

Ocena wpływu pracy turbiny wiatrowej FL MD 77 na jakość energii elektrycznej w węźle przyłączenia w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano zasady przeprowadzania pomiarów oraz oceny parametrów jakości energii elektrycznej dostarczanej przez turbospoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej. Przedstawiono podstawowe parametry techniczne turbiny wiatrowej typu FL MD 77 oraz charakterystykę jej mocy wyjściowej w funkcji prędkości wiatru. Zaprezentowano również wybrane wyniki pomiarów parametrów charakteryzujących jakość energii w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77 o mocy 1,5 MW do sieci SN o napięciu 15 kV oraz wyniki testów sprawdzających prawidłowość pracy turbiny wiatrowej typu FL MD 77 podczas wyłączenia elektrowni wiatrowej oraz jej załączenia do systemu po wymaganym 10-minutowym okresie przerwy w pracy dla różnych stopni wykorzystania dysponowanej mocy turbiny wiatrowej.

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 1,5 MW 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. (*Assessment of the impact of the wind turbine FL MD 77 on the power quality in the node connection to the medium voltage distribution network*).

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

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

Wprowadzenie

Wyczerpywanie się zasobów paliw kopalnych służących do wytwarzania energii, a także towarzysząca jej emisja dwutlenku węgla do atmosfery powodują konieczność wykorzystania tradycyjnych odnawialnych źródeł energii, między innymi energii wiatru. Jednakże oprócz oczywistych zalet wykorzystania energii wiatru, energetykę wiatrową cechują również i ograniczenia, których zasadniczym źródłem jest zmienność prędkości wiatru. Ponadto praca turbin wiatrowych powoduje realne zagrożenia dla ptaków, zmiany krajobrazu oraz może mieć negatywny wpływ na pracę sieci elektroenergetycznej i degradację jakości energii elektrycznej [5].

W celu określenia prawidłowości pracy turbiny wiatrowej oraz jej wpływu na stopień degradacji jakości energii elektrycznej w węźle jej przyłączenia, wymagane jest przeprowadzenie w okresie pierwszego roku pracy farmy wiatrowej, niezbędnych testów sprawdzających spełnienie wymagań określonych w odpowiedniej instrukcji ruchu i eksploatacji sieci elektroenergetycznej. Sposób przeprowadzenia testów turbiny wiatrowej uzgadniany jest w ramach umowy o przyłączenie.

Wybrane wymagania związane z przyłączaniem turbin wiatrowych do sieci elektroenergetycznych oraz ocena wpływu ich pracy na jakość energii elektrycznej

Wartości dopuszczalne parametrów 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 [11] (tzw. rozporządzeniu systemowym) i uzależnione są od grupy przyłączeniowej, do której został zakwalifikowany dany podmiot przyłączony do sieci. Wymaganie te w zasadniczej mierze wynikają z potrzeby wprowadzenia ujednoczonych standardów europejskich dotyczących jakości energii elektrycznej określonych w normie EN 50160, mającej swój krajowy odpowiednik w postaci normy PN-EN 50160:2010 [7]. Jakość energii elektrycznej podlega badaniom w tygodniowych okresach obserwacji na podstawie pomiaru zmian m.in.: częstotliwości napięcia zasilającego, stopnia

odkształcenia napięcia zasilającego wyższymi harmonicznymi z uwzględnieniem wyższych harmonicznych do rzędu 40 (badanie indywidualnych harmonicznych oraz całkowitego współczynnika odkształcenia wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego $THD U$), stopnia asymetrii napięć oraz intensywności zjawiska migotania światła powodowanego wahaniami napięcia zasilającego [6, 12]. 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 [11].

Wymagania techniczne dla jednostek wytwórczych przyłączanych i przyłączonych do sieci dystrybucyjnej oraz sieci przesyłowej określone zostały w odpowiednich instrukcjach ruchu i eksploatacji zarówno sieci dystrybucyjnych (IRiESD) [1], jak również sieci przesyłowej (IRiESP) [2], 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 bezpośrednio 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 [9]. 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 PN-EN 61400-21 [10].

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. Ponadto udział farmy wiatrowej w całkowitych wahaniami napięcia w miejscu jej przyłączenia wyrażony wartościami wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} oraz wskaźnika długookresowego migotania światła P_{lt} wyznaczonymi zgodnie z normą PN-EN 61000-4-15 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 harmonicznymi 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 $THD U < 4,0\%$ [1, 2].

Przedstawione wymagania powinny 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 na podstawie kolejnych dwunastu wartości wskaźnika P_{st} zgodnie z normą PN-EN 61000-4-15 [8].

Wartości współczynnika THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) wyrażającego całkowitą zawartość wyższych harmonicznymi napięcia wyznacza się również na podstawie harmonicznymi o rzędach $n = 1, \dots, 50$.

Wymagania zawarte w IRiESD dotyczące emisji wyższych harmonicznymi w przypadku przyłączenia farmy do sieci o napięciu znamionowym 110 kV są bardziej restrykcyjne, niż odpowiadające im wymagania zawarte w IRiESP.

Dokonując oceny udziału badanej farmy wiatrowej w całkowitym stopniu degradacji jakości energii elektrycznej w węźle PCP należy uwzględnić poziom tła zaburzeń elektromagnetycznych, będący skutkiem pracy odbiorców oraz ewentualnie innych źródeł energii elektrycznej przyłączonych do sieci elektroenergetycznej. Zależny jest on również od stopnia zaburzeń pochodzących z samego systemu elektroenergetycznego, przenikających do badanej sieci. Nierzadko, precyzyjne określenie poziomu tła zaburzeń elektromagnetycznych jest dalece utrudnione, bądź nawet niemożliwe [6]. Niemniej, 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.

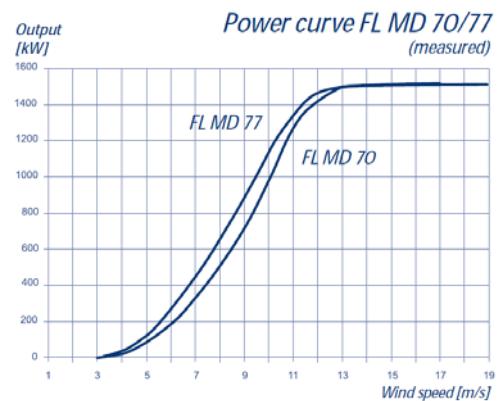
Podstawowe dane techniczne turbiny wiatrowej FL MD 77

Elektrownię wiatrową, z punktu widzenia elektrycznego, stanowią zasadniczo dwa zespoły: turbina wiatrowa z generatorem napięcia przemiennego niskiego napięcia wraz z układem regulacji i sterowania oraz stacja transformatorowa MST-W 0,69 kV/15 kV 1600 kVA wraz z kablówką instalacją przyłączeniową do napowietrznej sieci dystrybucyjnej 15 kV.

Podstawowe parametry turbiny przedstawione zostały w tabeli 1, natomiast na rysunku 1 przedstawiona została charakterystyka mocy wyjściowej generatora w funkcji prędkości wiatru.

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne turbiny wiatrowej typu FL MD 77 [3, 4]

Parametr techniczny	Wartość
moc czynna	1500 kW
moc pozorna	1579 kVA
prędkość wiatru dla startu	3 m/s
prędkość wiatru dla wyłączenia	22 m/s
prędkość obrotowa	1800 obr/ min
napięcie	690 V
częstotliwość	50 Hz
rodzaj generatora	asynchroniczny o zmiennej prędkości obrotowej z podwójnym zasilaniem
rodzaj przekształtnika	IGBT z modulacją szerokością impulsu (PWM)
średnica rotora	77 m
wysokość wieży	61,5 - 111,5 m



Rys. 1. Charakterystyki $P(v)$ generatorów asynchronicznych turbin typu FL MD 70 i FL MD 77 [4]

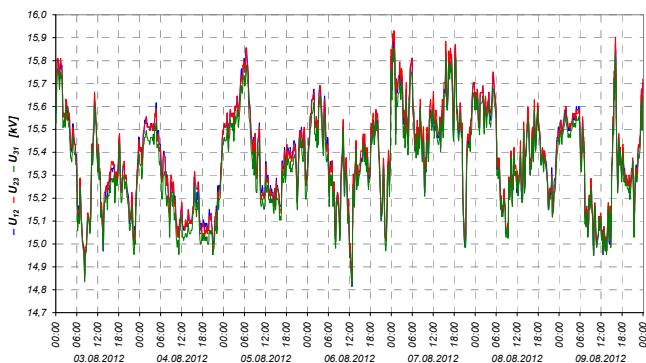
Wyniki badań

Ocenę jakości energii elektrycznej w węźle PCP w sieci SN o napięciu 15 kV oraz badania charakteru zmian napięć, prądów i mocy turbiny typu FL MD 70 przeprowadzono dla różnych prędkości wiatru w tygodniowym okresie obserwacji. Przeprowadzono również badania uwzględniające stany przejściowe występujące podczas wyłączenia oraz załączania farmy wiatrowej do pracy. Pomiarów dokonano z wykorzystaniem analizatora jakości energii elektrycznej typu PQ-BOX 200 oraz komputerowego systemu monitorowania jakości energii elektrycznej typu PQM-C610 spełniających wymagania normy PN-EN 61000-4-30, klasa A. Urządzenia pomiarowe zostały zainstalowane w obwodach wtórnych istniejących w stacji przekładników prądowych typu IMZ17

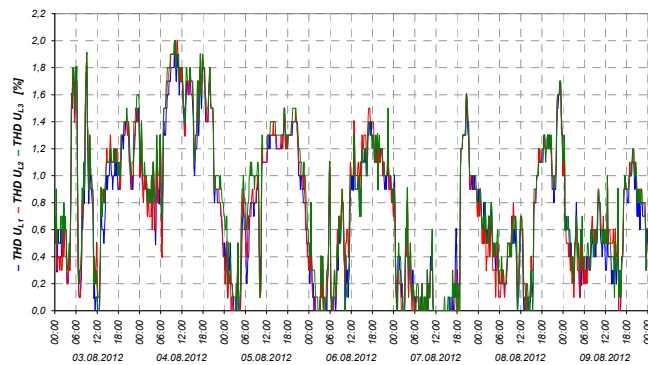
oraz przekładników napięciowych typu UMZ 17-1. Ze względu na obiektywne trudności związane z precyzyjnym określeniem poziomu tła zaburzeń elektromagnetycznych oraz brakiem możliwości przeprowadzenia pomiarów turbiny podczas jej pracy wyspowej z obciążeniem o znanej charakterystyce, wyznaczone zostały całkowite wartości parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w węźle PWP przyłączenia farmy wiatrowej do sieci SN o napięciu 15 kV. Na rysunkach 2 - 10 przedstawiono wybrane wyniki badań zrealizowane w tygodniowym okresie pomiarów, charakteryzujące stopień degradacji jakości energii elektrycznej w rzeczywistych warunkach generacji mocy determinowanych prędkością wiatru.

Na rysunku 2 zobrazowane zostały wartości skuteczne napięć międzyfazowych, natomiast na rysunku 3 przedstawiono wartości współczynnika $THD U$ określone dla harmonicznych o rzędach $n = 1, \dots, 50$. Wartości $THD U$ nie przekraczają 2%. Na rysunku 4 zaprezentowany został wykres mocy czynnej trójfazowej. Maksymalna moc generowana przez turbinę w badanym tygodniowym okresie pomiaru wyniosła $P_{max} = -1,28$ MW, natomiast moc minimalna $P_{min} = -91,5$ kW. Na rysunku 5 przedstawione zostały wartości chwilowe prądów zarejestrowane w węźle przyłączenia elektrowni wiatrowej FL MD77 do sieci SN o napięciu 15 kV w przypadku uzyskania przez turbinę mocy P_{max} . Widać, iż prąd generowany przez turbinę cechuje się niewielkim odkształceniem wyższymi harmonicznymi, $THD I = 1,93\%$. Również dla przypadków P_{max} oraz P_{min} sporządzone zostały wykresy widmowe wyższych harmonicznych napięć (rys. 6 i rys. 7), na podstawie których stwierdzono, iż dominującymi harmonicznymi napięciami są składowe o rzędach $n = 5$ i $n = 7$, których wartości względne w tygodniowym okresie obserwacji przedstawione zostały na rysunkach 8 i 9 z jednoczesnym porównaniem mocy czynnej generowanej przez turbinę. Pomimo, iż średnia wartość percentyla CP99 wyniosła dla harmonicznych U_5 i U_7 odpowiednio: 2,99% i 1,71%, jednak na podstawie wyznaczonych wartości współczynnika determinacji R^2 stwierdzono, iż praca turbiny wiatrowej nie powoduje widocznego wzrostu zawartości dominujących harmonicznych U_5 i U_7 , bowiem $R^2 = 0,38$ dla $U_5 = f(P)$ (rys. 8) oraz $R^2 = 0,14$ w przypadku dla $U_7 = f(P)$ (rys. 9). Przy czym zależności te są odwrotnie proporcjonalne: w przypadku wzrostu mocy generowanej przez turbinę, występowało zmniejszenie zawartości dominujących wyższych harmonicznych napięcia w węźle PWP.

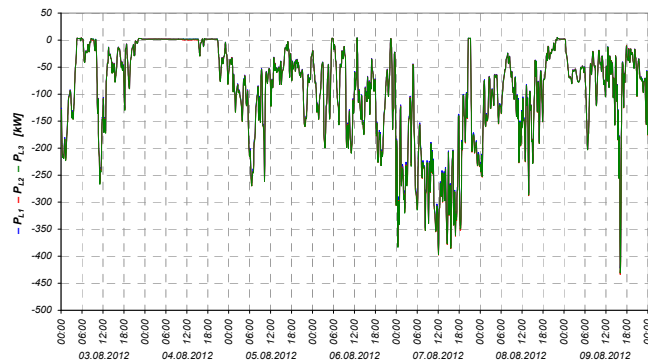
Na rysunku 10 przedstawiony został wykres wartości wskaźnika długookresowego migotania światła określony na podstawie zmian napięć fazowych w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77. Wyznaczone wartości percentyli CP99 dla wskaźnika P_{fl} wyniosły: 0,04, 0,04 i 0,05 dla napięć faz odpowiednio: L1, L2 i L3.



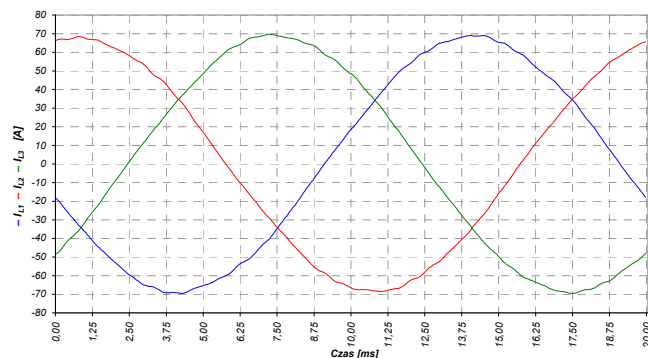
Rys. 2. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych U_{12} , U_{23} , U_{31} w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77 do sieci SN



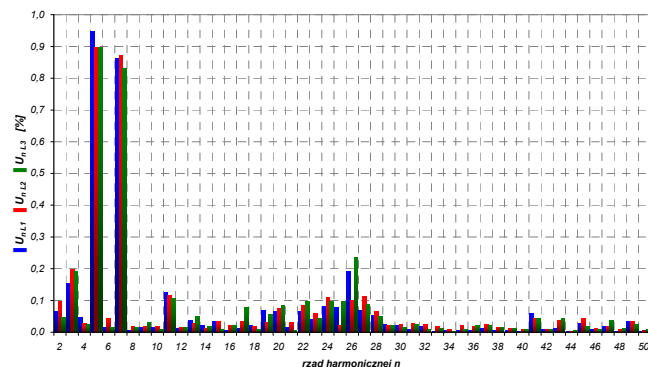
Rys. 3. Wartości współczynnika $THD U_{L1}$, $THD U_{L2}$, $THD U_{L3}$ napięć fazowych zarejestrowane w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77



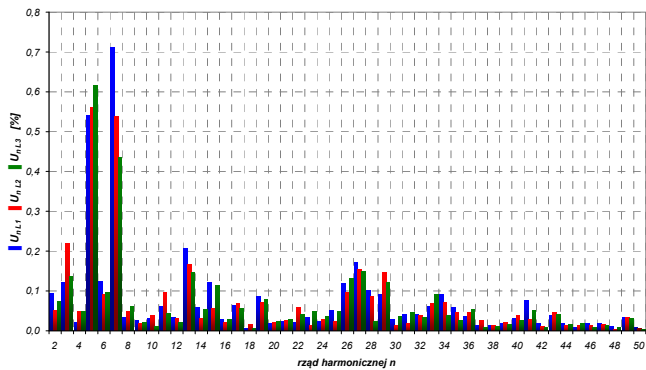
Rys. 4. Wartości mocy czynnej trójfazowej P zarejestrowane w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77



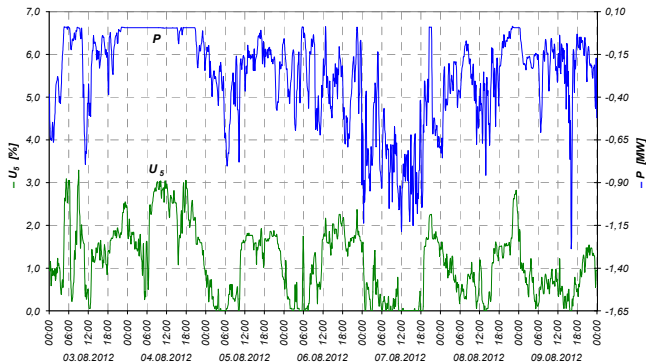
Rys. 5. Wartości chwilowe prądów I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} zarejestrowane w węźle przyłączenia elektrowni wiatrowej FL MD77 dla przypadku generacji mocy maksymalnej P_{max}



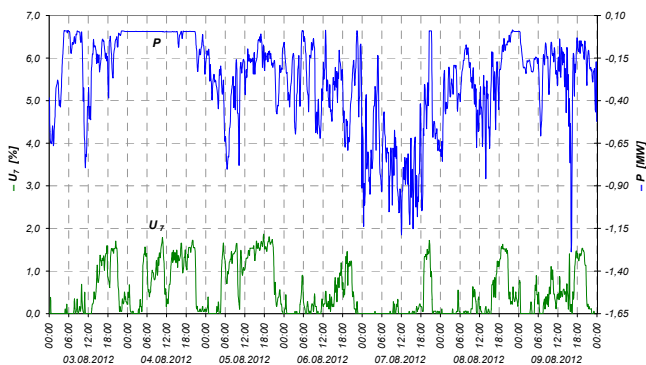
Rys. 6. Widmo wyższych harmonicznych napięć U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} zarejestrowane w węźle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77 dla przypadku generacji mocy maksymalnej P_{max}



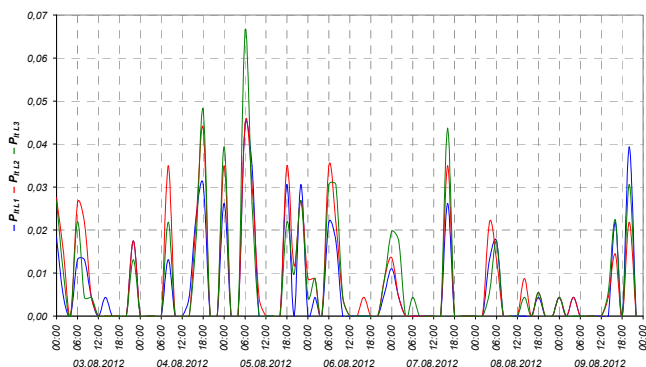
Rys. 7. Widmo wyższych harmonicznych napięć U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} zarejestrowane w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77 dla przypadku generacji mocy minimalnej P_{min}



Rys. 8. Porównanie zmian wartości względnych harmonicznej U_5 raz mocy czynnej trójfazowej P zarejestrowanych w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77



Rys. 9. Porównanie zmian wartości względnych harmonicznej U_7 raz mocy czynnej trójfazowej P zarejestrowanych w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77



Rys. 10. Wartości wskaźników długookresowego migotania światła P_{tL1} , P_{tL2} , P_{tL3} dla napięć fazowych w węzle przyłączenia turbiny wiatrowej FL MD 77

Wyniki przeprowadzonych badań podczas wyłączenia turbiny wiatrowej oraz ponownego jej załączenia po wymaganym 10-minutowym czasie postoju turbiny, wskazują, iż związane z tymi operacjami skoki i zmiany napięcia nie przekraczają wartości 3% [3].

Podsumowanie

Przyłączanie turbin wiatrowych do sieci elektroenergetycznych wymaga realizacji niezbędnych testów sprawdzających m.in. wpływ pracy farm wiatrowych na jakość energii elektrycznej, które powinny zostać wykonane w okresie pierwszego roku pracy farmy wiatrowej. Przedstawione wyniki badań turbiny wiatrowej Fuhrlander typu FL MD 77 dowodzą, iż jakość energii elektrycznej w sieci SN o napięciu 15 kV, do której przyłączona została badana turbina wiatrowa odpowiada obowiązującym wymaganiom określonym w rozporządzeniu systemowym [11]. Stwierdzono przekroczenie wartości dopuszczalnych harmonicznych napięcia o rzędach 5 i 7, określonych w odpowiedniej instrukcji IRIESD [1], jednakże wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, iż wpływ pracy badanej turbiny na zawartość ww. harmonicznych napięcia jest marginalny, zaś ich źródła zlokalizowane są powyżej węzła wspólnego przyłączenia, tj. w systemie elektroenergetycznym oraz po stronie odbiorców energii elektrycznej.

LITERATURA

- [1] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej Oddziału Łódź-Teren PGE Dystrybucja S.A.
- [2] 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
- [3] Jagieła K., Gała M.: Wykonanie pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej produkowanej przez elektrownię wiatrową FL MD 77. Częstochowa, sierpień 2012 r., s. 1-43
- [4] Karta katalogowa turbiny FL MD 70/77, Fuhrlander
- [5] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT Warszawa 2007
- [6] Gała M.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do oceny wpływu pracy odbiorników nieliniowych na jakość energii elektrycznej. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6 z 2011, s. 40-46
- [7] Norma PN-EN 50160:2010: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [8] Norma PN-EN 61000-4-15:2011: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Metody badań i pomiarów – Miernik migotania światła – Specyfikacja funkcjonalna i projektowa
- [9] Norma PN-EN 61000-4-30:2015-05: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-30: Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii
- [10] Norma PN-EN 61400-21: Turbozespoły wiatrowe. Część 21: Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczanej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej
- [11] 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.)
- [12] Z. Hanzelka, Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Kraków 2013

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