ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z. 137 Nr kol. 1244

Paweł SOWA

PRZEPIĘCIA W LINIACH PRZESYŁOWYCH O RÓŻNYCH POZIOMACH NAPIĘĆ PRACUJĄCYCH NA TYCH SAMYCH KONSTRUKCJACH WSPORCZYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy przebiegów przejściowych w liniach najwyższych napięć ze szczególnym uwzględnieniem przepięć występujących podczas zakłóceń zwarciowych, przy czym analiza dotyczyła linii o różnych poziomach napięć pracujących na tych samych konstrukcjach wsporczych. Na kilku przykładach wykazano, że w linii pracującej w stanie normalnym podczas zwarć w sąsiedniej linii mogą pojawić się składowe swobodne wyższej częstotliwości. Przepięcia będące konsekwencją występowania tych składowych mogą powodować zbędne wyłączenia linii nie dotkniętych zakłóceniem.

OVERVOLTAGES IN THE TRANSMISSION LINE WITH THE DIFFERENT VOLTAGE LEVEL WORKING ON THE SAME TOWER CONSTRUCTION

Summary. The paper describes the transient analysis in high-voltage transmission line systems with the specially stress of the overvoltage analysis occurring during system operation or fault conditions. The analysis is concerned with the effect of the various factors which influence fault-transient waveforms in the different coupled high-voltage line working on the same tower construction. It is shown that high frequency component can occur on non faulted line in high voltage system, following fault initiation on other lines with another voltage level but working on the same tower construction. As a consequence, the overvoltages will appear on the non faulted line and this can result in the outage of this transmission line. The paper is concluded with a presentation of some computational results.

ÜBERSPANNUNGEN IN ÜBERTRAGUNGSLEITUNGEN MIT VERSCHIEDENEN SPANNUNGSNIVEAU ARBEITENDEN AUF GLEICHEN TRAGKONSTRUKTIONEN

Zusammenfassung. Im Beitrag werden die transiente Vorgänge in Hochspannungsübertragungsleitung bei den Kurzschlußfehlern mit der besonderen Berücksichtigung von Überspannungen dargestellt. Die Analyse konzentrierte sich auf Leitungen, die auf dieselben Tragkonstruktionen aber mit verschiedenen Spannungsniveau arbeiten. Es wurde mit ein paar Beispielen bewiesen, daß die hochfrequente Schwingungen in der nicht kurzgeschlossenen Leitung bei Fehlern in der gekoppelten Leitung erscheinen können. Die infolgedessen entstehende Überspannungen können überflüssige Ausschaltungen der Leitungen folgen.

1. WPROWADZENIE

Zakłócenia zwarciowe pojawiające się w liniach przesyłowych wysokich napięć powodują powstanie fal udarowych biegnących od miejsca zwarcia do końców linii - węzłów, stanowiących punkty nieciągłości. Wielokrotne odbicia fal w punktach węzłowych wywołują przejściowe pojawienie się składowych swobodnych wyższej częstotliwości w przebiegach chwilowych napięć i prądów. Składowe te mogą być łatwo rejestrowane na krańcach linii podczas zakłóceń. Możliwość dokładnego określenia amplitudy oraz częstotliwości tych składowych pozwoliła w przeszłości na pojawienie się tendencji wykorzystania tych składowych w algorytmach szybkich zabezpieczeń linii oraz lokalizatorach zwarć [1, 2]. Szybkie wycofanie się z tej tendencji wskutek wielu czynników mogących powodować błędne działanie zabezpieczeń oraz lokalizatorów w oparciu o pomiar tych składowych, nie może jednak osłabić zainteresowania konsekwencjami ich występowania. Nakładanie się bowiem fal udarowych odbitych w układach wieloprzewodowych powoduje powstanie zjawisk przepięciowych mogących wywołać zbędne zadziałanie zabezpieczeń.

Celem niniejszego artykułu jest zwrócenie uwagi na zjawiska przejściowe występujące w liniach, w których nie występują zakłócenia, w konsekwencji zwarć pojawiających się w liniach pracujących na tej samej konstrukcji wsporczej. Zjawiska te mogą doprowadzić do zbędnego kaskadowego wyłączania linii będących w stanie bezzakłóceniowym.

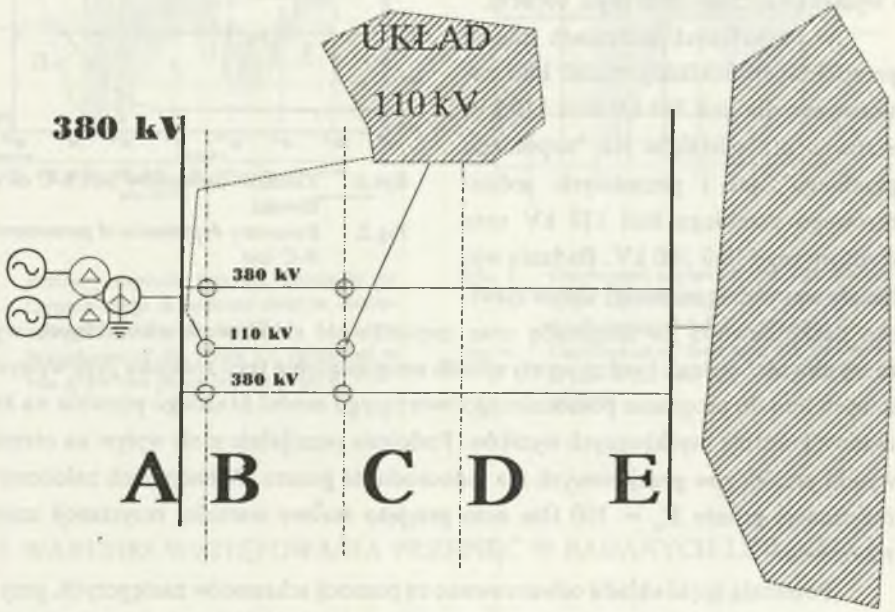
Analizę przedstawioną w niniejszym artykule autor oparł na wynikach obliczeń przeprowadzonych dla linii przesyłowych 380 kV oraz 110 kV pracujących na tych samych konstrukcjach wsporczych w układzie przesyłowym pomiędzy Szwajcarią i Austrią [3]. Wydaje się celowe przeprowadzenie podobnej analizy dla polskich linii w.n. pracujących w podobnych warunkach.

2. METODA OBLICZEŃ

2.1. Opis badanego układu

W układzie przedstawionym na rys. 1 międzynarodowa linia przesyłowa 380 kV o długości około 73 km stanowi część planowanego połączenia trzech systemów: austriackiego, szwajcarskiego oraz włoskiego. Aktualnie linia ta łączy dwa systemy: po stronie austriackiej - szyny **E** - oraz po stronie szwajcarskiej - szyny **A**, przy czym w każdym z tych krajów (graniczny punkt **D**) zaprojektowano odmienne konstrukcje wsporcze. Na odcinku **B-C** o długości 13 km na tych samych słupach nośnych zawieszona jest linia przesyłowa 110 kV pracująca tylko w Szwajcarii. W układzie tym w 1991 roku przeprowadzono próby zwarciowe dla testowania najnowszych urządzeń elektroenergetycznej

automatyki zabezpieczeniowej [3]. Zwarcia wywoływano w pobliżu szyn stacji E, natomiast pomiary przeprowadzono na początku linii w stacji A. Dostęp do wyników pomiarów stanowił doskonałą okazję do weryfikacji modeli elementów układu elektronergetycznego oraz metod analizy stanów przejściowych w układzie.



Rys. 1. Schemat zastępczy badanego układu
Fig. 1. Basic equivalent power system

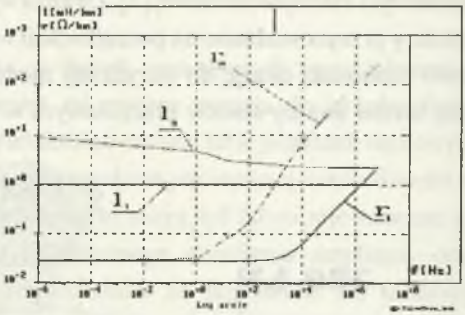
Szyny stacji A zasilane są z elektrowni oraz połączone z pozostałą częścią układu elektroenergetycznego 380 kV, natomiast szyny stacji E połączone są za pomocą transformatora z układem elektroenergetycznym 220 kV.

2.2. Model układu

Analizę przeprowadzono wykorzystując program MicroTran wraz z tzw. modelem linii Martiego [4]. W modelu tym można uwzględniać szereg parametrów wpływających w mniejszym lub większym stopniu na stany przejściowe w liniach najwyższych napięć podczas zakłóceń. Konieczność zastosowania modelu linii o parametrach rozłożonych zależnych od częstotliwości wynika z zależności tych parametrów od częstotliwości, co przykładowo dla odcinka linii B-C pokazano na rys. 2.

W przypadku zastosowania odwzorowania linii z parametrami stałymi, niezależnymi od częstotliwości otrzymuje się - podczas obliczeń przepięć w liniach - wyniki obarczone znacznym błędem.

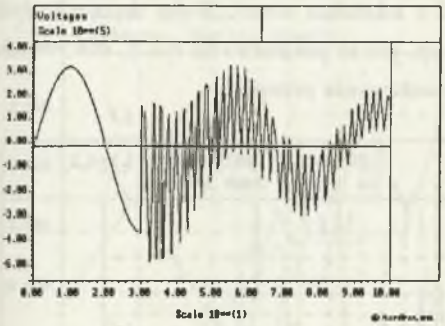
W omawianych badaniach stanów przejściowych dokładny model linii zastosowano dla linii 380 kV oraz 110 kV, zarówno dla odcinków ich "wspólnego przebiegu", jak i pozostałych: jednotorowego przebiegu linii 110 kV oraz dwutorowego linii 380 kV. Badania wykazały wprawdzie niewielki wpływ zjawiska naskórkowości na amplitudę oraz częstotliwość składowych swobodnych wyższej częstotliwości, jednak bardzo prosty sposób uwzględnienia tego zjawiska przy wpisywaniu danych linii do programu pomocniczego tworzącego model Martiego pozwala na każdorazową kontrolę uzyskiwanych wyników. Podobnie pomijalnie mały wpływ na otrzymane wyniki przebiegów przejściowych ma jednorodność gruntu. W badaniach założono stałą rezystancję gruntu R_z = 100 Ωm oraz przyjęto zerowe wartości rezystancji uziemień roboczych.



Rys.2. Zależność parametrów linii **B-C** od częstotliwości

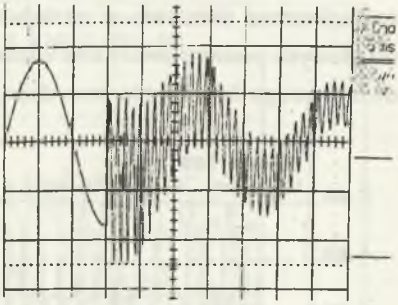
Fig.2. Frequency dependence of parameters of the **B-C** line

Pozostałą część układu odwzorowano za pomocą schematów zastępczych, przy czym parametry tych układów określono za pomocą metody identyfikacji wykorzystującej kryterium wrażliwości [5]. Model układu został zweryfikowany na podstawie porównania wyników pomiarów prób zwarciowych z rezultatami obliczeń przeprowadzonych dla tych samych warunków. Zaskakująco wysoka zgodność wyników pomiarowych oraz numerycznych pozwoliła na wykorzystanie modeli układu w celu przeprowadzenia obliczeń dla innych warunków zakłóceniowych. Optymalny model pozostałej części układu otrzymano po około 100 iteracjach. Należy tutaj podkreślić, że dla analizy zjawisk przejściowych w zakresach sekundowych (badania stabilności, równowaga itp.) model zastępczy można otrzymać już po kilku iteracjach. Jednoznaczna analiza potwierdzająca prawidłowość stosowanego modelu oraz metody zostanie opisana w artykule [6] oddanym do druku, który ukaże się pod koniec b.r. Przytoczone na rysunkach 3 i 4 przebiegi przejściowe napięcia w fazie L1, stanowiące fragment tej analizy, zostały odpowiednio obliczone oraz pomierzone na szynach stacji **A** podczas zwarcia dwufazowego faz **L1-L2** bez udziału ziemi. Porównanie to zostało celowo tutaj przytoczone z uwagi na trudny do identyfikacji przebieg ze składowymi o dużej amplitudzie i stosunkowo długim czasie zanikania.



Rys. 3. Przebieg napięcia fazy L1 obliczony na szynach stacji A podczas zwarcia dwufazowego L1-L2 w punkcie E

Fig. 3. Waveforms of the phase L1 calculated at bus A for two phase fault at point E



Rys. 4. Oscylogram napięcia fazy L1 pomierzony na szynach stacji A podczas zwarcia dwufazowego L1-L2 w punkcie E

Fig. 4. Oscillogram of the phase L1 measured at bus A for two phase fault L1-L2 at point E

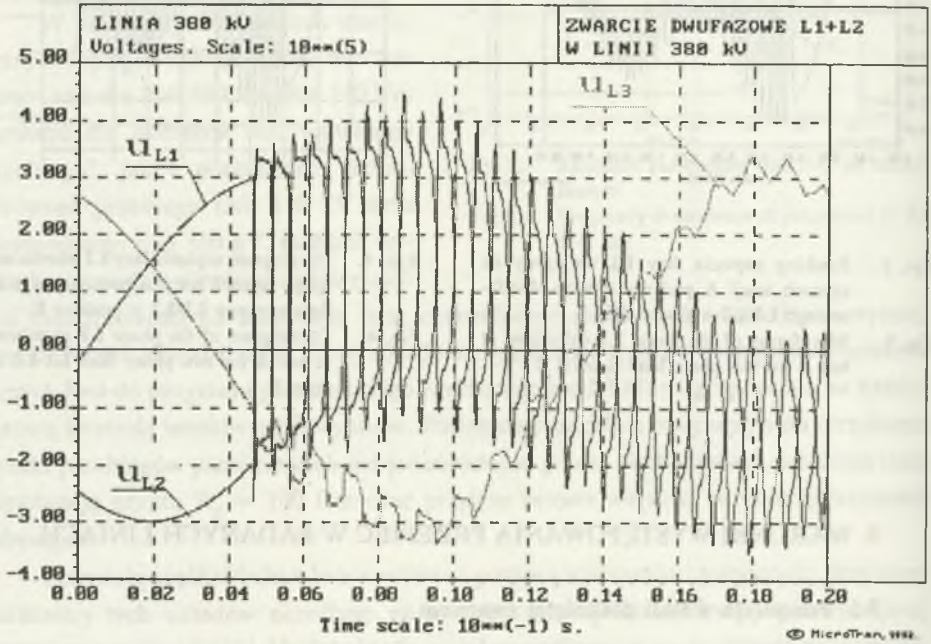
3. WARUNKI WYSTĘPOWANIA PRZEPIĘĆ W BADANYCH LINIACH

3.1. Przepięcia w linii dotkniętej zwarciem

W większości dotychczasowych badań przepięć w liniach najwyższych napięć zakładano jednoczesność zakłóceń - zwarć lub łączeń. Przy takich założeniach bardzo łatwo można określić warunki pojawiania się maksymalnych wartości chwilowych napięć. Dla zakłóceń występujących w chwili osiągnięcia maksimum przez napięcie fazy dotkniętej zwarciem pojawiają się maksymalne wartości chwilowe napięć w linii, natomiast w przypadku przejścia przez zero napięcia fazy zwartej w momencie powstania zakłócenia przepięcia nie występują.

Dla zwarć niejednoczesnych wymienione prawidłowości nie obowiązują. Czynniki związane z parametrami układu, takimi jak lokalizacja zakłócenia, wartości z_0/z_1, r/x, rodzaj zakłócenia, odgrywają podobną rolę jak podczas zwarć jednoczesnych. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość przepięć napięciowych jest czas opóźnienia zwierania poszczególnych faz. Z uwagi na fakt, że zwarcia jednoczesne stanowią szczególny przypadek zakłóceń niejednoczesnych, wydaje się celowe określanie maksymalnych wartości przepięć dla wszystkich rodzajów zakłóceń bez ich różnicowania.

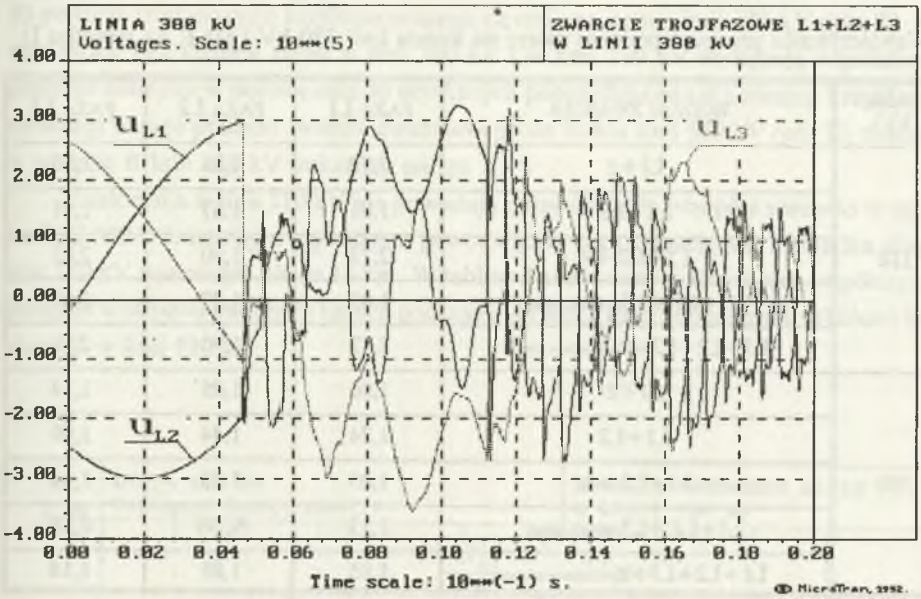
Jak wykazały badania, przejściowe składowe swobodne wyższej częstotliwości ulegają największemu tłumieniu w następstwie zwarć z udziałem ziemi. Słabe tłumienie tych składowych podczas zwarć bez udziału ziemi, np. jak to pokazano na rys. 5, dla zwarcia dwufazowego L1+L2 nie powoduje jednak powstawania przepięć.



Rys. 5. Przebiegi przejściowe napięć fazowych na początku linii 380 kV podczas dwufazowego zwarcia na jej końcu

Fig. 5. Waveforms at the beginning of the 380 kV line for two phase fault at the end of this line

Podczas zwarć z udziałem ziemi, jak to pokazano przykładowo na rys. 6, pojawiają się napięcia nieznacznie przekraczające wartość znamionową w linii 380 kV o długości całkowitej (A-E) około 60 km. Podczas zakłóceń zwarciowych oraz łączeniowych w krótszej (około 15 km) linii 110 kV - przepięcia nie występowały. Największe wartości chwilowe napięć otrzymano w obydwu liniach podczas niejednoczesnego zwarcia trójfazowego z ziemią.



Rys. 6. Przebiegi przejściowe napięć fazowych na początku linii 380 kV podczas trójfazowego zwarcia niejednoczesnego na jej końcu

Fig. 6. Waveforms at the beginning of the 380 kV line for three-phase non simultaneous fault at the end of this line

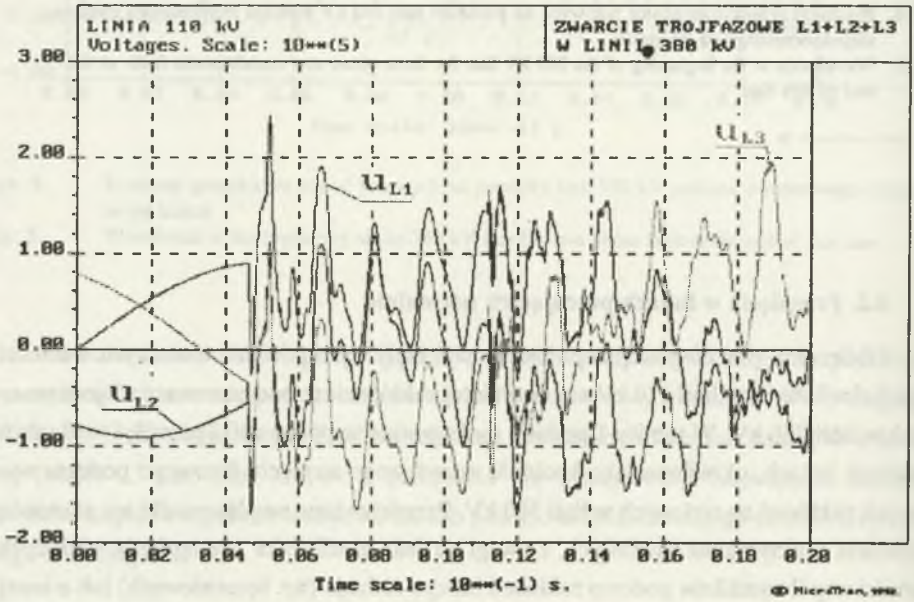
3.2. Przepięcia w liniach pracujących normalnie

Obliczenia przebiegów przejściowych wykazały występowanie znacznych wartości napięć chwilowych w linii 110 kV nie dotkniętej zakłóceniem podczas zwarć niejednoczesnych w linii 380 kV. W tablicy 1 podano maksymalne współczynniki przepięć w obydwu badanych liniach, określone jako krotność szczytowego napięcia fazowego podczas wybranych zakłóceń zwarciowych w linii 380 kV. Przedstawione współczynniki nie stanowią oczywiście maksymalnie możliwych, z uwagi na fakt możliwości wystąpienia większych wartości współczynników podczas zakłóceń innego rodzaju (np. łączeniowych) lub o innej lokalizacji. Zestawienie podane w tablicy powinno jedynie zwrócić uwagę na możliwości występowania przepięć w liniach nie dotkniętych zakłóceniem.

Tablica 1

Współczynniki przepięć podczas zwarć na końcu linii 380 kV (pkt E na rysunku 1)

Linia (kV)	RODZAJ ZWARCIA	FAZA L1	FAZA L2	FAZA L3
110	L1+Z	2,72	1,88	1,83
	L1+L2	1,81	1,67	1,91
	L1+L2 +Z	2,72	1,90	2,03
	L1+L2 +L3(JEDNOCZESNE)	1,49	1,27	1,68
	L1+L2+L3+Z(NIEJEDNOCZESNE)	2,72	1,90	2,19
380	L1+Z	1,06	1,05	1,14
	L1+L2	1,34	1,44	1,09
	L1+L2 + Z	1,05	1,05	1,14
	L1+L2 +L3(JEDNOCZESNE)	1,13	0,.96	0,86
	L1+L2+L3+Z(NIEJEDNOCZESNE)	1,05	1,05	1,14

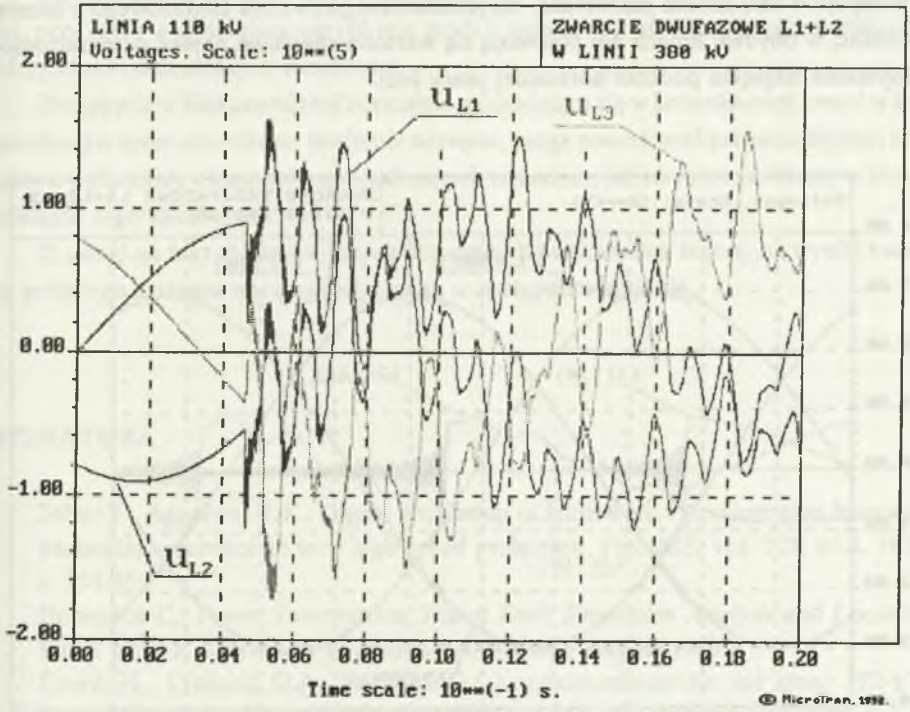


Rys. 7. Przebiegi przejściowe napięć fazowych w linii 110 kV (pkt B) podczas trójfazowego zwarcia niejednoczesnego na końcu linii 380 kV (pkt E)

Fig. 7. Waveforms on the line 110 kV (p. B) by three-phase non simultaneous fault at the end of line 380 kV (p. E)

Na rys. 7 pokazano przykładowe przebiegi przejściowe napięć w linii 110 kV (pkt B) podczas trójfazowego niejednoczesnego zwarcia na końcu linii 380 kV (pkt E). Podczas zwarć bez udziału ziemi w linii 380 kV i w linii 110 kV występują współczynniki przepięć mniejsze w porównaniu do uzyskanych poprzednio zwarć z ziemią. Przykładowe przebiegi napięć podczas zwarcia dwufazowego na końcu linii 380 kV (pkt E) obliczone w punkcie B linii 110 kV pokazano na rys. 8.

Zakłócenia w linii 110 kV nie powodują pojawiania się przepięć zarówno w tej, jak i w linii 380 kV. Istotnym czynnikiem powodującym taką sytuację jest niewielka długość linii 110 kV wynosząca około 13 km. W tablicy 2 zestawiono maksymalne współczynniki przepięć w obydwu badanych liniach podczas wybranych niejednoczesnych zakłóceń zwarciowych w linii 110 kV.



Rys. 8. Przebiegi przejściowe napięć fazowych w linii 110 kV (pkt B) podczas zwarcia dwufazowego na końcu linii 380 kV (pkt E)

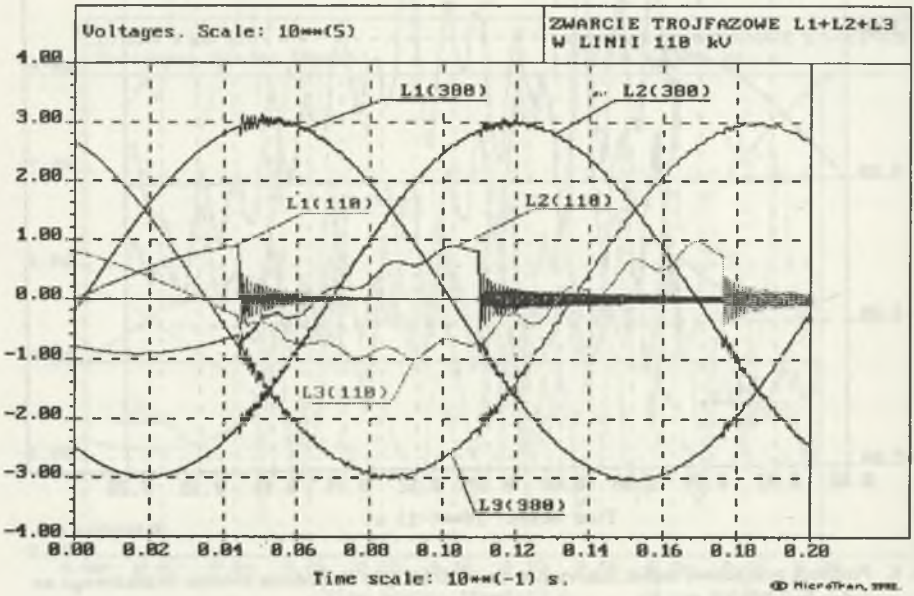
Fig. 8. Waveforms on the line 110 kV (p. B) under two-phase fault conditions at the end of line 380 kV (p. E)

Tablica 2

Współczynniki przepięć podczas zwarć w linii 110 kV

LINIA (kV)	RODZAJ ZWARCIA	FAZA L1	FAZA L2	FAZA L3
110	L1+L2+L3(JEDNOCZESNE)	0,99	1,01	0,88
380		0,98	0,97	0,96
110	L1+L2+L3+Z(NIEJEDNOCZESNE)	0,99	1,01	1,10
380		1,01	0,99	0,97

Przedstawione na rys. 9 przykładowe przebiegi napięć na początku obydwu linii obliczone zostały dla najgroźniejszego w linii 110 kV, z punktu widzenia pojawiających się przepięć w obu liniach zakłócenia, niejednoczesnego zwarcia trójfazowego z ziemią. Jak widać, w obydwu liniach nie pojawiają się wartości chwilowe napięć przekraczające maksymalne napięcia podczas normalnej pracy linii.



Rys. 9. Przebiegi przejściowe napięć fazowych w obydwu liniach podczas niejednoczesnego zwarcia trójfazowego w linii 110 kV

Fig. 9. Waveforms on the both line by thre-phase non-simultaneous fault on the line 110 kV

Amplituda napięcia w linii 110 kV pracującej normalnie podczas zwarć niejednoczesnych w linii 380 kV jest szczególnie duża w fazie L1 (zwieranej jako pierwsza) oraz L3. Oscylacyjny charakter przebiegów przejściowych napięć fazowych o dużych amplitudach może powodować nieprawidłowe wyłączenia linii, w których nie wystąpiło zakłócenie.

4. UWAGI KOŃCOWE

Wyniki badań prezentowane w niniejszym artykule dotyczyły przebiegów przejściowych w liniach 380 kV oraz 110 kV zawieszonych na tych samych konstrukcjach wsporczych. Jak wykazały badania, najgroźniejszym zakłóceniem zwarciowym z punktu widzenia możliwości wystąpienia przepięć są trójfazowe niejednoczesne zwarcia z ziemią.

Za pomocą programu MicroTran można uzyskać wyniki dla dowolnej konfiguracji linii, przy czym wcześniejsza weryfikacja modeli zastosowanych w programie potwierdza wiarygodność otrzymanych rezultatów.

Przepięcia w linii pracującej normalnie, pojawiające się w konsekwencji zwarć w linii pracującej w systemie o innym poziomie napięcia, mogą powodować zarówno błędne, kaskadowe wyłączanie elementów nie dotkniętych zwarciem, jak również problemy w zlokalizowaniu tego zakłócenia.

Z uwagi na fakt zbierania danych dotyczących polskich linii tego typu, wyniki badań dla polskiego systemu będą opublikowane w następnym artykule.

LITERATURA

1. Johns T., Aggarwal R.K.: Digital simulation of faulted e.h.v. transmission lines with particular reference to very high-speed protection, *Proc.IEE,* vol. 123, no.4, 1976, s. 353-359.
2. Boonybol C.: *Power Transmission System Fault Simulation Analysis and Location,* Ph.D. Dissert. University of Missouri, Columbia, August 1968.
3. Erven H., Crameri D.A., Bacchini G.: Kurzschlussversuche auf einer 380-kV-Doppelleitung zur Erprobung neuer Schutzsysteme, *Bull. SEV/VSE* 83, 1992, s. 3-11
4. *MicroTran, Transients Analysis Program for Personal Computers*, MicroTran Power System Analysis Corporation, Published, June 1991, Vancouver, B.C., Canada.
5. Sowa P.: Uwarunkowanie funkcji kryterium najmniejszych kwadratów dla optymalizacji identyfikowanych parametrów układów zredukowanych, *Mat. VI Międz. Konf. Nauk. "Aktualne Problemy w Elektroenergetyce"* Gliwice-Kozubnik, 1993, s. 161-171

6. Sowa P., Aschwanden Th., Bräunlich R., Crameri D.A.: MicroTran(EMTP)-Modellierung und Berechnung von Ausgleichsvorgängen auf Höchstspannungsleitungen für verschiedene Kurzschlussfälle, *Oddano do druku w Bull. SEV/VSE.*

Recenzent: Prof. dr hab inż. Zbigniew Kowalski

Wpłynęło do Redakcji dnia 22 marca 1994 r.

Abstract

The case described in the paper is analyzed with the **MicroTran** [4] version of the Electromagnetic Transients Program (EMTP). This work is concerned with the most severe conditions of fault and shows the possibility of the overvoltages caused by non-simultaneous faults in the different coupled high-voltage line working on the same tower construction. A one-line diagram of the portion of the h.v. transmission system studied is shown in Fig. 1. The analysed transmission lines are simulated as a distributed-parameter system with frequency-dependence parameter. Faults are applied at the end of the transmission line **A-E**, consisting between points **B** and **C** of nine phase conductors. As showed in Fig. 2 the typical model parameters calculated for this line depend strongly on the frequency. Therefore in this paper the Marti-model with frequency dependent parameter has been used.

An extensive series of studies has relevated that the magnitude of transient components is most heavily affected by the fault position, the fault instant, the sequence impedance ratio Z_0/Z_1, the type of fault and the time difference.

It is shown that under non-simultaneous faults very severe transient conditions can exist on lines.

The results are compared for the extremaly fault conditions, from the overvoltages point of view, with faults close to voltage maximum.

The figures in papers show the examples of the plotter oscillogram of the voltages at the beginning of the 380 kV and 110 kV lines (p. **A**) in the worst cases of the simultaneous and non-simultaneous fault, but the short-circuit occurs at the end of the 380 kV line (p. E).

As show in Fig. 7 and 8 the travelling waves of the voltage fault transient waveform in the ***sound 110 kV line*** are very distorted. In this line by steady state the critical overvoltage is appeared and the instant values of voltages are higher than 2.7 of the nominal maximum value of the voltage.

Using MicroTran program it is shown that all transients in high voltage system can be determined and the most severe conditions can be modelled without risk and with very flexible possibility to determine the performance of electrical equipment in the 110 kV line under all posible fault conditions in 380 kV transmission line system.