

Józef TRYNKIEWICZ

ZJAWISKA ELEKTROMAGNETYCZNE W LINIACH 400 kV Z PRZEWODAMI ODGROMOWYMI IZOLOWANYMI DLA CELÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH

Streszczenie. Badano zjawiska elektromagnetyczne stanu ustalonego i nieustalonego w liniach 400 kV, jedno- i dwutorowych, z izolowanymi przewodami odgromowymi, modelowanych za pomocą czwórników wielofazowych ze stałymi skupionymi. Szczególną uwagę poświęcono impedancji widzianej przez zabezpieczenia odległościowe i lokalizatory zwarć podczas zwarć jednofazowych w linii. Zbadano napięcia w przewodach fazowych i odgromowych w miejscu zwarcia jednofazowego. Stwierdzono znaczący wpływ badanych zjawisk na sposób działania urządzeń automatyki, co dezawuuje badane rozwiązanie.

ELECTROMAGNETIC PHENOMENA IN 400 kV LINES WITH INSULATED GROUND WIRES FOR TELECOMMUNICATION USE

Summary. The paper presents tests of electromagnetic phenomena of steady and transient states in 400 kV lines, both single- and double-circuit overhead ones, with insulated ground wires, modelled by means of multiphase networks of lumped parameters. Special notice has been given to impedance determined by distance protection and fault localizing systems during single-phase short-circuit in the line. The voltage in phase and ground wires in the point of single-phase short-circuit has been examined. It has been pointed out that there is a significant influence of the phenomena tested on the way of automatic equipment operation, which discredits the solution tested.

ELEKTRISCHE PHÄNOMENE IN HOCHSPANNUNGSLEITUNGEN 400 kV MIT ISOLIERTEN ERDSEIL FÜR FERNMELDEVERKEHR

• **Zusammenfassung.** Im Beitrag wurden die elektomagnetische Phänomene bei normalen und instationären Betriebszuständen in 400 kV Einfacher- und Doppelleitungen mit isolierten Erdseil untersucht, wobei die Leitungen mit Hilfe von mehrphasigen Glidern mit konstanten Parametern nachgebildet worden waren. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Impedanz, die durch Distanzschutz und Fehlerortungsgeräte während einpoliger Kurzschlußfehler in der Leitung gesehen wird, gewidmet. Es wurden die Phasen- und Erdseilspannungen beim Fehlerort untersucht. Da ein wichtiger Einfluß der untersuchten Phänomene auf die Wirkungsmöglichkeiten der Automatisierungsanlagen festgestellt worden ist, soll der untersuchte Fall, die Leitung mit isolierten Erdseil, als inkorrekte Lösung betrachtet werden.

1. WSTĘP

Stosowanie niektórych zabezpieczeń linii elektroenergetycznych wysokich napięć, na przykład zabezpieczenia porównawczo-fazowego, wymaga użycia łączy telekomunikacyjnych o bardzo dużej niezawodności, łączących przeciwległe końce linii. Zwykle łączy te w stanie normalnej pracy sieci są wykorzystywane do telemetrii, telefonii i innych celów, i tylko podczas krótkiego czasu trwania zwarć w zabezpieczanej linii lub w jej sąsiedztwie służą do przesłania sygnałów między jej końcami.

W przypadku zabezpieczania krótkich linii przesyłowych stosuje się wynajęte linie telefoniczne albo specjalnie do tego celu ułożone kable. Jest to rozwiązanie drogie, ale jeszcze nie tak bardzo, jak w przypadku stosowania go dla długich linii przesyłowych. Dla nich stosuje się od dawna łączy wysokiej częstotliwości, wykorzystujące dla celów transmisji przewody fazowe linii. Zasadniczą wadą tego rozwiązania jest przesyłanie sygnałów właśnie wtedy, gdy przewody fazowe są zwarte, może nawet uszkodzone, gdy tłumienie sygnałów jest duże.

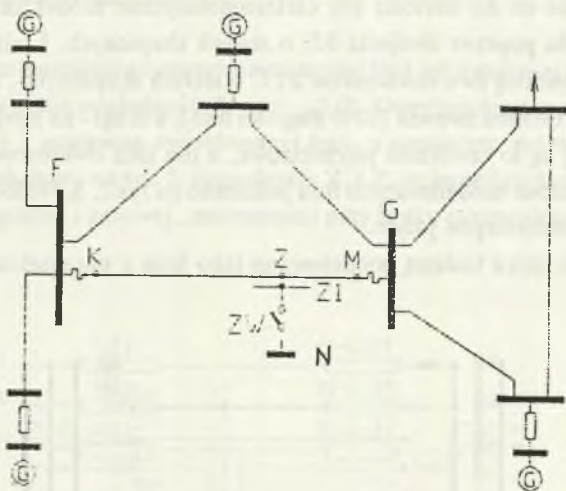
Jednym z próbowanych obecnie rozwiązań, pozwalających uniknąć tej wady, jest zrezygnowanie z wykorzystania przewodów fazowych i użycie w ich miejsce przewodów odgromowych, izolowanych w tym celu od słupów i uziemionych przy końcach linii oraz przy ewentualnych stacjach wzmacniakowych na trasie. Przewody odgromowe nadal spełniają swoją zasadniczą rolę. Izolacja przewodów odgromowych jest tak dobrana, aby niebezpieczne przepięcia atmosferyczne powodowały przeskok na rożkach izolatorów i odpływ ładunków do ziemi.

Opisane rozwiązanie wprowadza skomplikowany układ wzajemnych sprzężeń elektromagnetycznych wpływających na napięcia i prądy doprowadzane do zabezpieczeń i innych urządzeń pomiarowych podczas zwarć w linii, fałszując ich działanie. Oprócz tego istnieje uzasadniona obawa, że istniejące sprzężenia wywołują podczas zwarć w linii niepożądane przepięcia o konsekwencjach koniecznych do zbadania.

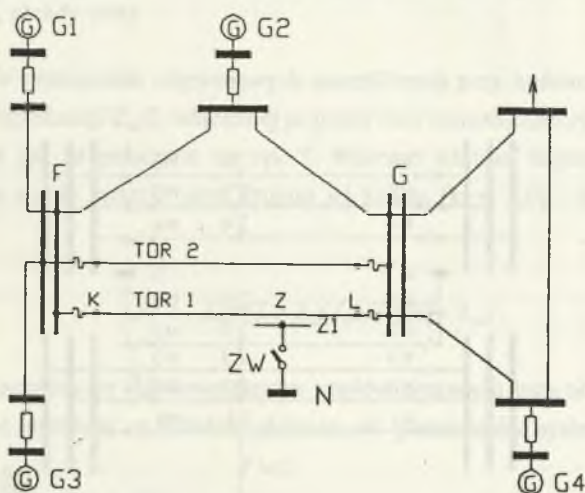
Przeprowadzone badania mają dostarczyć argumentów przeciwko stosowaniu linii z izolowanymi przewodami odgromowymi i uprzedzić służby eksploatacyjne o możliwości błędnego zachowania się zabezpieczeń i lokalizatorów zwarć tam, gdzie linie te są już stosowane.

2. MODEL SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Do badań obrano trójfazowy model systemu elektroenergetycznego 400 kV, pokazany na schematach jednokreskowych na rys.1,2. Na rysunku pierwszym linia badana F-G jest linią jednotorową na słupach typu Y52, a na rysunku drugim - linią dwutorową na słupach typu Z52.



Rys. 1. Model systemu elektroenergetycznego 400 kV z badaną linią F-G, jednotorową
 Fig. 1. Model of 400 kV electric power system with the tested single circuit overhead line F-G



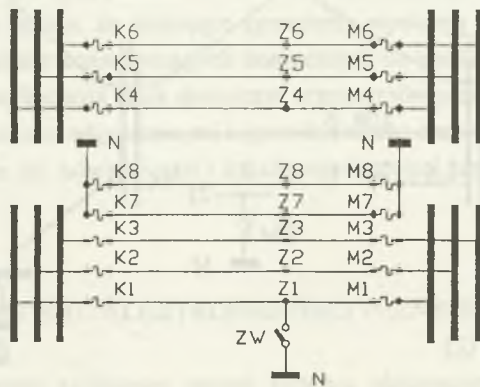
Rys. 2. Model systemu elektroenergetycznego 400 kV z badaną linią F-G, dwutorową
 Fig. 2. Model of 400 kV electric power system with the tested double-circuit overhead line F-G

Zróznicowane co do wartości siły elektromotoryczne źródeł zasilających są przyłączone do modelu poprzez dwójniki RL o stałych skupionych. Linia badana F-G jest modelowana za pomocą dwu czwórników RLC o stałych skupionych, z których pierwszy modeluje linię do miejsca zwarcia (60% długości linii), a drugi - za miejscem zwarcia. Dla linii jednorodnej są to czwórniki pięcioletowe, a dla linii dwutorowej - ośmioletowe. Schematy uproszczone modelowanych linii pokazano na rys.2, 3. Widoczne tam rezystory są bocznikami pomiarowymi prądu.

Wszystkie linie, poza badaną, modelowano jako linie z parametrami rozłożonymi.



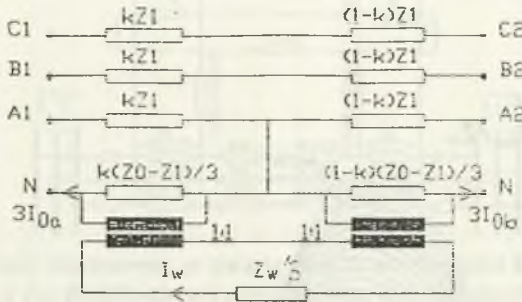
Rys. 3. Uproszczony schemat linii jednorodnej z izolowanymi przewodami odgromowymi
 Fig. 3. Simplified diagram of the single-circuit overhead line with insulated ground wires



Rys. 4. Uproszczony schemat linii dwutorowej z izolowanymi przewodami odgromowymi
 Fig. 4. Simplified diagram of the double-circuit overhead line with insulated ground wires

3. USTALONY STAN ZWARCIA

Do badania stanu ustalonego opracowano model linii jednororowej symetrycznej ze zwartą fazą A w odległości względnej k ($k = 0 \dots 1,0$). Uwzględniono w nim rezystancje, indukcyjności własne i wzajemne modelowanej linii, a pominięto pojemności własne i wzajemne. Model pokazano na rys. 5. Impedancje Z_1 i Z_0 są impedancjami modelowanej linii dla składowej zgodnej i zerowej, mierzonymi przy braku przewodów odgromowych.



Rys. 5. Model linii jednororowej ze zwartą fazą A w odległości k , stan ustalony

Fig. 5. Model of the single-circuit overhead line with the short-circuited phase A at a distance k , steady state

Uwzględnienie przewodów odgromowych uziemionych przy końcach linii ujawnia się wystąpieniem impedancji $Z_w/3$, włączonej poprzez dwa transformatory separacyjne o przekładni 1:1, tak jak to pokazano na rys. 5. Mierząc wartość impedancji linii dla składowej prądu w stanie zwarcia przy drugim jej końcu ($k = 1,0$) i oznaczając Z_{0w} , można określić:

$$Z_w = (Z_{0w} - Z_1)(Z_0 - Z_1)/(Z_0 - Z_{0w}) \quad (1)$$

Przez I_{0a} i I_{0b} oznacza się składowe zerowe prądów płynących przy obydwu końcach linii. Ich zespolone wartości są zależne głównie od parametrów systemu, z którym współpracuje linia.

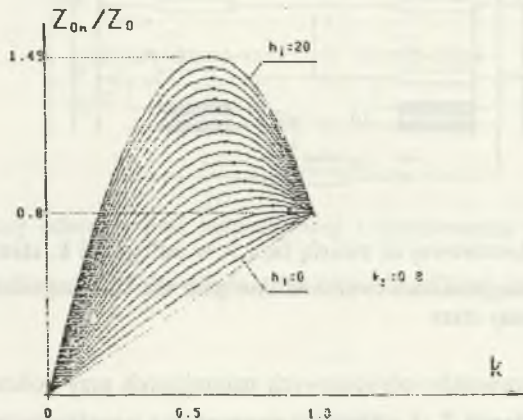
Wprowadzając współczynniki:

$$h_1 = I_{0a}/I_{0b} \quad \text{oraz} \quad k_2 = Z_{0w}/Z_0 \quad (2)$$

można wyprowadzić wzór na impedancję linii Z_{0m} dla składowej zerowej prądu mierzoną od końca pierwszego do miejsca zwarcia w odległości k :

$$Z_{0m} = kZ_0\{1-[k-(1-k)h_i](1-k_z)\}. \quad (3)$$

We wzorze tym wielkości h_i , k_z są w ogólnym przypadku wielkościami zespolonymi. Nie popełni się jednak dużego błędu, gdy uzna się je za rzeczywiste, bowiem ich kąty fazowe są niewielkie. Przy tym założeniu i ustaleniu $k_z = 0,8$ zrobiono wykres (rys. 6), pokazujący rodzinę krzywych dla $h_i = 0,1, \dots, 20$. Wartości maksymalne zaznaczono kropkami.

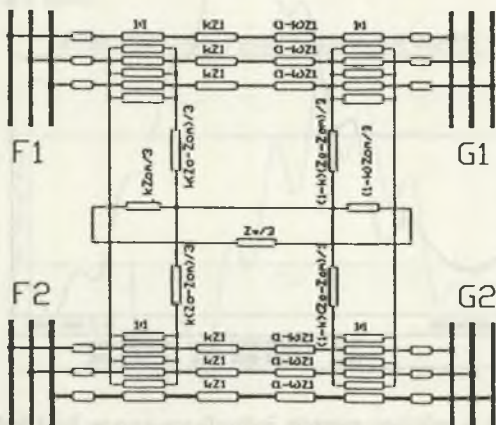


Rys. 6. Zależność mierzonej impedancji względnej Z_{0m}/Z_0 dla składowej zerowej od odległości zwarcia k dla różnych wartości stosunku h_i składowych zerowych prądów dopływających do miejsca zwarcia

Fig.6. Dependence of the measured relative zero-sequence impedance Z_{0m}/Z_0 on the distance k of short-circuit for different values of the ratio h_i of zero-sequence currents flowing to the point of short-circuit

Z wykresu można odczytać wyraźne odstępstwo od proporcjonalności pomiędzy odległością zwarcia k i mierzoną przy końcu pierwszym impedancją Z_{0m} dla składowej zerowej prądu. Stopień tego odstępstwa zależy od współczynnika h_i , a więc od składowej zerowej prądu przy przeciwległym końcu linii, na który mają wpływ zmieniające się warunki narzucone systemem, od prądu nie poddającemu się bezpośredniemu pomiarowi przy końcu pierwszym.

Opracowano również analogiczny model linii dwutorowej z izolowanymi przewodami odgromowymi, pokazany na rys. 7. Badania wykazały, że istnienie drugiego toru łągodzi negatywne skutki izolowania przewodów odgromowych dla pracy układów automatyki zabezpieczeniowej w porównaniu ze skutkami właściwymi dla linii jednotorowej.



Rys. 7. Model linii dwutorowej ze zwartą fazą A w odległości k , stan ustalony

Fig. 7. Model of the double-circuit overhead line with the short-circuited phase A at a distance k , steady state

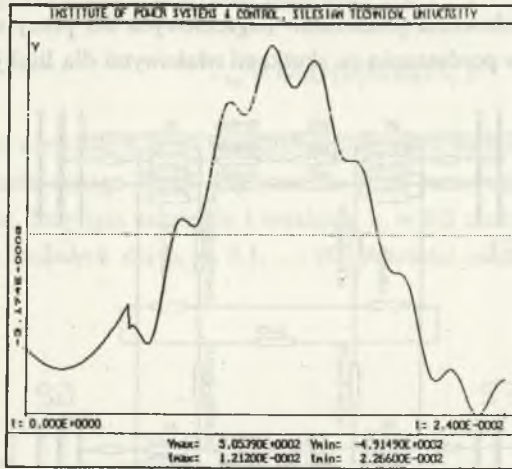
4. ZJAWISKA ELEKTROMAGNETYCZNE PRZEJŚCIOWE

Badano zjawiska elektromagnetyczne występujące podczas zwarć jednofazowych w liniach bez przepleceń, jednotorowych i dwutorowych 400 kV, w układach modelowych według rys. 1 i 2. Długości linii wynoszą 266 km, przekrój przewodów fazowych - 525 mm² AFL, przekrój linek odgromowych - 70 mm² AFL. Niektóre z przyjętych parametrów są wymienione w pracy [1].

Stanem wyjściowym badań jest ustalony stan pracy, zakłócony pojawieniem się zwarcia jednofazowego fazy A w chwili $t = 0,5$ ms, w odległości 60% długości linii liczonej od węzła F, w wyniku zamknięcia wyłącznika W. W chwili zwarcia napięcie fazy A w miejscu zwarcia ma wartość szczytową.

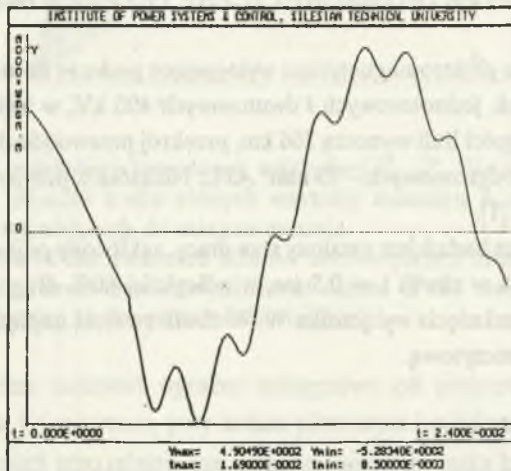
4.1. Linia jednotorowa

Na rys. 8 i 9 pokazano przebiegi obliczonych napięć fazowych faz B i C w miejscu zwarcia, to jest w węzłach Z2 i Z3, natomiast na rys.10 i 11 - napięcia przewodów odgromowych - węzły Z4 i Z5. U dołu każdego z rysunków widnieją wartości maksymalne i minimalne zapisanych przebiegów w kilowoltach wraz z chwilami ich wystąpienia. Po lewej stronie, pionowo, podawana jest początkowa wartość przebiegu.



Rys. 8. Napięcie fazy B w miejscu zwarcia jednofazowego w linii jednotorowej - węzeł Z2

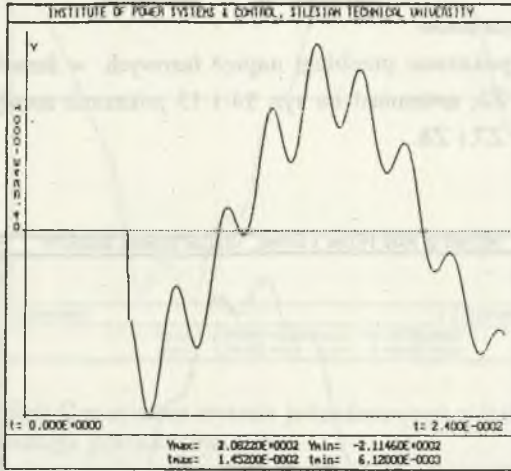
Fig. 8. Phase B voltage in the point of single-phase short-circuit in the single-circuit overhead line - Z2 node



Rys. 9. Napięcie fazy C w miejscu zwarcia jednofazowego w linii jednotorowej - węzeł Z3

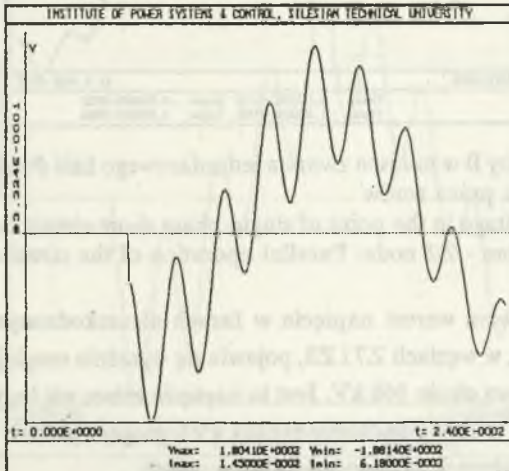
Fig. 9. Phase C voltage in the point of single-phase short-circuit in the single-circuit overhead line - Z3 node

W przewodach odgromowych, przy miejscu zwarcia, pojawia się znaczne napięcie. Z rys. 10 można odczytać wartość chwilową 211,5 kV, zaś z rys. 11 - wartość 188,1 kV. Obserwuje się również wyraźnie podwyższone napięcie faz B i C - rys. 8 i 9 - w pobliżu niedostępnego dla pomiarów miejsca zwarcia, czego nie obserwuje się (nie dołączono wyników) na początku linii.



Rys. 10. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii jednotorowej - węzeł Z4

Fig. 10. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the single-circuit overhead line - Z4 node



Rys. 11. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii jednotorowej - węzeł Z5

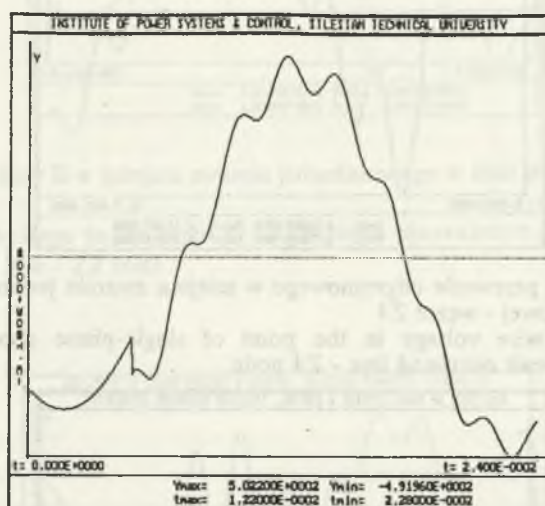
Fig. 11. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the single-circuit overhead line - Z5 node

4.2. Linia dwutorowa

Badania prowadzono dla dwu stanów pracy linii. W stanie pierwszym obydwa tory pracują obustronnie na te same, sprzęgnięte, szyny zbiorcze. Stan drugi opisuje schemat z rys.2.

- Równoległa praca torów

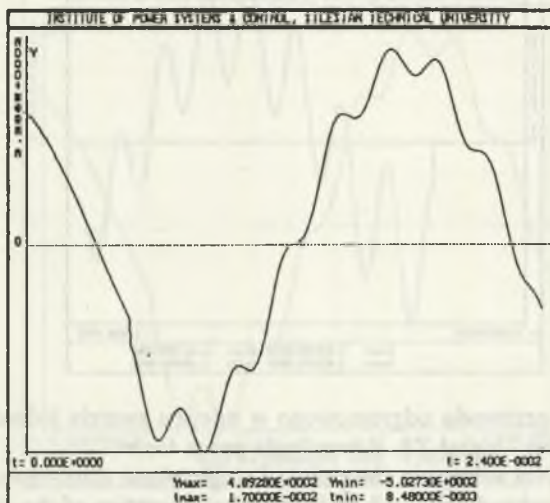
Na rys. 12 i 13 pokazano przebiegi napięć fazowych w fazach B i C w miejscu zwarcia - węzły Z2 i Z3, natomiast na rys. 14 i 15 pokazano napięcia w przewodach odgromowych - węzły Z7 i Z8.



Rys. 12. Napięcie fazy B w miejscu zwarcia jednofazowej linii dwutorowej - węzeł Z2. Równoległa praca torów

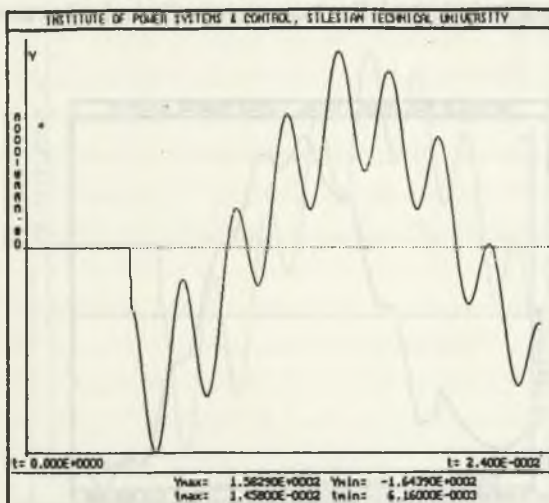
Fig. 12. Phase B voltage in the point of single-phase short in the double-circuit overhead line - Z2 node. Parallel operation of the circuits

Zauważa się pewien wzrost napięcia w fazach nieuszkodzonych B i C. W przewodach odgromowych, w węzłach Z7 i Z8, pojawia się wyraźnie oscylujące napięcie, osiągające wartość szczytową około 160 kV. Jest to napięcie niższe niż to, jakie obliczono dla podobnego przypadku w linii jednotorowej (211 kV), mogące jednak tak samo powodować przeskokki na izolatorach przewodów odgromowych.



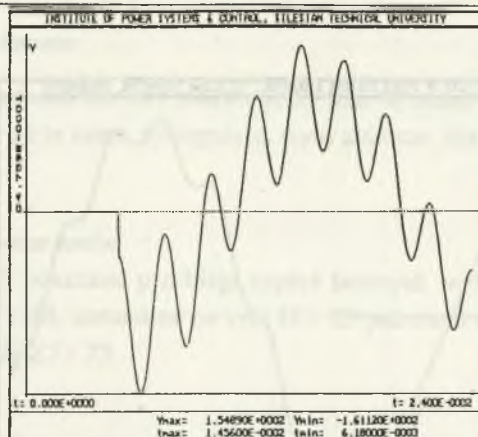
Rys. 13. Napięcie fazy C w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z3. Równoległa praca torów

Fig. 13. Phase C voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z3 node. Parallel operation of the circuits



Rys. 14. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z7. Równoległa praca torów

Fig. 14. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z7 node. Parallel operation of the circuits



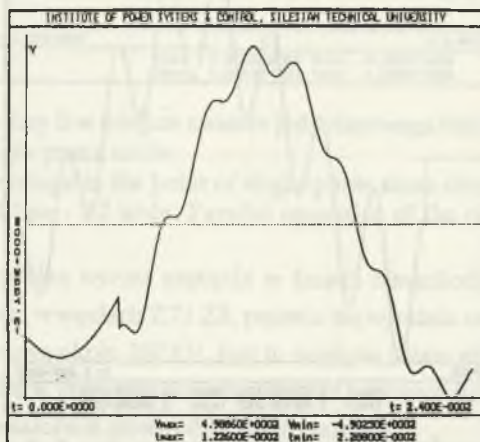
Rys. 15. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z8. Równoległa praca torów

Fig. 15. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z8 node. Parallel operation of the circuits

- Nierównoległa praca torów

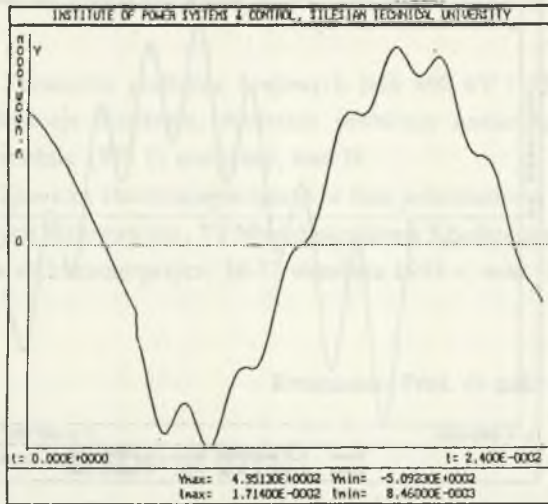
Na rys. 16 i 17 pokazano przebiegi napięć fazowych w fazach B i C w miejscu zwarcia - węzły Z2 i Z3, zaś na rys. 18 i 19 - napięcia przewodów odgromowych - węzły Z7 i Z8.

Występujące napięcia szczytowe są wprawdzie mniejsze niż w innych badanych przypadkach, ale różnica nie jest wielka i zagrożenie dla izolacji przewodów odgromowych nadal istnieje.



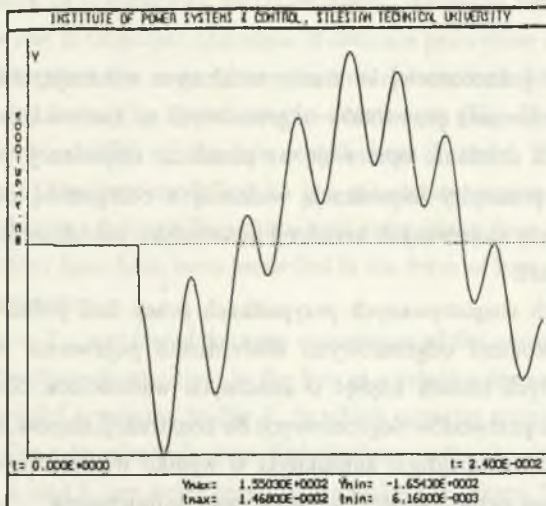
Rys. 16. Napięcie fazy B w miejscu zwarcia jednofazowego linii dwutorowej - węzeł Z2. Nierównoległa praca torów

Fig. 16. Phase B voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z2 node. Non-parallel operation of the circuits



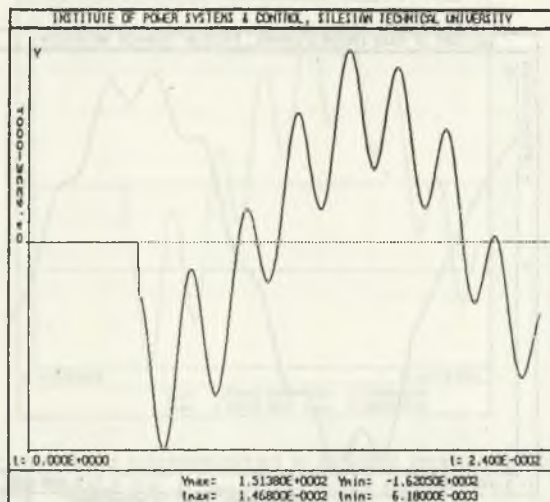
Rys. 17. Napięcie fazy C w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z3. Nierównoległa praca torów

Fig. 17. Phase C voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z3 node. Non-parallel operation of the circuits



Rys. 18. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z7. Nierównoległa praca torów

Fig. 18. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z7 node. Non-parallel operation of the circuits



Rys. 19. Napięcie przewodu odgromowego w miejscu zwarcia jednofazowego w linii dwutorowej - węzeł Z8. Nierównoległa praca torów

Fig. 19. Ground wire voltage in the point of single-phase short-circuit in the double-circuit overhead line - Z8 node. Non-parallel operation of the circuits

5. WNIOSKI

Badania linii jednotorowej w stanie ustalonym wskazują, że należy starannie rozważyć wpływ izolowania przewodów odgromowych na zachowanie się tych urządzeń automatyki, których działanie opiera się na pomiarze impedancji pętli zwarcia. Brak proporcjonalności pomiędzy impedancją widzianą a odległością do miejsca zwarcia (rys. 6) zakłóca pracę stosowanych urządzeń automatyki, zabezpieczeń odległościowych i lokalizatorów zwarć.

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach pracy linii jedno- i dwutorowych z izolowanymi przewodami odgromowymi stwierdzono pojawienie się podczas zwarć jednofazowych w tych liniach napięć o znacznych wartościach. Skutkiem mogą być przerywane zwarcia przewodów odgromowych do konstrukcji słupów. Można spodziewać się błędnego działania urządzeń automatyki w wyniku wielokrotnych zmian wartości impedancji widzianej przed zakończeniem procesu definiowania.

W liniach dwutorowych zjawiska negatywne są mniej wyraźne, lecz nie na tyle, aby znacząco ograniczały zagrożenie.

LITERATURA

1. Trynkiewicz J.: Parametry podłużne krajowych linii 400 kV i 750 kV. V Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Aktualne problemy automatyki w energetyce, Gliwice 26-28 września 1989 r., materiały, tom II.
2. Trynkiewicz J.: Zjawiska elektromagnetyczne w linii jednotorowej 400 kV z przewodami odgromowymi izolowanymi, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Aktualne problemy w elektroenergetyce, 16-17 września 1993 r., tom II, ss. 173-181.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Sygal

Wpłynęło do Redakcji dnia 21 marca 1994 r.

Abstract

Attempts are undertaken to apply a solution consisting in insulation of ground wires of h.v. lines and their application for telecommunication use. Ground wire insulation causes the appearance of complicated electromagnetic couplings between wires of the line, which may give rise to improper operation of distance protection and fault localizing systems. In order to present the scale of danger, model tests have been carried out for single-circuit overhead lines (Fig. 1) and double-circuit ones (Fig. 2) by short-circuiting phase A at a distance of 60% of the line length from F node. Figs 3 and 4 show simplified diagrams of the lines modelled. In the calculation program the tested lines have been modelled in the form of five-phase and eight-phase four-terminal networks RLC, whereas the other lines have been modelled in the form of four-terminal networks with distributed parameters.

First, impedance Z_{0m} was tested for zero component of the current measured from F node during single-phase short-circuit in the line at a relative distance k . Calculations were done for the model presented in Fig. 5, in which capacity couplings were ignored as non-essential during tests of steady state. Calculation results are given by formula (3) and Fig. 6. Factors h_1 and k_2 are determined by formulas (2), where I_{0a} and I_{0b} are zero components of the current which flow at both ends of the line, Z_{0u} is line impedance ($k = 1$) for zero component at the existence of ground wires and Z_0 is line impedance for zero component measured at the lack of those wires. Fig. 6 presents the lack of proportion between a short-circuit distance k and measured relative impedance Z_{0m}/Z_0 dependent on the system situation and expressed by h_1 factor.

Analog tests for the double-circuit overhead line according to Fig. 7 indicated that the existence of the second circuit slightly reduces negative effects of ground wire insulation.

Then, transient electromagnetic phenomena were tested in modelled lines after phase A short-circuiting, preceded by steady state of operation. The paper presents calculation results of phase voltage in the point of short-circuit (Z node) in B and C phases and in two ground wires. Figs. 8 ... 11 show results of calculations for the single-circuit overhead line, Figs. 12 ... 15 - for the double-circuit overhead line during parallel operation of the circuits, Figs. 16 ... 19 - for non-parallel operation of the circuits.

The tests indicate that voltage of 211.5 kV and 188.1 kV (Figs. 10 and 11) appears in ground wires in the point of short-circuit. The voltage in B and C phases also increases (Figs. 8 and 9).

The appearance of high voltage in ground wires may be the cause of sparks-over on insulators of those wires, which result in changes in the value of impedance determined by automatic apparatus at the moment of its determination. The changes lead to improper operation of automatic apparatus.