

Ana Tomasovic
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
ana.tomasovic@koncar-institut.hr

Jandro Šimić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
jandro.simic@koncar-institut.hr

Mate Lasić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
mate.lasic@koncar-institut.hr

Dražen Barukčić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
drazen.barukcic@koncar-institut.hr

MJERENJE KVALITETE NAPONA NAKON PRIKLJUČKA VE ORLICE

SAŽETAK

Vjetroelektrane sve češće postaju sastavni dio elektroenergetskih sustava pa tako i distribucijskih mreža. Njihovim priključenjem na male i relativno slabe distributivne mreže može se bitno promijeniti kvaliteta napona u okolini točke priključka. Uzroci promjene kvalitete napona leže u: fluktuaciji proizvodnje električne energije vjetroelektrana, sklapanjima vjetroagregata (uklop, isklop vjetroagregata i sklapanje lokalne kompenzacije ako postoji), te injektiranju viših harmonijskih članova struje ukoliko vjetroagregati imaju energetske pretvarače. Fluktuacije proizvodnje električne energije nastale zbog fluktuacija brzine vjetra izazivaju fluktuacije iznosa napona i flikere. Sklapanja vjetroagregata i njihovih lokalnih kompenzacija mogu izazvati tranzijente koji mogu izazvati smetnje kod potrošača. Injektiranje viših harmonijskih članova struje u mrežu izaziva izobličenje valnog oblika napona. Pogon VE Orlice u distribucijskoj mreži uzrokuje promjene naponskih prilika i zbog toga je potrebno obaviti mjerenja kvalitete napona i negativnog povratnog djelovanja na mjestu priključka VE Orlice na mrežu (tj. na mjestu predaje električne energije).

Operator distribucijskog sustava, u relativno slabim distribucijskim mrežama (mala snaga kratkog spoja), u svrhu održavanja određene razine kvalitete napona i zaštite opreme drugih korisnika mreže najčešće ograničava izdizanje napona koje može uzrokovati pogon vjetroelektrane. Najjednostavniji način ograničavanja izdizanja napona je djelovanje nadnaponskog releja na prekidač za odvajanje (koji je u nadležnosti operatora distribucijskog sustava), čime se vjetroelektrana odvaja s mreže ukoliko napon na mjestu priključka pređe podešenu graničnu vrijednost.

U ovom članku će biti obrađena iskustva s mjerenja kvalitete napona i mjerenja za vrijeme sklopnih operacija na mjestu priključka VE Orlice na mrežu. Mjerenja kvalitete napona će biti obrađena u skladu sa HRN EN 50160:2008, dok će mjerenja viših harmoničkih članova struje i emisije flikera biti obrađena u skladu sa Mrežnim pravilima EES-a (NN 36/2006).

Gljučne riječi: vjetroelektrana Orlice, distribucijska mreža, kvaliteta napona, sklopne operacije, HRN EN 50160:2008

POWER QUALITY MEASUREMENTS AFTER CONNECTION OF VE ORLICE

SUMMARY

Wind power plants are more and more often becoming a part of power systems and of distribution systems as well. Connection of wind power plants on small and weak distribution systems may significantly change voltage quality in vicinity of PCC. Voltage quality changes are caused by: fluctuation of active power produced by wind power plant, switching operation of wind power unit (cut in or cut out of wind power unit or switching of local compensation, if it exists), and injection of current harmonics if the units contain power electronic devices. Fluctuations of active power as a result of fluctuations of wind

speed cause voltage fluctuations and flicker. Switching of wind power units and their local compensation can cause transients that can affect consumer. Injection of harmonic currents causes distortion of the voltage waveform. Operation of wind power plant Orlice with distribution system causes changes of voltage quality, and it is necessary to perform measurements of power quality and measurements of negative influence of operation of VE Orlice on power quality on the point of connection of wind power plant Orlice on distribution system (PCC).

In relatively small and weak distribution systems (small short circuit power), in order to maintain certain voltage quality level and protection of devices of other consumers, distribution system operator generally limits voltage rise that can cause wind power plant operation. The simplest way to limit voltage rise is action of over voltage relay on circuit breaker for separation of wind power plant from distribution system (that circuit breaker is in jurisdiction of distribution system operator). Action of over voltage relay on circuit breaker separates the wind power plant from distribution system, if the voltage rise exceeds the adjusted limit value of voltage.

This paper will discuss issues related to power quality measurements and measurements during switching operations on the point of connection of wind power plant Orlice on distribution system. Power quality measurements will be discussed according to HRN EN 50160:2008, while the measurements of current harmonics and flicker emission will be discussed according to Mrežna pravila EES-a (NN 36/2006).

Key words: wind power plant Orlice, distribution system, power quality, switching operations, HRN EN 50160:2008.

1. UVOD

Na brdu Orlice u blizini Šibenika nalazi se novoizgrađena vjetroelektrana Orlice. VE Orlice se sastoji od ukupno 11 vjetroagregata, od čega je 8 vjetroagregata tipa E 44 pojedinačne snage 900 kW, i 3 vjetroagregata tipa E-48 pojedinačne snage 800 kW. Vjetroagregati E 44 i E 48 su proizvedeni od strane njemačke tvrtke Enercon. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrane je 9,6 MW, a vjetroelektrana je priključena na 30 kV nadzemni vod Šibenik 3 – Primošten. Priključak je izveden kao T-spoj u mjestu Grebaštica, gdje se nalazi i 30 kV rasklopno postrojenje RS 30 kV "VE ORLICE". E 44 i E 48 su tipovi vjetroagregata sa sinkronim generatorom i koriste pretvarače pune snage (u odnosu na snagu generatora). Kod ovih izvedbi 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 uzbudu generatora, pa je time omogućena kontrola izlazne radne i jalove snage vjetroagregata. Zato nije potrebna kompenzacija jalove snage.

Mjerenja su obavljena u RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009 (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak). Mjerenja kvalitete napona su obavljena u skladu sa HRN EN 50160:2008, dok su mjerenja viših harmoničkih članova struje i emisije flikera obavljena u skladu sa Mrežnim pravilima EES-a (NN 36/2006).

Osim mjerenja kvalitete napona i negativnog povratnog djelovanja, obavljena su i snimanja valnih oblika struje i napona za vrijeme sklopnih operacija na mjestu priključka VE Orlice na mrežu u razdoblju od 10.06.2009. (srijeda) do 06.07.2009. (ponedjeljak). Mjerenja su obavljena prilikom isklopa i uklopa prekidača (polje H1) u RS 30 kV "VE ORLICE", te prilikom sinkronizacije vjetroelektrane na mrežu.

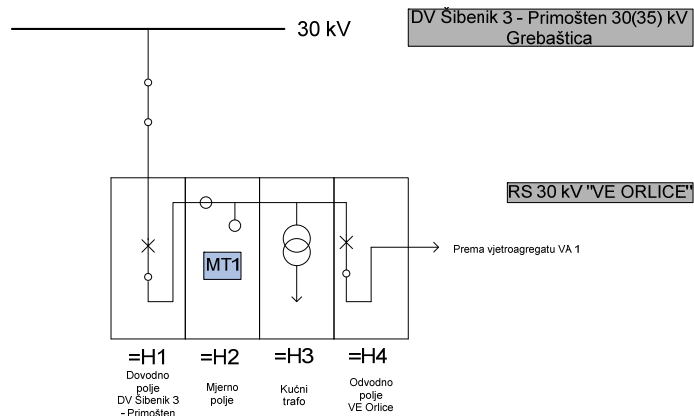
2. MJESTO I OPIS MJERENJA

Mjesto predaje električne energije iz VE Orlice se nalazi u RS 30 kV "VE ORLICE". Priključak RS 30 kV "VE ORLICE" je izveden u obliku T-spoja na 30 kV nadzemni vod Šibenik 3 – Primošten u mjestu Grebaštica. U RS 30 kV "VE ORLICE" postoje ugrađena dva prekidača koja služe za odvajanje vjetroelektrane od mreže. Prvi prekidač koji se nalazi u polju =H1 u nadležnosti je DP Elektre Šibenik. Na isklup prekidača može djelovati ugrađeni nadnaponski relej koji odvaja VE s mreže u trenutku kada iznos napona na mjestu priključka pređe vrijednost 30,7 kV (u trajanju dužem od 3s). Drugi prekidač koji se nalazi u polju H4 je u nadležnosti vjetroelektrane Orlice i služi za odvajanje vjetroelektrane s mreže u slučaju kvara, održavanja i drugo. Pojednostavljena jednopolna shema RS 30 kV "VE ORLICE" je prikazana na slici 1.

Na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju H2 – MT1) su obavljena mjerenja kvalitete napona u skladu sa HRN EN 50160:2008 u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak). Tijekom većine ovog razdoblja mjerenja VE Orlice je bila u pogonu. Osim neplaniranih slučajnih ispada VE iz pogona, VE Orlice nije bila u pogonu u razdoblju od

24 sata od dana 15.06.2009. (ponedjeljak) u 12:00 do 16.06.2009. (utorak) u 12:00 sati. U tom razdoblju je VE bila van pogona (isklopljen je bio prekidač u polju =H4) u svrhu ocjene negativnog povratnog djelovanja VE Orlice na mrežu (emisija flikera i viših harmonika struje) prema Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (NN 36/2006).

Pored toga obavljena su i snimanja valnih oblika struje i napona za vrijeme sklopnih operacija (prilikom isklopa i uklopa prekidača - polje =H1 u RS 30 kV "VE ORLICE"), te prilikom sinkronizacije vjetroelektrane na mrežu.



Slika 1. Prikaz mjernih mjesta na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

Za mjerenja su korišteni sljedeći instrumenti: Memobox 808 tvrtke Lem, PP4300 tvrtke Dranetz i Power Network Analyser PNA-570 tvrtke Dewetron.

3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

3.1. Uvod u analizu rezultata mjerenja

Idealan sinusni valni oblik, amplitude jednake $\sqrt{2} \cdot U_n$ i frekvencije jednake 50 Hz (60 Hz u Americi) u cijeloj mreži nije ekonomski opravdano, a vrlo često ni tehnički moguće postići (električna energija se najčešće proizvodi na velikoj udaljenost od mjesta potrošnje, prenosi se električnom mrežom od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje preko nekoliko stupnjeva transformacije, zahtijeva konstantnu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje, ne može se uskladištiti i ne može se dobiti provjera kvalitete neposredno prije upotrebe).

Kvaliteta napona u nekoj točki distribucijske elektroenergetske mreže iskazuje zbirno međudjelovanje proizvodnih jedinica, prijenosnih i distribucijskih linija i transformacija te trošila spojenih na elektroenergetski sustav, izraženim kroz nekoliko parametara:

- frekvencija napona,
- iznos napona u stacionarnom stanju (najčešće 10-min RMS prosjeci),
- brze dinamičke promjene napona (fliker),
- nesimetričnost napona,
- harmoničko izobličenje valnog oblika napona,
- međuharmonici napona,
- propadi napona,
- prenaponi mrežne frekvencije,
- tranzijentni prenaponi,
- naponi signaliziranja (MTU).

Navedeni parametri se mogu podijeliti u dvije skupine: prvih 6 parametara pripadaju u skupinu trajno prisutnih pojava, a ostala 4 parametara pripadaju u skupinu diskretnih pojava u mreži. Isto tako postoje i preporuke koje definiraju dozvoljeno odstupanje od navedenih parametara. Preporuke se donose na međunarodnoj razini i mogu, ali ne moraju, biti zakonski obvezujuće.

Međunarodne organizacije koje daju vrijednosti tehničkih parametara su: IEC, CENELEC, IEEE, UNIPED, CIGRE, ANSI i dr.

3.1.1. HRN EN 50160:2008

Hrvatska norma vezana za kvalitetu napona je HRN EN 50160:2008 "Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava", a preuzeta je od CENELEC-a - EN 50160:2007 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks".

Norma određuje mjerni period od sedam dana, odnosno 168 sati bez prestanka, a mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi i napone signaliziranja koji se promatraju u vremenskim isječcima od 3 sekunde. Norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za frekvenciju je to 99,5% vremena, a za napone signaliziranja 99% vremena). Registrirani podaci se nakon završetka mjerenja prikazuju u odgovarajućoj formi.

3.1.2. Mrežna pravila elektroenergetskog sustava (NN 36/2006)

Za kvalitetu napona u nekoj točki mreže su odgovorni i operator sustava i korisnici mreže. Održavanje određene razine kvalitete napona (nužno zbog ispravnog rada opreme koja je priključena na EES) u nekoj točki mreže je obveza operatora sustava. Ovu zadaću operator sustava provodi ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja opreme svih korisnika mreže. Svaki korisnik mreže (kupac, proizvođač ili trgovac električne energije) je dužan povratna djelovanja svoje opreme na kvalitetu napona (injektiranje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane (unaprijed dogovorene) granične vrijednosti (koje u načelu određuje operator sustava).

U Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (NN 36/2006) u poglavlju 5.3.6.3. se navodi dio regulative koji određuje dodatne tehničke uvjete za priključak proizvodnih jedinica (snage do 5 MW) na distribucijsku mrežu. Radi se prvenstveno o emisijama flikera i negativnom povratnom djelovanju (emisija harmonijskih struja):

- a) emisije flikera P_{st} i P_{lt} koje su uzrokovane pogonom vjetroelektrane ne smiju narušiti dopuštena ograničenja kako u kratkotrajnom (st) tako i u dugotrajnom (lt) razdoblju, u skladu s izrazima:

$$P_{st} < 0,35 \quad (1)$$

$$P_{lt} < 0,25 \quad (2)$$

- b) emisija neparnih harmonijskih struja ne smije biti veća od vrijednosti navedenih u tablici I:

Tablica I. Ograničenje emisije harmonijskih struja obzirom na nazivnu struju prema Mrežnim pravilima EES-a (NN 36/2006)

Neparni harmonijski član, h	Ograničenje emisije harmonijskih struja obzirom na nazivnu struju
$h < 11$	4,0 %
$11 \leq h < 17$	2,0 %
$17 \leq h < 23$	1,5 %
$23 \leq h < 35$	0,6 %
$35 \leq h < 50$	0,3 %
Faktor ukupnog harmonijskog izobličenja (THD)	5,0 %
Napomena: unutar istog frekvencijskog raspona, emisija parnih harmonijskih struja ne smije biti veća od 25% navedenih vrijednosti	

Mjerenje emisije viših harmonika struja u praksi može biti problematično, jer izobličenje valnog oblika napona, koje je uvijek prisutno u određenoj mjeri u distribucijskoj mreži, može izazvati povećanje izobličenja valnog oblika struje.

Emisiju flikera treba izračunati temeljem dva mjerenja (sa elektranom u pogonu i van pogona), za oba pokazatelja emisije flikera pomoću izraza:

$$P_{emisija} = \sqrt{P_{sa\ elektranom}^2 - P_{bez\ elektrane}^2} \quad (3)$$

Faktor jakosti dugotrajnog flikera Plt se računa na temelju 12 uzastopnih vrijednosti faktora jakosti kratkotrajnog flikera Pst, pomoću izraza:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} P_{stj}^3} \quad (4)$$

3.2. Analiza rezultata mjerenja kvalitete napona na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

Mjerenja kvalitete napona su obavljena na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak). Mjerenja kvalitete napona su obavljena u skladu sa HRN EN 50160:2008. U tablici II. se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2008. Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi i napone signaliziranja koji se promatraju u vremenskim isječcima od 3 sekunde. S obzirom da norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za frekvenciju je to 99,5% vremena, a za napone signaliziranja 99% vremena), vrijednosti koje su dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa (odnosno 99,5% za frekvenciju i 99% za napone signaliziranja). Vrijednosti parnih naponskih harmonika su bile jako niske, i stoga nisu dane u tablici II.

Za SN mreže iznos opskrbnog napona je određen deklariranim (dogovorenim) naponom U_n , koji je u ovom slučaju jednak U_n i iznosi 30 kV.

Tablica II. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009. do 18.06.2009.

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST		
Frekvencija napona napajanja (Hz)	49,50 – 50,50	49,97 – 50,05		
Iznos napona napajanja (% U_n)	0,90 – 1,10	L1 0,98 – 1,00	L2 0,98 – 1,01	L3 0,98 – 1,00
P_{st}	-	L1 - 0,25	L2 - 0,19	L3 - 0,29
P_{lt}	≤ 1	L1 - 0,22	L2 - 0,22	L3 - 0,22
Nesimetričnost napona (%)	< 2% Iznimno < 3%	0,25		
THD U_{10} (%)	< 8,0%	L1 - 1,8	L2 - 1,7	L3 - 1,6
$U_{h3} RMS_{10}$ (%) U_1	< 5,0%	L1 - 0,5	L2 - 0,6	L3 - 0,3
$U_{h5} RMS_{10}$ (%) U_1	< 6,0%	L1 - 1,4	L2 - 1,3	L3 - 1,3
$U_{h7} RMS_{10}$ (%) U_1	< 5,0%	L1 - 1,1	L2 - 1,1	L3 - 1,0
$U_{h9} RMS_{10}$ (%) U_1	< 1,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h11} RMS_{10}$ (%) U_1	< 3,5%	L1 - 0,2	L2 - 0,1	L3 - 0,1
$U_{h13} RMS_{10}$ (%) U_1	< 3,0%	L1 - 0,1	L2 - 0,1	L3 - 0,1
$U_{h15} RMS_{10}$ (%) U_1	< 0,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h17} RMS_{10}$ (%) U_1	< 2,0%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h19} RMS_{10}$ (%) U_1	< 1,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h21} RMS_{10}$ (%) U_1	< 0,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h23} RMS_{10}$ (%) U_1	< 1,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
$U_{h25} RMS_{10}$ (%) U_1	< 1,5%	L1 - 0,0	L2 - 0,0	L3 - 0,0
MTU _{3"} 208 Hz (% U_n)	< 9%	L1 - 0,6	L2 - 0,6	L3 - 0,6

Iz navedene tablice je vidljivo da su sve izmjerene vrijednosti unutar preporučenih granica danih prema HRN EN 50160:2008.

U tablici III. je dana statistika sa brojem i vremenom trajanja događaja na lokaciji RS 30 kV "VE Orlice" u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak).

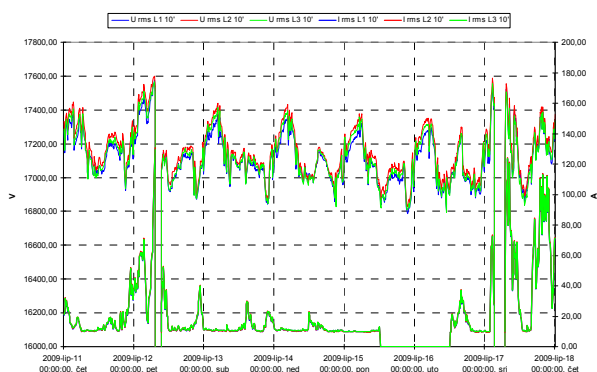
Tablica III. Broj i vrijeme trajanja događaja na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009. do 18.06.2009.

Faza L1, L2, L3	< 20 ms	20 - < 100 ms	100 - < 500 ms	0.5 - < 1 s	1 - < 3 s	3 - < 20 s	20 - < 60 s	≥ 1 min
Udarno prijelazno stanje > 10.00%		6						
Propad > 10.00%								
10 - < 15 %	5							
15 - < 30 %	1					1		
30 - < 60 %		6						
60 - < 99 %		1	1					
Prekid								6

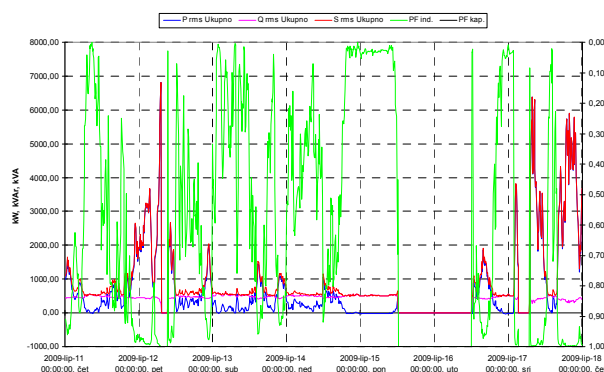
Kao što se vidi iz tablice III. tijekom monitoringa mjerni instrument je zabilježio 21 događaj (naponski propad, prenapon) i šest dugotrajnih prekida napajanja (trajanje dulje od 3 minute). Ova vrijednost zadovoljava uvjete norme HRN EN 50160:2008.

3.3. Analiza rezultata mjerenja iznosa struja, te ukupne radne i jalove snage na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

Mjerenja iznosa struja, te ukupne radne i jalove snage su obavljena na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak). Grafički prikaz rezultata mjerenja je dan na slikama 2 i 3.



Slika 2. Usporedba iznosa faznih struja i napona na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE"



Slika 3. Usporedba ukupne radne, ukupne jalove, ukupne prividne snage i faktora snage na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE"

Na slici 2. je dan prikaz usporedbe iznosa faznih struja i napona (10 minutne srednje RMS vrijednosti) na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju – ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE". Sa navedene slike je vidljivo da je VE Orlice bila u pogonu većinu razdoblja mjerenja. VE Orlice nije bila u pogonu u razdoblju od 24 sata od dana 15.06.2009. (ponedjeljak) u 12:00 do 16.06.2009. (utorak) u 12:00 sati. U tom razdoblju je VE bila van pogona (isklopljen je bio prekidač u polju =H4) u svrhu ocjene negativnog povratnog djelovanja VE Orlice na mrežu prema Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (NN 36/2006). Osim toga, bilo je i drugih prekida (trajanja dužeg od 10 min koji su vidljivi na grafičkom prikazu) u radu VE Orlice zbog isklopa prekidača u nadležnosti Operatora distribucijskog sustava DP Elektre Šibenik (npr. u petak 12.06.2009. ili u srijedu 17.06.2009.). Radi se o prekidima trajanja dužeg od 10 min koji su vidljivi na grafičkom prikazu. Pretpostavka je da je razlog isklopa prekidača u polju =H1 iznos napona veći od 30,7 kV jer je na prekidač u polju =H1 djelovao ugrađeni nadnaponski relej koji odvaja VE s mreže u trenutku kada iznos napona na mjestu priključka pređe vrijednost 30,7 kV (u trajanju dužem od 3s). Za vrijeme pogona VE Orlice vidljivo je da su najveći iznosi struja bili oko 132 A po fazi i to je zabilježeno dana 12.06.2009. (petak) u 07:10 sati. Tijekom pogona VE Orlice na mrežu u ovom razdoblju mjerenja, iznosi struja su se najčešće kretali između 10 i 40 A po fazi.

Na slici 3. je dan prikaz usporedbe ukupne radne, ukupne jalove, ukupne prividne snage i faktora snage (10 minutne srednje RMS vrijednosti) na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju – ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE". Za vrijeme pogona VE Orlice vidljivo je da je najveći iznos radne snage bio oko 6,8 MW ili 71% nazivne snage vjetroelektrane (nazivna snaga je 9,6 MW) i to je zabilježeno dana 12.06.2009. (petak) u 07:10 sati, dok su se iznosi radne snage najčešće kretali između 0 i 2 MW tijekom cijelog razdoblja mjerenja. Za vrijeme pogona VE Orlice vidljivo je da tijekom cijelog razdoblja mjerenja vjetroelektrana daje

jalovu snagu u mrežu (induktivan faktor snage). Kod malih brzina vjetra, vjetroelektrana ne proizvodi električnu energiju, već troši energiju iz mreže za vlastitu potrošnju. Radna snaga koju vjetroelektrana treba za vlastitu potrošnju (zakretanje gondole i lopatica, rad staničnog računala i sl.) iznosi nešto više od 16 kW.

3.4. Analiza rezultata mjerenja iznosa kratkotrajnog i dugotrajnog flikera na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

Mjerenja iznosa flikera (kratkotrajnog i dugotrajnog) su obavljena na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak). Analiza mjerenja iznosa flikera je obavljena u skladu sa Mrežnim pravilima (NN 36/2006).

Prema dodatnim tehničkim uvjetima za priključenje vjetroelektrana snage do 5 MW (poglavlje 5.3.6.3.) iz Mrežnih pravila (NN 36/2006) emisije flikera Pst i Plt koje su uzrokovane pogonom vjetroelektrane ne smiju narušiti dopuštena ograničenja kako u kratkotrajnom (st - Pst < 0,35) tako i u dugotrajnom (lt - Plt < 0,25) razdoblju. Ukoliko vjetroelektrana Orlice (nazivne snage veće od 5 MW) zadovoljava dodatne tehničke uvjete za priključenje vjetroelektrana snage do 5 MW, njen rad je zadovoljavajući.

Emisiju flikera treba izračunati temeljem dva mjerenja (sa elektranom u pogonu i van pogona) za oba pokazatelja pomoću izraza (3). Takav izračun vrijedi zbog toga što se doprinos VE emisiji flikera već postojećem flikeru u mreži ne zbraja aritmetički.

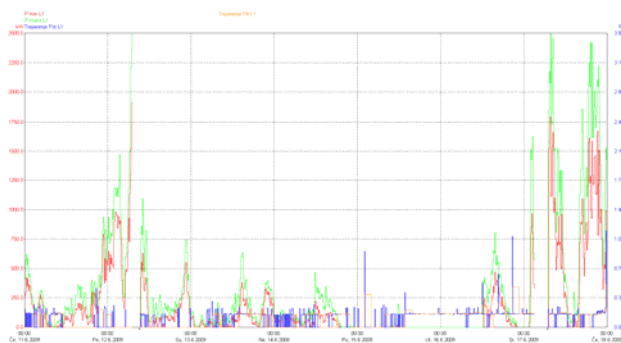
Ako se prema navedenom izrazu izračuna doprinos rada vjetroelektrane emisiji flikera, s tim da se u izraz uvrste tipične vrijednosti za fliker kada je vjetroelektrana bila van pogona (između 15.06.2009. u 12:00 i 16.06.2009. u 12:00) i kada je vjetroelektrana bila u pogonu (ostatak razdoblja mjerenja) dobiju se sljedeće vrijednosti za kratkotrajni fliker:

$$P_{emisija-st} = \sqrt{0,47^2 - 0,39^2} = 0,26$$

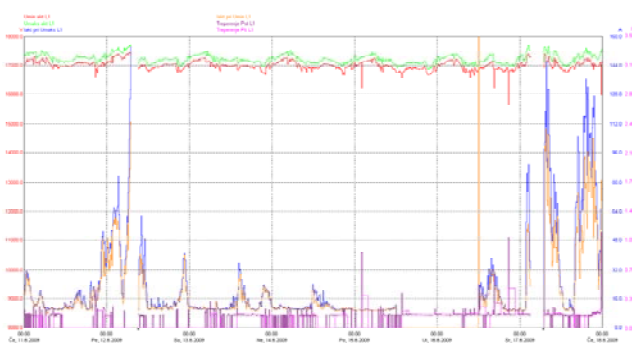
i za dugotrajni fliker:

$$P_{emisija-lt} = \sqrt{0,35^2 - 0,30^2} = 0,18$$

Slika 4 daje usporedbu maksimalne i minimalne radne snage (1 s vrijednosti) te faktora jakosti kratkotrajnog i dugotrajnog flikera u fazi L1 na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE". Slika 5 daje usporedbu kratkotrajnog flikera i dugotrajnog flikera te mogućih uzroka flikera (10 ms minimalne i maksimalne vrijednosti napona te vrijednosti struje u trenucima očitavanja vrijednosti napona) u fazi L1 na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE". Iz navedenih slika se može zaključiti da pogon vjetroelektrane ne uzrokuje povećanje iznosa kratkotrajnog i dugotrajnog flikera za vrijednosti dane mrežnim pravilima (Pst ≤ 0.35 i Plt ≤ 0.25). U trenutku povećanja vrijednosti flikera najčešće nema fluktuacija u snazi VE Orlice (nema velike razlike između minimalne P_{min} i maksimalne P_{maks} radne snage). Uzrok povećanju flikera je nešto veća razlika između minimalne U_{min} i maksimalne U_{maks} vrijednosti napona (10 ms vrijednosti), a s obzirom da u tim trenucima razlika struja I_{akt} pri U_{min} i I_{akt} pri U_{maks} nije značajna, zaključak je da povećanje iznosa flikera dolazi iz mreže.



Slika 4. Usporedba maksimalne i minimalne proizvedene radne snage te kratkotrajnog i dugotrajnog flikera u fazi L1



Slika 5. Prikaz kratkotrajnog i dugotrajnog flikera te mogućih uzroka flikera (10 ms minimalne i maksimalne vrijednosti napona te vrijednosti struje u trenucima očitavanja vrijednosti napona) u fazi L1

3.5. Analiza rezultata mjerenja iznosa viših harmonika struje na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

Mjerenja iznosa viših harmonika struje su obavljena na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak).

S obzirom da u Mrežnim pravilima (NN 36/2006) nije određen interval u kojem izmjereni podaci moraju zadovoljavati navedene granične vrijednosti, kao ni interval usrednjavanja viših harmonika struja, to je preuzeto iz tehničkog izvještaja IEC 61000-3-6:2008 (Period mjerenja je tjedan dana, interval usrednjavanja 10 minuta, a mjerodavna je maksimalna izmjerena vrijednost u 95% vremena monitoringa). Isto tako, izmjerene vrijednosti viših harmonika struje su izražene u postotku efektivne nazivne struje I_n koja odgovara usuglašenoj snazi (snazi iz elektroenergetske suglasnosti, koja u ovom slučaju iznosi 9,6 MW). U tablici IV. se nalaze prikazane vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana i granične vrijednosti prema poglavlju 5.3.6.3. Mrežnih pravila (NN 36/2006).

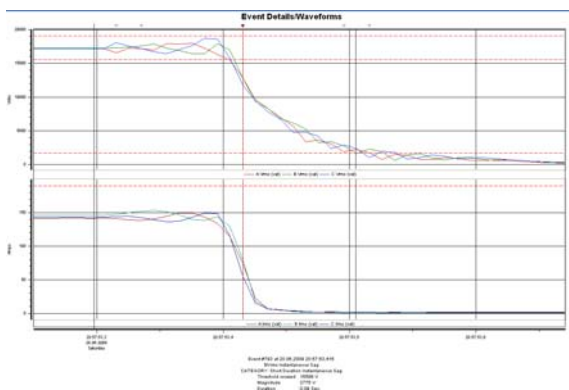
Vrijednosti strujnih harmonika koje su bile jako niske, u odnosu na graničnu vrijednost, nisu dane u tablici IV.

Tablica IV. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009. do 18.06.2009.

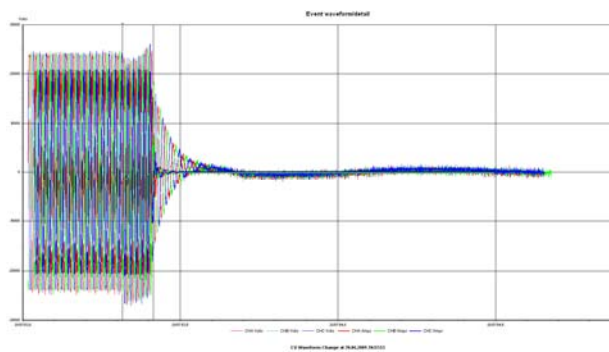
VIŠI HARMONIK STRUJE	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA MREŽNIM PRAVILIMA (NN 36/2006)	IZMJERENA VRIJEDNOST (maksimalna u 95% vremena-tjedna)		
THD $I_{10'}$ (%) ili $\sqrt{\sum i_h^2}$	< 5,000%	L1 - 1,3	L2 - 1,1	L3 - 1,1
I_{h2} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 1,000%	L1 - 0,5	L2 - 0,4	L3 - 0,4
I_{h3} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 4,000%	L1 - 0,3	L2 - 0,3	L3 - 0,1
I_{h4} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 1,000%	L1 - 0,5	L2 - 0,5	L3 - 0,1
I_{h5} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 4,000%	L1 - 0,5	L2 - 0,6	L3 - 0,7
I_{h6} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 1,000%	L1 - 0,4	L2 - 0,4	L3 - 0,0
I_{h7} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 4,000%	L1 - 0,9	L2 - 0,9	L3 - 0,8
I_{h8} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 1,000%	L1 - 0,2	L2 - 0,2	L3 - 0,0
I_{h11} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 2,000%	L1 - 0,3	L2 - 0,3	L3 - 0,3
I_{h13} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 2,000%	L1 - 0,3	L2 - 0,3	L3 - 0,3
I_{h23} RMS $_{10'}$ (% I_n)	< 0,600%	L1 - 0,0	L2 - 0,1	L3 - 0,1

3.6. Analiza rezultata mjerenja za vrijeme sklopnih operacija na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE"

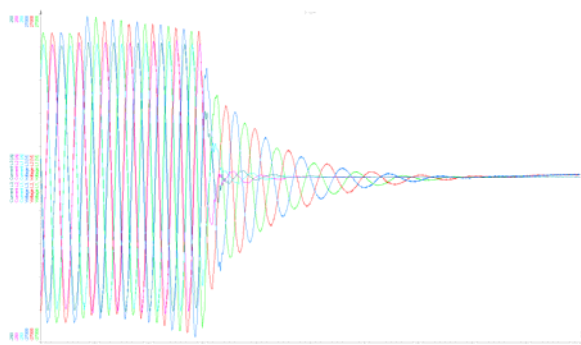
Snimanje valnih oblika napona i struja za vrijeme sklopnih operacija je obavljeno na mjestu predaje električne energije iz VE Orlice na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) u razdoblju od 10.06.2009. (srijeda) do 06.07.2009. (ponedjeljak). Snimanje valnih oblika struja i napona je obavljeno sa dva instrumenta (Power Network Analyser PNA-570 tvrtke Dewetron i PP 4300 tvrtke Dranetz) dok je statistički zapis događaja zabilježen u Memoboxu 808A tvrtke LEM. Tijekom navedenog razdoblja zabilježeno je ukupno 261 događaja (prenapona i propada) i 24 prekida (6 kratkotrajnih i 18 dugotrajnih prekida). U nastavku je grafički prikazan isklon i uklop vjetroelektrane na mrežu. Na slici 6. se nalazi U - I dijagram (prikaz efektivnih vrijednosti napona i struja po fazama), a na slikama 7. i 8. se nalazi prikaz valnih oblika napona i struja na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake =H2) dana 20.06.2009. u 20:57:15 sati kada je nastupio prekid. Prekid je nastao uslijed djelovanja nadnaponskog releja na prekidač u polju =H1, jer je napon prešao vrijednost 30,7 kV (17,7 kV fazno). Na slici 9. se nalazi prikaz valnih oblika napona i struja na 30 kV sabirnicama (u RS 30 kV "VE ORLICE" u mjernom polju oznake H2) dana 20.06.2009. u 21:44:20 sati, u trenutku nestanka prekida koji je trajao 47 minuta i 06 sekundi. Na slikama 6., 7. i 8. je vidljivo da je napon u sve tri faze prvo porastao na vrijednost nešto veću od 19 kV fazno. Porast napona je trajao oko 100 ms, nakon čega je došlo do smanjenja iznosa napona u sve tri faze, postupno do nule i prestanka rada vjetroelektrane (isklop generatora s mreže). U trenutku prije prestanka rada elektrane struja je iznosila 141 A po fazi efektivno, odnosno snaga vjetroelektrane je bila 7,3 MW (77 % nazivne snage). Struja je na nulu pala kroz 60 ms. Smanjenje iznosa napona do nule je trajalo oko 160 ms. Nakon toga je nastupio prekid u trajanju od 47 minuta i 6 sekundi, nakon kojeg je došlo do ponovne uspostave napona napajanja i uklopa vjetroagregata na mrežu (slika 9.).



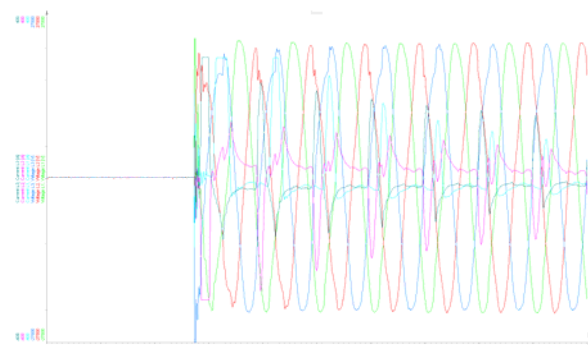
Slika 6. U-I dijagram na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE" dana 20.06.2009. u 20:57:15 sati



Slika 7. Valni oblici napona i struja na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE" dana 20.06.2009. u 20:57:15 sati



Slika 8. Valni oblici napona i struja na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE" dana 20.06.2009. u 20:57:15 sati



Slika 9. Valni oblici napona i struja na 30 kV sabirnicama (u mjernom polju - ćelija oznake =H2) u RS 30 kV "VE ORLICE" dana 20.06.2009. u 21:44:20 sati

4. ZAKLJUČAK

Pogon vjetroelektrana uzrokuje promjene u kvaliteti napona u okolini točke priključenja na mrežu. Nakon priključenja vjetroelektrane u određeno čvorište mreže važno je zadovoljiti propisane razine parametara kvalitete napona i negativnog povratnog djelovanja (prema normi HRN EN 50160:2008 i Mrežnim pravilima EES-a – NN 36/06). Uzroci promjene kvalitete napona leže u: fluktuaciji proizvodnje električne energije vjetroelektrana, sklapanjima vjetroagregata (uklop, isklop vjetroagregata i sklapanje lokalne kompenzacije ako postoji), te injektiranju viših harmonijskih članova struje ukoliko vjetroagregati imaju energetske pretvarače. Utjecaj vjetroelektrane na promjenu kvalitete napona u točki priključenja ovisi o snazi kratkog spoja u točki priključenja, snazi vjetroelektrane, parametrima vjetroagregata i dr. Ovaj utjecaj je najprikladnije utvrditi mjerenjem u točki priključenja, i to s vjetroelektranom van pogona i sa vjetroelektranom u pogonu. Takva mjerenja su potrebna operatoru sustava, posebno u relativno slabim distribucijskim mrežama (mala snaga kratkog spoja), u svrhu održavanja određene razine kvalitete napona i zaštite opreme drugih korisnika mreže.

Na brdu Orlice u blizini Šibenika nalazi se novoizgrađena vjetroelektrana Orlice. Pogon VE Orlice u distribucijskoj mreži uzrokuje promjene naponskih prilika i zbog toga su obavljena mjerenja kvalitete napona i negativnog povratnog djelovanja na mjestu priključka VE Orlice na mrežu, te snimanja valnih oblika struje i napona za vrijeme sklopničkih operacija. Mjesto predaje električne energije iz VE Orlice u distribucijsku mrežu HEP-ODS-a se nalazi u RS 30 kV "VE ORLICE". Mjerenja kvalitete napona su obavljena u skladu sa HRN EN 50160:2008, dok su mjerenja viših harmonijskih članova struje i emisije flikera obavljena u skladu sa Mrežnim pravilima EES-a (NN 36/2006).

Na osnovu rezultata mjerenja kvalitete napona na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak) zaključeno je da su se sve izmjerene vrijednosti nalazile unutar preporučenih granica danih prema HRN EN 50160:2008.

Na osnovu rezultata mjerenja iznosa struja, te ukupne radne i jalove snage na lokaciji RS 30 kV "VE ORLICE" u razdoblju od 11.06.2009. (četvrtak) do 18.06.2009. (četvrtak) vidljivo je da je za vrijeme pogona VE Orlice najveći iznos radne snage je bio oko 6,8 MW ili 71% nazivne snage vjetroelektrane (nazivna snaga je 9,6 MW). VE Orlice tijekom cijelog razdoblja mjerenja daje jalovu snagu u mrežu (induktivan faktor snage). Kod malih brzina vjetra, vjetroelektrana ne proizvodi električnu energiju, već troši energiju iz mreže za vlastitu potrošnju. Radna snaga koju vjetroelektrana treba za vlastitu potrošnju (zakretanje gondole i lopatica, rad staničnog računala i sl.) iznosi nešto više od 16 kW.

Na temelju usporedbe mjerenja dok je elektrana bila u pogonu i dok elektrana nije bila u pogonu kao i na temelju usporedbe fluktuacija snage, vjetroelektrana Orlice ne uzrokuje povećanje iznosa kratkotrajnog i dugotrajnog flikera za vrijednosti dane mrežnim pravilima za vjetroelektrane nazivne snage do 5 MW ($P_{st} \leq 0.35$ i $P_{lt} \leq 0.25$).

Na temelju provedenih mjerenja viših harmonika struje može se zaključiti da se sve izmjerene vrijednosti viših harmonika struje nalaze ispod graničnih razina danih prema Mrežnim pravilima.

U razdoblju od 10.06.2009. (srijeda) do 06.07.2009. (ponedjeljak) su obavljena snimanja valnih oblika napona i struja. Zabilježena vremena u kojima su se vjetroagregati odvojili od mreže u slučaju neke prijelazne pojave su iznosila između 20 ms i 160 ms, bez obzira na trenutnu proizvodnju električne energije (između 71% i 100% nazivne snage). U slučaju da iznos napona na mjestu priključka vjetroelektrane na mrežu pređe vrijednost od 30,7 kV, odnosno 17,7 kV fazno, nadnaponski relej djeluje na prekidač u polju =H1 koji je u nadležnosti DP Elektre Šibenik. U tom slučaju struje padnu na nulu kroz 20 - 60 ms, dok naponi padnu na nulu kroz nešto duže vrijeme – između 160 ms i 1 s.

LITERATURA

- [1] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, "Narodne novine" broj 36/06, 2006.
- [2] IEC 61000-3-6 Ed 1.0 (1996) "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication"
- [3] EN 50160:2007 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks" (HRN EN 50160:2008), CENELEC, 2007.