

Sławomir CIEŚLIK¹, Kazimierz BIELIŃSKI¹

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,
Wydział Telekomunikacji Informatyki i Elektrotechniki (1)

Model elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną

Streszczenie. W referacie przedstawiono fizyczny model elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną. Model ten pozwala na wykonywanie badań eksperymentalnych m.in. współpracy jednostek wytwórczych energii elektrycznej z siecią, również w kontekście jakości energii elektrycznej. Wyniki badań eksperymentalnych stanowią podstawę do właściwej interpretacji fizycznych zjawisk zachodzących w tego typu sieciach. Wnioski z badań na tym modelu są, szczególnie dla młodej kadry inżynierskiej, swego rodzaju „przepustką” do planowania, przeprowadzania i właściwej interpretacji wyników badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: generacja rozproszona, mikroinstalacje, smart grid, praca sieci elektroenergetycznych

Wstęp

Możliwość przyłączania jednostek wytwórczych do elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych wysokiego, średniego i niskiego napięcia wymusiła zmianę wyobrażenia o funkcjonowaniu takich sieci. Jeszcze kilkanaście lat temu niektórzy doświadczeni elektroenergetycy twierdzili, że nie jest dopuszczalny stan pracy sieci, w którym energia elektryczna, np. w stacji transformatorowej WN/SN, przekazywana jest ze strony SN na stronę WN. A informacja o tym, że podstawowym przetwornikiem energii w turbozespołe wiatrowym jest generator synchroniczny była wystarczającą podstawą do odrzucenia wniosku o wydanie warunków przyłączenia takiego turbozespołu do sieci.

Ciągle aktualne są problemy z eksploatacją sieci dystrybucyjnych z generacją rozproszoną, np. praca elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych z mikroinstalacjami prosumenckimi [1-3]. Polskie przedsiębiorstwa wykazują zapotrzebowanie na innowacyjne technologie w zakresie nowoczesnej elektroenergetyki. Implikuje to poszukiwanie nowoczesnych metod badań naukowych, które sprostają współczesnym oczekiwaniom przedsiębiorstw. Metody te można podzielić na trzy grupy: 1) oparte na symulacji komputerowej, 2) oparte na eksperymencie na rzeczywistym układzie lub jego fizycznym modelu i 3) oparte na symulatorach komputerowych pracujących w czasie rzeczywistym, które mogą bezpośrednio współpracować z urządzeniami rzeczywistymi. Uzasadnione jest budowanie laboratoriów np. [4, 5], w których mogą być realizowane badania eksperymentalne, ale zawsze istnieje ograniczenie choćby ze względu na moc dostępnych urządzeń.

Interpretacja wyników symulacji komputerowej opartej na modelu matematycznym jest właściwa dopiero po zapoznaniu się z procesami i rozpoznaniu zjawisk zachodzących w układach rzeczywistych. Takie możliwości rozpoznawcze daje wykorzystanie modeli fizycznych sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną.

Pożądane są następujące cechy modelu fizycznego elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną:

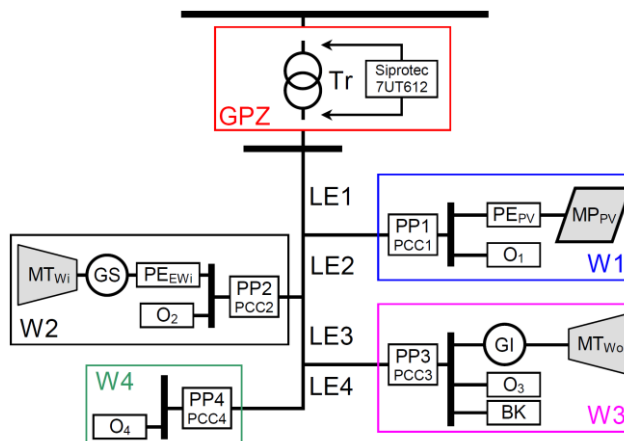
- podatność modelu fizycznego na odwzorowywanie charakterystycznych procesów zachodzących w sieci z generacją rozproszoną,

- obserwowalność i sterowalność,
- mnogość wariantów współpracy (procesów) generacji rozproszonej z siecią dystrybucyjną możliwych do przeprowadzenia na modelu fizycznym,
- uniwersalność modelu fizycznego, rozumiana jako możliwości zastosowania różnych źródeł energii,
- kompleksowość modelu fizycznego polegająca na jego wykorzystaniu do analizowania zjawisk fizycznych mających istotne znaczenie dla rozpatrywanego procesu,
- adekwatność odwzorowania zachodzących procesów przez model fizyczny (w tym: identyfikacji wielkości fizycznych niezbędnych do opisu procesu, dokładność znamienne dla aparatury pomiarowej, współczynnik regresji).

W niniejszym artykule przedstawiono fizyczny model elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną (z urządzeniami o niezbyt dużych mocach), który jest elementem metodyki badań naukowych prowadzonych w Instytucie Inżynierii Elektrycznej na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy.

Model elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną

Model elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną (rys. 1) zrealizowany jest w pomieszczeniu laboratoryjnym w Instytucie Inżynierii Elektrycznej UTP w Bydgoszczy. Integralną częścią tego modelu jest model GPZ (fot. 1.b), który zawiera m.in.: trójfazowy transformator Tr, układy łączeniowe oraz zabezpieczenia elektroenergetyczne pól liniowych i transformatora (m.in. Siprotec 7UT612).



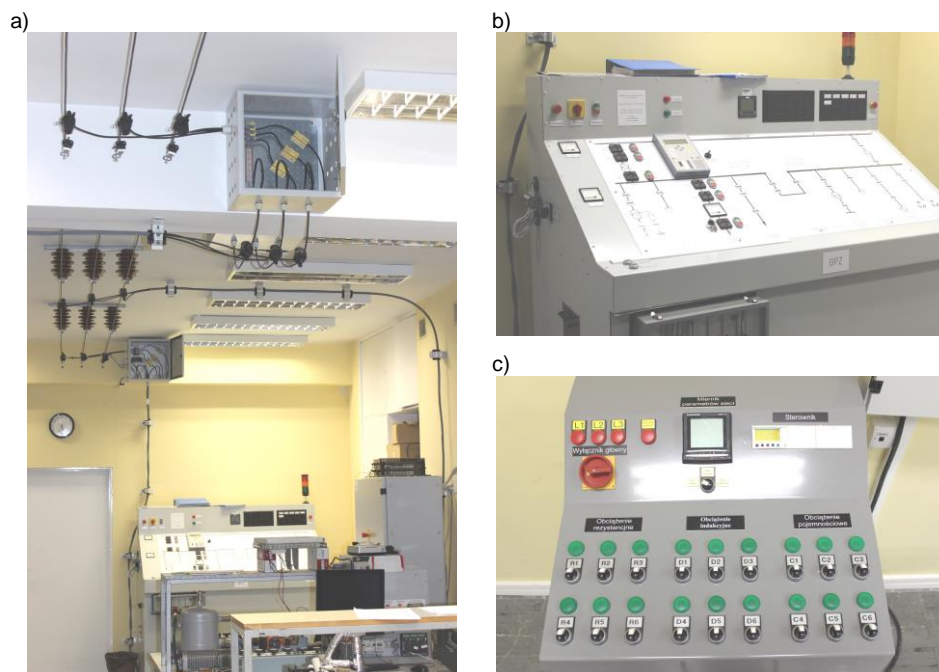
Rys. 1. Schemat poglądowy modelu fizycznego sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną.

Z modelu GPZ-u wyprowadzona jest linia elektroenergetyczna LE1-LE4 (zamocowana pod sufitem, fot. 1.a) od której wyprowadzono cztery charakterystyczne odgałęzienia. W celu odwzorowania rzeczywistych długości odcinków linii pomiędzy odgałęzieniami zastosowano dodatkowe elementy, które charakteryzują się określoną impedancją. W końcu każdego odgałęzienia linii, w węzłach odbiorczo-generacyjnych W1-W4, zainstalowano szafki rozdzielcze, które umożliwiają podłączenie modeli fizycznych odbiorów i jednostek wytwórczych energii elektrycznej. Dostępne są modele odbiorów trójfazowych O1-O4 z możliwością kształtowania obciążenia w poszczególnych fazach (fot. 1.c).

Modele odbiorów składają się z odpowiednio skonfigurowanych (z wykorzystaniem łączników można uzyskać praktycznie dowolną konfigurację) układów rzeczywistych

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

rezystorów, cewek i kondensatorów. Dodatkowo można podłączać rzeczywiste odbiorniki takie jak np. grzałki i źródła światła (w rzeczywistości w modelu sieci panuje niskie napięcie).



Fot. 1. Fotografie przedstawiają: widok ogólny modelu sieci (a), widok modelu GPZ (b) oraz widok modelu uniwersalnego odbioru trójfazowego (c).

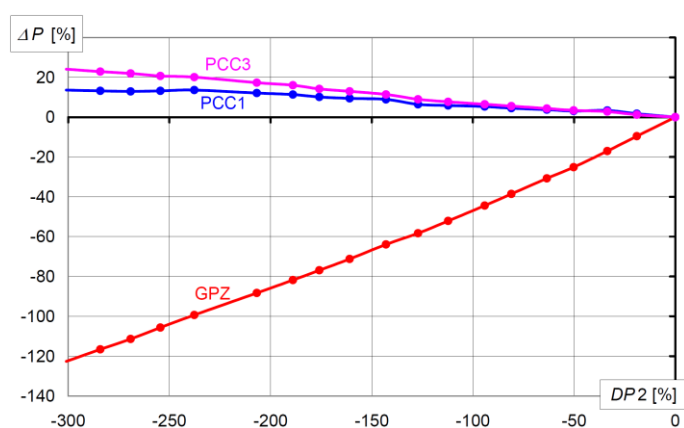
W prezentowanym modelu sieci dostępne są trzy modele fizyczne jednostek wytwórczych. Pierwszy model składający się z rzeczywistych paneli fotowoltaicznych zainstalowanych na dachu budynku. Ale z uwagi na potrzebę wykorzystywania modelu w różnych porach dnia i niezależnie od warunków pogodowych dostępny jest również model systemu fotowoltaicznego MP_{PV} z przekształtnikiem energoelektronicznym PE_{PV} , który może być przyłączony do modelu sieci. Drugi model jednostki wytwórczej to model turbiny wiatrowej MT_{wi} , w postaci komputerowo sterowanego zestawu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym klatkowym (koło wiatrowe), który sprzęgnięty jest mechanicznie z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi GS. Generator może być przyłączony do modelu sieci przez przekształtnik energoelektroniczny PE_{EWi} . Trzeci model to model małej elektrowni wodnej MT_{wo} , w postaci komputerowo sterowanego zestawu elektromaszynowego z maszyną prądu stałego (turbina wodna), która sprzęgnięta jest mechanicznie z klatkowym generatorem indukcyjnym GI. Generator może być bezpośrednio przyłączony do modelu sieci. Do kompensacji mocy biernej zastosowano statyczny wielostopniowy układ baterii kondensatorów BK z regulacją automatyczną oraz ręczną.

Węzły odbiorczo-generacyjne W1-W4, w punkcie wspólnego przyłączenia PCC, oraz pole liniowe w GPZ, wyposażone są w analizatory parametrów sieci, zainstalowane w punktach pomiaru PP1-PP4 oraz bezpośrednio w polu pomiarowym GPZ.

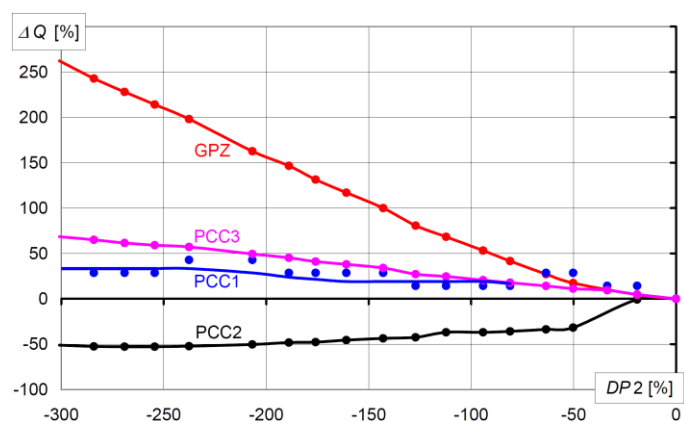
Przykłady badania statycznych stanów pracy elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną

Jednym z interesujących zagadnień w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia z mikroinstalacjami jest ocena wpływu generacji na zużycie energii w odbiorach sąsiednich [6]. Przeprowadzono następujący eksperyment. W węźle odbiorczo-generacyjnym W2 możliwa jest generacja energii elektrycznej w wewnętrznej jednostce wytwórczej (elektrownia wiatrowa). W pozostałych węzłach generacja energii elektrycznej nie występuje. Zatem węzły W1 i W3 można traktować jako bezpośrednie sąsiedztwo względem węzła W2.

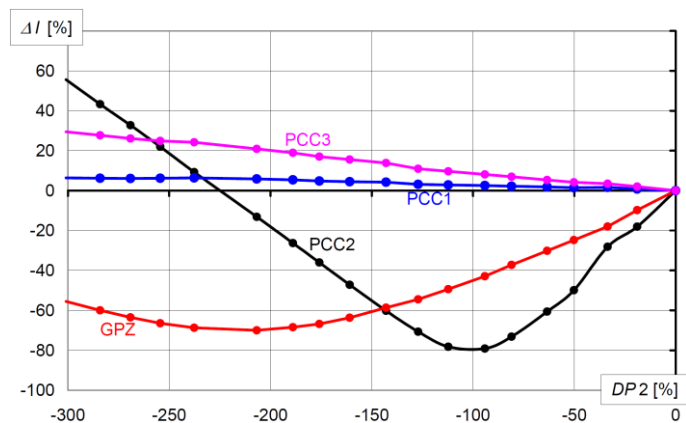
Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki zmian mocy czynnej w węzłach analizowanej sieci w zależności od zmian mocy czynnej w węźle W2. Na rysunku 3 pokazano charakterystyki zmian mocy biernej w tych samych węzłach.



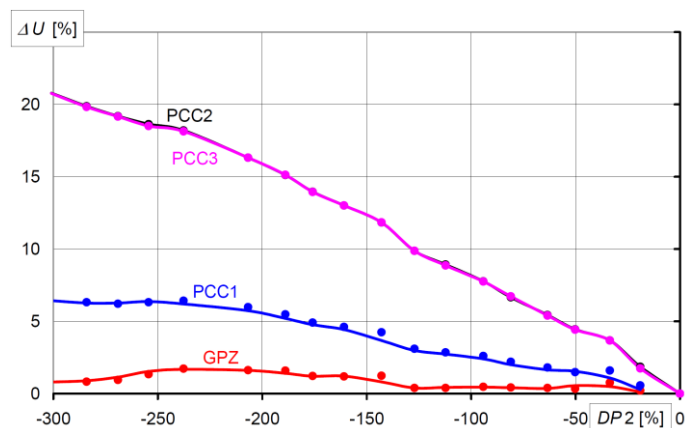
Rys. 2. Charakterystyki zmian mocy czynnej w węzłach analizowanej sieci w funkcji zmian mocy czynnej w węźle W2.



Rys. 3. Charakterystyki zmian mocy biernej w węzłach analizowanej sieci w funkcji zmian mocy czynnej w węźle W2.



Rys. 4. Charakterystyki zmian natężenia prądu w węzłach analizowanej sieci w funkcji zmian mocy czynnej w węźle W2.



Rys. 5. Charakterystyki zmian napięcia w węzłach analizowanej sieci w funkcji zmian mocy czynnej w węźle W2.

Na kolejnych rysunkach (rys. 4 i 5) pokazano charakterystyki zmian natężenia prądu oraz napięcia w tych samych węzłach elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej.

Na wszystkich tych rysunkach zastosowano względne wielkości fizyczne, które określono na podstawie następujących zależności:

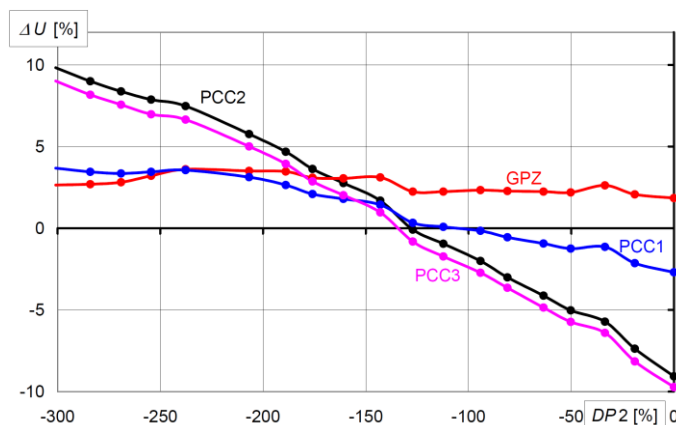
$$(1) \quad DP2 = \frac{P_{PCC2X} - P_{PCC2A}}{P_{PCC2A}} \cdot 100\% ,$$

$$\Delta B_{\xi} = \frac{B_{PCC\xi X} - B_{PCC\xi A}}{B_{PCC\xi A}} \cdot 100\% ,$$

gdzie: $DP2$ – zmiana mocy czynnej w węźle $W2$, P_{PCC2A} – moc czynna w węźle $W2$ w stanie bez generacji energii elektrycznej w jednostce wytwórczej w węźle $W2$, P_{PCC2X} – moc czynna w węźle $W2$ w X -tym stanie z generacją energii elektrycznej w jednostce wytwórczej w węźle $W2$, ΔB_{ξ} – zmiana wielkości fizycznej określonej symbolem B (Q , U lub I) w węźle W_{ξ} , $B_{PCC_{\xi A}}$ – wielkość fizyczna określona symbolem B (Q , U lub I) w węźle W_{ξ} w stanie bez generacji energii elektrycznej w jednostce wytwórczej w węźle $W2$, $B_{PCC_{\xi X}}$ – wielkość fizyczna określona symbolem B (Q , U lub I) w węźle W_{ξ} w X -tym stanie z generacją energii elektrycznej w jednostce wytwórczej w węźle $W2$.

Opisany model fizyczny elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną umożliwił eksperymentalne badania, m.in. wpływu generacji energii elektrycznej w określonym węźle na zmiany mocy czynnej, biernej, natężenia prądu oraz napięcia w węzłach sąsiednich.

Zmiana mocy o -100% oznacza, że w PCC danego węzła moc jest równa zero. W przypadku węzła $W2$ oznacza to, że odbiorniki tego węzła zasilane są energią elektryczną czynną wytworzoną przez lokalną jednostkę wytwórczą. W przypadku węzła GPZ oznacza to, że odbiorniki w całej sieci (linii) przyłączonej do tego węzła zasilane są energią elektryczną czynną wytworzoną przez lokalne jednostki wytwórcze (generację rozproszoną). Z obu stron węzeł jest połączony, ale przez ten węzeł nie przepływa energia elektryczna czynna. To samo rozumowanie można przyjąć dla energii biernej. Większe możliwości generacji energii w lokalnej jednostce wytwórczej (lub jednostkach) powodują wytwarzanie energii elektrycznej czynnej w ilości większej niż potrzebują odbiorniki w węźle (w linii, w sieci), czego wynikiem jest zwiększanie się wartości zmian mocy poniżej -100% . Należy zauważyć, że dodatkowo zmienia się znak mocy czynnej, następuje zmiana kierunku przepływu energii czynnej, zatem zmiany mocy nadal będą miały znak minus.



Rys. 6. Charakterystyki zmian napięcia w węzłach analizowanej sieci, odniesionych do deklarowanej wartości napięcia sieci, w funkcji zmian mocy czynnej w węźle $W2$.

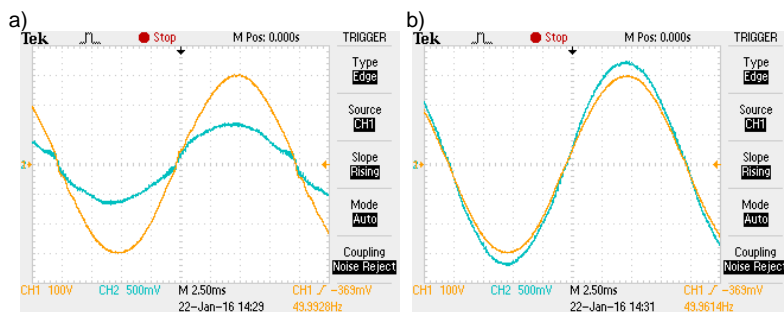
W kontekście wpływu generacji na zużycie energii elektrycznej przez odbiorniki, szczególnie w sąsiedztwie, interesujące są charakterystyki zmian mocy czynnej i biernej przedstawione na rys. 2 i 3. W przedziale zmian $DP2$ od 0 do -100% mamy do czynienia ze wzrostem energii pozyskiwanej w lokalnym źródle (elektrownia wiatrowa). Moc węzła $W2$ zmniejsza się aż do osiągnięcia pełnej kompensacji mocy czynnej

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

($DP2 = -100\%$). Zwiększeniu ulegają wartości mocy czynnych w węzłach sąsiednich W1 i W3. W tych węzłach nie zmieniono struktury i parametrów odbiorników, a zatem uprawniony jest wniosek, że na skutek generacji energii elektrycznej w węzle sąsiednim w węzłach W1 i W3 nastąpi wzrost energii elektrycznej zużywanej przez odbiorniki. przyczyną wzrostu mocy jest zwiększenie się wartości napięcia w tych węzłach (rys. 5). Właśnie zmiany napięcia w węzłach sieci elektroenergetycznych są praktycznie podstawą do ostatecznego wnioskowania o ewentualnych roszczeniach pomiędzy sąsiadami. W Instrukcjach Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych podawana jest dopuszczalna zmiana napięcia w każdym węzle w stosunku do wartości deklarowanej napięcia sieci. Dla sieci niskiego napięcia wynosi ona $\pm 10\%$. Zapisy z instrukcji są umieszczane w umowach z odbiorcami energii oraz z innymi podmiotami przyłączanymi do wspólnej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej. Zatem prawidłową ilustracją zmian napięcia w węzłach sieci, w kontekście ewentualnych sporów, jest charakterystyka zmian napięcia, jako wartości względnej odniesionej do wartości deklarowanej sieci, co przedstawiono na rysunku 6. Teraz ewidentnie widać, że w analizowanym przedziale zmian mocy czynnej w węzle W2, od 0 do -300% , napięcie w żadnym węzle nie przekracza dopuszczalnych wartości, wynikających z umowy. Nie ma zatem podstaw do żądania odszkodowania lub rekompensaty za zwiększenie zużycia energii elektrycznej u sąsiednich odbiorców. Zagadnienie to można wyjaśniać również od strony fizycznej z analizą funkcjonowania elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, co przedstawiono w publikacji [6].

Jak widać z rysunku 6 dalsze zwiększanie mocy jednostki wytwórczej w węzle W2 jest niedopuszczalne ze względu na dopuszczalne wartości napięć w węzłach sieci. Dalsze zwiększanie mocy generowanej w jednostce wytwórczej w węzle W2 spowoduje przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia w tym węzle.

Obserwując charakterystyki zmian wartości natężenia prądu w węzłach (rys. 4) widać charakterystyczne minima dla prądów w węzle W2 oraz w GPZ. Są to wartości skuteczne prądów, a charakterystyczne minima korespondują ze zmianą znaku mocy czynnej w poszczególnych w tych węzłach sieci. Natężenie prądu w węzle W2 ma swoje minimum przy zerowej wartości mocy czynnej, czemu odpowiada wartość $DP2 = -100\%$. Natomiast natężenie prądu w węzle GPZ ma swoje minimum przy zerowej wartości mocy czynnej w GPZ, czemu odpowiada wartość $\Delta P_{GPZ} = -100\%$ na rysunku 2. Wówczas w GPZ nie ma przepływu energii elektrycznej czynnej, czyli zapotrzebowanie na energię czynną wszystkich odbiorników w sieci zasilanej z GPZ (również straty w elementach sieci) wypełniane jest z generacji rozproszonej w postaci jednostki wytwórczej w węzle W2 (elektrownia wiatrowa).



Rys. 7. Przebiegi napięcia fazowego (CH1) oraz natężenia prądu (odwrócony przebieg) (CH2) przekształtnika energoelektronicznego systemu fotowoltaicznego: a) $0,17P_N$ i a) $0,46P_N$.

Drugim przykładowym zagadnieniem, które może być analizowane w proponowanym modelu fizycznym sieci z generacją rozproszoną, jest praca jednofazowego systemu fotowoltaicznego oraz jego współpraca z siecią. W niniejszym artykule przedstawiono dla przykładu tylko jeden aspekt, mianowicie dotyczący jakości energii elektrycznej.

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi napięcia i natężenia prądu jednofazowego systemu fotowoltaicznego jako elementu przedstawionego fizycznego modelu sieci z generacją rozproszoną. Na przedstawionych oscylogramach odwrócono przebieg natężenia prądu, żeby można było porównać wizualnie jego kształt z kształtem (praktycznie sinusoidalnym) przebiegu napięcia. Wyraźnie widać, że kształt sinusoidy natężenia prądu przy generacji na poziomie ok. 17% mocy znamionowej jest znacząco odkształcony od sinusoidy. Zgodnie z deklaracjami producenta przekształtnika energoelektronicznego dopiero przy generacji większej niż 30% mocy znamionowej następuje zadowalający kształt natężenia prądu. Potwierdzeniem tej deklaracji jest oscylogram na rys. 7.b, na którym przy generacji na poziomie ok. 46% mocy znamionowej kształt przebiegu natężenia prądu jest już praktycznie sinusoidalny.

Wnioski

1. Opisany w artykule model fizyczny elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną umożliwia wykonywanie badań eksperymentalnych charakterystycznych stanów pracy tego typu sieci. Pokazano dwa przykłady eksperymentów dla sieci niskiego napięcia w stanach ustalonych. Możliwe jest prowadzenie badań również nieustalonych (przejściowych) stanów pracy sieci.
2. Model może być wykorzystywany w ściśle określonych zakresach do badania stanów pracy występujących również w sieciach elektroenergetycznych średnich, wysokich i najwyższych napięć, np. z uwzględnieniem aspektów regulacji napięcia.
3. Wyniki uzyskane z badań na proponowanym modelu mogą być podstawą analizy zjawisk fizycznych, która prowadzi do właściwej interpretacji tych wyników, co daje swojego rodzaju „przepustkę” do analizy wyników badań symulacyjnych.

Literatura

1. Cieślik S., *Regulacja napięcia w sieciach dystrybucyjnych nn z mikroinstalacjami*, Materiały XVII Sympozjum „Współczesne urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”, Poznań, 2014, str. 24-27. Przedruk: INPE, Nr 189 (Rok XXI), czerwiec 2015, str. 43-49.
2. Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K.: *Prosument – krajobraz po bitwie*, Rynek Energii Nr 2, 2015, str. 40-44.
3. Sobierajski M., Rojewski W., *Kryteria przyłączania OZE do sieci nN*. Materiały VI Konferencji Przyłączanie i Współpraca OZE z Systemem Elektroenergetycznym, Warszawa, 2014, str. 73-94.
4. Politechnika Gdańska, Laboratorium Generacji Rozproszonej, (10 stycznia 2016 r.), <http://eia.pg.gda.pl/linte/>.
5. Politechnika Łódzka, Laboratorium Generacji Rozproszonej, (10 stycznia 2016 r.), http://www.i15.p.lodz.pl/pl/pliki_htm/LGR.htm.
6. Cieślik S., *Wpływ mikroinstalacji prosumenckich na zużycie energii przez odbiorniki*. ElektrolInfo, Nr 1-2, 2016, str. 34-37.

Autorzy: dr hab. inż. Sławomir Cieślik, prof. nadzw. UTP; Instytut Inżynierii Elektrycznej, Wydział Telekomunikacji Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: slavcies@utp.edu.pl, dr inż. Kazimierz Bieliński; Instytut Inżynierii Elektrycznej, Wydział Telekomunikacji Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: kbiel@utp.edu.pl