

UPRAVLJANJE VETROELEKTRANOM U SKLADU SA ZAHTEVIMA MREŽE

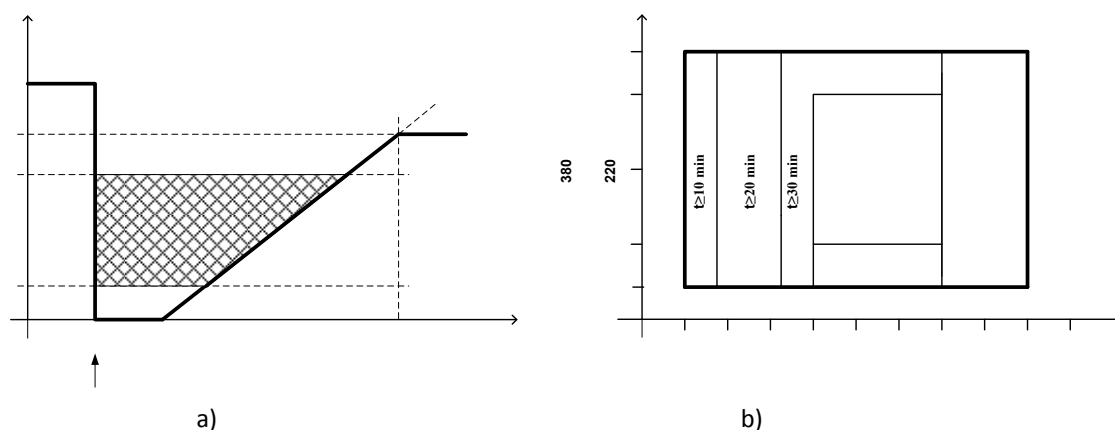
D. Jerkan- Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
V. Katić - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
Z. Ivanović - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija
M. Vekić - Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija

UVOD

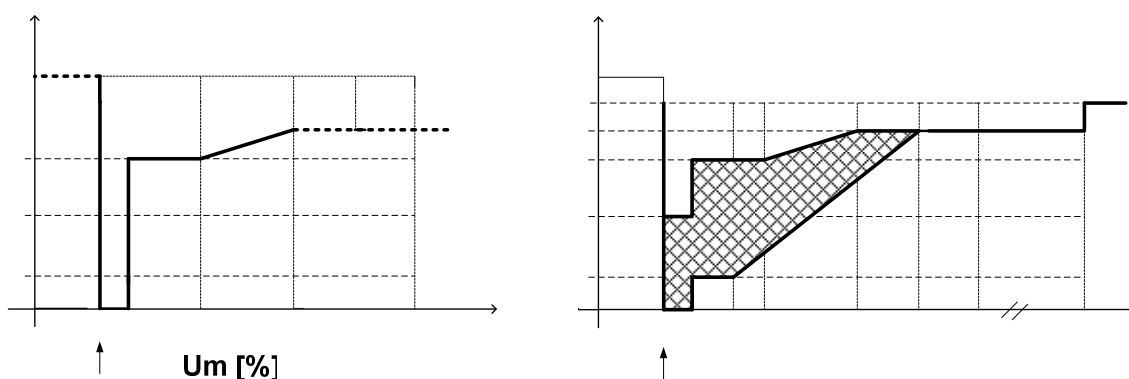
Tendencije koje nameću ekološku, a naravno i ekonomsku opravdanost sve veće upotrebe alternativnih, prvenstveno obnovljivih izvora električne energije, među kojima energija vetra uzima ključno mesto, sa sobom povlače i neophodnost da se taj, sve veći udeo u ukupnoj proizvodnji električne energije što bolje i efikasnije uklopi u već postojeću infrastrukturu električnih mreža. U ranijem periodu, kada je količina energije dobijene iz vetra bila mala u odnosu na ukupno proizvedenu električnu energiju, postojala je i praksa da se vetroelektrane isključe iz sistema u slučaju pojave nekog mrežnog poremećaja. Danas, a pogotovo u budućnosti, nametaće se sve strožiji zahtevi koje vetroelektrane moraju da ispune u slučaju pojave takvih poremećaja. Takvi trendovi će jednostavno postati nužni, jer elektroenergetski sistemi neće imati dovoljne proizvodne kapacitete koji bi bili u stanju da nadomeste simultani ispad velikog broja vetroelektrana, pa ujedno i jednovremeni gubitak električne energije koju one injektuju u elektroenergetski sistem, što bi moglo da dovede do kolapsa istog. Tu se prvenstveno misli na neophodnost njihovog ostanka u pogonu onoliko dugo vremena koliko je to propisano, naravno u zavisnosti od vrste samog poremećaja. Pod poremećajima se ovde podrazumevaju propadi napona, kao posledica pojave kratkih spojeva u mreži i fluktuacije mrežne učestanosti usled naglog opterećivanja ili rasterećivanja potrošnjom elektroenergetskog sistema na koji su vetroelektrane priključene. Ovi zahtevi su definisani u posebnim tehničkim propisima koji se nazivaju i " zahtevi mreže" (Grid Code). Cilj rada je iznalaženje optimalnog upravljanja i postizanje stabilnog rada vetroelektrane u gorenavedenim režimima. U radu su grafički predstavljeni zahtevi mreže različitih elektroprivrednih firmi (E.ON i Eltra iz Nemačke, kao i drugi) i dato je njihovo poređenje. Zatim je postavljen matematički model vetroelektrane i dat je njegov simulacioni model u programskom paketu Matlab. Poseban akcenat je stavljen na detaljniji opis onog dela upravljačkog algoritma, koji implementira dvojak strujnu regulaciju mrežnog konvertora (DVCC), kao i PLL (Phase-Locked Loop), koji obezbeđuje efikasnu i robusnu sinhronizaciju sa mrežom, nezavisno od toga koji je tip poremećaja nastupio u njoj, što u mnogome povećava efikasnost i stabilan rad vetroelektrane. Kao potvrda ovim tvrdnjama, priloženi su i rezultati simulacija sprovedenih nad datim modelima, u kojima su prikazani odzivi karakterističnih veličina same vetroelektrane i električne mreže, sa naglaskom na režime električne mreže sa poremećajima.

ZAHTEVI MREŽE ("Grid Code")

U evropskim zemljama koje predstavljaju lidere u proizvodnji električne energije iz vetroelektrana (Nemačka, V.Britanija, Danska, Španija i druge) uveliko su razvijeni i prisutni strogi tehnički propisi koji regulišu ponašanje vetroelektrana u skladu sa zahtevima mreže. U njima su definisani vremenski intervali u kojima vetroelektrane moraju i dalje biti priključene na električnu mrežu, u zavisnosti od toga kakav je tip poremećaja u mreži nastao. Na Slici 1. dat je prikaz zahteva mreža nemačkih elektroprivrednih firmi E.ON i Eltra, gde je na Slici 1. a) imamo grafički prikaz zahteva mreže E.ON-a [1] za trajanjem rada vetroelektrane u slučaju propada mrežnog napona ("Fault Ride Through"). Na Slici 1. b) prikazan je zahtev mreže E.ON-a i Eltre koji se tiču varijacija mrežne učestanosti, za različite naponske nivoe, uz propisane vremenske intervale u kojima vetroelektrane moraju ostati priključene na električnu mrežu. Na Slici 2. prikazan je zahtev mreže E.ON-a koji se odnose na propade mrežnog napona uzrokovanim kvarom u neposrednoj blizini generatora. Na Slici 2 b) prikazan je zahtev mreže E.ON-a i Eltre koji se odnosi na propade napona koji se tiču farme vetroelektrana. Na Slici 3 a) i b) respektivno su dati grafički prikazi zahteva mreže škotske [2] i irske [3] elektroprivrede koji se tiču propada napona. Važno je primetiti da u svim dole prikazanim zahtevima mreže nema velikih međusobnih razlika, što je naravno i očekivano, jer se teži njihovom unificiranju. Potrebno je još napomenuti da će ovi zahtevi postajati sve strožiji u budućnosti, kako bude rastao broj i ukupna instalisana električna snaga vetroelektrana u elektroenergetskom sistemu. Doći će se i do tačke kada će se one morati tretirati kao konvencionalne elektrane. U ovom radu se nećemo baviti svim zahtevima mreže, već samo sa dva gorenavedena, ali treba napomenuti da postoje i zahtevi obuhvataju i mogućnost varijacije proizvodnje reaktivne energije vetroelektrana, odnosno rad sa promenljivim faktorom snage, kao i propisani nivoi harmonijskog izobličenja koji vetroelektrane smeju da injektuju u sistem, kao i drugi.



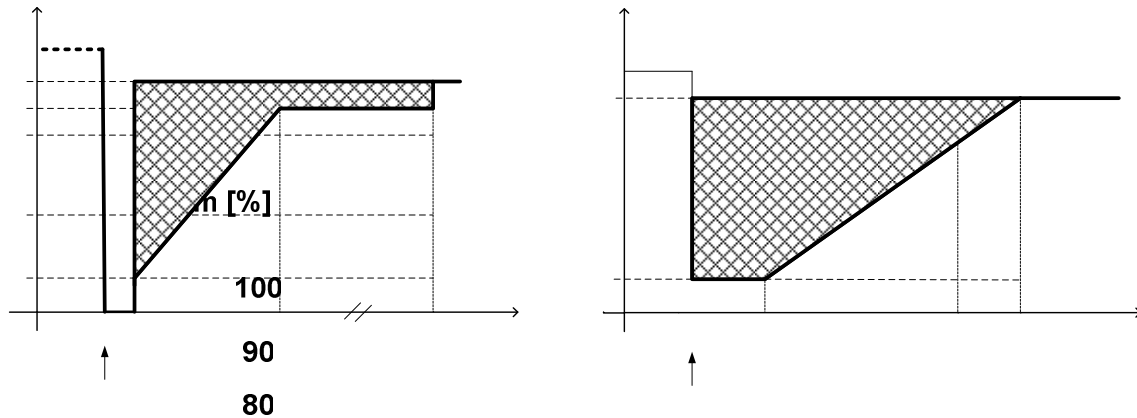
Slika 1.. a) Zahtev mreže E.ON-a koji se tiče propada mrežnog napona; b) Zahtev mreže E.ON-a i Eltre koji se tiče varijacija mrežne učestanosti



Slika 2. a) Zahtev mreže E.ON-a za propade napona usled kvarova u blizini samog generatora; b) Zahtev mreže E.ON-a i Eltre koji se tiču farme vetroelektrana u slučaju propada napona

100

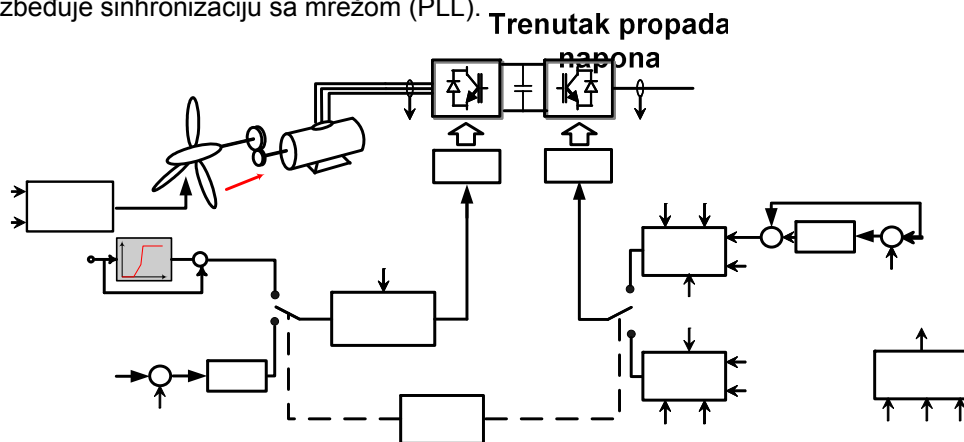
80



Slika 3. a) Zahtev mreže škotske elektroprivrede koji se tiče propada napona ; b) Zahtev mreže irske elektroprivrede koji se tiče propada napona

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 (inverzor), koji reguliše protok aktivne i reaktivne snage prema mreži. Ova dva pretvarača su povezana jednosmernim međukolom. Jednosmerno međukolo frekvencijski raspoređuje elektroenergetski sistem od sistema vetroelektrane [4]. Asinhrona mašina je vektorski upravljana u cilju nezavisnog upravljanja momentom i fluksom [5]. Posebnu pažnju treba obratiti na regulaciju strujne regulaciju (DVCC), kao i blok koji obezbeđuje sinhronizaciju sa mrežom (PLL).

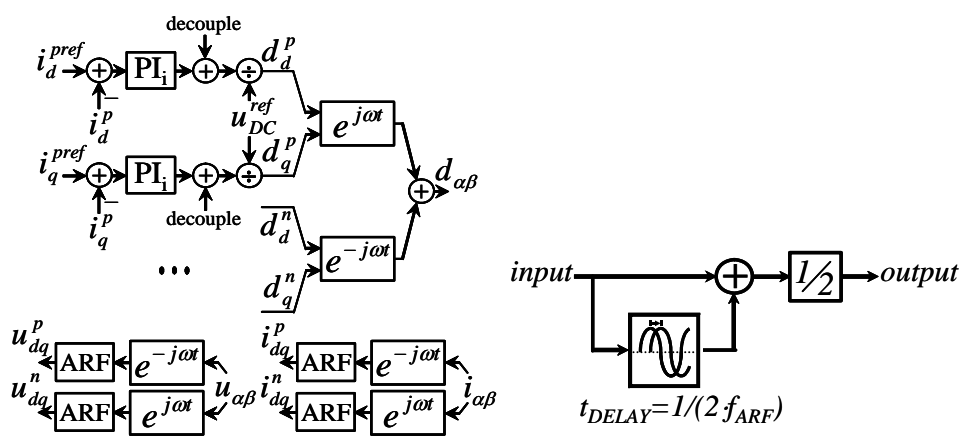


Slika 4. Kontrolna struktura vetroelektrane

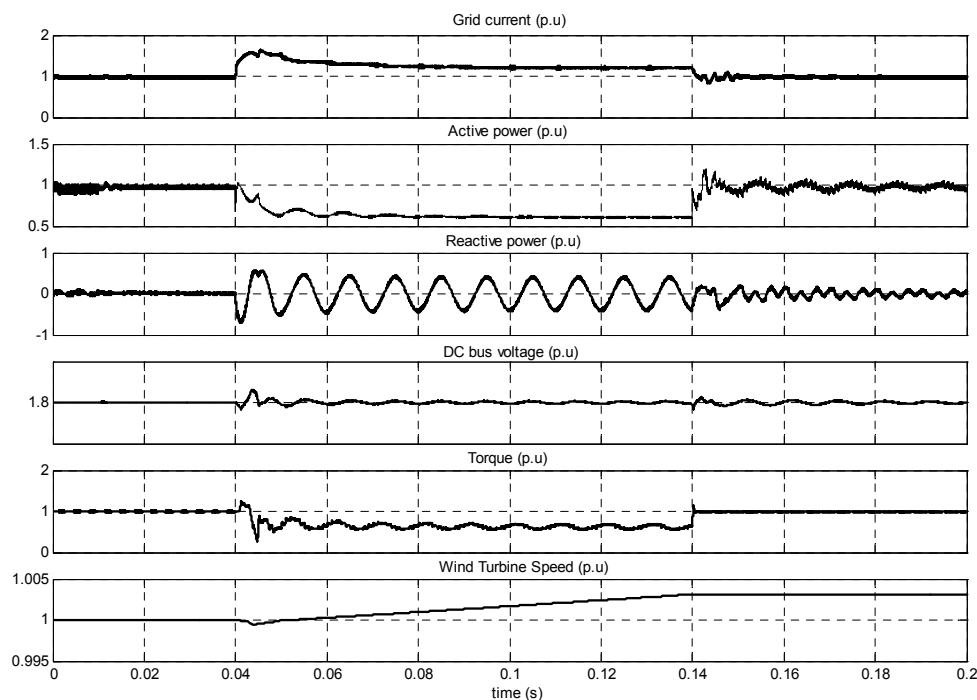
REGULACIONA STRUKTURA UPRAVLJANJA PRETVARAČEM PREMA MREŽI

U ovom poglavlju biće predstavljene regulacione strukture upravljanja pretvaračem prema mreži u uslovima nesimetričnih propada mrežnog napona. Kao što je već navođeno u prethodnom poglavlju, vetroelektrane moraju da se povinuju zahtevima mreže koji se tiču propada napona, a kako je poznato da su u električnoj mreži daleko najviše zastupljeni upravo nesimetrični propadi napona, jasno je da je neminovno razvijati i usavršavati upravo takve algoritme upravljanja vetroelektranama. Postojeća rešenja se zasnivaju na tzv. DVCC-u [6]. Ovaj metod se zasniva na regulaciji direktne i inverzne komponente struja, što omogućava prenos sve raspoložive snage na mrežnoj učestanosti, uz suzbijanje oscilacija na dvostrukoj učestanosti. Veliki nedostatak ove metode predstavlja nepostojanje nadzora nad temenim vrednostima struja, koje u slučaju dubljih propada napona mogu dostići

vrednosti i nekoliko puta veće od nominalnih. Moguće rešenje ovog problema jeste predimensionisanje samog pretvarača, što je ekonomski krajnje neisplativo rešenje. Drugo rešenje predstavlja ograničavanje izlaznih struja. To automatski znači i ograničavanje izlazne snage elektrane, a sa sobom povlači i oscilacije reaktivne snage tokom propada napona. Rešenje, odnosno algoritam primenjen u ovom radu omogućuje kako nadzor izlaznih struja, tako i eliminaciju oscilacija na dvostrukoj učestanosti aktivne i reaktivne snage [7]. Taj algoritam, pod nazivom Modifikovani DVCC se zasniva na nezavisnoj regulaciji komponenti struja pretvarača po d i q osi dobijenih transformacijom u pozitivno, odnosno negativno rotirajućem koordinatnom sistemu, respektivno (i_d^p i i_q^p ; i_d^n i i_q^n). Da bi se postiglo potpuno raspredzavanje regulacionih struktura za pozitivne i negativne komponente struja, neophodno je eliminisati oscilacije na dvostrukoj učestanosti koje se pojavljuju kao posledica primene transformacije obrtanja na simetrične komponente struja. Detaljniji matematički model Modifikovanog DVCC-a, kao i proračun parametara odgovarajućih PI regulatora i referentnih vrednosti struja invertora po obe ose može se naći u [8]. Na Slici 5 a) prikazana je regulaciona struktura Modifikovanog DVCC-a, a na Slici 5 b) prikazana je struktura antirezonantnog filtra (ARF). Na Slici 6 prikazani su karakteristični odzivi vetroelektrane dobijeni simulacijom u programskom paketu Matlab, u slučaju pojave propada napona tipa C. Pretpostavlja se da je napon u fazama b i c opao na 40% nazivne vrednosti.



Slika 5. a) Regulaciona struktura trenutne regulacije snage; b) Dijagram antirezonantnog filtra (ARF)



Slika 6. Odzivi karakterističnih veličina vetroelektrane u slučaju pojave propada napona tipa C

MODEL PLL-a

U slučaju pojave poremećaja u električnoj mreži, koji u sebi obuhvata promenu faznog stava mrežnih napona ili čak varijaciju mrežne učestanosti, od suštinskog značaja je postići kvalitetnu i robusnu sinhronizaciju pretvarača vetroelektrane prema mreži. Ako to nije slučaj, može doći do pojave veoma velikih struja izjednačenja, koje teku između pretvarača i mreže, koje mogu rezultovati oštećenjima samog pretvarača, te su stoga nedopustive. U ovom poglavlju je prikazano jedno rešenje koje obezbeđuje efikasnu sinhronizaciju sa mrežom, nezavisno od toga da li je nastupio poremećaj koji u sebi obuhvata čak i propade napona i varijacije učestanosti istovremeno. Osnovni deo prikazanog PLL-a predstavlja tzv. SOGI-QSG (Second Order Generalized Integrator for Quadrature Signals Generation) [8], generalizovani integrator drugog reda za generisanje signala fazno pomerenih za 90° , prikazan na Slici 7. Prenosne funkcije datog bloka date su sa (1) i (2). Ako je ulazni signal sinusoida učestanosti ω koja se poklapa sa rezonantnom učestanošću ω' , tada se kao izlazi SOGI-QSG dobijaju naponi jednaki po amplitudi, a fazno pomereni za 90° , nezavisno od vrednosti pojačanja K što se da zaključiti iz (3) i (4), na koje se izrazi (1) i (2) mogu svesti u gorenavedenom slučaju.

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{K\omega'\omega}{s^2 + K\omega's + \omega'^2} \quad (1) \quad Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{K\omega'^2}{s^2 + K\omega's + \omega'^2} \quad (2)$$

$$qv' = QV \begin{cases} |Q| = \frac{\omega'}{\omega} |D| \\ |Q| = |D| - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3) \quad v' = \begin{cases} |D| = \frac{K\omega\omega'}{\sqrt{(K\omega\omega')^2 + (\omega^2 - \omega'^2)^2}} |D| \\ |D| = \tan^{-1} \left(\frac{\omega^2 - \omega'^2}{K\omega\omega'} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Međutim, ako se vrednosti ω i ω' ne poklapaju, tada dolazi kako do odstupanja izlaza SOGI-QSG i po amplitudi i po faznom pomeraju, koji više ne iznosi 90° . Ako bismo kao ulaz dva ovakva integratora dovodili α i β komponente mrežnog napona, respektivno i njihove izlaze povezali kako je prikazano na Slici 8, na izlazu sabirača bismo dobili modifikovane vrednosti $\alpha\beta$ komponenti napona iz kojih bi se jednostavno mogao dobiti fazni stav prvog harmonika mrežnog napona, uz uslov $\omega = \omega'$:

$$\theta^{+'} = \tan^{-1} \frac{V_{\beta}^{+'}}{V_{\alpha}^{+'}} \quad (5)$$

Ako je, međutim, došlo do varijacije mrežne učestanosti, tako da više ne važi jednakost učestanosti osnovnog harmonika mrežnog napona i rezonantne učestanosti SOGI-QSG, ovaj metod bi nam dao netačne rezultate. Modifikovane vrednosti $\alpha\beta$ komponenti koji se dobijaju na izlazu dvostrukog SOGI-QSG bi u sebi sadržale više harmonike, čiji su izrazi za moduo i fazni stav dati u (6). Važno je napomenuti, da iako imamo nejednakost učestanosti prvog harmonika mrežnog napona i rezonantne učestanosti SOGI-QSG, važi izraz (7), koji je takođe nezavisan od vrednosti pojačanja K . Bitna osobina ovog sklopa je i da se on ponaša kao NF filter za simetrične komponente pozitivnog redosleda mrežnog napona. Ta osobina je iskorišćena, da uvođenjem zatvorene povratne sprege, pomoću PI regulatora, izvršimo dinamičku korekciju rezonantne učestanosti i na taj način ponovo obezbedimo pretpostavke iz kojih sledi (5), tj. obezbedimo efikasnu sinhronizaciju sa mrežom. Struktura koja omogućuje rešenje ovog problema, pod nazivom DSOGI-PLL (Dual Second Order Generalized Integrator Phase Locked Loop), prikazana je na Slici 8. Blokovi $T[\alpha\beta]$ i $T[dq]$ predstavljaju blokove za transformaciju mrežnih napona iz abc domena u $\alpha\beta$ domen (8), odnosno transformaciju iz $\alpha\beta$ domena u dq domen (9).

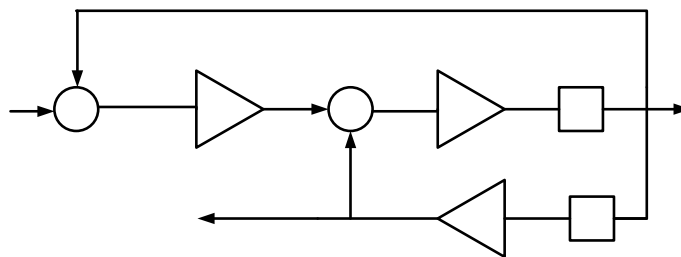
$$V_{\alpha}^{+} = P^n V_{\alpha}^{+n} \begin{cases} |P^n| = \frac{K\omega'}{2} \sqrt{\frac{(n\omega + \omega')^2}{(Kn\omega\omega')^2 + (n^2\omega^2 + \omega'^2)^2}} \\ \angle P^n = \text{sgn}(n) \tan^{-1} \left(\frac{\omega'^2 - n^2\omega^2}{Kn\omega\omega'} \right) - \frac{\pi}{2} (1 - \text{sgn}(n^2\omega + n\omega')) \end{cases} \quad (6)$$

$$|V_{\beta}^{+}| = |V_{\alpha}^{+}|; \angle V_{\beta}^{+} = \angle V_{\alpha}^{+} - \text{sgn}(n) \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

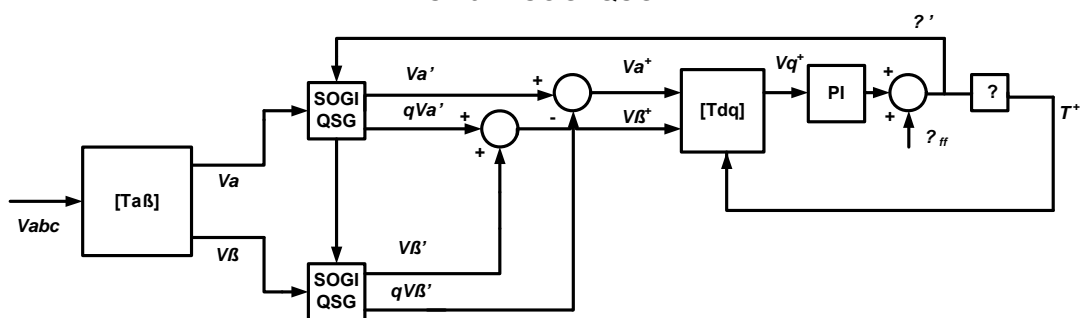
$$[T_{dq}] = \begin{bmatrix} \cos \theta^+ & \sin \theta^+ \\ -\sin \theta^+ & \cos \theta^+ \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[T_{dq}] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

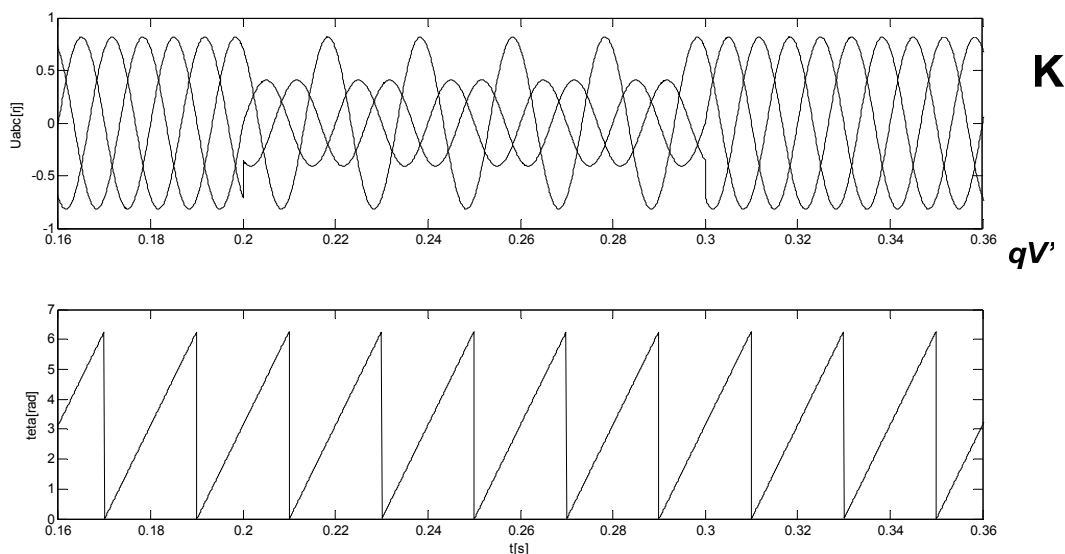
Vrednosti proporcionalnog, odnosno integralnog dejstva PI regulatora iznose $K_p=2.22$ i $K_i=61.69$, a postupak njihovog proračuna je dat u [9]. Na Slici 9 je prikazan odziv DSOGI-PLL u slučaju pojave propada mrežnog napona tipa C, gde su vrednosti napona u fazama b i c pale na 50% nazivne vrednosti. Vidi se da dati algoritam dobro estimira fazni stav mrežnih napona, bez obzira što je u mreži nastupio kratkotrajni propad napona. Na Slici 10 je prikazana još kritičnija situacija, gde je osim propada napona nastala i promena mrežne učestanosti. Ovde je, zbog preglednosti, načinjen prilično veliki skok mrežne učestanosti sa 50Hz na 60Hz. Vidi se da i u ovom slučaju algoritam dobro estimira fazni stav mrežnog napona.



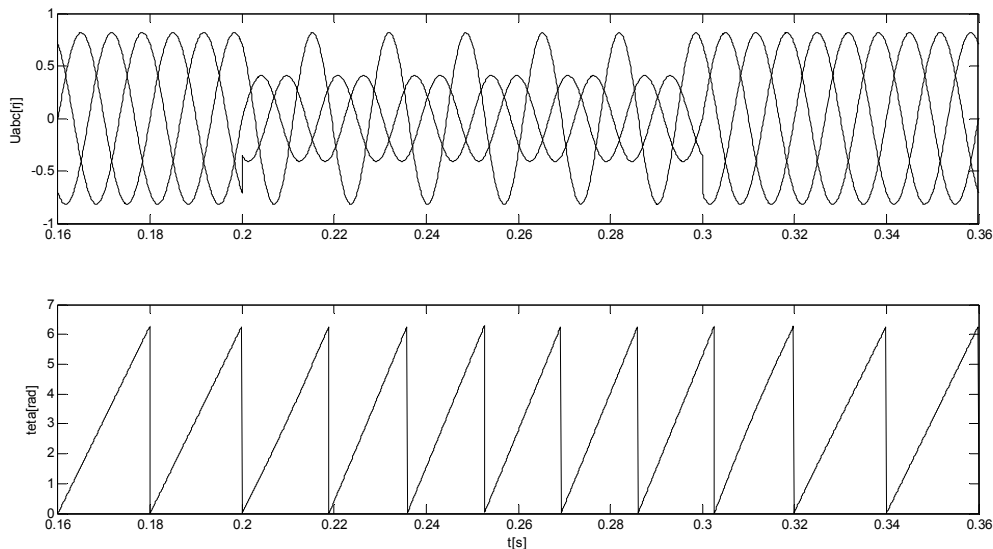
Slika 7. SOGI-QSG



Slika 8. DSOGI-PLL



Slika 9. Rezultati simulacije DSOGI-PLL algoritma u slučaju pojave propada mrežnog napona tipa



Slika 10. Rezultati simulacije DSOGI-PLL algoritma u slučaju propada mrežnog napona tipa C i poremećaja mrežne učestanosti

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

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

Za ostale veličine korišćeni su sledeći parametri:

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

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

ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni zahtevi mreže različitih elektroprivrednih firmi i dato je njihovo poređenje, uz zaključak da oni ne odsupaju mnogo jedni od drugih, što svakako ide u prilog njihovom olakšanom unificiranju u budućnosti. Zatim su prikazani poboljšani upravljački algoritmi koji obezbeđuju robusno upravljanje vetroelektranom, kao i efikasnu sinhronizaciju sa mrežom, u skladu sa analiziranim zahtevima mreže. Na taj način se raspoloživa energija vetra može i dalje injektovati u električnu mrežu, nezavisno od poremećaja u samoj mreži, što obezbeđuje optimalnu iskorišćenost same vetroelektrane.

LITERATURA

1. EON Netz, German TSO, 2005, "Grid Code, High and extra high voltage"
2. Hydro-Electric Transmission Ltd., Scottish TSO, 2006, "Scottish Grid Code"
3. ESB National Grid, Irish TSO, 2005, "Wind Farm Power Station Grid Code Provisions"
4. Bimal B., 2002, "Modern power electronics and AC drives", Prentice Hall, New York
5. Boldea I., Nasser S., 2006, "Electric Drives", Taylor & Francis, New York
6. 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., ISBN 1-4244-0121-6.
7. A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, "Wind-Turbine Fault Ride-Through Enhancement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 4, pp. 1929 – 1937, Nov. 2005.

8. P. Rodriugez, R. Teodorescu, I. Candela, A.V. Timbus, M. Liserre and F. Blaabjerg, "New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions", *IEEE PESC'06 2006*, pp. 1-7, June 2006.
9. S. Chung, "A phase tracking system for three phase utility interface inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 15, pp. 431-438, May 2000.