverzije je uzet sa znakom minus, jer se radi o generatoru (za ovako definisanu električnu snagu koja izlazi iz generatora i mehaničku snagu koja ulazi u mašinu moment konverzije je negativan). Dostizanjem nominalne brzine vetra, postiže se i maksimalni moment konverzije. Brzina obrtanja generatora i aktivna snaga predata mreži rastu do nominalnih vrednosti, ali se kod brzine javlja mali prebačaj. U trenutku kada brzina vetra počinje da raste rastu i moment konverzije, brzina obrtanja generatora i aktivna snaga koja se

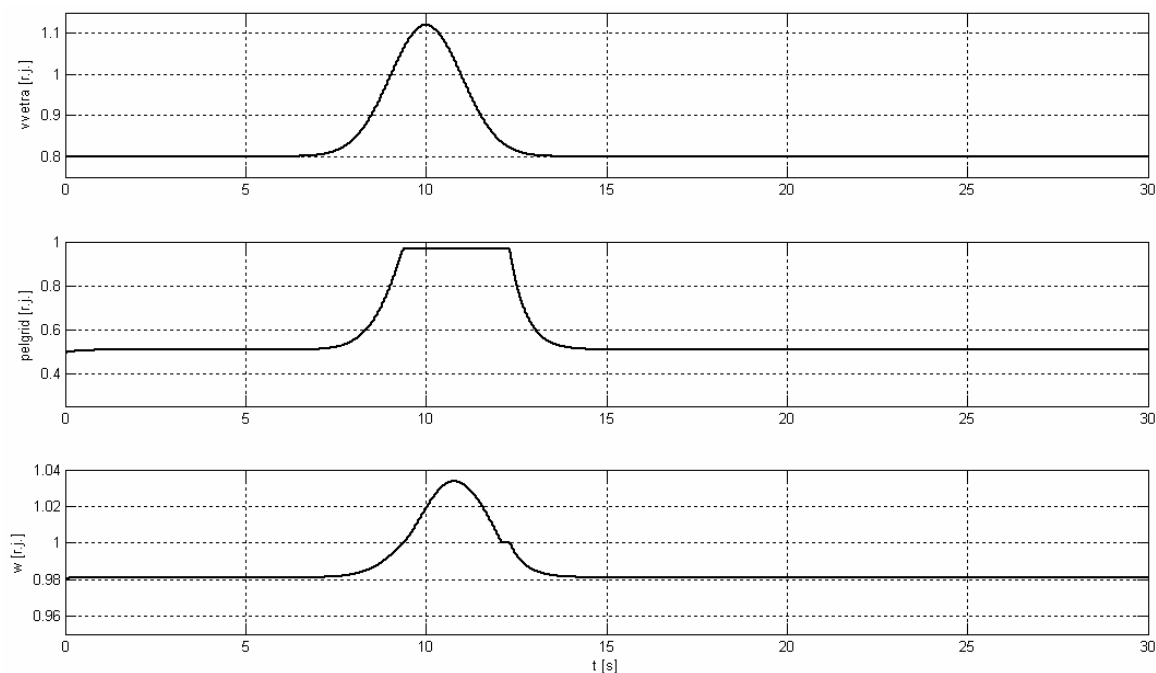
predaje mreži. U prvih 20 s ima se oblast optimizacije snage, a u narednih 20 s snaga se drži na konstantnoj vrednosti.

Napon jednosmernog međukola održava se konstantnim (oko 1.8 r.j.), kao i podužna komponenta struje statora koja se održava na konstantnoj vrednosti kako bi se momentom upravljalo samo preko poprečne komponente struje statora. Njena vrednost iznosi 0.2881 r.j.



Sl.5. Odzivi na linearnu promenu vetra

Na sl.6. dati su odzivi karakterističnih veličina na udarnu promenu brzine vetra: električna snaga koja se predaje mreži i brzina obrtanja generatora. Udarne promene započinje u trenutku $T_{16} = 7$ s i traje narednih 6 s. Po isteku dejstva udarne promene, brzina vetra se na poslednjoj postignutoj vrednosti zadržava narednih 17 s, tako da je ukupni vremenski interval posmatranja pojave 30 s. U oba stacionarna stanja brzina vetra iznosi 0.8 r.j. Maksimalna brzina pri udaru vetra iznosi 1.12 r.j. Može se uočiti da pri udarnoj promeni vetra dolazi do velike promene aktivne snage koja se predaje mreži.



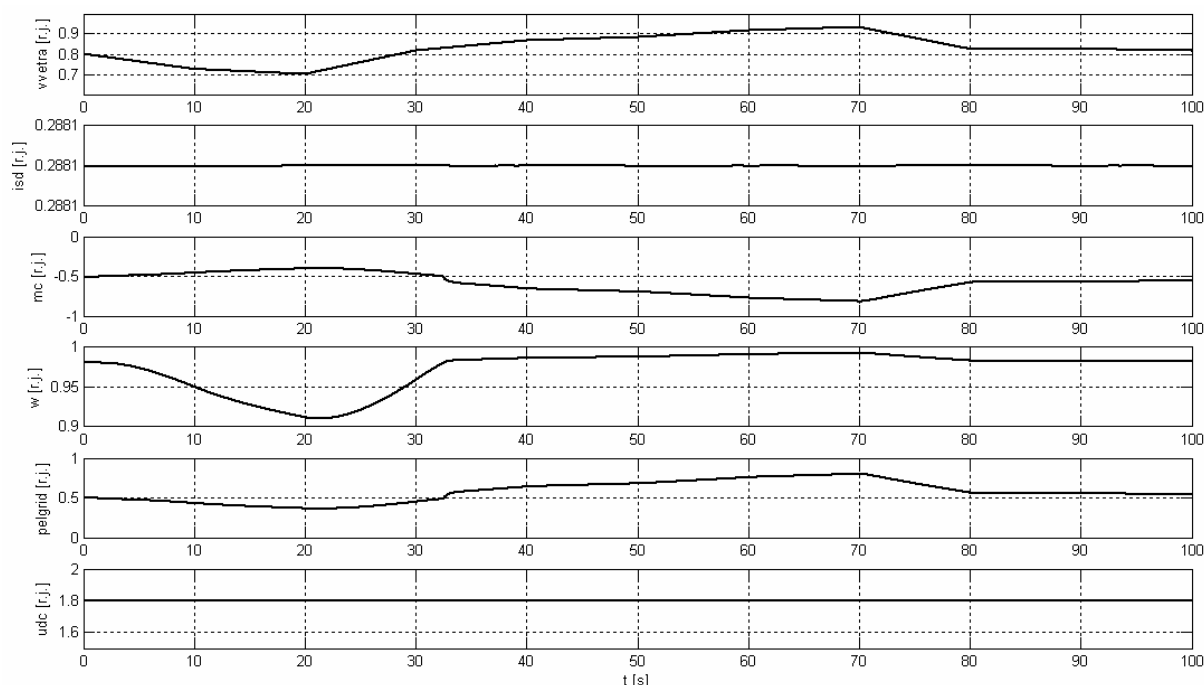
Sl. 6. Odzivi na udarnu promenu vetra

Kada brzina vetra poraste iznad nominalne, aktivna snaga koja se predaje mreži održava se na nominalnoj vrednosti i to je oblast ograničenja snage. Kada prođe udar vetra tj. brzina vetra opadne ispod nominalne, aktivna snaga koja se predaje mreži posle nekog vremena opet pada ispod nominalne vrednosti. U oba stacionarna stanja predata aktivna snaga iznosi 0.5 r.j. Brzina obrtanja takođe reaguje na udar vetra stvarajući mali prebačaj iznad nominalne vrednosti i to za oko 3%.

Na sl.7. date su karakteristične veličine: poduzna komponenta struje statora, moment konverzije, brzina obrtanja generator, aktivna snaga koja se predaje električnoj mreži i napon jednosmernog međukola. Brzina vetra ne prelazi nominalnu vrednost i kreće se u intervalu od 0.7 r.j. do 0.92 r.j.

Promena vetra između dve vrednosti uzeta je da traje 10 s i tretirana linearnim segmentima. Ukupni vremenski interval posmatranja je 100 s.

Uočava se da brzina obrtanja generatora direktno zavisi od brzine vetra. Kada brzina vetra opadne javlja se naglo opadanje brzine obrtanja generatora. Najniža ostvarena brzina generatora u ovom slučaju je 0.92 r.j., a najviša je skoro nominalna i iznosi 0.99 r.j. Slično važi i za moment konverzije i aktivnu snagu koja se predaje mreži. Povećanje brzine vetra povećava i aktivnu snagu koja se predaje mreži. Najniža vrednost aktivne snage koja je predata mreži iznosi 0.45 r.j., a najviša 0.85 r.j. moment konverzije se u apsolutnom iznosu kreće između 0.46 i 0.82 r.j. Poduzna komponenta struje statora se drži konstantnom i to na 0.2881 r.j., kao i napon jednosmernog međukola koji iznosi 1.8 r.j..

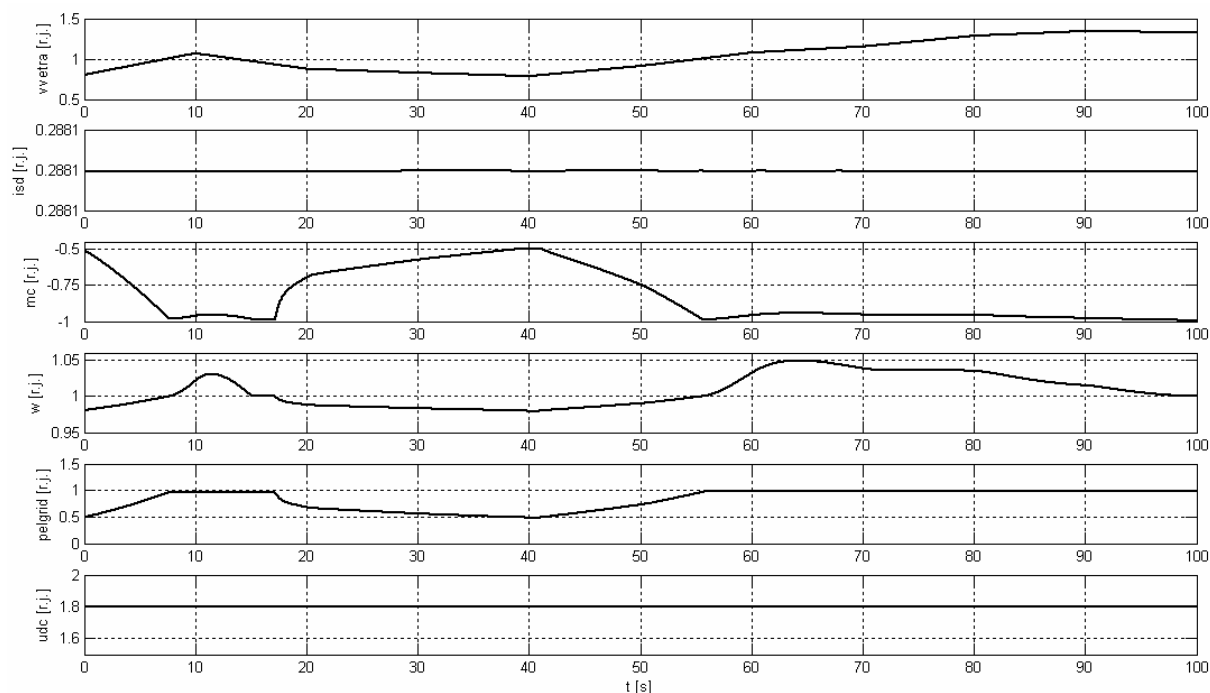


Sl. 7. Odzivi na realne podatke o kvalitetu vetra iz mesta Banatski Karlovac.

POBOLJŠANJE UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

Da bi se optimizovao rad vetroelektrane, izvršena je korekcija načina upravljanja, odnosno upravljačkog algoritma bazirana na realnim podacima. Dobijen je optimizovani upravljački algoritam, koji vodi računa o realnoj dinamici u prirodi. Na sl.8 prikazani su odzivi na realne podatke o kvalitetu vetra iz Banatskog Karlovca i efekat primene ovog poboljšanja. Može se videti da optimalno upravljanje odmah reaguje čim brzina vetra pređe nominalnu vrednost. Tako se na grafiku aktivne snage koja se predaje mreži mogu uočiti dve oblasti ograničenja snage na nominalnu vrednost. U prethodnom slučaju za ovim nije bilo potrebe. Što se tiče brzine obrtanja generatora može se uočiti kratkotrajno zadržavanje na nominalnoj vrednosti. Ovo nastaje usled toga što je potrebno da prođe neko relativno kratko vreme da nakon opadanja brzine vetra ispod nominalne vrednosti opadne i brzina obrtanja generatora, tj. da odreaguje mehanizam regulacije ugla krilaca. Pri ovakvom upravljanju poboljšana je energetska efikasnost, a koeficijent snage vetroturbine se održava na

maksimalnoj vrednosti. Regulacija zakrenutosti ugla krilaca u svakom trenutku daje optimalno iskorišćenje energije vetra.



Sl. 8. Odzivi na realne podatke o kvalitetu vetra iz mesta Banatski Karlovac sa poboljšanim upravljačkim algoritmom.

ZAKLJUČAK

Prikazani poboljšani upravljački algoritam daje optimalno iskorišćenje energije vetra i povećava energetska efikasnost. Tako se sva raspoloživa energija vetra može proslediti ka električnoj mreži za različite ulazne intenzitete vetra.

LITERATURA

1. Sharma H., 2002, „Effect of pitch control and power conditioning on power quality of variable speed wind turbine generators“, Curtin University of technology, Washington, USA
2. Bimal B., 2002, “Modern power electronics and AC drives”, Prentice Hall, New York
3. Maxime D., 2000, “Review of electromechanical conversion in wind turbines”, TU Delft, Netherlands
4. Zevros A., Kjaer C., 2008, “Pure Power-Wind energy scenarios up to 2030”, European wind energy association, www.ewea.com
5. Boldea I., Nassar S., 2006, "Electric Drives", Taylor & Francis, New York
6. Cathey J., 2001, „Electric machines: Analysis and design applying MATLAB“, McGraw-Hill, New York
7. Hau E., 2000, „Wind-turbines“, Springer-Verlag, New York.
8. Ivanović Z., Vekić M., Grabić S., Katić V., 2006, “Control of Multilevel Converter Driving Variable Speed Wind Turbine in Case of Grid Disturbances”, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2006, Portoroz, Slovenia, pp.1569-1573., IEEE Cat. No.06EX1282C, ISBN 1-4244-0121-6, CD-ROM.

Kontakt: igortas@neobee.net