

doi:10.15199/48.2017.06.10

## Praca turbin wiatrowych w systemie elektroenergetycznym oraz ich wpływ na jakość energii elektrycznej

**Streszczenie.** W artykule omówiono zagadnienia związane z pracą farm wiatrowych w systemie elektroenergetycznym. Przedstawiono wymagania dotyczące przyłączania farm wiatrowych do sieci przesyłowej i dystrybucyjnej oraz pracy farm wiatrowych przy zakłóceniach w sieci. Szczegółowo omówiono zasady przeprowadzania testów sprawdzających prawidłowość pracy farm wiatrowych oraz pomiarów parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej i analizy wpływu pracy farm wiatrowych na jakość energii elektrycznej. Przedstawiono wybrane wyniki badań wpływu pracy turbiny VESTAS V90 na jakość energii elektrycznej w węźle jej przyłączenia do sieci dystrybucyjnej SN.

**Abstract.** The article presents the principles of measurements and assessment of characteristics of power quality supplied by the wind turbine connected to the power system. The basic technical parameters of the wind turbine of type FL MD 77 and the characteristics of its output as a function of wind speed were described. The present article also shows selected results of measurements of parameters characterizing the power quality in the node of wind turbine FL MD 77 of 500 kW connection to the medium voltage network of 15 kV and results of verification tests concerning correct operation of wind turbine type of FL MD 77 during its switching off and switching on to the power system after the required 10-minute period of interruption for different power levels of the wind turbine. (*Operation of wind turbines in the power system and their impact on the power quality*).

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, wyższe harmoniczne, turbina wiatrowa, energia odnawialna

**Keywords:** power quality, harmonics, wind turbine, renewable energy

### Wprowadzenie

Ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz obowiązek realizacji przez poszczególne kraje członkowskie Unii Europejskiej celów ilościowego udziału energii pochodzącej z OZE w końcowym zużyciu energii prowadzą do konieczności wykorzystywania m.in. energii wiatru. Energetykę wiatrową cechują jednak pewne ograniczenia wynikające przede wszystkim ze zmienności prędkości wiatru oraz jej możliwy negatywny wpływ na funkcjonowanie niektórych organizmów żywych, w tym również człowieka. Ma ona także negatywny wpływ na zmiany krajobrazu i może negatywnie oddziaływać na pracę sieci elektroenergetycznej oraz degradację jakości energii elektrycznej [1, 2, 6, 7].

Ocenę prawidłowości pracy turbiny wiatrowej oraz jej ewentualnego wpływu na jakość energii elektrycznej w węźle przyłączenia turbiny do sieci elektroenergetycznej, przeprowadza się w okresie pierwszego roku pracy farmy wiatrowej wykonując odpowiednie testy sprawdzające spełnienie wymagań określonych w odpowiedniej instrukcji ruchu i eksploatacji sieci elektroenergetycznej. Sposób przeprowadzenia testów turbiny wiatrowej uzgadniany jest w ramach umowy o przyłączenie.

### Charakterystyka jakości energii elektrycznej oraz wybrane zasady przyłączania turbin wiatrowych do sieci elektroenergetycznych

Zbiór parametrów oraz ich wartości dopuszczalnych charakteryzujących jakość dostaw energii elektrycznej zostały określone w §38 - §40 Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [13] (tzw. rozporządzeniu systemowym) i uzależnione są od grupy przyłączeniowej, do której został zakwalifikowany dany podmiot przyłączony do sieci. Ocenę jakości energii elektrycznej zaleca przeprowadzać się w okresach tygodniowych na podstawie pomiaru zmian m.in.: wartości skutecznych i częstotliwości napięcia zasilającego, zawartości wyższych harmonicznych napięć o rzędach do 40. włącznie, stopnia asymetrii napięć oraz wskaźników migotania światła wyrażających intensywność tego zjawiska [8, 12, 13]. Przy czym dla większości ww. parametrów (za wyjątkiem częstotliwości) wymagana jest zgodność

uzyskanych wyników pomiarów w 95% czasu obserwacji. W pozostałych 5% czasu wartości ww. parametrów (za wyjątkiem częstotliwości) mogą przyjmować wartości dowolne, nieograniczone wymaganiami rozporządzenia [13].

Szczegółowe wymagania techniczne dla jednostek wytórczych przyłączanych i przyłączonych do sieci dystrybucyjnej oraz sieci przesyłowej określone zostały w odpowiednich instrukcjach ruchu i eksploatacji zarówno sieci dystrybucyjnych (IRiESD) np. w [3], jak również sieci przesyłowej (IRiESP) [4], opracowanych przez operatorów poszczególnych sieci elektroenergetycznych i zatwierdzonych przez Prezesa URE. Wymagania te są ze sobą zgodne w przypadku instrukcji opracowanych przez poszczególnych operatorów sieci dystrybucyjnych (OSD).

W przypadku przyłączenia bezpośredniego do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym wyższym niż 1 kV farmy wiatrowej o łącznej mocy przyłączeniowej wynoszącej co najmniej 5 MW wymagane jest dodatkowo opracowanie ekspertyzy wpływu tej instalacji na system elektroenergetyczny. Sporządzenie ekspertyzy zapewnia przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się przesyłaniem lub dystrybucją energii elektrycznej, a koszt jej sporządzenia uwzględniany jest w całkowitej opłacie pobieranej za przyłączenie do sieci. Ekspertyza powinna zostać sporządzona przez zewnętrznego podmiot lub jednostkę naukową bądź naukowo-badawczą niezależną od przedsiębiorstwa energetycznego oraz podłączanego do sieci podmiotu.

W okresie pierwszego roku pracy farmy wiatrowej wymagane jest przeprowadzenie odpowiednich testów sprawdzających w celu potwierdzenia spełnienia wymagań zawartych w IRiESD lub IRiESP. Testy przeprowadza odpowiedni podmiot ekspercki niez zaangażowany w jakiegokolwiek prace związane z budową farmy wiatrowej, wyposażony w specjalistyczne urządzenia pomiarowe, posiadające ważne świadectwa zgodności, spełniające wymagania normy PN-EN 61000-4-30 [11]. Harmonogram oraz zakres testów uzgadniany jest z operatorem sieci i powinien odpowiadać wymaganiom zawartym w odpowiedniej instrukcji IRiESD lub IRiESP, natomiast zasady realizacji badań jakości energii dostarczanej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej zostały określone w normie [12].

Przeprowadzenie testów sprawdzających ma na celu określenie wpływu pracy farmy wiatrowej na jakość energii elektrycznej w miejscu jej przyłączenia do sieci (ang. PCP – *Point of Common Coupling*). Farma nie powinna generować nagłych skoków i zmian napięcia przekraczających 3% oraz 2,5% w przypadku zakłóceń powtarzających się dla częstotliwości do 10 zakł./godz. oraz do 1,5% dla zakłóceń powtarzających się dla częstotliwości do 100 zakł./godz. z uwzględnieniem rozruchów i wyłączeń farmy. Udział farmy wiatrowej w całkowitych wahaniami napięcia w miejscu jej przyłączenia wyrażony wartościami wskaźnika krótko-okresowego migotania światła  $P_{st}$  oraz wskaźnika długo-okresowego migotania światła  $P_{lt}$  wyznaczonymi zgodnie z normą [10] nie powinien przekraczać odpowiednio:

- $P_{st} < 0,30$  dla sieci o napięciu znamionowym  $U_n \geq 220$  kV,  $P_{st} < 0,35$  dla sieci o  $U_n = 110$  kV i  $P_{st} < 0,45$  dla sieci SN,
- $P_{lt} < 0,20$  dla sieci  $U_n \geq 220$  kV,  $P_{lt} < 0,25$  dla sieci o  $U_n = 110$  kV i  $P_{lt} < 0,35$  dla sieci SN.

Ponadto farma wiatrowa nie powinna powodować emisji względnych wyższych harmonicznych napięcia o rzędach  $n = 2, \dots, 50$  większych niż:

- 1,0% w przypadku przyłączenia farmy do sieci o  $U_n \geq 220$  kV przy jednocześnie  $THD U < 1,5\%$ ,
- 1,5% lub 0,70% w przypadku przyłączenia farmy do odpowiednio: koordynowanej sieci o  $U_n = 110$  kV lub sieci OSD o  $U_n = 110$  kV przy  $THD U < 1,5\%$  i analogicznie  $THD U < 2,0\%$  dla ww. sieci,
- 1,5% w przypadku przyłączenia farmy do sieci SN przy jednocześnie  $THD U < 4,0\%$  [3, 4, 9].

Powyższe wymagania winny być spełnione przez co najmniej 99% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych dla każdego tygodniowego okresu obserwacji. Wyjątek stanowią wartości wskaźnika  $P_{lt}$ , który określany jest w okresach dwugodzinnych zgodnie z normą [10]. Wymagania zawarte w IRIESD dotyczące emisji wyższych harmonicznych w przypadku przyłączenia farmy do sieci o napięciu znamionowym 110 kV są bardziej restrykcyjne, niż odpowiadające im wymagania zawartych IRIESP.

Praca farmy wiatrowej w rzeczywistych warunkach, determinowanych intensywnością zaburzeń pochodzących z pozostałych ich źródeł, nie może spowodować przekroczenia wartości dopuszczalnych wskaźników określających jakość energii elektrycznej wskazanych w rozporządzeniu systemowym [13].

#### Podstawowe dane techniczne turbiny wiatrowej VESTAS V90

W tabeli 1 przedstawione zostały podstawowe dane techniczne charakteryzujące turbinę wiatrową VESTAS V90. Turbiny VESTAS V90 mogą być instalowane na wieżach o wysokości 80 m, 95 m lub 105 m i dostępne są z dwoma rodzajami generatorów asynchronicznych pierścieniowych, dwustronnie zasilanych o mocach 1,8 MW i 2 MW. Poprzez sterowanie wartościami napięcia od strony wirnika maszyny możliwa jest zmiana generowanej w obwodzie stojana mocy biernej. Turbina automatycznie zmienia połączenie stojana generatora z gwiazdy na trójkąt i odwrotnie w zależności od bieżącej wartości wytwarzanej przez nią mocy czynnej: z gwiazdy na trójkąt dla  $P > 650$  kW w czasie  $t > 30$  s oraz z trójkąta na gwiazdę, gdy  $P < 200$  kW w czasie  $t > 15$  s.

Zastosowane w turbinie układy sterowania dają możliwość regulacji mocy biernej w szerokim zakresie, zarówno generacji, jak i poboru mocy biernej, w zależności od mocy czynnej. Dla elektrowni Vestas V90 producent podaje możliwości regulacji w zakresie od  $\cos\varphi = 0,98$  (poj.) (generacja mocy biernej  $Q$ ) do  $\cos\varphi = 0,96$  (ind.) (pobór mocy biernej) przy generacji znamionowej mocy czynnej  $P$ . Dla mniejszych wartości mocy  $P$  możliwe jest zwiększenie generacji mocy  $Q$  poza podane granice.

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne turbiny wiatrowej typu VESTAS V90 [5, 14]

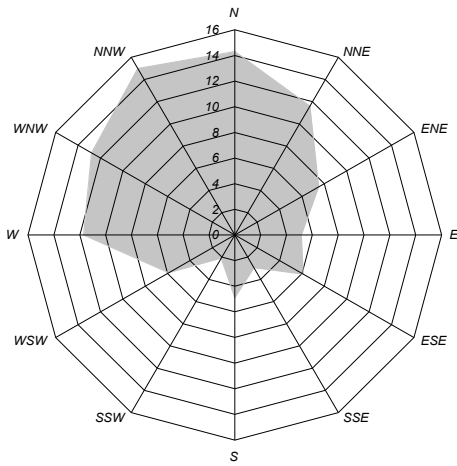
Parametr techniczny	Wartość
moc czynna	2000 kW
moc pozorna	2083 kVA
prędkość wiatru dla startu	2,5 m/s
nominalna prędkość wiatru	13 m/s
prędkość wiatru dla wyłączenia	25 m/s
nominalna prędkość obrotowa wirnika	14,9 obr./min.
zakres regulacji obrotów wirnika	9 ÷ 14,9 obr./min.
napięcie	690 V
częstotliwość	50 Hz
rodzaj generatora	asynchroniczny o zmiennej prędkości obrotowej z podwójnym zasilaniem
rodzaj przekształtnika	IGBT typu VMP (Vestas Multi Processor) z modulacją PWM
średnica rotora	90 m

#### Wyniki badań jakości energii elektrycznej w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

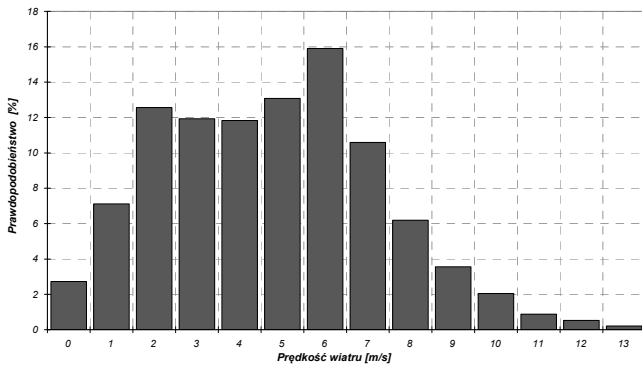
Zgodnie z obowiązującymi wymaganiami oraz po dokonaniu niezbędnych ustaleń z OSD dotyczących zakresu, sposobu oraz terminu przeprowadzenia badań, zostały zrealizowane pomiary jakości energii elektrycznej oraz badania charakteru zmian napięć, prądów i mocy turbiny VESTAS V90 w węzle PCP sieci SN o napięciu 15 kV z uwzględnieniem stanów przejściowych towarzyszących wyłączeniu oraz ponownemu załączaniu turbiny wiatrowej do pracy. Pomiary przeprowadzono dla różnych prędkości wiatru w tygodniowym okresie obserwacji z wykorzystaniem analizatora jakości energii elektrycznej typu PQ-BOX 200 spełniającego wymagania normy PN-EN 61000-4-30, klasa A. Urządzenia pomiarowe zostały zainstalowane w obwodach wtórnych istniejących w stacji przekładników prądowych i napięciowych.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono odpowiednio: rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru o określonym kierunku wraz z wyznaczonym histogramem prędkości wiatru. Natomiast na rysunkach 3 – 11 zobrazowano wybrane wyniki pomiarów parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w badanym węzle sieci dystrybucyjnej dla tygodniowego okresu obserwacji i rzeczywistych warunków generacji mocy determinowanych zmiennością prędkości wiatru.

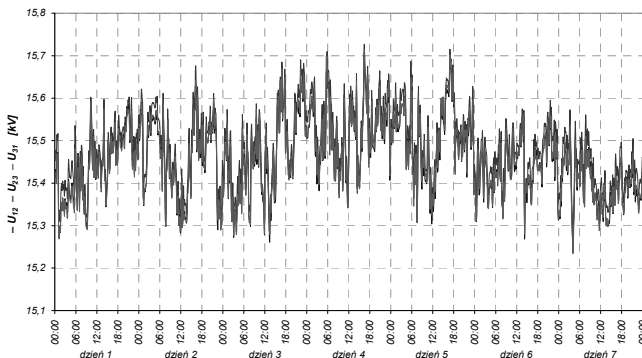
Praca turbiny wiatrowej nie powoduje widocznego wzrostu stopnia odkształcenia napięć w węzle PWP. Wartości współczynnika  $THD U$  napięć fazowych nie przekraczają 2% (rys. 4). Nie stwierdzono istotnej zależności pomiędzy wartością współczynnika  $THD U$  a mocą generowaną przez turbinę wiatrową – rysunek 6, co potwierdza wyznaczona wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosząca 0,096. Na rysunku 7 przedstawiono wykres wartości chwilowych prądów zarejestrowanych w węzle przyłączenia elektrowni wiatrowej Vestas V90 dla przypadku generacji mocy maksymalnej  $P_{max} = -1,98$  MW. Jak widać, prądy wykazują charakter niemal sinusoidalnie zmienny,  $THD I = 1,28\%$ . Na rysunkach 8 i 9 zobrazowane zostały widma względne wyższych harmonicznych napięć dla przypadków generacji mocy odpowiednio: minimalnej  $P_{min} = -149,5$  kW, (wówczas  $THD U = 1,59\%$ ) oraz maksymalnej  $P_{max} = -1,98$  MW (wówczas  $THD U = 1,16\%$ ). Na rysunku 10 przedstawiono wykres zmian dominującej harmonicznej o rzędzie  $n = 5$ . Natomiast na rysunku 11 oraz w tabeli 2 przedstawiono wyniki oceny stopnia intensywności migotania światła w postaci wartości wskaźników  $P_{lt}$  oraz wartości odpowiednich percentyli CP95 i CP99 określonych dla wskaźników  $P_{st}$  i  $P_{lt}$ .



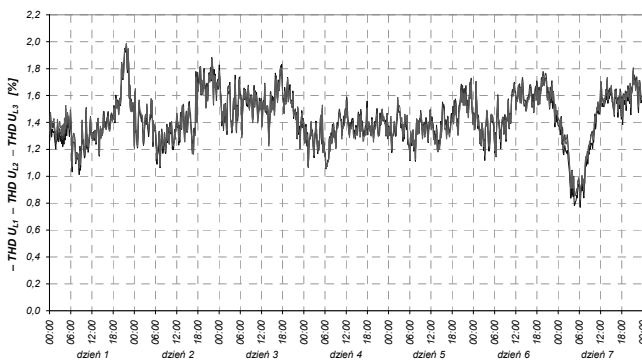
Rys. 1. Rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru o określonym kierunku



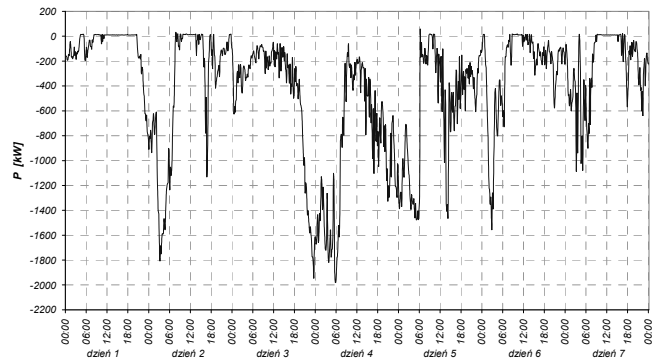
Rys. 2. Histogram prędkości wiatru



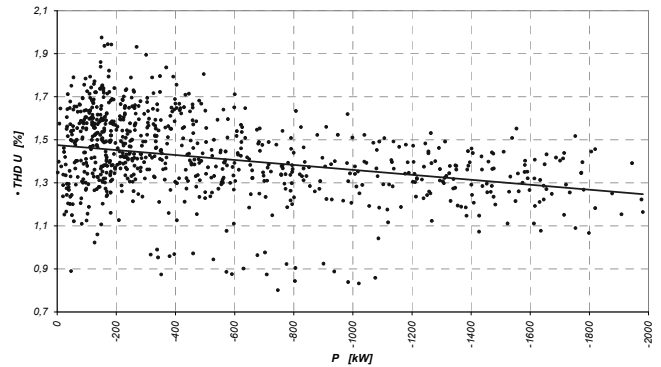
Rys. 3. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90 do sieci SN



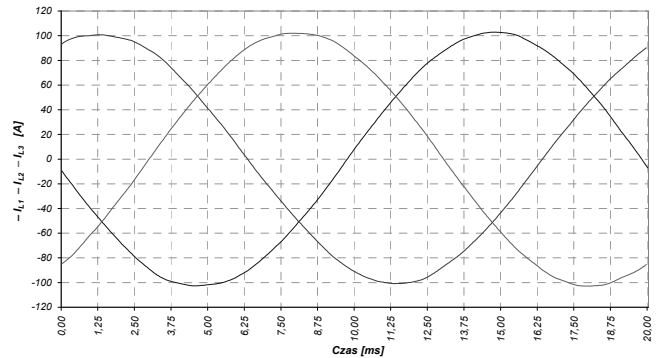
Rys. 4. Wartości współczynników  $THD U_{L1}$ ,  $THD U_{L2}$ ,  $THD U_{L3}$  napięć fazowych zarejestrowane w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90



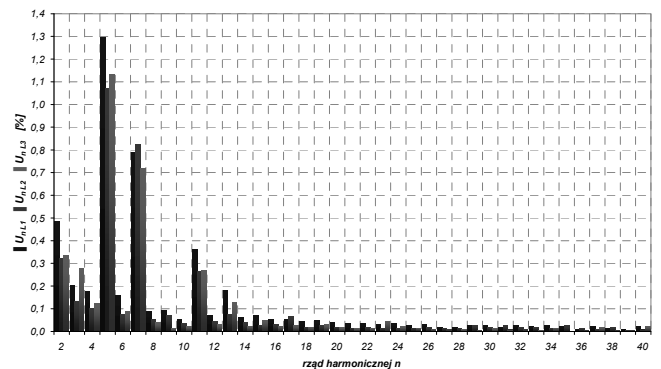
Rys. 5. Wartości mocy czynnej trójfazowej  $P$  zarejestrowane w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90



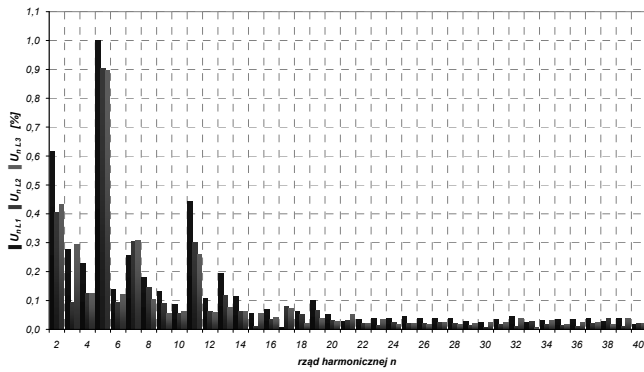
Rys. 6. Zależność średnich wartości współczynnika  $THD U$  od mocy czynnej  $P$  generowanej przez turbinę wiatrową Vestas V90



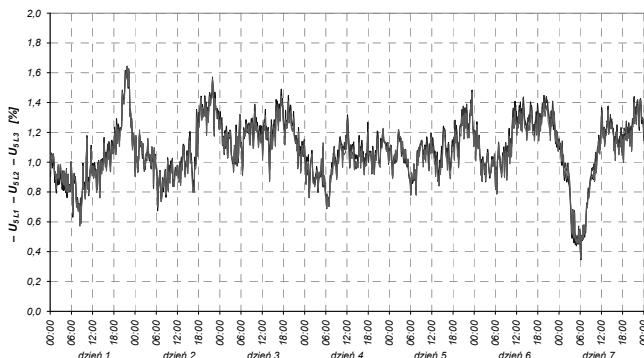
Rys. 7. Wartości chwilowe prądów  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$  zarejestrowane w węzle przyłączenia elektrowni wiatrowej Vestas V90 dla przypadku generacji mocy maksymalnej  $P_{max}$



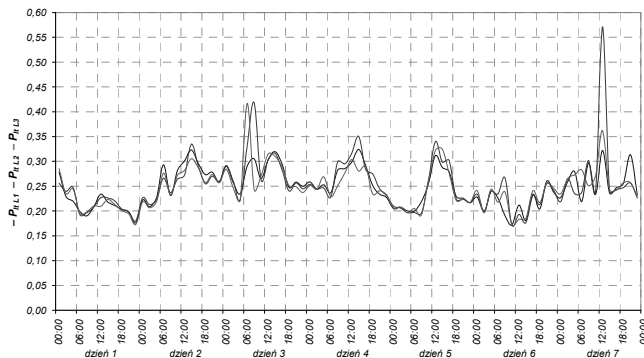
Rys. 8. Widmo wyższych harmonicznych napięć  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  zarejestrowane w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90 dla przypadku generacji mocy minimalnej  $P_{min}$



Rys. 9. Widmo wyższych harmonicznych napięć  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  zarejestrowane w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90 dla przypadku generacji mocy maksymalnej  $P_{max}$



Rys. 10. Wartości względne harmonicznej  $U_5$  zarejestrowane w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90



Rys. 11. Wartości wskaźników długookresowego migotania światła  $P_{stL1}$ ,  $P_{stL2}$ ,  $P_{stL3}$  dla napięć fazowych w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90

Tabela 2. Zestawienie wartości procentyli CP99 i CP95 określone dla wskaźników migotania światła  $P_{st}$  i  $P_{fl}$  wyznaczonych na podstawie rejestracji napięć  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  i  $U_{L3}$  węźle PWP

Rodzaj procentyla	CP99/CP95 dla wskaźnika $P_{st}$			CP99/CP95 dla wskaźnika $P_{fl}$		
	$P_{stL1}$	$P_{stL2}$	$P_{stL3}$	$P_{flL1}$	$P_{flL2}$	$P_{flL3}$
CP99	0,40	0,44	0,40	0,32	0,44	0,37
CP95	0,34	0,34	0,34	0,31	0,33	0,31

Na podstawie przeprowadzonych badań podczas wyłączenia turbiny wiatrowej oraz jej ponownego załączenia po wymaganym 10-minutowym czasie postoju, stwierdzono, iż związane z tymi operacjami skoki i zmiany napięcia nie przekraczają wartości dopuszczalnej wynoszącej 3%.

### Podsumowanie

Każda z przyłączonych do sieci elektroenergetycznej farm wiatrowych powinna w okresie pierwszego roku jej

pracy przejść pomyślnie ocenę prawidłowości jej funkcjonowania oraz ewentualnego wpływu jej pracy na jakość energii elektrycznej w węźle przyłączenia. Sposób przeprowadzenia właściwych testów sprawdzających spełnienie przez farmę wiatrową wymagań określonych w odpowiedniej instrukcji ruchu i eksploatacji sieci elektroenergetycznej uzgadniane jest z operatorem sieci w ramach umowy o przyłączenie.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż jakość energii elektrycznej w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej VESTAS V90 do sieci elektroenergetycznej odpowiada obowiązującym wymaganiom określonym w rozporządzeniu systemowym [11] oraz instrukcji IRIESD [3]. Nie stwierdzono przekroczenia wartości dopuszczalnych harmonicznych napięcia określonych w odpowiedniej instrukcji IRIESD [3]. Wartości procentyli CP99 wyznaczone dla harmonicznej napięcia o rzędzie  $n = 5$  nie przekroczyły wartości dopuszczalnej wynoszącej 1,5%.

**Autor:** dr inż. Marek Gała, E-mail: [m.gala@el.pcz.czest.pl](mailto:m.gala@el.pcz.czest.pl); Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, 42-200 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 17

### LITERATURA

- [1] Gała M.: Pomiary i analiza wpływu pracy turbin wiatrowych na jakość energii elektrycznej w węzłach ich przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. [W:] Maj J. (red.), Kwiatkiewicz P. (red.): Energetyka wiatrowa w wybranych aspektach. WAT, Poznań 2016, s. 213 – 232
- [2] Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Kraków 2013
- [3] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej TAURON Dystrybucja S.A. obowiązująca od dnia 01.01.2014 r.
- [4] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Warszawa 2014, obowiązująca od dnia 01.08.2014
- [5] Karta katalogowa turbin wiatrowych Vestas typu V90 o mocach 1,8 MW i 2,0 MW Vestas Wind Systems A/S, 02/2008
- [6] Klucznik J. Udział farm wiatrowych w regulacji napięcia w sieci dystrybucyjnej. Acta Energetica nr 11/2011, s. 39-46
- [7] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT Warszawa 2007
- [8] Norma PN-EN 50160:2010: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [9] Norma PN-EN 61000-4-7:2007: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-7: Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń
- [10] Norma PN-EN 61000-4-15:2011: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Metody badań i pomiarów – Miernik migotania światła – Specyfikacja funkcjonalna i projektowa
- [11] Norma PN-EN 61000-4-30:2015-05: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-30: Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii
- [12] Norma PN-EN 61400-21: Turbozespoły wiatrowe. Część 21: Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczanej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej
- [13] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r., nr 93, poz. 623 z późn. zm.)
- [14] Specyfikacja ogólna turbin wiatrowych Vestas typu V90 o mocach 1,8 MW i 2,0 MW Vestas Wind Systems A/S, 02/2008