

Edmund PIĘTKA

Jerzy ŻACZEK

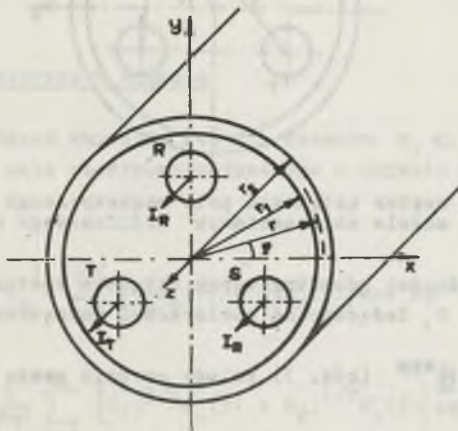
STRATY MOCY W EKRANIE UKŁADU PRZESYŁOWEGO

Stressczenie. W pracy zaprezentowano metodę obliczania strat mocy czynnej wywołanych prądami wirowymi w ekranie metalowym trójfazowych, trójprzewodowych układów przesyłowych. Uwzględnia ona:

- nierównomierność pola magnetycznego we wnętrzu ekranu, wynikająca z geometrii układu i przesunięć fazowych prądów poszczególnych faz,
- zniekształcenie obrazu pola magnetycznego wywołane obecnością metalowego ekranu.

1. Wstęp

Wprowadzanie układów o coraz większej przepustowości mocowej czy też nowych konstrukcji przesyłowych powoduje, że problem wyznaczania strat mocy czynnej w powłokach metalowych pozostaje nadal aktualny [1], [2], [3]. W niniejszej pracy zaprezentowano metodę wyznaczania strat w ekranie otaczającym trójfazowy, trójprzewodowy układ przesyłowy, przy uwzględnieniu faktu iż pole magnetyczne wywołane przepływem prądu w poszczególnych fazach zostanie zniekształcone tzw. reakcją prądów wirowych indukowanych w ekranie.



Rys. 1. Model obliczeniowy trójfazowego układu przesyłowego z przewodami symetrycznie ułożonymi względem osi ekranu

W celu wyznaczenia strat mocy w ekranie trójfazowego trójprzewodowego układu przesyłowego analizie poddano model takiego układu z przewodami fazowymi symetrycznie ułożonymi względem osi ekranu (rys. 1). Ekran jest cylindrycznym walcem wykonanym z materiału niemagnetycznego o stałej konduktywności, izolowany lub uziemiony jednostronnie. W metodzie nie uwzględnia się zjawisk zachodzących na końcach ekranu. Dla przyjętego modelu wprowadzono układ współrzędnych cylindrycznych r, φ , z oś z skierowanej zgodnie z kierunkiem przepływu prądu w danej chwili.

2. Pole magnetyczne na powierzchni wewnętrznej ekranu

Wektor natężenia pola magnetycznego na powierzchni wewnętrznej ekranu (dla $r = r_1$) jest wypadkową natężeń pola magnetycznego wywołanego przepływem prądu przeniennego w poszczególnych fazach (rys. 2):

$$\underline{H}^{wyp}(r_1, \varphi) = \underline{H}^R(r_1, \varphi) + \underline{H}^S(r_1, \varphi) + \underline{H}^T(r_1, \varphi), \quad (1)$$

gdzie:

$\underline{H}^R, \underline{H}^S, \underline{H}^T$ - zespolone wartości wektorów natężeń pola magnetycznego od poszczególnych faz.



Rys. 2. Wypadkowy wektor natężenia pola magnetycznego na powierzchni wewnętrznej ekranu w modelu obliczeniowym trójfazowego układu przesyłowego

Wyznaczone z zależności geometrycznych składowe wektorów $\underline{H}^R, \underline{H}^S, \underline{H}^T$ dla dowolnego punktu P, leżącego na powierzchni wewnętrznej ekranu, zestawiono w tabl. 1.

Przy wyznaczaniu \underline{H}^{wyp} (rów. 1) należy zwrócić uwagę na kierunek poszczególnych składowych.

Tablica 1

Zestawienie wartości składowych wektora natężenia pola magnetycznego od poszczególnych faz

Faza	Składowa	Układ symetryczny względem osi ekranu	
		Wartość składowej	Wartość składowej po rozw. w szeregu Furiera
R	H_y^R	$\frac{I_{mR}}{2\pi} \frac{r_1 - (r_1 - b) \cos(90^\circ - \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(90^\circ - \varphi)}$	$\frac{I_{mR}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \cos n(90^\circ - \varphi)$
	H_r^R	$\frac{I_{mR}}{2\pi} \frac{(r_1 - b) \sin(90^\circ - \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(90^\circ - \varphi)}$	$\frac{I_{mR}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \sin n(90^\circ - \varphi)$
S	H_y^S	$\frac{I_{mS}}{2\pi} \frac{r_1 - (r_1 - b) \cos(30^\circ + \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(30^\circ + \varphi)}$	$\frac{I_{mS}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \cos n(30^\circ + \varphi)$
	H_r^S	$\frac{I_{mS}}{2\pi} \frac{(r_1 - b) \sin(30^\circ + \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(30^\circ + \varphi)}$	$\frac{I_{mS}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \sin n(30^\circ + \varphi)$
T	H_y^T	$\frac{I_{mT}}{2\pi} \frac{r_1 - (r_1 - b) \cos(210^\circ - \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(210^\circ - \varphi)}$	$\frac{I_{mT}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \cos n(210^\circ - \varphi)$
	H_r^T	$\frac{I_{mT}}{2\pi} \frac{(r_1 - b) \sin(210^\circ - \varphi)}{r_1^2 + (r_1 - b)^2 - 2r_1(r_1 - b) \cos(210^\circ - \varphi)}$	$\frac{I_{mT}}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{(r_1 - b)^n} \sin n(210^\circ - \varphi)$

3. Pole elektromagnetyczne w ekranie

Po rozwiązaniu równań Maxwella [4] dla obszaru $r_1 \leq r < r_2$ zespolone wartości składowych pola elektromagnetycznego w ekranie dane są równaniami:

$$\underline{H}_z^w = \sum_{n=1}^{\infty} [C_1 J_n(\vec{r}) + C_2 K_n(\vec{r})] \cos n\varphi \quad (2)$$

$$\underline{H}_\varphi^w = \frac{k}{j\omega\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} [C_1 j^{3/2} J_n(\vec{r}) + C_2 j^{1/2} K_n'(\vec{r})] \cos n\varphi \quad (3)$$

$$\frac{H_r^w}{r} = \frac{1}{j\omega\mu r} \sum_{n=1}^{\infty} [C_1 J_n(\tilde{r}) + C_2 K_n(\tilde{r})] \sin n\varphi, \quad (4)$$

gdzie:

$$\tilde{r} = krj^{3/2}; \quad \tilde{z} = krj^{1/2},$$

$$k = \sqrt{\omega\mu\eta}$$

I_n, K_n, I'_n, K'_n - funkcje Bessela 1 i 2 rodzaju rzędu n oraz ich pochodne,

C_1, C_2 - stałe,

j - jednostka urojona, $j^2 = -1$,

$\omega = 2\pi f$ - pulsacja,

$\frac{\mu}{\eta}$ - przenikalność magnetyczna bezwzględna,

η - konduktywność.

Stałe C_1, C_2 , występujące w równaniach (2+4), wyznaczyć można z warunków brzegowych dla powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej ekranu. Aby sformułować warunki brzegowe należy wyznaczyć składowe pola elektromagnetyczne dla obszaru na zewnątrz ekranu ($r \geq r_2$) oraz uwzględnić fakt, iż wypadkowe pole magnetyczne dane równaniem (1) zostanie zniekształcone tzw. reakcją prądów wirowych (w obszarze $r \leq r_1$).

4. Składowe pola elektromagnetyczne w rozpatrywanym układzie przesyłowym

Dla obszaru na zewnątrz ekranu ($r \geq r_2$) obowiązuje równanie Laplace'a, którego rozwiązaniem są następujące zespolone wielkości składowych pola elektromagnetycznego:

$$\frac{H_z^z}{r} = \sum_{n=1}^{\infty} C_3 \frac{\cos n\varphi}{r^n}, \quad (5)$$

$$\frac{H_r^z}{r} = \sum_{n=1}^{\infty} C_3 \frac{n \sin n\varphi}{j\omega\mu r^{n+1}}, \quad (6)$$

$$\frac{H_\varphi^z}{r} = \sum_{n=1}^{\infty} C_3 \frac{n \cos n\varphi}{j\omega\mu r^{n+1}}, \quad (7)$$

gdzie: C_3 - stała.

Pole magnetyczne opisane równaniem (1) zostanie zniekształcone tzw. reakcją prądów wirowych wyindukowanych w ekranie. Wyznaczone z równania La-

placę'a dla obszaru $r \leq r_1$ zespolone wielkości składowych pola elektromagnetycznego oddziaływania mają postać:

$$\underline{E}_z^{\text{od}} = \sum_{n=1}^{\infty} C_4 r^n \cos n\varphi, \quad (8)$$

$$\underline{H}_r^{\text{od}} = \sum_{n=1}^{\infty} C_4 \frac{nr^{n-1} \sin n\varphi}{j\omega\mu}, \quad (9)$$

$$\underline{H}_\varphi^{\text{od}} = \sum_{n=1}^{\infty} C_4 \frac{nr^{n-1} \cos n\varphi}{j\omega\mu}, \quad (10)$$

gdzie: C_4 - stała.

Wyznaczenie powyższych składowych pozwala na sformułowanie następujących warunków brzegowych:

$$\underline{H}_\varphi^{\text{wyp}}(r_1, \varphi) + \underline{H}^{\text{od}}(r_1, \varphi) = \underline{H}^{\text{w}}(r_1, \varphi), \quad (11)$$

$$\underline{H}^{\text{w}}(r_2, \varphi) = \underline{H}^{\text{w}}(r_2, \varphi) \quad (12)$$

Z warunków brzegowych wyznaczyć można stałe C_1 i C_2 występujące w równaniach (2+4) i w ten sposób uzależnić wartości składowych pola elektromagnetycznego w ekranie od prądów poszczególnych faz.

5. Straty mocy

Moc strat ciepłych na jednostkę długości ekranu określić można z prawa Joule'a-Lenza [4] w postaci:

$$P = \frac{1}{\sigma} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} |\underline{J}_z|^2 r dr d\varphi, \quad (13)$$

gdzie:

$|\underline{J}_z|^2$ - kwadrat modułu wektora gęstości prądu indukowanego w ekranie.

Wektor gęstości prądu indukowanego w ekranie jest równy:

$$\underline{J}_z = 1_z \underline{E}_z^{\text{w}}, \quad (14)$$

gdzie:

\underline{E}_z^* - zespolona wartość wypadkowego natężenia pola elektrycznego w ekranie (wywołana przepływem prądu w poszczególnych fazach).

W tabelicy 2 zestawiono wartość wektora gęstości prądu indukowanego w ekranie. Znajomość tego wektora pozwala na wyznaczenie, zgodnie z zależnością (13), strat mocy czynnej w ekranie wywołanych indukowanymi prądami wirowymi.

Tabela 2

Wartość wektora gęstości prądu indukowanego w ekranie

Układ	Wektor gęstości prądu \underline{J}_z indukowanego w ekranie
Symetryczny względem osi ekranu	$\underline{J}_z = \frac{j}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_1^{n-1}}{\alpha^n} \frac{L_n}{M_n} \cdot W_2 \cos n\varphi$ <p>gdzie: $W_2 = \underline{I}_{mR} \left[\frac{\sin n(90^\circ - \varphi)}{\sin n\varphi} - \frac{\cos n(90^\circ - \varphi)}{\cos n\varphi} \right] +$ $+ \underline{I}_{mS} \left[\frac{\sin n(30^\circ + \varphi)}{\sin n\varphi} - \frac{\cos n(30^\circ + \varphi)}{\cos n\varphi} \right] + \underline{I}_{mT} \left[\frac{\sin n(210^\circ - \varphi)}{\sin n\varphi} - \frac{\cos n(210^\circ - \varphi)}{\cos n\varphi} \right]$</p>
$L_n = e^{-j\pi/4} K_{n-1}(\tilde{r}_2) J_n(\tilde{r}) + e^{j\pi/4} J_{n-1}(\tilde{r}_2) K_n(\tilde{r})$ $L_n = K_{n-1}(\tilde{r}_2) J_{n-1}(\tilde{r}_1) - K_{n-1}(\tilde{r}_1) J_{n-1}(\tilde{r}_2)$	$\underline{I}_{mR} = \sqrt{2} I$ $\underline{I}_{mS} = \sqrt{2} I (-1/2 + j\sqrt{3}/2)$ $\underline{I}_{mT} = \sqrt{2} I (-1/2 - j\sqrt{3}/2)$

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę obliczania strat mocy czynnej w ekranach metalowych trójfazowych, trójprzewodowych układów przesyłowych. Zaprezentowana metoda uzależnia wartości strat od:

- wymiarów poprzecznych ekranu,
- parametrów elektrycznych materiału, z którego wykonany jest ekran,
- sposobu ułożenia przewodów fazowych względem osi ekranu,
- odległości przewodów fazowych od ekranu.

Uwzględnia ona:

- nierównomierność pola magnetycznego we wnętrzu ekranu, wynikającą z geometrii układu i przesunięć fazowych prądów poszczególnych faz,
- zniekształcenie obrazu pola magnetycznego wywołane obecnością metalowego ekranu.

Metoda może być stosowana do wyznaczania strat w ekranach kabli trójżyłowych z izolacją rdzeniową jak i w ekranowanych trójfazowych, trójprzewodowych układach przesyłowych oraz adaptowana dla układów o dowolnym ułożeniu przewodów fazowych względem osi ekranu.

LITERATURA

- [1] Emanuel A., Doepken H.C.: Calculation of losses in Steel Enclosures of Three Phase Bus on Cables. IEEE Trans. Pow. App. and System, nr 6, 1974.
- [2] Kawasaki K., Inami H., Ishikawa T.: Theoretical Considerations on eddy-current Losses in non-magnetic and magnetic pipes for power transmission systems. IEEE Trans. Pow. App. and System, February 1981, nr 1
- [3] Poltz J., Grzybowski S., Bartkowiak E.: Pole magnetyczne wokół kabla 3-żyłowego w powłoce metalowej. IV Seminarium Sieci kablowe 110 kV, Elektroprojekt, Gliwice 1980.
- [4] Goworkow A.W.: Pole elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1962.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Czesław Królikowski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

ПОТЕРИ В ОБОЛОЧКЕ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

Резюме

В статье представлен способ вычисления активной потери от вихревых токов в оболочке трёхфазной трёхпроводной системы.

EDDY-CURRENT POWER LOSSES IN METAL ENCLOSURES OF THREE-PHASE BUS OR CABLES

Summary

This paper derives a method of calculating eddy-current power losses in metal enclosures of three-phase bus or cables.