

## WYZNACZANIE PARAMETRÓW MODELU LINII PRZESYŁOWEJ NA PODSTAWIE WSKAZAŃ DWÓCH SYNCHROFAZORÓW – REFERAT KONFERENCYJNY

Artur PASIERBEK

1. Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska  
tel: +48 32 237 18 44 fax: +48 32 237 19 29 e-mail: artur.pasierbek@polsl.pl

**Streszczenie:** W publikacji Autor zaprezentował autorską metodę wyznaczania parametrów modelu linii elektroenergetycznej na podstawie wskazań dwóch urządzeń PMU (phasor measurement unit). Zaproponował użycie trójfazowego modelu pojedynczego elementu SEE (system elektroenergetyczny), jako rozwinięcie powszechnie stosowanego w obliczeniach rozplywu mocy modelu jednofazowego. W modelu uwzględniono, niezależnie dla każdej fazy, takie elementy jak: admitancje poprzeczne własne i wzajemne (poprzeczne) oraz admitancje podłużne.

**Słowa kluczowe:** wyznaczanie parametrów modelu linii elektroenergetycznej, zastosowanie PMU, trójfazowy model linii elektroenergetycznej.

### 1. WSTĘP

Obserwowany w ostatnich latach ciągły i szybki rozwój technologii budowy urządzeń elektronicznych (zwiększenie ich funkcjonalności oraz obniżanie kosztów produkcji), w tym również elektronicznej aparatury pomiarowej, stwarza nowe możliwości pozyskiwania informacji o otaczającym nas świecie. W konsekwencji prowadzi to do udoskonalania istniejących lub tworzenia nowych modeli opisujących rzeczywistość. Dla elektryka jednym z podstawowych pojęć jest obwód elektryczny. Podstawowym celem analizy obwodu elektrycznego jest poszerzenie obszaru wiedzy na temat zjawisk w nim zachodzących. Analiza obwodu może obejmować badanie stanów ustalonych oraz nieustalonych i dotyczyć rozplywu prądów, rozkładu napięć, rozplywu mocy i wielu innych. Badania mogą również dotyczyć estymacji parametrów modelu opisującego wybrane zjawisko fizyczne.

Szczególnym przypadkiem obwodu elektrycznego jest linia elektroenergetyczna. Jest to główny element składowy systemu elektroenergetycznego przeznaczonego do przesyłu (nierzadko na bardzo duże odległości) energii elektrycznej. Prawidłowe funkcjonowanie linii elektroenergetycznej wymaga ciągłego monitorowania jej stanu. Jest to realizowane przez zainstalowaną w systemie aparaturę kontrolno-pomiarową oraz systemy automatyki zabezpieczeniowej. Od roku 1992 pod kierownictwem profesora G. Phadke prowadzone były prace nad nowym urządzeniem zwiększającym możliwości stosowanej wówczas aparatury kontrolno-pomiarowej. W efekcie prac opracowano PMU [1] (phasor measurement unit), czyli urządzenie elektroniczne dostarczające informacji na temat fazorów napięć i prądów wraz z infor-

macją o czasie, w którym miał miejsce pomiar tych wielkości. Nowe możliwości oferowane przez PMU [2] zachęcają do inwestowania w to rozwiązanie, jednakże niezbędne duże nakłady finansowe wynikające z liczby koniecznych do zainstalowania urządzeń oraz ceny pojedynczego urządzenia sprawiają, że proces wdrażania napotyka na trudności. Jest to sytuacja typowa, gdyż bardzo często, gdy na rynek wprowadzane jest nowe rozwiązanie techniczne, względy finansowe spowalniają proces jego upowszechnienia. Mimo to można z dużym prawdopodobieństwem założyć, że w przyszłości wszystkie kluczowe elementy systemu zostaną wyposażone w urządzenia PMU. To z kolei prowadzi do wniosku, że warto prowadzić badania w celu zwiększenia efektywności wykorzystania dostępnych urządzeń. Jednym z możliwych sposobów osiągnięcia tego celu jest zastosowanie PMU do wyznaczania parametrów linii elektroenergetycznej, używanych następnie na przykład w procesie optymalizacji rozplywu mocy w systemie elektroenergetycznym i innych pokrewnych zagadnieniach.

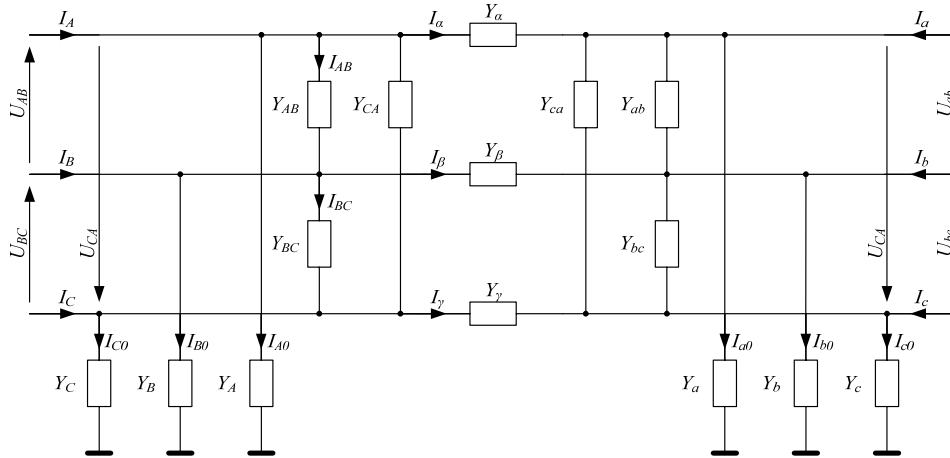
### 2. MODEL LINII

W zależności od przeznaczenia, linia elektroenergetyczna może zostać zamodelowana na wiele sposobów. Reprezentacja rzeczywistej linii elektroenergetycznej za pomocą schematu zastępczego pociąga za sobą konieczność stosowania uproszczeń. Przykładowo, do obliczeń rozplywu mocy (także optymalizacji rozplywu) powszechnie stosuje się model typu  $\Pi$  zakładający pełną symetrię wszystkich faz [3]. Takie podejście znacznie upraszcza obliczenia, gdyż układ trójfazowy zostaje zredukowany do układu jednofazowego. Założenie pełnej symetrii podyktowane względami praktycznymi nie pozwala na uwzględnienie rzeczywistej asymetrii linii, której główną przyczyną jest pojemność linii, silnie uzależniona od sposobu ułożenia przewodów względem siebie oraz ziemi.

W pracy rozpatrywany jest model sieci trójfazowej (rysunek 1) z elementami liniowymi w stanie ustalonym. Takie założenie eliminuje potrzebę stosowania równań różniczkowych i prowadzi do opisu za pomocą układu równań algebraicznych, odzwierciedlających związki pomiędzy prądami i napięciami w poszczególnych elementach sieci zgodnie z prawami Kirchhoffa i Ohma. Autor zaproponował użycie

modelu uwzględniającego admitancje własne i wzajemne (poprzeczne) oraz admitancje wzdłużne. Admitancje poprzeczne można interpretować jako elementy, na których powstają straty mocy wynikające z podłączenia linii do źródła napięcia. Straty te nie zależą od obciążenia, a jedynie od konfiguracji linii oraz warunków pogodowych (zjawisko

ulotu). Admitancja podłużna symbolizuje straty mocy wynikające z przepływu prądu (przesyłu mocy). Straty te zależą od wartości skutecznej prądu. Przepływ prądu powoduje ponadto nagrzewanie przewodów, co w upalne dni może doprowadzić do zmniejszenia przepustowości linii oraz niekorzystnie zwiększa zwis przewodów.



Rys. 1. Schemat ilustrujący rozpatrywany w publikacji model trójfazowej linii elektroenergetycznej

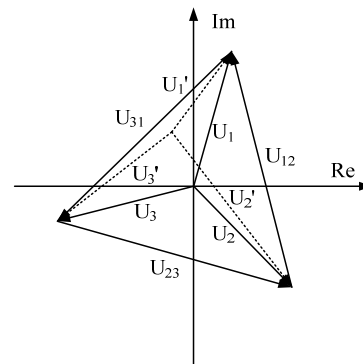
### 3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Na podstawie zaproponowanego modelu linii można zapisać następujące równania wynikające z I prawa Kirchhoffa.

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_{A0} + I_{AB} - I_{AC} + I_\alpha \\
 I_B &= I_{B0} + I_{BC} - I_{AB} + I_\beta \\
 I_C &= I_{C0} + I_{CA} - I_{BC} + I_\gamma \\
 I_a &= I_{a0} + I_{ab} - I_{ac} - I_\alpha \\
 I_b &= I_{b0} + I_{bc} - I_{ab} - I_\beta \\
 I_c &= I_{c0} + I_{ca} - I_{bc} - I_\gamma
 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $I_A, I_B, I_C$  – prądy fazowe w węzle początkowym linii,  $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$  – prądy fazowe w węzle końcowym linii,  $I_{A0}, I_{B0}, I_{C0}$  – doziemne składowe prądów fazowych w węzle początkowym linii,  $I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}$  – doziemne składowe prądów fazowych w węzle końcowym linii,  $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$  – prądy międzyfazowe w węzle początkowym linii,  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  – prądy międzyfazowe w węzle końcowym linii,  $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$  – prądy fazowe przepływające z węzła początkowego do końcowego.

Dokonując analizy układu równań (1) można dojść do wniosku, że wyznaczenie wszystkich admitancji wymaga znajomości prądów i napięć międzyfazowych oraz potencjałów wszystkich przewodów fazowych względem ziemi. Niestety, na podstawie wskazań synchrofazorów można określić prądy fazowe oraz napięcia międzyfazowe, brak jest natomiast możliwości wyznaczenia potencjałów przewodów względem ziemi. W efekcie podczas próby wyznaczenia admitancji ( $Y_A, Y_B, Y_C, Y_a, Y_b, Y_c$ ) powstaje problem spowodowany istnieniem nieskończenie wielu zbiorów napięć fazowych (potencjałów), które po złożeniu dają zadane napięcia międzyfazowe (rysunek 2).



Rys. 2. Przykładowe dwa różne zestawy napięć fazowych, z których uzyskujemy ten sam zestaw napięć międzyfazowych.

Uzyskanie rozwiązania wymaga dodatkowego założenia dotyczącego zależności pomiędzy admitancjami poprzecznymi (doziemnymi) na obu końcach linii. Ze względów praktycznych dla linii elektroenergetycznej uzasadnione jest przyjęcie następujących założeń:

$$\begin{aligned}
 Y_A &= Y_a, \\
 Y_B &= Y_b, \\
 Y_C &= Y_c,
 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $Y_A, Y_B, Y_C$  – admitancje poprzeczne w węzle początkowym linii,  $Y_a, Y_b, Y_c$  – admitancje poprzeczne w węzle końcowym linii.

Kolejny problem utrudniający rozwiązanie występuje podczas próby wyznaczenia na podstawie wskazań dwóch synchrofazorów admitancji podłużnych ( $Y_\alpha, Y_\beta, Y_\gamma$ ), z tym, że dodatkowym utrudnieniem jest użycie danych pomiarowych wielkości elektrycznych z dwóch synchrofazorów zainstalowanych na końcach linii, gdy pomiary wykonane zostały w różnym czasie. Występująca różnica musi zostać skompensowana (można posłużyć się znacznikami czasu obu zesta-

wów danych) tak, aby pomiary odnosiły się do tej samej chwili czasu. Jeżeli czynność ta nie zostanie wykonana lub zostanie wykonana nieprawidłowo, uzyskane wyniki będą niepoprawne.

Uwzględniając zależności (1) i 2 oraz fakt, iż do rozwiązania zostaną zastosowane metody komputerowe (metody numeryczne), wygodnie jest posługiwać się postacią macierzową równania opisującego przedstawiony problem (3).

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A & 0 & 0 & V_A - V_B & 0 & V_A - V_C & V_A - V_a & 0 & 0 \\ 0 & V_B & 0 & V_B - V_A & V_B - V_C & 0 & 0 & V_B - V_b & 0 \\ 0 & 0 & V_C & 0 & V_C - V_B & V_C - V_A & 0 & 0 & V_C - V_c \\ V_a & 0 & 0 & V_a - V_b & 0 & V_a - V_c & V_a - V_A & 0 & 0 \\ 0 & V_b & 0 & V_b - V_a & V_b - V_c & 0 & 0 & V_b - V_B & 0 \\ 0 & 0 & V_c & 0 & V_c - V_b & V_c - V_a & 0 & 0 & V_c - V_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_A \\ Y_B \\ Y_C \\ Y_{AB} \\ Y_{BC} \\ Y_{CA} \\ Y_\alpha \\ Y_\beta \\ Y_\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

Analizując wzór (3) można dostrzec jeszcze jedną jego właściwość utrudniającą uzyskanie jednoznacznego rozwiązania. Chodzi o to, iż jest to układ niedookreślony, co oznacza, że ma nieskończenie wiele rozwiązań. W celu wyeliminowania niejednoznaczności rozwiązań założono, iż poszukiwany jest taki przypadek, w którym zachodzi pełna symetria napięć fazowych.

#### 4. ALGORYTM

Konstrukcja algorytmu zaproponowanego przez autora jest następująca:

- Krok 0. Uruchom moduł pomiaru czasu.
- Krok 1. Zainicjalizuj wektor I wartościami prądów fazowych (wzór 2).
- Krok 2. Oblicz napięcia fazowe dla obu końców linii.
- Krok 3. Zainicjalizuj macierz V (wzór 2) wartościami obliczonymi w poprzednim kroku.
- Krok 4. Rozwiąż równanie 2 (można zastosować dowolną metodę rozwiązywania niedookreślonego układu równań algebraicznych).
- Krok 5. Zakończ pomiar czasu.
- Krok 6. Porównaj wyniki z wartościami zadanymi.

Podstawową zaletą algorytmu jest brak szczególnych wymagań dotyczących punktu startowego. Autor nie przeprowadził matematycznego dowodu zbieżności zaprezentowanego algorytmu, jednak dla wszystkich przypadków testowych udało się uzyskać poprawny wynik.

#### 5. EKSPERYMENT NUMERYCZNY

W ramach badań stworzone zostało autorskie oprogramowanie wykorzystujące fragment biblioteki obliczeń macierzowych oraz algorytm najmniejszych kwadratów [4]. Do sprawdzenia koncepcji przygotowano kilka zestawów testowych. Parametry użytych w badaniach zestawów pomiarowych przedstawiono w tabelcy 1.

Obliczenia zostały przeprowadzone na komputerze wyposażonym w mikroprocesor Intel Core i7-860 2,8 GHz pod kontrolą 64-bitowego systemu operacyjnego Windows 7. Zastosowano kompilator zintegrowany ze środowiskiem Microsoft Visual Studio 2008.

Tabela 1. Wartości prądów i napięć zestawów testowych

Parametr	1	2	3	4	5	6	Wymiar
$U_{AB}$	1	1	1	1	1	1	V
$\varphi_{AB}$	0	0	0	0	0	0	°
$U_{BC}$	1	1	1,1	1,1	1	1,1	V
$\varphi_{BC}$	120	120	90	90	120	90	°
$U_{CA}$	1	1	0,9	0,9	1	0,9	V
$\varphi_{CA}$	-120	-120	-120	-120	-120	-120	°
$U_{ab}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	V
$\varphi_{ab}$	30	30	30	30	30	30	°
$U_{bc}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	V
$\varphi_{bc}$	150	150	150	150	150	135	°
$U_{ca}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	V
$\varphi_{ca}$	-90	-90	-90	-90	-90	-85	°
$I_A$	1	1	1	1	1	1	A
$\varphi_A$	0	0	0	0	0	0	°
$I_B$	1	1	1	1	1	1	A
$\varphi_B$	120	120	120	120	120	120	°
$I_C$	1	0,9	1	0,9	0,9	0,9	A
$\varphi_C$	-120	-90	-120	-90	-90	-90	°
$I_a$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	A
$\varphi_a$	0	0	0	0	0	0	°
$I_b$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	A
$\varphi_b$	120	120	120	120	90	90	°
$I_c$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	A
$\varphi_c$	-120	-120	-120	-120	-90	-90	°

Uzyskane wyniki zebrano i przedstawiono w formie tabelarycznej (tablica 2), a następnie poddano weryfikacji, która składała się z dwóch etapów:

- automatyczne sprawdzenie normy wyrażenia  $\|VY - I\|$ ,
- porównanie uzyskanych wyników obliczeń admittancji modelu linii trójfazowej z wartościami założonymi w trakcie tworzenia zestawów testowych.

Tablica 2. Wyniki obliczeń

Parametr	Zestaw						Jednostka
	1	2	3	4	5	6	
Liczba iteracji	13	10	11	14	11	12	—
Czas obliczeń	0,35	0,32	0,33	0,37	0,33	0,34	ms
Max. błąd względny	0,1	0,5	0,6	0,2	0,2	0,3	%

Zestaw 1 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy pełnej symetrii prądów fazowych i napięć międzyfazowych występującej na obu końcach linii.

Zestaw 2 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy asymetrii prądów fazowych występującej na jednym końcu linii. Pozostałe parametry zachowują pełną symetrię.

Zestaw 3 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy asymetrii napięć międzyfazowych występującej na jednym końcu linii. Pozostałe parametry zachowują pełną symetrię.

Zestaw 4 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy asymetrii prądów fazowych i napięć międzyfazowych występującej na jednym końcu linii. Na drugim końcu linii została zachowana pełna symetria.

Zestaw 5 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy asymetrii prądów fazowych na obu końcach linii. Napięcia międzyfazowe na obu końcach linii zachowują pełną symetrię.

Zestaw 6 przygotowano w celu przetestowania zachowania się algorytmu przy asymetrii prądów fazowych i napięć międzyfazowych występujących na obu końcach linii.

Zaprezentowane w tabeli 2 wartości wymuszeń dla poszczególnych zestawów testowych zostały przyjęte arbitralnie. Zaprezentowane dane prezentują tylko niewielką część przeprowadzonych przez Autora testów stworzonego przez niego oprogramowania komputerowego i opracowanego algorytmu.

## 6. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono, że zaproponowany algorytm wyznaczania paramet-

trów liniowego modelu linii elektroenergetycznej działa prawidłowo. Wszystkie testowane przypadki wykazywały brak wrażliwości na wartości parametrów procesu iteracyjnego.

Prawidłowe działanie algorytmu wymaga założenia, że admitancja poprzeczna na końcu i na początku linii (niezależnie dla każdej fazy) ma taką samą wartość. Nie jest wymagana symetria admitancji podłużnych i poprzecznych dla wszystkich faz.

Etap obliczeń polegający na wyznaczeniu napięć fazowych (na podstawie napięć międzyfazowych) wymaga założenia, że rozwiązanie będzie spełniało warunki symetrii tych napięć.

W przypadku, gdy na obu końcach linii zainstalowane są synchronofazory, wyznaczenie parametrów jej modelu zaproponowaną metodą nie wymaga dodatkowych nakładów finansowych.

Czas dostarczenia wyników pomiarowych nie wpływa na poprawność i dokładność obliczeń, co pozwala na wykorzystanie do transmisji danych wejściowych istniejącej sieci Internet.

Wyznaczenie parametrów i ich aktualizacja w miarę zmian warunków atmosferycznych i obciążenia linii pozwoli w sposób wiarygodny przeprowadzać symulacje różnych stanów pracy systemu. Może pozwolić na bardziej efektywne wykorzystanie zasobów oferowanych przez linie przesyłowe.

Opracowany algorytm postępowania oraz przeprowadzony eksperyment numeryczny to etap poprzedzający obliczenia dla danych pozyskanych z zainstalowanych w systemie synchronofazorów.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. C37.118-2005 IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Explore 2006.
2. Habibi-Ashrafi F., Johnson A. P., Vo S., Catanese D.: Phasors Point the Way, Transmission & Distribution World, January 2011.
3. Kremens Z., Sobierajski M.: „Analiza systemów elektroenergetycznych”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
4. Baron B. Pasierbek A. Maciążek M.: „Algorytmy numeryczne w Delhi – Księga eksperta”. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2006.

## ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE MODEL OF A POWER LINE BY MEANS OF USING A PAIR OF PHASOR MEASUREMENT UNITS – CONFERENCE PAPER

**Key-words:** estimating the parameters of the model of a power line, application of phasor measurement units, a three-phase model of a power line.

The paper describes a method for estimating the parameters of the model of a power line by means of using a pair of phasor measurement units, developed by the Author. It describes a three-phase model of a power system element, a derivative of the single-phase model commonly used in power flow estimation applications. The model being proposed describes – independently for each phase – parameters such as shunt self-admittance, shunt trans-admittance and series admittance.

By using measurements obtained from a pair on phasor measurement units installed on both ends of a power line, all parameters of the model being described can be estimate.