



Michał Daszczyszak\*

## ELEKTRODYNAMICZNE ODDZIAŁYWANIE PRĄDÓW ZWARCIOWYCH NA IZOLATORY WSPORCZE

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono elektrodynamiczne oddziaływanie prądów zwarciovych w rozdzielniach najwyższych napięć z oszynowaniem giętkim na izolatory wsporcze. Ponieważ analiza dynamiki oszynowania giętkiego jest bardzo skomplikowana, dlatego wykorzystano do tego celu specjalny program komputerowy — „TUT-Fs”.

**Słowa kluczowe:** zwarcie, oddziaływanie elektrodynamiczne, izolatory wsporcze

### 1. Wstęp

Przepływowi prądu zwarciovego przez oszynowanie giętkie zawieszony pomiędzy elementami wsporczymi, towarzyszą m.in. dwa zjawiska:

- oddziaływanie dynamiczne pomiędzy przewodami samej wiązki,
- oddziaływanie dynamiczne pomiędzy fazami.

Skutki dynamiczne prądów zwarciovych w rozdzielniach z przewodami giętkimi są znacznie bardziej złożone niż w rozdzielniach z przewodami sztywnymi. Występują tu bowiem znaczne ruchy przewodów, które wpływają na siły zarówno wskutek zmiany odległości oddziaływujących na siebie przewodów przewodzących prąd zwarciovą, jak i wskutek energii kinetycznej poruszających się mas przewodów.

Całkowita siła działająca na element wsporczy  $j$ -tej fazy, pochodząca od reakcji oszynowania giętkiego powstałej na skutek elektrodynamicznego działania prądu zwarciovego zależy głównie od:

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

- wartości prądu zwarcowego  $I_Z$ ,
- rodzaju zwarcia  $i$ ,
- czasu zwarcia  $t_z$ ,
- kąta zwarcia  $\varphi_z$ ,
- temperatury przewodów  $\theta_p$ ,
- naciągu statycznego w przewodach przed wystąpieniem zwarcia  $F_{st}$ ,
- kąta przesunięcia między fazami  $\beta_{2+z}$  (dla zwarć 2-fazowych z ziemią).

Wartość prądu zwarcowego, dla badanego miejsca zwarcia, otrzymuje się za pomocą metody optymalizacyjnej SBS — pkt. 3., lub metody „sumowania” macierzy [2]. Natomiast naciąg statyczny w przewodach, w chwili przed wystąpieniem zwarcia zależy od naciągu montażowego i temperatury przewodów.

## 2. Model obiektu

Badany element to para izolatorów wsporczych NN, pomiędzy którymi zawieszono jest oszynowanie giętkie. Badany element zastąpiono modelem fizycznym, który składa się z trzech wzajemnie powiązanych ze sobą części:

- a) przewodu wiązkowego pojedynczej fazy,
- b) poszczególnego przewodu wiązki  $n$ -przewodowej,
- c) izolatorów wsporczych.

Przewód wiązkowy pojedynczej fazy utożsamiono z wahadłem fizycznym — „THE PENDULUM MODEL”. Natomiast elementy wsporcze zastąpiono (w sposób uproszczony) układem sprężystym, charakteryzującym się określoną sprężystością  $S_I$  oraz masą  $M_I$  [1].

Powyżej przedstawiony model opisano układem silnie nieliniowych i wzajemnie ze sobą powiązanych równań różniczkowych (1÷4) a następnie rozwiązano za pomocą autorskiego programu komputerowego „TUT-Fs”, służącego do wyznaczania przebiegów czasowych siły  $F_S$  działającej na element wsporczy w  $j$ -tej fazie. Odpowiedzią programu na zadane wymuszenie (prąd zwarcowy) są wykresy sił  $F_S$  w poszczególnych fazach — rys. 1.

$$M_p \cdot \frac{2}{3} \left( \ddot{f}_j - f_j \cdot \dot{\alpha}_j^2 + f_j \frac{12 \cdot F_{Sj}}{M_p \cdot L} \right) = F_{dj}'' \sin \alpha_j + M_p g \cos \alpha_j \quad (1)$$

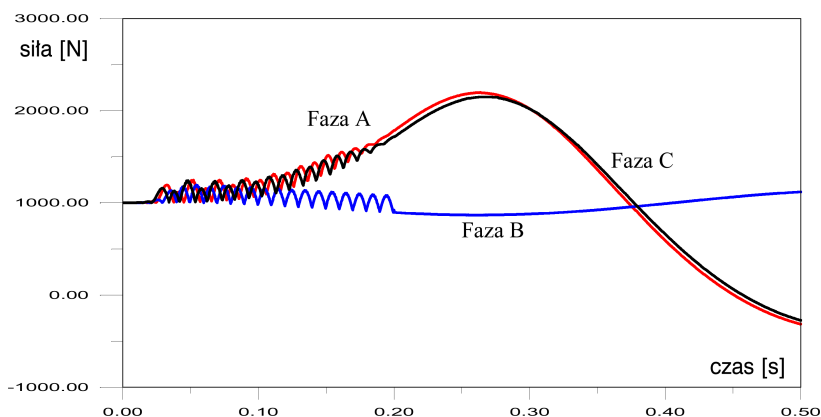
$$M_p \cdot \frac{2}{3} \left( \ddot{\alpha}_j \cdot f_j + 2\dot{\alpha}_j \cdot \dot{f}_j \right) = F_{dj}'' \cos \alpha_j - M_p g \sin \alpha_j \quad (2)$$

$$M_I \cdot \ddot{w}_j + S_I \cdot w_j = F_{Sj} \quad (3)$$

Siłę działającą na badany izolator wsporczy wyznacza się na podstawie prawa Hooke'a z zależności:

$$F_{Sj} = F_{stj} + \frac{n \cdot S_n \cdot Y}{L} (\Delta l_{pj} + \Delta l_{fj} + \Delta l_{wj}) \quad (4)$$

gdzie:  $w_j$  – odchylenie izolatora wsporczeo  $j$ -tej fazy,  $M_I$  – masa izolatora wsporczeo,  $S_I$  – sprężystość izolatora wsporczeo,  $F_{stj}$  – naciąg statyczny przewodu wiązkowego  $j$ -tej fazy,  $n$  – liczba przewodów w wiązce,  $S_n$  – przekrój pojedynczego przewodu w wiązce,  $Y$  – moduł Young’a przewodu wiązkowego,  $\Delta l_{pj}$  – przyrost długości przewodu wiązkowego spowodowany „sklejaniem” się wiązki,  $\Delta l_{fj}$  – przyrost długości przewodu wiązkowego spowodowany zmianą zwisu przewodu,  $\Delta l_{wj}$  – przyrost długości przewodu wiązkowego spowodowany odchyleniem elementów wsporczych.



Rys. 1. Przebieg czasowy sił działających na elementy wsporcze w trzech fazach

### 3. Metoda optymalizacyjna SBS

Metoda optymalizacyjna służy do wyznaczania prądu zwarcia w analizowanym punkcie  $z$ , za pomocą stopniowego przybliżania się „krok po kroku” („Step By Step” — stąd nazwa metody — SBS) do wyniku finalnego. Całkowite straty mocy w rozpatrywanej sieci elektroenergetycznej, w czasie trwania zwarcia wynoszą:

$$\Delta Q_z = \sum (\alpha_j - \alpha_i)^2 \cdot Y_{ji} \quad (5)$$

**Twierdzenie 1:** Prąd zwarcia w analizowanym punkcie „ $z$ ” powoduje optymalny rozptył prądów w rozpatrywanej sieci, a co za tym idzie minimalne straty mocy:

$$\Delta Q_z = \min \Delta Q \quad (6)$$

**Twierdzenie 2:** Całkowite straty mocy (względne) w czasie trwania zwarcia, w analizowanym punkcie „ $z$ ” równają się co do wartości prądowi zwarcia:

$$\Delta Q_z = I_z \quad (7)$$

### 3.1. Algorytm postępowania

I. Należy wyznaczyć względne napięcia średnie dla całej rozpatrywanej sieci:

$$\alpha_1 = \dots = \alpha_i = \dots = \alpha_n = \alpha \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta Q_z(\alpha) = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \alpha_{\text{śr}} = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \alpha^0 = \begin{bmatrix} \alpha_{\text{śr}} \\ \vdots \\ \alpha_{\text{śr}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Wyznaczone napięcie jest punktem startowym w optymalizacyjnej metodzie SBS.

Uwaga — zamiast względnego napięcia średniego, punktem startowym w tej metodzie mogą być względne napięcia otrzymane z generatora liczb losowych w przedziale  $0,001 \div 0,999$ .

II. Wyznaczenie rozwiązania optymalnego:

Poniższą procedurę obliczeniową należy wykonywać do momentu, kiedy otrzymany błąd nie będzie większy od wartości dopuszczalnej, np. 1%:

$$\delta_{Iz\%} \leq \delta_{\text{dop}\%} = 1\% \quad (10)$$

przy czym :

$$\delta_{Iz\%} = \max\{\delta'_{Iz\%}, \delta''_{Iz\%}\} \quad (11)$$

gdzie:

$$\delta'_{Iz\%} = \left| \frac{\Delta Q_z - \sum_{i=1}^n I_{Gi}}{\Delta Q_z} \right| \cdot 100\% \quad (12)$$

$$\delta''_{Iz\%} = \left| \frac{\Delta Q_z - \sum_{i=1}^n I_{iz}}{\Delta Q_z} \right| \cdot 100\% \quad (13)$$

**1-szy krok** — w oparciu o macierz  $\alpha^0$  wyznacza się:

$$\alpha^{11} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_{\text{śr}} \\ \vdots \\ \alpha_{\text{śr}} \end{bmatrix}; \quad \alpha_1 = \text{var} \quad \alpha_{\text{śr}} = \text{const}$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \Delta Q_z(\alpha^{11}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_1^1 = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \alpha^{12} = \begin{bmatrix} \alpha_1^1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{\text{śr}} \\ \vdots \\ \alpha_{\text{śr}} \end{bmatrix}$$

**2-gi krok** — w oparciu o macierz  $\alpha^{12}$  wyznacza się:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_2} \Delta Q_z(\alpha^{12}) = 0 \implies \alpha_2^1 = \text{const} \implies \alpha^{13} = \begin{bmatrix} \alpha_1^1 \\ \alpha_2^1 \\ \alpha_3 \\ \alpha_{\acute{s}r} \\ \vdots \\ \alpha_{\acute{s}r} \end{bmatrix}$$

***i*-ty krok:**

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_i} \Delta Q_z(\alpha^{1i}) = 0 \implies \alpha_i^1 = \text{const} \implies \alpha^{1i+1} = \begin{bmatrix} \alpha_1^1 \\ \vdots \\ \alpha_i^1 \\ \alpha_{i+1} \\ \alpha_{\acute{s}r} \\ \vdots \\ \alpha_{\acute{s}r} \end{bmatrix}$$

***n*-ty krok:**

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_n} \Delta Q_z(\alpha^{1n}) = 0 \implies \alpha_n^1 = \text{const} \implies \alpha^1 = \begin{bmatrix} \alpha_1^1 \\ \vdots \\ \alpha_i^1 \\ \vdots \\ \alpha_n^1 \end{bmatrix}$$

W oparciu o wyznaczoną macierz  $\alpha_1$  należy obliczyć  $\Delta Q_Z(\alpha_1)$  oraz  $\delta_{Iz\%}(\alpha_1)$ , a następnie należy sprawdzić warunek (10).

Jeżeli warunek został spełniony to macierz  $\alpha_1$  jest rozwiązaniem optymalnym, jeżeli nie to powyższą procedurę należy powtarzać tyle razy, np.  $k$ , aż uzyskamy poprawny wynik:

$$\alpha^k = \begin{bmatrix} \alpha_1^k \\ \vdots \\ \alpha_i^k \\ \vdots \\ \alpha_n^k \end{bmatrix}$$

Oznacza to, że uzyskane rozwiązanie jest rozwiązaniem optymalnym oraz obliczone całkowite straty mocy  $\Delta Q_Z$ , równają się co do wartości prądowi zwarcia w analizowanym punkcie  $z$  — zależność (7).

## 4. Podsumowanie

Przyjęty model matematyczny badanego elementu stał się podstawą programu komputerowego „TUT-Fs”, który pozwala analizować dynamikę oszynowania giętkiego  $n$ -przewodowego zawieszonego pomiędzy elementami wsporczyymi (konstrukcjami lub izolatorami). Otrzymane na drodze obliczeniowej wyniki są zbieżne z rezultatami pomiarów [1], co potwierdza poprawność przyjętego modelu. Na podstawie bazy programowej (program „TUT-Fs”) można w przyszłości tak projektować oszynowanie giętkie w stacjach, aby zminimalizować ryzyko związane z przekroczeniem wytrzymałości mechanicznej elementów wsporczych. Natomiast wartość prądu zwarciovego, dla badanego miejsca zwarcia, otrzymuje się za pomocą metody optymalizacyjnej SBS.

## Literatura

- [1] **Daszczyszak M.**: *Damage Analysis in High Voltage Station with Strain Bus System*, materiały 7th International Symposium SCC'96, Warsaw, 10–12 September 1996, Rep. 2.8
- [2] **Daszczyszak M.**: *Alternatywna metoda wyznaczania prądu zwarciovego*, Materiały IV Sympozjum MMwEE '98, str. 495–500, Zakopane 22–24.10.1998
- [3] PN-88/E-06313: *Dobór izolatorów liniowych i stacyjnych pod względem wytrzymałości mechanicznej*
- [4] PN-89/E-06307: *Elektroizolacyjne materiały ceramiczne. Metody badań*
- [5] PN-90/E-06322/01: *Elektroenergetyczne izolatory wysokonapięciowe. Izolatory wsporcze. Wymagania*
- [6] PN-90/E-06322/02: *Elektroenergetyczne izolatory wysokonapięciowe. Izolatory wsporcze. Badania*

### ELECTRODYNAMIC INTERACTION BETWEEN SHORT-CIRCUIT CURRENTS ON SUPPORTING INSULATORS

The paper refers electrodynamic interaction between short-circuit currents with flexible bus system on supporting insulators at power station. The analysis of flexible busbar systems is much more complicate. For calculating short-circuit forces in bundled conductors and the mechanical loads on supporting insulators one uses „TUT-Fs” — computer program.