

Diagnostyka wybranych parametrów energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach wiatrowych

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań wpływu elektrowni wiatrowej na parametry jakościowe energii elektrycznej występujące w punkcie jej przyłączenia. Szczególną uwagę zwrócono na zmiany przebiegów mocy i napięć wynikające z operacji łączeniowych w analizowanej jednostce wytwórczej, w tym podczas awaryjnego jej wyłączenia.

Abstract. The paper shows results of research on the impact of wind farm work on the parameters electrical quality at the point where wind farm is connected with power grid. Particular attention was paid to changes in power and voltage waveforms that are the result of switching operations in the analyzed generating unit, including during emergency its shut-down. (*Diagnosics of some parameters of electricity generated in wind farms*).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, diagnostyka systemów elektrycznych, elektrownie wiatrowe.

Keywords: electrical quality, diagnostic of electrical systems, wind farms.

Wstęp

Eksploatacja elektrowni wiatrowych wiąże się z nieustannymi zmianami stanu jej pracy, wynikającymi zarówno z samej budowy elektrowni (kształt i długość łopat, przekładnia, typ generatora, przekształtniki napięcia), jak również ze zmienności kierunku i siły wiatru, a także gęstości przemieszczającego się powietrza. Wynikiem tych zmian jest oddziaływanie dynamiczne elektrowni wiatrowych na parametry energii elektrycznej panujące w punkcie ich przyłączenia. Zmienność prędkości wiatru, a także gęstości powietrza, wpływa przede wszystkim na zmianę wartości wytwarzanej w niej mocy czynnej, a co za tym idzie na wartość napięcia panującego w sieci. Budowa elektrowni (w szczególności zainstalowane w niej układy energoelektroniczne) wpływa przede wszystkim na kształt przebiegu generowanego przez źródło prądu (wartość poszczególnych harmonicznych prądu), a w konsekwencji na odkształcenia przebiegu napięcia. Dlatego bardzo istotnym staje się możliwość diagnostyki instalacji elektrycznych elektrowni wiatrowych.

Wymagania polskich przepisów w zakresie dynamicznego oddziaływania elektrowni wiatrowych

Wśród parametrów opisujących jakość energii elektrycznej wytwarzanej w odnawialnych źródłach energii są również wytyczne dotyczące dynamicznych zmian napięcia w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowych do sieci dystrybucyjnej. Ich spełnienie wymagane jest do otrzymania zgody na przyłączenie elektrowni wiatrowej do sieci elektroenergetycznej oraz podpisanie bezterminowej umowy na dostawę energii elektrycznej. Jednakże, ze względu na starzenie się urządzeń wytwórczych, zdaniem autorów, parametry te powinny być monitorowane na bieżąco, aby zapobiec ewentualnym szkodom wynikającym z dostarczenia do odbiorców energii elektrycznej o nieprawidłowych parametrach technicznych.

Wymagania stawiane elektrowniom wiatrowym czasowo przyłączonym do sieci średniego napięcia opisane zostały w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych PGE S.A. [1], normie PN – EN 50160 [2] oraz Rozporządzeniu Ministra Gospodarki [3]. W ramach tych wymagań szczególną uwagę zwraca się na: wartość produkowanej mocy czynnej, gradient mocy, wartość skuteczną napięcia oraz jego zniekształcenia [4]. Stopień zniekształcenia napięcia zasilania można określić za pomocą współczynnika zawartości wyższych harmonicznych THD (ang. Total Harmonic Distortion), który wyznacza się z zależności:

$$(1) \quad THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

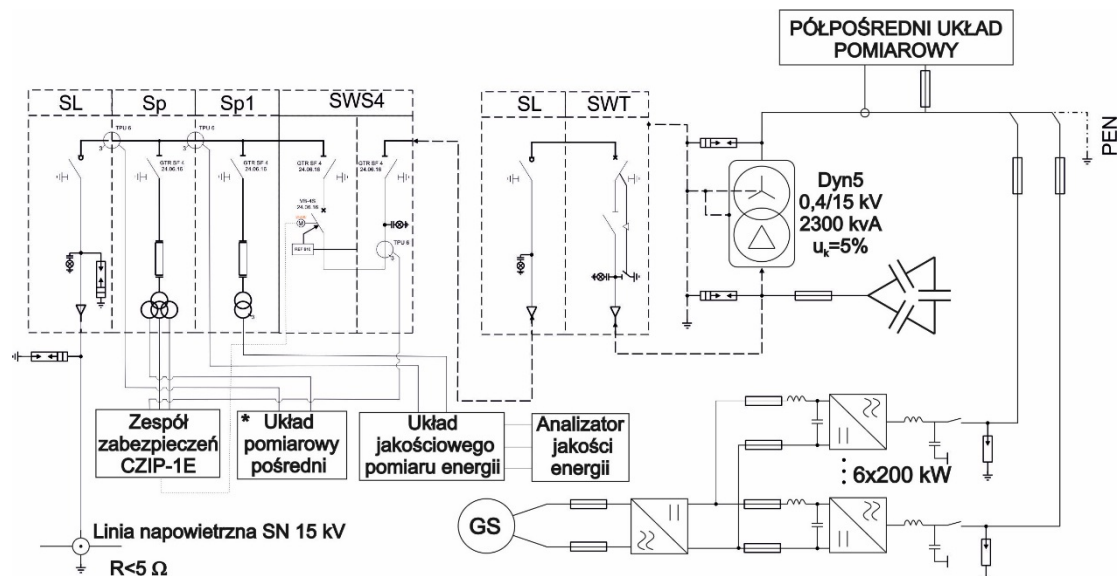
gdzie: U_1 – wartość skuteczna napięcia harmonicznej podstawowej, U_h – wartość skuteczna napięcia h -tej harmonicznej, h – rząd harmonicznej.

Charakterystyka układu i aparatury pomiarowej

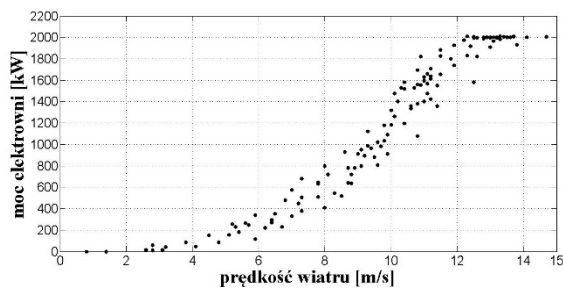
Do rejestracji zmian wartości wielkości elektrycznych elektrowni wiatrowej wykorzystano przenośny analizator jakości zasilania MAVOWATT 240, posiadający certyfikat kalibracji wydany przez Laboratorium Drantez. Analizator ten przeznaczony jest do pomiarów i rejestracji parametrów pracy sieci elektroenergetycznej (jednofazowej lub trójfazowej) zgodnie z najnowszymi standardami. Urządzenie realizuje pomiary w klasie A normy IEC 61000-4-30 i jest wykorzystywane szczególnie w przypadku konieczności przeprowadzenia dokładnych pomiarów, np. w celu weryfikacji mierzonych parametrów z postanowieniami norm. Analizator MAVOWATT 240 jest urządzeniem programowalnym, za pomocą którego istnieje możliwość rejestracji rzeczywistych wartości skutecznych (RMS), wartości szczytowych oraz wartości podstawowych harmonicznej napięcia i prądu dla trzech faz oraz przewodu neutralnego i ochronnego, a także napięcia i prądu stałego. Analizator pozwala na pomiary i rejestrację wielkości elektrycznych w stanach ustalonych i zakłóceńowych (zapis stanów przejściowych do 10000 cykli z częstotliwością 512 próbek/cykl), dzięki regulowanemu czasowi uśredniania wartości pomiarowych (minimalny czas uśredniania pomiaru wynosi 10 ms – ½ okresu napięcia zasilania).

Analiza wyników badań

Badania wykonano w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowej Enercon E66 o mocy 2000 kW do sieci dystrybucyjnej średniego napięcia (15 kV) – rysunek 1. Układ zasilający został wyposażony w dwa pola pomiarowe, umożliwiające pomiar tzw. „czarnej” (po stronie SN) i zielonej (po stronie nn) energii. W ramach badań przeprowadzonych w wybranej elektrowni wiatrowej uzyskano przebiegi wartości prądów i napięć rejestrowanych w punkcie przyłączenia jednostki wytwórczej do sieci dystrybucyjnej, podczas operacji łączeniowych wykonywanych w elektrowni oraz podczas jej awaryjnego wyłączenia.



Rys.1. Schemat układu zasilającego badaną elektrownię wiatrową z zaznaczonym miejscem przyłączenia aparatury rejestrującej

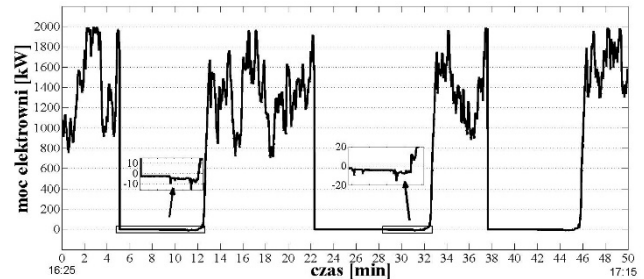


Rys.2. Zarejestrowana zależność wartości mocy czynnej generowanej w elektrowni wiatrowej od prędkości wiatru

Na rysunku 2 zaprezentowano pomiary rozkładu wartości mocy czynnej generowanej w analizowanej elektrowni wiatrowej w funkcji prędkości wiatru. Na podstawie prezentowanych wyników można stwierdzić, że moc znamionowa (wynosząca 2000 kW) została przekroczona - maksymalna moc generowana w elektrowni wyniosła 2010 kW, co stanowi 100,5 % deklarowanej mocy znamionowej, i jest zgodne z aktualnie obowiązującymi przepisami. Elektrownia dostarcza moc czynną do systemu przy prędkościach wiatru większych od 2 m/s. Przy prędkościach wiatru powyżej 9 m/s moc generowana jest większa od połowy mocy znamionowej. Dla prędkości wiatru powyżej 12 m/s badana elektrownia generuje moc znamionową. Przy prędkości wiatru powyżej 25 m/s elektrownia wiatrowa powinna zostać zatrzymana ze względów bezpieczeństwa. Przedstawiona na rysunku 2 charakterystyka odbiega od tych dostępnych w literaturze czy kartach katalogowych elektrowni wiatrowych. Różnica ta, zdaniem autorów, spowodowana jest różną gęstością powietrza wprawiającego w ruch łopaty elektrowni.

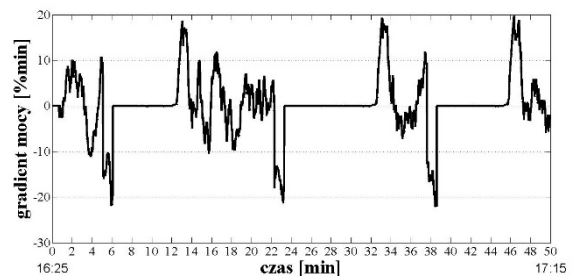
W ramach badań sprawdzono czy odłączenie i załączenie elektrowni wiatrowej wpływa na zmianę parametrów energii w sieci. W tym celu dokonano trzykrotnego, w przeciągu godziny, odłączenia i załączenia elektrowni. Badanie przeprowadzono przy wietrze umożliwiającym osiągnięcie mocy wynoszącej około 50 % mocy znamionowej. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rysunkach 3-7.

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg trójfazowej mocy czynnej generowanej w elektrowni, której wartość zmieniała się (w wyniku chwilowych zmian prędkości wiatru) od 700 do 2000 kW.

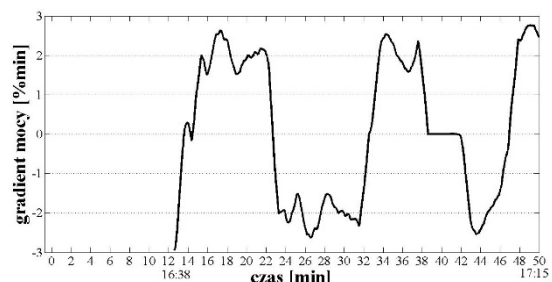


Rys.3. Przebieg mocy czynnej trójfazowej zarejestrowany na szynach 15 kV podczas trzykrotnego załączenia elektrowni wiatrowej, w ciągu jednej godziny

Bardzo ważny z punktu widzenia energetyki zawodowej jest parametr gradientu mocy, określający dynamikę zmian wartości mocy spowodowanych różnymi czynnościami łączeniowymi. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przebiegi gradientów mocy czynnej trójfazowej uśrednionych odpowiednio w okresie 1 i 15 minutowym.



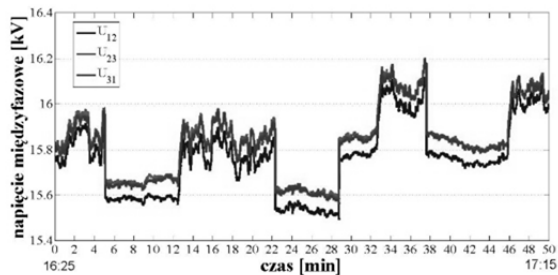
Rys.4. Przebieg zmian wartości gradientów mocy czynnej trójfazowej na szynach 15 kV podczas trzykrotnego załączenia elektrowni wiatrowej, uśrednionych w okresie 1 minutowym



Rys.5. Przebieg zmian wartości gradientów mocy czynnej trójfazowej na szynach 15 kV podczas trzykrotnego załączenia elektrowni wiatrowej, uśrednionych w okresie 15 minutowym

Maksymalna wartość gradientu mocy uśrednionego w okresie 1 minutowym podczas trzykrotnego załączenia elektrowni wiatrowej była równa w przybliżeniu 25,6% natomiast minimalna wartość -28,7%. Dla gradientu uśrednionego w okresie 15 minutowym wartość maksymalna wyznaczona dla tych samych warunków wynosiła 2,8% zaś wartość minimalna -2,9%. Prezentowane przebiegi gradientów mocy mieszczą się w wymaganiach stawianych elektrowniom wiatrowym.

Następnym z etapów sprawdzenia poprawności działania elektrowni wiatrowych jest określenie zmian napięcia podczas procesów łączeniowych. W celu minimalizacji skutków wynikających z procesów łączeniowych można zastosować łączniki hybrydowe zbudowane na bazie łączników fotokonduktancyjnych [6, 7]. Na rysunku 6 przedstawiono przebieg zmian wartości skutecznej napięć przewodowych mierzonych na szynach 15 kV podczas trzykrotnego załączania elektrowni wiatrowej, w ciągu jednej godziny. Napięcia przewodowe U₂₋₃ oraz U₃₋₁ są na tym samym poziomie, natomiast napięcie międzyfazowe U₁₋₂ ma obniżoną wartość (w porównaniu z innymi napięciami). Taki stan związany jest z asymetrią napięć występujących w danym RPZcie (Rozdzielczy Punkt Zasilania) [5]. Podczas drugiej przerwy bezgeneracyjnej widoczne jest podwyższenie wartości napięcia z około 15,6 kV do około 15,85 kV. Podwyższenie napięcia spowodowane było zmianą położenia przelącznika zaczeppów w stacji zasilającej analizowaną linię.



Rys.6. Przebieg zmian wartości skutecznych napięć przewodowych na szynach 15 kV podczas trzykrotnego załączania elektrowni wiatrowej, w ciągu jednej godziny

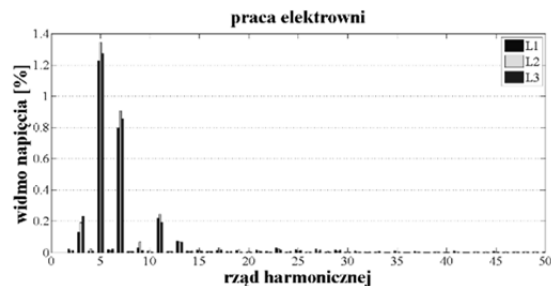
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki analizy harmonicznej przebiegów napięcia fazowego podczas pracy normalnej (rys.7a) oraz podczas odłączenia elektrowni od sieci (rys.7b). Z rozkładów tych wynika, że decydujące znaczenie w przebiegach napięcia poza harmoniczną podstawową mają harmoniczne 3, 5, 7 oraz 11. Wyższe harmoniczne występujące w napięciu w dużej mierze są wynikiem pracy przekształtników energoelektronicznych

Na podstawie rozkładu wartości średnich poszczególnych harmonicznych z wykorzystaniem równania (1) wyznaczono wartość współczynnika odkształcenia napięcia THD_U, na szynach 15 kV, która wahała się w poszczególnych fazach od 1,488 do 1,657%. Wyłączenie elektrowni nie wpłynęło na wartość THD – zmiana wynosiła mniej niż 0,01%.

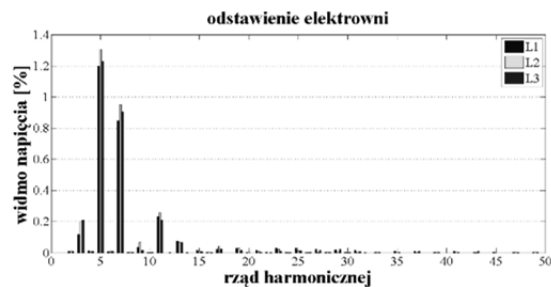
Na rysunku 8 przedstawiony został przebieg wartości napięcia zarejestrowany podczas normalnego uruchomienia elektrowni. Na przebiegu widoczny jest wyraźny (około 2%) wzrost wartości napięcia w sieci, spowodowany pracą elektrowni. Proces rozruchu rozpoczyna się wstępnym sprawdzeniem wszystkich systemów bezpieczeństwa elektrowni, a po uzyskaniu pozytywnych odpowiedzi z czujników, następuje załączenie obwodu wzbudzenia generatora i powolne odkręcanie łopat wirnika. Po osiągnięciu przez rotor prędkości obrotowej, umożliwiającej

obciążenie układu generatorem, następuje załączenie styczników sprzęgających elektrownię z siecią elektroenergetyczną i rozpoczyna się generacja energii elektrycznej.

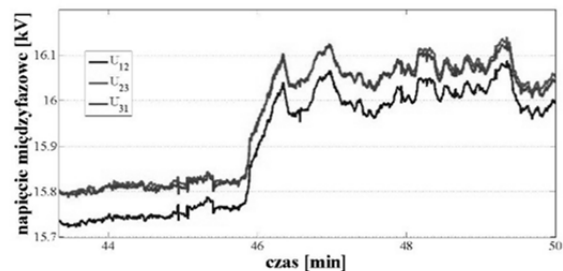
a)



b)



Rys.7. Rozkład wartości średnich procentowych udziałów poszczególnych harmonicznych napięcia na szynach 15 kV, zarejestrowanych podczas pracy a) oraz przy odstawieniu b) elektrowni wiatrowej



Rys.8. Przebieg zmian wartości napięć przewodowych zarejestrowany na szynach 15 kV podczas uruchomienia elektrowni wiatrowej, przy wietrze umożliwiającym osiągnięcie co najmniej 75% mocy znamionowej

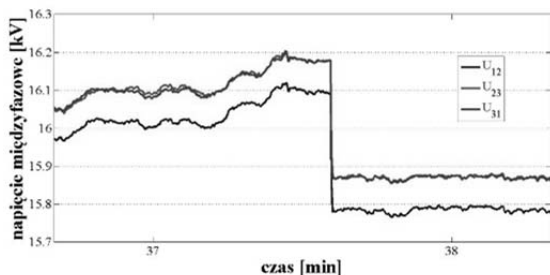
Zestawienie wyników analizy wartości gradientów mocy zarejestrowanych na szynach 15 kV podczas uruchomień, wyłączeń oraz godzinnej pracy elektrowni wiatrowej - przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki analizy wartości gradientów mocy czynnej trójfazowej, zarejestrowanych na szynach 15 kV, podczas uruchomień, wyłączeń oraz godzinnej pracy elektrowni wiatrowej

Gradient mocy	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia
	[%/min]	[%/min]	[%/min]
Uruchomienie elektrowni wiatrowej - uśrednianie 1 minutowe	-4,473	26,947	8,041
Trzykrotne załączenie elektrowni wiatrowej - uśrednianie 1 minutowe	-28,653	25,599	0,175
Trzykrotne załączenie elektrowni wiatrowej - uśrednianie 15 minutowe	-2,944	2,765	0,104

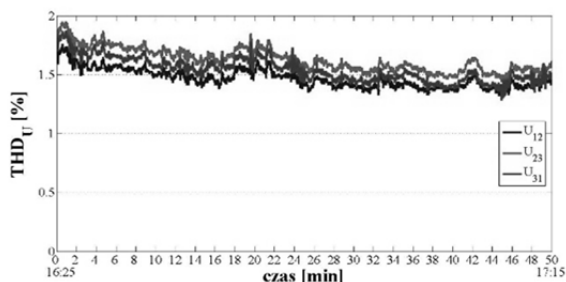
Na rysunku 9 przedstawiony został przebieg zmienności napięć przewodowych na szynach 15 kV zarejestrowany podczas awaryjnego odstawienia elektrowni, w wyniku naciśnięcia przycisku bezpieczeństwa, znajdującego się na panelu sterowniczym. W takim przypadku elektrownia ma

za zadanie, po odłączeniu od zasilania generatora oraz obwodów wzbudzenia, jak najszybciej zatrzymać rotor, wykorzystując w tym celu nie tylko zmianę położenia łopat (jak to ma miejsce przy normalnych zatrzymaniach), ale również hamulce bezpieczeństwa znajdujące się przy wale głównym. Operacja ta powoduje zarówno spadek wartości napięcia w sieci (w badanym przypadku nieprzekraczający 1%), jak również znacząco wpływa na stabilność samej elektrowni (odchylenie wieży od pionu przy gondoli często przekracza 1 m).



Rys.9. Przebieg zmian wartości napięć przewodowych na szynach 15 kV zarejestrowany podczas awaryjnego odstawienia elektrowni wiatrowej

Na rysunku 10 przedstawiony został przebieg zmienności wartości współczynnika odkształcenia napięcia THDu, na którym można zauważyć brak istotnych zmian wartości współczynnika THD po wyłączeniu elektrowni.



Rys.10. Przebieg zmian wartości współczynnika odkształcenia napięcia THDu na szynach 15 kV zarejestrowany podczas awaryjnego odstawienia elektrowni wiatrowej

Podsumowanie

Wykonana analiza pokazała, że badana elektrownia wiatrowa, dzięki zaawansowanym układom automatyki, nie wprowadza do sieci zakłóceń, powodujących niespełnienie wymagań aktualnych przepisów i norm w zakresie jakości energii elektrycznej. Ponadto wykazano, że nie wszystkie pogorszenia parametrów jakościowych energii elektrycznej pochodzą z przyłączanych do sieci źródeł niestabilnych mocowo (na przykładzie elektrowni wiatrowej), a nawet w niektórych przypadkach przyłączenie źródła poprawia parametry jakościowe. Nie mniej jednak, szczególnie ze względu na znaczący wpływ miejsca przyłączenia elektrowni do sieci, przeprowadzenie prawidłowej diagnostyki urządzeń wytwórczych (w szczególności niestabilnych mocowo odnawialnych źródeł energii takich jak elektrownie wiatrowe) jest szczególnie istotne zarówno z punktu widzenia stabilności sieci elektroenergetycznej, jak i odbiorcy końcowego.

Na podstawie uzyskanych z rejestracji wyników badań przeprowadzonych w analizowanej elektrowni wiatrowej oraz analizy zgodności tych wyników z wymogami aktualnych przepisów [1, 2, 3] w zakresie szczegółowych wymagań technicznych dla jednostek wytwórczych przyłączanych do sieci dystrybucyjnej – ustalono, że badana elektrownia spełniona wszystkie wymagania w nich zawarte (tab. 2).

Tabela 2. Zestawienie otrzymanych wyników badań z wymaganiami aktualnych przepisów i norm

Parametr mierzony	Wartości wymagane w sieciach SN	Wartości uzyskane z badań w sieciach SN	Wymagania spełnione: TAK/NIE
Wartość zmian napięcia w punkcie przyłączenia wynikające z operacji łączeniowych	$\leq 3\%$	max 2,069 %	TAK
Zawartość poszczególnych harmonicznych	przyrost $\leq 1,5\%$	max 0,0591 %	TAK
Wartość współczynnika odkształcenia napięcia THD	przyrost THD _U $\leq 3\%$	max 0,01 %	TAK
Wartość średnia gradientu zmiany mocy czynnej elektrowni wiatrowej za okres 1 minuty	$\leq 30\%$	max -28,653 %	TAK
Wartość średnia gradientu zmiany mocy czynnej elektrowni wiatrowej za okres 15 minut	$\leq 10\%$	max 2,944 %	TAK

Autorzy: dr inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00 – 908 Warszawa 49, E-mail: marek.suproniuk@wat.edu.pl; dr inż. Zbigniew Skibko, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: z.skibko@pb.edu.pl. mgr inż. Andrzej Stachno, Politechnika Wrocławska, Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki, ul. Janiszewskiego 11/17, 50 – 370 Wrocław, E-mail: Andrzej.Stachno@pwr.wroc.pl;

LITERATURA

- [1] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, PGE S.A. wrzesień 2013 r.
- [2] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [3] 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).
- [4] Hołdyński G., Skibko Z.: Analiza odkształceń prądów i napięć w terenowych sieciach elektroenergetycznych średniego napięcia Przegląd Elektrotechniczny Nr 7, Lipiec 2011 r. pp. 103.
- [5] Hołdyński G., Skibko Z., Skliński R.: Analiza wpływu pracy elektrowni wiatrowych na asymetrię napięć w sieciach elektroenergetycznych średniego napięcia Wiadomości Elektrotechniczne Nr 5, 2013r. str. 11-14
- [6] Kulas S., Supronowicz H., Suproniuk M., Michta K.: Koncepcja jednofazowego łącznika hybrydowego do zastosowań energetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2016. pp. 37.
- [7] Majda-Zdancewicz E., Suproniuk M., Pawłowski M., Wierzbowski M.: Current state of photoconductive semiconductor switch engineering, Opto-electronics Review, vol. 26, 2018, pp. 92