Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów

doi:10.15199/48.2022.12.10

Zakres i metodyka pomiarów parametrów schematu zastępczego linii napowietrznych

Streszczenie. Dokładność odwzorowania elementów sieci przesyłowej w postaci schematów zastępczych ma istotne znaczenie w ujęciu pracy systemu elektroenergetycznego. W artykule omówiono metodykę wyznaczania modelu matematycznego linii napowietrznej. Następnie przeprowadzono ocenę wyników pomiarów parametrów wzdłużnych linii napowietrznej prądu przemiennego 50 Hz w odniesieniu do parametrów wyznaczonych analitycznie.

Abstract. The precision of mapping the elements of the transmission network in the form of equivalent schemes is important in terms of the operation of the power system. The article discusses the methodology for determining the mathematical model of the overhead line. The evaluation of the measurement results of the series parameters of the 50 Hz alternating current overhead lines was carried out in relation to the parameters determined analytically. (The scope and methodology of measurements of parameters of the equivalent scheme of overhead lines).

Słowa kluczowe: macierz admitancyjna, schemat zastępczy, linia napowietrzna, parametry wzdłużne. **Keywords**: admittance matrix, equivalent scheme, overhead line, series parameters.

Wprowadzenie

Znajomość wartości parametrów schematu zastępczego linii napowietrznej jest konieczna dla prowadzenia poprawnej eksploatacji systemu elektroenergetycznego oraz na potrzeby analiz obliczeniowych i symulacyjnych wymaganych z punktu widzenia bieżącej pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, jak również analiz uwzględniających plany rozwojowe infrastruktury wytwórczej i przesyłowej. Przeprowadzone dotychczas analizy pozwoliły na opracowanie metodyki obliczania impedancji własnej wzajemnej i obwodów ziemnopowrotnych złożonych z przewodu napowietrznego oraz ziemi jako drogi powrotnej prądu [1]. Parametry elektryczne linii napowietrznych mogą również zostać wyznaczone w sposób pomiarowy.

Model matematyczny linii napowietrznej stanowią macierze admitancyjne parametrów wzdłużnych i poprzecznych dla wielkości fazowych i składowych symetrycznych. Pełny model matematyczny uwzględnia elementy i zjawiska obejmujące:

- oddziaływanie przewodów odgromowych,
- występowanie przewodów wiązkowych oraz
- zróżnicowanie poziomów napięć znamionowych torów prądowych linii.

Sposób wyznaczania parametrów modelu metodą analityczną

Parametry modelu wyznacza się w oparciu o teorię obwodów ziemnopowrotnych (parametry wzdłużne) oraz metodę odbić zwierciadlanych (parametry poprzeczne).

Linię napowietrzną tworzy 3n przewodów fazowych, gdzie n – liczba torów prądowych linii napowietrznej oraz g przewodów odgromowych. Każdy z przewodów fazowych może stanowić m-przewodową wiązkę, co przede wszystkim zapewnia zmniejszenie natężenia pola elektrycznego wokół przewodu, a w efekcie pozwala na ograniczenie powstawania zjawiska ulotu i wynikającego z niego strat mocy czynnej w linii.

Zależności na impedancje własne (1) i wzajemne (2) obwodów ziemnopowrotnych dla częstotliwości sieciowej 50 Hz przyjmują następującą postać [1, 2]:

(1)
$$\underline{Z}_{kk} \approx l \cdot \left(R_k' + 0.049 + j0.0628 \ln \frac{\delta}{r_{0k}} \right)$$

(2)
$$\underline{Z}_{kp} \approx l \cdot \left(0,049 + j0,0628 \ln \frac{\delta}{d_{kp}}\right)$$

gdzie: k, p – przewody linii napowietrznej, $k, p \in \{1, ..., N\};$ N – liczba przewodów napowietrznych, l – długość linii w km; R_k ' – rezystancja jednostkowa przewodu kw temperaturze 20°C w Ω /km, δ – wielkość interpretowana jako odległość rozważanego przewodu napowietrznego od fikcyjnego przewodu znajdującego się w ziemi w m, ρ – rezystywność gruntu w Ω ·m, r_{0k} = 0,816 r_k dla linek stalowo-aluminiowych, r_{0k} = 0,78 r_k dla przewodów jednodrutowych, gdzie r_k – promień przewodu k.



Rys.1. Wybrane parametry geometryczne dwutorowej linii napowietrznej

Susceptancję linii wyznacza się w oparciu o potencjałowe współczynniki Maxwella [3] zgodnie z (3) – parametr własny i (4) – parametr wzajemny:

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 l} \ln \frac{2h_k}{r_k} ,$$

(4)
$$P_{kp} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 l} \ln \frac{d_{kp'}}{d_{kp}},$$

gdzie: ε_0 – przenikalność elektryczna próżni.

W celu redukcji rozmiaru modelu dokonuje się agregacji *m*-przewodowych wiązek stanowiących przewody fazowe w przewody zastępcze. W efekcie otrzymuje się nowe zależności pozwalające na wyznaczenie impedancji własnych (5) oraz potencjałowych współczynników Maxwella własnych (6) przewodów fazowych:

(5)
$$\underline{Z}'_{Wzast} \approx \frac{1}{m} R_k' + 0,049 + j0,0628 \ln \frac{\delta}{\sqrt[m]{r_0 \overline{D}^{m-1}}},$$
(6)
$$P'_{Wzast} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sqrt[m]{\frac{2\overline{h}}{r} \left(\frac{\overline{H}}{\overline{D}}\right)^{m-1}},$$

gdzie: \overline{H} – średnia odległość przewodu wiązkowego od jego odbicia lustrzanego, \overline{D} – średnia odległość między przewodami w wiązce zgodnie z (7):

(7)
$$\overline{D} = \frac{m(m-1)}{2} \sqrt{\prod_{\substack{k=1, \ p>2\\p > k}}^{m} d_{kp}} .$$

Zastosowanie poprawki wpływającej na wartości impedancji obwodów ziemnopowrotnych ujmującej wpływ oddziaływania przewodów odgromowych dokonuje się następująco:

(8)
$$\mathbf{Z}^{\mathbf{e}} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{\mathbf{L}\mathbf{E}}^{\mathrm{T}} \mathbf{Z}_{\mathbf{E}}^{-1} \mathbf{Z}_{\mathbf{L}\mathbf{E}},$$

gdzie: Z – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów fazowych linii napowietrznej, Z_{EE} – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów odgromowych, Z_{LE} – macierz impedancji wzajemnych skojarzonych z przewodami odgromowymi i fazowymi linii napowietrznej. Analogiczne przekształcenie wykonuje się dla potencjałowych współczynników Maxwella.

W wyniku transformacji parametrów na składowe symetryczne otrzymuje się macierz impedancji składowych symetrycznych Z_s w postaci (9) (dla symetrycznej linii dwutorowej):

(9)
$$\mathbf{Z}_{s} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{01} - 3\underline{Z}_{E} & \underline{Z}_{0m} - 3\underline{Z}_{E} \\ \underline{Z}_{11} & & \\ \underline{Z}_{21} & & \\ \underline{Z}_{0m} - 3\underline{Z}_{E} & \underline{Z}_{01} - 3\underline{Z}_{E} \\ & & & \underline{Z}_{11} \\ & & & & Z_{21} \end{bmatrix},$$

gdzie:

- (10) $\underline{Z}_{1i} = \underline{Z}_{2i} = \underline{Z}_{Wi} \underline{Z}_{Mi}.$
- (11) $\underline{Z}_{0i} = \underline{Z}_{Wi} + 2\underline{Z}_{Mi},$

(12)
$$\underline{Z}_{0m} = 3\underline{Z}_{m},$$

oraz: \underline{Z}_{0i} , \underline{Z}_{1i} , \underline{Z}_{2i} – kolejno impedancje składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej toru prądowego *i*, *i* = {I, II}, \underline{Z}_{0m} – impedancja zerowa wzajemna torów, \underline{Z}_{Wi} , \underline{Z}_{Mi} , \underline{Z}_{m} – kolejno impedancje własne, wzajemna w obrębie toru i wzajemna między torami linii, \underline{Z}_E – impedancja związana z oddziaływaniem przewodów odgromowych wyznaczona na podstawie (8). Analogiczną postać uzyskuje się dla macierzy pojemności składowych symetrycznych $C_S = P_S^{-1}$.

Macierze admitancyjne składowych symetrycznych Y_s (parametry wzdłużne) i B_s (parametry poprzeczne), o postaci analogicznej jak macierz Z_s , na podstawie których tworzy się schematy zastępcze linii, określa się zgodnie z zależnościami (13) i 14):

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{S}} = \mathbf{Z}_{\mathbf{S}}^{-1}$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{S}} = \boldsymbol{\omega} \mathbf{C}_{\mathbf{S}} = \boldsymbol{\omega} \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{-1},$$

(14

gdzie: P_s – macierz potencjałowych współczynników Maxwella składowych symetrycznych, ω - pulsacja napięcia.

Schemat zastępczy linii napowietrznej dla składowej zgodnej stanowi czwórnik typu Π o parametrach wzdłużnych: rezystancja R_1 , reaktancja X_1 oraz poprzecznych: susceptancja B_1 i konduktancja poprzeczna G_1 . Dla każdego toru prądowego symetrycznej linii napowietrznej można wyodrębnić niezależny schemat zastępczy zgodny.

Schemat zastępczy zerowy składa się z analogicznych parametrów jak schemat zgodny i dla linii dwutorowej przyjmujo postoć jak po przypku 2



Rys.2. Schemat zastępczy zerowy linii dwutorowej

Nowobudowane linie napowietrzne WN i NN są projektowane w taki sposób, aby maksymalnie zredukować zjawisko ulotu, które modelowane jest za pomocą konduktancji poprzecznej. Z tego względu wartość strat mocy (a w efekcie strat energii) jest na tyle mała, że konduktancja poprzeczna linii może zostać pominięta w modelu.

Sposób wyznaczania parametrów modelu metodą pomiarową

Zakres i metodykę pomiarów parametrów elektrycznych linii napowietrznych WN i NN określa Standardowa Specyfikacja Techniczna [4]. Przed przystąpieniem do pomiarów należy oszacować spodziewane wartości mierzonych parametrów w celu doboru odpowiedniej aparatury pomiarowej i jej zakresu, mocy źródła zasilania oraz podjęcia decyzji dotyczącej zastosowania aparatury pośredniczącej (przekładniki napięciowe i prądowe). Aparatura stosowana do pomiarów parametrów elektrycznych linii powinna mieścić się w klasie 0,2.

Wyróżnia się trzy główne układy pomiarowe do pomiarów prądem przemiennym 50 Hz. Układ pomiarowy 1 służy do pomiaru impedancji dla składowej zgodnej. Pomiar należy przeprowadzić trzykrotnie włączając układ pomiarowy kolejno między zaciski a - b, a - c i b - c (rys. 3). W rezultacie otrzyma się impedancje $Z_{\text{pab}}, Z_{\text{pac}}$ i Z_{pbc} :

(15)
$$\begin{cases} \underline{Z}_{p ab} = \underline{Z}_{Wa} + \underline{Z}_{Wb} - 2\underline{Z}_{Mab} \\ \underline{Z}_{p ac} = \underline{Z}_{Wa} + \underline{Z}_{Wc} - 2\underline{Z}_{Mac} \\ \underline{Z}_{p bc} = \underline{Z}_{Wb} + \underline{Z}_{Wc} - 2\underline{Z}_{Mbc} \end{cases}$$

wówczas:

(16)
$$\frac{\underline{Z}_{p\,ab} + \underline{Z}_{p\,ac} + \underline{Z}_{p\,bc}}{2} = 3\underline{Z}_{1}^{\text{sr}},$$

gdzie:

(17)
$$\underline{Z}_{1}^{\text{sr}} = \frac{\underline{Z}_{Wa} + \underline{Z}_{Wb} + \underline{Z}_{Wc}}{3} - \frac{\underline{Z}_{Mab} + \underline{Z}_{Mac} + \underline{Z}_{Mbc}}{3}$$

Impedancja linii dla składowej zgodnej wyniesie wówczas:

Rys.3. Układ pomiarowy 1

Układ pomiarowy 2 służy do pomiarów impedancji własnych linii \underline{Z}_W (rys. 4). Podczas pomiarów przewody odgromowe pozostają uziemione na krańcach linii, wówczas mierzy się wartości impedancji własnych, w których ujęte jest oddziaływanie przewodów odgromowych. Na podstawie wyników uzyskanych z układów pomiarowych 1 i 2 oraz na podstawie (10) i (11) można wyznaczyć wartość impedancji zerowej toru prądowego linii według zależności (19):



Rys.4. Układ pomiarowy 2

Układ pomiarowy 3b (rys. 5b) jest przeznaczony do pomiaru impedancji wzajemnej dla składowej zerowej \underline{Z}_{0m} .



Rys.5. Układ pomiarowy 3

Podczas wykonywania pomiarów, drugi tor prądowy linii jest uziemiony, wówczas otrzymuje się następujący układ równań:

(20)
$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{0 \text{ I}} & \underline{Z}_{0 \text{ m}} \\ \underline{Z}_{0 \text{ m}} & \underline{Z}_{0 \text{ I}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}_{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U} \\ 0 \end{bmatrix},$$

stąd wartość impedancji \underline{Z}_{0m} ostatecznie wyznacza się z zależności:

(21)
$$\underline{Z}_{0m} = \sqrt{\underline{Z}_{01} \left(\underline{Z}_{01} - \frac{\underline{U}}{\underline{I}} \right)}.$$

Impedancję linii dla składowej zerowej można wystarczająco dokładnie dla celów praktycznych, wyznaczyć przy pomocy jednego pomiaru, wykorzystując układ 3a (rys. 5a) w którym nie występuje oddziaływanie drugiego toru, wówczas dla linii symetrycznej:

(22)
$$\underline{U} = \frac{1}{3} \underline{I} \left(\underline{Z}_{W} + 2 \underline{Z}_{M} \right),$$

stąd impedancja zerowa wyznaczana jest według (23):

(23)
$$\underline{Z}_0 = 3 \frac{\underline{U}}{\underline{I}}.$$

W przypadku pomiarów parametrów poprzecznych linii napowietrznych, z uwagi duże wartości pojemności tego obiektu, metoda techniczna pomiaru jest niewystarczająca, a z uwagi na niewielką wartość prądów (mA) nie ma możliwości zastosowania przekładników prądowych. Pomiary parametrów poprzecznych wymagają zastosowania wysokiego napięcia (kilku kV) oraz miernika prądu umieszczonego na izolowanym stanowisku, a także zachowania szczególnej ostrożności podczas pomiarów.

Pojemności cząstkowe linii jednotorowej C_p (24) mierzy się łącznie w sześciu konfiguracjach schematu pomiarowego (rys. 6,7). Pomiar w każdym z układów należy przeprowadzać zmieniając cyklicznie miejsce przyłożenia napięcia i uziemienie jednego z zacisków układu pomiarowego według następujących konfiguracji, gdzie *a*, *b*, *c* – zaciski układu pomiarowego, *a*, *b*, *c* = {1, 2, 3}:

- trzy konfiguracje pomiarów typu C_{pa} zaciski b i c zwarte i uziemione (rys. 6),
- trzy konfiguracje pomiarów typu C_{pab} zaciski a i b zwarte, zacisk c uziemiony (rys. 7),



Rys.6. Układ pomiarowy do pomiaru pojemności cząstkowych Cpl



Rys.7. Układ pomiarowy do pomiaru pojemności cząstkowych Cp12

Zmierzone wartości pojemności cząstkowych C_p obejmują szeregowo-równoległe połączenia pojemności międzyfazowych i doziemnych linii napowietrznej, stąd otrzymuje się układ sześciu równań opisujących te pojemności według (25) i (26):

(25)
$$C_{pa} = C_a + C_{ab} + C_{ac}$$
,

(26)
$$C_{pab} = C_a + C_b + C_{ac} + C_{bc}$$

gdzie: C_1 , C_2 , C_3 – pojemności doziemne linii, C_{12} , C_{23} , C_{13} – pojemności międzyprzewodowe linii. Rozwiązanie układu równań pozwala wyznaczyć parametry poprzeczne linii napowietrznej:

(27)
$$C_a = \frac{1}{2} (C_{\text{pab}} + C_{\text{pac}} - C_{\text{pb}} - C_{\text{pc}}),$$

(28)
$$C_{ab} = \frac{1}{2} (C_{pa} + C_{pb} - C_{pab})$$

W przypadku linii dwutorowej, pomiary prowadzi się w opisany powyżej sposób otrzymując łącznie 21 równań, z których wyznacza się sześć pojemności doziemnych, sześć pojemności międzyprzewodowych w obrębie torów prądowych i dziewięć pojemności międzyprzewodowych występujących między przewodami dwóch torów linii.

Porównanie parametrów wzdłużnych modelu wyznaczonych dwiema metodami

W celu zweryfikowania parametrów elektrycznych linii uzyskanych metodą pomiarową wyznaczono model matematyczny rzeczywistej dwutorowej linii napowietrznej 400 kV (rys. 8).



Rys.8. Fragment napowietrznej linii dwutorowej (n = 2) jednonapięciowej o napięciu znamionowym 400 kV o dwóch przewodach odgromowych (g = 2) oraz przewodach fazowych zbudowanych z trójprzewodowych wiązek (m = 3) prowadzonej na konstrukcji wsporczej typu E33

Porównano parametry elektryczne wzdłużne linii napowietrznej zmierzone przedstawionymi metodami wyznaczając procentowe błędy względne zgodnie z zależnością (29):

(29)
$$\delta_{\%} = \frac{A_{\rm p} - A_{\rm a}}{A_{\rm a}} \cdot 100\%$$

gdzie: A_p – parametr zmierzony, A_a – parametr wyznaczony analitycznie.

W tabelach 1 ÷ 3 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji i reaktancji wzdłużnych jednego toru prądowego rozważanej linii. W tabelach 4 ÷ 6 porównano poszczególne parametry schematu zastępczego linii napowietrznej.

Tabela 1	. Zmierzone	wartości im	pedancji –	Układ	pomiarowy	y 1

Parametr	L1-L2	L2-L3	L1-L3	
	drugi tor otwarty	drugi tor otwarty	drugi tor otwarty	
R, Ω	4,509	4,499	4,594	
Χ, Ω	41,601	47,172	42,858	

Tabela 2. Zmierzone wartości impedancji – Układ pomiarowy 2

Parametr	L1-E	L2-E	L3-E	
	drugi tor otwarty	drugi tor otwarty	drugi tor otwarty	
R, Ω	5,475	5,280	5,904	
Χ, Ω	34,291	34,935	32,734	

Tabela 3. Zmierzone wartości impedancji – Układ pomiarowy 3

-						
	Parametr	L1L2L3-E	L1L2L3-E			
		drugi tor otwarty	drugi tor uziemiony			
R, Ω		4,106	1,999			
Χ, Ω		19,293	14,962			

Tabela 4. Parametry własne w obrębie jednego toru linii

Parametr		Analitycznie	Pomiarowo	$\delta_{\%},$ %
	R, Ω	5,128	5,475	6,8
LI-E	Χ, Ω	35,262	34,291	-2,8
	R, Ω	5,302	5,280	-0,4
LZ-E	Χ, Ω	34,226	34,935	2,1
125	R, Ω	5,608	5,904	5,3
L3-E	Χ, Ω	32,677	32,735	0,2

Tabela 5. Parametry wzajemne w obrębie jednego toru linii

		<u> </u>		
Parametr		Analitycznie	Pomiarowo	$\delta_{\%}$, %
1110	R, Ω	3,201	3,123	-2,4
LI-LZ	Χ, Ω	14,151	13,813	-2,4
1010	<i>R</i> , Ω	3,305	3,255	-1,5
LZ-LJ	Χ, Ω	10,258	10,249	-0,1
L1-L3	R, Ω	3,431	3,393	-1,1
	Χ, Ω	12,880	12,084	-6,2

Tabela 6. Składowe symetryczne

Parametr		Analitycznie	Pomiarowo	δ‰, %
7	R, Ω	2,034	2,123	4,4
Z_1	Χ, Ω	21,626	21,938	1,4
Z_0	R, Ω	11,971	12,318	2,9
	Χ, Ω	58,914	57,878	-1,8
Z_{0M}	R, Ω	9,946	9,662	-2,9
	Χ, Ω	29,026	27,886	-3,9

Podsumowanie

Otrzymane w wyniku pomiarów wzdłużne parametry elektryczne linii napowietrznej nie różnią się znacząco od wartości obliczonych. Maksymalna różnica nie przekracza 7%. Linia napowietrzna jest elementem, którego parametry od wielu czvnników elektrvczne zależą (także takich jak rezystywność zewnętrznych) gruntu, geometryczny rozkład przewodów na konstrukcji wsporczej, temperatura, w której dokonuje się pomiaru. Średnia długość linii napowietrznej NN w Polsce wynosi ponad 120 km, stąd warunki, w których bada się jej parametry są różne w poszczególnych obszarach jej przebiegu, co jest powodem niewielkiej rozbieżności uzyskanych parametrów linii. Ponadto, pomiar parametrów obarczony jest niepewnością wynikającą z klasy użytych mierników, a także z zastosowaniem pośredniej metody wykonywania pomiarów.

Autorzy: dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ, E-mail: <u>henryk.kocot@polsl.pl</u>, dr inż. Paweł Kubek, E-mail: <u>pawel.kubek@polsl.pl</u>, mgr inż. Agnieszka Dziendziel, E-mail: <u>agnieszka.dziendziel@polsl.pl</u>, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

LITERATURA

- Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines, *Energies*, vol. 14, iss. 2, 2021
- [2] Kocot H., Dziendziel A., Chosen analyses for multi-circuit multivoltage overhead lines capacitances, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 8, 71-74
- [3] Kacejko P., Miller P., Osik J.: Wyznaczanie parametrów linii napowietrznych, *Energetyka*, nr 3 (1995), 101-105
- [4] Wymagania odnośnie zakresu i metodyki pomiarów parametrów elektrycznych linii elektroenergetycznych NN, Standardowa Specyfikacja Techniczna, Departament Standardów Technicznych PSE S.A., Konstancin-Jeziorna czerwiec 2019