

Uticaj vetrogeneratora na kvalitet električne energije u tački priključenja na distributivnu mrežu

Branka Kostić, Aleksandar Nikolić

Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
branka.kostic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu su prikazani rezultati analiza rada vetrogeneratora i uticaj na parametre kvaliteta električne energije na mestu priključenja na distributivnu mrežu. Navedeni rezultati treba da posluže kao osnova distributivnim preduzećima pri davanju elektroenergetskih saglasnosti za obnovljive izvore električne energije, a prvenstveno vetrogeneratore. Pri analizi su korišćeni rezultati merenja na jedinom do sada instaliranom vetrogeneratoru u Srbiji montiranom u oblasti Tutina. Posebno su analizirani slučajevi pri startu i zaustavljanju vetrogeneratora u uslovima slabog vetra, pa samim tim i manjim vrednostima energije koja se predaje u mrežu. S obzirom da zakonska regulativa iz ove oblasti kod nas još nije definisana, korišćene su preporuke i standardi EU i novousvojena Tehnička preporuka 16 JP EPS.

Ključne reči: vetrogenerator, kvalitet električne energije, merenja, distributivna mreža

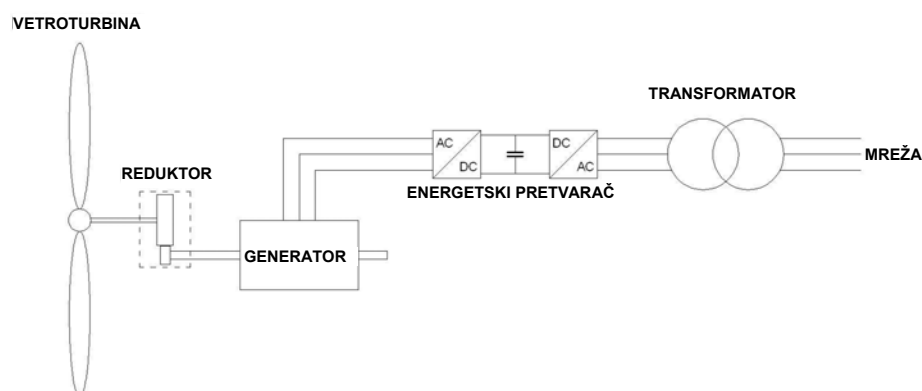
1. Uvod

U poslednjih 30 godina u svetu je došlo do značajnog povećanja snaga vetrogeneratora i veličina tzv. vetro parkova. U isto vreme, nedostatak pravila, standarda i regulativa tokom ranog razvoja vetrogeneratora bili su uzrok problema u pogledu stabilnosti i kvaliteta električne energije u mreži u kojoj je priključen vetro park. Na sreću, tehnologija se vremenom razvijala pa su mnoga nova postrojenja sa vetrogeneratorima opremljena najsavremenijom tehnologijom, što im omogućava dobar rad i održavanje, kao i proizvodnju „čiste“ električne energije ka mreži.

Razvoj u oblasti energetske elektronike je omogućio da mnoge aplikacije iz oblasti energetskih sistema postanu fleksibilnije i da mogu da zadovolje zahteve za kontinualnom regulacijom. Aplikacije kao što su kompenzacija

reaktivne snage, statički prekidači, uređaji za skladištenje energije, generatori promenljive brzine [1] se često mogu naći u savremenim postrojenjima sa vetrogeneratorima.

Koncept vetrogeneratora sa promenljivom brzinom obrtanja i energetske pretvaračem u statorskom kolu omogućava upotrebu kako asinhronih generatora sa kaveznim rotorom, tako i sinhronih generatora sa velikim brojem pari polova, kao što je slučaj i sa vetrogeneratorom koji je analiziran u radu. Blok šema vetrogeneratora data je na slici 1.



Slika 1. Šema vetrogeneratora sa promenljivom brzinom obrtanja i energetske pretvaračem u statorskom kolu

Kompletna snaga generatora prolazi kroz energetske pretvarač, zbog čega je potrebno da nazivna snaga pretvarača bude jednaka nominalnoj snazi generatora, što povećava troškove u odnosu na koncept sa dvostrano napajanim asinhronim generatorom. Upotrebom višepolnog sinhronog generatora, umesto asinhronog generatora sa kaveznim rotorom, moguće je izbeći primenu reduktora, što predstavlja veliku prednost ovog koncepta u odnosu na ostale. Uz to, obzirom da celokupna snaga prolazi kroz energetske pretvarač, ovo rešenje se odlično pokazuje prilikom poremećaja u mreži, ograničavajući trenzijentne struje na minimum. Takođe je poboljšano upravljanje tokovima aktivne i reaktivne snage, zbog čega je ovakvo rešenje povoljnije za mrežne operatere.

Iako mnogi radni uslovi utiču na rad vetrogeneratora, u ovom radu je prvenstveno stavljeno težište na uticaj na kvalitet električne energije. S obzirom da je vetrogenerator priključen na mrežu, veoma je važno razumevanje izvora poremećaja koji utiču na kvalitet električne energije. U osnovi, napon i učestanost moraju da se održavaju što je više moguće stabilnim.

Termin kvalitet električne energije [3], [4] se uglavnom odnosi na kvalitet napona napajanja, koji treba da ispuni sledeće kriterijume u odnosu na:

- napon (tolerancija je u okviru granica $U_n \pm 5\%$),
- dozvoljenu ukupnu distorziju napona $THD_U \leq 3-8\%$ (više vrednosti odgovaraju mrežama nižeg naponskog nivoa), i
- dozvoljeni debalans napona (3%) koji ima veći uticaj na odgovarajući i ekonomični rad opterećenja/potrošača.

U ovom radu su analizirana dva aspekta uticaja vetrogeneratora na kvalitet električne energije. Prvi predstavlja uticaj napojne mreže na potrošače koji se nalaze blizu tačke priključenja vetrogeneratora. Drugi aspekt je zahtev distributivnog preduzeća prema vlasniku vetrogeneratora kako bi se održala stabilnost i pouzdanost isporuke električne energije u distributivnoj mreži. Analiza je izvršena korišćenjem proračuna na osnovu podataka o mreži u skladu sa standardima i tehničkim preporukama [5]-[7], kao i merenjima na samom vetrogeneratoru (slika 2). Merenja su izvršena pri maloj brzini vetra kako bi se naglasio najnepovoljniji slučaj rada vetrogeneratora.



Slika 2. Vetrogenerator na kojem su vršena ispitivanja

2. Konfiguracija mernog sistema

Merni instrument koji se koristi za merenje električnih veličina (napona i struja) i računanje ostalih veličina (snage, faktor snage, faktori izobličenja, viši

harmonici napona i struja) na osnovu kojih se određuje kvalitet električne energije prema važećim svetskim standardima je analizator kvaliteta električne energije, premda se mogu koristiti i rešenja sa akvizicionim mernim sistemima.

Za ispitivanje upotrebljeni su analizatori kvaliteta električne energije proizvođača Chauvin Arnoux tip C.A 8334 i C.A 8335, sa pripadajućim setom strujnih senzora tipa AmpFlex193 [8].

Ispitivanje je izvršeno merenjem međufaznih napona i struja i sračunavanjem svih ostalih relevantnih parametara (snage, energije, faktora snage, faktora izobličenja, sadržaja viših harmonika).

Merna oprema je priključena direktno na niskonaponsku stranu transformatora 0.4/10 kV kojim je vetrogenerator povezan na 10 kV distributivnu mrežu (slika 3).



Slika 3. Mesto priključenja mernog sistema

Ispitivanja su obavljena u trajanju od nekoliko sati u tri vremenska intervala (I interval 10:40 – 11:36, II interval 11:41 – 11:52 i III interval 11:59 – 13:29), pri čemu je tokom perioda ispitivanja nekoliko puta dolazilo do zaustavljanja i pokretanja vetrogeneratora zbog oscilovanja brzine vetra.

Uslovi pod kojima su vršena ispitivanja su detektovana odgovarajućim meračima temperature, vlage i atmosferskog pritiska:

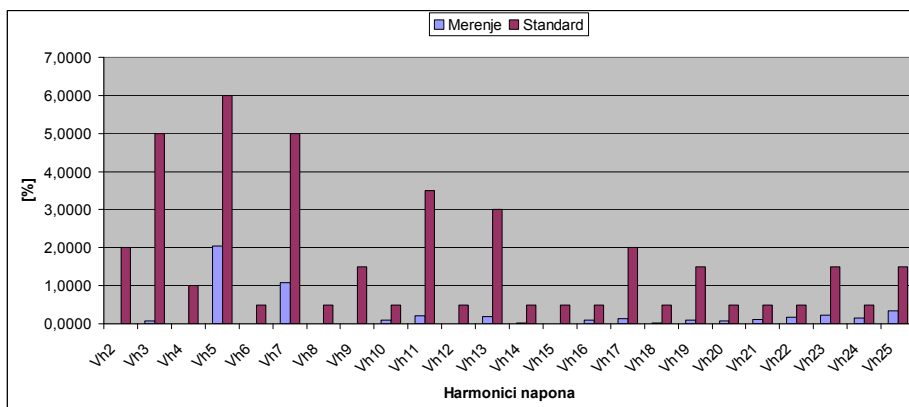
- Temperatura ambijenta: 12,1°C
- Relativna vlažnost: 50.4% RH
- Atmosferski pritisak: 867.9 hPa
- Nadmorska visina 1390 m.

3. Rezultati merenja i analize

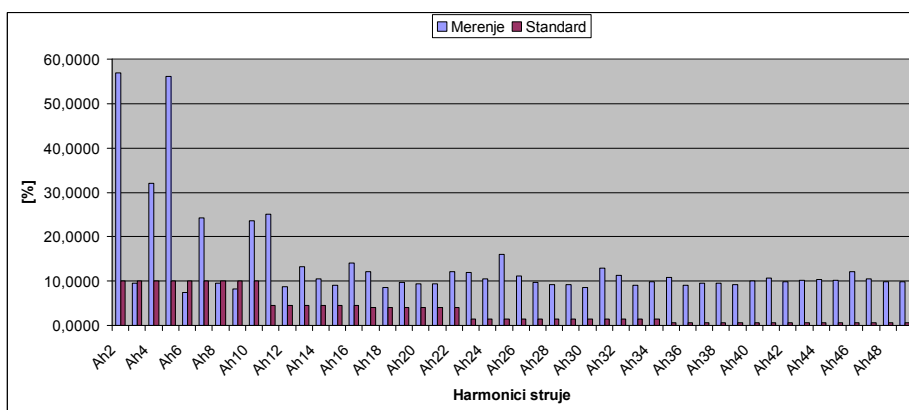
Sumarni rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 1 za prvi interval merenja koji je uzet kao referentni, dok su na slikama 4 i 5 dati podaci o sadržaju viših harmonika napona i struja, respektivno, sve do 49. reda. Pri tome, harmonici napona su poređeni sa vrednostima datim u standardu EN 50160:2008 [4] za harmonike do 25. reda, dok su harmonici struje analizirani u odnosu na granične vrednosti predviđene standardom IEEE 519 [9] do 49. reda.

Tabela 1. Rezultati ispitivanja parametara kvaliteta električne energije u I intervalu

Veličina	Opis	Min	Max	Srednje
f [Hz]	Frekvencija	49.970	50.030	49.998
U_1 [V]	Međufazni napon faza 1-2	406.60	411.00	408.91
U_2 [V]	Međufazni napon faza 2-3	408.50	412.80	410.96
U_3 [V]	Međufazni napon faza 1-3	405.80	410.10	408.33
V_1 [V]	Fazni napon 1. faze	234.20	236.70	235.58
V_2 [V]	Fazni napon 2. faze	235.60	238.10	236.93
V_3 [V]	Fazni napon 3. faze	235.10	237.60	236.55
I_1 [A]	Struja opterećenja 1. faze	3.90	58.10	33.10
I_2 [A]	Struja opterećenja 2. faze	3.70	56.50	31.89
I_3 [A]	Struja opterećenja 3. faze	3.70	55.70	31.44
$THDu$ [%]	Faktor izobličenja napona	2.20	3.00	2.72
$THDi$ [%]	Faktor izobličenja struje	0.00	522.60	124.59
P [kW]	Aktivna snaga	5.20	34.57	10.09
Q [kVAr]	Reaktivna snaga	-16.96	20.80	17.95
S [kVA]	Prividna snaga	2.70	40.34	22.83
$\cos\varphi$	Faktor snage	0.901	0.994	0.663



Slika 4. Harmonici napona u odnosu na vrednosti definisane standardom



Slika 5. Harmonici struja u odnosu na vrednosti definisane standardom

Sa slike 5 bi se moglo zaključiti da su sve vrednosti struja viših harmonika znatno veće od onih definisanih standardom. Međutim, uzimajući u obzir činjenicu da su merenja vršena pri maloj brzini vetra i generisanoj snazi vetrogeneratora do 45 kW (nominalna snaga je 500 kW), potrebno je struje harmonika posmatrati u apsolutnim vrednostima, tj. u [A].

Osnovni tehnički uslovi za priključenje malih elektrana na distributivnu mrežu definisani su Tehničkim preporukama Direkcije za distribuciju EPS. Tehnička preporuka br. 16 odnosi se na priključenje malih elektrana na distributivnu mrežu nazivnog napona 0.4 kV, 10 kV, 20 kV ili 35 kV, a prema njoj se kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika proverava pomoću sledećeg izraza:

$$I_{vhdoz} = I_{vhs} \cdot S_{ks} \quad (1)$$

gde je:

I_{vhdoz} - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika na naponskom nivou generatora u [A],

I_{vhs} - vrednost struje višeg harmonika koja je svedena na snagu kratkog spoja na mestu priključenja na distributivnu mrežu u [A/MVA],

S_{ks} - snaga trofaznog kratkog spoja (stvarna vrednost) na mestu priključenja na distributivnu mrežu u [MVA].

Za posmatrani vetrogenerator vrednost stvarne snage kratkog spoja na mestu priključenja je: $S_{ks} = 19.43$ MVA. Uzimajući u obzir ovu vrednost, izračunate su najviše dozvoljene vrednosti struja viših harmonika prema Tehničkoj preporuci br. 16 i date su u sledećoj tabeli.

Tabela 2. Dozvoljene struje ν -tog harmonika i μ -tog interharmonika na naponskom nivou generatora za snagu kratkog spoja u tački priključenja vetrogeneratora

Redni broj višeg harmonika ν	$I_{vhs,\nu,\mu}$ [A]			
	Niski napon	10 kV	20 kV	35 kV
3	77.72			
5	29.14	1.13	0.56	0.32
7	38.86	1.59	0.80	0.45
9	13.60			
11	25.26	1.01	0.51	0.28
13	19.43	0.74	0.37	0.22
17	10.69	0.43	0.21	0.12
19	8.74	0.35	0.17	0.10
23	5.83	0.23	0.12	0.07
25	4.86	0.19	0.10	0.05
$25 < \nu < 40^*$	$4.86 \cdot 25/\nu$	$0.19 \cdot 25/\nu$	$0.1 \cdot 25/\nu$	$0.05 \cdot 25/\nu$
$\nu = \text{paran}$	$29.14/\nu$	$1.17/\nu$	$0.58/\nu$	$0.33/\nu$
$\mu < 40$	$29.14/\mu$	$1.17/\mu$	$0.58/\mu$	$0.33/\mu$
$\mu, \nu > 40^{**}$	$87.43/\mu$	$3.50/\mu$	$1.75/\mu$	$1.02/\mu$

* neparan broj harmonika,

** za opseg modulacije pri frekvenciji od 200 Hz. Mereno u skladu sa EN 61000-4-7, Anex B

Maksimalne srednje vrednosti struja viših harmonika izmerenih na 0.4 kV izvodima generatora izražene u [A] date su u sledećoj tabeli i direktno se mogu porediti sa dozvoljenim vrednostima iz Tabele 2.

Tabela 3. Izmerene maksimalne srednje vrednosti struja ν -tog harmonika na 0.4 kV izvodima vetrogeneratora

Redni broj višeg harmonika ν	Struja ν -tog harmonika [A]		
	I interval merenja 10:40h – 11:36h	II interval merenja 11:41h – 11:52h	III interval merenja 11:59h – 13:29h
3	3.31	2.31	3.70
5	12.76	7.82	15.99
7	5.38	3.44	7.85
9	2.14	1.23	5.07
11	4.74	3.73	8.08
13	3.28	1.97	3.27
17	2.80	1.84	4.26
19	2.29	1.49	3.01
23	3.07	1.65	3.88
25	4.07	1.41	4.17

Kriterijum dozvoljenih vrednosti napona viših harmonika se proverava prema Tabeli 4:

Tabela 4. Dozvoljeni naponi ν -tog harmonika i μ -tog interharmonika u procentima nominalnog napona u tački priključenja vetrogeneratora

Redni broj višeg harmonika ν	Dozvoljene vrednosti napona viših harmonika za 10, 20 i 35 kV mrežu
5	0.5
7	1
11	1
13	0.85
17	0.65
19	0.6
23	0.5
25	0.4
$25 < \nu < 40^*$	0.4
$\nu = \text{paran}$	0.1
$\mu < 40$	0.1
$\mu > 40^{**}$	0.3

* neparan broj harmonika,

** za opseg modulacije pri frekvenciji od 200 Hz. Mereno u skladu sa EN 61000-4-7, Anex B

S obzirom da je merenje na vetrogeneratoru vršeno na strani 0.4 kV, dobijene vrednosti viših harmonika napona treba svesti na stranu 10 kV, kako bi moglo da se izvrši poređenje sa graničnim vrednostima datim u Tabeli 4. Da bi se merene vrednosti svele na 10 kV nivo, neophodno je poznavati

ukupnu impedansu mreže kao i impedansu transformatora 10/0.4 kV preko kojeg je vetrogenerator priključen na distributivnu mrežu. Na osnovu tih impedansi se zatim izračunava deo viših harmonika napona koji će biti injektiran u 10 kV mrežu. Ovakav proračun jeste približan, ali se u ovom slučaju može smatrati dovoljno tačnim, pri čemu vrednost višeg harmonika napona svedenog na 10 kV nivo u % iznosi:

$$U_{hB} = \frac{Z_M}{Z_M + Z_{T10/0.4}} \cdot U_{hA} \quad (2)$$

gde je:

U_{hB} - vrednost višeg harmonika napona svedenog na 10 kV nivo u [%],

U_{hA} - vrednost višeg harmonika napona merenog na 0.4 kV nivou u [%],

Z_M - ukupna impedansa mreže svedena na 10 kV nivo u [Ω],

$Z_{T10/0.4}$ - impedansa transformatora 10/0.4 kV svedena na 10 kV nivo u [Ω].

Za konkretan slučaj dobijaju se sledeće vrednosti:

$$Z_M = 5.66 \Omega$$

$$Z_{T10/0.4} = 6.98 \Omega$$

pa se zamenom vrednosti u izraz (2) dobija:

$$U_{hB} = \frac{5.66}{5.66 + 6.98} \cdot U_{hA} = 0.447 \cdot U_{hA} \quad (3)$$

Na osnovu (3), prethodno izmerene vrednosti viših harmonika napona su date u Tabeli 5.

Tabela 5. Izmerene maksimalne srednje vrednosti napona ν -tog harmonika na 0.4 kV izvodima vetrogeneratora svedene na 10 kV naponski nivo

Redni broj višeg harmonika ν	Napon ν -tog harmonika [%]		
	I interval merenja 10:40h – 11:36h	II interval merenja 11:41h – 11:52h	III interval merenja 11:59h – 13:29h
5	0.97	0.97	1.00
7	0.51	0.51	0.55
11	0.15	0.15	0.17
13	0.13	0.13	0.17
17	0.12	0.12	0.18
19	0.08	0.08	0.19
23	0.13	0.13	0.27
25	0.19	0.19	0.33

4. Zaključak

U radu su prikazani rezultati analize uticaja obnovljivih izvora na napojnu mrežu i to za konkretni vetrogenerator, a takođe i mogućnost da se metodologija iskoristi za sagledavanje načina rada vetrogeneratora za potrebe tehničkih preporuka koje se daju pri priključenju ovakvih uređaja na distributivnu mrežu. Rezultati dobijeni merenjima na transformatoru preko kojeg je vetrogenerator priključen na distributivnu 10 kV mrežu pokazali su sledeće:

- sve zabeležene maksimalne srednje vrednosti viših harmonika struja su u granicama propisanim novom Tehničkom preporukom br. 16, čije se usvajanje očekuje;

- sve zabeležene maksimalne srednje vrednosti viših harmonika napona, izuzev 5. harmonika, su u granicama propisanim novom Tehničkom preporukom br. 16, čije se usvajanje očekuje;

- neke od vrednosti zabeleženih maksimalnih srednjih vrednosti viših harmonika (5. harmonika u jednom intervalu merenja i 25. harmonika u dva intervala merenja) struja su bile iznad granica propisanih postojećom Tehničkom preporukom br. 16. Za ove redove viših harmonika ni vrednosti viših harmonika napona nisu u granicama propisanih postojećom Tehničkom preporukom br. 16.

Treba napomenuti da su merenja vršena u trenucima relativno malog generisanja od strane vetrogeneratora. Aktivna snaga generisanja se kretala u rasponu 0-45 kW kao posledica slabog vetra. To znači da se u režimima velikih aktivnih snaga, tj. u režimima kada je aktivna snaga približno jednaka nominalnoj snazi generatora ($P_n = 500$ kW) može očekivati porast vrednosti harmonika struja u [A]. Sa druge strane, ne treba izgubiti iz vida da se prilikom proračuna snage kratkog spoja na mestu priključenja vetrogeneratora išlo na stranu sigurnosti, pa je za proračun dozvoljenih vrednosti struja viših harmonika uzeta najmanja vrednost snage kratkog spoja na mestu priključenja. Drugim rečima, kao granica dozvoljenih vrednosti uzet je najkritičniji slučaj sa aspekta vetrogeneratora kao izvora.

Literatura

- [1] I.Boldea, *The Electric Generators Handbook, Variable Speed Generators*, CRC Press, Taylor & Francis Group. (2006)
- [2] ENERCON, *Wind energy converters – Technology & Service*. (2010)
- [3] R.C.Dugan, M.F.McGranaghan, S.Santso, H.Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition, McGraw-Hill. (2004)

- [4] Power Quality Standard EN 50160:2008, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system. (2008)
- [5] BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.), Technical Guideline: Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network. (2008)
- [6] International Standard IEC 61400-21, Edition 2.0, Wind Turbines – Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines. (2008)
- [7] IEEE Standard 1547.1, IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. (2005)
- [8] Chauvin Arnoux, Three Phase Electrical Networks Analyzer C.A 8335 Qualistar Plus, Operating Manual, France. (2009)
- [9] IEEE Standard 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. (1992)

Abstract. The paper presents the results of analysis of wind-generator and their influence to the power quality parameters in the coupling point to the distribution network. The specified results should be used as a starting point for distribution system operators (DSO) for issuing permit for connecting renewable sources, mainly for wind-generators. As the case study, the results of measurements at the only one wind generator installed in Serbia, near town of Tutin, are used. The cases of wind-generator start and stop during low wind and consequently smaller value of the energy delivered to the network are particularly analyzed. Taking into consideration that law regulations in this field are not yet defined, EU standards and guidelines are used along with the newly adopted Technical recommendation No. 16 of Public Enterprise Electric Power Industry of Serbia.

Keywords: wind-generator, power quality, measurements, distribution network

Wind-generator Influence to the Power Quality in the Coupling Point to the Distribution Network

Rad primljen u uredništvo 12.09.2011. godine
Rad prihvaćen 15.10.2011. godine