

Tomasz SZCZEGIELNIAK\*  
Zygmunt PIĄTEK\*  
Dariusz KUSIAK\*

## ANALIZA STRAT MOCY W TRÓJFAZOWYCH TORACH WIELKOPRĄDOWYCH

Do przesyłu energii elektrycznej o dużych prądach stosuje się m.in. tory wielkoprądowe. W urządzeniach tego typu przepływ prądu wywołuje efekty natury elektromagnetycznej, termicznej oraz dynamicznej. Poprawne wyznaczenie parametrów elektrodynamicznych ma duże znaczenie praktyczne. Podstawą w analizie tych zjawisk jest informacja o rozkładzie pola elektromagnetycznego i stratach mocy, w szczególności zaś gdy straty te stanowią znaczną część całkowitych strat mocy w analizowanej konstrukcji. W artykule przeprowadzono analizę strat mocy w trójfazowych torach wielkoprądowych o przekroju kołowym. Opisano analityczną metodę wyznaczania strat mocy, którą następnie skonfrontowano z metodą numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych, zastosowanej w programie FEMM.

SŁOWA KLUCZOWE: tory wielkoprądowe, straty mocy, pole elektromagnetyczne

### 1. WSTĘP

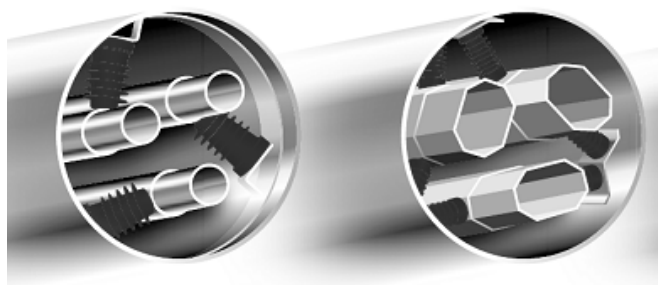
Począwszy od lat siedemdziesiątych w elektroenergetyce światowej stosuje się tory wielkoprądowe z izolacją gazową. Najczęściej stosowanym gazem jest SF<sub>6</sub> (sześćfluorek siarki) o ciśnieniu od 0,29 do 0,51 MPa (przy 20°C). Bardzo dobre właściwości dielektryczne tego gazu, a także dobre przewodnictwo ciepła oraz właściwości gaszenia łuku spowodowały szybkie rozpowszechnianie urządzeń z SF<sub>6</sub>. Jednakże przy torach wielkoprądowych o długościach przekraczających kilka kilometrów wymagana objętość gazu jest znaczna. Gaz ten nie jest tani, a ponadto może przyczyniać się w niekorzystnych warunkach eksploatacyjnych do intensyfikacji efektu cieplarnianego. Z tego względu rozpoczęto szerokie badania nad zastosowaniem azotu, ponieważ jest głównym składnikiem powietrza i jest całkowicie przyswajalny przez środowisko naturalne. Dlatego też w ostatnich latach SF<sub>6</sub> zastępowany jest mieszaniną 95% N<sub>2</sub> i 5% SF<sub>6</sub> o ciśnieniu 1,3 MPa, odpowiadającemu ciśnieniu 0,4 MPa w przypadku czystego SF<sub>6</sub> [1-10].

---

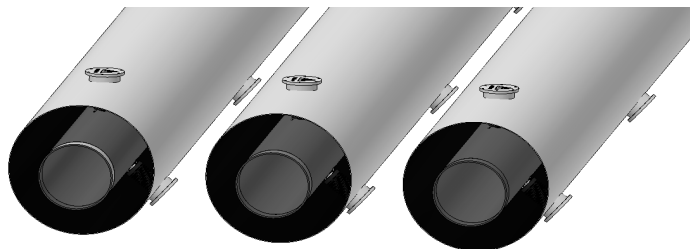
\* Politechnika Częstochowska.

Obecnie takie tory są budowane na napięcia od 72 do 1200 kV, najczęściej jednak na napięcia od 110 do 750 kV, prądy znamionowe od 1 do 12 kA i moce znamionowe od 200 do 4000 MVA. Najkorzystniejszym zastosowaniem torów wielkoprądowych z izolacją gazową, w porównaniu z liniami napowietrznymi lub kablowymi, jest stosowanie ich dla napięć większych od 245 kV i mocy przesyłowych od 2000 do 4000 MVA [1-10].

Długości stosowanych torów wielkoprądowych o przewodach szynowych osłoniętych z izolacją lub bez izolacji gazowej zawarte są od kilku metrów do kilkunastu kilometrów. Konstrukcje torów są wytwarzane jako sztywne, w odcinkach kilkunastometrowych, linia jest z nich montowana na miejscu budowy. Połączenia przewodów fazowych wykonuje się jako elementy wsuwane (specjalne gniazdo-trzpień zapewnia właściwy docisk łączonych części), natomiast osłony najczęściej łączy się poprzez spawanie, rzadko przez spójnienia kołnierzowe. Połączenie wsuwane przewodów fazowych spełnia rolę kompensatora wydłużeń termicznych. Do kompensacji osłony instaluje się w pewnych odległościach specjalne elementy tzw. kompensatory harmonijkowe. Do wykonania odgałęzienia służą specjalne człony rozgałęźne, natomiast w celu zmiany kierunku prowadzenia przewodów stosuje się specjalne elementy kątowe [1-10]. Najczęściej stosowane rozwiązania torów wielkoprądowych są to jednobiegunowe oraz trójbiegunowe trójfazowe tory wielkoprądowe przedstawione na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Trójbiegunowy tor wielkoprądowy [11]



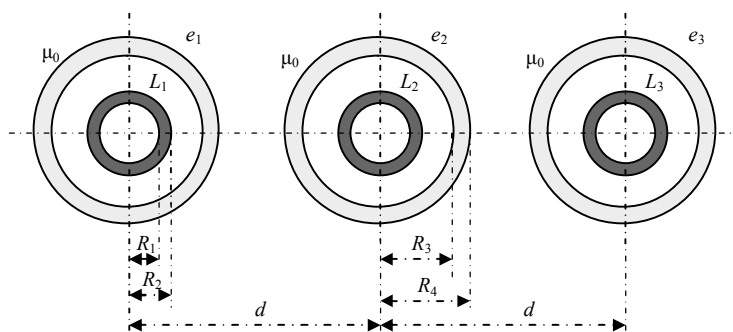
Rys. 2. Jednobiegunowy trójfazowy tor wielkoprądowy [11]

Przekroje poprzeczne ekranów oraz przewodów fazowych są duże dlatego przy wyznaczaniu strat mocy nawet dla częstotliwości przemysłowej należy uwzględnić zjawisko naskórkowości oraz zewnętrzne i wewnętrzne zjawisko zbliżenia [1-6].

## 2. STRATY MOCY

Obliczanie wielkości elektromagnetycznych w torach wieloprądowych wykonuje się najczęściej metodami numerycznymi, rzadziej analitycznymi. Niemniej jednak przewaga metod analitycznych polega na dostępności rozwiązania w jawnej formie jako funkcji parametrów analizowanego układu.

W przypadku najczęściej stosowanych trójfazowych torów wieloprądowych (rys. 3 i 4) analityczne rozwiązania pól elektromagnetycznych i strat mocy przedstawione są w pracach [1-7].



Rys. 3. Trójfazowy płaski tor wieloprądowy

Dla trójfazowego toru przedstawionego na rysunku 3 straty mocy w przewodach fazowych określone są wzorami [7]:

$$P_L = \frac{\Gamma l I_1^2}{4 \pi \gamma R_2} \frac{a}{\underline{b} \underline{b}^*} \quad (1)$$

Natomiast moc czynna wydzielana w ekranach skrajnych wynosi odpowiednio [7]:

$$P_{s13} = P_{e0} + P_{e13} \quad (2)$$

gdzie

$$P_{e0} = \frac{\Gamma_e^* l I_1^2}{4 \pi \gamma_e \beta_e^2 R_4} \frac{a_0}{\underline{d}_0 \underline{d}_0^*} \quad (2a)$$

$$P_{e13} = \frac{\Gamma_e^* l I_1^2}{2 \pi \gamma R_4} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \left( \frac{R_4}{d} \right)^{2n} \frac{a_{ne}}{\underline{b}_{ne} \underline{b}_{ne}^*} \quad (2b)$$

W ekranie środkowym straty mocy określone są wzorem

$$P_{s2} = P_{e0} + P_{e2} \quad (3)$$

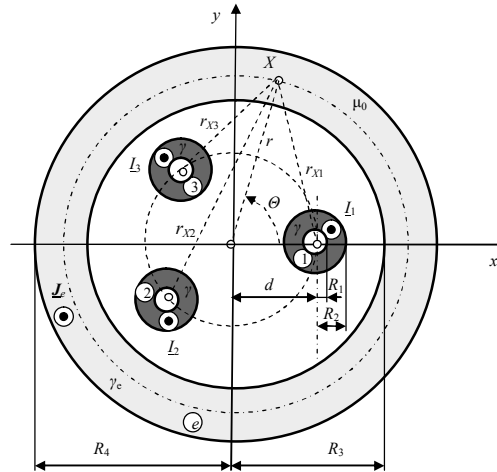
przy czym

$$P_{e2} = \frac{\underline{\Gamma}_e^* l I_1^2}{2 \pi \gamma R_4} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 \left( \frac{R_4}{d} \right)^{2n} \frac{\underline{a}_{ne}}{\underline{b}_{ne} \underline{b}_{ne}^*} \quad (3b)$$

Dla trójbiegunowego toru przedstawionego na rysunku 4 moc czynna wydzielana w przewodach fazowych jest jednakowa i wynosi [3]:

$$P_{L123} = P_L + P_{123} \quad (4)$$

$$P_{123} = \frac{\underline{\Gamma}^* l I_1^2}{2 \pi^2 \gamma R_2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_0^{2\pi} D_n^2 d\theta \right) \left( \frac{R_2}{d} \right)^{2n} \frac{\underline{a}_n}{\underline{b}_n \underline{b}_n^*} \quad (4a)$$



Rys. 4. Trójfazowy trójbiegunowy tor wieloprądowy

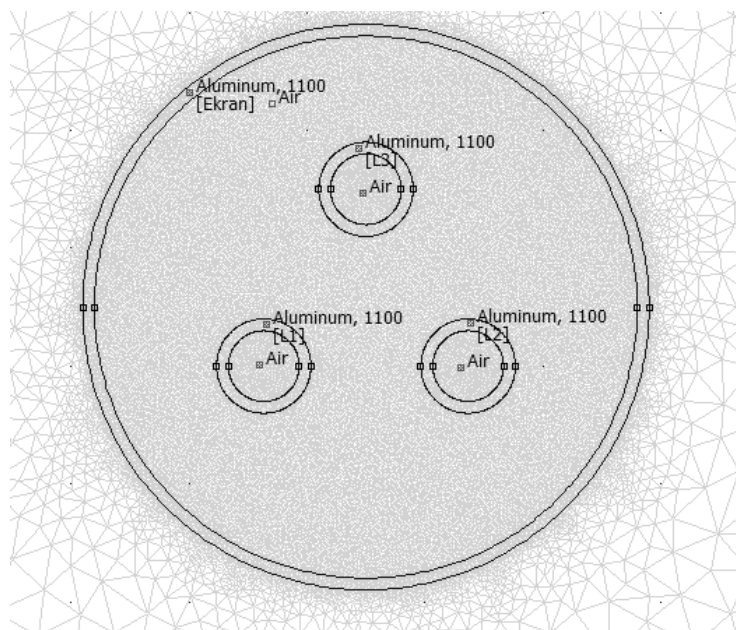
Natomiast straty mocy w ekranie toru przedstawionego na rysunku 4 wynoszą [3]:

$$P_s = \frac{l \underline{\Gamma}_e^* I_1^2 R_4}{2 \pi \gamma_e R_3^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{9}{2} \pi \left( \frac{d}{R_3} \right)^{2n} \frac{\underline{a}_{nn}}{\underline{d}_n \underline{d}_n^*} \quad (5)$$

Parametry  $\underline{a}$ ,  $\underline{a}_0$ ,  $\underline{a}_n$ ,  $\underline{a}_{ne}$ ,  $\underline{a}_{ne}$ ,  $\underline{b}$ ,  $\underline{b}_n$ ,  $\underline{b}_{ne}$ ,  $\underline{d}$ ,  $\underline{d}_n$  występujące we wzorach (1) ÷ (5), wyrażone za pomocą funkcji Bessela, przedstawione są w pracach [3-7]. Natomiast  $\underline{\Gamma} = \sqrt{j \omega \mu_0 \gamma}$  oznacza zespoloną stałą propagacji,  $\omega$  jest pulsacją,  $\gamma$  oznacza konduktywność przewodu, a  $\mu_0$  przenikalność magnetyczna próżni.

### 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W celu weryfikacji analitycznych wzorów na straty mocy przeprowadzono przykładowe obliczenia dla typowych torów stosowanych w przemyśle ( a dokładniej mówiąc dla toru EHON-12/2 i HOIO-24/2 produkowanych przez firmę Holduct [11]) oraz przeprowadzono symulację korzystając z programu FEMM [12] opartego na metodzie elementów skończonych (rys. 5).



Rys. 5. Dyskretyzacja trójbiegunowego toru wielkoprądowego

Dla trójfazowego toru przedstawionego na rysunku 4 przyjęto następujące wartości:  $R_1 = 30$  mm,  $R_2 = 40$  mm,  $R_3 = 230$  mm,  $R_4 = 240$  mm,  $d = 100$  mm. Zaś w przypadku toru występującego na rysunku 3, parametry geometryczne wynoszą:  $R_1 = 30$  mm,  $R_2 = 40$  mm,  $R_3 = 230$  mm,  $R_4 = 240$  mm,  $d = 640$  mm. Dla obu typów torów założono, że przewody fazowe oraz ekrany wykonane są z aluminium o konduktywności  $\gamma = 35$  MS·m<sup>-1</sup>. Prądy płynące przez przewody wnoszą odpowiednio  $\underline{I}_1 = 2000\exp[-j0]$  A,  $\underline{I}_2 = 2000\exp[-j\frac{2}{3}\pi]$  A,  $\underline{I}_3 = 2000\exp[j\frac{2}{3}\pi]$  A, a częstotliwość wynosi 50 Hz. Długość torów przyjęto  $l = 10$  m. Wyniki obliczeń zarówno dla metody analitycznej, jak i numerycznej przedstawione są w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Straty mocy w torze wieloprądowym przedstawionym na rysunku 4

Metoda	P (W)			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	Ekran
Metoda analityczna	523.447	523.447	523.447	164.912
FEMM	565.078	565.04	565.037	148.818

Tabela 2. Straty mocy w torze wieloprądowym przedstawionym na rysunku 3

Metoda	P (W)					
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	Ekran $e_1$	Ekran $e_2$	Ekran $e_3$
Metoda analityczna	538.328	538.328	538.328	44.789	117.664	44.789
FEMM	546.21	546.225	546.179	43.887	110.065	41.67

#### 4. WNIOSKI

Praca jest próbą konfrontacji analitycznej metody wyznaczania strat mocy w torach wieloprądowych z metodą elementów skończonych, stosowaną w wielu komercyjnych programach obliczeniowych.

Jedną z podstawowych zalet metody analitycznej jest dostępność rozwiązania w jawnej formie jako funkcji parametrów analizowanego układu. Niemniej jednak wyznaczanie wielkości elektromagnetycznych metodami numerycznymi nie skutkuje otrzymaniem błędnych wyników. Potwierdzają to obliczenia wykonane w ramach artykułu.

Z przedstawionych w tabelach 1 i 2 wartości wynika, że wartości strat mocy obliczone na podstawie rozwiązań analitycznych są zbliżone do wartości wyznaczonych za pomocą programu FEMM. Błąd względny nie przekracza 10%. Różnice w wartościach strat mocy wyznaczonych dwoma metodami wynikają z pewnych uproszczeń w modelu matematycznym. W przypadku metody analitycznej, podczas wyznaczania wielkości elektromagnetycznych przewody fazowe traktowane są jako zbiór przewodów nitkowych.

## LITERATURA

- [1] Nawrowski R.: Tory wielkopiędowe izolowane powietrzem lub SF<sub>6</sub>. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 1998.
- [2] Piątek Z.: Impedances of high-current busducts. Wyd. Pol. Częst., Czestochowa 2008.
- [3] Szczegielniak T.: Straty mocy w nieekranowanych i ekranowanych rurowych torach wielkopiędowych, Praca Doktorska, Gliwice, 2011.
- [4] Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D.: Power losses in the screens of the symmetrical three phase high current busduct, Computer Applications in Electrical Engineering. Ed. by Ryszard Nawrowski, Poznań 2012.
- [5] Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D.: Wpływ zewnętrznego zjawiska zbliżenia na straty mocy w trójfazowym płaskim torze wielkopiędowym, XVI Conference Computer Applications in Electrical Engineering, s 15-16 Poznań 2011.
- [6] Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D.: Straty mocy w ekranach trójfazowego jednobiegowego toru wielkopiędowego, Electrical Engineering, Iss.73, s.91-98, 2013.
- [7] Szczegielniak T., Kusiak D., Jabłoński P., Piątek Z.: Power losses in a three-phase single-pole gas-insulated transmission line (GIL), International Review of Electrical Engineering (IREE), October 2013, Vol. 8, N. 5.
- [8] Koch, H.: Gas-Insulated Transmission Lines (GIL). John Wiley & Sons, 2012.
- [9] CIGRE TB 218.: Gas Insulated Transmission Lines (GIL, CIGRE, Paris, France, 2003.
- [10] CIGRE TB 351.: Application of Long High Capacity Gas Insulated Lines (GIL), CIGRE, Paris, France, 2008.
- [11] Holduct – Z. H. Ltd. Polska.: Szynoprzewody trójfazowe okrągłe. [Online]. Available: <http://www.holduct.com.pl/index.php?menu=p2>
- [12] Meeker, D.C., Finite Element Method Magnetics, version 4.2 (11apr2012, Mathematica Build), <http://www.femm.info>.

### ANALYSIS OF THE POWER LOSSES IN THE THREE-PHASE HIGH-CURRENT BUSDUCTS

This paper presents an analytical method for determining the power losses in the three-phase gas-insulated transmission line (*i.e.*, high-current busduct) of circular cross-section geometry. The mathematical model takes into account the skin effect and the proximity effects, as well as the complete electromagnetic coupling between phase conductors and enclosures (*i.e.*, screens). Apart from analytical calculation, computer simulations for high-current busduct system power losses were also performed with the aid of the commercial FEMM software, using two-dimensional finite elements.