

*elektrownia wiatrowa, jakość energii elektrycznej
wind turbine, power quality*

Grzegorz KOSOBUDZKI*

PRZYŁĄCZANIE ELEKTROWNI WIATROWEJ DO SIECI ENERGETYCZNEJ ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono wyniki badań jakości energii elektrycznej sieci energetycznej średniego napięcia do której przyłączono elektrownię wiatrową. Pokazano wpływ pracy elektrowni na poziom harmonicznych, wahań napięcia i współczynnika migotania światła w napięciu zasilającym w punkcie przyłączenia. Porównano wymagania operatora sieci dystrybucyjnej i przepisów normalizacyjnych dotyczących wskaźników jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowej.

1. WSTĘP

Zgodnie z zobowiązaniami pakietu klimatycznego Polska do roku 2020 ma uzyskać 15% udział odnawialnych źródeł energii w zużyciu energii. W roku 2013 ilość energii wytworzonej w elektrowniach wiatrowych wyniosła 4 182 904 MWh, co stanowi 55% całkowitego wolumenu energii uzyskanej z odnawialnych źródeł energii [1]. Kolejne znaczące technologie to elektrownie wodne oraz biogaz, biomasa i współspalanie.

Lokalizacje elektrownie wiatrowe są ściśle powiązane z występowaniem dobrych warunków wiatrowych. Zmiany prędkości wiatru, podmuchy powodują zmianami mocy generowanej co ma negatywny wpływ na jakość napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia do systemu energetycznego. Zakłócenia powodowane przez pracę farmy wiatrowej, szczególnie większej mocy, mogą rozprzestrzeniać się w systemie energetycznym. Dominujące zaburzenia powodowane przez turbiny lub farmy wiatrowe to wahania napięcia i powiązany z nim współczynnik migotania światła (ang. *Flicker*) oraz harmoniczne i interharmoniczne.

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: grzegorz.kosobudzki@pwr.edu.pl

Operator systemu dystrybucyjnego określa warunki przyłączenia elektrowni wiatrowej do sieci na podstawie aktualnego poziomu zakłóceń w punkcie przyłączenia oraz parametrów sieci i obiektu. Przyłączenie elektrowni wiatrowej do sieci energetycznej średniego napięcia (SN) regulują dokumenty normatywne:

- Ustawa Prawo Energetyczne [2],
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego[3],
- Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnego (IRiESD) zatwierdzona przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki.

Wartości dopuszczalne wskaźników jakościowych napięcia znajdujące się w IRiESD zostały określone na podstawie ustawy [2], rozporządzenia [3] i standardów dotyczących jakości napięcia zasilającego sieci elektroenergetycznej PN-EN 614000-21, PN-EN 50160, PN-EN 61000-2-12[4-6].

Na podstawie analizy warunków wydanych inwestorowi dotyczących przyłączanej elektrowni wiatrowej i zawartych parametrów jakościowych w IRiESD [7] można odnieść wrażenie zbyt wysokiego zastrzeżenia limitów stawianych przyłączanemu obiektowi co może wynikać z braku doświadczenia przy ocenie wpływu farm (elektrowni) wiatrowych na funkcjonowanie systemu. Istnieje niebezpieczeństwo odmowy przyłączenia elektrowni wiatrowej niewpływającej na pogorszenie jakości napięcia.

Na przykładzie elektrowni wiatrowej o mocy 2 MW przyłączonej do sieci średniego napięcia skonfrontowano parametry jakościowe wymagane przez IRiESD [7] z faktycznym wpływem obiektu na jakość energii elektrycznej w punkcie przyłączenia.

2. OPIS PRZYŁĄCZANEGO OBIEKTU

Przeprowadzono badania jakości energii elektrycznej i zmian mocy czynnej elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym Vestas V80 o mocy 2 MW. Napięcie znamionowe $U_n = 690$ V, prąd znamionowy $I_n = 415$ A. Elektrownia podłączona jest przez transformator do sieci energetycznej średniego napięcia 15 kV*. Przyłączenie od rozdzielnic SN 15 kV do rozłącznika słupowego (punkt przyłączenia) wykonano kablem ziemnym o długości 300 metrów.

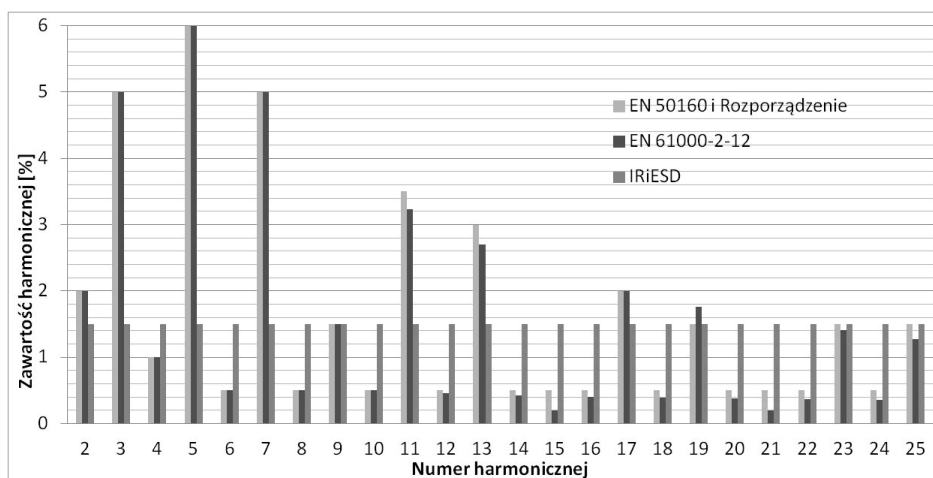
Analizator jakości energii podłączono w polu pomiarowym w rozdzielni kontenerowej. Mierzone było napięcie i prąd SN. Sondy napięciowe podłączono do przekładników napięciowych w konfiguracji gwiazdy o przekładni $k_u = 150$ V/V, Cęgi prądowe założono na obwody wtórne przekładników prądowych o przekładni $k_i = 16$ A/A.

* Szczegółowe dane na stronie internetowej producenta www.vestas.com

3. WYNIKI BADAŃ JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

3.1. HARMONICZNE W NAPIĘCIU ZASILAJĄCYM – PORÓWNAIE IRiESD Z NORMAMI [3], [5], [6]

Warunki określone w IRiESD [7] dla farm wiatrowych przyłączanych do sieci średniego napięcia wymagają aby wszystkie harmoniczne napięcia rzędów od 2 do 50 były mniejsze od 1,5%, natomiast całkowity współczynnik zniekształceń harmonicznym THD mniejszy od 4%. Należy zauważyć, że limity dla harmonicznych 3, 5, 7, 11, 13 są kilkukrotnie niższe (trudniejsze do spełnienia) niż w normie opisującej środowisko – poziomy kompatybilności [6], rozporządzeniu [3] i normie PN-50160 [5]. Natomiast dla pozostałych harmonicznych wymagania zostały złagodzone. Przykładowo elektrownia wiatrowa może spowodować poziom 15 harmonicznej w sieci o wartości 1,5%. Zgodne z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki każdy odbiorca (także ten przyłączony „blisko” punktu przyłączenia elektrowni wiatrowej) ma mieć zapewniony w poprawnie funkcjonującym systemie zawartość 15 harmonicznej poniżej 0,5%. Na rysunku 1 pokazano rozbieżności pomiędzy wymaganiami IRiESD a przepisami normalizacyjnymi. Dla współczynnika zawartości harmonicznym THD są to odpowiednio wartości 4% i 8%(PN EN 50160).



Rys. 1. Wartości dopuszczalne harmonicznym w napięciu zasilającym według norm oraz IRiESD

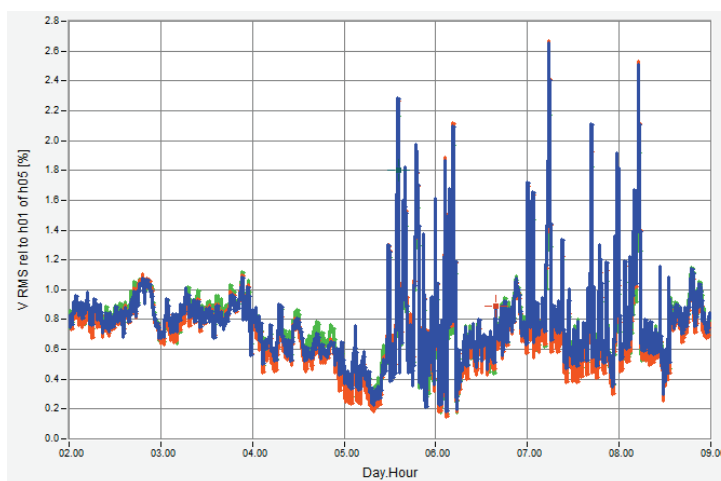
Według IRiESD, minimum 99% wszystkich wartości skutecznych 10-minutowych dla poszczególnych harmonicznym powinno zawierać się w zakresie tolerancji. Praktycznie w ciągu tygodnia może zaistnieć 10 przekroczeń limitu przez poszczególną harmoniczną lub współczynnik migotania światła W normach udział ustalono na 95%.

3.2. HARMONICZNE W PUNKCIE PRZYŁĄCZENIA ELEKTROWNI WIATROWEJ

Średnia wartość harmonicznego napięcia w punkcie przyłączenia jest poniżej wartości dopuszczalnej 1,5%. Nie spełniony jest warunek, że minimum 99% wszystkich wartości skutecznych 10 minutowych dla poszczególnych harmonicznym poniżej limitu (tabela 1). Analizę przeprowadzono do 50 harmonicznym włącznie.

Tabela 1. Dane statystyczne wystąpienia harmonicznym poza zakresem tolerancji

	Zakres tolerancji	L1	L2	L3
	[%]	[%]	[%]	[%]
THD	0,00–4,00	100,00	100,00	100,00
Harmonicznym				
harmonicznym	Zakres	L1	L2	L3
Nr	[%]	[%]	[%]	[%]
2	0,00–1,50	100,00	100,00	100,00
3	0,00–1,50	100,00	100,00	100,00
4	0,00–1,50	100,00	100,00	100,00
5	0,00–1,50	97,05	96,95	97,93
6	0,00–1,50	100,00	100,00	100,00
7	0,00–1,50	95,52	94,91	96,35
8	0,00–1,50	100,00	100,00	100,00

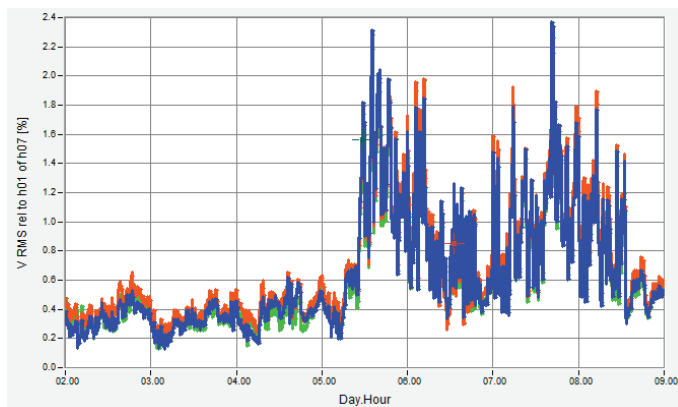


Rys. 2. Wartość 5 harmonicznej w czasie rejestracji od 2 do 9 października

Mniej niż wymagane 99% wszystkich wartości skutecznych harmonicznym 5 i 7 jest poniżej limitu 1,5%. Harmoniczne napięcia 5 i 7 nie są powodowane przez

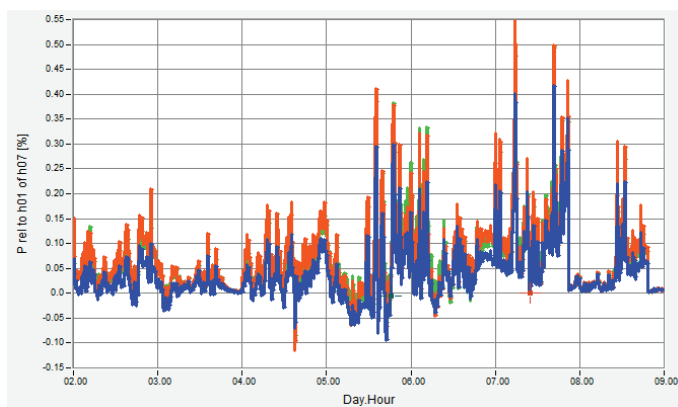
elektrownię wiatrową. W czasie od 4 października godz. 0:00 do 7 października godz. 20:30 elektrownia była odłączona od sieci. Przy odstawionej elektrowni pobierana jest moc nie przekraczająca 15 kW. Wartość harmonicznych jest na podobnym poziomie.

Rejestracje jakości energii na obiekcie kontynuowano przez kolejne dni. W czasie normalnej pracy przy pojawiających się dobrych warunkach wiatrowych od 9 do 14 października nie wystąpiło przekroczenie limitu przez żadną harmoniczną.



Rys. 3. Wartość 7 harmonicznej w czasie rejestracji od 2 do 9 października

Źródło harmonicznych można zlokalizować na podstawie mocy czynnej harmoniczej. Ujemna wartość mocy czynnej harmoniczej oznacza generowanie harmoniczej. Porównując rysunek 3 i 4 nie można stwierdzić zwiększenia zawartości harmoniczej z poborem mocy czynnej 7 harmonicznej.



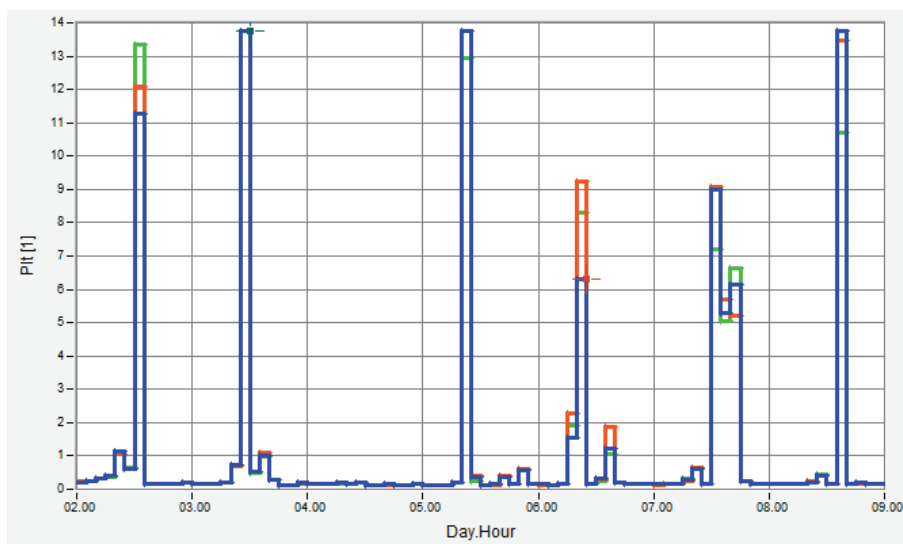
Rys. 4. Wartość mocy czynnej 7 harmonicznej w czasie rejestracji od 2 do 9 października

3.3 WSPÓLCZYNNIK UCIAŻLIWOŚCI MIGOTANIA ŚWIATŁA – PLT (FLICKER)

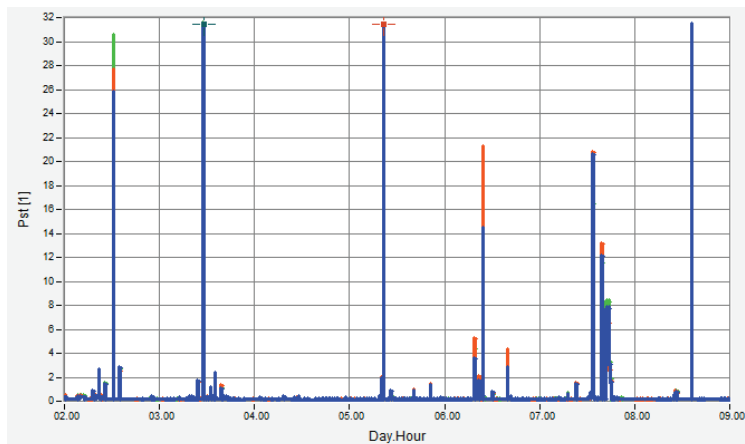
Zaobserwowano przekroczenia współczynnika migotania światła długookresowego (Plt) i krótkookresowego (Pst) powyżej wartości dopuszczalnej przez normę PN-EN 50160 dotyczącą sieci publicznej oraz Instrukcję Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Wahania napięcia są powodowane przez elektrownię wiatrową. Jednakże nie są głównym źródłem zakłóceń w badanej sieci. Przy odstawionej oraz pracującej elektrowni współczynnik migotania światła był na podobnym poziomie. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Statystyczna zawartość w zakresie tolerancji współczynnika Plt i Pst – wyniki w % czasu wartości w zakresie dopuszczalnym. Okres uwzględniający tydzień od 2 do 9 października 2014

Współczynnik	Zakres tolerancji	L1	L2	L3	Uwagi
Plt	0,00–0,35	74,50%	73,81%	75,00%	Cały okres
Pst	0,00–0,45	95,93%	96,03%	96,03%	Cały okres
Plt	0,00–0,35	75,72%	75,72%	77,70%	Elektrownia odłączona
Pst	0,00–0,45	94,96%	95,32%	95,50%	Elektrownia odłączona
Plt	0,00–0,35	73,01%	71,46%	71,68%	Elektrownia pracuje
Pst	0,00–0,45	97,12%	96,90%	96,68%	Elektrownia pracuje

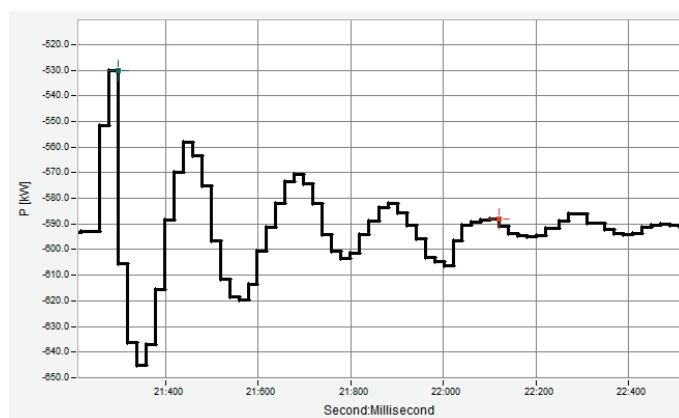


Rys. 4. Współczynnik długookresowy migotanie światła (Plt) w czasie rejestracji od 2 do 9 października

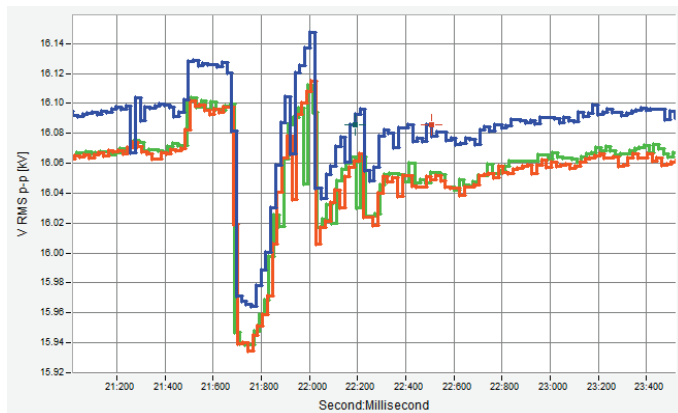


Rys. 5. Współczynnik krótkookresowego migotanie światła (Pst) w czasie rejestracji od 2 do 9 października

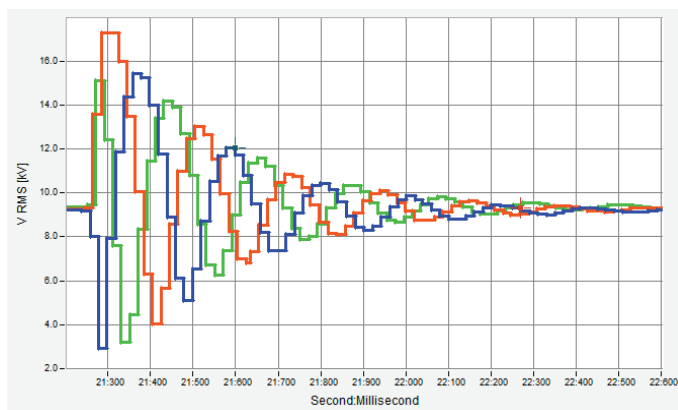
W czasie włączania elektrowni i zmiany parametrów i warunków pracy następują chwilowe oscylacyjne wahania mocy. Na rysunkach 6-9 pokazano efekt zmian w postaci oscylacji wartości napięć fazowych, mocy oddawanej do sieci i kształt przebiegu napięcia fazowego. Wartość krótkookresowego współczynnika migotania światła w czasie powstałego zaburzenia wzrosła do ponad 20. Wyraźna tłumiona oscylacja mocy o częstotliwości około 5 Hz widoczna jest także w napięciach fazowych. Przedstawione zaburzenie jest symetryczne. Nie powoduje dużych zmian w napięciach międzyfazowych (rys. 7). Analizator jakości energii elektrycznej zarejestrował w tym czasie maksymalna zmiana napięć międzyfazowych 0,88%, natomiast dla napięć fazowych pojawiła się sekwencja kolejnych zapadów i przepięć.



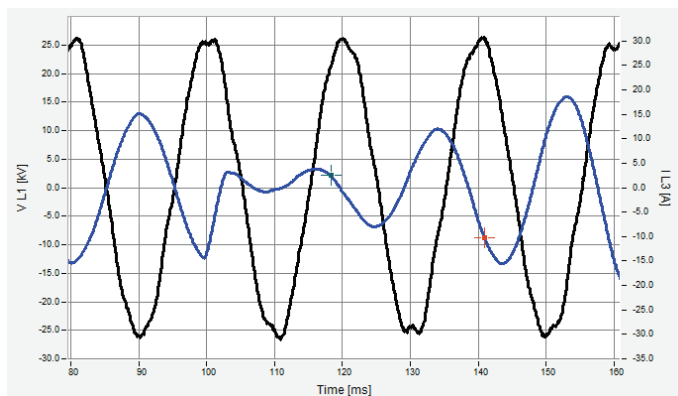
Rys. 6. Chwilowa zmiana wartości mocy czynnej



Rys. 7. Chwilowa zmiana wartości skutecznej napięć międzyfazowych

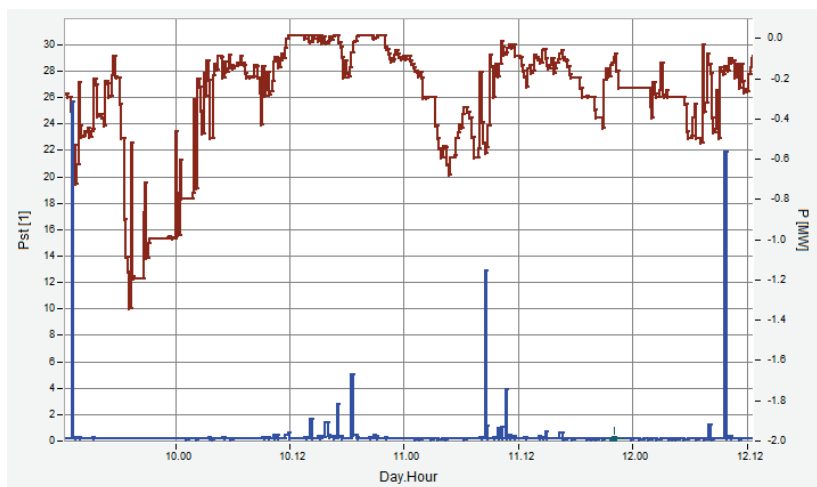


Rys. 8. Chwilowa zmiana wartości skutecznej napięć fazowych



Rys. 9. Zniekształcenie przebiegu napięcia i prądu fazowego

Powyższy przypadek zaburzenia powoduje wyraźnie wpływa na wartość współczynnika migotania światła obliczanego z napięć fazowych. W badanym punkcie na wahania napięcia wpływają również inne źródła. Brak wpływu przyłączonej elektrowni część zarejestrowanych wahań potwierdza brak korelacji pomiędzy zaburzeniem a skokową zmianą wartości prądu lub mocy.



Rys. 10. Porównanie zmian mocy i współczynnika migotania światła Pst

WNIOSKI

Przedstawione wyniki pomiarów jakości energii elektrycznej elektrowni wiatrowej w punkcie przyłączenia do sieci średniego napięcia wskazują na zbyt wygórowane żądania operatora (przedstawione w IRiESD) systemu dystrybucyjnego dotyczące przyłączonej elektrowni wiatrowej w punktach związanych z harmonicznymi rzędów 3, 5, 7, 11, 13. Z drugiej strony dla harmonicznych parzystych i pozostałych nieparzystych limity są łagodne. Przyłączany obiekt może spowodować zwiększenie zawartości poszczególnej harmonicznej ponad wymagania normalizacyjne [3], [5] i narazić dystrybutora na konsekwencje związane z niedotrzymywaniem standardów jakościowych.

W przypadku braku jednego dominującego źródła zakłóceń w systemie, jego identyfikacja jest trudna. Badana elektrownia wiatrowa powoduje wahania napięcia w sieci, lecz nie jest głównym źródłem. Nie wszystkie przypadki zmiany mocy lub prądu powodują zwiększenie krótkookresowego współczynnika migotania światła (rys. 10).

LITERATURA

- [1] URZĄD REGULACJI ENERGETYKI, Sprawozdanie z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki w 2013 r, Warszawa, kwiecień 2014.
- [2] *Prawo energetyczne*, ustawa z 10 kwietnia 1997 r. z późniejszymi zmianami, Dziennik Ustaw z 2012 r., poz. 1059.
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dziennik Ustaw nr 93, poz. 623.
- [4] PN EN 61400-21:2009, *Turbozespoły wiatrowe – Część 21: Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczanej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej*.
- [5] PN-EN 50160:2010, *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych*.
- [6] PN-EN 61000-2-12:2004, *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 2–12: Środowisko – Poziomy kompatybilności dla zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości i sygnałów sygnalizacji w publicznych sieciach zasilających średniego napięcia*.
- [7] ENERGA-OPERATOR SA, *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*, Biuletyn Branżowy URE, Energia Elektryczna, nr 238, 19.12.2013.

WIND TURBINE CONNECTION TO MEDIUM VOLTAGE POWER DISTRIBUTION SYSTEM

The paper presents results of power quality assessment of medium voltage distribution system with connecting a wind turbine. Impact of the working wind power generator on harmonics level, voltage variation, long and short term flicker is presented. This paper presents comparison between requirements of the distribution network manager and standards concerning power quality indicators at the point of connection of the wind power plant.