

MODERNE TEHNOLOGIJE VETROGENERATORA

V.Katić, B.Dumnić, D.Milićević, S.Gračić, Z.Čorba, N.Katić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

SAŽETAK

Brz razvoj industrije vetrogeneratora ide u dva ključna pravca – povećanje snage, kroz povećanje dijametara rotora, odnosno kroz sve veći obuhvat kinetičke energije vetra, i povećanje efikasnosti konverzije kroz unapređenje pretvaračkih sklopova, odnosno aktivnu regulaciju brzine i postavljanje u tačku maksimalne snage. Do sada su razvijene različite konfiguracije su i one se opisuju u ovom radu. Razmatrane su tehnologije sa asinhronim i sinhronim generatorima, sa i bez multiplikatora brzine. Posebno su razmatrana i prikazana postojeća rešenja vetrogeneratora sa promenljivom brzinom. Na kraju je predstavljena i problematika priključenja vetrogeneratora na elektroenergetsku mrežu uz poštovanje Pravila o radu EES-a ili Grid Code.

Ključne reči: Energija vetra, Vetrogeneratori, Priključenje vetrogeneratora

UVOD

Vetroelektrane postaju sve značajniji izvor električne energije, a brzina rasta njihove implementacije poslednjih 10-tak godina je impresivna. Danas je već u Evropi instalirano blizu 100 GW vetrogeneratora, koji daju preko 200 TWh električne energije godišnje, što čini oko 6% ukupne potrošnje električne energije u EU [1]. Industrija vetrogeneratora u EU zapošljava direktno ili indirektno blizu 240.000 ljudi, što u današnjoj ekonomskoj krizi čini respektabilan broj [2]. Predviđanja su da će do kraja ove decenije instalisana snaga po jednim projekcijama dostići 180 GW [1], a po drugim čak 240 GW [2], pa će shodno tome učešće vetroelektrana u proizvodnji električne energije porasti na 13,4%, odnosno 16%. Očekuje se da će to doneti veliki broj novih radnih mesta, pa se procenjuje da će tada u ovom industrijskom sektoru raditi oko 520.000 ljudi [2]. Da bi se ostvario takav intenzivan rast, potrebno je dalje usavršavati tehnologiju izrade vetrogeneratora, kao i povećati njihovu pojedinačnu snagu.

MODERNE TEHNOLOGIJE KONVERZIJE ENERGIJE VETRA U ELEKTRIČNU

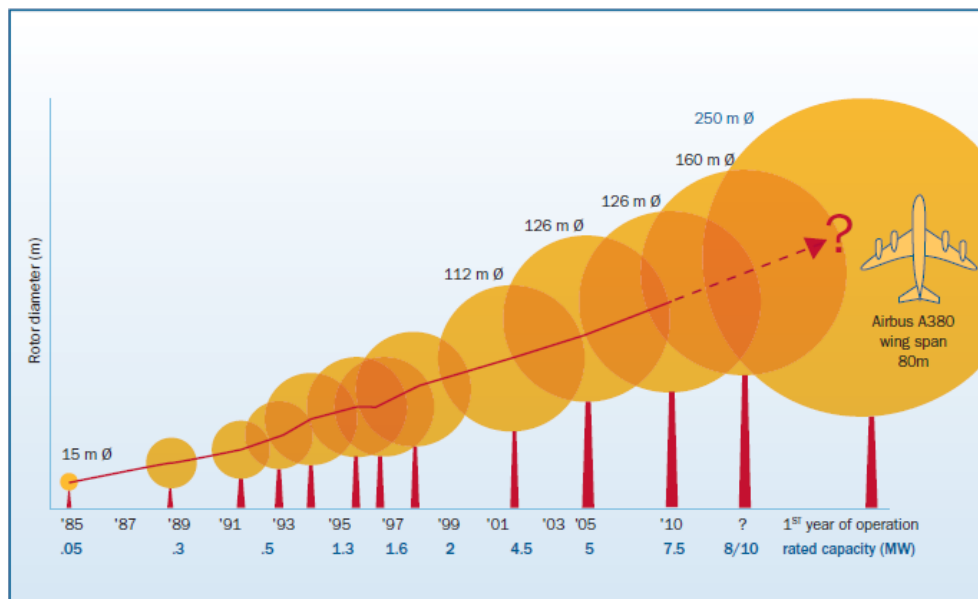
Dosadašnja rešenja sa asinhronim mašinama kaveznog ili kliznokolutnog tipa sa konstantnom ili delimično regulisanim brzinama rada nisu dovoljno energetski efikasna i sve teže mogu da odgovore sve složenijim zahtevima mreže datim u „Pravilima za rad elektroenergetskih sistema“ (*Grid Code*) [3,4]. Takođe, pitanja pouzdanosti i smanjenja troškova održavanja, posebno za vetroelektrane na moru, sve je značajnije, pa se traže nova rešenja efikasnijeg korišćenja energije vetra kroz sve veću ulogu energetskih elektronskih pretvarača kao interfejsa između generatora i mreže, kao i rada bez mehaničkih multiplikatora brzine.

Brz razvoj industrije vetrogeneratora ide u dva ključna pravca – povećanje snage, kroz povećanje dijametara rotora, odnosno kroz sve veći obuhvat kinetičke energije vetra, i povećanje efikasnosti konverzije kroz unapređenje pretvaračkih sklopova, odnosno aktivnu regulaciju brzine i postavljanje u tačku maksimalne snage.

Povećanje instalisane snage generatora

Vetrogeneratori su počeli kao male generatorske jedinice od nekoliko desetina kW i sa simboličnom ulogom u elektroenergetskom sistemu. Međutim, veoma brzo su se razvijali i u prethodnoj deceniji, jedinice od nekoliko MW su postale uobičajene. Trenutno se na tržištu javljaju vetrogeneratori snage 6 - 8 MW, s tim da se planira razvoj jedinica snage 10MW sa vizijom povećanja do čak 20 MW [5].

Na slici 1 prikazan je karakterističan ilustrativan prikaz zavisnosti prečnika rotora od instalisane snage vetrogeneratora. Vidi se da oni postaju kolosalni građevinski objekti visina većih od 100m sa prečnikom rotorskih krilca većim od najvećeg putničkog aviona današnjice Airbus-a A380 (raspon krila 80m).



Slika 1 – Zavisnost prečnika rotora od instalisane snage [5].

Povećanje efikasnosti konverzije energije vetra

U kontinuiranim naporima da se smanje troškovi, poveća pouzdanost i efikasnost sistema za konverziju energije vetra, različita rešenja su razvijena. Generalno, vetro-turbine se mogu svrstati u turbine sa fiksnom i sa regulisanom brzinom [6].

Vetrogeneratori sa fiksnom brzinom koriste kavezni asinhroni generator konektovan direktno na mrežu. Za pokretanje se koriste tiristorski energetski pretvarači u konfiguraciji „soft start“, koji su u nominalnom režimu kratko-spojeni. Taj metod tera električnu mašinu da radi na konstantnoj frekvenciji i zbog toga na približno konstantnoj brzini. Pulsacije snage vetrogeneratora se prenose direktno na

mrežu i nema kontrole aktivne i reaktivne snage, koji su tipično važni parametri za regulaciju frekvencije i napona. Priključenje na mrežu i teškoće u usaglašavanju sa „Pravilima rada EES“ predstavljaju dodatne probleme. S druge strane, ova rešenja su jednostavna, robusna i koriste postojeću, već razvijenu tehnologiju, pa su sa te strane cenovno prihvatljiva.

Poboljšano rešenje sa sinhronim generatorom sa permanentnim magnetima i pretvaračkim sklopom povezanim u zvezdištu otvorenog statora, omogućava aktivno prigušenje uz relativno malu snagu pretvarača (20% nominalne snage generatora) [7]. Međutim, to rešenje je ostalo na nivou akademskog predloga i van interesa industrije.

Vetrogeneratori sa fiksnom brzinom uglavnom su primenjeni u prvima danima korišćenja energije vetra i karakteristični su za male snage. Veće interesovanje za primenu vetrogeneratora i snažniji investicioni ciklusi, doveli su do traženja rešenja za otklanjanje gornjih ograničenja, odnosno do razvoja primene konstrukcija sa regulisanom brzinom.

Turbine sa regulisanom brzinom daju bolje iskorišćenje snage i lakše se adaptiraju potrebama mreže. Sinhroni generatori i asinhroni kavezni generatori povezani sa energetskim pretvaračkim sistemom se koriste u praktičnim izvedbama ovih vetrogeneratora. Dodatno, klizno-kolutne mašine, kao dvostruko napajani asinhroni generatori sa smanjenom snagom pretvarača ili asinhroni generatori sa spoljnom kontrolisanom otpornošću rotora, imaju praktične primene [6].

PREGLED POSTOJEĆIH REŠENJA VETROGENERATORA SA PROMENLJIVOM BRZINOM

Zbog promenljivosti brzine vetra, veoma je poželjno da pogon turbine bude sa promenljivom brzinom. Takođe, porastom snage turbine kontrolni parametri postaju sve više važni, tako da je neophodno implementirati energetsku elektroniku kao interfejs između vetro-turbine i mreže. Turbina sa promenljivom brzinom poboljšava dinamičko ponašanje turbine i omogućava pogon sa maksimalnom snagom na određenoj brzini vetra i kontrolu toka aktivne i reaktivne snage. Ostale prednosti su smanjeni mehanički stres, manje pulsacije momenta i snage, poboljšani kvalitet napona i manja buka na malim brzinama vetra [4].

Na osnovu korišćenja prenosnog mehanizma, mogu se podeliti na turbine sa direktnim ili indirektnim pogonom. Oba rešenja sinhronog generatora sa namotanim rotorom ili sa permanentnim magnetima su prihvatljiva za direktni pogon, za koje je pun energetski pretvarački sistem potreban. Mogu se koristiti i asinhroni kavezni generatori, takođe uz primenu pretvaračkog sistema tipa „back-to-back“. Ovaj sistem služi kao interfejs između generatora i mreže i sastoji se iz diodnog ili aktivnog ispravljača, jednosmernog međukola (DC link) i mrežnog invertora. Brzina generatora se prilagođava brzini turbine i time je prenosni mehanizam od manjeg značaja i može biti eliminisan.

U vetrogeneratorskim sistemima sa konfiguracijama sa multi-polnim (naprimer 72 pola) ili multi-faznim (na primer 6 faza) sinhronim generatorima mehanički multiplikator se može eliminisati [8]. To naročito važi kada generator radi na maloj brzini, tj. ima veliki broj polova. Takva turbina bez mehaničkog multiplikatora (prenosnog mehanizma) je atraktivna zbog niže cene, težine i značajno manjih troškova održavanja. Multifazni ili višenamotajni generatori su interesantni za istraživanja i zbog toga što takva topologija povećava pouzdanost celog sistema, a sa odgovarajućim dizajnom uklopnih šema, uticaj harmonika na mrežu se može značajno smanjiti [9].

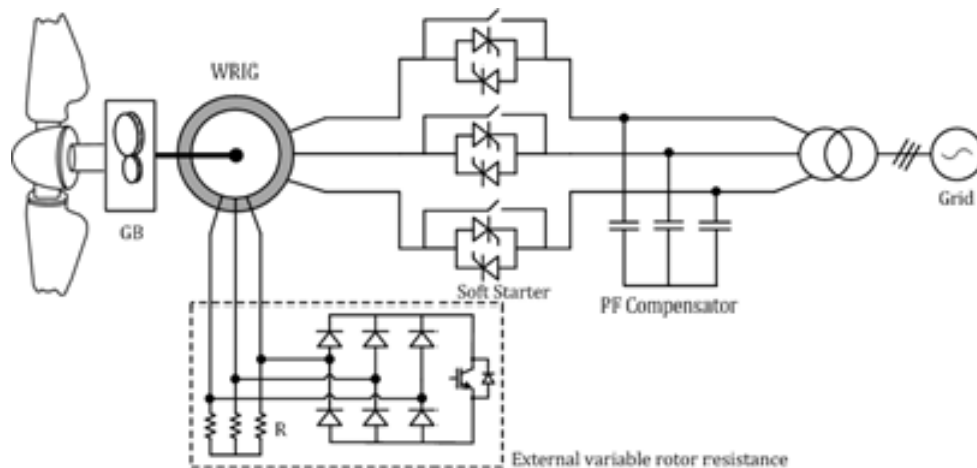
Turbine sa indirektnim pogonom zahtevaju prenosni mehanizam za sinhronizuju male brzine turbine sa visokom brzinom generatora.

Druga moguća klasifikacija odslikava primenu pretvaračkih sistema na bazi energetskih elektronskih pretvarača. Razlikuju se vetrogeneratorski sistemi sa delimično regulisanim brzinama i sa punom regulacijom brzine.

Rešenja sa delimično regulisanom brzinom

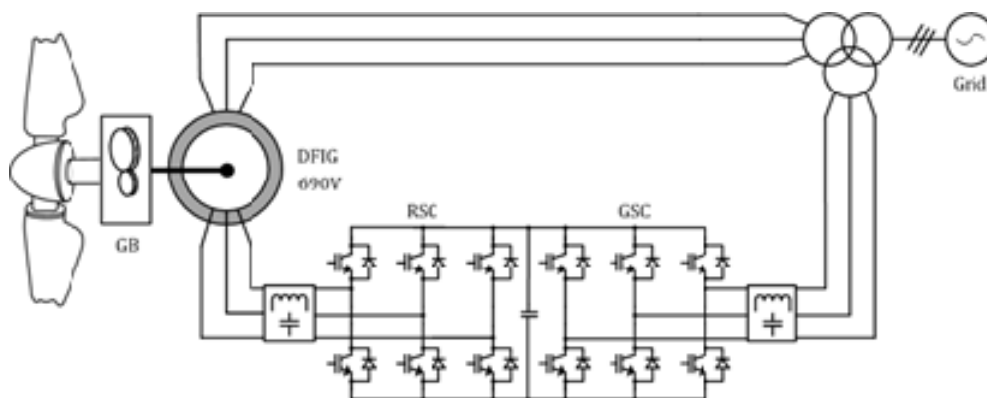
Slika 2 predstavlja jedno od najjednostavnijih rešenja za pogon sa promenljivom brzinom. Konfiguracija je bazirana na klizno-kolutnom asinhronom generatoru sa spoljnim otporom rotora.

Spoljni otpor rotora je promenljiv korišćenjem pretvarača sa diodnim mostnim ispravljačem i IGBT čoperom. Sa različitim vrednostim otpora, generator može da radi na različitim radnim tačkama. To omogućava ograničeni opseg brzina, obično manje od 10% od nominalne brzine. Najveća prednost ove konstrukcije je mala cena i jednostavnost, a nedostatak je ograničen opseg promene brzine, nemogućnost kontrole isporuke reaktivne snage u mrežu i smanjena efikasnost zbog gubitaka u otporima.



Slika 2 – Ashinhroni klizno-kolutni generator sa regulacijom spoljnog otpora rotora

Dvostruko napajani asinhroni generator ili DFIG sistem konverzije energije vetra sa promenljivom brzinom je jedna od najviše komercijalizovanih konfiguracija u industriji vetrogeneratorске opreme u prethodnoj deceniji i danas se najčešće može videti na poljima. Stator je direktno povezan na mrežu, dok je rotor povezan na mrežu preko dvostrukog energetskog pretvarača (slika 3). Tipični statorski napon za DFIG je 690 V, a opseg snaga je od nekoliko stotina kW do nekoliko MW. Dvostruki pretvarač je 1/3 instalisane snage generatora, s tim da pretvarač na strani rotora kontroliše momenat ili aktivnu/reaktivnu snagu generatora, dok pretvarač na strani mreže kontroliše napon jednosmernog međukol i reaktivnu snagu na naizmeničnoj strani. Opseg brzina ovog tipa vetrogeneratora je oko +/- 30%.

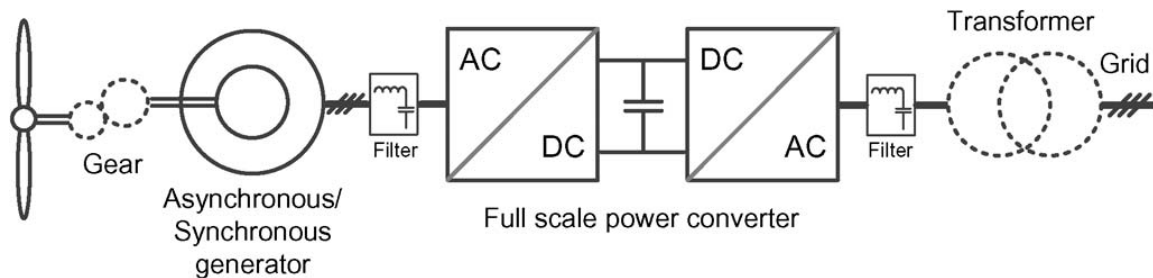


Slika 3 – Konfiguracija vetrogeneratora sa dvostruko napajanim asinhronim generatorom (DFIG)

Rešenja sa punom regulacijom brzine i dvostrukom konverzijom

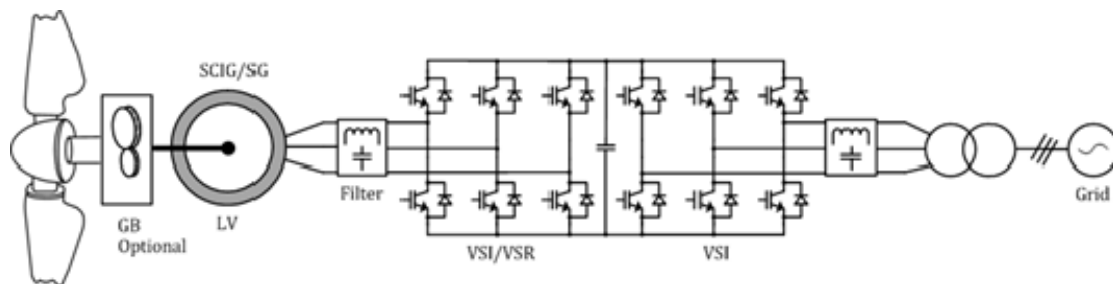
Tipična konfiguracija vetrogeneratorskog sistema opremljena sa nisko-naponskim električnim generatorima kaveznog asinhronog ili sinhronog tipa, prikazana je na slici 4. Turbina je sa generatorom najčešće povezana preko multiplikatora (Gear), mehaničkog sistema za usaglašavanje brzine turbine sa nominalnom brzinom generatora. Za povezivanje generatora sa mrežom primenjen je dvostruki naponski pretvarač, koji se sastoji od dva identična konvertora povezana u "back-to-back"

topologiju, sa kapacitivnim filterom u jednosmernom međukolu kao svojevrsnim interfejsom. Prema mreži može biti povezan i transformator u zavisnosti od naponskog nivoa.



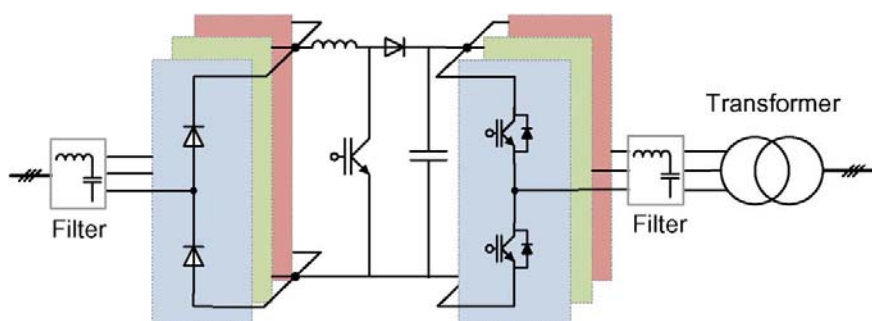
Slika 4 – Blok šema vetrogeneratorskog sistema sa punom regulacijom brzine.

Pretvarački sklop može imati različita rešenja. Za pomenute vrste mašina to je aktivni naponski ispravljač i mrežni naponski inverter povezani DC linkom. Na slici 5 se vidi ova konfiguracija sa pretvaračima na 2 nivoa i IGBT prekidačima. Generator i konverteri su tipično za 690 V, a svaki pretvarač može da nosi 0,75 MW. Za generatore snage veće od 0,75 MW, snaga pretvarača se može povećati paralelisanjem IGBT modula. Ova konfiguracija obezbeđuje najveće iskorišćenje energije vetra, mogućnost injekcije reaktivne snage u mrežu i kompenzaciju reaktivne snage u slučaju “slabe mreže” ili kvarova u sistemu – bez obzira na korišćenje indukcione mašine.



Slika 5 – Konfiguracija SCIG/SG sa “back-to-back” konverterom

Vetrogenerator sa sinhronim generatorom (SG) ima veći broj mogućih konfiguracija, jer SG mogu da proizvode rotorski fluks samostalno. Umesto aktivnog ispravljača na generatorskoj strani, može se koristiti jeftiniji diodni ispravljač sa podizačem napona (boost pretvaračem) u jednosmernom međukolu (slika 6). Međutim, za veće snage podizač napona mora biti sastavljen od više isprepletanih jedinica ili na neki drugi način.

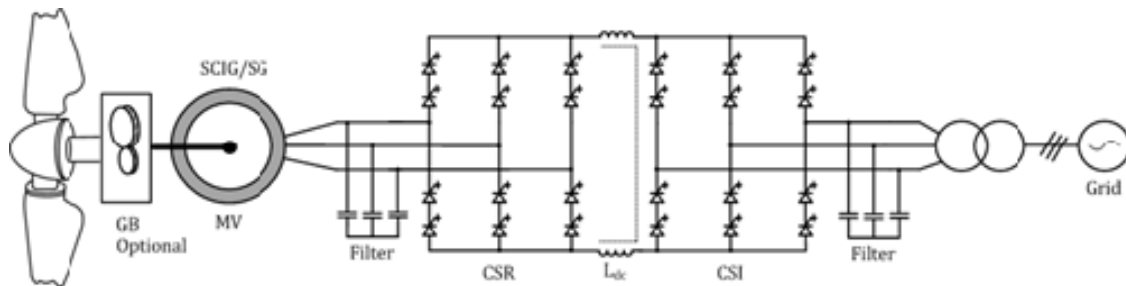


Slika 6 – Pretvarački sklop sa diodnim ispravljačem, podizačem napona i naponskim ispravljačem [10].

Rešenja za vetrogeneratore velikih snaga

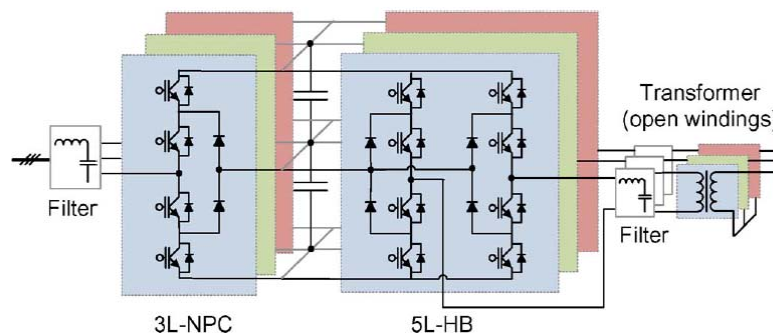
Za vetrogeneratore većih snaga (10 MW) koriste se sredjenaponski električni generatori i adekvatni pretvarači. Problem je veliko naponsko naprezanje elektronskih prekidačkih komponenti, pa se

komponente moraju vezivati na red. Slika 7 predstavlja srednje-naponsku (MV) vetro-turbinu, koja koristi konverter sistem punog kapaciteta sa kaveznim asinhronim ili sinhronim MV generatorom. Dva identična konvertera su primenjena, jedan koji radi kao ispravljač strujnog tipa (CSR) na generatorskoj strani i drugi koji radi kao strujni inverter (CSI) na strani mreže. Takodje, postoji trofazni kondenzator na obe AC strane da pomaže komunikaciju uklopnih uređaja i smanjuje harmonike uklapanja. CSR i CSI su povezani sa DC prigušnicom koja ograničava DC struju i takodje razdvaja generator od mreže. Strujni ispravljač (CSR) ima jednostavnu strukturu sa malim brojem uklapanja i pouzdanom zaštitom od kratkih spojeva u poredjenju sa naponskom tehnologijom. Mada dinamički odziv strujnog pretvarača nije tako brz kao naponskog, on je dobro rešenje pretvarača za velike vetrogeneratore na srednjem naponu od 3 do 4 kV.



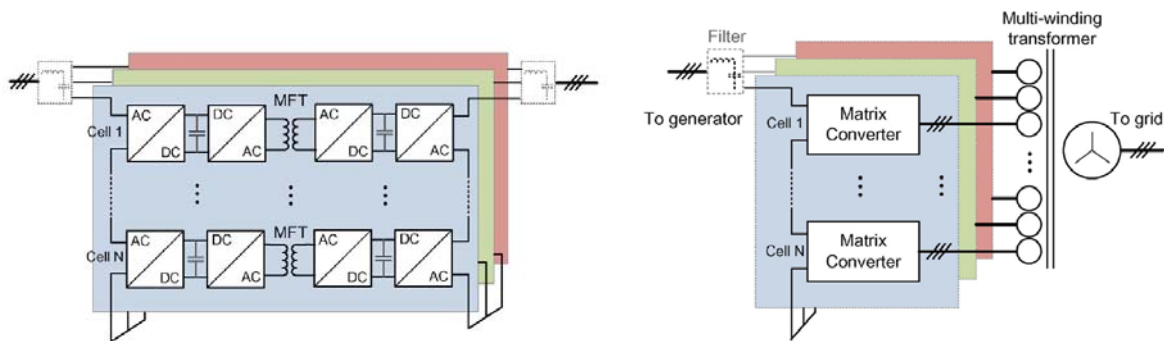
Slika 7 – Konfiguracija SCIF/SG sa sredjenaponskim konverterom strujnog tipa.

Nova rešenja za konvertore većih snaga uključuju primenu pretvarača sa više nivoa (*Multilevel Converters*). Moguće su varijante pretvarača sa 3 nivoa, sa 5 nivoa, kao i kombinacije ovih rešenja u polumostnoj ili mostnoj konfiguraciji. Na slici 8 prikazano je rešenje sa ispravljačem sa 3-nivoa i inverterom sa 5 nivoa u polumostnoj konfiguraciji. Pored problema sa fluktuacijom napona srednje tačke, koji je na putu rešenja, ozbiljan nedostatak je nejednaka distribucija gubitaka u granama pretvarača.



Slika 8 – Dvostruki pretvarač sa ispravljačem sa 3-nivoa i inverterom sa 5 nivoa [10].

Za vetrogeneratore moguće je primeniti i pretvarače sa više povezanih manjih jedinica, što je pogodnije s obzirom na nivoe naprezanja samih prekidačkih elektronskih komponenti. Za razliku od varijanti sa dvostrukim pretvaračima, ovde se predlažu rešenja sa indirektnim ili direktnim AC/AC pretvaračima. Na slici 9 prikazane su dve mogućnosti: indirektni pretvarač i direktni (matrični) pretvarač. Indirektni pretvarač je kombinacija AC/DC, DC/AC, AC/AC, AC/DC i DC/AC serijski vezanih pretvarača, s tim što je AC/AC pretvarač u stvari izolacioni transformator, koji radi na srednjim frekvencijama. Matrični pretvarač je složena jedinica, koji zahteva izolacioni transformator sa većim brojem primarnih namotaja. Moguća su i druga rešenja, koja obuhvataju veći broj različito paralelovanih ili serijski vezanih pretvarača sa velikim brojem prekidača. Međutim, zbog mnogobrojnih komponenti, pitanje pouzdanosti sistema dolazi u prvi plan, pa su potrebne složene analize mogućih ispada i metoda održavanja [10].



Slika 9 – Indirektni i direktni AC/AC pretvarači za vetrogeneratore [15]

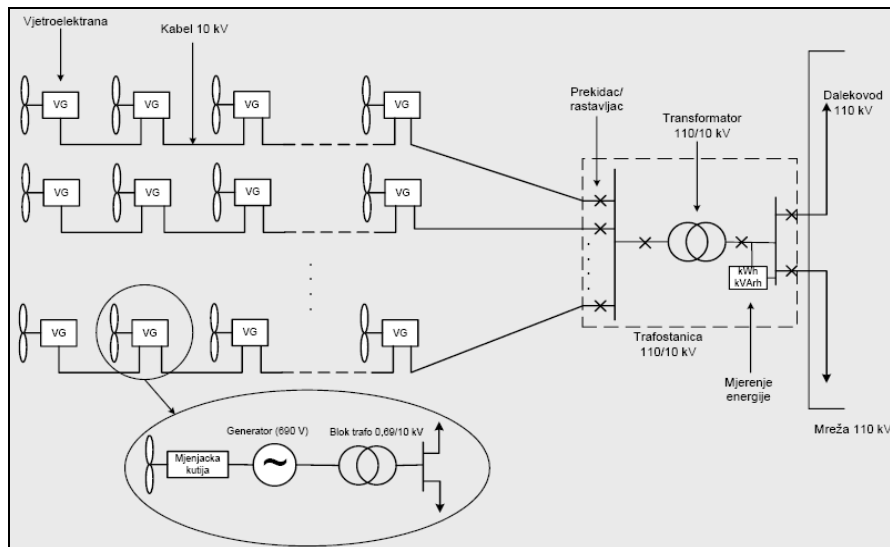
PRIKLJUČENJE VETROELEKTRANE NA MREŽU

Svaki elektroenergetski sistem radi u skladu sa određenim pravilima koja definišu obaveze postojećih i budućih korisnika za pogon i priključenje na elektroenergetsku mrežu [3,4]. Ovi zahtevi moraju biti ispunjeni od strane proizvođača električne energije, potrošača konektovanih na elektroenergetsku mrežu i kompanija koja upravljaju mrežom. Ta pravila su poznata kao "Pravila o radu elektroenergetskog sistema" (*Grid Code*). Slično prenosnim mrežama, distributivna mreža određuje zahteve za priključenje svojih korisnika u „Pravilima o radu Distributivne Mreže“ (*Distribution Code*) [11]. U poredjenju sa korisnicima prenosne mreže, korisnici distributivne mreže imaju manje snage i manji uticaj na rad mreže, tako da su zahtevi Pravila o radu Distributivne Mreže značajno lakši u poredjenju sa prenosom.

Činjenica je da se zahtevi „Pravila o radu EES“ stalno prilagodjavaju razvoju tehnologije. Ona uključuju problematiku kvarova, regulaciju aktivne snage, frekvencije, regulaciju reaktivne snage, napona i planiranje proizvodnje.

Glavni nedostatak WECS u poredjenju sa konvencionalnim izvorima energije je nesigurnost proizvodnje električne energije, kao posledica konstantnih promena u brzini vetra [6]. Iz tih razloga, vetrogeneratori ne mogu ispuniti zahteve koje sinhroni generatori velike snage ispunjavaju, naprimer tačna predikcija proizvodnje električne energije, ograničena brzina promene snage, ostrvski rad i puštanje u rad bez podrške mreže (*black start*). Takodje, razna tehnološka rešenja farmi vetrogeneratora su karakterisana različitim upravljanjem, kako u stabilnom pogonu, tako i u vreme poremećaja u radu sistema, što određuje kako utiču na rad elektroenergetskog sistema. Na primer, vetro-turbina sa kavezim asinhronim generatorom (*squirrel cage induction generator*) direktno povezana na mrežu i sa ograničenjem mehaničkog inputa (*stall turbines*) ima najjednostavniji dizajn bez mogućnosti kontrole toka aktivne ili reaktivne snage u normalnom pogonu ili tokom poremećaja rada. Za vreme propada napona, asinhroni generator dodatno opterećuje mrežu povećanom potrošnjom reaktivne snage, što može ugroziti stabilnost mreže. Sa druge strane, vetrogenerator sa energetskim pretvaračima ima mnogo više mogućnosti, čak i prednosti u poređenju sa konvencionalnim elektranama. Njihova sposobnost da brzo kontrolišu tokove aktivne i reaktivne snage može obezbediti dodatnu podršku mreži u smislu doprinosa regulaciji frekvencije i napona.

Parkovi vetrogeneratora se priključuju na elektroenergetsku mrežu, u zavisnosti od snage: za instalisane snage preko 15 MW, farme su priključene uglavnom na prenosnu mrežu, dok za snage ispod 15 MW su priključene na distributivnu mrežu. Jedna mogućnost za organizaciju i priključenje farme vetrogeneratora je prikazana na slici 10. S obzirom da farme vetrogeneratora mogu imati značajan uticaj na kvalitet električne energije i stabilnost elektroenergetskog sistema, njihova instalacija, aktiviranje i pogon predstavljaju značajan problem. U tom smislu propisana su tehnička pravila za priključenje farmi vetrogeneratora u Pravilima za rad elektroenergetskih sistema (*Grid Code*). Tehnologija vetrogeneratora se brzo razvija i ima puno specijalnih funkcionalnosti u poredjenju sa konvencionalnim elektranama. Iz tog razloga, u mnogim zemljama zahtevi za priključenje farmi vetrogeneratora imaju poseban tretman u vidu posebnih pravila (*Wind Code*) [8].



Slika 10 – Priklučenje farme vetrogeneratora na elektroenergetsku mrežu

ZAKLJUČAK

Opšti zahtevi većine vodećih Pravila o radu sistema (Grid Code) u delu priključenja farmi vetrogeneratora, uključuju problematiku kvarova, regulaciju aktivne snage, frekvencije, regulaciju reaktivne snage i napona, koji su analizirani u ovom radu. Sa druge strane savremene konstrukcije vetrogeneratora omogućavaju smanjenja troškova i povećanja pouzdanosti. Predstavljene su tehnologije sa asinhronim i sinhronim generatorima, sa i bez multiplikatora brzine, a posebno su analizirana postojeća rešenja vetrogeneratora sa promenljivom brzinom. U budućim jedinicama velike snage (10-20 MW) ključnu ulogu u elektro-delu će imati kvalitetna i pouzdana rešenja pretvaračkih sklopova energetske elektronike. U toj oblasti se očekuje dalji napredak i značajna unapređenja.

REFERENCE

1. TPWind Advisory Council, „Wind Energy: A Vision for Europe 2030“, European Wind Energy Technology Platform, 2006, www.windplatform.eu
2. Wilkes J., „Green Growth – The Impact of Wind Energy on Jobs and Economy“, Report, EWEA, April 2012, www.ewea.org
3. Fulli, G., Ciupuliga, A.R., Review of existing methods for transmission planning and for grid connection of wind power plants, 15.06.2009, <http://realisegrid.erse-web.it>
4. JP Elektromreže Srbije, Pravila o radu prenosnog sistema, verzija 1, od 15.04.2008. god. http://www.ems.rs/pravila_o_radu_prenosnog_sistema.pdf.
5. Nicolas Fichaux et al., „Up Wind – Design limits and solutions for very large wind turbines“, EWEA, March 2011, www.ewea.org
6. Bin, W., et al., Power Conversion and Control of Wind Energy Systems, John Wiley and Sons, Inc., Publication, New Jersey, USA, 2011
7. Grabić S., Čelanović N., Katić V., „Permanent Magnet Synchronous Generator Cascade for Wind Turbine Application“, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.23, No.3, May 2008, pp. 1136-1142
8. Heier S., „Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems“, John Wiley & Sons, 2nd Ed., Chichester, U.K., 2006.
9. Levi E., „Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 5, May 2008, pp.1893-1909.
10. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K., „Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems“, IEEE Tran. on Industry Applications, Vol.48, No.2, Mar./Apr.2012, pp.708-719.
11. The Distribution Code, NGET plc., Warwick, UK, 2006, <http://energynetworks.org>