



Michał DASZCZYSAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Narażenia mechaniczne izolatorów w czasie trwania zwarcia

Streszczenie. W referacie przedstawiono analizę elektrodynamicznego oddziaływania prądów zwarciovych, płynących w oszynowaniu giętkim rozdzielni elektroenergetycznej, na izolatory. Ze względu na stopień komplikacji tego zadania obliczeniowego, dla wyznaczenia wielkości powstających sił i obciążeń mechanicznych izolatorów wsporczych zastosowano dedykowany program komputerowy napisany w środowisku Matlab.

Abstract. (Mechanical exposures of insulators during short-circuit current). Analysis of electrodynamic interactions between short-circuit currents in flexible bus system and insulators at electric power substation is presented in the paper. Because of complication level, for calculation of short-circuit forces and mechanical loads on supporting insulators, dedicated computer program written in Matlab was used.

Słowa kluczowe: prąd zwarcia, izolatory, dynamiczne działanie prądów zwarciovych, oszynowanie giętkie.

Keywords: short-circuit current, insulators, dynamic effect of short-circuit currents, flexible bus system.

Wstęp

Oszynowanie giętkie w stacji elektroenergetycznej składa się z trzech fazowych przewodów pojedynczych lub wiązkowych, zawieszonych:

- zawieszonych odciągowo na izolatorach wiszących pomiędzy konstrukcjami wsporczymi,
- łączących pionowo urządzenia stacyjne,
- zawieszonych pomiędzy izolatorami aparatowymi lub wsporczymi.

Przepływ prądu zwarciovego przez oszynowanie giętkie zawieszone pomiędzy izolatorami wsporczymi, powoduje m.in.:

- 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 zwarciovowy, jak i wskutek energii kinetycznej poruszających się mas przewodów. W przypadku konstrukcji wsporczych siły zwarciove działające na przewody, łańcuchy izolatorowe i konstrukcje wsporcze z reguły nie są groźne dla przewodów ani łańcuchów izolatorowych ze względu na duży zapas wytrzymałości mechanicznej. Natomiast konstrukcje wsporcze powinny być uwzględniane przy projektowaniu, ponieważ wartości sił zwarciovych są znacznie większe od naciągu statycznego przewodów, który jest uwzględniany w obliczeniach konstrukcji. Oprócz sił naciągu zwarciovego występują przy zwarciu znaczne ruchy przewodów, które powodują zbliżenia pomiędzy przewodami fazowymi. Jeżeli odstęp między przewodami jest zbyt mały, to może wystąpić zwarcie wtórne. Decydujący w projektowaniu jest przypadek zwarcia dwufazowego, ponieważ występuje wówczas największe zbliżenie przewodów. Natomiast przy połączeniach pomiędzy aparatami rozdzielczymi, w przypadku, gdy długość oszynowania giętkiego nie przekracza kilku metrów, występują zjawiska podobne do efektów w połączeniach między konstrukcjami wsporczymi. Tu jednakże - ze względu na małe zwisy - ruchy przewodów nie prowadzą do zwarcí wtórnych, natomiast naciągi zwarciove mogą stanowić zagrożenie mechaniczne dla izolatorów aparatowych i wsporczych.

Celem przeprowadzenia analizy sił elektrodynamicznych wynikających z oddziaływania prądów zwarciovych napisano program komputerowy w środowisku *Matlab*. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano przykład z zawarty w normie IEC 60865-2 [4].

Narażenia mechaniczne

Narażenia mechaniczne izolatorów związane są z funkcjami, jakie pełnią one w systemie elektroenergetycznym i można je podzielić ze względu na rodzaj obciążenia na:

- rozciągające,
- zginające,
- skręcające,
- ściskające (występują rzadko).

Narażenia mechaniczne mogą mieć charakter statyczny, udarowy lub wibracyjny. Wartości narażeń zależą m.in. od wartości następujących parametrów:

- naciągów przewodów,
- masy przewodów i izolatorów,
- obciążenia przewodów wiatrem,
- obciążenia przewodów sadzą lub oblodzeniem,
- momentów gnących podczas przepływu prądów udarowych i zwarciovych.

Zagadnienia wytrzymałości mechanicznej linii napowietrznych ujęto w normie [7].

Skutki dynamiczne

Prąd zwarciovowy, płynący w przypadku zwarcia, jest znacznie większy od prądu występującego w czasie normalnej pracy sieci. Wyjątkiem od tego są zwarcia w sieciach jednofazowych izolowanych i kompensowanych.

Siła działająca między dwoma przewodnikami jest proporcjonalna do iloczynu wartości chwilowych prądów płynących w tych przewodnikach:

$$(1) \quad F = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a}$$

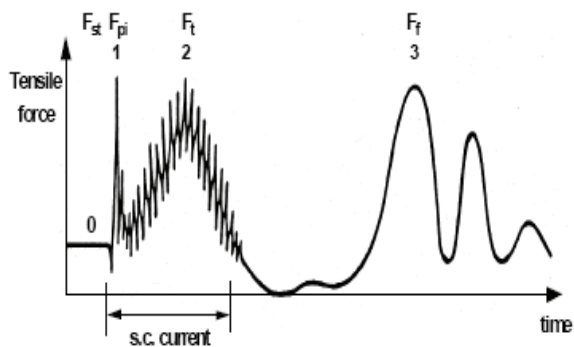
gdzie: μ_0 - stała magnetyczna, i_1, i_2 - wartości chwilowe prądów w przewodach, l - odległość pomiędzy podporami, a - odległość między osiami przewodów.

Skutkiem działania siły elektrodynamicznej jest wystąpienie naprężeń zginających w przewodach sztywnych oraz naprężeń łamiących w izolatorach

wsporczych. Jeśli chodzi o przewody giętkie, siły zwarciove mogą powodować dodatkowe naciągi i wychylenia przewodów oraz rozciąganie lub ściskanie izolatorów wraz z ich osprzętem. Przy napięciu przemiennym siła elektrodynamiczna zmienia się z częstotliwością podwojoną częstotliwości składowej okresowej prądu. Może też prowadzić do dodatkowych naprężeń, a nawet rezonansu mechanicznego układu przewodów sztywnych, jeżeli jego częstotliwość własna jest zbliżona lub równa podwójnej sieciowej częstotliwości technicznej.

Skutki dynamiczne wyrażają się w powstawaniu znacznych naprężeń mechanicznych między sąsiadującymi między sobą przewodami. Naprężenia w przewodach mogą spowodować albo bezpośrednie ich uszkodzenie, albo też uszkodzenie izolatorów lub innych elementów wsporczych linii. Najbardziej widoczne i destrukcyjne skutki działania prądów zwarciowych występują w rozdzielniach, gdzie odległości między przewodami są mniejsze niż w przypadku typowych linii napowietrznych.

Prace nad lepszym poznaniem zjawisk fizycznych zachodzących podczas zwarcia były prowadzone od dłuższego czasu w różnych krajach. Prace te miały na celu uproszczenie oraz ujednoczenie schematów obliczania skutków prądów zwarciowych. Obliczenia skutków prądów zwarciowych w rozdzielniach z przewodami giętkimi zostały dogłębniej przeanalizowane i zbadane, czego efektem było powstanie normy [5] oraz wielu metod numerycznych implementowanych w specjalistycznym oprogramowaniu komputerowym [2,3]. Obecny jej kształt zawarty jest w polskiej normie [6].



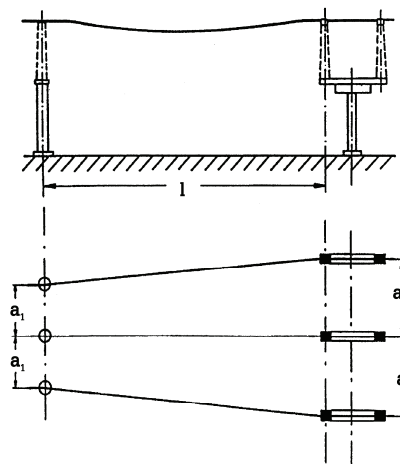
Rys.1. Przykładowy przebieg siły $F_s(t)$ działającej na izolator wsporczy [3] gdzie: F_{pi} - maksymalna siła pochodząca od "sklejania się przewodów" (*pinch effect*), F_t - maksymalna siła pochodząca od elektrodynamicznych oddziaływań międzyfazowych, F_r - maksymalną siłę powstałą w wyniku opadnięcia przewodów po ustąpieniu zwarcia.

Zawarte w normie metody obliczeń pozwalają na obliczenie sił działających na izolatory, naprężeń w przewodach sztywnych i naciągów w przewodach giętkich. W normie tej podano również sposoby obliczania skutków cieplnych w przewodach gołych. W większości przypadków obliczenia z użyciem metod uproszczonych podanych w normie są wystarczające w fazie projektowania, modernizacji oraz budowy elementów systemu elektroenergetycznego. Tylko w nadzwyczajnych przypadkach jest pożądane użycie złożonych metod obliczeniowych.

Norma [6] jest szeroko wykorzystywana i stosowana przy analizie skutków prądów zwarciowych począwszy od fazy projektowania, przez budowę, modernizację oraz eksploatację urządzeń rozdzielczych. Bardzo ważnym wymaganiem w trakcie wyżej wymienionych faz jest zachowanie wytrzymałości mechanicznej rozdzielni zgodnie z zakładanymi poziomami zwarcia.

Przykład obliczeniowy

Celem przeprowadzenia analizy wartości sił działających na izolatory wsporcze będących efektem elektrodynamicznego oddziaływania prądów zwarciowych - wykonano program komputerowy bazujący na normie [6]. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano przykład z zawarty w normie IEC [4].



Rys.2. Analizowana konstrukcja wsporcza z przewodami giętkimi - przykład zawarty w normie IEC [4]

Wprowadzono parametry stałe i zmienne układu.

Parametry stałe:

- A_s - pole przekroju poprzecznego przewodu (242 mm^2),
- m'_s - masa jednostkowa na metr długości przewodu ($0,670 \text{ kg/m}$),
- E - moduł Young'a ($55\,000 \text{ N/mm}^2$),
- a_1 - odstęp między fazami ($1,6 \text{ m}$),
- a_2 - odstęp między fazami ($2,4 \text{ m}$).

Parametry zmienne:

- I''_{k3} - prąd zwarcia trójfazowego,
- T_{k1} - czas trwania zwarcia,
- S - stała sprężystości konstrukcji wsporczej,
- l - długość przęsła.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wartości maksymalnych sił elektrodynamicznych działających na izolatory wsporcze w funkcji parametrów zmiennych, a otrzymane zależności przedstawiono w formie graficznej na rysunkach od 3 do 7.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że decydujący wpływ na wartość maksymalnej siły działającej na izolatory mają parametry:

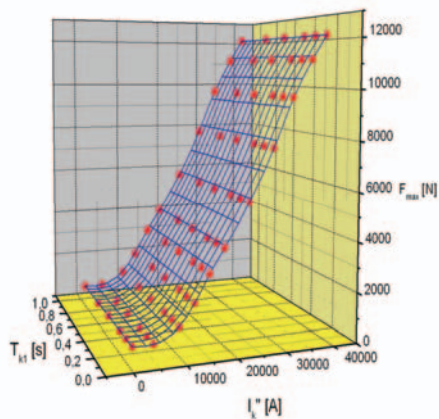
- wartość prądu zwarcia,
- długość przęsła,
- sprężystość konstrukcji wsporczej.

Mniejszy, ale równie znaczący wpływ mają:

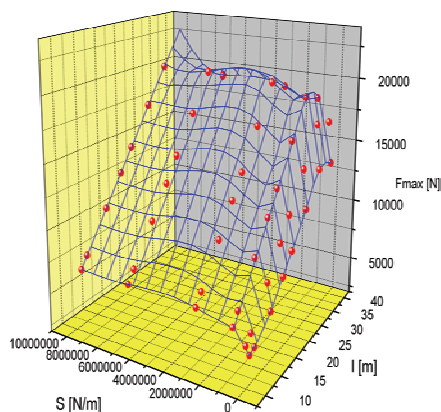
- czas trwania zwarcia,
- długość przewodu,
- zwis przewodu.

Głównym parametrem, od którego zależy siła, jest wartość prądu zwarcia. Siła naciągu statycznego wzrasta dwukrotnie już przy prądzie zwarcia 25 kA , a prawie czterokrotnie przy 40 kA i wysokiej stałej sprężystości konstrukcji, co przekracza wszystkie rezerwy wytrzymałości konstrukcji.

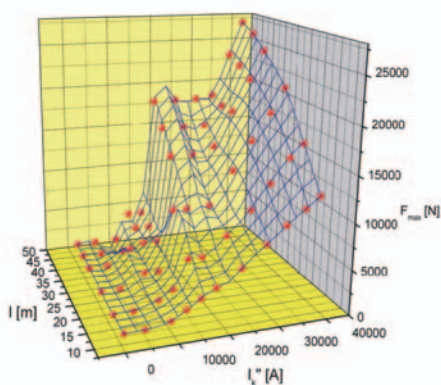
Wręcz z wzrostem długości przęsła rosną siły. Wpływ długości przęsła na maksymalną siłę jest zauważalny dla prądów zwarciowych powyżej 13 kA . Wzrost naciągu statycznego przewodów prowadzi do wzrostu siły maksymalnej.



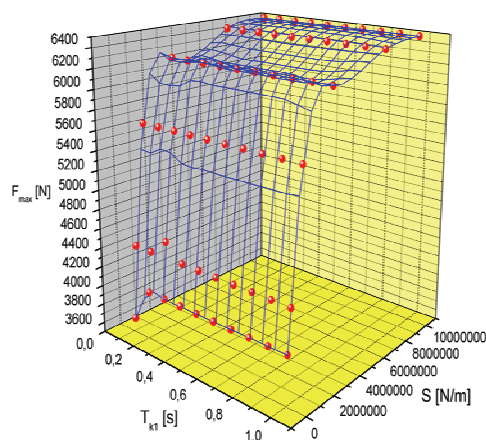
Rys. 3. Maksymalna siła w zależności od czasu trwania zwarcia i prądu zwarcia



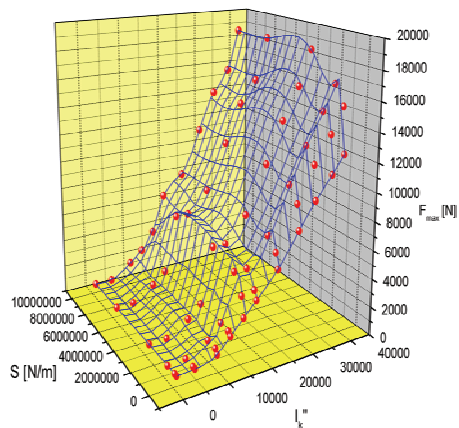
Rys.6. Maksymalna siła w zależności od sprężystości i długości przęsła



Rys.4. Maksymalna siła w zależności od długości przęsła i prądu zwarcia



Rys.7. Maksymalna siła w zależności od sprężystości i czasu trwania zwarcia



Rys.5. Maksymalna siła w zależności od sprężystości i prądu zwarcia

Znaczący wpływ na siły ma stała sprężystości konstrukcji. Zazwyczaj stała sprężystość konstrukcji wsporczych niezależnie od napięcia rozdzielni wynosi od 500 do 1500 kN/m. Specjalnymi przypadkami są konstrukcje żelbetowe, w których wartość stałej konstrukcji przekracza 20000 kN/m. W niektórych przypadkach mała sztywność konstrukcji może okazać się znaczącym parametrem przy ograniczaniu sił maksymalnych.

Czas trwania zwarcia nie ma większego wpływu na wartości maksymalnych sił działającej na izolatory.

LITERATURA

- [1] Daszczyszak M., Probabilistic Formulation Of Analysis For Supporting Insulators Subjected To Dynamic Effect Of Short-Circuit Currents, *8th International Conference on Applied Electromagnetics*, University of Niš, Faculty of Electronics Niš, Serbia, 3-5 September 2007
- [2] Herrmann B., Stein N., Kiessling G., Short-circuit effects in high-voltage substations with stranded conductors. Systematic full-scale tests and a simple calculation method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1021-1028, 1989
- [3] Miri, A.M., Stein N., Calculated Short-Circuit Behaviour and Effects of a Duplex Conductor Bus Variation of the Sub-conductor Spacing, *Journal of Electrical Engineering* vol. 3, 2003
- [4] IEC 60865-2, Short-circuit currents - Calculation of effects. Part 2: Examples of calculation, Geneva: IEC, 1994
- [5] IEC 865 - 1:1993, Short - circuit currents – calculation of effects, Part 1: Definitions and calculation methods, Brussels 1993
- [6] PN-EN-60865-1:2002, Obliczanie skutków prądów zwarcio- wych – Część 1: Definicje i metody obliczania, PKN, Polska 2002
- [7] PN-92/E-04060, Wysokonapięciowa technika probiercza – Ogólne określenia i wymagania probiercze, PKN, Polska 1992

Autor: dr inż. Michał Daszczyszak, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mdaszcz@agh.edu.pl