ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Marek SZADKOWSKI

WPŁYW DŁUGOŚCI PRZĘSŁA NA SKUTKI MECHANICZNE PRĄDU ZWARCIOWEGO W OSZYNOWANIU GIĘTKIM ROZDZIELNI WN

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki analizy wpływu długości przęsła na parametry opisujące obciążenia zwarciowe w rozdzielniach wysokich napięć. Do analizy wykorzystano opracowany w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej program komputerowy WASP.

INFLUENCE OF SPAN LENGTH ON MECHANICAL EFFECTS OF FAULT CURRENT IN FLEXIBLE BUSING OF HV SUBSTATIONS

Summary. The paper presents results of analysis of the effect of span length on fault load parameters in high voltage switching stations. The analysis was performed using WASP computer software developed at the Institute of Electrical Engineering and System Control of the Silesian Technical University.

1. WPROWADZENIE

Potrzeba uwzględnienia oddziaływań elektrodynamicznych przy projektowaniu i modernizacji oszynowania giętkiego rozdzielni WN była od dawna sygnalizowania w literaturze [1]. Pierwsze prace na ten temat pojawiły się w połowie lat dwudziestych bieżącego stulecia. Przepływowi prądów zwarciowych przez oszynowanie giętkie towarzyszą bowiem złożone zjawiska, które mogą być opisane wyłącznie za pomocą skomplikowanych modeli obliczeniowych [1, 2, 4, 6]. Analiza tych modeli stała się możliwa dopiero po zastosowaniu techniki komputerowej. Jedną z wielu istniejących obecnie na świecie metod (programów komputerowych) służących do szacowania skutków mechanicznych prądu zwarciowego w oszynowaniu giętkim rozdzielni WN jest program WASP [1, 6], opracowany w IESU Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Właśnie ten program został wykorzystany do analizy wpływu długości przęsła na parametry opisujące obciążenia zwarciowe w rozdzielniach wysokich napięć.

2. WYNIKI ANALIZY

Program komputerowy WASP wykorzystano do analizy wychyleń przewodów dla typowych rozwiązań konstrukcyjnych przęseł szynowych, stosowanych w polskich rozdzielniach WN. W analizie skoncentrowano się na obliczaniu i porównaniu następujących wartości, decydujących o obciążeniach zwarciowych:

- maksymalnej siły naciągu przewodów F_{zmax},
- minimalnej odległości d_{min} między wychylającymi się w czasie zwarcia przewodami sąsiednich faz ,
- maksymalnego wychylenia konstrukcji wsporczych f_{kwmax}.

Celem analizy była ocena wpływu długości przęsła na wyżej wymienione wartości oraz - w wybranych przypadkach - na trajektorię ruchu przewodu fazowego w środku przęsła i przebiegi czasowe sił naciągu przewodów i wychyleń konstrukcji wsporczych. Uwzględniono przy tym następujące czynniki:

- wartość prądu początkowego I_k'' ,
- długość przęsła,
- temperaturę otoczenia i związaną z nią początkową siłę naciągu przewodów,

W analizie uwzględniono jedynie przęsła szyn zbiorczych i szyny obejściowej. Pozostałe przęsła w rozdzielniach WN (głównie odejściowe, przez które prąd zwarciowy płynie zawsze na odcinku znacznie krótszym od ich długości) zostały pominięte. Ocenę wyników analizy prowadzono, opierając się na trzech kryteriach:

1) oszynowanie dwu sąsiednich faz nie może zbliżyć się na odległość umożliwiającą przeskok między fazami,
2) wartość dynamicznej siły naciągu nie może przekroczyć wartości dopuszczalnych dla przewodów, osprzętu i izolatorów,
3) odkształcenie konstrukcji wsporczych nie może przekroczyć dopuszczalnych przemieszczeń.

Analizę prowadzono dla typowych rozwiązań konstrukcyjnych przęseł szynowych stosowanych w krajowych rozdzielniach 110 kV.

Dopuszczalny odstęp d_{dop} między przewodami można określić deterministycznie. Dla maksymalnego napięcia roboczego 123 kV odstęp ten wynosi ok. 30 cm. Problemem otwartym przy wymiarowaniu odstępów jest ewentualne uwzględnienie przepięć łączeniowych, a nawet atmosferycznych. Autor przyjął, że prawdopodobieństwo wystąpienia takich przepięć w momencie maksymalnego zbliżenia przewodów różnych faz jest pomijalnie małe.

Minimalna odległość między przewodami tworzącymi oszynowanie d_{min} w czasie ich ruchu powinna spełniać zależność

$$d_{min} > d_{dop} . \tag{1}$$

Wytrzymałość przewodów stosowanych w polskich rozdzielniach 110 kV określa obliczeniowa siła zrywająca (np. 158 kN dla przewodów AFL8-525). Siła niszcząca dla izolatorów stacyjnych określona jest na poziomie 100÷140 kN w zależności od typu izolatora.

Przy projektowaniu typowych konstrukcji wsporczych pod szyny zbiorcze przyjmuje się, że dopuszczalna siła naciągu F_{stdop} jest 1,3÷1,5-krotnie większa od maksymalnej statycznej siły naciągu, jaka może wystąpić w projektowanym przęśle. W polskich rozdzielniach 110 kV maksymalna statyczna siła naciągu jednej fazy wynosi najczęściej 10 kN (w przypadku pojedynczych przewodów) lub 15 kN (w przypadku wiązki dwuprzewodowej). Znając te siły oraz zastępcze współczynniki sprężystości analizowanych konstrukcji wsporczych [3] można wyznaczyć dopuszczalne wychylenie konstrukcji w płaszczyźnie poziomej

$$f_{kwd} = \frac{F_{stdop}}{s}, \tag{2}$$

przy czym kryterium dopuszczalnego wychylenia konstrukcji wsporczej stanowi nierówność

$$f_{kw\max} < f_{kwd}, \tag{3}$$

gdzie $f_{kw\max}$ - maksymalne wychylenie konstrukcji wsporczej w trakcie ruchu przewodów.

2.1. Długość przęsła

Długość przęsła wynika w przypadku szyn zbiorczych z szerokości pola oraz liczby pól w przęśle. W rozdzielniach napowietrznych 110 kV szerokość pola wynosi w większości przypadków 9 m. Przy liczbie pól przypadającej na jedno przęsło 3 do 4 daje to długość przęsła 27÷36 m. Przęsła o większej długości występują jedynie w wyjątkowych przypadkach. Przęsła krótsze występują natomiast w rozdzielniach uproszczonych (np. przęsła o długości 8 i 16 m, wg pracy [5]).

Długości przęseł przyjmowane w obliczeniach wychyleń przewodów są z reguły o ok. 3...4 m mniejsze od podanych powyżej. Wynika to stąd, że przewody są zawieszone odciągowo na łańcuchach izolatorów w układzie V, które praktycznie nie biorą udziału w ruchu. Długość przęsła przyjmowana do obliczeń jest wobec tego równa odległości l pomiędzy punktami zamocowania przewodów do izolatorów.

2.2. Wyniki analizy

W tablicy 1 oraz na rysunkach 4÷7 przedstawiono wyniki obliczeń dla przęseł o różnych długościach, z przewodami pojedynczymi AFL-8 525. Obliczenia wykonano dla zwarć dwufazowych, zakładając trzy poziomy prądu początkowego 18,5, 25 i 40 kA (dla zwarcia trójfazowego). Na podstawie zależności

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3}$$

w obliczeniach przyjęto wartości prądu początkowego I''_{k2}, wynoszące odpowiednio 16, 21,7 i 34,6 kA.

Na rys. 1 przedstawiono trajektorie przewodu fazowego w środku przęsła dla przęseł o różnych długościach przy prądzie I''_{k2} = 21,7 kA. Wynika stąd, że ruch przewodów jest bardzo zróżnicowany, w zależności od długości przęsła. W przęsłach bardzo krótkich (np. 8 m) przewód wykonuje drgania o bardzo dużej częstotliwości i minimalnym wychyleniu. W przęsłach dłuższych (16, 27 i 36 m) przewód obraca się wokół osi wyznaczonej przez punkty jego zamocowania. W przypadku przęseł długich (np. 45 m) przewód porusza się ruchem wahadłowym o małej częstotliwości i dużych promieniach wychylenia. Zróżnicowane (pod względem częstotliwości oraz wartości amplitud) są również przebiegi czasowe sił naciągu i wychylenia konstrukcji wsporczych, pokazane na rysunkach 2 i 3.

Na rys. 4. pokazano wpływ długości przęsła na stosunek sił $F_{s\max}/F_{st}$ przy trzech poziomach prądu zwarciowego. Wynika stąd, że - z wyjątkiem przęseł bardzo krótkich (do 8 m) - długość przęsła nie ma znaczącego wpływu na wzrost sił dynamicznych $F_{s\max}$ w stosunku do początkowych sił naciągu F_{st}. W przypadku prądów 16 i 21,7 kA, wzrost ten wynosił średnio od 3 do 5, natomiast w przypadku prądu 34,6 kA ok. 9. Siły dynamiczne występujące w całym zakresie analizowanych długości przęseł nie były niebezpieczne dla przewodów, izolatorów i osprzętu. Maksymalne wychylenie (ugięcie) konstrukcji wsporczych związane jest z siłami naciągu przenoszonymi na te konstrukcje w czasie wychyleń przewodów oraz własnościami mechanicznymi konstrukcji wsporczych. Dla typowych konstrukcji wsporczych pod szyny zbiorcze można przyjąć, że ich dopuszczalne wychylenie wynosi 3,8 cm [1]. Z tablicy 1 oraz rys. 5 wynika, że przy prądach I''_{k2} nie większych niż 21,7 kA wychylenia uwzględnianych w analizie typowych konstrukcji wsporczych nie są niebezpieczne dla całego zakresu analizowanych długości przęseł. W przypadku prądu I''_{k2} = 34,6 kA niebezpieczeństwo nadmiernego obciążenia konstrukcji wsporczych występuje dla przęseł o długości powyżej 27 m. W przeciwieństwie do maksymalnej siły naciągu $F_{s\max}$ zbliżenie przewodów $d_{\min}$ jest ściśle związane z długością przęsła, a właściwie z początkową siłą naciągu F_{st} oraz z poziomem prądu początkowego I''_k (rys. 6). W przypadku prądu I''_{k2} nie większego niż 21,7 kA, dla przęseł o długości do 36 m, zbliżenia przewodów nie są niebezpieczne. Natomiast w przypadku prądu I''_{k2} = 34,6 kA niebezpieczeństwo nadmiernych zbliżeń przewodów pojawia się już dla przęseł o długości 30 m.

Tablica 1

Wyniki obliczeń

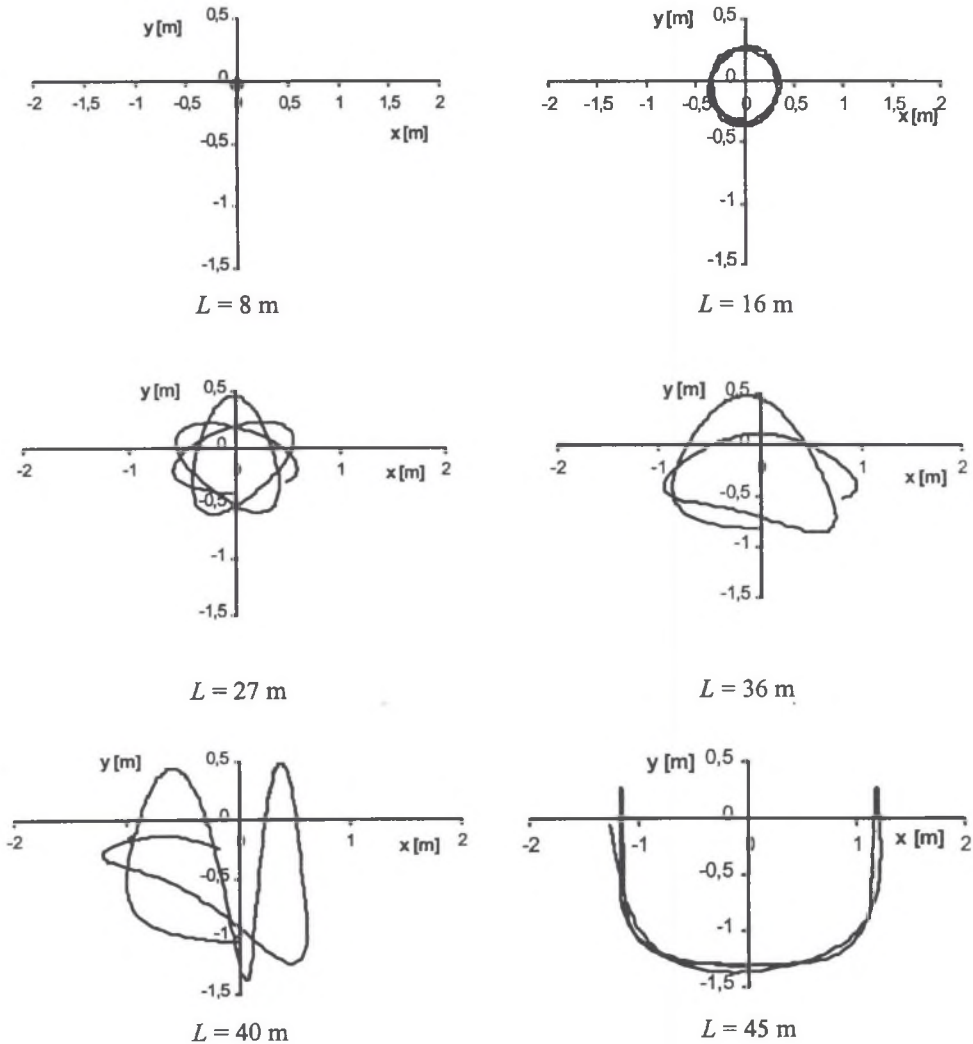
Dane wejściowe do obliczeń								
L	m	8	16	27	30	36	40	45
l	m	4	12	23	26	32	36	40,4
F_{st}	kN	1,3	1,1	3,15	3,0	3,0	3,0	3,0
Wyniki obliczeń przy prądzie 18,5 kA (I''_{k2} = 16 kA)								
F_{smax}	N	2167	12140	11978	13313	12582	6254	6061
d_{min}	m	2,17	1,58	1,55	1,14	0,77	0,4	0,21
f_{kwmax}	cm	0,26	0,83	1,45	1,59	1,63	0,98	0,95
Wyniki obliczeń przy prądzie 25 kA (I''_{k2} = 21,7 kA)								
F_{smax}	N	1860	10564	15472	15631	19815	23707	11642
d_{min}	m	2,15	1,47	1,03	0,93	0,3	0,99	0
f_{kwmax}	cm	0,28	0,75	1,87	1,83	2,24	3,1	1,65
Wyniki obliczeń przy prądzie 40 kA (I''_{k2} = 34,6 kA)								
F_{smax}	N	9490	9154	20105	22537	25114	32302	27598
d_{min}	m	2,05	1,4	0,55	0,25	0	0	0
f_{kwmax}	cm	0,7	1,71	3,45	3,68	4,06	4,15	3,91

Pozostałe dane wejściowe: przewody AFL-8 525; a = 2,2 m, S = 4,4 10^5 N/m, m_{zkw} = 185 kg, l_p = 11 m, l_{p1} = l_{p2} = 3,3 m, φ = 180°, R/X = 0,07, ψ = 0°, T_k = 0,2 s,
gdzie: a - odległość między fazami, S - współczynnik sprężystości konstrukcji wsporczych, m_{zkw} - masa zastępcza konstrukcji wsporczych, l_p - długość poprzeczki konstrukcji wsporczych, l_{p1} i l_{p2} - odległości między punktami zaczepienia skrajnych faz a końcami poprzeczki, φ - kąt przesunięcia między prądami fazowymi, ψ - kąt zwarcia

2.3. Uproszczone szacowanie skutków mechanicznych prądu zwarciowego

Wyniki analizy przedstawione na rys. 4÷ 6 prowokują do próby opisania przedstawionych tam charakterystyk zależnościami matematycznymi. W tym celu rzeczywiste wykresy proponuje się zastąpić liniami trendów. Po przekształceniach otrzymuje się np. następujące równanie umożliwiające bardzo proste szacowanie minimalnej odległości między przewodami w czasie ich ruchu dla typowego oszynowania (AFL-8 525) polskich rozdzielni 110 kV:

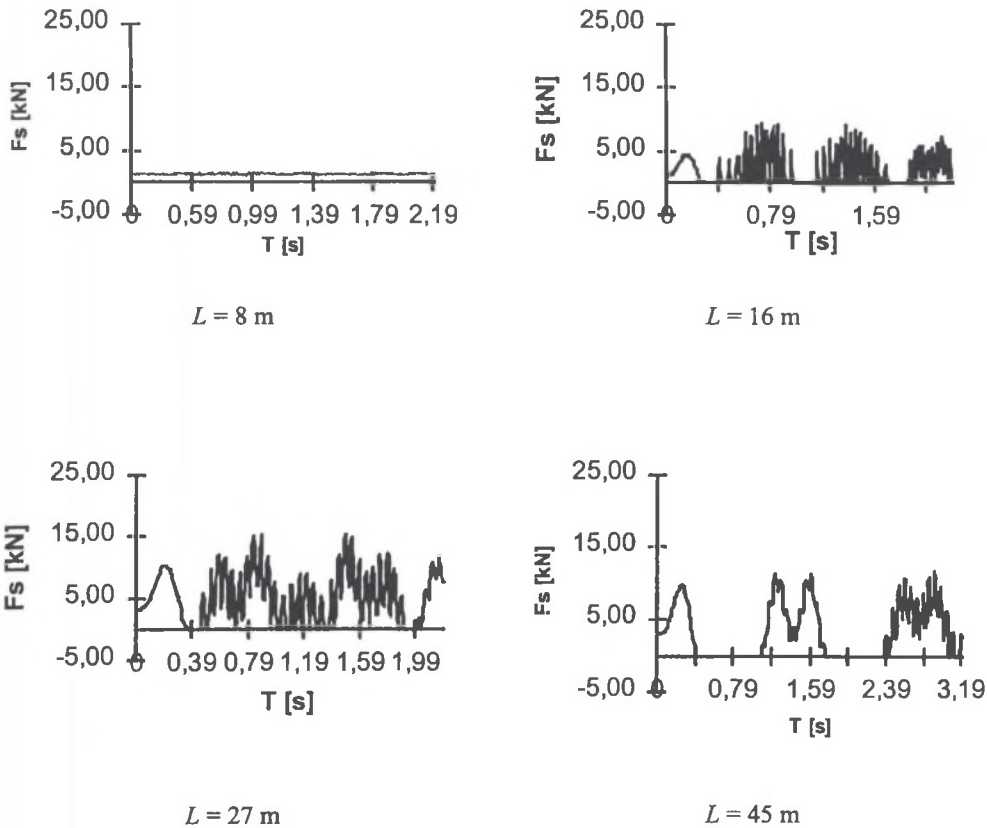
$$d_{min} = -\left(0{,}001 I''_{k2} + 0{,}036\right)L + 2{,}61 \quad \text{dla } 8\ \text{m} < L < 45\ \text{m}. \tag{4}$$



Rys. 1. Trajektorie ruchu środka przewodu dla różnych długości przęsła w wyniku przepływu prądu zwarciowego $I''_{k2} = 21{,}7$ kA w czasie $T_k = 0{,}2$ s

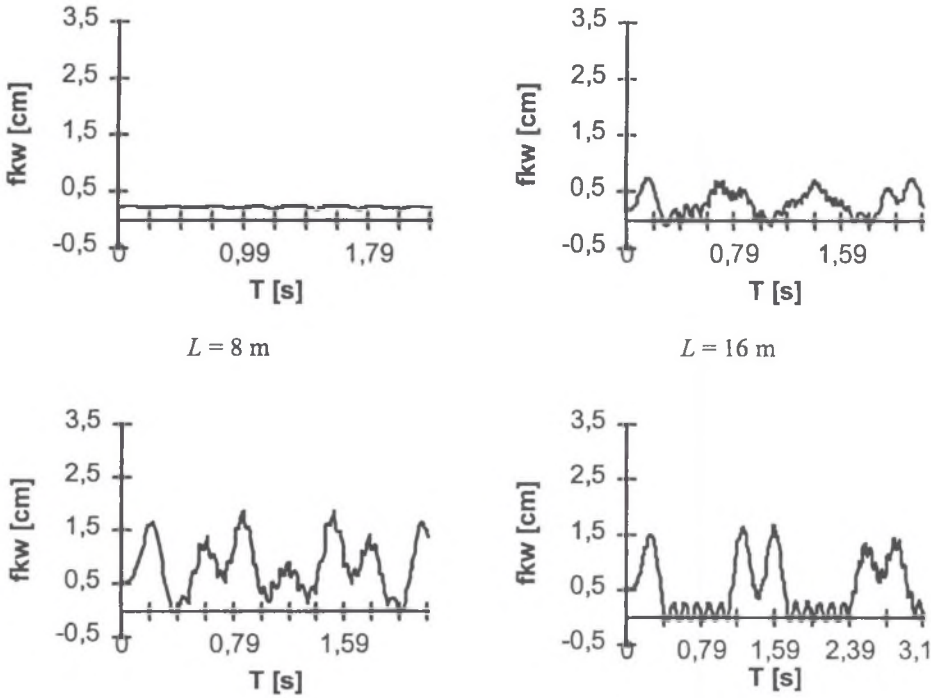
Fig. 1. Movement trajectories of a conductor centre for different spans due to passage of the short-circuit current $I''_{k2} = 21{,}7$ kA during $T_k = 0{,}2$ s

W tablicy 2 porównano wyniki obliczeń d_{min} uzyskanych za pomocą programu WASP i zależności (4). Jak wynika z porównania, dla typowych sytuacji konstrukcyjnych polskich rozdzielni 110 kV zależność (4) może być z powodzeniem stosowana do szybkiego szacowania d_{min}.



Rys. 2. Przebiegi czasowe sił naciągu przewodów w przęsłach o różnej długości w wyniku przepływu prądu zwarciowego $I''_{k2} = 21{,}7$ kA w czasie $T_k = 0{,}2$ s

Fig. 2. Time variations of conductor tension forces in different spans due to passage of the short-circuit current $I''_{k2} = 21{,}7$ kA during $T_k = 0{,}2$ s



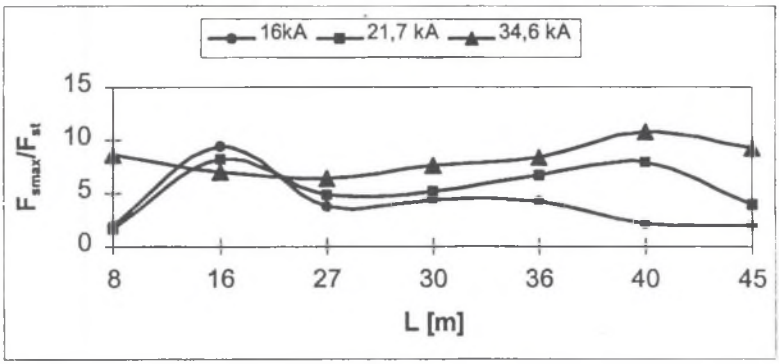
Rys.3. Przebiegi czasowe wychylenia konstrukcji wsporczych w przęsłach o różnej długości w wyniku przepływu prądu zwarciowego $I''_{k2} = 21{,}7$ kA w czasie $T_k = 0{,}2$ s

Fig. 3. Time variations of support construction displacements in different spans due to passage of the short-circuit current $I''_{k2} = 21{,}7$ kA during $T_k = 0{,}2$ s

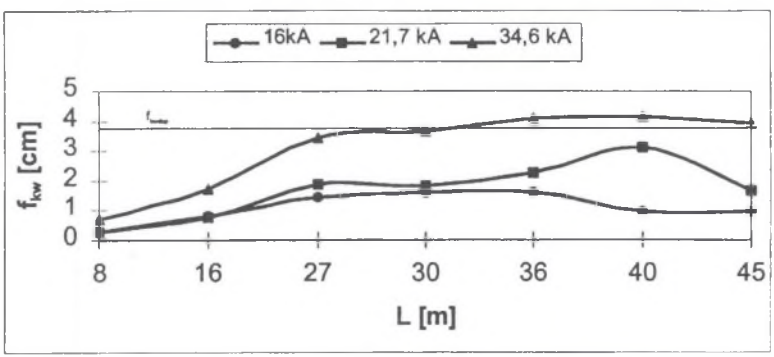
Tablica 2

Porównanie wyników obliczeń

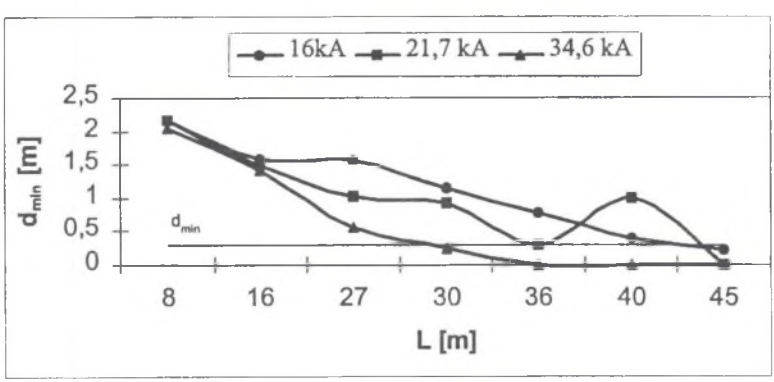
L [m]	WASP			Zależność (4)		
	d_{min} w [m] dla I''_k			d_{min} w [m] dla I''_k		
	16 kA	21,7 kA	34,6 kA	16 kA	21,7 kA	34,6 kA
8	2,17	2,15	2,05	2,17	2,13	2,05
16	1,58	1,47	1,40	1,75	1,67	1,49
27	1,55	1,03	0,55	1,18	1,04	0,71
30	1,14	0,93	0,25	1,02	0,86	0,50
36	0,77	0,30	0,00	0,71	0,52	0,08
40	0,40	0,99	0,00	0,50	0,29	0,00
45	0,21	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00



Rys 4. Wpływ długości przęsła na maksymalną siłę naciągu F_{smax}
Fig. 4. Influence of a span length on a maximum tension force F_{smax}



Rys. 5. Wpływ długości przęsła na maksymalne wychylenie konstrukcji wsporczych
Fig. 5. Influence of a span length on a maximum displacement of support constructions



Rys.6. Wpływ długości przęsła na minimalną odległość między przewodami
Fig. 6. Influence of a span length on a minimum clearance between conductors

LITERATURA

1. Szadkowski M.: Metoda obliczania skutków mechanicznych prądu zwarciowego w oszynowaniu giętkim rozdzielni WN. Praca doktorska. Gliwice 1989.
2. Bartodziej G., Szadkowski M.: Projektowanie oszynowania podatnego w rozdzielniach WN z uwzględnieniem dynamicznego działania prądów zwarciowych. „Biuletyn Elektroprojektu" 1987, nr 2.
3. Gołąbek J., Kopia A., Szadkowski M.: Metoda obliczania efektów mechanicznych działania prądu zwarciowego oraz współczynników sprężystości konstrukcji wsporczych w rozdzielniach WN. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej, nr 68. Konf. 23. WPW, Wrocław 1986.
4. Lilien J.L.: Contraintes et consequences electromecaniques liees au pasage d'une intensite de courant dans les struktures en cables. These de doctorat. Universite de Liege collection des publications nr 87, 1983.
5. Tablice montażowych zwisów i naciągów dla rozdzielni 110, 220, 400 kV wg opracowań typizacyjnych. Opracowanie Energoprojekt Kraków nr 70-214.
6. Szadkowski M.: WASP program do szacowania skutków mechanicznych prądu zwarciowego w oszynowaniu giętkim rozdzielni WN. Mat. III Konf. Nauk.-Techn.:"Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice - ZKwE'98", Poznań/Kiekrz 1998, ss. 205-208.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 kwietnia 2000 r.

Abstract

The paper presents results of analysis of the effect of span length on fault load parameters in high voltage substations. The analysis was performed using WASP computer software developed at the Institute of Power Systems and Control at the Silesian Technical University. The analysis was focused on the calculation and comparison of the following parameters, which affect the fault loads: conductor-tensioning force, minimum distance between adjacent phase conductors displaced during fault, maximum deviation of support structures. The aim of the analysis was to evaluate the influence of span length on those parameters. The following factors were taken into account: initial current I_k'', span length, ambient temperature and initial conductor tensioning force, spacing between phases and fault duration time.

The evaluation of analysis results was based on three criteria:

- adjacent phase buses cannot come together close enough to create spark-over,
- the tensioning force cannot exceed permissible values for the conductors, fittings and insulators,
- deviation of support structures cannot exceed permissible distortion values.

The analysis was made for spans, conductors, fittings and insulators used in HV substations in Poland. Results are presented in the form of tables, diagrams and mathematical relations.