

## OPTYMALNY WYBÓR MIEJSC POMIARU PARAMETRÓW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

Krzysztof PIĄTEK<sup>1</sup>, Mateusz DUTKA<sup>2</sup>, Grzegorz WICZYŃSKI<sup>3</sup>, Tomasz SIOSTRZONEK<sup>4</sup>,  
Krzysztof CHMIELOWIEC<sup>5</sup>

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,  
tel.: 12 617 39 20 e-mail: kpiatek@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,  
tel.: 12 617 39 20 e-mail: mdutka@agh.edu.pl
3. Politechnika Poznańska  
tel.: 61 665 26 39 e-mail: gwicz@man.poznan.pl
4. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,  
tel.: 12 617 48 59 e-mail: tsios@agh.edu.pl
5. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,  
tel.: 12 617 35 93 e-mail: kchmielo@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej coraz częściej realizowane są za pomocą rozproszonych systemów pomiarowych obejmujących wiele mierników zainstalowanych w węzłach sieci dystrybucyjnej. W artykule przedstawiono przegląd trzech metod optymalnego wyboru miejsc przyłączenia analizatorów jakości energii elektrycznej. Przedstawiono również wyniki aplikacji tych metod do fragmentu typowej sieci dystrybucyjnej spotykanej na obszarze miejskim.

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, pomiar parametrów jakości energii elektrycznej, minimalizacja liczby mierników.

### 1. WSTĘP

Jednym z zadań operatora systemu dystrybucyjnego jest kontrola jakości energii elektrycznej (JEE) w miejscu jej dostarczania do odbiorców końcowych. Można to wykonać poprzez doraźne pomiary analizatorami JEE. W celu ciągłego monitorowania parametrów JEE zasadne jest zbudowanie rozproszonego systemu pomiarowego. Taki system opiera się na wykorzystaniu wielu urządzeń pomiarowych (mierników parametrów jakości energii elektrycznej) rozmieszczonych w sieci dystrybucyjnej. Instalowanie miernika w każdym węźle sieci jest jednak niemożliwe, choćby ze względu na koszty infrastruktury pomiarowej. Pojawia się wobec tego zagadnienie wyboru miejsc pomiaru w taki sposób, aby stworzyć użyteczny system pomiarowy JEE bez ponoszenia nadmiernych nakładów finansowych na jego budowę i utrzymanie.

Na podstawie ogólnych zasad powstawania i rozchodzenia się zaburzeń JEE można sformułować kryteria wyboru miejsc istotnych do monitorowania JEE. Miejscami ważnymi dla zachowania poprawnej jakości zasilania w sieci SN są stacje GPZ z transformatorami WN/SN. W następnej kolejności monitoringiem powinny być objęte punkty przyłączenia istotnych odbiorców – co wynika z konieczności kontroli emisji zaburzeń oraz z potrzeby rozstrzygnięcia sporów związanych z ewentualnymi skargami na jakość zasilania. Analizator w punkcie przyłączenia takiego odbiorcy (lub w rozdzielni SN zasilającej takiego odbiorcę) stanowi cenne źródło informacji pomocnych przy rozstrzygnięciu sporów. Jest to

zgodne z rekomendacjami grup roboczych CIGRE (grupa robocza JWG C4.112) i CEER [1-3]. W praktyce wdrożenie tych kryteriów związane byłoby z instalacją analizatorów JEE w każdej rozdzielni WN/SN.

### 2. OPTYMALNY WYBÓR MIEJSC POMIARU

Problem optymalnego wyboru liczby i miejsc pomiaru można podzielić na dwa zagadnienia teoretyczne:

1. zbudowanie modelu matematycznego i sformułowanie zadania optymalizacyjnego,
2. rozwiązanie zadania optymalizacyjnego.

Osiągnięcie optymalnego rozlokowania urządzeń pomiarowych od strony teoretycznej jest problemem teorii badań operacyjnych. Jednak rozwiązanie poprawnie sformułowanego problemu optymalizacyjnego nie jest łatwe ze względu na właściwości systemu dystrybucji energii elektrycznej. Ponadto mogą istnieć pewne praktyczne uwarunkowania, które nie dają się w łatwy sposób przedstawić w postaci analitycznej.

Analiza dostępnej literatury pozwala na wyciągnięcie wniosku, że problem optymalnego rozmieszczenia miejsc pomiaru ma wiele rozwiązań i zależy silnie od założonego celu pomiarów. Jest to problem wtórny w stosunku do bardziej ogólnego, np. problemu estymacji stanu lub wykrycia miejsca zwarcia w sieci.

Pełny przegląd opublikowanych metod wykracza poza ramy tego artykułu. Rozpatrując różne zaburzenia JEE można wskazać, która grupa istniejących metod będzie miała zastosowanie do wyboru optymalnego miejsca pomiaru danego parametru JEE:

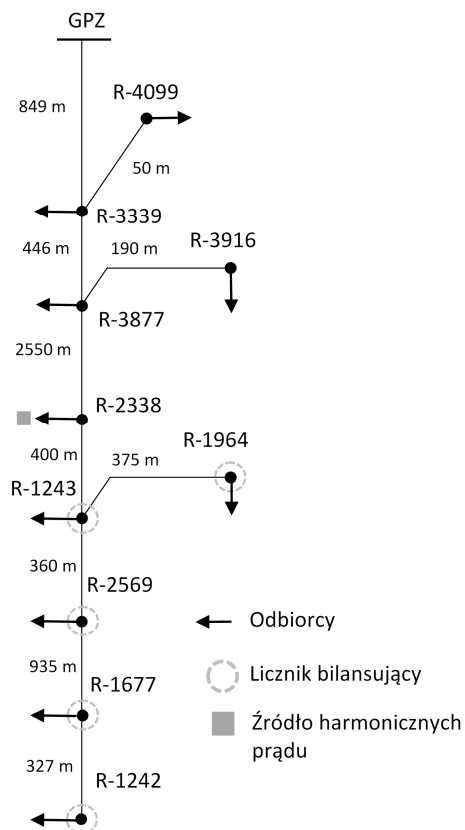
1. analiza wartości skutecznej napięcia i spadków napięć – metody wywodzące się z problemu estymacji stanu systemu (ang. *state estimation*, SE),
2. analiza wahań napięcia – brak dedykowanych metod, jednak problem wahań napięcia można zdefiniować jako problem SE, więc będą miały zastosowanie te same metody,
3. analiza asymetrii napięciowej – brak dedykowanych metod, ten problem również można przedstawić jako problem SE w systemie dystrybucyjnym,

- analiza odkształcenia napięcia i prądu – metody wywodzące się z problemu estymacji stanu harmonicznym,
- analiza zapadów i wzrostów napięcia – istniejące metody wspierają głównie problem detekcji zwarć w sieci, przede wszystkim w systemie przesyłowym.

### 3. ZASTOSOWANIE WYBRANYCH METOD W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

#### Sieć testowa

Wybrane metody przetestowano na fragmencie rzeczywistej sieci dystrybucyjnej OSD, której uproszczony schemat pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat sieci testowej

Schemat ten przedstawia fragment linii kablowej SN zasilający odbiorców na terenie miejskim. Połączenia realizowane są kablami typu YHAKXS o przekrojach 240 mm<sup>2</sup> lub 120 mm<sup>2</sup>. W wyróżnionych okręgami miejscach (stacje SN/nn) zainstalowane są liczniki bilansujące. Dodatkowo w rozpatrywanej sieci zidentyfikowano jedną stację z przyłączonymi odbiornikami, które wywołują przepływ silnie odkształconego prądu.

Ze względu na charakter danych i rodzaj sieci do dalszej analizy wybrano trzy metody.

#### Metoda 1

Metoda Don-Jun Wona i Seung-II Moona [4, 5] łączy wiedzę ekspercką wyrażoną poprzez system wag, z zachowaniem obserwowalności systemu (w sensie zdolności do estymacji stanu). Metodę można łatwo rozszerzać poprzez definiowanie nowych wag w oparciu o kryteria inne niż te podane w oryginalnych pracach. Metoda jest bardzo prosta w stosowaniu i w większości przypadków nie wymaga użycia algorytmu optymalizacji numerycznej.

Sieć przedstawia się w postaci grafu skierowanego, gdzie każdemu węzłowi można przypisać pewną wagę odzwierciedlającą istotność danych pomiarowych w tym miejscu. Przydział wag jest ściśle określony i wynika z:

- praw Kirchhoffa – część prądów może zostać wyznaczona na podstawie pomiarów w innych węzłach,
- połączenia odbiorcy (odbiorców) – stała waga znormalizowana w stosunku do liczby wszystkich odbiorców,
- liczby linii zasilających – waga wynika z liczby innych węzłów zasilanych z tego węzła,
- początku linii – zwiększona waga dla węzłów zasilanych z linii tuż po rozgałęzieniu.

Postępując się kryteriami przydziela się wagi dla każdego węzła sieci. Mierniki powinny być rozlokowane w miejscach o największych wagach. Następnie wprowadza się tzw. indeks wieloznaczności (ang. *ambiguity index*) określający, jak duża część sieci jest nieobserwowalna. Procedura optymalizacji znajduje takie miejsca pomiaru przy zadanej liczbie mierników, aby indeks wieloznaczności był minimalny. Procedura jest iteracyjna i wymaga sukcesywnego rozwiązywania zadania optymalizacyjnego dla zmieniającej się liczby mierników (zwiększanej w każdej iteracji).

#### Metoda 2

Metoda Saxenty, Bhaumika, Singha [6], opisuje wybór miejsc pomiaru ze względu na pomiar wyższych harmonicznym. Pośrednio wspiera metodę umożliwiającą znalezienie odbiorników zaburzających (wskazanie węzła ze źródłem) oraz metodę estymacji stanu harmonicznym. Poprawne wskazanie źródła wymaga pomiaru fazy (tj. wartości zespolonych) napięć wyższych harmonicznym. Dodatkowo, wymagana jest znajomość fazy prądów źródeł energii.

Stosowanie tej metody rozpoczyna się od analizy obserwowalności, a następnie minimalizuje się liczbę miejsc pomiaru. Metoda składa się z dwóch etapów:

- Procedura iteracyjna zwana indeksowaniem (ang. *index method*), w której wybiera się węzły dające maksymalną obserwowalność systemu. Ten krok ma na celu zmniejszenie liczby węzłów do sprawdzenia w następnym etapie.
- Przeprowadzenie procedury optymalizacji, w której minimalizuje się liczbę miejsc pomiaru oraz tzw. liczbę pomiarów nadmiarowych zachowując obserwowalność systemu.

W [6] założono, że problem jest sekwencyjny tzn. optimum dla całego systemu zawiera się w zbiorze węzłów znalezionych w etapie 1. Proces optymalizacji w etapie 2 nie usuwa żadnych węzłów, ani nie dodaje węzłów spoza zbioru znalezionego w etapie 1. Dzięki temu procedura optymalizacji przebiega szybciej. Ponieważ gwarantowana jest całkowita obserwowalność, można określić wartości napięć i prądów także w węzłach nie objętych pomiarem. Dzięki temu można wyznaczyć m.in. emisję harmonicznym przez odbiorniki (które w tej metodzie definiowane są jako źródła prądowe).

#### Metoda 3

Metoda Almeidy i Kagana [7, 8] jest dedykowana dla pomiaru wyższych harmonicznym, jednak jej zastosowanie może być szersze. Metoda zapewnia obserwowalność systemu (w sensie estymacji stanu harmonicznym) poprzez analizę topologii połączeń między węzłami.

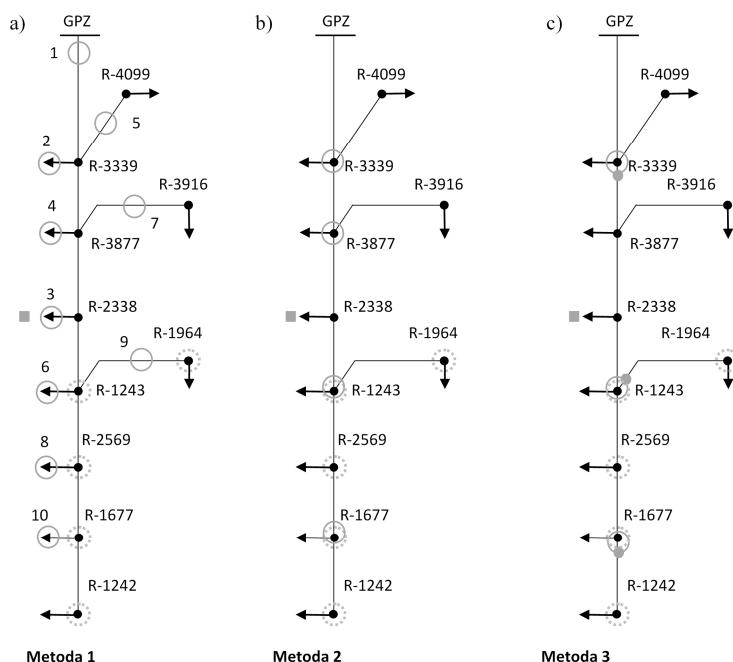
W tej metodzie miernik wykonuje pomiar napięcia i prądu wybranej wyższej harmonicznej. Napięcie mierzone jest we wskazanym węźle natomiast prąd jest prądem jednej z linii wychodzącej z tego węzła. Analizie podlega topologia połączeń między węzłami. Tworzy się dwa wektory: wektor obserwowalności wstępnej (ang. *pre-observability vector*) oraz skorygowany wektor obserwowalności (ang. *fixed observability vector*). Wektory te niosą informację o możliwości wyznaczenia napięć i prądów w miejscach, w których nie ma zainstalowanego miernika.

Problem optymalizacyjny definiowany jest jako minimalizacja kosztu systemu pomiarowego przy zachowaniu obserwowalności. Tak zdefiniowany problem optymalizacji można rozwiązać korzystając z klasycznego algorytmu programowania całkowitoliczbowego [7, 8], lub z algorytmów genetycznych [7].

zostać monitorowany. W przypadku odbiorów oznacza to pomiar prądu odpływu i napięcia na szynach transformatora SN/nn. W przypadku monitorowania linii pomiar powinien obejmować napięcie węzła, z którego ta linia jest zasilana oraz prądu tej linii. Liczby oznaczają pozycję w hierarchii. Całkowita obserwowalność uzyskiwana jest przez zastosowanie 10 mierników.

Metodę można rozszerzyć o mierniki preinstalowane (np. istniejące liczniki bilansujące). Dzięki wprowadzeniu wag możliwe jest wprowadzenie etapów do budowy dużego systemu pomiarowego. Część systemu będzie wtedy nieobserwowalna do czasu kolejnego etapu rozmieszczania mierników.

Wyniki aplikacji metody nr 2 pokazano na rysunku 2b. Optymalne rozwiązanie znajdujące jest w pierwszym etapie obliczeń i nie ma konieczności przeprowadzenia



Rys. 2. Wyniki zastosowania wybranych metod do sieci testowej

Wybór miejsc pomiaru zgodnie z tą metodą umożliwia również wyznaczenie niemierzonych wartości napięć lub prądów wyższych harmonicznych.

Opis metody nie określa jednoznacznie czy mierzona powinna być wartość skuteczna rzeczywista czy zespolona tj. czy konieczna jest informacja o przesunięciu fazowym wskazań napięcia. Nie ma to znaczenia dla aplikacji samej metody w celu optymalnego wyboru miejsc pomiaru.

### Wyniki zastosowania metod

Metoda nr 1 każdemu elementowi w sieci przydziela wagę liczbową określającą jak istotny jest ten element z punktu widzenia pomiaru parametrów JEE. Dzięki temu powstaje hierarchia elementów, w której elementy najbardziej istotne mają największą wagę i te elementy powinny być w pierwszej kolejności objęte pomiarem. Indeks wieloznaczności pozwala na określenie, jaka część sieci pozostaje nieobserwowalna przy wybranych miejscach pomiaru. Rysunek 2a przedstawia schemat sieci z zaznaczonymi miejscami pomiaru wskazanymi przez metodę nr 1. Szary okrąg oznacza element, który powinien

optymalizacji numerycznej. Metoda wskazuje 4 węzły, w których należy prowadzić pomiar fazorów napięć. W całkowitej liczbie mierników należy uwzględnić jeszcze pomiar prądów odbiornika. Zakładając, że istniejące liczniki bilansujące mogą być wykorzystane do tego rodzaju pomiaru, oznacza to instalację dodatkowych 5 mierników. Sumarycznie system wymagałby instalacji 9 mierników.

W metodzie nr 3 zakłada się, że miernik dokonuje pomiaru napięcia w jednym węźle oraz prądu jednej linii. Możliwe kombinacje podłączenia miernika wynikają z liczby linii dochodzących do danego węzła. Dla sieci testowej otrzymujemy 20 możliwych miejsc podłączenia.

Metoda wymaga wykorzystania procedury optymalizacji numerycznej. Optymalizację wykonano wykorzystując dwa algorytmy: sprawdzenie wszystkich możliwości (ang. *complete enumeration*, CE) oraz algorytm genetyczny (ang. *genetic algorithm*, GA). Całkowitą obserwowalność sieci realizują 3 mierniki mogące być połączone w sumie na 16 różnych sposobów. Jedno z rozwiązań (znalezione zarówno przez GA jak i przez CE) przedstawione jest na rysunku 2c. Okręgami oznaczono

węzły, których napięcia powinno się mierzyć, natomiast małymi szarymi kołami zaznaczono linie, których prąd powinien być mierzony. Metoda nie bierze pod uwagę monitorowania odbiorników. Zakłada się, że wartości prądów odbiornika (lub mocy) są znane. Wynika to z pierwotnego przeznaczenia metody – wspiera problem estymacji stanu harmonicznym w systemie przesyłowym.

#### 4. WNIOSKI

Istniejące i opisane w literaturze metody optymalnego wyboru miejsc pomiaru mogą być zastosowane do wyboru miejsca pomiaru parametrów JEE. Przegląd dostępnych metod wskazuje jednak, że ich zastosowanie nie jest łatwe. Żadna z nich nie daje się w sposób prosty uogólnić na przypadek pomiaru parametrów JEE.

Istniejące metody powstały w celu rozwiązania innego problemu niż pomiar parametrów JEE. W niektórych przypadkach wspierany jest jeden z problemów JEE jak np. problem znalezienia źródła harmonicznym (metoda nr 2) lub estymacji stanu harmonicznym (metoda nr 3). Jedynie metoda nr 1 Wona i Moona została stworzona z myślą o monitorowaniu parametrów JEE, jednak bez wskazania, który z nich można dzięki temu uzyskać.

Istotnymi ograniczeniami mogą też być względy praktyczne, np. organizacyjne lub logistyczne. Takie ograniczenia nie są zwykle brane pod uwagę na etapie stosowania danej metody – metody analityczne zwykle abstrahują od ograniczeń praktycznych. Można zauważyć, że inne będą wymagania odnośnie metody praktycznej, a inne odnośnie metody analitycznej. W pierwszym przypadku poszukiwane rozwiązanie problemu powinno dać się zastosować w sytuacji ograniczeń, jakie występują w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej. W drugim przypadku rozwiązanie powinno spełniać wymogi formalizmu definiowanego w ramach samej metody.

Tam, gdzie sieć ma prostą strukturę (np. zawierającą jeden ciąg z ewentualnymi krótkimi odgałęzieniami bocznymi) można skupić się na pomiarze odbiorów, rozpoczynając od tych o największej wrażliwości na zaburzenia JEE (potwierdzonej np. reklamacjami konsumentów), lub wprowadzających zaburzenia. W dalszej kolejności pomiarem można objąć pozostałych odbiorców, kierując się całkowitą mocą w punkcie przyłączenia lub liczbą odbiorców indywidualnych.

Tam, gdzie sieć ma złożoną strukturę drzewiastą należy skorzystać z jednej z metod optymalizacji. Mając na uwadze właściwości metody Wona i Moona (metoda nr 1) można ją rekomendować wprost do planowania instalacji mierników JEE. Metoda ta może być wykorzystana do określenia, który z elementów systemu powinien być monitorowany w pierwszej kolejności. Należy jednak wziąć pod uwagę, że

całkowita obserwowalność systemu (indeks wieloznaczności równy zero) osiągnięta jest kosztem instalacji względnie dużej liczby mierników. Dla elementów położonych blisko głównego punktu zasilania (stacji GPZ) metoda preferuje monitorowanie prądu linii odgałęzień bocznych zamiast odbiorów.

Prace prowadzone były w ramach projektu „System oceny propagacji i poprawy parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych – SOPJEE”, realizowanego w ramach Programu Badawczego Sektora Elektroenergetycznego „PBSE” nr POIR.01.02.00-00-0203/16-00.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Kilter J.: Guidelines for Power Quality Monitoring - Results from CIGRE/CIREN JWG C4.112, 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Bucharest, 2014.
2. Bollen M., Milanović J.V., Čukalewski N.: CIGRE/CIREN JWG C4.112 – Power Quality Monitoring, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba, Spain, 2014.
3. Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes, Council of European Energy Regulator, 2012.
4. Won D.-J., Moon S.-I.: Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology, IEEE Transaction on Power Delivery, Nr 1 (23), 2008.
5. Xie Z., Yu Z., Weng G., Wang Q.: Research on allocation optimization for power quality monitors in smart distribution grid, Proc. Int. Conf. Power System Technology, Chengdu, China, 2014.
6. Saxena D., Bhaumik S., Singh S. N.: Identification of Multiple Harmonic Sources in Power System Using Optimally Placed Voltage Measurement Devices, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Nr 5 (61), 2014, str. 2483-2492.
7. Almeida C. F. M., Kagan N.: Harmonic state estimation through optimal monitoring systems, IEEE Transactions on Smart Grid, Nr 1 (4) 2013, str. 467-478.
8. Almeida C. F. M., Kagan N., Souza T. P., Matsuo N. M., Duarte S. X., Neto A. B., Suematsu A. K.: Locating power quality meters in order to perform harmonic state estimation, Proc. IEEE 15th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012.

### OPTIMAL SELECTION OF MEASUREMENT LOCATIONS FOR POWER QUALITY METERING

Measurement of power quality parameters are increasingly carried out using metering system comprising a large number of meters installed in distribution network nodes. From the existing methods for the optimal selection of measurement points, three methods were selected. The results of application to a fragment of a typical distribution network in urban area is also presented. The conclusion is that the selected methods can be useful in selection of measurement locations when distributed power quality metering system is considered. Method no 1 (Won's and Moon's method) can be directly used for that purpose bearing in mind its characteristic: that the method ensures full observability of the system by using quite large number of meters.

**Keywords:** power quality, measurement of power quality parameters, minimisation of the number of meters.