

PREGLED STANJA U OBLASTI RAZVOJA GENERATORSKIH ŠEMA ZA VEZIVANJE VETROGENERATORA NA STANDARDNU DISTRIBUTIVNU MREŽU

Leposava Ristić, Zoran Stojiljković, Borislav Jeftenić¹

Ključne reči: Šeme za generisanje električne energije, vetrogeneratori, CSCF sistemi, VSCF sistemi, dvostrano napajani asinhroni generatori, poređenje savremenih koncepata vetro sistema

SADRŽAJ:

Rad prikazuje pregled stanja u oblasti razvoja generatorskih šema za generisanje električne energije iz energije vetra, koje su pogodne za direktno vezivanje na standardnu distributivnu mrežu. Mogu se generalno podeliti u dve grupe, konstantna brzina konstantna učestanost (CSCF) i varijabilna brzina konstantna učestanost (VSCF). U radu se razmatraju varijante VSCF sistema za razne nivoe energije i vrši se njihovo poređenje u pogledu radnih karakteristika i efikasnosti.

1. UVOD:

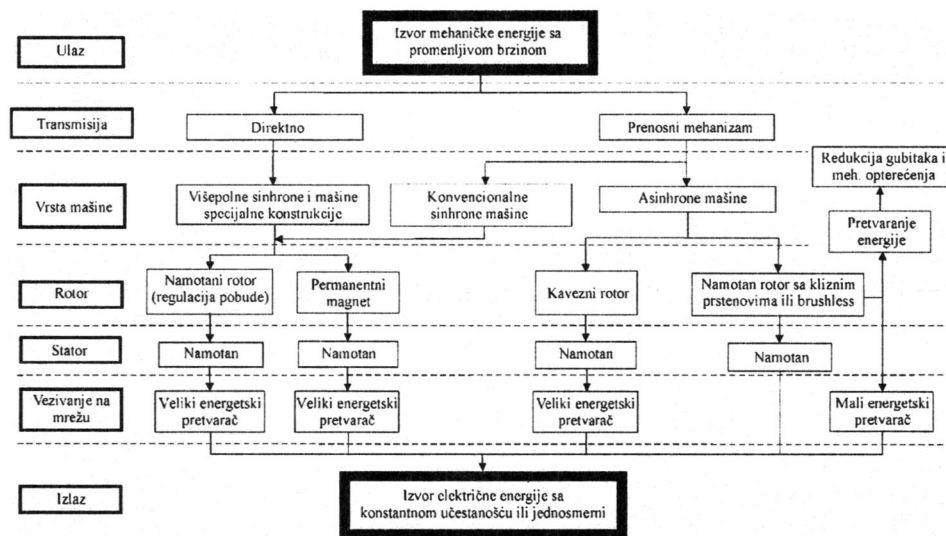
U toku poslednjih 5 godina proizvodnja električne energije iz vetroenergije se učetvorostručila, zbog čega energija vetra beleži najdinamičniji godišnji porast instalisane snage, od svih energetske izvora [1]. Evropska zajednica je, revizijom svoje energetske strategije, povećala cilj sa 20 000 na 40 000 MW instalisane snage do 2010. godine.

Po važećim svetskim kriterijumima, vetar predstavlja značajan energetske resurs Srbije. Zvanični podaci ukazuju da je cena električne energije koju proizvedu vetrogeneratori, za određene lokacije, već konkurentna sa klasičnim izvorima, pa je pitanje vremena kada će se u Srbiji instalirati prvi savremeni vetrogeneratori za proizvodnju električne energije.

¹ Prof. dr Zoran Stojiljković, Prof. dr Borislav Jeftenić, asist. mr Leposava Ristić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, p.f. 35-54, 11120 Beograd

2. GENERATORSKE ŠEME

Brzina vetra varira u vremenu, a time i brzina rotora turbine, pa je izlazni naizmenični napon standardnih generatora promenljive učestanosti, što je, naravno, nepogodno za vezivanje na standardnu distributivnu mrežu. Vetroturbine mogu biti predviđene za različite načine povezivanja na mrežu [2]: direktno (CSCF - *Constant Speed Constant Frequency*) i indirektno (VSCF - *Variable Speed Constant Frequency*, vetrogenerator radi na svojoj sopstvenoj mini mreži naizmenične struje, u kojoj se regulacija vrši korišćenjem invertora, tako da učestanost naizmenične struje u statoru generatora može da se menja). Do sada poznate generatorske šeme mogu se klasifikovati na više načina, od kojih je jedan (za VSCF sisteme) prikazan na slici 1, [3].



Slika 1: Generatorske šeme za VSCF sisteme

Najčešće se koriste **asinhroni generatori** zbog svoje pouzdanosti i niske cene. Maksimalnu snagu postižu za brzine malo veće od sinhronne (rade u malom opsegu brzina). Generatorske šeme sa asinhronim generatorom (AG), prisutne u literaturi, su [4]:

1. AG vezan na mrežu sa kaveznim kratkospojenim rotorom
2. AG sa namotanim rotorom i eksternim rotorskim otpornicima
3. AG sa regulacijom klizanja (*slip power recovery*) korišćenjem diodnog ispravljača. Rotorska struja se ispravlja pomoću diodnog ispravljača: vraća se nazad u mrežu (*Scherbius drive* – još uvek se koristi) ili se korišćenjem motora za jednosmernu struju (MJS), mehanički spregnutog sa osovinom AG-a, proizvodi mehanička energija (*Krämmer drive* – zbog dodatnog MJS nije od interesa)
4. AG čiji se statorski namotaj napaja iz invertora: (koristi se U/f regulacija ili vektorska kontrola)
5. Dvostrano napajani AG:

Za pobudu rotorskih namotaja koristi se serijski rezonantni inverter [5]. Tim rešenjem dobijene su dve pogodnosti: prva, za pobudu je potreban samo mali procenat ukupne snage mašine, i druga, rezonantni inverter eliminiše probleme velikih prekidačkih gubitaka, harmonijske smetnje i naprezanja prekidačkih komponenti. Serijski rezonantni inverter vezan je za rotorske namotaje preko kliznih prstenova, koji mogu biti izbegnuti ako se koristi *brushless* AG sa namotanim rotorom. Obezbeđuje sve potrebne funkcije: četvorokvadratni i bidirekcionni tok energije, upravljivi izlazni napon i učestanost, održavanje faktora snage na jedinici, bez obzira na stanje opterećenja, i eliminacija niskopropusnih harmonijskih filtera. Pretvarač radi na učestanosti oko 10kHz.

- a) standardni dvostrano napajani AG (DNAG, rotor sa kliznim prstenovima)
- b) kaskadni DNAG (sastoji se od dva DNAG-a sa namotanim rotorima, kod kojih su namotaji rotora električno spojeni, a rotorske osovine mehanički; stator jednog AG –a je direktno vezan na mrežu a drugog preko invertora)
- c) jednomodulni kaskadni DNAG
- d) *brushless* DNAG (dva statorska namotaja u istim žlebovima; jedan za generisanje el. energije, a drugi za regulaciju; imaju različiti broj pari polova ($2p$), a rotor može da ima broj pari polova, jednak zbiru $2p$ ova dva namotaja)
- e) dvostrano napajana reluktantna mašina (stator je isti kao u prethodnom slučaju, a rotor je konstruisan na osnovu principa reluktantnosti)

AC-DC-AC konverzija (ADA): Izlazni napon generatora promenljive učestanosti se ispravlja u jednosmerni, a potom, uz pomoć invertora, konvertuje u naizmienični, čija je učestanost jednaka mrežnoj. Primena ADA konverzije u vetrogeneratorским sistemima je ograničena cenom uređaja energetskih pretvarača. Međutim, za isti iznos snage jednosmerni prenos je jeftiniji od naizmieničnog, pa postoji karakteristična dužina prenosnog puta kod koje se izjednačuje razlika cene ulaganja u prenosni put sa cenom energetskih pretvarača AC-DC-AC. Ta rastojanja u praksi nisu velika, pa je zato ADA sistem konkurentan u odnosu na ostale generatorske šeme (naročito pogodan za vetro turbine udaljene od distributivne mreže).

Generator sa modulisanom pobudom:

Izlazni napon generatora pobuđenog mrežnim naponom umesto jednosmernim je amplitudno modulisan talas prema relaciji

$$U = A(\cos 2\pi f_e t)(\cos 2\pi f_r t)$$

(1)

gde je f_e učestanost pobude, a f_r rotaciona učestanost mašine. Za slučaj vetrogeneratora, za dobijanje izlazne snage na 50Hz, mašina se pobuđuje mrežnom učestanošću, a učestanost rotiranja generatora se pojavljuje kao noseća [6]. Taj uslov zahteva da f_r bude mnogo puta veća od f_e . Zato se ovakvi sistemi mogu primenjivati samo za generatore koji se vrte veoma brzo, na primer u sklopu sistema električnog napajanja letelica kod kojih je generator vezan za visokoturažnu pogonsku turbinu letelica. Izlazni napon koji je amplitudno modulisan sa ($f_r \pm 50\text{Hz}$), demoduliše se ispravljačem u jednosmerni signal (U_{dc}), zatim se kroz inverter pretvara u naizmienični signal (U_{ac}) i na kraju prolazi kroz filter za konačno čišćenje nosesće učestanosti. Da bi se postigao dobar odnos signala prema harmonicima, f_r mora biti desetak puta veće od mrežne učestanosti, što znači da bi bilo potrebno ugraditi

multiplokator sa faktorom 100, a to je u trenutnom stanju tehnologije skupo i tehnički teško izvodljivo. Ovi sistemi, bar za sada, nisu pogodni za vetrogeneratore.

Komutatorski generator: Trofazni komutatorski generator ima učestanost izlaznog napona jednaku učestanosti pobudnog signala nezavisno od brzine rotacije mašine. Komutator je doživeo tehnološki vrhunac, robustan je, jeftin i pouzdan, ima slične karakteristike jednosmernom generatoru, tako da je veoma pogodan za radne režime koji se pojavljuju u sistemima vetrogeneratora. Optimalan režim opterećenja može se dobiti programiranjem fluksa u funkciji signala proporcionalnog brzini rotora i realizovati u modernoj mikrorračunarskoj tehnologiji. Četvoropolni komutatorski generatori grade se za snage blizu 1MW. Za veće snage komutatorski generatori mogu se relativno lako vezati paralelno.

3. AKTUELNI KONCEPTI VETROTURBINA

Trenutno su primenljiva tri [7], odnosno četiri [4] koncepta vetroturbina:

1. CSCF sistem koji se sastoji od direktno priključenog na mrežu AG-a sa kaveznim rotorom.

Vetroturbina je povezana sa rotorom generatora preko prenosnog mehanizma. CSCF sistemi često poseduju po dva AG-a, jedan za male brzine vetra i jedan za velike brzine (danski koncept).

2. VSCF sistem sa dvostano napajanim AG-om (ograničeni VSCF sistem, [4])

Prednost ovog sistema se ogleda u tome što se može upotrebiti energetska pretvarač čija nominalna snaga iznosi samo trećinu nominalne snage vetroturbine, a njegova veličina se i dalje može smanjiti upotrebom prebacivača zvezda-trougao za napajanje rotorskog namotaja. Međutim, još uvek je potrebno koristiti prenosni mehanizam, što može smanjiti pouzdanost sistema. Kod vetroturbine kod koje se ne koristi prenosni mehanizam, ova prednost se gubi na taj način što se mora upotrebiti veći energetska pretvarač i komplikovaniji, teži i skuplji vetrogenerator. Najpoznatiji proizvođači ovih vetroturbina su: *DeWind, GE Wind Energy, Nordex, i Vestas*.

3. VSCF sistem sa sinhronim generatorom bez prenosnog mehanizma (potpuni VSCF sistemi sa mnogopolnim generatorom, [4])

Sinhroni generator može da ima namotani rotor ili sa permanentnim magnetima, a na mrežu se vezuje preko antiparalelnog invertora ili preko diodnog ispravljača i naponskog invertora. Sinhroni generator je niskobrzinski višepolni generator, pa nije potreban prenosni mehanizam (proizvodi *Enercon*).

4. Potpuni VSCF sistemi ([3])

Sastoji se od vetroturbine, invertora, AG-a ili SG-a i prenosnog mehanizma. Dobro je razvijen i robustan.

Različiti tipovi vetroturbina imaju svoje prednosti i mane. CSCF sistemi su relativno jednostavni i robustni, a njihovi nedostaci su [7]: nemogućnost regulacije aktivne i reaktivne snage; velika mehanička opterećenja (jer se varijacije snage prenose kao pulsacije momenta, a ovo može dovesti do oštećenja prenosnog mehanizma); velike fluktuacije izlazne snage (može dovesti do varijacija napona, i u mnogim slučajevima do pojave flikera). Proizvođači vetroturbina se uglavnom koncentrišu na proizvodnju VSCF sistema

iz sledećih razloga [7]: energetska elektronika za potrebe VSCF sistema veoma brzo pojeftinjuje i postaje pouzdanija; imaju veći stepen korisnog dejstva u poređenju sa CSCF; ostvarena je redukcija mehaničkog opterećenja; moguća je regulacija aktivne i reaktivne snage u širokom opsegu (što je naročito bitno u slučaju udaljenih lokacija i vetrogeneratora postavljenih u moru); lakše se uklapaju u zahteve koje nameću kompanije za prenos i distribuciju električne energije, a posebno u slučaju velikih farmi vetrogeneratora; kod VSCF sistema su se pokazale manje varijacije izlazne snage (jer velika inercija rotora ublažava varijacije brzine vetra i na taj način redukuje probleme sa flikerima).

4. ZAKLJUČAK

Energetska efikasnost VSCF sistema sa DNAG-om je nekoliko procenata veća u odnosu na VSCF sistem sa AG-om, ali u poređenju sa SG-om sa permanentnim magnetima, koji je direktno priključen na mrežu, postoji prednost, zahvaljujući mogućnosti da se održava optimalni odnos između brzine turbine i vetra. Većina proizvođača vetroturbina razvija nove, veće sisteme u opsegu snaga od 3 do 6 MW, a oni su svi bazirani na radu sa promenljivom brzinom i *pitch* kontrolom bez obzira da li koriste SG-e bez prenosnog mehanizma ili DNAG-e. AG-i sa *stall* kontrolom za konstantnu brzinu su nepodesni za ovako velike snage. Svako izabrano rešenje za VSCF sistem vetrogeneratora mora se podvrgnuti analizi kvaliteta i cene. Optimalni izbor je onaj koji je pogodan za priključenje na standardnu distributivnu mrežu, a minimizira cenu generisane energije.

LITERATURA

- [1] <http://www.awea.org/>
- [2] <http://www.windpower.dk/>
- [3] F. Blaabjerg, Z. Chen, P. H. Madsen: "Wind Power Technology Status, Development and Trends ", Wind Power and the Impacts on Power Systems Workshop, Oslo, Norway, 17.-18. jun 2002. <http://www.ieee.no/oslo/ieee.nsf/>
- [4] A. Petersson: "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines", Th. for the deg. of lic. of eng., Dept. of El. Power Eng. Chalmers Univ. of Techn., Göteborg, Sweden 2003, www.ieee.no/oslo/ieee.nsf/
- [5] Z. Stojiljković, B. Jeftenić: "Vezivanje vetrogeneratora za standardnu distributivnu mrežu", Izvori električne energije, br.2, pp. 245-250, 1994.
- [6] T.S. Devaiah, R.T. Smith: "Generation Schemes For Wind Power Plants", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol.11, No.4, 1975, pp.543-550
- [7] W.L. Kling, J.G. Sloopweg: " Wind Turbines as Power Plants ", Wind Power and the Impacts on Power Systems Workshop, Oslo, Norway, 17.-18. jun 2002. <http://www.ieee.no/oslo/ieee.nsf/>

STATE OF ART IN THE FIELD OF DEVELOPING ELECTRIC GENERATION SCHEMES FOR INTERCONNECTION OF WINDMILLS WITH GRID

ABSTRACT:

The paper presents the state of the art in the field of developing electric generation schemes for wind energy conversion suitable for interconnection with a power grid. The schemes can be generally classified as constant speed constant frequency (CSCF) and variable speed constant frequency (VSCF). The paper analyses different types of VSCF systems for different energy levels and compares them according to their working characteristics and efficiency.