

## PRIKLJUČENJE VJETROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM

Dunja SRPAK

### SAŽETAK

*Članak opisuje načine priključenja i upravljanja današnjih vjetroelektrana spojenih na fiksnu mrežu, te navodi probleme koje u sistemu čine priključene vjetroelektrane zbog nestalnosti pogona. Osim toga je prikazana topologija jednog od mrežnih pretvarača novije generacije koji ima znatno bolja regulaciona svojstva od danas komercijalno korištenih mrežnih pretvarača. Na kraju je dan i pregled postojećih vjetroelektrana u Hrvatskoj i vjetroelektrana u izgradnji sa smjernicama za poboljšanje stabilnosti sistema sa većom integracijom vjetroelektrana.*

### ABSTRACT

*This article describes the way of connections and control of nowadays wind power plants connected to fixed power network, and presents problems that are caused by wind plants because their operative instability. It is also described topology of a newer with better regulations capabilities then today commercial used grid converters. At the end of this paper there is a review of existing wind power plants in Croatia and those in construction with guidelines for improvement of system stability with high wind energy penetration.*

### 1. UVOD

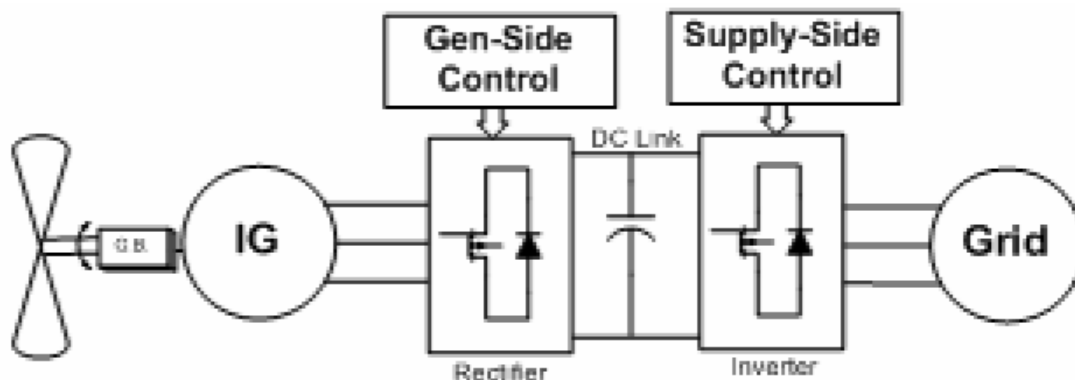
Vjetroelektranu čini niz vjetroagregata (prostorno blizu smještenih) koji su preko zajedničkog rasklopnog postrojenja spojeni na električnu mrežu. Osnovni dio vjetroagregata je vjetroturbina spojena (direktno ili preko multiplikatora) sa generatorom (sinkronim ili asinkronim). Električna energija proizvedena u generatoru se zatim mora transformirati u takav oblik (iznosom napona, faznim kutem) kakav zahtijeva mreža u točki na koju je priključena elektrana. Za optimalnan pogon elektroenergetskog sistema potrebno je pravilno odabrati strategije upravljanja sistemom kod različitih udjela energije iz obnovljivih izvora (vjetroelektrana) na promatranom području, ovisno o snagama vjetroelektrana, kombiniranju primjene različitih obnovljivih izvora sa različitim omjerom udjela svake od njih ili rezervnih izvora koji se mogu brzo priključiti na sistem kod isključenja vjetroelektrane...

## 2. NAČINI PRIKLJUČENJA VJETROELEKTRANE NA MREŽU I PRILAGODBE NA MREŽNI NAPON

Vjetroagregati se, obzirom na mogućnosti upravljanja i regulacije, mogu svrstati u četiri osnovne skupine: s fiksnom brzinom vrtnje, s ograničeno promjenljivom brzinom (s promjenljivim otporom u krugu rotora), s dvostrano napajanim asinkronim generatorom (DFIG – doubly fed induction generator) i potpuno upravljivi vjetroagregati (FSWT – full scale wind turbine). Prve dvije skupine su dosta raširene jer su krajem 20.-og stoljeća bile jeftinije i jednostavnije, ali danas se izbjegavaju jer se njima ne može lako upravljati i udovoljiti suvremenim zahtjevima vođenja elektroenergetskog sistema.

Generatori direktno spojeni s mrežom, fiksne brzine vrtnje, imaju manju iskoristivost. Kod vjetroagregata sa promjenljivom brzinom, brzina vrtnje generatora, osim o opterećenju, ovisi i o brzini vjetra, te se za dobivanje fiksne frekvencije na mjestu spoja s mrežom, mora postići odvajanje izlaznog napona koji je na frekvenciji mreže od proizvedenog napona promjenljive frekvencije. Zbog povećanog razvoja energetske elektronike, danas se to uglavnom postiže korištenjem upravljivih pretvarača. Kod vjetroelektrane sa dvostrano napajanim asinkronim generatorom promjena brzine se postiže regulacijom uzbude pri čemu pretvarač ne mora biti predviđen za ukupnu snagu koja se predaje u mrežu, što je prednost obzirom na cijenu pretvarača, ali je nedostatak to što generator ima klizne kolute i četkice.

Česta je upotreba frekvencijskog pretvarača koji se sastoji od dva trofazna pretvarača frekvencije i napona, te istosmjernog međukruga. Takav se pretvarač u literaturi često naziva back - to - back pretvarač [6]. Trofazni pretvarač na strani generatora naziva se generatorski pretvarač, a na strani mreže mrežni pretvarač. Frekvencijski pretvarač u tom slučaju mora biti dimenzioniran za nazivnu snagu vjetroagregata (engl. Full scale converter).



Sl. 1. Vjetroagregat sa asinkronim generatorom i back – to – back pretvaračem [6].

Generatorski pretvarač pretvara proizvedenu izmjeničnu energiju u istosmjernu i upravljanjem generatorskim pretvaračem se regulira proizvedena količina radne energije (ukupne energije). Uloga mrežnog pretvarača je pretvaranje napona istosmjernog međukruga u izmjenični trofazni napon, s tim da se pri tom se uz radnu energiju, u mrežu treba isporučiti

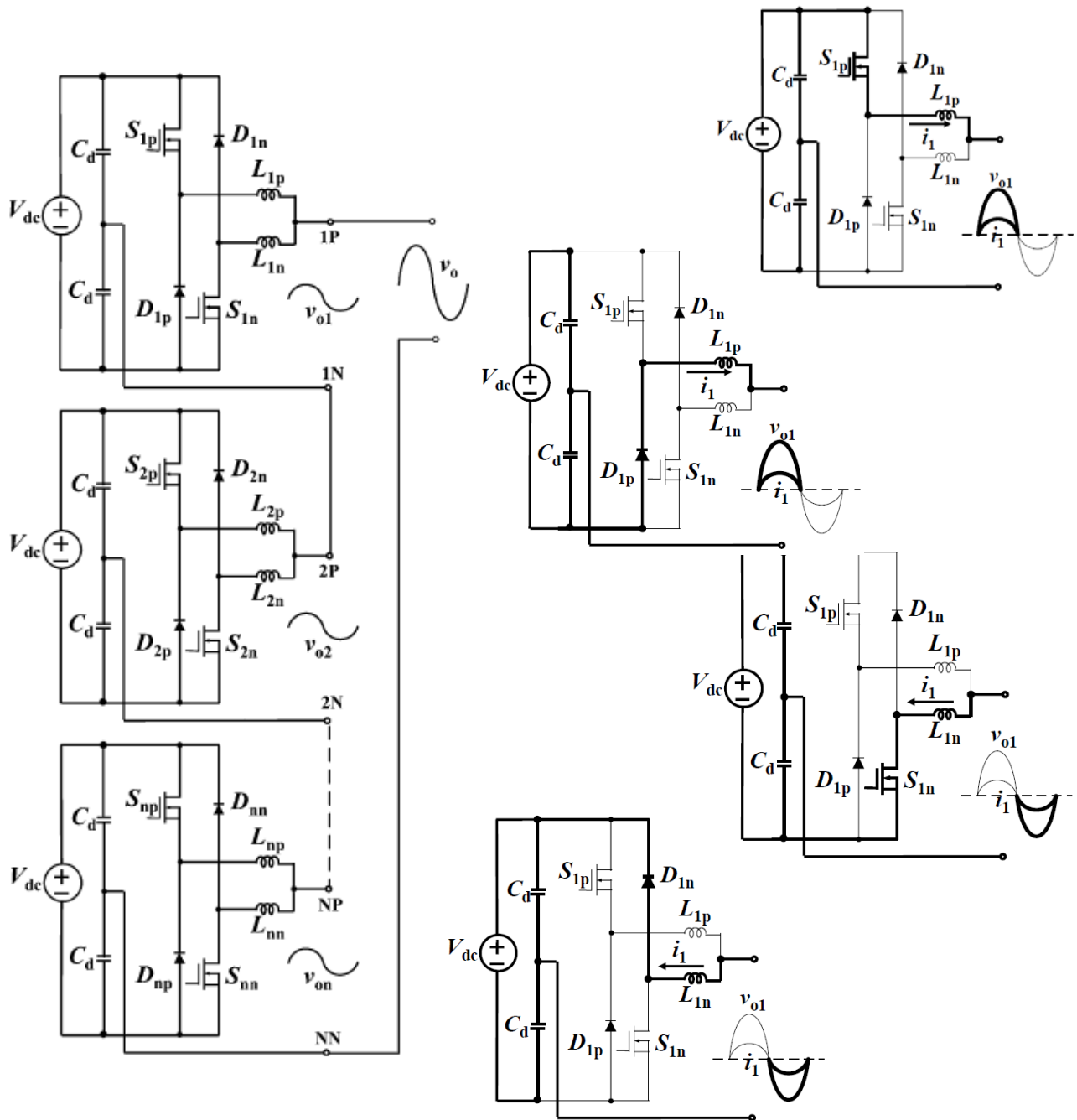
i odgovarajući zahtijevani iznos jalove energije. Dok god je napon istosmjernog međukruga na nazivnoj vrijednosti sva proizvedena snaga se preko mrežnog pretvarača može predati u mrežu.

Istosmjerni međukrug odvaja dva pretvarača te je moguće upravljati svakim pretvaračem zasebno uz održavanje napona istosmjernog međukruga približno konstantnim. Mrežni pretvarač odgovoran je između ostalog za postizanje odgovarajuće kvalitete električne energije koja se daje u mrežu (u skladu s nacionalnim propisima).

Kod vjetroelektrana upravljanje mrežnim pretvaračem (inverterom) uključuje manipulaciju indeksom modulacije referentnog sinusnog signala za PWM generator impulsa. To se postiže definiranjem napona istosmjernog međukruga tehnikom raspodjele snage koja sadrži maksimalnu snagu za određene karakteristike istosmjernog napona. Daljnje poboljšanje upravljanja je kontrola frekvencije statora, budući da se i ona mijenja s promjenom napona istosmjernog kruga. Ta regulacija je usporediva sa MPPT (maximum power point tracking) kod fotonaponskih sustava, odnosno mrežni izmjenjivači koji se koriste kod vjetroelektrana su istog tipa kao kod elektrana sa fotonaponskim panelima (ulaz u izmjenjivač se prilagođava optimalnoj točki rada), za razliku od npr. kod elektrana sa gorivim ćelijama kod kojih se ulaz u izmjenjivač mijenja balansiranjem elektrane (BOP – balance of plant). Vjetromjer mjeri brzinu vjetra i daje referencu u MPPT kontroler. Ta referenca se uspoređuje sa trenutnom proizvodnjom i određuje se nova radna točka istosmjernog napona, te se prema tome korigira PWM signal (metoda predviđanja vjetra). MPPT se izvodi na generatorskoj strani, tj. određuje se optimalna brzina rotora za svaku brzinu vjetra, da bi se postigla maksimalna snaga rotora (mjeri se napon i struja u istosmjernom krugu, računa snaga generatora i mijenja radna točka (povećanjem ili smanjenjem strujne reference). Mrežni pretvarač upravlja linijskom (mrežnom) strujom tako da bude sinusoidalna, te da daje zahtijevani faktor snage (omjer radne i jalove energije), prema zahtjevima operatera. Referenca za radnu snagu ide na generatorsku stranu, a za jalovu snagu na mrežnu stranu pretvarača. Za potrebe očuvanja napona mreže injektiranjem jalove energije, od pretvarača se može zahtijevati i rad u točki koja ne odgovara optimalnoj. [6]

### 3. RAZVOJ NOVIH TOPOLOGIJA MREŽNIH IZMJENJIVAČA

Da bi vjetroelektrana imala što bolja upravljačka svojstva i mogla brže odgovoriti na zahtjeve operatera (potrebe mreže), moguće je primjenjivati suvremene mrežom upravljane izmjenjivače, prilagođene za pogon vjetroelektrana. Jedan od novijih primjera je izmjenjivač u kaskadnom spoju (engl. *Cascade dual-buck inverter*), opisan u [4]. Kod ovih izmjenjivača se kaskadnim spojem može dobiti viši napon na izlazu (nema potrebe za transformatorom na izlazu) (sl. 2.).

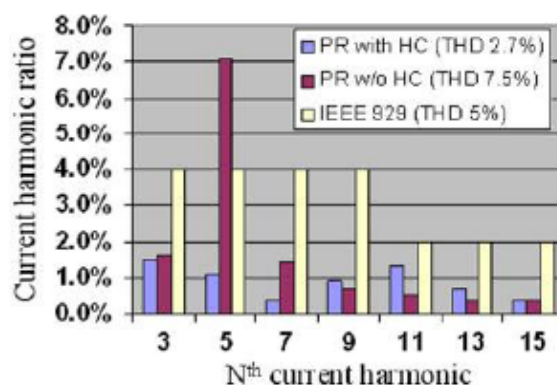


Sl. 2: Topologija kaskadnog dvostrukog silaznog polumosnog pretvarača [4]

Bolja upravljačka svojstva i veće iskorištenje svakog agregata. ovaj pretvarač postiže jer se upravlja mrežnim stranama pretvarača (izmjenjivačima) pojedinih vjetroagregata tako da se samo ukupni izlazni napon (zbroj svih pojedinih izlaznih napona) mora prilagoditi potrebama mreže, dok se svaki agregat može koristiti u optimalnoj radnoj točki u svakom trenutku. Ujedno izlazni napon ima bolja dinamička svojstva i znatno manji udio viših harmonika u struji koju pretvarač daje u mrežu, koji je prikazan faktorom ukupnog harmoničkog izobličenja struje (engl. Total harmonic distortion, THD).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{50} I^2(h)}}{I(1)} \quad (1)$$

Gdje je  $h$  redni broj harmonika, a  $I(h)$  je srednja vrijednost  $h$ -tog harmonika struje. Za vjetroelektrane maksimalni dopušteni iznos THD-a struje koja se emitira u mrežu određen je nacionalnim i drugim propisima (najčešće iznosi 5%).



Sl. 3: Iznosi (u % od osnovnog harmonika) pojedinih harmonika i ukupni TDH mjereno kod izmjenjivača u kaskadnom spoju sa i bez harmoničkog kompenzatora, u odnosu na propisane vrijednosti [4]

#### 4. UVJETI ZA VJETROELEKTRANE PRIKLJUČENE NA MREŽU

Prilikom priključenja vjetroelektrana (VE) na mrežu u propisima većine zemalja sa povećanim udjelom proizvedene energije iz obnovljivih izvora postavljaju se određeni zahtjevi u upravljanju vjetroturbinama sa promjenljivom brzinom vrtnje kao što su:

- upravljanje radnom energijom – prema zahtjevima operatera elektroenergetskog sistema (EES-a), odnosno treba biti moguće povećati ili smanjiti izlaznu radnu snagu iz radne točke u zahtijevanu točku.
- upravljanje jalovom snagom – na izlazu iz VE prema promjenama napona u točki priključka VE na EES.
- nastavak rada VE prilikom kvara u mreži (pri čemu napon znatno pada) dodavanjem reaktivne snage, te povratak na radnu energiju nakon prolaska smetnje (FRT – fault ride through)
- kontrola frekvencije i stabilizacija frekvencije pri odstupanju od nazivne, uzrokovanom debalansom proizvedene energije i trenutne potrošnje. [3]

U Hrvatskoj su trenutno u pogonu slijedeće vjetroelektrane (sa navedenom ukupnom radnom snagom i godinom puštanja u rad):

- Vjetroelektrana Ravne 1, Pag, 7 vjetroagregata, 5,95 MW, 2004.g.
- Vjetroelektrana Trtar-Krtolin, Šibenik, 14 vjetroagregata, 11,2 MW, 2006.g.
- Vjetroelektrana Orlice, Šibenik, 11 vjetroagregata, 9,6 MW, 2009.g.
- Vjetroelektrana Crno brdo, Šibenik, 7 vjetroagregata, 10 MW, 2011.g.
- Vjetroelektrana Vrataruša, Senj, 14 vjetroagregata, 42MW, 2011.g.
- Vjetroelektrana Velika Popina, Gračac, 4 vjetroagregata, 9,2MW, 2011.g.
- Vjetroelektrana Bruška, Benkovac, 16 vjetroagregata, 36,8MW, 2012.g.
- Vjetroelektrana Pometeno Brdo, Dugopolje, 16 vjetroagregata, 17,5MW, 2012.g.

Vjetroelektrane trenutno u probnom pogonu ili u izgradnji su:

- Vjetroelektrana Pelješac, Ponikve - 14 vjetrogeneratora, 34 MW (probni pogon)
- Vjetroelektrana Jelinak, Trogir - 20 vjetrogeneratora, 30 MW (probni pogon)
- Vjetroelektrana Čičarija, Čičarija - 34 vjetrogeneratora, 80 MW
- Vjetroelektrana Glunča, Šibenik - 10 vjetrogeneratora, 23 MW
- Vjetroelektrana Danilo, Šibenik - 19 vjetrogeneratora, 43,7 MW
- Vjetroelektrana Rudine, Slano - 12 vjetrogeneratora, 27,6 MW
- Vjetroelektrana Mravinjac, Dubrovačko primorje - 29 vjetrogeneratora, 87 MW

Usluge koje bi vjetroelektrane u Republici Hrvatskoj mogle pružati kao npr.: održavanje frekvencije, održavanje napona i sposobnost prolaska kroz propad napona (FRT), mogućnost proizvodnje jalove snage, te djelovanje u hitnim slučajevima, računaju se kao pomoćne usluge. Pomoćne usluge vjetroelektrana su fizički ograničene na određeno područje, te je njihovo organiziranje na širem zemljopisnom području tehnički zahtjevno i ekonomski neopravdano. Sve pomoćne usluge moraju biti plaćene obzirom da sve ove usluge uzrokuju određeni trošak na strani pružatelja usluge. Preduvjet za stvaranje tržišta pomoćnih usluga je organizirano i funkcionalno tržište električne energije koje u Hrvatskoj još nije uspostavljeno zbog nedostatka odgovarajućih podzakonskih akata.

Mrežnim pravilima hrvatskog elektroenergetskog sustava određeno je da svaki proizvođač mora udovoljiti dodatnim uvjetima operatora prijenosnog sustava i mora pružiti pomoćne usluge kad operator prijenosnog sustava to zatraži. Vjetroelektrane snage iznad 10 MW trebaju imati mogućnost proizvodnje jalove snage i automatske regulacije napona na priključnim 110 kV sabirnicama vjetroelektrane u određenom opsegu od kapacitivnog do induktivnog područja (barem od 0,95 kap. do 0,95 ind. ) i regulaciju frekvencije. Vjetroelektrane trebaju imati sposobnost prolaska vjetroelektrane kroz propad napona, moraju biti sposobne proći kroz stanje propada napona na 15 % nazivne vrijednosti tijekom 625 ms, a da se pritom ne isključe s mreže. Vjetroelektrane manje instalirane snage ne sudjeluju u regulaciji frekvencije i napona, već se u slučaju pojave poremećaja isključuju te kasnije ponovno priključuju nakon uspostavljanja uvjeta normalnog pogona. [5]

U Hrvatskoj se vjetroelektrane priključuju na distribucijsku mrežu (10 kV, 20kV i 35 kV) (do 10 MW) i prijenosnu 110 kV, 220kV i 400 kV (>10 MW). Za mogućnost uklapanja vjetroelektrana velikih snaga u elektroenergetski sistem, te usklađivanje njihova rada s ostalim klasičnim proizvodnim objektima/elektranama (termoelektrane, hidroelektrane) i razmjenom električne energije sa inozemstvom uvjetovana je s tehničkog gledišta potrebno je razmotriti:

- stanje prijenosne mreže (110 kV, 220 kV i 400 kV) (sadašnje stanje i njen razvoj) koja će omogućiti siguran plasman i prijenos proizvedene električne energije iz postojećih i novih elektrana do potrošača/ drugih mreža.
- sistemski utjecaj na planiranje i pogon elektroenergetskog sustava s relativno visokim udjelom vjetroelektrana (rezervacija sekundarne i tercijarne snage, angažiranje rezerve za regulaciju, uravnoteženje, regulacija napona i jalove snage, rješavanje poremećaja u sustavu)
- probleme vezane za dinamičku stabilnost EES-a s visokim udjelom vjetroelektrana.

Promjenjivost proizvodnje vjetroelektrana (vremenski i prostorno - fluktuacija snage) uvjetovana je promjenljivošću inteziteta vjetra na svim vremenskim razinama, što zahtijeva da se pogon klasičnih elektrana mora prilagođavati kako bi se osigurala stalna ravnoteža proizvodnje i potrošnje električne energije. Mogućnosti takve podrške su ograničene, a vezane su za strukturu ostalih elektrana u sustavu. Hidroelektrane su idealni komplement vjetroelektrana u tom smislu, budući da su, pogotovo akumulacijske hidroelektrane i naročito reverzibilne elektrane, u mogućnosti osigurati brzu regulaciju djelatne snage na razini primarne, sekundarne i tercijarne regulacije, a također i prilagođavanje proizvodnje na satnom, dnevnom, tjednom i višemjesečnom nivou. [2]

Pri analizi problema plasmata proizvodnje vjetroelektrana u prijenosnu mrežu, te zahtjeva za regulacijskim uslugama unutar sustava (P/f, Q/U regulacija) koje izaziva povećani udio vjetroelektrana u proizvodnji električne energije, razmatra se najprije statički aspekt (tokovi snaga, n-1 sigurnost) kako bi se provjerile mogućnosti prijenosne mreže da prenese njihovu proizvodnju s obzirom na dopuštena opterećenja vodova i naponske prilike, uz zadovoljavajuću sigurnost pogona definiranu mrežnim pravilima. Zatim se pri svakom pojedinačnom zahtjevu za priključak nove vjetroelektrane mora izraditi analiza dinamičkog utjecaja rada vjetroelektrane na elektroenergetski sistem, posebno s obzirom na njihovo ponašanje u slučajevima kratkih spojeva (karakteristike prolaza kroz stanje kvara), te obzirom na oscilacije i regulaciju frekvencije i napona.

Budući da je proizvodnja vjetroelektrana izrazito stohastičke naravi, unatoč značajnom razvoju sistema predviđanja teško ju je u potpunosti točno predvidjeti. Ipak, moguće je određenim mjerama, u kratkoročnom ili srednjoročnom razdoblju, povećati ukupnu snagu vjetroelektrana koje se mogu priključiti u hrvatski EES, a da sigurnost pogona bude zadovoljavajuća. Te mjere su slijedeće:

- Revidiranje provedenih analiza na temelju stečenih pogonskih iskustava u pogonu vjetroelektrana unutar elektroenergetskog sistema;
- Uvođenje kvalitetne prognoze brzine vjetra na lokacijama vjetroelektrana i kretanja snage vjetroelektrana za razdoblje do barem 48 sati;
- Uvođenje naknada za pružanje pomoćnih usluga sustavu;
- Nabava prekograničnih pomoćnih usluga sustavu;
- Uključivanje većeg broja elektrana u sekundarnu P/f regulaciju;
- Modernizacija i obuka osoblja nacionalnog dispečerskog centra i regionalnih mrežnih centara upravljanja;
- Razvoj, izgradnja i revitalizacija prijenosne mreže. [5]

## 5. ZAKLJUČAK

Zbog stohastičke prirode vjetra, postoje vremenska razdoblja u kojima su pojedine vjetroelektrane potpuno van pogona (premale i prevelike brzine vjetra), tako da EES mora imati osigurane dovoljne rezervne kapacitete. Rađene studije su pokazale da regulacijske elektrane (sekundarna regulacija) trebaju biti oko 50% ukupne instalirane snage VE, dok dnevna, 48-satna i mjesečna rezerva (sekundarna i tercijarna regulacija) treba biti na razini 100% ukupne instalirane snage VE.

U vremenu dok vjetroelektrane proizvode električnu energiju (brzina vjetra je u radnom rasponu), snaga koju mogu predati u mrežu se mijenja ovisno o brzini vjetra. Kako bi se smanjili udari predane energije u mrežu, potrebno je optimalno upravljanje svim proizvodnim kapacitetima u skladu sa promjenama potrošnje. S toga bi, s tehničkog stajališta, bilo bolje da vjetroelektrane rade sa sniženom izlaznom snagom (u % od  $P_{max}$ , ili za fiksni iznos manje), kako bi po potrebi, na zahtijev operatera, mogle dati tu rezervu, odnosno da daju konstantan iznos u mrežu unatoč oscilacijama brzine vjetra. Pri tome je nužno ugovorno i zakonski regulirati iznos nadoknade vlasnicima kod isporučivanja manje energije u mrežu nego su bile mogućnosti, ako je uzrok tome zahtijev mrežnog operatera.

## 6. LITERATURA

- [1] I. Čičak, G. Benčić, „Vjetroelektrane – razvoj i konstrukcijska rješenja“, 8. Savjetovanje Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Umag, 2010.
- [2] M. Lovrić, „Problematika uklapanja/integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Hrvatske“, HEP – OPS d.o.o., Prezentacija na FER-u, Zagreb, 20.03.2012.
- [3] O. Goksu, R. Teodorescu, P. Rodriguez, L. Helle, „A Review of the State of the Art in Control of Variable-Speed Wind Turbines“, Paper presented at 9th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, Aarhus, Denmark, 2010.



- [4] P. Sun, C. Liu, J.S. Lai, C.L. Chen „Grid – Tie Control of Cascade Dual Buck Inverter With Wide – Range Power Flow Capability for Renewable Energy Applications“, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS VOL.27, NO.4, APRIL 2012
- [5] F. Šikić, V. Švarc „Problem priključka vjetroelektrana na prijenosni elektroenergetski sustav i osiguravanje uvjeta za njihov siguran i stabilan pogon“, 8. Simpozij o sustavu vođenja EES-a, Cavtat, 2008.
- [6] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A.M. Knight „A review of Power Converter Topologies For Wind Generators“, Electric Machines and Drives, IEEE International Conference, May 2005

## **NASLOV AVTORJEV**

Dunja Srpak, dipl.inž.el.

Veleučilište u Varaždinu, Križanićeva ulica 33, 42000 Varaždin, Hrvatska

Tel: + 385 98 821 891

Elektronska pošta: [dunja.srpak@velv.hr](mailto:dunja.srpak@velv.hr)