

Mate Lasić, mag. ing. el.
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
mlasic@koncar-institut.hr

Slaven Nekić, mag. ing. el.
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
snekic@koncar-institut.hr

mr. sc. Jandro Šimić, mag. ing. el.
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
jsimic@koncar-institut.hr

Ana Tomasović, mag. ing. el.
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
atomasovic@koncar-institut.hr

Mario Veža, mag. ing. el.
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
mveza@koncar-institut.hr

prof. dr. sc. Davor Škrlec, mag. ing. el.
FER Zagreb
davor.skrlec@fer.hr

UTJECAJ VJETROAGREGATA S PROMJENJIVOM BRZINOM VRTNJE NA KVALITETU NAPONA

SAŽETAK

Posljednjih godina na području proizvodnje električne energije je došlo do značajnih promjena u pogledu iskorištavanja obnovljivih izvora energije. Svjetski trendovi pokazuju da je energije vjetra komercijalno najprihvatljivija. Ovakav iskorak u prihvaćanju korištenja energije vjetra za proizvodnju električne energije je uzrokovan velikim napretkom u konstrukciji vjetroagregata. Zbog relativno male snage jedinice vjetroagregata (0,5 - 5MW), ovakve proizvodne jedinice se mogu spajati i na distribucijsku mrežu. Time se mogu značajno promijeniti tokovi snaga, što ima za posljedicu i promjenu iznosa napona u čvorištima distribucijske mreže. Osim toga zbog stohastičke prirode vjetra može doći i do značajnijih dinamičkih promjena iznosa napona, što može utjecati na značajno povećanje iznosa treperenja napona. Većina ovih problema se može izbjeći pravilnim izborom priključka vjetroelektrane i izvedbe vjetroagregata.

U ovom članku će biti obrađene komercijalno dostupne izvedbe vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje s naglaskom na njihov utjecaj na izobličenje valnog oblika napona u elektrodistribucijskim mrežama. Osim toga će biti dan pregled i komentar postojeće regulative u RH koja se odnosi na priključenje vjetroelektrane na elektrodistribucijsku mrežu.

Gljučne riječi: vjetroagregat s promjenjivom brzinom vrtnje, kvaliteta napona, energetska elektronika, viši harmonici, fliker

INFLUENCE OF VARIABLE-SPEED WIND TURBINE ON VOLTAGE QUALITY

SUMMARY

During the last decade in the field of electricity production has come to significant change concerning exploitation of renewable energy sources. World trends show that the wind energy is commercially most acceptable. Acceptance of wind power for electricity production is mainly result of great improvement in design (efficiency and availability) of wind turbines. Because of the relatively small nominal power of wind turbine unit (0,5 – 5 MW), this type of power plant is appropriate for connection on the distribution power grid. Connection of the wind turbine on the distribution power grid can lead to a significant change of power flow, and therefore the changes of voltage in the nodes of distribution power grid. Except that, the stochastic nature of wind can cause dynamic voltage fluctuation resulting in increased flicker. Most of mentioned problems can be avoided with the proper connection and construction of the wind turbine.

This paper is going to elaborate commercially available variable-speed wind turbines with accent on their impact on voltage distortion in distribution power grid. The paper will also give overview of Croatian regulations related to connection of wind turbines to distribution power grid.

Key words: variable-speed wind turbine, voltage quality, power electronics, harmonics, flicker

1. UVOD

Vjetar je po svojoj prirodi stohastička pojava i njegova snaga (brzina) je vrlo promjenjiva. Međutim, energiju vjetra je ipak moguće koristiti za proizvodnju električne energije. Vjetroelegtrane su postrojenja koja se sastoje od nekoliko vjetroagregata u kojima se kinetička energija vjetra pretvara u električnu energiju. Vjetroagregati su zbog tehničkih i ekonomskih razloga građeni tako da proizvode električnu energiju samo u određenom rasponu brzina vjetra (tipično 4-25 m/s). Zbog stohastičkog karaktera vjetra kao izvora energije, vjetroelegtrane svojim radom bitno utječu na naponske prilike na mjestu priključka na mrežu.

Vjetroagregate generalno možemo podijeliti na dvije velike grupe: vjetroagregati sa stalnom brzinom vrtnje i vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje. Utjecaj vjetroagregata na kvalitetu napona uvelike se razlikuje za ove dvije grupe vjetroagregata.

Kada se analizira utjecaj rada vjetroelegtrana na kvalitetu napona obično se raspravlja o četiri kriterija: utjecaj rada vjetroelegtrana na napon u stacionarnom stanju, utjecaj dinamičkih promjena napona (flicker), tranzijenti uzrokovani sklapanjem te injektiranje viših harmoničkih članova struje u mrežu.

2. UTJECAJ RADA VJETROELEKTRANE NA KVALITETU NAPONA

2.1. Utjecaj rada vjetroelegtrane na napon u stacionarnom stanju

Promjena napona u stacionarnom stanju je posljedica injektiranja struje u mrežu. Iznos napona na mjestu priključka vjetroelegtrane kao funkcije proizvedene radne i jalove snage se može približno odrediti izrazom:

$$U = R \cdot \frac{P}{U_n} - X \cdot \frac{q}{U_n} + U_n \quad (1).$$

U_n - nazivni napon mreže

U – napon na mjestu priključka vjetroelegtrane

p – proizvedena radna snaga

q – jalova snaga

R – radni otpor mreže

X – induktivni otpor mreže

Utjecaj na iznos napona vjetroagregata s asinkronim generatorom izravno spojenim na mrežu (vjetroagregati sa stalnom brzinom vrtnje) najviše ovisi o X/R omjeru mreže, dok u manjoj mjeri ovisi o značajkama generatora. S druge strane vjetroagregati s energetske pretvaračima automatski mogu provoditi kontrolu po bilo kojem zadanom kriteriju (održavanje iznosa napona ili održavanje faktora snage na zadanoj vrijednosti).

2.2. Dinamičke promjene napona (emisija flikera)

Turbulencije vjetra stvaraju varijacije proizvedene snage a time i varijacije iznosa napona u rasponu 0.01-10 Hz. Ove varijacije iznosa napona stvaraju fliker koji je mjera za promjenu jačine svjetla uzrokovanog promjenom napona na rasvjetnom tijelu.

Turbulencije vjetra se izravno prenose kao oscilacije predane snage u mrežu kod vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje. Kod vjetroagregata koje koriste energetske pretvarače (vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje) turbulencije vjetra se ne prenose izravno u mrežu kao oscilacije proizvedene snage. Razlog leži u činjenici da se brzina vrtnje rotora polako mijenja pa se rotor ponaša

kao svojevrsan zamašnjak u kojemu se privremeno pohranjuje energija vjetra. Osim toga energetski pretvarač omogućava i kontrolu jalove snage da bi se smanjile fluktuacije iznosa napona.

2.3. Tranzijenti uzrokovani sklapanjem

Utjecaj vjetroagregata na mrežu prilikom sklapanja se može podijeliti na dva slučaja. Prvi slučaj je utjecaj na napon u stacionarnom stanju za vrijeme spajanja generatora na mrežu. Visoki iznosi struje prilikom uklopa mogu izazvati propade napona. Ovo se naročito odnosi na uklop vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje na nazivnoj brzini vjetra. Sklapanja izazivaju i fliker što se ograničava određivanjem maksimalnog broja sklapanja u vremenskom intervalu od dva sata. Sklapanja kod vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje uglavnom nemaju značajni utjecaj na mrežu.

Drugi slučaj sklapanja se odnosi na sklapanje kondenzatora kod asinkronih generatora izravno spojenih na mrežu. Ovaj tip sklapanja je popraćen strujnim udarima visokih frekvencija i odgovarajućim naponskim tranzijentima koji se šire u mrežu. Kod vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje ne postoje kondenzatorske baterije za kompenzaciju već je kontrola jalove snage omogućena energetskim pretvaračem.

2.4. Injektiranje viših harmonika struje u mrežu

Injektiranje viših harmonika struje u mrežu je posljedica rada energetskih pretvarača koji se koriste kod vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje. Osnovni elementi ovih energetskih pretvarača su: GTO (gate turn off thyristor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristors), BJT (bipolar junction transistor), MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) ili IGBT (insulated gate bipolar transistor). Usporedba tehničkih značajki za ove upravljive sklopke su dane u tablici I.

Tablica I. Tehničke značajke za upravljive sklopke

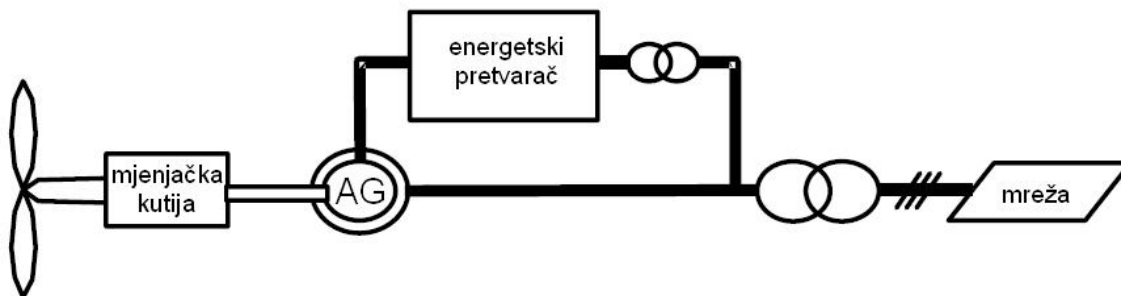
Tip sklopke	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Napon (V)	6000	4500	1200	1000	3300
Struja (A)	4000	2000	800	28	2000
Vrijeme isklopa (μ s)	10-25	2-5	15-25	0.3-0.5	1-4
Sklopna frekvencija (kHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20

Tipični energetski pretvarači koji se koriste u vjetroagregatima s promjenjivom brzinom vrtnje se sastoje od ispravljača (AC/DC pretvorba), spremnika energije i izmjenjivača (DC/AC pretvorba). Najčešće se koristi "back to back pulse wide modulation voltage source inverter" konfiguracija energetskog pretvarača. Korištenjem IGBT sklopki (koje se najčešće koristi) sklopne frekvencije su dovoljno visoke da bi se izbjegla pojava viših harmonika na tipičnim frekvencijama (ispod 1 kHz). Kod vjetroagregata kod kojih je generator izravno spojen na mrežu (vjetroagregati sa stalnom brzinom vrtnje) ovaj aspekt kvalitete napona se može zanemariti.

3. IZVEDBE VJETROAGREGATA S PROMJENJIVOM BRZINOM VRTNJE

3.1. Izvedba vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom

Izvedba vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom (DFIG) je jedna od najčešće korištenih izvedbi vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje. Kod ove izvedbe se koristi klizno-kolutni asinkroni generator koji je preko mjenjačke kutije mehanički povezan s elisama. Stator asinkronog generatora je priključen izravno na mrežu, dok se rotor izvodi s namotima i klizno-kolutnim prstenovima preko kojih je rotor posredno preko energetskog pretvarača priključen na mrežu. Energetski pretvarač direktno djeluje na struju rotora, pa je time omogućena kontrola izlazne radne i jalove snage vjetroagregata. Zato nije potrebna kompenzacija jalove snage (nema kondenzatorske baterije, a samim time ni problema sa sklapanjem kondenzatorske baterije).

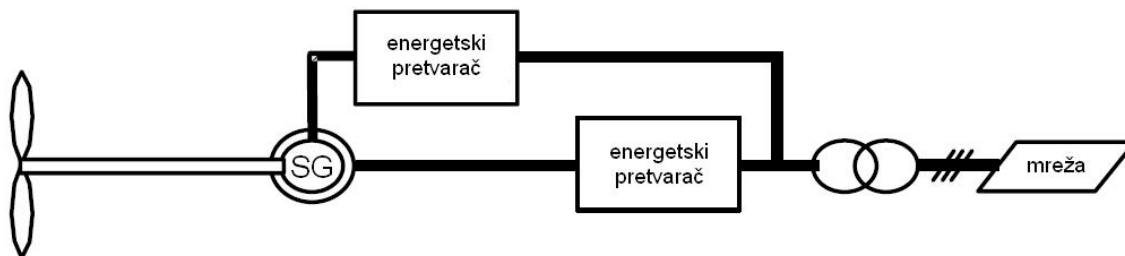


Slika 1. Načelni prikaz izvedbe vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom

Ova izvedba vjetroagregata ima mogućnost rada u području podsinkrone i nadsinkrone brzine vrtnje u određenim granicama (tipično 0.7 do 1.2 p.u.). Zbog mogućnosti rada u širokom rasponu brzina oko sinkrone brzine naleti vjetra se ne prenose izravno u mrežu. Tada se rotor ponaša kao privremeni spremnik energije. Ova značajka smanjuje fluktuacije napona i snage koja se predaje u mrežu pa se samim time i smanjuju vrijednosti emisija flikera u mrežu. Snaga energetskog pretvarača iznosi 20-30% nazivne snage vjetroagregata pa je stoga jeftiniji i njegovi gubici su manji nego kod izvedbe kada se generator priključuje na mrežu preko energetskog pretvarača (sinkroni generator, kavezni asinkroni generator). Na slici 1 se nalazi načelni prikaz izvedbe vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom. Ovakva izvedba vjetroagregata je instalirana na otoku Pagu.

3.2. Izvedba vjetroagregata sa sinkronim generatorom i energetskim pretvaračem

Izvedba vjetroagregata sa sinkronim generatorom najčešće koriste pretvarač pune snage (u odnosu na snagu generatora) . Kod ove izvedbe ne postoji mjenjačka kutija pa je sinkroni generator direktno mehanički povezan s elisama. Stator i rotor sinkronog generatora je posredno preko energetskog pretvarača priključen na mrežu. Energetski pretvarač time djeluje na uzбудu generatora, pa je time omogućena kontrola izlazne radne i jalove snage vjetroagregata. Zato nije potrebna kompenzacija jalove snage.



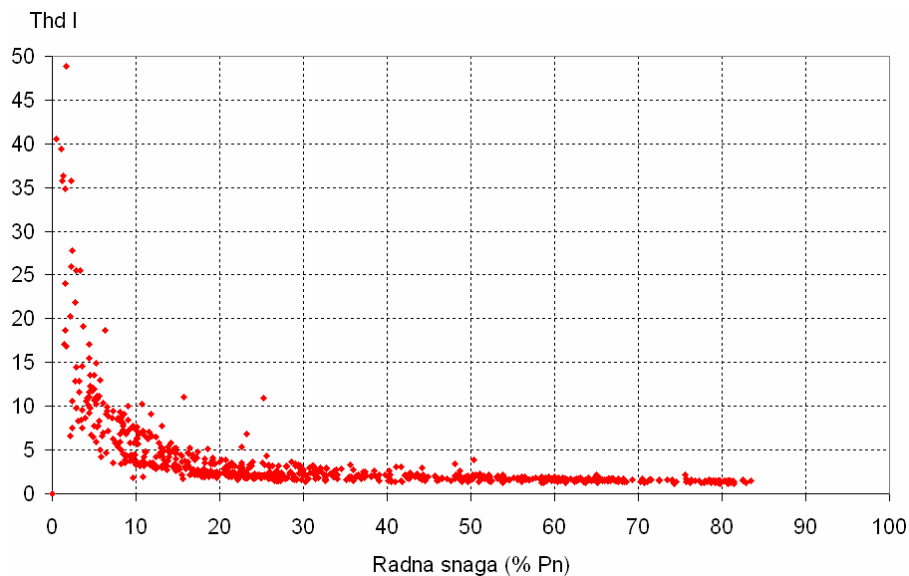
Slika 2. Načelni prikaz izvedbe vjetroagregata sa sinkronim generatorom

Ova izvedba vjetroagregata također ima mogućnost rada u području podsinkrone i nadsinkrone brzine vrtnje u određenim granicama (tipično 0.7 do 1.2 p.u.). Zbog mogućnosti rada u širokom rasponu brzina oko sinkrone brzine naleti vjetra se ne prenose izravno u mrežu što djeluje na smanjenje vrijednosti emisija flikera u mrežu. Snaga energetskog pretvarača iznosi oko 120% nazivne snage vjetroagregata pa su njegovi gubici veći nego kod DFIG izvedbe vjetroagregata. Na slici 2 se nalazi načelni prikaz izvedbe vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom. Ovakva izvedba vjetroagregata je instalirana iznad Šibenika.

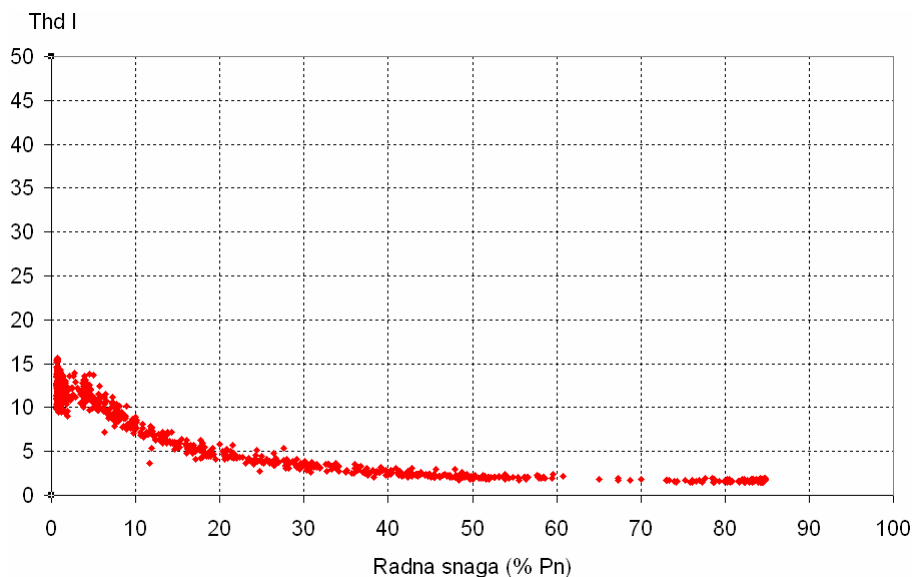
3.2.1. Usporedba rezultata mjerenja viših harmonika struja

Na slikama 3 i 4 su dani rezultati mjerenja ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ u ovisnosti o iznosu nazivne radne snage na mjestu priključka za VE Ravna i VE Krtolin. Na obje lokacije vjetroagregati koriste energetske pretvarače zasnovane na IGBT sklopkama. Iz navedenih slika se može vidjeti da je faktor ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ već pri 20 % P_n manji od 5%. Pri vrlo malim iznosima radne snage ukupno harmoničko izobličenje struje $ThdI$ može biti značajno. Ovdje treba napomenuti da se faktor ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ definira prema osnovnom harmoniku struje. Pri vrlo

malim iznosima nazivne snage osnovni harmonik će biti vrlo mali pa je to osnovni razlog puno većih vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ pri malim iznosima radne snage. Uzimajući ovu činjenicu u obzir apsolutni iznosi harmoničkih članova će uvijek biti vrlo mali (do 2% I_n).



Slika 3. Rezultati mjerenja ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ u ovisnosti o iznosu nazivne radne snage za VE Ravna



Slika 4. Rezultati mjerenja ukupnog harmoničkog izobličenja struje $ThdI$ u ovisnosti o iznosu nazivne radne snage za VE Krtolin

U Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava se pod točkom 5.3.6.3. *Dodatni tehnički uvjeti za priključenje vjetroelektrana snage do 5 MW* propisuju tehnički i pogonski uvjeti za priključenje vjetroelektrana na distribucijsku mrežu radi osiguranja normalnog pogona distribucijske mreže, sprječavanja nedopuštenog povratnog djelovanja na mrežu i postojeće korisnike mreže. Prema toj točki vrijednost faktora ukupnoga harmonijskog izobličenja (THD) struje na mjestu priključka može iznositi najviše 5%, ali se to ograničenje emisije harmonijskih struja odnosi na nazivnu struju.

U načelu je operator sustava odgovoran za iznos izobličenja napona na mjestu priključka korisnika mreža, a korisnik mreže je odgovoran za iznos izobličenja struje. Stoga navedeni tehnički zahtjevi dobro opisuju i definiraju prava i obveze operatora sustava.

4. ZAKLJUČAK

Vjetroelektrane su postale sastavni dio elektrodistribucijskih mreža u svijetu. Njihovim priključkom na elektrodistribucijsku mrežu i proizvodnjom električne energije se uvelike mijenjaju naponske prilike u samoj distribucijskoj mreži. Da bi se bolje iskoristila energije vjetra i smanjile fluktuacije proizvedene snage (a samim time i napona) koriste se vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje. Ovakve izvedbe vjetroagregata za konverziju energije koriste energetske pretvarače.

Energetski pretvarači imaju nelinearnu U-I karakteristiku pa injektiraju više harmoničke članove struje u mrežu. Viši harmonički članovi struje stvaraju na impedancijama mreže padove napona, te uslijed toga dolazi do izobličenja valnog oblika napona. Da bi se izobličenja valnog oblika napona održalo unutar određenih granica iznosi injektiranje viših harmonika struja kao posljedica rada vjetroagregata moraju biti vrlo mali. To se postiže upotrebom sklopki s visokom sklopnom frekvencijom (npr. IGBT) ili primjenom odgovarajućih filtara. U Hrvatskoj zasad postoje dvije vjetroelektrane koje koriste različite izvedbe vjetroagregata. Ispitivanja su pokazala da obje vjetroelektrane zadovoljavaju uvjete iz Mrežnih pravila koji se odnose na injektiranje viših harmonika struje. Međutim svjetska iskustva pokazuju da je nakon priključka vjetroelektrane na elektrodistribucijsku mrežu i puštanja u rad potrebno obaviti mjerenja kvalitete napona s ciljem utvrđivanja novog stanja kvalitete napona te davanja ocjene negativnog povratnog djelovanja vjetroelektrane.

LITERATURA

- [1] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, "Narodne novine" broj 36/06, 2006.
- [2] T. Dropulić, M. Lasić, J. Šimić: " Analysis of State of MV Distribution System Before and After Connection of Small Wind Farm Ravna1", ICREPQ'06, April 5-7, 2006, Palma de Mallorca, Spain
- [3] Schulz, D.; Kompa, T.; Hanitsch, R., Saniter, C.; Investigations of power quality of 1.5 MW wind energy generators, ISES 2001 Solar World Congress Adelaide, South Australia
- [4] Schulz, D.; Hanitsch, R.; Untersuchung von Netzrückwirkungen an drehzahlvariablen Windkraftanlagen, Fachtagung Elektrische Energiewandlungssysteme 13.- 14. 03. 2001, Magdeburg