

Wiktor KIŚ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

ALGORYTM OBLICZEŃ OBCIĄŻEŃ JEDNOSTKOWYCH ŁUKU ELEKTRYCZNEGO NA OSPRZĘCIE ŁUKOCHRONNYM IZOLATORÓW LINIOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono próbę znalezienia zależności między kształtem osprzętu łukochronnego a rozkładem sił elektrodynamicznych wzdłuż łuku. Obliczenia wykonywane są przy założeniach upraszczających dotyczących kształtu osprzętu. Praktyczne wykorzystanie otrzymanych zależności ilustruje przykład obliczeń dla jednego z obecnie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

1. Wprowadzenie

Łuk elektryczny zapalony na łańcuchu izolatorowym linii wysokiego napięcia w wyniku przepięcia lub przeskoaku zabrudzeniowego utrzymuje się najczęściej aż do przerwania prądu przez wyłącznik. Wydzielona w tym czasie duża ilość ciepła stwarza zagrożenie termiczne izolatorów, osprzętu izolatorowego, przewodu roboczego i w mniejszym stopniu konstrukcji słupa. W izolatorach najbardziej zagrożona jest porcelana, ze względu na jej dużą wrażliwość na gwałtowne zmiany temperatury. Szkodliwe działanie łuku na elementy metalowe polega na obniżaniu ich wytrzymałości mechanicznej na skutek ubytków materiału w miejscach palenia się łuku.

Przyczyną awarii zapoczątkowanej zwarcie na łańcuchu izolatorowym są najczęściej termiczne uszkodzenia izolatorów. Zakres uszkodzeń zależy oczywiście od parametrów zwarcia, ale nie mniejsze znaczenie ma odległość łuku od izolatorów. Powodując szybkie odrzucenie łuku na możliwie dużą odległość od powierzchni izolatorów, można znacznie zmniejszyć prawdopodobieństwo ich uszkodzenia. Stosowane są w tym celu specjalne konstrukcje osprzętu, zwanego ochronnym lub łukochronnym. Wspólną cechą zdecydowanej większości tych konstrukcji jest dążenie do racjonalnego wykorzystania oddziaływań elektrodynamicznych, zachodzących między osprzętem ochronnym i łukiem, spowodowanych przepływającym przez nie prądem zwarcia.

Siły elektrodynamiczne mają duży wpływ na kierunek i szybkość poruszania się łuku, zwłaszcza przy prądach zwarciovych rzędu wielu tysięcy amperów. Wielkość i kierunek działania sił elektrodynamicznych w istotny

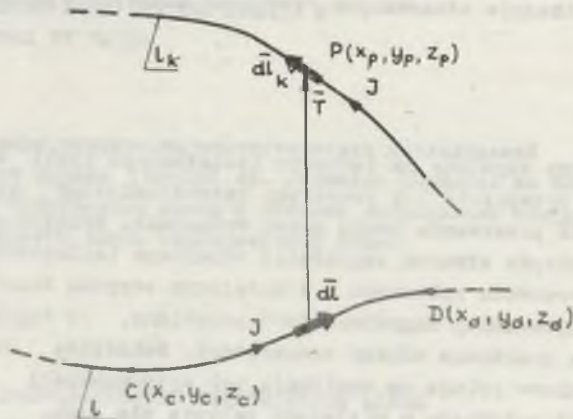
sposób zależą od kształtu osprzętu ochronnego. Należy jednak podkreślić, że obliczenia rozkładu sił działających na łuk, wykonywane zwykle na etapie prac konstruktorskich, są kłopotliwe nawet przy stosunkowo prostym kształcie osprzętu, ze względu na przestrzenny układ obwodu zwarcia.

Poniżej przedstawiono próbę znalezienia ogólnej zależności między kształtem osprzętu a rozkładem sił elektrodynamicznych wzdłuż łuku.

2. Zależności ogólne

Przewód roboczy, osprzęt i łuk stanowią rozpatrywaną część obwodu zwarcia. Zakłada się, że ta część obwodu jest jednowymiarowa (idealnie cienka). Niech jej kształt przestrzenny przedstawia na rys. 1 krzywa 1, której części l_k odpowiada kanał łuku.

Siła elementarna $d\vec{F}$, działająca na nieskończenie mały odcinek łuku dl_k w polu magnetycznym, określona jest zależnością:



Rys. 1. Dwa dowolne fragmenty krzywej 1 reprezentujące część obwodu zwarcia

$$d\vec{F} = I(d\vec{l}_k \times \vec{B}) \quad (1)$$

gdzie: I - prąd zwarcia w funkcji czasu,

$d\vec{l}_k$ - wektor, którego moduł równy jest długości odcinka dl_k a zwrot zgodny z kierunkiem przepływającego w nim prądu,

\vec{B} - wektor indukcji magnetycznej w środku odcinka dl_k .

Siła elektrodynamiczna, działająca na jednostkę długości (obciążenia jednostkowe) idealnie cienkiego łuku wynosi:

$$\vec{p} = I(\vec{i}_k \times \vec{B}) \quad (2)$$

przy czym

$$\vec{i}_k = \frac{d\vec{l}_k}{dl_k} \quad (3)$$

jest wektorem jednostkowym, stycznym do dl_k .

Wektor indukcji magnetycznej zależy od prądu zwarcia płynącego w obwodzie 1 oblicza się następująco:

$$\vec{B} = \frac{I\mu}{4\pi} \int_1 \frac{(d\vec{l}_k \times \vec{r})}{r^3} \quad (4)$$

gdzie:

μ - przenikalność magnetyczna powietrza,

dl - nieskończenie mały odcinek krzywej 1,

$d\vec{l}$ - wektor, którego moduł równy jest długości odcinka dl , a zwrot zgodny z kierunkiem przepływającego w nim prądu,

\vec{r} - wektor, którego moduł równy jest odległości r między środkami odcinków: dl i dl_k , a zwrot odpowiada strzałce skierowanej do odcinka dl_k .

Jeżeli krzywa 1 jest przedziałami regularna i określona równaniami parametrycznymi:

$$x = X(t); \quad y = Y(t); \quad z = Z(t) \quad (5)$$

to zależność (4) dla przedziału regularności $C(x_c, y_c, z_c) - D(x_d, y_d, z_d)$ może być zapisana w postaci:

$$\vec{B} = \frac{I\mu}{4\pi} \int_{t_c}^{t_d} \frac{i N(t)dt + jR(t)dt + kW(t)dt}{(U(t))^{3/2}} \quad (6)$$

gdzie:

$$N(t) = [z_p - Z(t)] Y'(t) - [y_p - Y(t)] Z'(t)$$

$$R(t) = [x_p - X(t)] Z'(t) - [z_p - Z(t)] X'(t)$$

$$W(t) = [y_p - Y(t)] X'(t) - [x_p - X(t)] Y'(t)$$

$$U(t) = [x_p - X(t)]^2 + [y_p - Y(t)]^2 + [z_p - Z(t)]^2$$

(x_p, y_p, z_p) - współrzędne środka odcinka dl_k .

Krzywa l_k jako część krzywej 1 jest przedziałami regularna i w przedziale zawierającym punkt $P(x_p, y_p, z_p)$ opisana jest równaniami parametrycznymi:

$$x_k = X_k(\tau); \quad y_k = Y_k(\tau); \quad z_k = Z_k(\tau) \quad (8)$$

Wektor jednostkowy (3) w punkcie P równy jest:

$$\vec{T}_k = \frac{i X'_k(\tau_p) + j Y'_k(\tau_p) + k Z'_k(\tau_p)}{\sqrt{[X'_k(\tau_p)]^2 + [Y'_k(\tau_p)]^2 + [Z'_k(\tau_p)]^2}} \quad (9)$$

Wstawiając zależności (9) i (6) do wzoru (2) otrzymuje się w punkcie P trzy składowe obciążenia jednostkowego p w postaci:

$$P_x = \frac{\mu I^2}{4\pi S(\tau_p)} \left[Y'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{W(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} - Z'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{R(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} \right] \quad (10)$$

$$P_y = \frac{\mu I^2}{4\pi S(\tau_p)} \left[Z'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{N(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} - X'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{W(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} \right] \quad (11)$$

$$P_z = \frac{\mu I^2}{4\pi S(\tau_p)} \left[X'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{R(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} - Y'_k(\tau_p) \int_{t_c}^t \frac{N(t) dt}{[U(t)]^{3/2}} \right] \quad (12)$$

$$\text{gdzie: } S(\tau_p) = \sqrt{[X'_k(\tau_p)]^2 + [Y'_k(\tau_p)]^2 + [Z'_k(\tau_p)]^2} \quad (13)$$

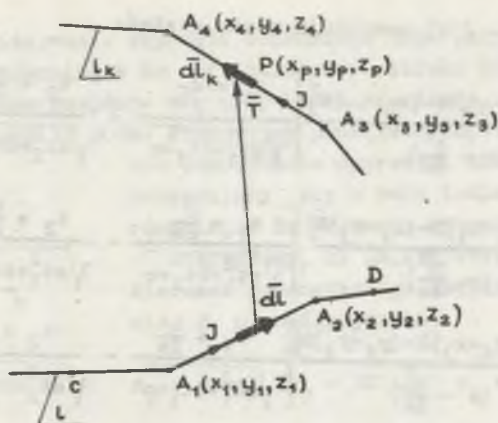
W uzyskanych zależnościach nie wykonano całkowania i z tego powodu bezpośrednie ich wykorzystanie nie upraszcza jeszcze obliczeń. Dalsze przekształcenia zależności (10) - (12), zmierzające do nadania im postaci bardziej funkcjonalnej, wymagają bliższego określenia kształtu rozpatrywanego fragmentu obwodu zwarcia.

3. Algorytm obliczeń

Każdy element rzeczywistego toru zwarcia określony przez fragment krzywej 1 można rozpatrywać oddzielnie. Niektóre z tych elementów jak np. przewód roboczy, mają kształt linii prostej. Pozostałe można zastąpić w obliczeniach linią łamaną, złożoną z odcinków prostych (rys. 2).

Niech dowolny z tych odcinków łączy punkty $A_1(x_1, y_1, z_1)$ i $A_2(x_2, y_2, z_2)$ wówczas prosta, a której ten odcinek leży, opisana jest równaniem:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} = t \quad (14)$$



Rys. 2. Fragmenty krzywej l z rys. 1 zastąpione odcinkami prostych

W celu obliczenia jednostkowego obciążenia łuku w dowolnym punkcie $P(x_p, y_p, z_p)$ leżącym na krzywej l_k , należy określić styczną do krzywej w tym punkcie. Przechodzi ona przez punkty: $A_3(x_3, y_3, z_3)$ i $A_4(x_4, y_4, z_4)$ i opisana jest równaniem:

$$\frac{x - x_3}{x_4 - x_3} = \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} = \frac{z - z_3}{z_4 - z_3} = \tau \quad (15)$$

Z zależności (7) i (14) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} N &= (z_p - z_1)(y_2 - y_1) - (y_p - y_1)(z_2 - z_1) \\ R &= (x_p - x_1)(z_2 - z_1) - (z_p - z_1)(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (16)$$

$$W = (y_p - y_1)(x_2 - x_1) - (x_p - x_1)(y_2 - y_1)$$

oraz:

$$U(t) = at^2 + bt + c \quad (17)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} a &= (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \\ b &= -2 [(x_p - x_1)(x_2 - x_1) + (y_p - y_1)(y_2 - y_1) + (z_p - z_1)(z_2 - z_1)] \\ c &= (x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 + (z_p - z_1)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Zależności (10) - (12) przyjmują wtedy postać:

$$\begin{aligned}
 P_x &= \frac{\mu I^2 [(y_4 - y_3)W - (z_4 - z_3)R]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{t_1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_1^2 + bt_1 + c}} - \frac{t_2 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_2^2 + bt_2 + c}} \right] \\
 P_y &= \frac{\mu I^2 [(z_4 - z_3)N - (x_4 - x_3)W]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{t_1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_1^2 + bt_1 + c}} - \frac{t_2 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_2^2 + bt_2 + c}} \right] \\
 P_z &= \frac{\mu I^2 [(x_4 - x_3)R - (y_4 - y_3)N]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{t_1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_1^2 + bt_1 + c}} - \frac{t_2 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{at_2^2 + bt_2 + c}} \right]
 \end{aligned} \quad (19)$$

przy czym:

$$S = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} \quad (20)$$

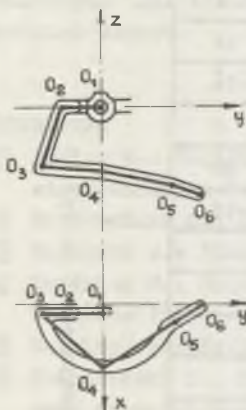
Jeżeli granice całkowania (t_1, t_2) pokrywają się z wartościami parametru t dla punktów A_1 i A_2 , tak jak to jest w zależnościach (19), wówczas zależności te mają postać:

$$\begin{aligned}
 P_x &= \frac{\mu I^2 [(y_4 - y_3)W - (z_4 - z_3)R]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{a+b+c}} - \frac{b}{2a\sqrt{c}} \right] \\
 P_y &= \frac{\mu I^2 [(z_4 - z_3)N - (x_4 - x_3)W]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{a+b+c}} - \frac{b}{2a\sqrt{c}} \right] \\
 P_z &= \frac{\mu I^2 [(x_4 - x_3)R - (y_4 - y_3)N]}{4\pi S (c - \frac{b^2}{4a})} \left[\frac{1 + \frac{b}{2a}}{\sqrt{a+b+c}} - \frac{b}{2a\sqrt{c}} \right]
 \end{aligned} \quad (21)$$

Wzory w postaci (21) nadają się już do bezpośredniego wykorzystania i mają tę zaletę, że umożliwiają prowadzenie obliczeń w sposób szablonowy. Określają one jednostkowe obciążenie łuku w dowolnym punkcie P, wywołane przepływem prądu w dowolnym prostym odcinku A_1A_2 obwodu zwarcia. Całkowite obciążenie jednostkowe w punkcie P liczy się, sumując odpowiednie składowe obciążenia, wywołane prądem płynącym w poszczególnych odcinkach składających się na obwód zwarcia.

4. Przykład obliczeń

Rozpatrzmy oddziaływanie osprzętu ochronnego typu spiralnego (rys. 3) na łuk palący się równoległe do osi izolatorów, blisko ich powierzchni, w chwili gdy stopa łuku znajduje się przy końcu elektrody osprzętu (punkt O_6) a prąd ma wartość 10 000A. Przyjmijmy początek współrzędnych w punkcie zamocowania osprzętu, kierunek osi "z" pokrywający się z osią izolatora a osi "x" równoległy do przewodu roboczego (rys. 3).



Przypuśćmy, że należy obliczyć wielkość i kierunek jednostkowego obciążenia łuku w punkcie P o współrzędnych:

$$x_p = 0 \text{ cm} \quad y_p = 20 \text{ cm} \quad z_p = - 22 \text{ cm}$$

Ponieważ łuk jest w pobliżu punktu P równoległy do osi izolatorów, to styczna do niego w tym punkcie przechodzi również przez punkty $O_7 (0,20,0)$ $O_8 (0,20,-1)$.

Rzeczywisty kształt przestrzenny osprzętu można z dowolną dokładnością zastąpić linią łamaną składającą się z pewnej ilości odcinków prostych. W przedstawianym przykładzie zastąpiono rzeczywisty kształt osprzętu linią łamaną $O_1 O_2 O_3 O_4 O_5 O_6$, złożoną z pięciu odcinków różnych prostych. Punkty $O(x,y,z)$ mają następujące współrzędne:

$$O_1 (2,0,0) \quad O_2 (2,-8,0) \quad O_3 (2,-12,-11), \quad O_4 (13,0,-13) \quad O_5 (4,14,-16) \\ O_6 (0,20,-18).$$

Współrzędne x_1, y_1, z_1 i x_2, y_2, z_2 , występujące we wzorach (16), (18), (20) i (21), określają końce odcinka zastępującego rozpatrywany fragment osprzętu, natomiast x_3, y_3, z_3 i x_4, y_4, z_4 wyznaczają dwa dowolne punkty leżące na stycznej do łuku w punkcie P. Wartości tych współrzędnych dla poszczególnych odcinków zestawiono w górnej części tablicy nr 1. Środkowa część tablicy podaje wyniki obliczeń pomocniczych a dolna część - ostateczne wyniki.

Jednostkowe obciążenie łuku siłami elektrodynamicznymi w punkcie P, w warunkach przedstawionego przykładu wynosi:

$$\bar{p} = -i0,994 + j1,470 \text{ N/cm}$$

Analogiczne obliczenia można przeprowadzić dla dowolnego punktu na kolumnie łuku i dla dowolnego kształtu osprzętu.

Tablica 1

Obliczanie jednostkowych obciążeń elektrodynamicznych kanału żuku.
Wyjściowe dane liczbowe, etapy obliczeń i wyniki końcowe

Odcinek (wg rys. 3)			0 ₁ 0 ₂	0 ₂ 0 ₃	0 ₃ 0 ₄	0 ₄ 0 ₅	0 ₅ 0 ₆	Uwagi	
Wielkości dane	x ₁		2	2	2	13	4	Oznaczenia dostosowano do rys. 2	
	y ₁		0	-8	-12	0	14		
	z ₁		0	0	-11	-13	-16		
	x ₂		2	2	13	4	0		
	y ₂		-8	-12	0	14	20		
	z ₂		0	-11	-13	-16	-18		
	x ₃		0						
	y ₃		20						
	z ₃		0						
	x ₄		0						
	y ₄		20						
	z ₄		-1						
	x _p		0						
	y _p		20						
	z _p		-22						
	I	A	10 000						
μ	H/m	4π10 ⁻⁷							
Wielkości obliczone		wzór nr	Wartości obliczone					Sumaryczny wynik końcowy	
Obliczenia pomocnicze	N	cm ²	16	176	396	-68	-66	-24	
	R	cm ²	16	0	22	125	-42	-16	
	S	cm	20	1	1	1	1	1	
	a	cm ²	18	64	137	269	286	56	
	b	cm ²	18	320	-260	-788	-848	-128	
	c	cm ²	18	888	1272	1149	650	88	
Obliczenia obciążeń	p _x	N/cm	19	0	0,005	0,054	-0,132	-0,921	-0,994
	p _y	N/cm	19	-0,051	-0,097	0,030	0,207	1,381	1,470
	p _z	N/cm	19	0	0	0	0	0	0

5. Podsumowanie

Otrzymane zależności znacznie ułatwiają obliczenie wielkości sił elektrodynamicznych występujących w skomplikowanych obwodach przestrzennych osprzętu łukochronnego. Zależności te traktować można jako algorytm, przydatny szczególnie w przypadku wykonywania dużej serii obliczeń elektrodynamicznych dla alternatywnych rozwiązań technicznych osprzętu w liniach wysokich napięć.

LITERATURA

- [1] Ballus H.: Beitrag zur Berechnung elektromagnetischer Kräfte zwischen stromführenden Leitern", ETZ-A Bd 90 1969 H. 21 s. 539-544.
- [2] Suffczyński M.: Elektrodynamika. PWN Warszawa 1965 r.
- [3] Turowski J.: Elektrodynamika techniczna. WNT Warszawa 1968.
- [4] Kurdziel R.: Działania cieplne i dynamiczne prądów zwarciovych. PWT Warszawa 1965.
- [5] Katalog wyrobów BELOS - 1973. Osprzęt ochronny.
- [6] Stępniewski T., Kiś W., Karnowski M.: Modernizacja osprzętu ochronnego przeciwłukowego dla linii elektroenergetycznych 110-400 kV. Politechnika Śląska 1968 r. Dok. techniczna NB-187/137/E9/2/2/69.
- [7] Choljajewskij G.B.: Raszcziot elektrodinamicheskich usilij w električeskich apparatach. "Energia" 1971 r.

Przyjęto do druku w październiku 1975 r.

АЛГОРИТМ РАССЧЕТОВ УДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ДУГОЗАЩИТНОЙ АРМАТУРЕ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Резюме

В статье представлены попытки определения зависимости между формой дугозащитной арматуры и распределением электродинамических сил вдоль дугового канала. Вычисления делались исходя из упрощённых предпосылок, касающихся формы арматуры. Практическое использование полученных зависимостей иллюстрирует пример вычислений для одного из используемых в настоящее время конструктивных решений.

