

Jan Anuszczyk, Piotr Błaszczak, Bogusław Terlecki
Politechnika Łódzka, Łódź

DIAGNOSTYKA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH ELEKTROWNI WIATROWEJ W PROCESIE WYTWARZANIA ENERGII

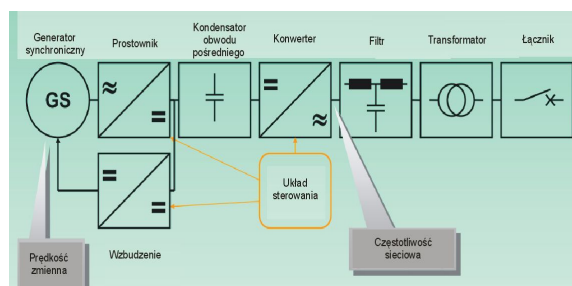
DIAGNOSTICS OF ELECTRIC PARAMETERS OF ENERGY GENERATED BY A CHOSEN WIND FARM

Abstract: In the paper, electric energy quality measurements for the modern Kamiensk Wind Power Plant are described. The obtained results prove that each of the wind turbine is a source of a reactive power, depending on the generated value of active power. Following the conducted measurement diagnostics, it has been noted that the parameters of electric energy quality in the Common Connection Point (CCP) of the power plant electric network with the public power system are guaranteed.

1. Wstęp

Wybrany do badań Park Wiatrowy Kamięński stanowi 15 elektrowni produkcji firmy ENERCON o mocy 2 MW każda – typ E-70 E4, o łącznej mocy 30 MW. Elektrownie wiatrowe są połączone wewnętrznymi energetycznymi liniami kablowymi o napięciu 30 kV i są podzielone na dwie grupy:

I grupę stanowi 7 turbin wiatrowych, natomiast II grupę – 8 turbin. Wyprowadzenie mocy do sieci elektroenergetycznej na poziomie napięcia 0,4 kV jest realizowane przez konwerter włączony w obwód stojana generatora wykorzystujący przekształtnik AC-DC-AC. Schemat funkcjonalny przetwarzania energii wiatru na energię prądu przemiennego wprowadzaną do sieci elektroenergetycznej pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny przetwarzania energii przez turbinę wiatrową E-70 E4 [2]

Warunki sieciowe w obszarze pracy EWK należy uznać za sztywne, o dużej wartości mocy zwarciowej, które są wymuszone przez bliskie sąsiedztwo elektrowni konwencjonalnej z generatorami synchronicznymi GTHW – 12 x 400 MW, (PGE Energetyka Konwencjonalna Oddział Elektrownia Bełchatów), [1].

2. Parametry jakościowe wytwarzanej energii w świetle obowiązujących norm

Badany obiekt – elektrownia EWK należy do nowych źródeł mocy w systemie elektroenergetycznym, który został wyposażony w układy regulacji STATCOM będące jednocześnie źródłami pewnych zakłóceń (wprowadzanie do sieci harmonicznych prądów i napięć). Jest to także obiekt wrażliwy na zakłócenia pochodzące z systemu elektroenergetycznego (przebiecia, zapady napięcia, odkształcenia napięcia zasilającego). Praca elektrowni wiatrowej w funkcji prędkości wiatru charakteryzuje się wahaniami mocy czynnej, co ma istotny wpływ na jakość generowanej i dostarczanej do sieci energii elektrycznej. Przedstawione wyniki pomiarów diagnostycznych dotyczą badań wykonanych w okresie tygodniowym od 6 lipca 2011 roku do 13 lipca 2011 roku.

Przeprowadzona ocena obejmuje:

- badania jakości energii elektrycznej w sieci 30 kV,
- badania jakości energii elektrycznej w sieci 110 kV,
- badania jakości energii w turbinie wiatrowej nr 7, bez kompensatora mocy biernej STATCOM,
- badania jakości energii w turbinie nr 11 wyposażonej w kompensator mocy biernej STATCOM.

Analizatory jakości energii elektrycznej typu Topas 1000, Memobox 800 oraz FLUKE 1760, które były wykorzystywane w pomiarach, umożliwiają ocenę jakości energii elektrycznej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50160.

Zgodnie z wymaganiami obowiązujących standardów, jakość energii elektrycznej jest określana poprzez charakterystyczne parametry napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia (inaczej złącza), instalacji odbiorcy do sieci publicznej [3],[4]. Parametry te są definiowane następująco:

zmiana napięcia:

$$U_{L\%} = \frac{U_L}{U_c} 100\% \quad (1)$$

gdzie:

U_c – napięcie deklarowane w złączu sieci elektroenergetycznej (dla sieci niskiego napięcia równe napięciu znamionowemu 230V),

U_L – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna napięcia zasilającego.

Zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego w sieciach średniego napięcia oraz w sieci 110 kV powinny zawierać się w przedziale od 90 % do 110 % napięcia znamionowego.

współczynnik niesymetrii:

gdzie poszczególne symbole oznaczają:

$$K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_{1s}} 100\% \quad (2)$$

U_{1s} – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej zgodnej napięcia zasilającego,

U_{2s} – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna składowej przeciwnej napięcia zasilającego.

Dopuszczalna wartość współczynnika niesymetrii napięcia w sieciach średniego napięcia wynosi 2%, a w sieciach wysokiego napięcia 1% .

względna wartość h-tej harmonicznej:

$$U_{h\%} = \frac{U_h}{U_c} 100\% \quad (3)$$

poszczególne symbole oznaczają:

U_c – napięcie deklarowane w złączu sieci elektroenergetycznej (dla sieci niskiego napięcia równe napięciu znamionowemu 230 V),

U_h – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna napięcia h-tej harmonicznej ($h = 1, \dots, 40$).

Tab.1. Wartości dopuszczalne wyższych harmonicznych napięcia w złączu sieci elektroenergetycznej średniego i niskiego napięcia [3]

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
nie będące krotnością 3		będące krotnością 3			
rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	>4	0,5
13	3,0	>21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tab.2. Wartości dopuszczalne wyższych harmonicznych napięcia w złączu sieci elektroenergetycznej wysokiego napięcia [3]

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
nie będące krotnością 3		będące krotnością 3			
rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]	rząd h	$U_{h\%}$ [%]
5	2,0	3	2,0	2	1,5
7	2,0	9	1,0	4	1,0
11	1,5	15	0,5	>4	0,5
13	1,0	>21	0,5		
17	1,0				
19	1,5				
23	0,7				
25	0,7				
>25	$0,2 + 0,5 \frac{25}{h}$				

Dopuszczalne względne wartości wyższych harmonicznych napięcia dla sieci niskiego i średniego napięcia podano w tabeli 1, zaś dla sieci wysokiego napięcia w tabeli 2.

współczynnik odkształcenia:

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\% \quad (4)$$

gdzie poszczególne symbole oznaczają:

THD – współczynnik odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego,

U_h – wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej,

U_1 – uśredniona w przedziale pomiarowym wartość skuteczna harmoniczej podstawowej napięcia zasilającego,

h – rząd wyższej harmonicznej.

Dopuszczalna wartość współczynnika odkształcenia w sieciach średniego i niskiego napięcia wynosi 8%, zaś w sieciach wysokiego napięcia 3%.

wskaźnik długookresowego migotania światła:

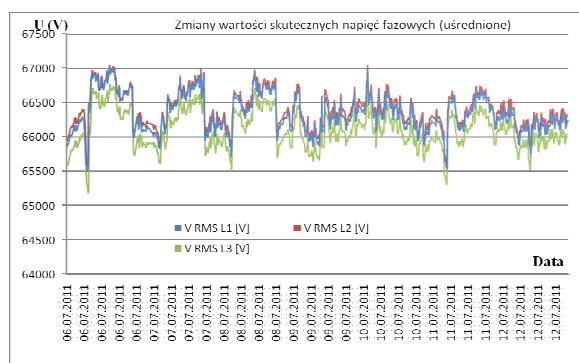
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}} \quad (5)$$

gdzie: P_{lt} – wskaźnik długookresowego migotania światła,

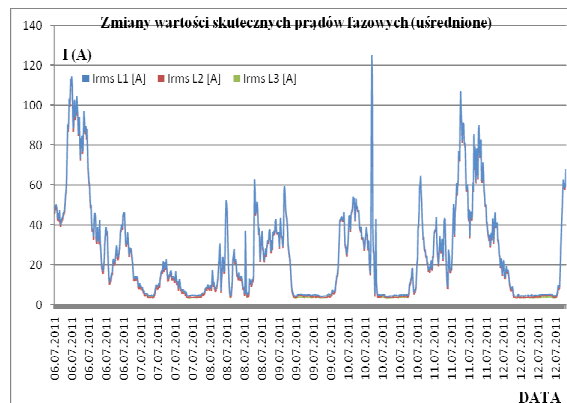
P_{st} – wskaźnik krótkookresowego migotania światła (wartość krótkookresowego wskaźnika migotania światła uśredniona w przedziale pomiarowym). Dopuszczalna wartość wskaźnika długookresowego migotania światła w sieciach średniego i niskiego napięcia wynosi 1, zaś w sieciach wysokiego napięcia 0,8 [3].

3. Diagnostyka pomiarowa

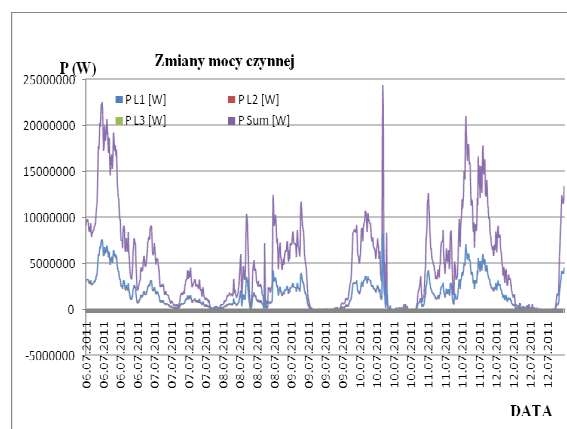
Diagnostyka pomiarowa parametrów elektrycznych wybranej elektrowni wiatrowej jest rozumiana jako okresowa kontrola wskaźników jakościowych wytwarzanej energii, które są określone w obowiązujących przepisach i aktach normatywnych. Charakterystyki przedstawione dodatkowo na rysunkach poniżej stanowią uzupełnienie tych pomiarów.



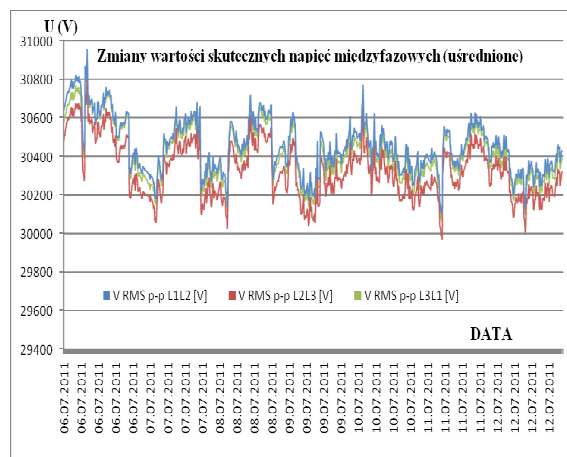
Rys. 2. Zmiany uśrednionych wartości skutecznych napięć fazowych, (110 kV)



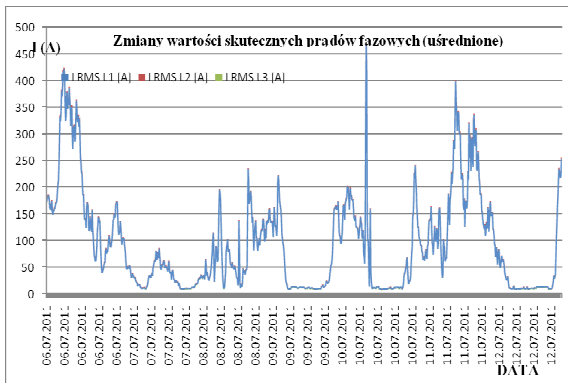
Rys. 3. Zmiany uśrednionych wartości skutecznych prądów fazowych, (110 kV)



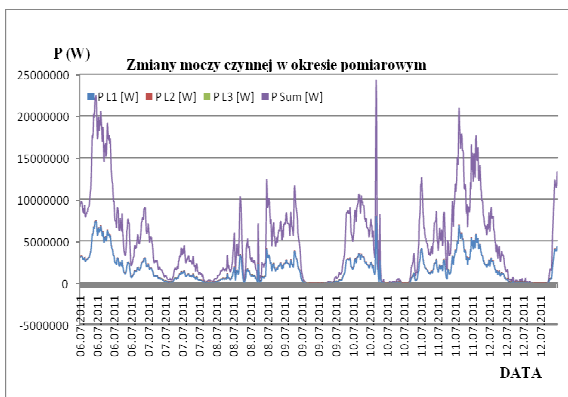
Rys. 4. Zmiany wartości mocy czynnej, (110kV)



Rys. 5. Zmiany uśrednionych wartości skutecznych napięć międzyfazowych, (30kV)

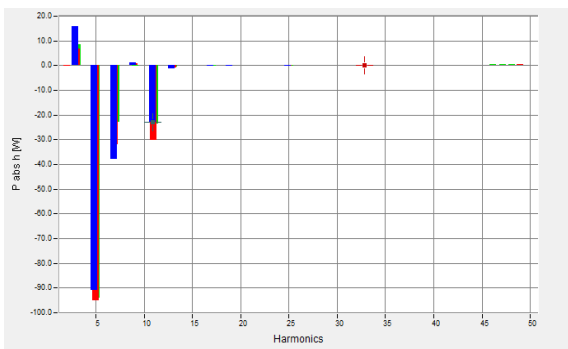


Rys. 6. Zmiany uśrednionych wartości skutecznych prądów fazowych, (30 kV)

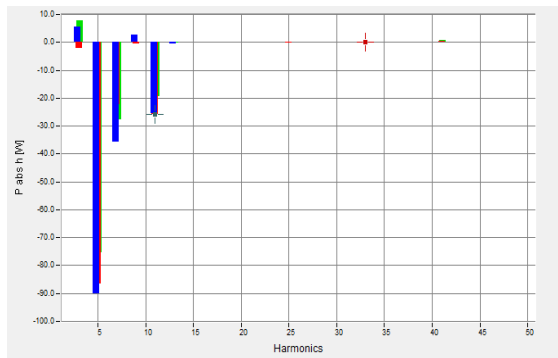


Rys. 7. Zmiany wartości mocy czynnej, (30 kV)

Ponadto poddano diagnostyce porównawczej zawartość harmonicznym mocy. Z porównania harmonicznym mocy w sieci wewnętrznej 30 kV wynika, że udział harmonicznym pochodzących z przekształtników AC/DC/AC w torze głównym (trzecia harmoniczna) jest o znikomej mocy czynnej i stanowi zaledwie wartość 20 W. Natomiast źródła dominujących harmonicznym rzędu trzeciego i siódmego są zlokalizowane w sieci zewnętrznej 110 kV.

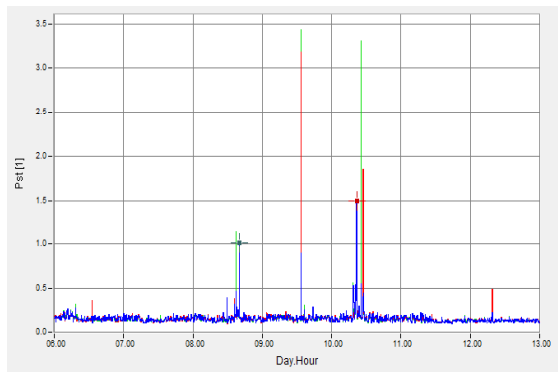


Rys. 8. a) Porównanie harmonicznym mocy w sieciach współpracujących z parkiem dla sieci 110 kV

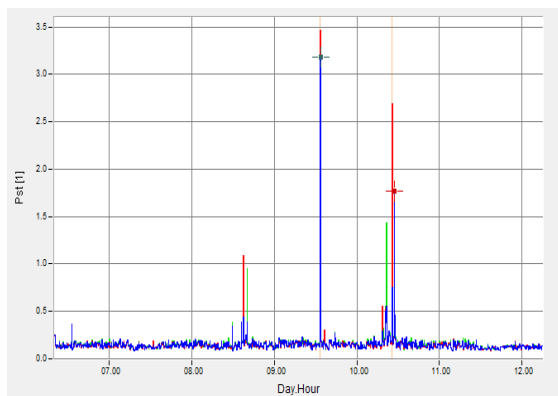


Rys. 8. b) Porównanie harmonicznym mocy w sieciach współpracujących z parkiem dla sieci 30kV

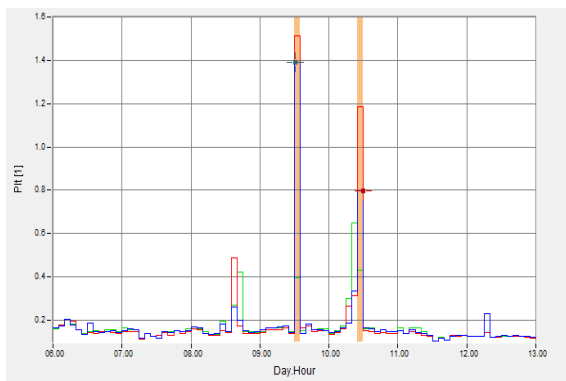
Rysunki 9, 10 i 11 przedstawiają porównanie wskaźników migotania światła w badanych sieciach.



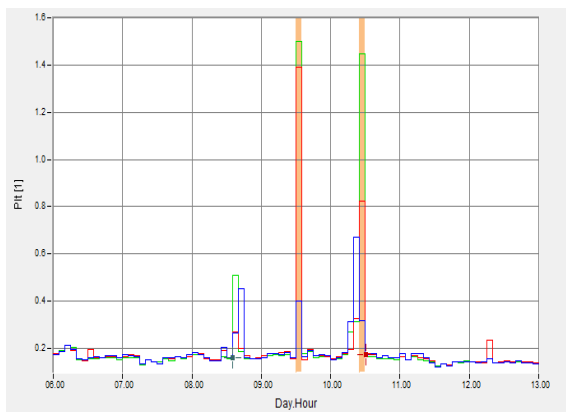
Rys. 9.a) Porównanie wskaźników krótkookresowego migotania światła dla sieci 110 kV



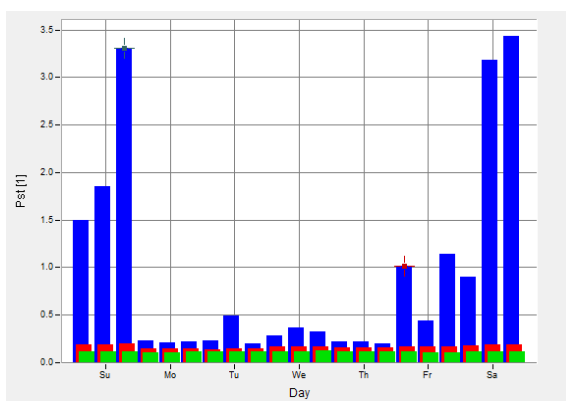
Rys. 9.b) Porównanie wskaźników krótkookresowego migotania światła dla sieci 30 kV



Rys. 10. a) Porównanie wskaźników długookresowego migotania światła dla sieci 110 kV

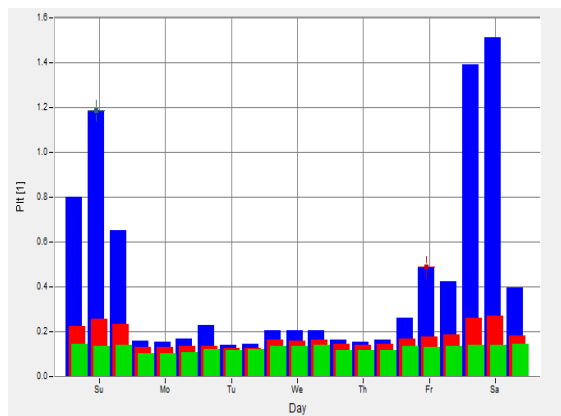


Rys. 10. b) Porównanie wskaźników długookresowego migotania światła dla sieci 30kV



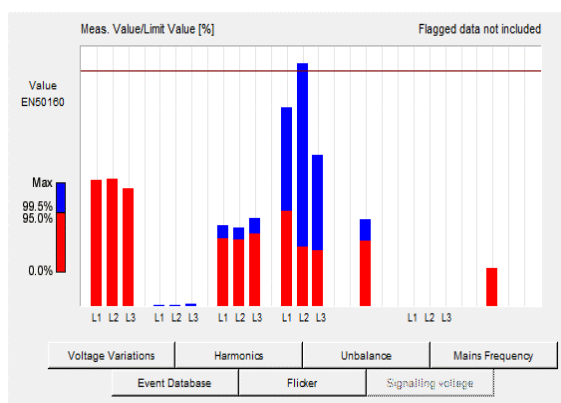
Rys. 11.a) Porównanie wartości ekstremalnych wskaźników długookresowego migotania światła dla sieci 110 kV

Wynikowe charakterystyki diagnostyki pomiarowej jakości energii w sieciach 30 kV oraz 110 kV na tle obowiązujących wymagań objętych normą [3], przedstawiają rysunki 12 i 13.



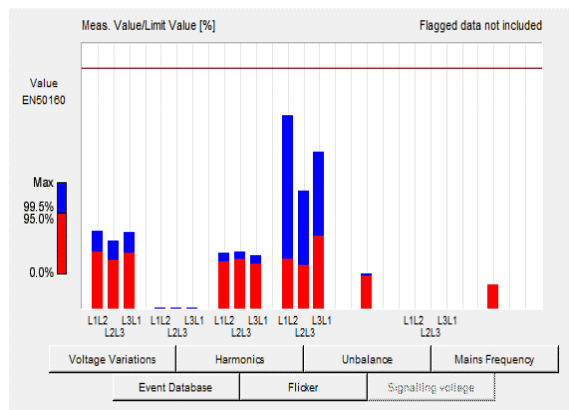
Rys. 11.b) Porównanie wartości ekstremalnych wskaźników długookresowego migotania światła dla sieci 30 kV

Linia brązowa na rysunkach (pozioma) odpowiada wartościom granicznym dla każdego z parametrów napięcia. Kolorem niebieskim oznaczono słupki określające wartość maksymalną ze zbioru wartości danego parametru. Kolorem czerwonym oznaczono słupki określające wartość parametru, który w okresie pomiarowym nie przekroczył 95% wartości występujących w analizowanym zbiorze.



Rys. 12. Graficzna ocena wyników pomiarów jakości energii w sieci 110 kV

Z przedstawionych rysunków wynika, że parametry napięcia zasilającego rozdzielnię 30/110kV są zgodne z wymogami określonymi w obowiązujących przepisach. Zaburzenia po zapadach napięcia, które wystąpiły podczas badań po stronie sieci zasilającej zewnętrznej spowodowały pojawienie się większych wartości wskaźników krótkookresowego i długookresowego migotania światła P_{st} i P_{It} .



Rys. 13. Graficzna ocena wyników pomiarów jakości energii w sieci 30kV

Z przeprowadzonych badań wynika ponadto, że Elektrownia Wiatrowa Kamieńsk może być potencjalnym źródłem mocy biernej, o wartości około 15MVar dostępnej z prawdopodobieństwem 95%, które może być wykorzystane w procesie regulacji napięcia w lokalnej sieci 110 kV. W tym celu inwertory w każdej turbinie wiatrowej powinny zostać wyposażone w odpowiednie układy regulacji mocy biernej typu STATCOM.

4. Podsumowanie

Określone w badaniach diagnostycznych wartości parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w punkcie wspólnego połączenia (PWP) sieci 110kV elektrowni z siecią energetyki zawodowej spełniają wymagania określone w obowiązujących przepisach. Na pracę Elektrowni Wiatrowej Kamieńsk mają wpływ zakłócenia (np. zwarcia lub czynności łączeniowe) powstające w sieciach nadrzędnych energetyki zawodowej powodujące zaburzenia w postaci np. zapadów napięcia obserwowanych w sieci 30kV elektrowni lub wzrostu wartości wskaźników migotania światła.

Z przeprowadzonych badań wynika ponadto duża zgodność spektrum częstotliwościowego zmierzonych wyższych harmonicznymi z danymi podanymi w raporcie WINDTEST [5], przy czym pomierzone wartości wyższych harmonicznymi są w większości przypadków mniejsze od wartości podanych przez producenta turbin. Jednocześnie należy stwierdzić, że w widmie częstotliwościowym prądów zarejestrowano znaczne wartości harmonicznymi rzędów 41 (turbozespół nr 11) oraz 42 i 43 (turbozespół nr 7), których nie podaje wspomniany raport. Harmoniczne te są wynikiem sposobu sterowania inwertorami turbozespołów wiatro-

wych, dla których częstotliwość przełączania tranzystorów IGBT wynosi ponad 2 kHz.

5. Literatura

- [1]. Anuszczyk J., „Maszyny elektryczne w energetyce. Zagadnienia wybrane”. Wydawnictwa WNT, Warszawa, 2005.
- [2]. Instrukcja eksploatacji turbiny wiatrowej E-70 E4(CS-82). Enercon GmbH Aurich.
- [3]. Norma PN-EN 50160: „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”. PKN, 2010.
- [4]. Norma PN-EN 61400-21: „Turbozespoły wiatrowe”. Część 21: „Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczanej przez turbozespoły przyłączone do sieci elektroenergetycznej”, PKN, 2009.
- [5]. WINDTEST - Materiał źródłowy firmy Enercon. Raport No.WT4865/06.

Autorzy

prof. dr hab. inż. J. Anuszczyk
dr inż. P. Błaszczak: Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej

mgr inż. B. Terlecki: PGE Energia Odnawialna S.A., Warszawa.