

## **WYBRANE PROBLEMY INTEGRACJI ROZPROSZONYCH ŹRÓDEŁ ENERGII Z SIECIĄ DYSTRYBUCYJNĄ**

**Irena WASIAK**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź,  
tel.: 42 631 2590, e-mail: [irena.wasiak@p.lodz.pl](mailto:irena.wasiak@p.lodz.pl)

**Streszczenie:** W artykule omówiono wybrane problemy integracji rozproszonych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną. Zdefiniowano zdolność przyłączeniową sieci oraz omówiono sposób jej wyznaczania. Przedstawiono wpływ przyłączania źródeł na parametry jakości napięcia zasilającego. Omówiono rolę zasobników energii w procesie integracji źródeł.

**Słowa kluczowe:** generacja rozproszona, odnawialne źródła energii, zasobniki energii, jakość zasilania, jakość energii

### **1. WSTĘP**

Rozwój generacji rozproszonej i wzrost udziału energii produkowanej ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym jest, jak wiadomo, jednym z celów polityki energetycznej państwa. W dokumencie strategicznym [1] Polska zobowiązała się do zwiększenia ilości energii produkowanej ze źródeł odnawialnych (OZE) do poziomu przekraczającego 15% w 2020 roku. Rozwojowi OZE sprzyjają także naturalny postęp technologiczny oraz ekonomiczne instrumenty wsparcia wprowadzone przez państwo.

W efekcie przyłączania rozproszonych źródeł i zasobników energii do sieci dystrybucyjnej następuje zmiana struktury sieci oraz sposobu jej funkcjonowania. Tradycyjna sieć pasywna o konfiguracji otwartej i jednokierunkowym przepływie energii staje się siecią aktywną. Źródła wprowadzają do sieci moc czynną w węzle przyłączenia. W zależności od wartości tej mocy w stosunku do lokalnego zapotrzebowania oraz miejsca przyłączenia źródła zmienia się charakter zjawisk towarzyszących przesyłowi energii. Lokalne źródła zwiększają niezawodność zasilania odbiorców, jednocześnie jednak zmieniają funkcjonowanie sieci i powodują konieczność rozwiązywania rozmaitych problemów technicznych związanych z bezpieczeństwem pracy sieci oraz zapewnieniem wymaganej przez odbiorców jakości zasilania.

Jakość zasilania oznacza odpowiednią jakość energii elektrycznej oraz niezawodność (ciągłość) jej dostawy. Miarą jakości energii są parametry (wskaźniki) napięcia zasilającego. Wskaźniki jakości napięcia oraz ich wartości dopuszczalne, tzw. standardy jakościowe, zdefiniowane są w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki [2], stanowiącym akt wykonawczy do Ustawy „Prawo Energetyczne”. Wraz ze zwiększonym wykorzystaniem OZE wzrasta

poziom zaburzeń wprowadzanych do sieci zasilającej, w efekcie których może nastąpić pogorszenie parametrów napięcia zasilającego. Zapewnienie wymaganych standardów jakości zasilania wiąże się z koniecznością zastosowania dodatkowych urządzeń kompensacyjnych lub odpowiednich sposobów sterowania pracą urządzeń.

Naturalnym celem przedsiębiorstw energetycznych i odbiorców końcowych jest zmniejszenie kosztów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej oraz zwiększenie efektywności energetycznej. Działania zmierzające w tym kierunku są powszechnie promowane i ujęte w programach badawczych oraz planach rozwoju sieci. W tym obszarze dużego znaczenia nabiera wykorzystanie technologii zasobnikowych. Tradycyjne zastosowania zasobników dotyczą głównie zasilania awaryjnego odbiorników. Przyłączanie do sieci rozproszonych źródeł energii, a w szczególności OZE, stworzyło nowe obszary dla wykorzystania zasobników, które coraz częściej stają się elementem wspomagającym pracę sieci i zwiększającym jej efektywność [3].

Wzajemnie oddziaływanie rozproszonych źródeł i zasobników energii z siecią zasilającą decyduje o problemach integracji tych urządzeń z siecią. Wybrane zagadnienia integracji są przedmiotem niniejszego artykułu.

### **2. ZDOLNOŚĆ SIECI DO PRZYŁĄCZANIA ŹRÓDEŁ ENERGII**

W generacji rozproszonej można wyróżnić dwie grupy źródeł:

- źródła wykorzystujące energie odnawialne: Słońca, wiatru, wody, biopaliw lub ciepła Ziemi
- źródła zasilane paliwami kopalnymi.

Do pierwszej grupy zalicza się elektrownie fotowoltaiczne, wiatrowe, wodne, geotermalne, oraz elektrownie, wykorzystujące energię pozyskiwaną z biopaliw. W grupie drugiej mieszczą się przede wszystkim mikroturebiny gazowe, ale także silniki spalinowe i ogniwa paliwowe.

Moce źródeł generacji rozproszonej zawierają się w szerokim zakresie, od kilku kW do kilkudziesięciu MW. Największe moce dotyczą farm wiatrowych, które przyłączane są do sieci 110 kV i podlegają centralnemu sterowaniu. W sieciach dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia pracują źródła o znacznie

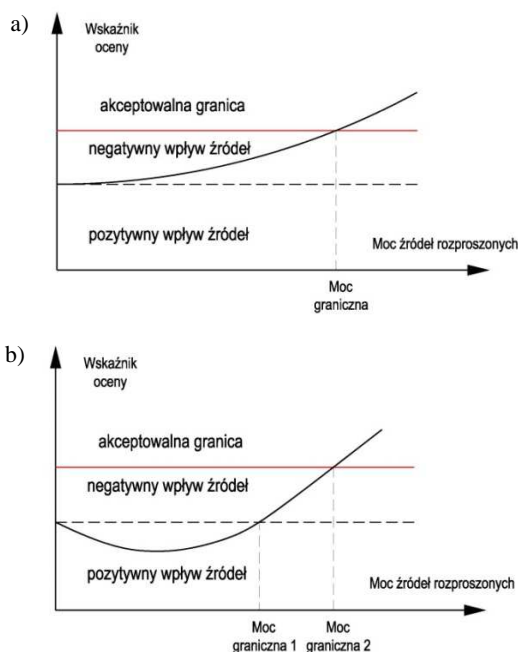
mniejszych mocach, trójfazowe i jednofazowe. Dość dowolna lokalizacja źródeł, znacznie mniejsza moc wytwarzana oraz zmienność mocy wytwarzanej, zależna od dostępności i zmienności energii pierwotnej stanowią szczególne cechy generacji rozproszonej, od których zależy jakość funkcjonowania sieci i jakość zasilania odbiorców.

Rodzaj przemian energetycznych zachodzących w źródle decyduje o jego budowie i związanych z tym parametrach napięcia wyjściowego. Jeśli na zaciskach generatora wytwarzane jest napięcie przemienne o częstotliwości sieciowej, to wówczas źródło można przyłączyć do sieci bezpośrednio. Przypadek ten dotyczy niektórych elektrowni wiatrowych, wodnych czy też elektrowni ciepłych na biopaliwa. Jeśli natomiast parametry napięcia źródła nie odpowiadają parametrom napięcia sieci, to wówczas do połączenia wymagany jest przekształtnik energoelektroniczny. Jako interfejsy przyłączeniowe stosuje się zarówno przekształtniki DC/AC, jak i AC/AC. Zwykle są to indywidualne urządzenia dobierane do rodzaju źródła.

Sposób przyłączenia źródła wpływa na możliwości współpracy z siecią. Wzajemne oddziaływanie sieci i źródła dotyczy różnych technicznych aspektów funkcjonowania sieci, np. rozpyłów mocy w sieci, jakości wprowadzanej do sieci energii, wpływu zdarzeń i zaburzeń zachodzących w systemie elektroenergetycznym na pracę źródła, pracy zabezpieczeń sieciowych i innych. Pojawia się pytanie, jaka jest dopuszczalna moc źródeł, które mogą zostać przyłączone bez pogorszenia warunków pracy danej sieci w stopniu powodującym przekroczenie granicznych wartości zdefiniowanych dla tej sieci wskaźników funkcjonalnych. Moc ta określa zdolność przyłączeniową sieci (ang. *hosting capacity*) [4].

Wskaźnikami, na podstawie których określa się zdolność przyłączeniową mogą być: obciążalność sieci, parametry jakości napięcia zasilającego, straty mocy czynnej, wskaźniki błędnego działania zabezpieczeń itp. Dla każdego wskaźnika określa się jego zależność od mocy przyłączanych źródeł oraz wartość dopuszczalną. Moc przyłączeniową wyznacza punkt przecięcia charakterystyki wskaźnika z linią wartości dopuszczalnej. Jeżeli wskaźnik został zdefiniowany jako miara zaburzeń (parametr jakości napięcia), to wraz ze wzrostem mocy źródeł jego wartość będzie tylko rosła. Przypadek ten został przedstawiony na rys. 1a. Dla innych wskaźników charakter zmian może być odmienny. Przykładowo, jeśli wskaźnikiem jest obciążalność sieci lub straty mocy czynnej, to przy małej wartości mocy źródeł obserwuje się obniżenie jego wartości (poprawę funkcjonowania sieci w zakresie wyznaczonym wskaźnikiem), a przy większej wzrost. Ilustrację takiego przypadku stanowi rysunek 1b.

Sposób wyznaczenia zdolności przyłączeniowej sieci pokazany na rysunku 1 dotyczy prostych układów otwartych, dla których jest możliwe wyznaczenie zależności analitycznych. W innych przypadkach, a w szczególności w przypadku sieci zamkniętych, należy stosować metody i narzędzia symulacyjne.



Rys. 1. Ilustracja wyznaczenia mocy przyłączeniowej: a) kryterium oceny według wskaźnika o wartości rosnącej, b) kryterium oceny według wskaźnika o wartości malejąco-rosnącej

### 3. WPŁYW GENERACJI ROZPROSZONEJ NA JAKOŚĆ NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

#### 3.1. POZIOMY NAPIĘĆ

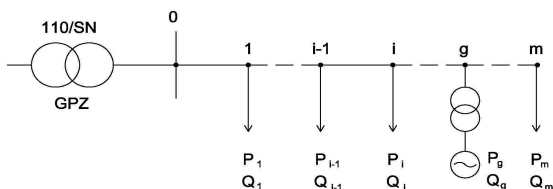
W konwencjonalnych sieciach dystrybucyjnych energia przepływa od węzła zasilającego (stacja transformatorowo-rozdzielcza, GPZ) do węzłów odbiorczych. Przepływ mocy powoduje powstawanie dodatnich spadków napięcia na impedancji sieci, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia napięć w kolejnych węzłach odbiorczych. Przesyłowi mocy i energii towarzyszą straty, tym większe, im większa jest rozległość sieci i dłuższa droga przesyłu. Zjawiska te są znane i uwzględniane w praktyce projektowej i eksploatacyjnej.

W sieci ze źródłami rozproszonymi kierunek prądu może być różny, zatem możliwe są zarówno dodatnie, jak i ujemne spadki napięcia; te ostatnie prowadzące do wzrostów napięcia w węzłach sieci. Zakładając, że napięcie w węzle zasilającym jest utrzymywane na stałym poziomie, o zmianie wartości napięcia w węzle przyłączeniowym źródła (rys. 2) decyduje zmiana spadku napięcia pomiędzy węzłami zasilającym i przyłączeniowym, określona zależnością:

$$\Delta U_g = \Delta(\delta U_{0g}) = \frac{1}{U_n} (-R_{0g} P_g \pm X_{0g} Q_g) \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } R_{0g} = \sum_{j=1}^g R_{j-1,j} \quad X_{0g} = \sum_{j=1}^g X_{j-1,j}$$

są rezystancjami i reaktancjami gałęzi linii między węzłami 0 oraz g.



Rys. 2. Schemat linii rozdzielczej

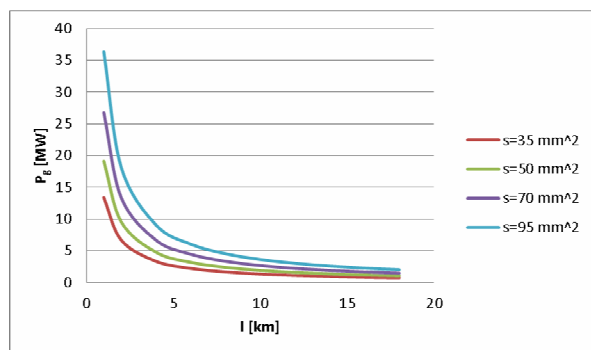
Zmiana napięcia wynika przede wszystkim z mocy czynnej  $P_g$  wytwarzanej w źródle i jest tym większa, im większa jest rezystancja sieci  $R_{0g}$  między węzłem przyłączenia źródła a stacją zasilającą.

Przy założeniu, że moc bierna źródła  $Q_g = 0$ , ze wzoru (1) można wyznaczyć graniczną moc czynną źródła, dla której napięcie w węźle przyłączenia nie przekroczy wartości dopuszczalnej:

$$P_g \leq \frac{\Delta U_{g\%min} U_n^2}{100 R_{0g}} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta U_{g\%min}$  – dopuszczalna zmiana napięcia w węźle przyłączenia.

Na rysunku 3 pokazano zdolność przyłączeniową sieci według kryterium (2) w zależności od miejsca przyłączenia źródła i przekroju linii, przy założeniu, że dopuszczalna zmiana napięcia w węźle przyłączenia wynosi 5% napięcia znamionowego sieci [5].



Rys. 3. Moce graniczne  $P_g$  wyznaczone dla linii SN według kryterium (2):  $l$  – odległość przyłączenia źródła od stacji zasilającej,  $s$  – pole przekroju przewodów

Wprowadzanie do sieci mocy biernej wpływa na zmniejszenie spadku napięcia w linii w taki sam sposób jak wprowadzenie mocy czynnej, tzn. zwiększa napięcie w węźle przyłączeniowym. Moc bierną, przy której nie wystąpi zmiana napięcia w węźle przyłączeniowym można wyznaczyć ze wzoru (2) dla  $\Delta U_g=0$ :

$$Q_g = P_g \frac{R_{0g}}{X_{0g}} \quad (3)$$

Wielkość tej mocy jest dodatnia i proporcjonalna do mocy czynnej w stopniu zależnym od stosunku R/X linii. Im mniejszy jest udział rezystancji linii, tym mniejsza musi być moc bierna dla uzyskania

odpowiedniego efektu regulacyjnego. Powyższy wzór potwierdza znaną i wykorzystywaną w praktyce zależność, że w sieciach o dużej reaktancji indukcyjnej wpływ na regulację napięcia ma przede wszystkim moc bierna. Natomiast w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia (SN), a w szczególności sieciach niskiego napięcia (nN), w których reaktancja indukcyjna jest porównywalna, a nawet mniejsza od rezystancji, możliwości regulacji napięcia przez zmianę mocy biernej są ograniczone. Należy więc liczyć się z tym, że z powodu nadmiernego wzrostu napięcia konieczne będzie ograniczenie mocy czynnej wytwarzanej w źródle.

Należy zauważyć, że źródła, które są odbiorami mocy biernej (generatory indukcyjne) w naturalny sposób ograniczają wzrost napięcia w sieci. Jednocześnie wymagana przez operatora kompensacja mocy biernej dla takich źródeł może ten korzystny efekt zmniejszyć.

### 3.2. WAHANIA NAPIĘCIA

W sieciach z generacją rozproszoną pojawiają się szybkie zmiany napięcia, zwane wahaniami, jako efekt oddziaływania źródeł, w których wytwarzana jest moc czynna zmieniająca się w czasie w zależności od wielkości energii pierwotnej, np. prędkości i kierunku wiatru lub wielkości promieniowania słonecznego. Wahania napięcia na zaciskach źródła prowadzą do powstania zjawiska migotania światła, którego miarą są współczynniki uciążliwości. W przypadku farm wiatrowych zaburzenie to jest efektem sumarycznego oddziaływania wszystkich turbozespołów danej farmy. Dopuszczalne wartości wskaźników uciążliwości migotania: krótkookresowego  $P_{st}$  i długookresowego  $P_{lt}$  ustala operator sieci dystrybucyjnej. Zgodnie z [5], w normalnych warunkach pracy sieci przyłączone do niej źródła nie powinny powodować wahań napięcia, dla których wskaźnik  $P_{lt}$  przekracza wartość 0,6. Oddzielne wymagania podano dla farm wiatrowych, dla których:

- $P_{st} \leq 0,35$  oraz  $P_{lt} \leq 0,25$  – dla sieci WN,
- $P_{st} \leq 0,45$  oraz  $P_{lt} \leq 0,35$  – dla sieci SN.

Ocenę intensywności zaburzenia na etapie projektowania przyłączenia źródła przeprowadza się dla elektrowni wiatrowych o mocach większych od 2 MW. Należy wyznaczyć wskaźniki uciążliwości migotania światła, które powstanie w sieci po przyłączeniu źródła, na podstawie dostarczonej przez producenta charakterystyki pomiarowej emisji wahań pojedynczej turbiny wiatrowej, tzw. certyfikatu WINDEST, zgodnie z [6].

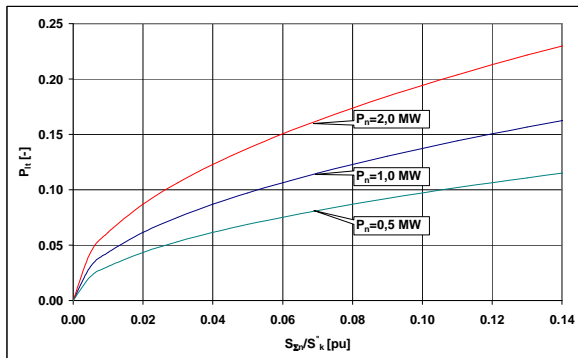
W certyfikacie WINDEST podany jest wskaźnik migotania światła z turbozespołu wiatrowego  $c(\psi_k, v_a)$ , którego wartość zależy od konstrukcji turbozespołu, kąta fazowego  $\psi_k$  impedancji sieci w punkcie przyłączenia (PWP) oraz średniorocznej prędkości wiatru  $v_a$  na wysokości piasty turbozespołu wiatrowego w miejscu jej zainstalowania.

Wskaźniki uciążliwości migotania w PWP podczas pracy ciągłej pojedynczego turbozespołu wiatrowego można oszacować na podstawie równania

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k, v_a) \frac{S_n}{S_k} \quad (4)$$

gdzie:  $S_n$  – znamionowa moc pozorna turbosespołu wiatrowego,  $S_k$  – zwarciova moc pozorna sieci w PWP.

Korzystając ze wzoru (4), wyznaczono zależność wskaźników  $P_{lt}$  od mocy zainstalowanej farmy wiatrowej przyłączonej w określonym miejscu sieci (rys. 4). Obliczenia te wykonano dla różnych wartości mocy znamionowej turbosespołów, zakładając, że mają one podobne charakterystyki wskaźników migotania. Do obliczeń przyjęto  $c(\psi_k, v_a) = 4,3$ .



Rys. 4. Zależność wskaźnika długookresowego migotania światła od względnej mocy farmy wiatrowej i mocy znamionowej turbosespołów

Z przedstawionego rysunku wynika, że hipotetyczna farma wiatrowa zawierająca turbosespoły o mocy znamionowej 2 MW emituje znacznie większe wahania napięcia niż równoważna pod względem mocy całkowitej farma zawierająca dwa razy większą liczbę turbosespołów o mocy 1 MW.

Ocenę wpływu źródła na wartości wahań napięcia w warunkach rzeczywistych można przeprowadzić na podstawie pomiarów. Problemem, który powszechnie występuje w takim przypadku jest ocena, w jakim stopniu źródłem zaburzenia jest rozpatrywana farma wiatrowa, a w jakim inne obiekty zaburzające znajdujące się w sieci.

### 3.3. ZNIEKSZTAŁCENIE KRZYWEJ NAPIĘCIA

Większość źródeł i zasobników energii elektrycznej stanowiących generację rozproszoną jest przyłączona do sieci przez przekształtniki energoelektroniczne, które są źródłem wyższych harmonicznych prądu. Stosowane współcześnie techniki sterowania przekształtnikami pozwalają na skuteczne ograniczanie poziomu wprowadzanych harmonicznych, tym niemniej intensywność tego zaburzenia przy przyłączaniu źródeł do sieci wymaga oceny.

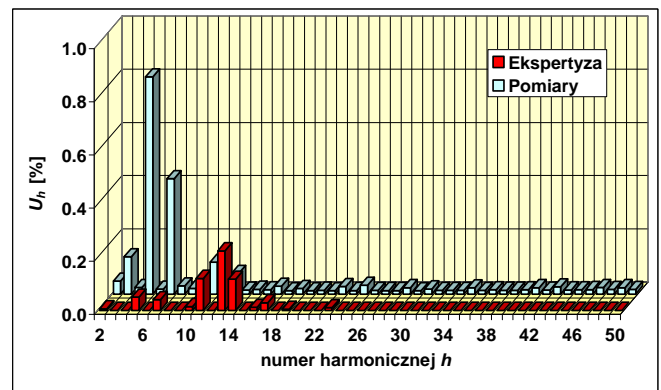
Dopuszczalne wartości wskaźników, które charakteryzują zniekształcenie napięcia ustala operator sieci dystrybucyjnej. Maksymalna zawartość poszczególnych harmonicznych odniesionych do harmonicznej podstawowej wynosi 0,5% [5]. Ponadto współczynnik THD napięcia uwzględniający wszystkie

harmoniczne aż do rzędu 40 nie może przekraczać w miejscu przyłączenia odpowiednio:

- 1,5% – dla sieci o napięciu  $30 \text{ kV} < U_n \leq 110 \text{ kV}$ ,
- 3,0% – dla sieci o napięciu  $1 \text{ kV} < U_n \leq 30 \text{ kV}$ ,
- 5,0% – dla miejsc przyłączenia w sieci nN.

Ocenę wpływu źródła na zniekształcenie napięcia w PWP należy przeprowadzić dla elektrowni wiatrowych o mocy znamionowej większej niż 2 MW. Podstawą oceny są wartości wskaźników emisji harmonicznych prądu źródeł zawarte w certyfikatach WINDTEST oraz charakterystyki częstotliwościowe impedancji sieci wyznaczone dla węzła przyłączenia.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń oraz pomiarów harmonicznych napięcia w PWP farmy wiatrowej o mocy 30 MW. W analizowanym przypadku poziomy harmonicznych zarówno prądu, jak i napięcia są bardzo małe i spełniają wymagania odnośnych przepisów z dużym zapasem.



Rys. 5. Porównanie zmierzonych i obliczonych udziałów wyższych harmonicznych napięcia w PWP elektrowni wiatrowej 30 MW

Problem asymetrii napięcia zasilającego występuje głównie w sieciach niskiego napięcia, do których przyłączane są źródła jednofazowe. Z uwagi na małe moce takich źródeł oraz stosunkowo krótkie linie na ogół nie następuje przekroczenie dopuszczalnych wartości współczynnika asymetrii wynoszącej  $K_{2U} = 2\%$ .

### 4. ROLA ZASOBNIKÓW ENERGII W PROCESIE INTEGRACJI ŹRÓDEŁ Z SIECIĄ ZASILAJĄCĄ

Wzrost penetracji generacji rozproszonej, ograniczona moc przyłączeniowa sieci oraz rosnące wymagania związane ze zwiększeniem efektywności energetycznej sprzyjają rozwojowi zastosowań zasobników energii w sieciach dystrybucyjnych.

Zasobnik jest urządzeniem, które może zwiększyć zdolność przyłączeniową sieci poprzez wyrównanie obciążenia i obniżenie mocy maksymalnej, na którą sieć była projektowana. Efekt ten jest szczególnie korzystny, jeśli sieć pracuje na granicy swoich możliwości. W takim przypadku możliwe staje się przyłączenie kolejnych odbiorów i źródeł bez konieczności modernizacji i rozwoju sieci, co dla

przedsiębiorstwa energetycznego oznacza określone oszczędności inwestycyjne. Zmniejszenie obciążenia szczytowego przyczynia się do wzrostu niezawodności zasilania oraz zmniejsza straty mocy i energii w sieci.

Zasobnik staje się niezbędnym elementem układów współpracujących z OZE. Źródła takie charakteryzują się zmiennością mocy generowanej, zależną od zmienności energii pierwotnej. Zazwyczaj maksymalna moc jest produkowana poza okresami szczytowego obciążenia sieci. Jeśli źródło współpracuje z zasobnikiem, to wyprodukowany w źródle nadmiar energii może być zmagazynowany i przesłany do sieci w okresie maksymalnego obciążenia. Dla właściciela źródła oznacza to zwiększenie efektywności jego wykorzystania i korzystny rezultat ekonomiczny w szczególności, gdy taryfy opłat za energię elektryczną różnicują ceny sprzedaży w zależności od stref czasowych. Aspekty techniczne i ekonomiczne takiego wykorzystania zasobników zaprezentowane są w [7, 8, 9]. W sytuacji gdy źródło przeznaczone jest głównie do zasilania odbiorców w sieci lokalnej właściciela, wykorzystanie energii zgromadzonej w zasobniku umożliwia zmniejszenie zapotrzebowania na energię pobieraną z sieci zasilającej. Można więc stwierdzić, że niesterowalne ze swej natury odnawialne źródła energii we współpracy z zasobnikami mogą uzyskać cechę źródeł sterowalnych, której znaczenie wzrasta, jeśli rozliczenia za energię elektryczną dokonywane są według taryf strefowych. Zasobniki współpracujące z OZE wpływają też na ograniczenie zmian generowanej mocy, a w konsekwencji wahań napięcia zasilającego.

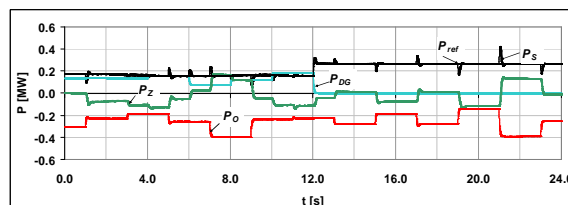
Układy wykorzystywane jako magazyny energii do kształtowania obciążenia charakteryzuje stosunkowo długi czas rozładowania – do kilku godzin. Cechy takie wykazują baterie akumulatorów, których technologia jest dojrzała, a zakres mocy i pojemności szeroki. Dla odbiorców indywidualnych nie bez znaczenia jest także cena zasobnika, w tym przypadku korzystna. W chwili obecnej baterie akumulatorów stosowane są w elektroenergetyce najczęściej.

Odrębnym zagadnieniem jest wykorzystanie inwerterów współpracujących z zasobnikami energii do realizacji dodatkowych funkcji związanych z kompensacją zaburzeń i poprawą jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej. Pożądany efekt kompensacyjny można uzyskać przez odpowiedni dobór algorytmów sterowania przekształtnikiem łączącym zasobnik energii z siecią zasilającą.

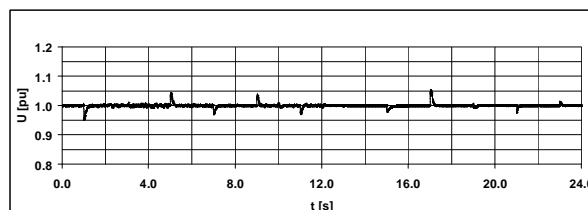
Poprawa jakości energii elektrycznej jest dla inwertera zasobnika zadaniem dodatkowym, wykraczającym poza jego funkcję podstawową, tj. przesyłanie mocy i energii czynnej. Pobór lub wytwarzanie mocy czynnej odbywa się zgodnie z założonym programem pracy (harmonogram ładowania i rozładowania). Realizacja zadań dodatkowych powinna być niezależna od zarządzania mocą czynną i dostosowana do właściwości zasobnika.

Dla ilustracji omawianych możliwości wykorzystania zasobnika przedstawiono przykładowe wyniki symulacji na rysunkach 6 i 7. Zasobnik zainstalowany został w mikrosystemie nN ze źródłami odnawialnymi. Celem zastosowania jest w tym

przypadku utrzymanie stałej wartości mocy wymiany z siecią zasilającą przy jednoczesnej stabilizacji napięcia w węzle PWP. Przy pracy źródła lokalnego moc wymiany wynosi 190 kW, po wyłączeniu źródła 220 kW. Na zmiany mocy czynnej zasobnika nakładają się stany przejściowe wynikające z skokowych zmian mocy czynnej obciążenia oraz zmian mocy czynnej wytwarzanej przez lokalne źródło energii. Stabilizacja napięcia w węzle przyłączenia, uzyskiwana jest przez zmianę generowanej mocy bierniej.



Rys. 6. Zmiany mocy czynnej sieci  $P_s$ , obciążenia  $P_o$ , lokalnego źródła  $P_{DG}$  oraz zasobnika energii  $P_z$  w okresie symulacji (dodatkowo pokazano zmiany wartości zadanej mocy zasobnika  $P_{ref}$ )



Rys. 7. Napięcie w węzle przyłączenia

Funkcje dodatkowe mogą być realizowane w podobny sposób przez przekształtniki przyłączeniowe źródeł energii. W przypadku OZE relatywnie mały czas wykorzystania mocy maksymalnej umożliwia wykonywanie dodatkowych funkcji kompensacyjnych przez inwerter źródła bez wzrostu jego mocy zainstalowanej. Warto także zwrócić uwagę, że tak sterowane urządzenia generacji rozproszonej mogą zastąpić tradycyjne kompensatory typu DSTATCOM, które dotychczas były stosowane najczęściej do poprawy jakości zasilania w sieciach dystrybucyjnych.

Wykorzystanie generacji rozproszonej do realizacji usług pomocniczych jest przedmiotem wielu prac badawczych, m.in. [11, 12, 13, 14]. Techniczne możliwości zostały już udowodnione i choć w chwili obecnej nie są jeszcze wykorzystywane w praktyce, stanowią obiecującą propozycję wykorzystania urządzeń generacji rozproszonej w mikrosystemach energetycznych w przyszłości. Wprowadzenie zasad rynkowych i odpowiednich regulacji prawnych może wpłynąć na zwiększenie wykorzystania technicznych możliwości źródeł.

## 5. PODSUMOWANIE

Integracja urządzeń generacji rozproszonej we wspólnej sieci elektroenergetycznej wymaga analizy ich wzajemnego oddziaływania. Ocena wpływu

przyłączania źródeł do sieci pod kątem jakości energii elektrycznej nie jest jednoznaczna. W wielu przypadkach obserwuje się zjawiska, których efektem jest pogorszenie jakości napięcia zasilającego w stopniu wymagającym zastosowania dodatkowych środków do kompensacji wprowadzanych zaburzeń bądź ograniczenia penetracji źródeł. Odpowiednie sterowanie źródeł stwarza możliwości poprawy funkcjonowania sieci elektroenergetycznej i zwiększenia jej zdolności przyłączeniowej. Problemy te zostały szczegółowo omówione w [10].

W sieciach z generacją rozproszoną znacząco wzrasta rola zasobników energii. Urządzenia te mogą być wykorzystane przez wszystkich uczestników procesu wytwarzania, przesyłu, dostawy i użytkowania energii, a w szczególności przez operatorów sieci i prosumentów. Stanowią one środek pomocny w rozwiązywaniu problemów technicznych, ale także dający możliwość uzyskania konkretnych efektów ekonomicznych. Wykorzystanie zasobników może przyczynić się do eliminacji barier technicznych w instalowaniu rozproszonych źródeł energii, a w szczególności źródeł odnawialnych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Polityka energetyczna Polski do 2030 r., dokument uchwalony przez Radę Ministrów 10.11. 2009 r.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4.05.2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dziennik Ustaw Nr 93
3. Wasiak I., Pawełek R., Mieński R., 2011. Zasobniki energii w mikrosystemach elektroenergetycznych, Konferencja Aktualne problemy w elektroenergetyce, APE'11, Jurata, s. 159-166
4. Bollen M. H-J., Yang Y., Hassan F., *Integration of distributed generation in the power system – A power quality approach*, 13<sup>th</sup> Int. Con. Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2008), Wollongong, Australia 2008
5. IRiESD, Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, PGE Dystrybucja S.A. 10.09.2013
6. PN-EN 61400-21, 2002. Turbozespoły wiatrowe. Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczanej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej
7. Barote L., Georgescu M., Marinescu C.: *Smart Storage Solution for Wind Systems*, IEEE Power Tech Conference, Bucharest, Romania 2009
8. Faias S., Santos P., Matos F., Sousa J., Castro R.: *Evaluation of energy storage devices for renewable energies integration Application to a Portugese wind farm*. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Electricity Market (EEM 2008) 2008
9. Kook K.S., McKenzie K.J., Liu Y., Atcitty S.: *A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems*, PES General Meeting 2006
10. Wasiak I., Pawełek R.: *Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną*, PWN, Warszawa 2015
11. Joos G., Ooi B.T., McGillis D., Galiana F.D., Marceau R., 2000. *The potential of distributed generation to provide ancillary services*, Proc. IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, s. 1762-1767
12. Wasiak I., Mieński R., Pawełek R., Gburczyk P., Espie P., Burt G.M., 2003. *Improving electrical power quality using distributed generation : Part 2 – case studies*, 7th Int. Conf. Electrical Power Quality and Utilisation, Kraków
13. Hanzelka Z., Wasiak I., 2010. *Grid inverter ancillary services*, IEEE PES General Meeting (IEEE PES GM 2010), Minneapolis, USA
14. Wasiak I., Pawełek R., Mienski R., 2014. *Energy storage application in low- voltage microgrids for energy management and power quality improvement*, IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 8, iss.3, s. 463-472

## SELECTED PROBLEMS OF INTEGRATION OF DISTRIBUTED ENERGY SOURCES IN ELECTRICAL POWER NETWORK

In the paper some selected problems of the integration of distributed energy resources in distribution power networks are presented. The influence of energy sources on the network operation is discussed. Then, network hosting capacity is defined and illustrated for different evaluation indices. The impact of energy sources connection to the network is presented with focus on power quality issues including voltage level, voltage fluctuation, voltage harmonics and asymmetry. A formula for the network hosting capacity determination is derived as regards voltage changes after the source connection. Further, the way of evaluation of voltage fluctuation and resulting flicker phenomena as well as evaluation of voltage harmonics is discussed for wind farms. Finally, the role of energy storages in the process of distributed energy sources integration is discussed with special attention to ancillary services that can be performed by storage inverters. An example of simulation is shown to illustrate the ability of energy storage to control active power and stabilize the supplying voltage at the same time.

**Keywords:** distributed generation, renewable energy sources, energy storage, power quality