

ESTYMACJA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA W NIEOPOMIAROWANYCH PUNKTACH SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM ŚRODOWISKA SYMULACYJNEGO

Mateusz DUTKA, Krzysztof PIĄTEK, Tomasz SIOSTRZONEK, Szymon BARCZENIEWICZ,
Bogusław ŚWIĄTEK

Miejsce pracy: AGH, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
tel.: +48 12 617 39 20 e-mail: mdutka@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule zaprezentowano możliwości wykorzystania oprogramowania OpenDSS do komputerowej symulacji pracy sieci elektroenergetycznych w estymacji wartości skutecznej napięcia w nieopomiarowanych punktach sieci, jako wsparcie dla operatorów systemów dystrybucyjnych w monitorowaniu i diagnostyce pracy ich sieci. W artykule przedstawiono porównanie wyników pomiarów oraz symulacji pracy wybranego obszaru systemu dystrybucyjnego na poziomie średniego napięcia.

Słowa kluczowe: symulacja pracy systemu dystrybucyjnego, system pomiarowy, propagacja wartości skutecznych napięcia, wpływ elektrowni fotowoltaicznych na sieć.

1. WSTĘP

Obecność rozproszonych źródeł energii oraz zaburzenia powodowane pracą odbiorników stawiają przed operatorami systemów dystrybucyjnych (OSD) nowe wyzwania. Zapewnienie prawidłowej jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) wymusza budowę systemów pomiarowych, gdyż brak znajomości stanu bieżącego uniemożliwia wdrożenie narzędzi naprawczych. Z kolei rozległe systemy pomiarowe wiążą się ze znacznymi nakładami finansowymi na ich budowę oraz utrzymanie. Kompromisem może okazać się wykorzystanie symulacji komputerowych współpracujących z systemem pomiarowym. Połączenie tych dwóch środowisk umożliwia znaczne ograniczenie liczby koniecznych do zainstalowania urządzeń pomiarowych. Jednocześnie informacje pochodzące z zainstalowanych urządzeń są źródłem cennych informacji dla modelu symulacyjnego. Pozwalają na jego uproszczenie, umożliwiają weryfikację oraz korektę wyników.

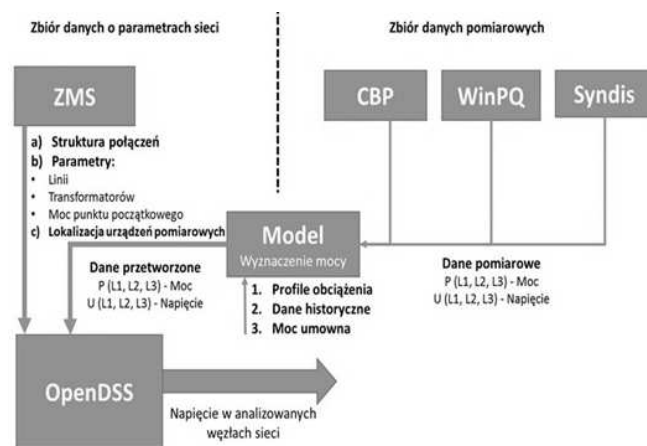
2. MODEL SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Do estymacji parametrów napięcia w nieopomiarowanych punktach sieci dystrybucyjnej konieczne jest opracowanie modelu symulacyjnego, który następnie zostanie powiązany z systemem pomiarowym.

Dla prezentowanego przypadku model opracowany został w programie OpenDSS rozpowszechnianym na licencji *open source* przez EPRI. Środowisko zaprojektowano na potrzeby symulacji pracy systemu dystrybucyjnego energii elektrycznej. Układ został

przygotowany z myślą o wsparciu integracji rozproszonych zasobów energii w sieci elektroenergetycznej i planowania jej modernizacji. Umożliwia inżynierom przeprowadzanie złożonych analiz przy użyciu platformy przeznaczonej do modelowania sieci oraz może stanowić podstawę do zrozumienia oddziaływania i szacowania wpływu nowo przyłączanych źródeł lub odbiorników. Działanie środowiska OpenDSS oraz problematyka symulacji pracy sieci została opisana w artykułach [1-9].

Na rysunku 1 zamieszczono koncepcję współpracy modelu symulacyjnego z systemami informatycznymi wspomagającymi pracę OSD, takimi jak: system zarządzania majątkiem sieciowym (ZMS), centralna baza pomiarowa (CBP), bazy pomiarowe parametrów jakości energii elektrycznej (WinPQ, SyndisPQ).



Rys. 1. Współpraca środowiska symulacyjnego z systemami ZMS, CBP, WinPQ, SyndisPQ

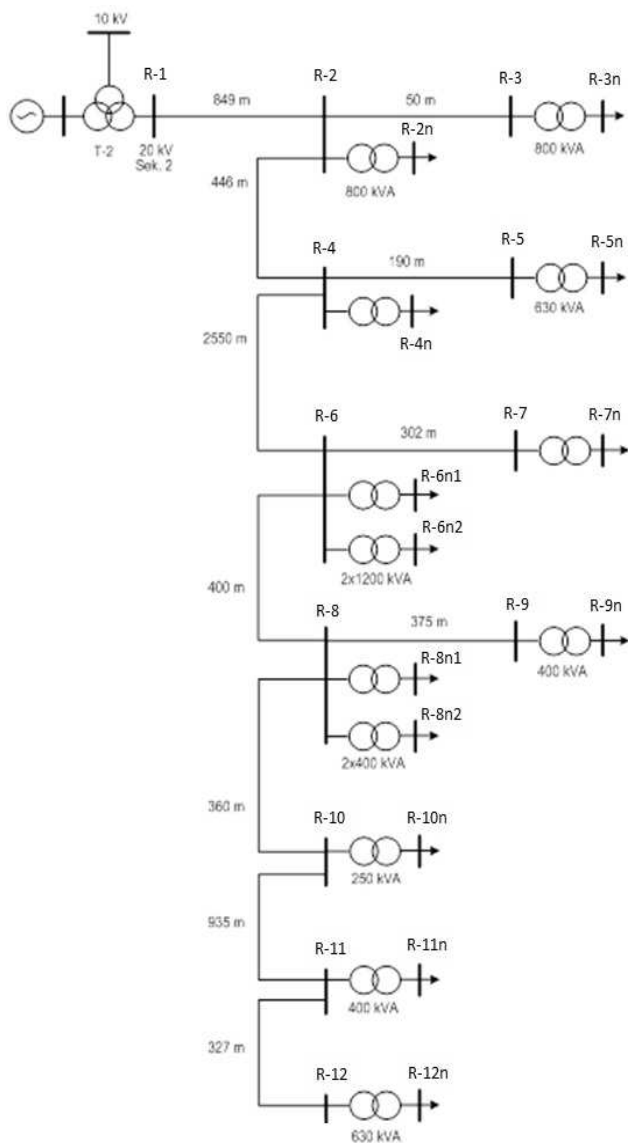
Do budowy modelu niezbędne są dane gromadzone w systemie ZMS. W tym przypadku warto zadbać o ustandaryzowanie wymiany informacji pomiędzy systemami na przykład wykorzystując Common Grid Model Exchange Specification (CGMES). Specyfikacja jest wykorzystywana podczas wymiany danych operacyjnych i danych dotyczących planowania sieci między operatorami systemów przesyłowych [10].

Drugim cennym źródłem danych jest system pomiarowy gromadzący informacje z urządzeń pomiarowych pracujących w sposób ciągły lub czasowy.

Instalacja zbyt dużej liczby urządzeń pomiarowych jest ekonomicznie nieopłacalna, dlatego część danych może zostać zastąpiona informacjami statystycznie oszacowanymi np. profilami obciążenia, danymi historycznymi. Zwłaszcza, gdy odbiór charakteryzuje się okresowością w poborze energii.

Połączenie trzech powyższych elementów pozwala na przygotowanie systemu wspomaganie decyzji dedykowanego zarówno dla inżynierów odpowiedzialnych za prawidłową pracę sieci, jak i kadry zarządzającej odpowiedzialnej za planowanie inwestycji.

Na rysunku 2 zamieszczono schemat badanej sieci dystrybucyjnej. W jej obszarze zainstalowanych jest 10 urządzeń pomiarowych, na które składają się 4 analizatory JEE klasy A oraz 6 liczników energii elektrycznej wyposażonych w funkcje pomiaru parametrów JEE. Informacje z tych urządzeń są podstawą do wykonania symulacji oraz weryfikacji uzyskanych wyników. Przyjęty do analizy okres pomiaru wynosił 3 tygodnie.



Rys. 2. Schemat rozważanej sieci dystrybucyjnej

3. ANALIZA PORÓWNAWCZA DANYCH POMIAROWYCH ORAZ SYMULACYJNYCH

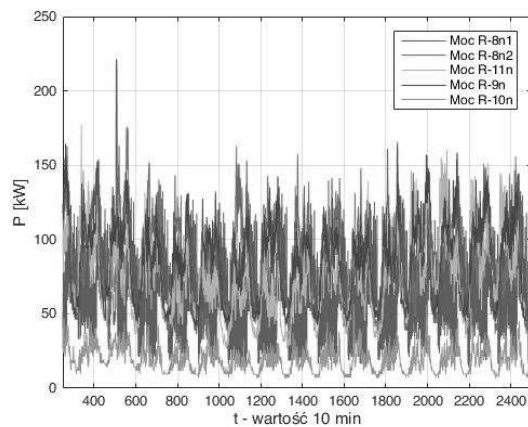
Zgromadzone dane umożliwiły wykonanie porównania rzeczywistej pracy obszaru testowego sieci dystrybucyjnej

z danymi wygenerowanymi przy wykorzystaniu modelu sieci dystrybucyjnej w programie OpenDSS. Analizie poddano opomiarowane węzły sieci: R-1 (początek sieci), R-9, R-8n1, R-8n2, R-11n, R-9n oraz R-10n.

3.1. Proces symulacyjny

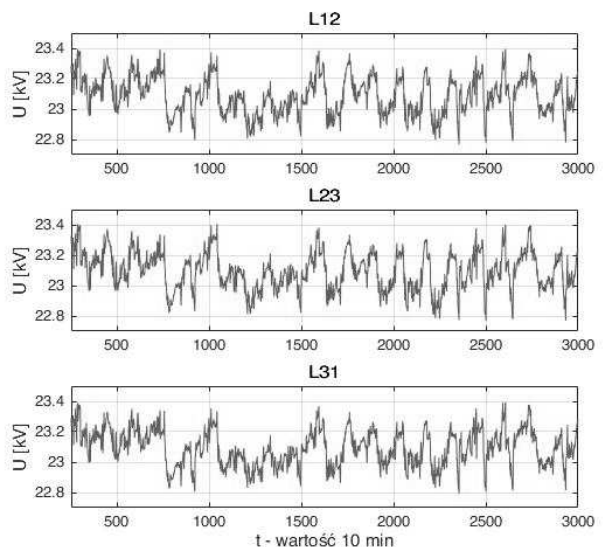
W celu wykonania symulacji zmian napięcia z interwałem 10-minutowym niezbędne jest uwzględnienie mocy węzłów końcowych oraz wartości napięcia zasilającego sieć.

Źródłem danych mogą być pomiary wykonane za pomocą liczników końcowych, bilansujących oraz analizatorów jakości energii. Przydatne mogą okazać się, również profile obciążenia oszacowane dla danego typu odbiorcy. Model symulacyjny zbudowano w oparciu o rejestracje mocy czynnej wykonane przez analizatory oraz liczniki. Jej zmienność oraz wolumen zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Wartość mocy - Faza L1

Węzeł R-1 (do którego dołączony jest badany obszar sieci dystrybucyjnej) charakteryzuje się zmiennością wartości skutecznych napięcia zaprezentowaną na rysunku 6.

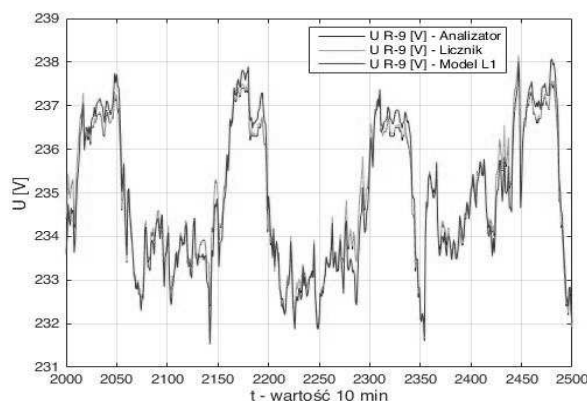


Rys. 6. Napięcie węzła R-1

Dla analizowanego okresu zmienność wartości skutecznej napięcia, wyznaczona na podstawie analizy zagregowanych wartości 10-minutowych, mieści się w zakresie 2,8% wartości średniej napięcia skutecznego.

Uwzględnienie wartości napięcia węzła R-1 w symulacjach pozwala zwiększyć ich dokładność.

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie wartości skutecznej napięcia węzła R-9n z wartościami zmierzonymi za pomocą analizatora, licznika oraz będącymi wynikiem symulacji.



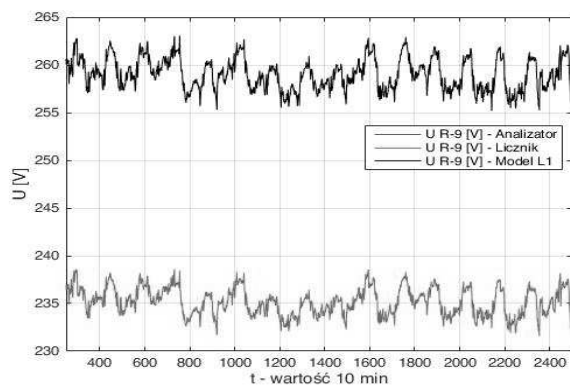
Rys. 7. Napięcie węzła R-9n – z uwzględnieniem zmienności mocy i napięcia zasilającego

Średnia względna różnica wartości skutecznej napięcia zmierzonego (węzły R-9, R-8n1, R-8n2, R-11n, R-9n oraz R-10n) oraz symulowanego zawierała się w przedziale od 0,05% do 2,46%.

3.2. Weryfikacja danych oraz korekta napięcia początkowego - studium przypadku

Ze względu na rzeczywisty charakter systemu, może okazać się, że urządzenie pomiarowe zostało niewłaściwie skonfigurowane lub w czasie eksploatacji nastąpiła zmiana warunków pomiaru (np. wymiana urządzeń). Dotyczy to zwłaszcza pomiarów na poziomie średniego oraz wysokiego napięcia, gdzie pomiar wykonywany jest za pomocą przekładników napięciowych. Konieczne jest wtedy precyzyjne zdefiniowanie przekładni, w przeciwnym razie wystąpi stały błąd pomiaru. Wykorzystanie środowiska symulacyjnego pozwala na weryfikację rzeczywistych pomiarów oraz umożliwia ich sprawdzenie.

Na potrzeby przeprowadzonej analizy zwiększono wartość skuteczną napięcia w węźle R-1 o 10%. Następnie wykonano symulację dla badanej sieci. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyniku symulacji oraz pomiarów.



Rys. 8. Napięcie węzła R-9n – błędne napięcie źródła

W celu wykonania korekty wybrano opomiarowany węzeł R-9n sieci znajdujący się wewnątrz analizowanej struktury sieci. Wybrano ten punkt, ponieważ dla niego realizowany był pomiar dwoma niezależnymi urządzeniami:

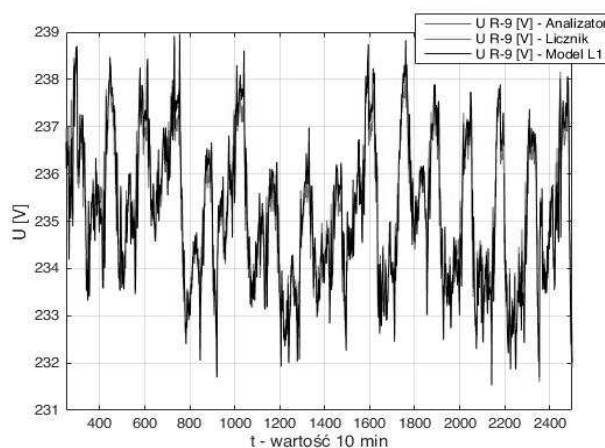
analizatorem jakości energii oraz licznikiem. Następnie w sposób iteracyjny wyznaczono współczynnik korekcyjny.

$$K = \frac{U_{pom} - U_{sym}}{U_{pom}} \quad (1)$$

$$U_{zr} = (1 + K) \cdot U_{zr} \quad (2)$$

gdzie: K – współczynnik korekcyjny, U_{pom} – napięcie zmierzone, U_{sym} – napięcie z symulacji, U_{zr} – napięcie zasilające sieć.

W wyniku przeprowadzonej korekty wyznaczono współczynnik $k = 0,0904$ oraz skorygowano wartość skuteczną napięcia w węźle R-1 zgodnie z wzorem 2. Wynik działania mechanizmu korekty oraz symulacji zaprezentowano na rysunku 9.



Rys. 9. Napięcie węzła R-9n – skorygowane napięcie źródła

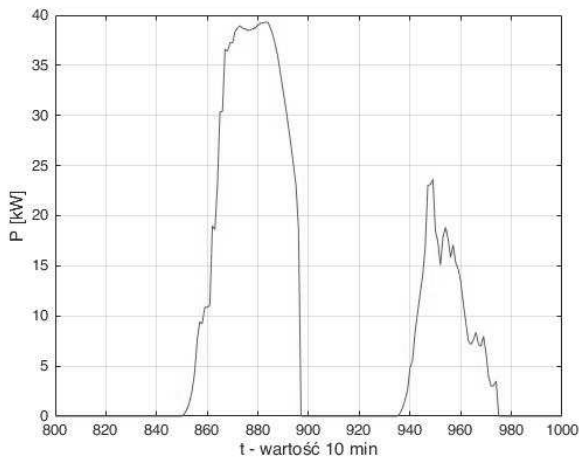
Powyższy przypadek opisuje przykładową możliwość wykorzystania środowiska symulacyjnego do weryfikacji poprawności pomiarów i konfiguracji urządzeń zainstalowanych wewnątrz sieci. Nie uwzględnia ona sytuacji, w której błędnie przyjęto moc odbiorników. Wtedy zastosowanie powyżej opisanej metody powinna poprzedzać dokładna analiza porównawcza przebiegów zmierzonych oraz otrzymanych w wyniku symulacji.

4. SYMULACJA WPŁYWU PRZYŁĄCZENIA OZE

W Polsce coraz popularniejsze są prosumenckie oraz komercyjne instalacje fotowoltaiczne. Tego typu instalacje charakteryzują się zmiennością produkcji zależną od zmiennych warunków pogodowych. Instalowane są niejednokrotnie w miejscach znacznie oddalonych od transformatora, o niskiej mocy zwarciowej. Wpływ takich instalacji na sieć wymaga szczególnej uwagi od OSD.

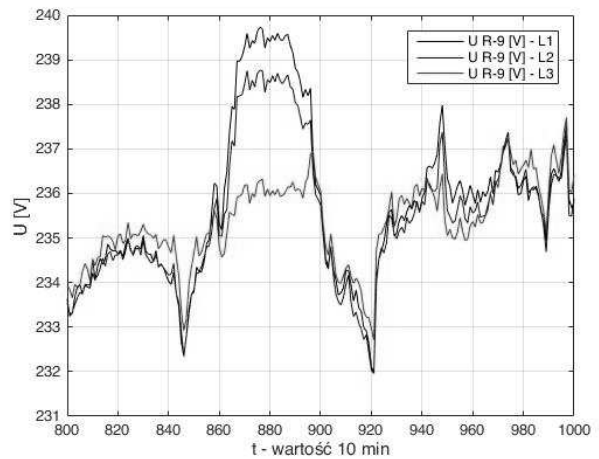
4.1. Symulacja przyłączenia 1 fazowego OZE do sieci dystrybucyjnej

Na potrzeby symulacji założono, że do węzła R-12n (fazy L1) została przyłączona elektrownia fotowoltaiczna o mocy 60 kW. Wykorzystano przykładowe zmierzone dane dla dnia słonecznego oraz pochmurnego zmienność mocy przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Moc elektrowni fotowoltaicznej
– dzień słoneczny / pochmurny

W celu stwierdzenia wpływu elektrowni na sieć przeskalowano dane pięciokrotnie (300 kW) i dziesięciokrotnie (600 kW). Jest to sytuacja hipotetyczna, mająca na celu pokazanie wpływu rozproszonych jednofazowych instalacji PV na sieć dystrybucyjną. Wyniki symulacji zaprezentowano na rysunkach 11, 12, 13.

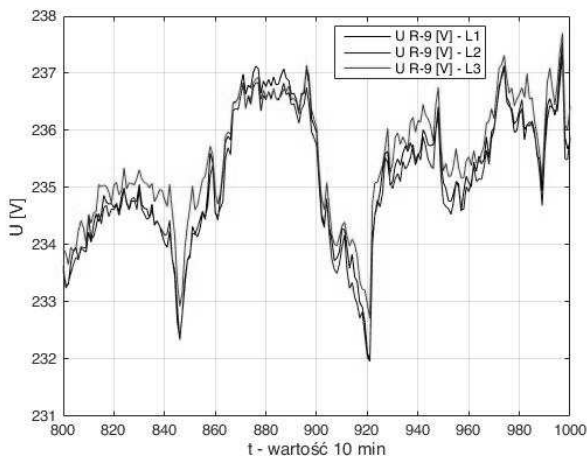


Rys. 13. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie dziesięciu 1 fazowych PV

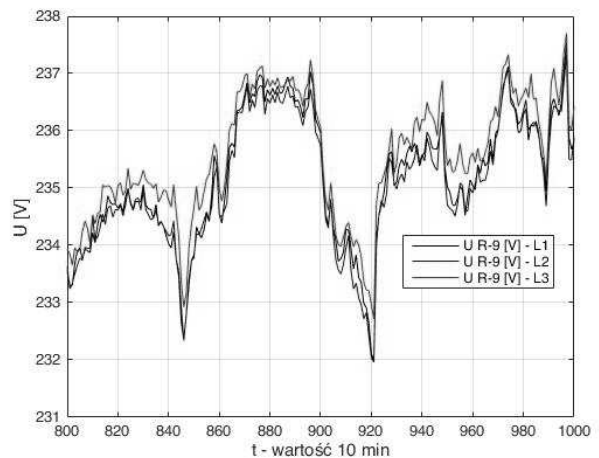
Jak wynika z symulacji przyłączenie kolejnych 1 fazowych elektrowni PV spowoduje zwiększenie wartości skutecznej napięcia w fazie L1 i L2 oraz jej obniżenie w fazie L3. Jednocześnie zwiększy się asymetria napięcia zasilającego.

4.2. Symulacja przyłączenia 3 fazowego OZE do sieci dystrybucyjnej

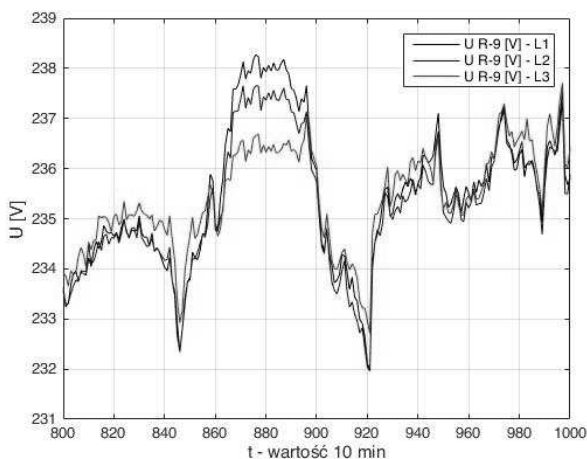
Dla rzeczywistych danych wykonano symulację przyłączenia do sieci dystrybucyjnej jednej 3 fazowej elektrowni PV. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 14, 15, 16.



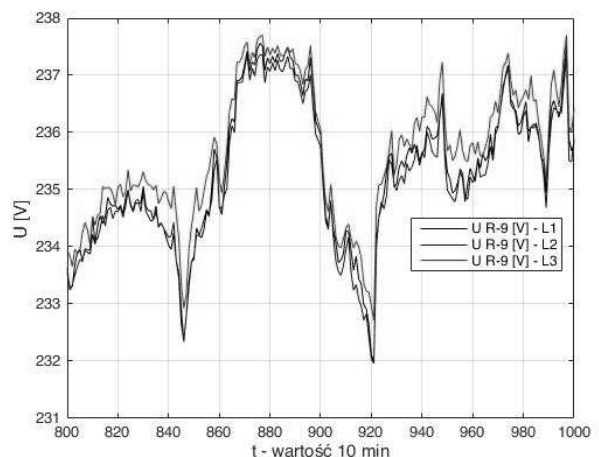
Rys. 11. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie jednej 1 fazowej PV



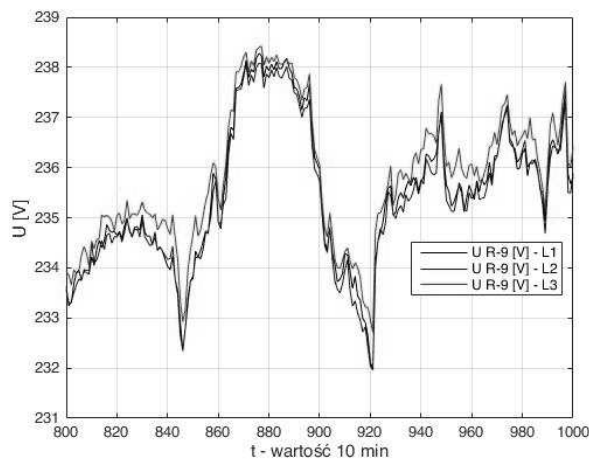
Rys. 14. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie jednej 3 fazowej PV



Rys. 12. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie pięciu 1 fazowych PV



Rys. 15. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie pięciu 3 fazowych PV



Rys. 16. Napięcie węzła R-9n
– przyłączenie dziesięciu 3 fazowych PV

Jak wynika z symulacji dla instalacji 3 fazowych wewnątrz sieci dystrybucyjnej widoczne jest zwiększenie wartości skutecznej napięcia fazowego. Asymetria napięciowa jest znacznie mniejsza niż w poprzednio rozważanym przypadku.

5. WNIOSKI

Współpraca systemu pomiarowego oraz środowiska symulacyjnego OpenDSS pozwoliła na uzyskanie efektu synergii upraszczając model i jednocześnie zwiększając dokładność szacowania. Zaproponowano wykorzystanie środowiska symulacyjnego do szacowania wpływu elektrowni wykorzystujących OZE na sieć dystrybucyjną.

Narzędzie symulacyjne współpracujące z systemem pomiarowym pozwala na szacowanie wartości skutecznej napięcia wewnątrz sieci ze średnim błędem dla całego analizowanego okresu na poziomie poniżej 1%.

W przypadku rozległych systemów, w skład których wchodzi duża liczba urządzeń pomiarowych, bardzo trudne jest wykrycie błędnie mierzącego urządzenia. Porównanie wyników symulacji i rejestracji pozwala na weryfikację poprawności działania urządzeń pomiarowych.

Wykorzystanie środowiska symulacyjnego pozwala na oszacowanie wpływu elektrowni fotowoltaicznych na sieć dystrybucyjną z uwzględnieniem niesymetrii źródła.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Liang Ch., Jun H., Yiran W., Jian T., Hong L., Sanrong G., Yin W.: Analysis of Access Location and Capacity of Distributed Generation Based on OpenDSS, 2018 China International Conference on Electricity

2. Argüello A., Cunha W. L., Ricciardi T. R., Torquato R., Freitas W.: Dynamic Modeling in OpenDSS: An Implementation Sequence for Object Pascal, 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Aug. 2018.
3. Camilo Alberto Sepulveda Rangel, Canha L., Sperandio M., Severiano R.: Methodology for ESS-type selection and optimal energy management in distribution system with DG considering reverse flow limitations and cost penalties, IET Generation, Transmission & Distribution, s. 1164-1170, Volume: 12, Issue: 5, 2018
4. Maciel R., Campello T., Silva M., Borba B., Fritz L., Ferreira V., Zamboti M., Correia W.: DG impact evaluation on LV distribution grids using AMI data: a Brazilian case study, CIREN - Open Access Proceedings Journal, s. 1699-1702, Volume: 2017, Issue: 1, 2017
5. Abdelsamad S. F., Morsi W. G., Sidhu T. S.: Impact of Wind-Based Distributed Generation on Electric Energy in Distribution Systems Embedded With Electric Vehicles, IEEE Transactions on Sustainable Energy, s. 79-87, Volume: 6, Issue: 1, Jan. 2015
6. Mahmoud K., Abdel-Nasser M.: Efficient SPF approach based on regression and correction models for active distribution systems, IET Renewable Power Generation, s. 1778-1784, Volume: 11, Issue: 14, 2017
7. Mahmoud K., Yorino N.: Robust quadratic-based BFS power flow method for multi-phase distribution systems, IET Generation, Transmission & Distribution, s. 2240-2250, Volume: 10, Issue: 9, 2016
8. Mortazavi H., Mehrjerdi H., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoir L.: An Impedance-Based Method for Distribution System Monitoring, IEEE Transactions on Smart Grid, s. 220-229, Volume: 9, Issue: 1, Jan. 2018
9. Pecenek Z. K., Disfani V. R., Reno M. J., Kleissl J.: Multiphase Distribution Feeder Reduction, IEEE Transactions on Power Systems, s. 1320-1328, Volume: 33, Issue: 2, March 2018
10. Gietz M., Rogowski T.: CGMES as an Interface for Multilateral Grid Modelling Data Exchange, International Conference Modern Electric Power Systems, Wrzesień 2019

ESTIMATION OF VOLTAGE IN DISTRIBUTION NETWORKS USING A SIMULATION ENVIRONMENT

The article contains a comparison of real measurements and simulation results of a distribution system at medium voltage with a resolution of 10-minutes. The cooperation of the measuring system and the simulation environment allowed to obtain a synergy effect by simplifying the model and at the same time increasing the accuracy of estimation. It was proposed to use a simulation environment to estimate the impact of renewable energy power plants on the distribution network.

Keywords: simulation of distribution system operation, measuring system, propagation of voltage effective values, influence of photovoltaic power plants on the network.