

Analysis of the Feasibility of Locating 110 kV Line in 400 kV Right-of-way in Terms of Electromagnetic Interaction

Authors

Wiesław Nowak
Rafał Tarko

Keywords

overhead power lines, electromagnetic interaction, designing

Abstract

In this paper an analysis of the feasibility of locating a 110 kV line in a 400 kV line right-of-way in terms of electromagnetic interaction is presented. The analysis was performed in a model system with the use of the EMTP-ATP simulation program. Construction conditions of the 110 kV line and its subsequent operation were considered. Normal operation conditions and short-circuit in 400 kV line were taken into account. The paper presents the results of the calculation of the prospective touch voltages and touch currents in the 110 kV line.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013109

1. Introduction

The problem of electromagnetic interaction of power lines is not new. Even at the outset of the power sector development, in 1880–1890, a negative impact of overhead lines on telecommunication circuits was observed. Ever since, the problem of electromagnetic fields and their interactions has been an important element of both engineering and operation of electric power facilities [1].

The impact of electromagnetic fields is examined in two basic aspects. The first is their effect on living organisms and the risks this entails. The other aspect, strictly technical, concerns impacts resulting in voltages and currents induced in objects close to electric power facilities. These impacts can interfere with the safety of people and equipment, or endanger it.

The influence of power lines on other power lines has not raised much interest, which is mainly due to the mitigation of its effects by avoiding too long stretches of close-ups, and assuming appropriate angles at crossings. One of such interesting effects was inducing voltages of hundreds kilovolts on both sides of a disconnected 750 kV line due to the impact of another 750 kV line parallel to the first one at a length of ca. 70 km, at a distance of ca. 80 m [2]. Another example is the electromagnetic interaction between a 110 kV line set on shared supports in parallel to an inactive 220 kV line (close-up ca. 26 km long) [3, 4].

However, given the current economic and legal situation, resulting mainly from the very high cost of land, difficulties in its acquisition, and formal complexities in investment processes, the problem of electric power infrastructure's electromagnetic interference has gained an entirely new dimension. An example can be the trend in locating buildings (including residential buildings) in the immediate vicinity of 110 kV power lines [1, 5].

Difficulties in the construction of new power lines necessitate

searching for new engineering concepts, such as the location of a proposed line in the right-of-way of an existing line. The paper is focused on analyzing the feasibility of such a concept in terms of the electromagnetic interaction, in relation to the proposed 110 kV line build in the right-of-way of the existing 400 kV line.

2. Characteristics of the considered system and nature of problem

Subject to analysis is the system shown in Fig. 1. It consists of two single-circuit power lines: a 400 kV (existing) line and a 110 kV (proposed) line. At a distance of 25 km from a switching substation A, a 20 km stretch (section Z1–Z2) of the route of a 110 kV line is planned within a 400 kV line's right-of-way, which, according to document [6], is 70 m wide (35 m on each side of the line's axis). The distance between the lines' axes in the discussed concept of the 110 kV line equals to 30 m (Fig. 2).

The electromagnetic field of an electric power facility is characterized by a wide frequency spectrum, though it is electric and magnetic fields at the network frequency which significantly predominate.

Sample images of electric and magnetic fields in the vicinity of the analysed lines are shown in Fig. 3. They were obtained under the assumption of maximum operating voltages, 420 kV and 123 kV, respectively, and of 2,060 A current in 400 kV and 6.30 A in 110 kV lines.

In the analysis of the 400 kV line's impact, capacitive and magnetic coupling should be considered. Capacitive coupling is due to the electric field generated by the 400 kV line's phase conductors powered at the operating voltage. When the 110 kV line's phase conductors are not grounded, they gain a certain potential against the ground. As a result of capacitive coupling, line to ground voltages are induced. After grounding the conductors

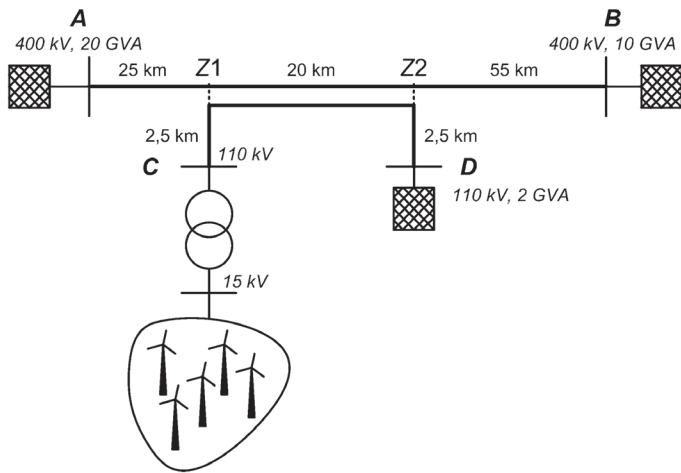


Fig. 1. Diagram of 110 kV line close to 400 kV line

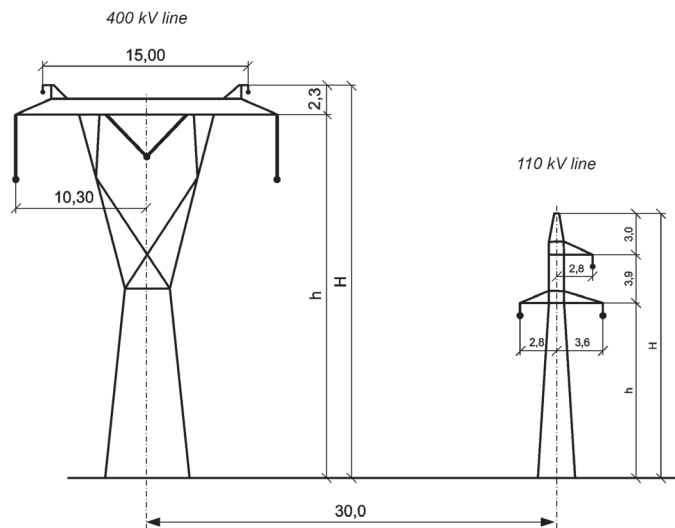


Fig. 2. 110 kV line routed in 400 kV line right-of-way

under the impact, their potential is zero (in the absence of other interactions), and the line-to-ground discharge currents determine the impact's current capacity in terms of potential electric shock hazard. The capacitively induced voltages and currents are dependent on the impacting line's voltage, spatial location of the conductors, and the close-up stretch length. Also relevant is the impact of ground wires.

The cause of such magnetic interaction is the magnetic field generated by currents in the 400 kV line. As a result of coupling through mutual inductances along the 110 kV line's phase conductors, electromotive forces are induced, the values of which depend on operational currents in the 400 kV line, the conductors' mutual spatial positioning, and the close-up stretch length. Also relevant is inductive interaction of ground wires and adjacent conductive objects. After grounding both sides of the 110 kV line's conductors, currents are flowing in the ground-return loops created in that way, with the values resulting from the magnitude of the induced electromotive forces and the

ground-return loops' self impedances.

Of particular importance is the magnetic impact at faults in high and the extra high voltage grids, i.e. operating with a directly grounded neutral point, where short-circuit currents exceed the rated currents many times.

Theoretical methods of capacitive and magnetic coupling

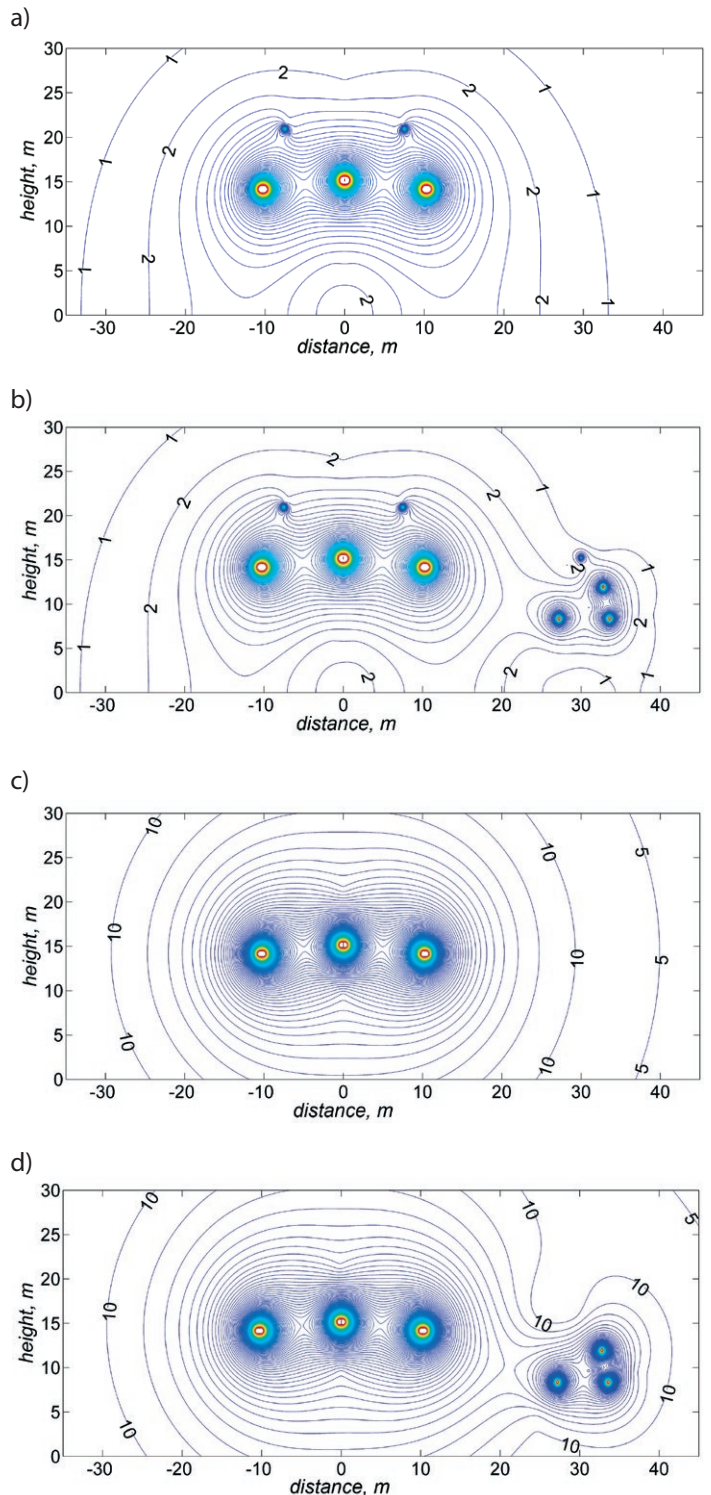


Fig. 3. Images of electric (a, b) and magnetic (c, d) fields of 400 kV (a, c), and 400 kV and 110 kV (b, d) lines: electric field strength isoline interval 1 kV/m, magnetic field strength interval 5 A/m

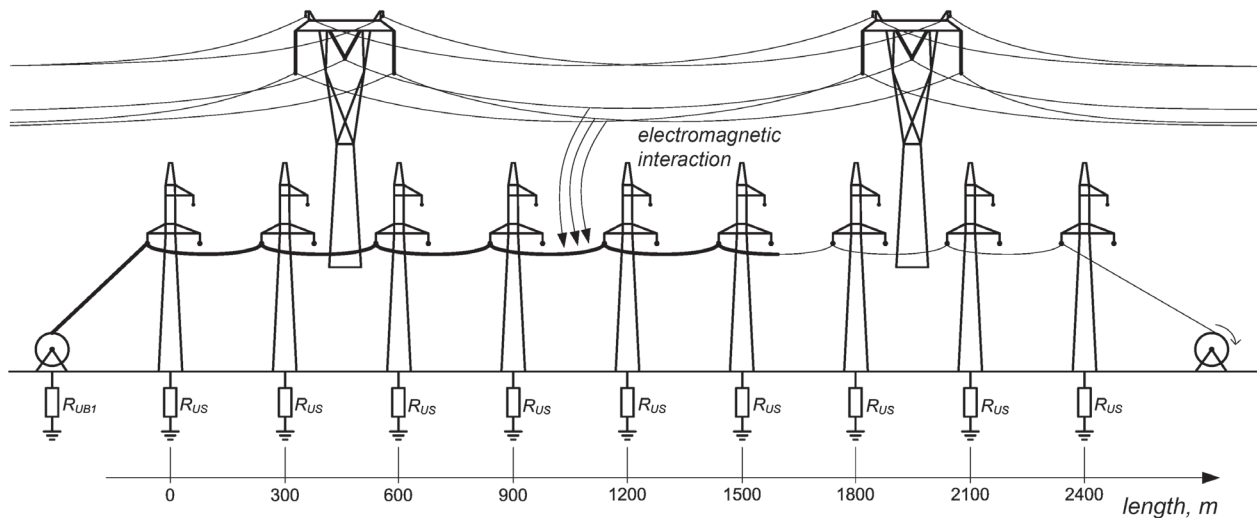


Fig. 4. Assembly model of 110 kV line section

analysis are based on the laws of electrostatics, and on the ground-return circuits theory, respectively. In this analysis macroscopic impact models were employed, using line models implemented in the EMTP-ATP programme. This approach provides a comprehensive coverage of both types of interactions, and the ability to easily quantify the interaction parameters in the 400 kV line. Such models were positively verified based on measurements of real objects [3, 4].

To analyse the impact of the 400 kV line, three groups of problems were considered:

1. conditions in which a 110 kV line was constructed
2. influence of 400 kV line on 110 kV line operation in steady and transient states
3. conditions of maintenance on a disconnected 110 kV line.

3. Conditions of 110 kV line's construction

Provided that the distance between the new 110 kV line and the 400 kV line exceeds 20 m, then, judging from images in Fig. 3a and 3c, all works will be performed in electric field below 4 kV/m, and a magnetic field below 50 A/m. Accordingly, no protective zones specified in the work environment in line with the Regulation of the Minister of Labour and Social Policy are available in this area [7]. From the electric shock hazard perspective, it is important to consider impacts in the form of induced voltages and currents.

The voltages induced due to capacitive coupling are differences between the conductor and ground potentials. The situation is different with magnetic coupling, where the induced voltages are electromotive forces. From the electric shock hazard perspective, induced voltages can be treated as touch voltages, i.e. differences in potential between two points, which may be touched simultaneously by human hands or a hand and a leg. This may happen during assembly or while performing maintenance works. Once such points are touched, between which there is a touch voltage, a touch current flows through the human body. Usually the human body's marginal reactance is neglected, and in safety analysis for grid frequency voltages and currents its resistance is adopted at 1,000 Ω.

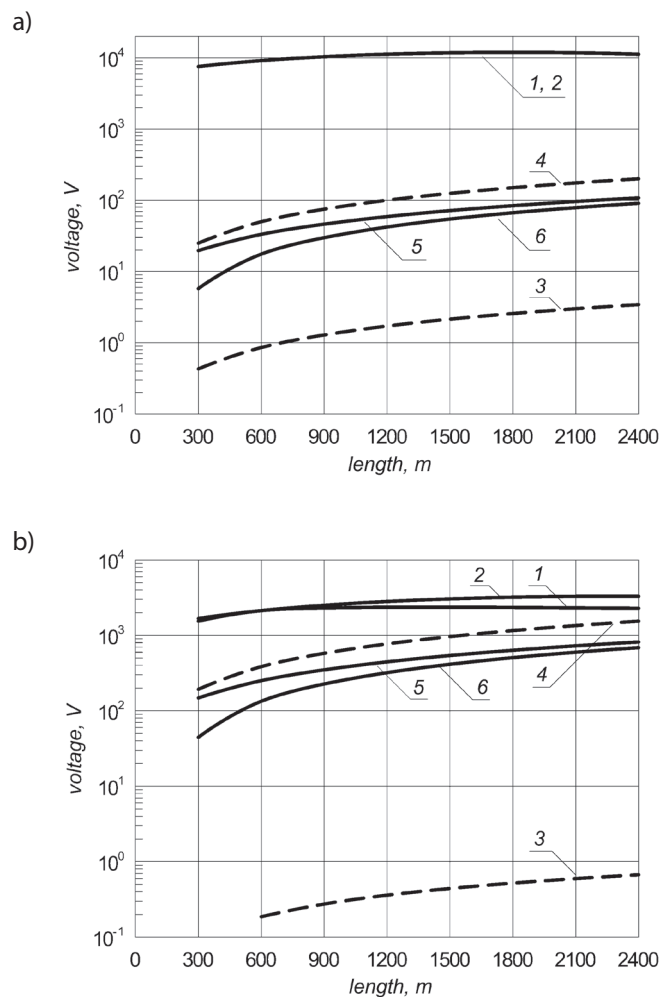


Fig. 5. Touch voltages induced at the beginning (curves 1, 3, 5) and the end (curves 2, 4, 6) of the rolled-out stretch at the assembly of the 110 kV line section: a) 400 kV line normal operation, b) 400 kV line phase-to-earth fault; 1, 2 – no grounding of drum and conductor travelers suspended on line insulators; 3, 4 – drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and no conductor traveler grounding; 5, 6 – drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and conductor traveler grounding through support resistance $R_{US} = 15 \Omega$

For this analysis of the voltages and currents induced during the 110 kV line construction, the model system was adopted as shown in Fig. 4. It refers to the initial phase of the section’s assembly, involving pilot wire pulling. The model consists of eight equal 300 m spans, formed by nine supports with grounding resistances of 15 Ω. The aim of the analysis was to determine the expected touch voltages and touch currents depending on the stretched pilot wire’s length.

The following types of installation were considered:

- no grounding of drum and conductor traveler suspended on line insulators
- drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and no conductor traveler grounding
- drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and conductor traveler grounding through the support resistance $R_{US} = 15 \Omega$

The following 400 kV line operation options were considered:

- normal operation at 420 kV voltage and 2,060 A phase current
- phase-to-earth fault of 400 kV line’s phase L3, at impact current $I''_k = 8.16 \text{ kA} = 8.16 \text{ kA}$.

Fig. 5 presents the touch voltages induced at both ends of the rolled-out stretch, while Fig. 6 presents the touch currents for the maximum stretch length of 2,400 m.

It follows from the analysis of prospective touch voltages and touch currents that during the 110 kV line construction in the 400 kV line right-of-way, an electric shock hazard may occur not only at a fault, but also during normal operation of the 400 kV line. The occurrence of an electric shock hazard is practically independent of the method of grounding the drum, from which the wire is unwound, and grounding of the conductor travelers.

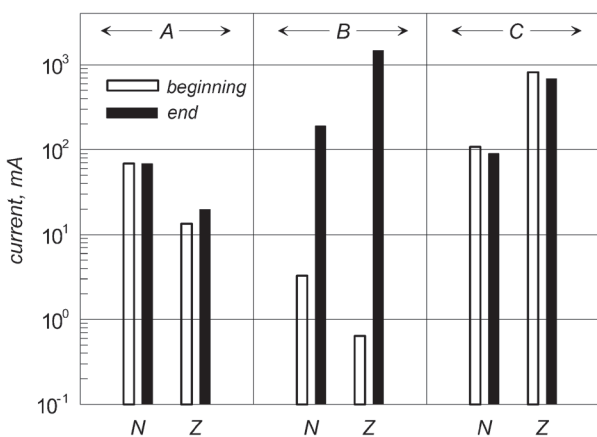


Fig. 6. Touch currents for rolled-out stretch maximum length 2,400 m, at 110 kV line section assembly, at 400 kV line normal operation (N) and at 400 kV line phase-to-earth fault (Z)

A – no grounding of drum and conductor travelers suspended on line insulators; B – drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and no conductor traveler grounding; C – drum grounding through resistance $R_{UB1} = 50 \Omega$ and conductor traveler grounding through support resistance $R_{US} = 15 \Omega$

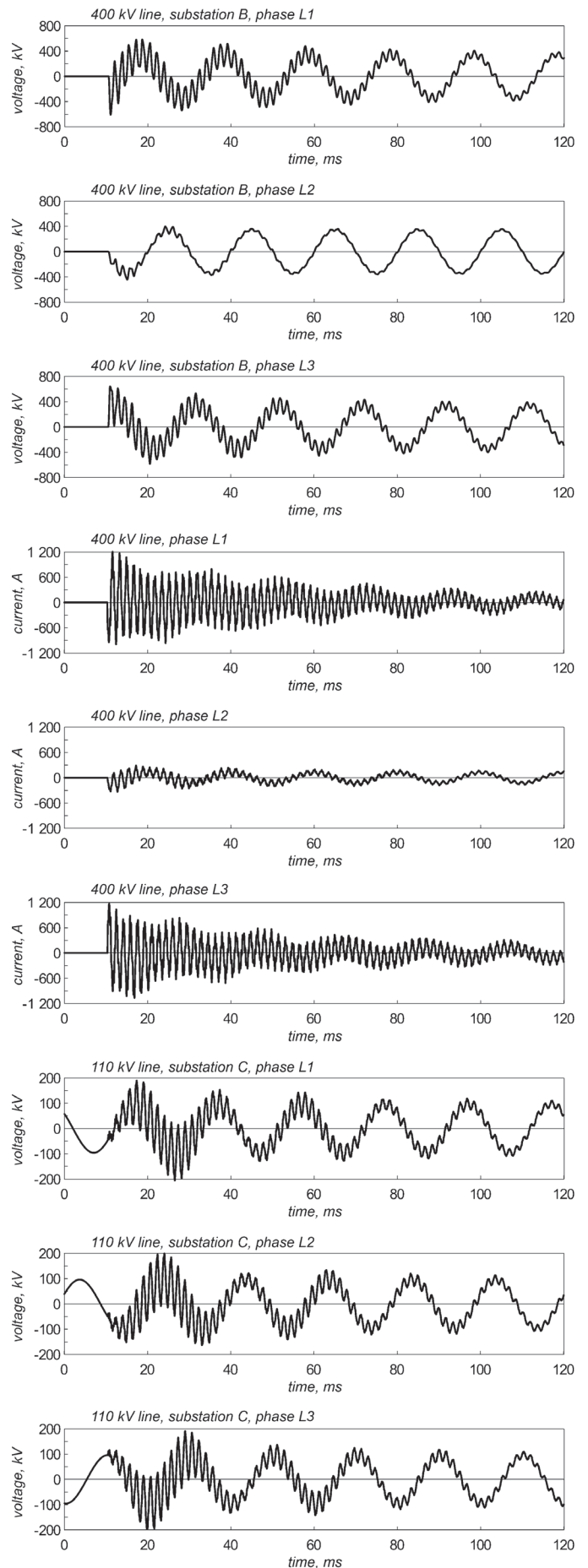


Fig. 7. Voltage and current waveforms at selected points of 400 kV and 110 kV grids

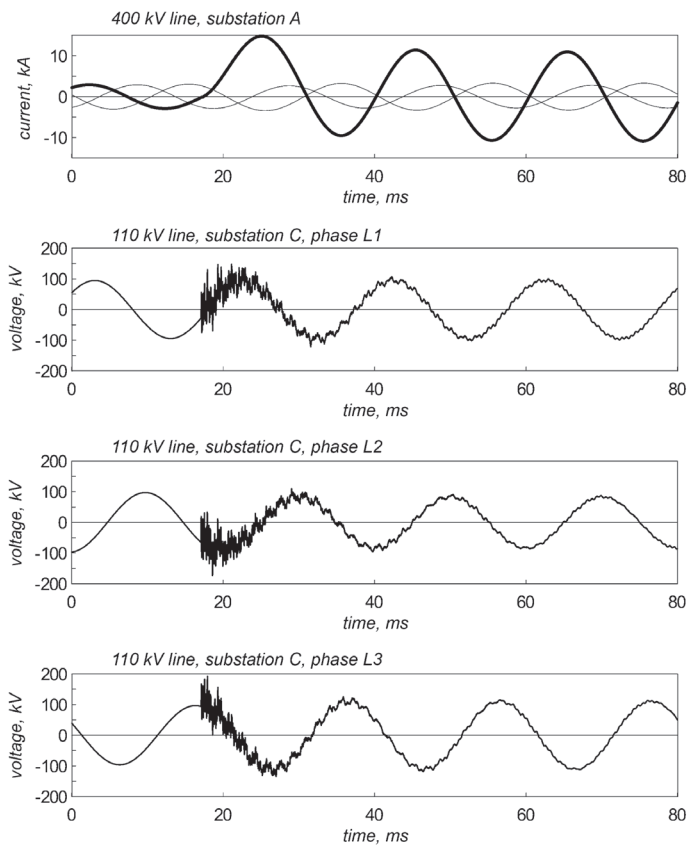


Fig. 8. Current waveforms in 400 kV line at phase-to-earth fault, and voltage waveforms in switching substation C in 110 kV grid

4. Impact of 400 kV line on 110 kV line operation in steady and transient states

In the analysis of the 400 kV line impact on the 110 kV line operation, the following options were considered:

- normal operation of 400 kV and 110 kV lines
- switching on 400 kV line
- phase-to-earth fault in 400 kV line.

It can be concluded that in the steady state the 400 kV line slightly increases the voltage asymmetry in the 110 kV line. However, this is not a significant change, and the share of voltage and current zero components does not exceed 1% of the positive component.

In the analysis of the transient impact of the 400 kV line, the line was assumed to be switched on unloaded at the switching substation A. The switching of the 400 kV line was accompanied by transient voltage and current waveforms that were disturbing voltage and current waveforms in the 110 kV line (Fig. 7). The analysis showed that the switching operations in the 400 kV line were sources of transient overvoltage in the 110 kV line. Their peak values did not exceed ca. 200 kV, and thus they were below the level of surge protection provided by surge arresters, the reduced voltage of which at discharge current 30/60 ms was 214 kV. The simulations also included surge arresters in A and B switching substations of the 400 kV grid, and their reduced voltage was 656 kV. Also analysed was the 400 kV line impact at its phase-to-earth fault. The largest current and voltage effects in

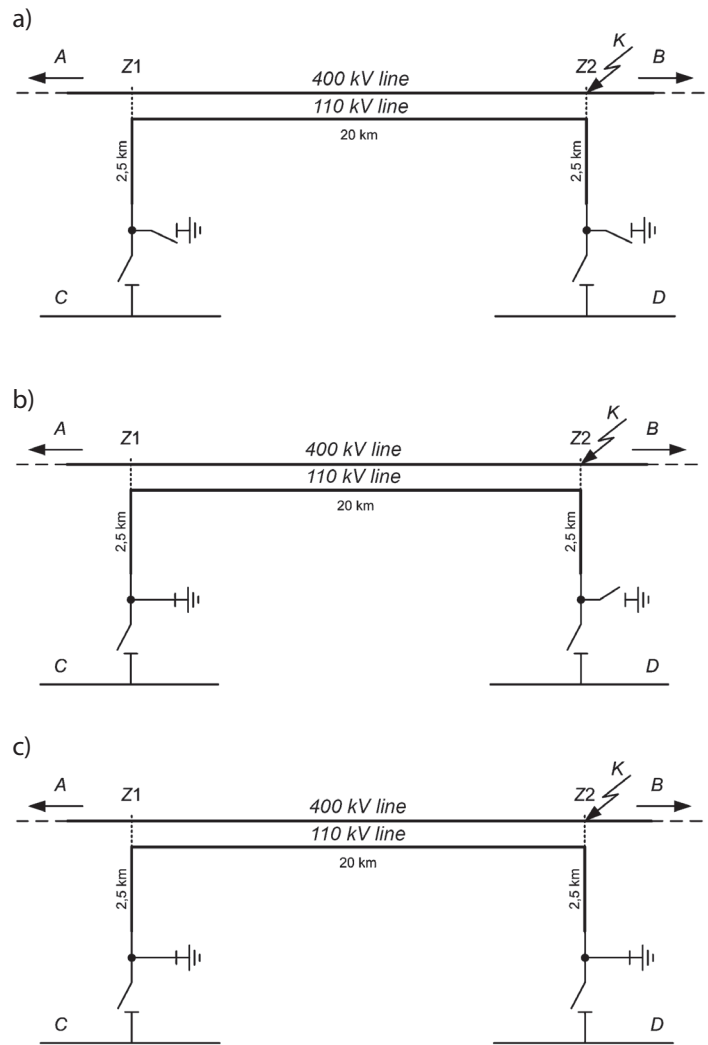


Fig. 9. 110 kV line disconnection options a) no grounding, b) one-end grounding in substation C, c) both-ends grounding in substations C and D

a close line are produced by phase-to-earth fault in a 400 kV line, due to larger phase asymmetry.

The calculations were made for the most unfavourable conditions in terms of the short-circuit current (location Z2 in Fig. 1 and the moment of the fault causing the highest surge) and in the phase closest to the 110 kV line (phase L3). Fig. 8 shows currents in the 400 kV line after the fault, and voltages in 110 kV switching substation C.

It can be concluded that the flow of short-circuit currents in the 400 kV line was a source of transient voltage surge with peaks not exceeding 200 kV. Electromagnetic coupling between the lines also caused significant asymmetry of voltages and currents in the 110 kV line. It should be borne in mind, however, that the time of its occurrence is limited by the fault duration in the 400 kV line.

5. Analysis of maintenance work conditions

The conditions of maintenance works performed at disconnected 110 kV lines were analysed for the following three variants:

- with their ends ungrounded (Fig. 9a)

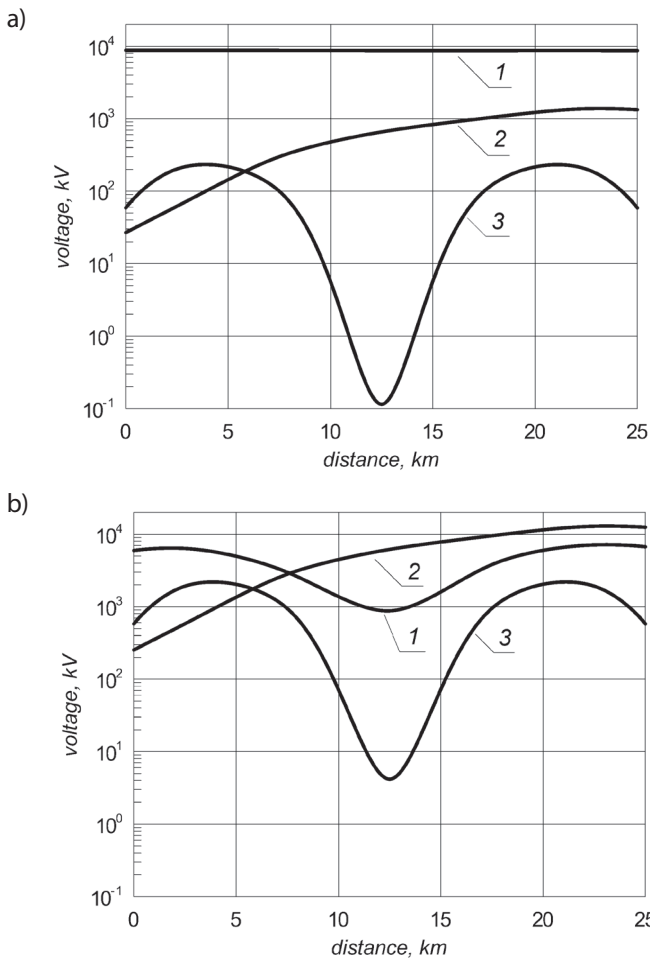


Fig. 10. Touch voltages along 110 kV line as a function of distance from switching substation C: a) 400 kV line normal operation, b) 400 kV line phase-to-earth: 1 – no 110 kV line grounding, 2 – grounding in substation C, 3 – grounding in substations C and D

- with the line grounded in substation C (Fig. 9b)
- with the line grounded in substations C and D (Fig. 9c).

The resulting rms values of touch voltages and touch currents along the 110 kV line as a function of distance from switching substation C are shown in Fig. 10 and 11. It follows from the calculations that during maintenance works on the 110 kV line, an electric shock hazard may occur not only during a fault, but also during normal operation of the 400 kV line. The occurrence of an electric shock hazard is practically independent of the method in which the de-energized 110 kV lines were grounded.

6. Summary

The analysis showed that electric shock hazards may occur when constructing a 110 kV line within the impact zone of an existing 400 kV line. This hazard can occur not only during a fault in the 400 kV line, but also during its normal operation.

The analysis revealed that after making the 110 kV line, the impact of the 400 kV line on it was negligible. This applies to both normal (steady) operation of the 400 kV line and the impacts in transient states resulting from switching processes and faults in the 400 kV line.

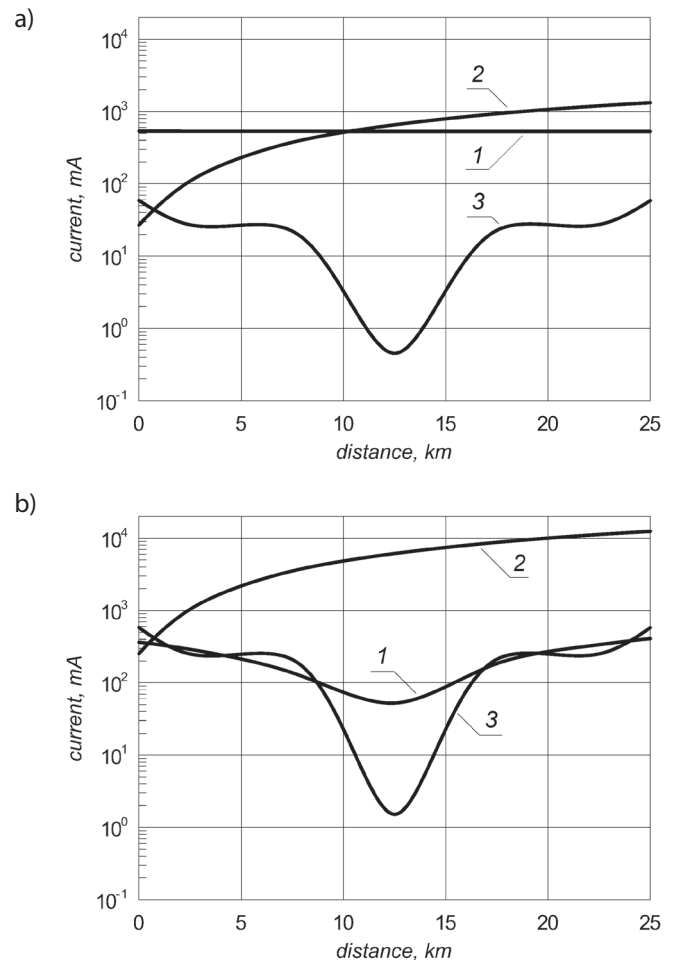


Fig. 11. Touch currents along 110 kV line as a function of distance from substation C: a) 400 kV line normal operation, b) 400 kV line phase-to-earth: 1 – no 110 kV line grounding, 2 – grounding in substation C, 3 – grounding in substations C and D

When planning the maintenance works on the de-energized 110 kV line, the occurrence of dangerous touch voltages and touch currents should be taken into account. This hazard can occur not only at a fault in the 400 kV line, but also during its normal operation. It should be noted that the occurrence of an electric shock hazard is practically independent of the method of grounding the de-energized 110 kV lines.

REFERENCES

1. Bąchorek W. et al., Problemy projektowania i eksploatacji napowietrznych linii elektroenergetycznych w aspekcie pól elektromagnetycznych [Problems of the design and operation of overhead power lines in terms of electromagnetic fields], V. Scientific and Engineering Conference „Overhead Power Lines”, PTPIREE, Dźwirzyno, 15 May 2012, pp. 6–11.
2. Szostek T., Kurpanik B., Wojciechowski J., Analiza indukowanych napięć w obustronnie odłączonej linii 750 kV Chmielnicka Elektrownia Jądrowa – Rzeszów [Analysis of the voltages induced in both-ends disconnected 750 kV line Chmielnik Nuclear Power Plant – Rzeszów], Energetyka 1988, No. 10, pp. 365–370.

3. Nowak W. et al., Analiza warunków eksploatacyjnych linii 110 kV Klikowa-Połaniec i 220 kV Klikowa-Niziny w aspekcie oddziaływania elektromagnetycznego [Analysis of the operating conditions of Klikowa-Połaniec 110 kV line and Klikowa-Niziny 220 kV line in terms of electromagnetic interaction], Energetyka 2006, No 2, pp. 118–123.
4. Nowak W. et al., Analysis of overhead lines working conditions – case study of electromagnetic coupling effect, 51. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 11–15 September 2006, [CD], pp. 1–10.
5. Nowak W., Tarko R., Komputerowa analiza pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej wytwarzanego przez linie i stacje elektroenergetyczne [Computer-aided analysis of the grid frequency electromagnetic field generated by power lines and substations], Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2008, No. 25, pp. 111–114.
6. PSE Operator SA, Linia napowietrzna 400 kV, Standardowe Specyfikacje Techniczne [400 kV overhead line, Standard Technical Specifications], Konstancin-Jeziorna, 2009.
7. Regulation of the Minister of Labour and Social Policy of November 29, 2002, on the maximum allowable concentrations and levels of noxious factors in the workplace (Journal of Laws, No. 217, Item 1833, as currently amended).

Wiesław Nowak

AGH University of Science and Technology in Kraków

e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl

Graduate of AGH University of Science and Technology. Since 1987 he has worked at his alma mater, now an associate professor at AGH. His research speciality is power engineering, and his main research interests concern power grid analysis.

Rafał Tarko

AGH University of Science and Technology in Kraków

e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Graduate of AGH University of Science and Technology. He has been working at the Department of Electrical and Power Engineering of the University of Science and Technology since 2001. His main research interests include analysis of operational exposures and electromagnetic transients in power networks.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 102–108. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Analiza możliwości lokalizacji linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV w aspekcie oddziaływań elektromagnetycznych

Autorzy

Wiesław Nowak
Rafał Tarko

Słowa kluczowe

napowietrzne linie elektroenergetyczne, oddziaływanie elektromagnetyczne, projektowanie

Streszczenie

Przedmiotem artykułu jest analiza możliwości lokalizacji linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV w aspekcie oddziaływań elektromagnetycznych. Analizę przeprowadzono w układzie modelowym z wykorzystaniem programu symulacyjnego EMTP-ATP. Rozważono zarówno warunki budowy linii 110 kV, jak i jej późniejszej eksploatacji w stanie pracy normalnej oraz zwarc w linii 400 kV. Wyznaczono spodziewane w tych warunkach w linii 110 kV napięcia dotykowe i prądy rażeniowe.

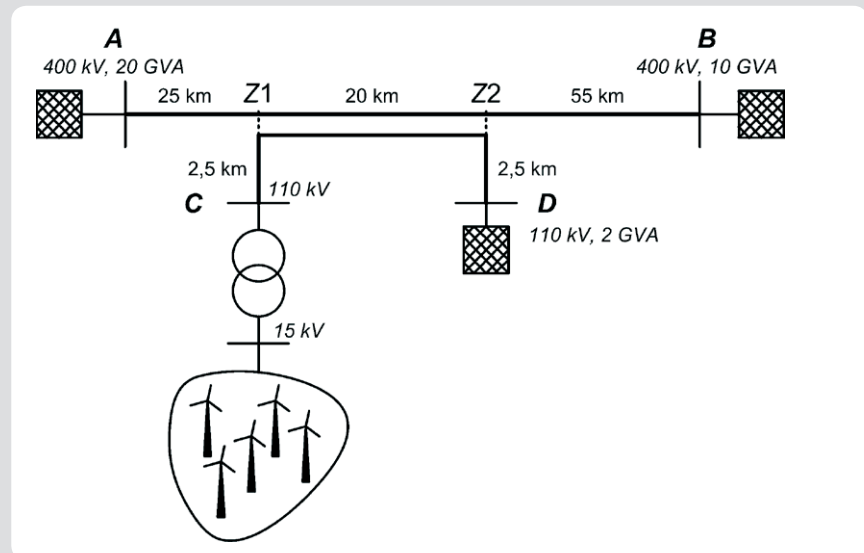
1. Wstęp

problem oddziaływania elektromagnetycznego linii elektroenergetycznych nie jest zagadnieniem nowym. Już na początku rozwoju elektroenergetyki, w latach 1880–1890, zaobserwowano zjawisko negatywnego wpływu budowanych wówczas linii napowietrznych na obwoły telekomunikacyjne. Od tego momentu problem pól elektromagnetycznych i ich oddziaływań pozostaje ważnym elementem zarówno projektowania, jak i eksploatacji obiektów elektroenergetycznych [1].

Oddziaływanie pól elektromagnetycznych rozpatrywane jest w dwóch podstawowych aspektach. Pierwszy z nich to wpływ pól na organizmy żywe i zagrożenia z tego wynikające. Drugi aspekt, *stricte* techniczny, dotyczy oddziaływań, których skutkiem są napięcia i prądy indukowane w obiektach zbliżonych do obiektów elektroenergetycznych. Oddziaływania te mogą być oddziaływaniami zakłócającymi lub niebezpiecznymi z punktu widzenia bezpieczeństwa ludzi i urządzeń.

Oddziaływanie linii elektroenergetycznych na inne linie elektroenergetyczne nie było przedmiotem szczególnych zainteresowań, co wynikało przede wszystkim z minimalizowania skutków oddziaływań przez unikanie zbyt długich odcinków zbliżeń oraz przyjmowanie odpowiednich wartości kątów skrzyżowań. Jednym z ciekawszych oddziaływań tego typu było indukowanie napięć o wartości kilkuset kilowoltów w obustronnie odłączonej linii 750 kV, wskutek oddziaływania drugiej linii 750 kV, biegnącej równoległe na długości ok. 70 km, w odstępnie ok. 80 m [2]. Innym przykładem jest oddziaływanie elektromagnetyczne pomiędzy linią o napięciu 110 kV prowadzoną na wspólnych konstrukcjach wsporczych, równoległe z nieczynną linią 220 kV (długość zbliżenia ok. 26 km) [3, 4].

Jednak przy obecnych uwarunkowaniach ekonomiczno-prawnych, wynikających przede wszystkim z bardzo wysokich kosztów gruntów, trudności ich



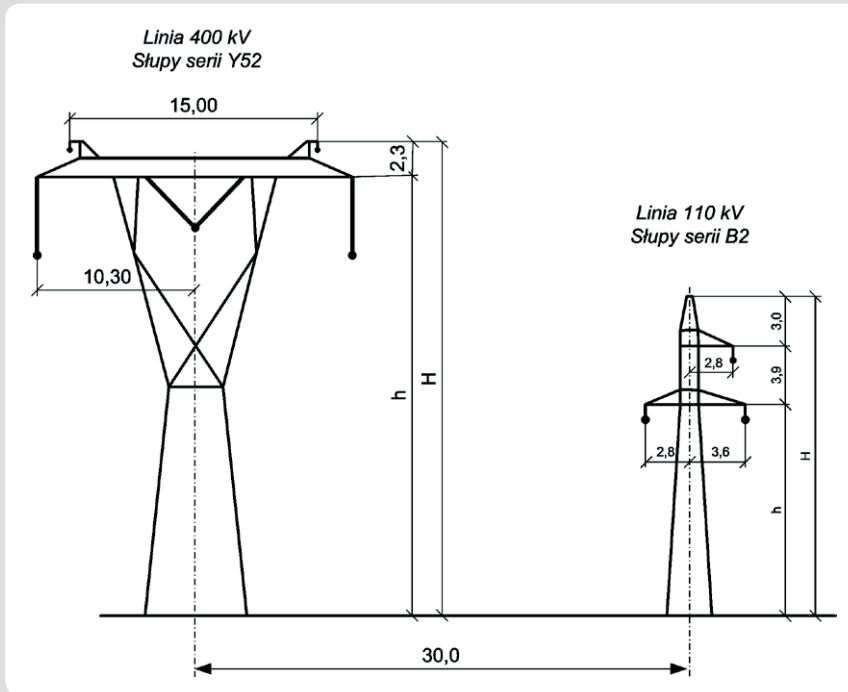
Rys. 1. Schemat linii 110 kV zbliżonej do linii 400 kV

pozyskiwania oraz zawłości formalnych w procesach inwestycyjnych, problem oddziaływań elektromagnetycznych infrastruktury elektroenergetycznej nabrał całkiem nowego wymiaru. Przykładem może być tendencja w lokalizacji obiektów budowlanych (w tym mieszkalnych) w jak najbliższym sąsiedztwie linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV [1, 5].

Trudności w budowie nowych linii elektroenergetycznych wymuszają poszukiwanie nowych koncepcji projektowych, np. w postaci usytuowania planowanej linii w pasie technologicznym linii istniejącej. Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza możliwości realizacji właśnie takiej koncepcji z punktu widzenia oddziaływań elektromagnetycznych, w odniesieniu do projektowanej linii 110 kV, prowadzonej w pasie technologicznym istniejącej linii 400 kV.

2. Charakterystyka rozważanego układu i istota problemu

Przedmiotem analizy jest układ przedstawiony na rys. 1. Stanowią go dwie jednocierowe linie elektroenergetyczne: o napięciu 400 kV (linia istniejąca) i 110 kV (linia projektowana). W odległości 25 km od rozdzielni A planowane jest poprowadzenie na długości 20 km (odcinek Z1–Z2) trasy linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV, który zgodnie z dokumentem [6] ma szerokość 70 m (po 35 m od osi linii w obie strony). W rozważanej koncepcji usytuowania linii 110 kV odległość pomiędzy osiami linii wynosi 30 m (rys. 2). Pole elektromagnetyczne wytwarzane przez obiekty elektroenergetyczne charakteryzuje się szerokim widmem częstotliwości, jednak dominujące znaczenie mają pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości sieciowej.



Rys. 2. Linia 110 kV usytuowana w pasie technologicznym linii 400 kV

Przykładowe obrazy pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu analizowanych linii przedstawiono na rys. 3. Otrzymano je przy założeniu najwyższych napięć roboczych, wynoszących odpowiednio 420 kV i 123 kV, oraz obciążenia 2060 A w linii 400 kV oraz 630 A w linii 110 kV.

W analizie oddziaływania linii 400 kV należy rozważyć sprzężenia pojemnościowe oraz magnetyczne. Oddziaływanie pojemnościowe jest skutkiem pola elektrycznego wytwarzanego przez znajdujące się pod napięciem roboczym przewody fazy linii 400 kV. W sytuacji, gdy przewody fazy linii 110 kV nie są uziemione, uzyskują względem ziemi określony potencjał. W wyniku sprzężenia pojemnościowego dochodzi do indukowania napięć doziemnych. Po uziemieniu przewodów podlegających oddziaływaniu ich potencjał wynosi zero (przy braku innych oddziaływań), a wartości doziemnych prądów rozładowania określają wydajność prądową oddziaływania w aspekcie potencjalnego zagrożenia porażeniowego. Wartości indukowanych pojemnościowo napięć i prądów zależne są od napięć linii oddziałującej, przestrzennego usytuowania przewodów i długości odcinka zbliżenia. Istotne jest również oddziaływanie uziemionych przewodów odgromowych.

Przyczyną oddziaływania magnetycznego jest pole magnetyczne wytworzone przez prądy płynące w przewodach linii 400 kV. W wyniku sprzężenia poprzez indukcyjności wzajemne wzdłuż przewodów fazowych linii 110 kV indukowane są siły elektromotoryczne, których wartości zależne są od prądów roboczych w przewodach linii 400 kV, wzajemnego przestrzennego usytuowania przewodów i długości odcinka zbliżenia. Istotne jest również redukcyjne oddziaływanie uziemionych przewodów

odgromowych i sąsiednich obiektów przewodzących prąd. Po obustronnym uziemieniu przewodów linii 110 kV w utworzonych wówczas pętłach ziemnopowrotnych płyną prądy o wartościach wynikających z wielkości indukowanych sił elektromotorycznych oraz impedancji własnych pętli ziemnopowrotnych.

Szczególne znaczenie ma oddziaływanie magnetyczne w stanach zwarć w sieciach wysokich i najwyższych napięć, a więc pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem gwiazdowym, gdzie wartości prądów zwarciowych wielokrotnie przewyższają wartości prądów znamionowych.

Teoretyczne metody analizy oddziaływań pojemnościowych oparte są na prawach elektrostatyki, natomiast oddziaływań magnetycznych na teorii obwodów ziemnopowrotnych. W analizie zastosowano modele makroskopowe oddziaływań, wykorzystując modele linii zaimplementowane w programie EMTP-ATP. Takie podejście daje kompleksowe ujęcie obu rodzajów oddziaływań oraz możliwość łatwego wyznaczenia wielokrotnie oddziałujących w linii 400 kV. Modele takie zostały pozytywnie zweryfikowane na podstawie pomiarów w obiektach rzeczywistych [3, 4]. Analizując skutki oddziaływania linii 400 kV, rozpatrzono trzy grupy problemów:

1. warunki budowy linii 110 kV
2. wpływ linii 400 kV na pracę linii 110 kV w stanach ustalonych i niestabilnych
3. warunki wykonywania prac eksploatacyjnych na wyłączonej linii 110 kV.

3. Warunki budowy linii 110 kV

Jeżeli założyć, że prace związane z budową linii 110 kV będą wykonywane w obszarze odległym powyżej 20 m od osi linii 400 kV, to z przedstawionych na rys. 3a oraz 3c obrazów wynika, że prace te

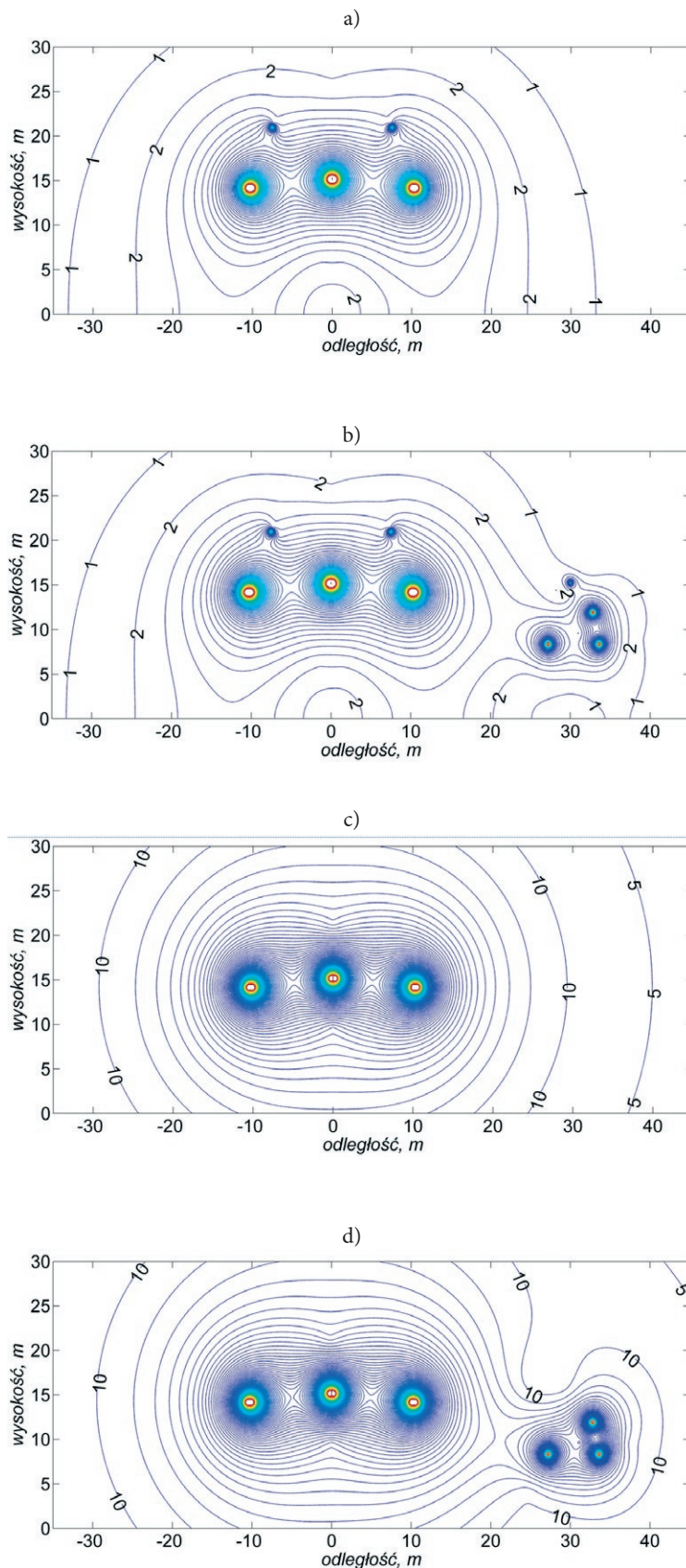
będą odbywały się w polu elektrycznym o wartości natężenia nie większej niż 4 kV/m oraz w polu magnetycznym o wartości natężenia nie większej niż 50 A/m. W obszarze tym nie występują więc strefy ochronne definiowane w środowisku pracy zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej [7]. Natomiast z punktu widzenia zagrożenia porażeniowego istotne jest rozważenie oddziaływań w postaci indukowania napięć i prądów. Indukowane wskutek sprzężeń pojemnościowych napięcia są różnicami potencjału przewodu i potencjału ziemi. Odmienne sytuacja przedstawia się w przypadku sprzężeń magnetycznych, gdzie napięcia indukowane mają charakter siły elektromotorycznej. Z punktu widzenia zagrożenia porażeniowego napięcia indukowane można traktować jako napięcia dotykowe, czyli różnice potencjałów między dwoma punktami, z którymi mogą zetknąć się jednocześnie ręce lub ręka i noga człowieka. Sytuacja taka może mieć miejsce podczas wykonywania prac montażowych lub eksploatacyjnych. Z chwilą dotknięcia punktów, pomiędzy którymi występuje napięcie dotykowe, przez ciało człowieka płynie prąd rażenia. Na ogół pomija się niewielką reaktancję ciała ludzkiego i przy analizie warunków bezpieczeństwa dla napięć i prądów o częstotliwości sieciowej przyjmuje się rezystancję ciała człowieka wynoszącą 1000 Ω .

Do analizy indukowanych napięć i prądów podczas budowy linii 110 kV przyjęto układ modelowy przedstawiony na rys. 4. Dotyczy on początkowej fazy montażu sekcji odciągowej związanej z rozciąganiem linki pilotującej. Model składa się z ośmiu pręseł o jednakowej długości 300 m, utworzonych z dziewięciu słupów o rezystancji uziemienia wynoszącej 15 Ω . Celem analizy było wyznaczenie spodziewanych wartości napięć dotykowych i prądów rażeniowych w zależności od długości rozciągniętej linki pilotującej. Rozpatrzono następujące rodzaje montażu:

- brak uziemienia bębna i rolek prowadzących zawieszonych na izolatorach liniowych
- uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UBI} = 50 \Omega$ oraz brak uziemienia rolek prowadzących
- uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UBI} = 50 \Omega$ oraz uziemienie rolek prowadzących przez rezystancje słupów $R_{US} = 15 \Omega$
- Rozważono następujące warianty pracy linii 400 kV:
- stan pracy normalnej, przy wartości napięcia 420 kV i prądu fazowego 2060 A
- stan zwarcia jednofazowego fazy L3 linii 400 kV, przy wartości prądu oddziałującego $I_k'' = 8,16 \text{ kA}$.

Na rys. 5 przedstawiono napięcia dotykowe indukowane na początku i końcu rozwijanego odcinka, natomiast na rys. 6 wartości prądów rażeniowych dla maksymalnej długości odcinka 2400 m.

Z przeprowadzonej analizy spodziewanych napięć dotykowych i prądów rażeniowych wynika, że podczas budowy linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV może wystąpić zagrożenie porażeniowe nie tylko podczas zwarć, ale również w warunkach normalnej pracy linii 400 kV. Występowanie



Rys. 3. Obrazy pola elektrycznego (a, b) i magnetycznego (c, d) linii 400 kV (a, c) oraz linii 400 kV i 110 kV (b, d): izolacja natężenia pola elektrycznego co 1 kV/m, natężenia pola magnetycznego co 5 A/m

zagrożenia porażeniowego jest praktycznie niezależne od sposobu uziemienia bębna, z którego rozwijana jest linka, oraz uziemienia rolek prowadzących.

4. Wpływ linii 400 kV na pracę linii 110 kV w stanach ustalonych i nieustalonych

Analizując wpływ linii 400 kV na pracę linii 110 kV, rozważono następujące sytuacje:

- stan pracy normalnej linii 400 i 110 kV
- załączanie linii 400 kV
- zwarcie jednofazowe w linii 400 kV.

Można stwierdzić, że w stanie ustalonym linia 400 kV nieznacznie zwiększa asymetrię napięć w linii 110 kV. Nie jest to jednak istotna zmiana, a udział składowej zerowej napięć i prądów nie przekracza wartości 1% składowej zgodnej.

W analizie nieustalonego oddziaływania linii 400 kV założono jej załączenie w stanie nieobciążonym w rozdzielni A. Procesowi załączenia linii 400 kV towarzyszą nieustalone przebiegi napięć i prądów, które są przyczyną zaburzeń przebiegów napięć i prądów w sieci 110 kV (rys. 7). Analiza wykazała, że procesy łączeniowe w linii 400 kV są źródłami przepięć przejściowych w linii 110 kV. Ich wartości szczytowe nie przekraczają ok. 200 kV, a tym samym są poniżej poziomu ochrony przeciwprzepięciowej realizowanej przy użyciu ograniczników przepięć, których napięcie obniżone dla prądu wyładowczego 30/60 μ s wynosi 214 kV. W symulacjach uwzględniono również ograniczniki przepięć w rozdzielniach A i B sieci 400 kV, przy czym ich napięcie obniżone wynosiło 656 kV.

Przedmiotem badań była również analiza oddziaływania linii 400 kV w stanie zwarcia jednofazowego. Zwarcie jednofazowe w linii 400 kV, z uwagi na największą asymetrię fazową, wywołuje największe efekty prądowe i napięciowe w linii zblizonej.

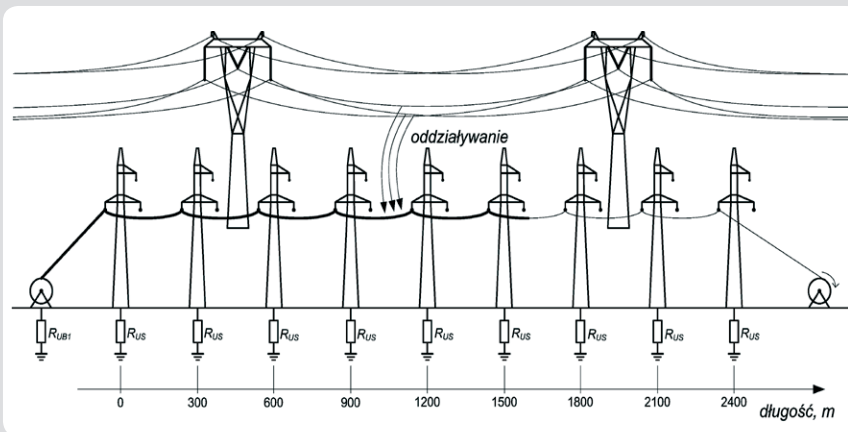
Obliczenia przeprowadzono przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków z punktu widzenia wartości prądu zwarciovego (miejsce Z2 na rys. 1 i moment wystąpienia zwarcia wywołujący największą wartość udarową) oraz w fazie najbardziej zblizonej do linii 110 kV (faza L3). Na rys. 8 przedstawiono prądy w linii 400 kV po wystąpieniu zwarcia oraz napięcia w rozdzielni C 110 kV.

Można stwierdzić, że przepływ prądów zwarciovych w linii 400 kV jest źródłem przepięć przejściowych o wartościach szczytowych nieprzekraczających 200 kV. Sprężenie elektromagnetyczne pomiędzy liniami jest również przyczyną znacznej asymetrii napięć i prądów w linii 110 kV. Należy jednak wziąć pod uwagę, że czas jej występowania ograniczony jest czasem trwania zwarcia w linii 400 kV.

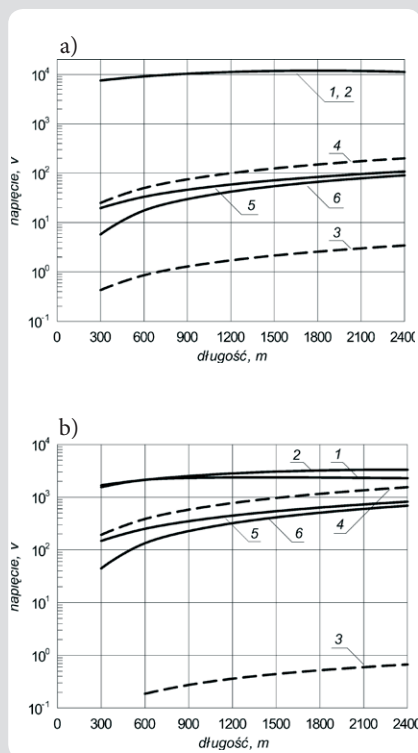
5. Analiza warunków wykonywania prac eksploatacyjnych

Analizę warunków wykonywania prac eksploatacyjnych na wyłączonych liniach 110 kV przeprowadzono dla trzech wariantów ich obustronnego odłączenia od zasilania:

- przy niezziemianiu ich końców (rys. 9a)
- przy uziemianiu linii w rozdzielni C (rys. 9b)
- przy uziemianiu linii w rozdzielni C i D (rys. 9c).

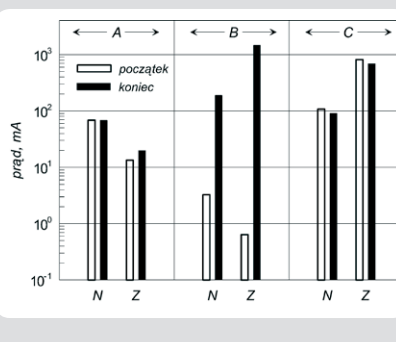


Rys. 4. Model montażu sekcji odciążowej linii 110 kV



Rys. 5. Napięcia dotykowe indukowane na początku (krzywe 1, 3, 5) i końcu (krzywe 2, 4, 6) rozwijanego odcinka podczas montażu sekcji odciążowej linii 110 kV: a) stanie pracy normalnej linii 400 kV, b) podczas zwarcia jednofazowego linii 400 kV
1, 2 – brak uziemienia bębna i rolek prowadzących zawieszonych na izolatorach liniowych; 3, 4 – uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UB1} = 50 \Omega$ oraz brak uziemienia rolek prowadzących; 5, 6 – uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UB1} = 50 \Omega$ oraz uziemienie rolek prowadzących przez rezystancje słupów $R_{US} = 15 \Omega$

Otrzymane wartości skuteczne napięć dotykowych i prądów rażeniowych wzdłuż linii 110 kV w funkcji odległości od rozdzielni C przedstawiono na rys. 10 i 11. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że podczas wykonywania prac eksploatacyjnych na linii 110 kV może wystąpić zagrożenie porażeniowe nie tylko podczas zwarć, ale również w warunkach normalnej pracy linii 400 kV.



Rys. 6. Prądy rażeniowe dla maksymalnej długości sekcji 2400 m rozwijanego odcinka, podczas montażu sekcji odciążowej linii 110 kV, w stanie pracy normalnej linii 400 kV (N) i podczas zwarcia jednofazowego linii 400 kV (Z)

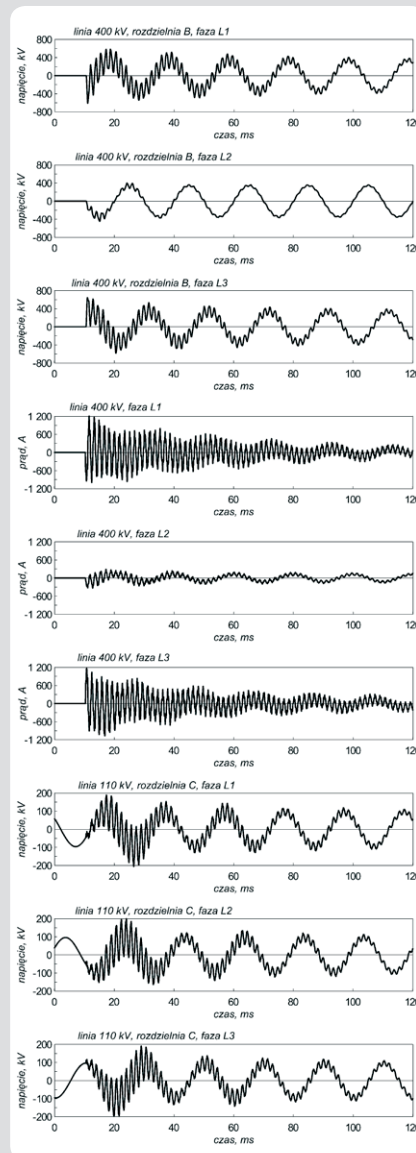
A – brak uziemienia bębna i rolek prowadzących zawieszonych na izolatorach liniowych; B – uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UB1} = 50 \Omega$ oraz brak uziemienia rolek prowadzących; C – uziemienie bębna przez rezystancję $R_{UB1} = 50 \Omega$ oraz uziemienie rolek prowadzących przez rezystancje słupów $R_{US} = 15 \Omega$

Zagrożenie porażeniowe jest praktycznie niezależne od sposobu uziemienia odłączonych od zasilania linii 110 kV.

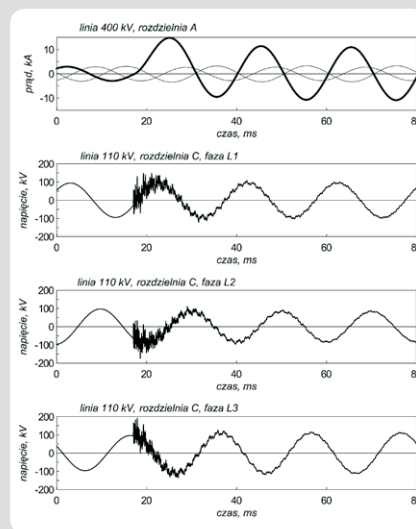
6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że podczas budowy linii 110 kV w pasie technologicznym istniejącej linii 400 kV może wystąpić zagrożenie porażeniowe. Zagrożenie to może wystąpić nie tylko podczas zwarć w linii 400 kV, ale również w warunkach normalnej pracy tej linii. Analiza wykazała, że po wybudowaniu linii 110 kV wpływ linii 400 kV na linię 110 kV jest znikomy. Dotyczy to zarówno normalnej (ustalonej) pracy linii 400 kV, jak i oddziaływań w stanach nieustalonych wynikających z procesów łączeniowych i zwarć w linii 400 kV.

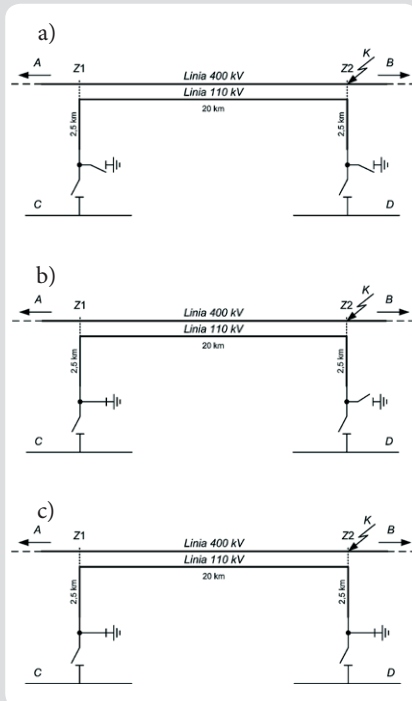
Planując wykonanie prac eksploatacyjnych na odłączonej od zasilania linii 110 kV, należy liczyć się z występowaniem niebezpiecznych napięć dotykowych i prądów rażeniowych. Zagrożenie to może występować nie tylko podczas zwarć, ale również w warunkach normalnej pracy linii 400 kV. Należy podkreślić, że występowanie zagrożenia porażeniowego jest praktycznie niezależne od sposobu uziemienia odłączonych od zasilania linii 110 kV.



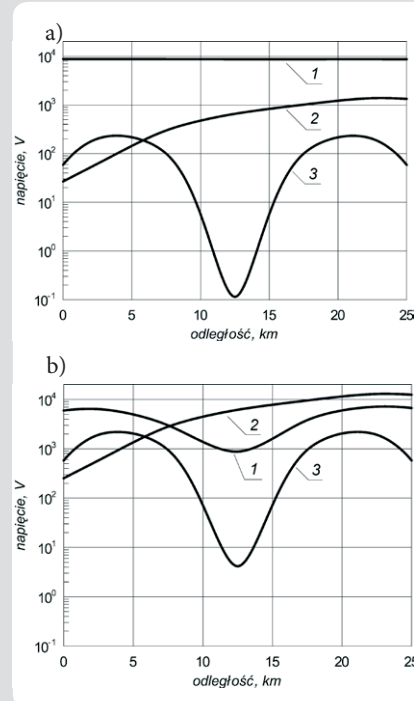
Rys. 7. Przebiegi napięć i prądów w wybranych punktach sieci 400 kV i 110 kV



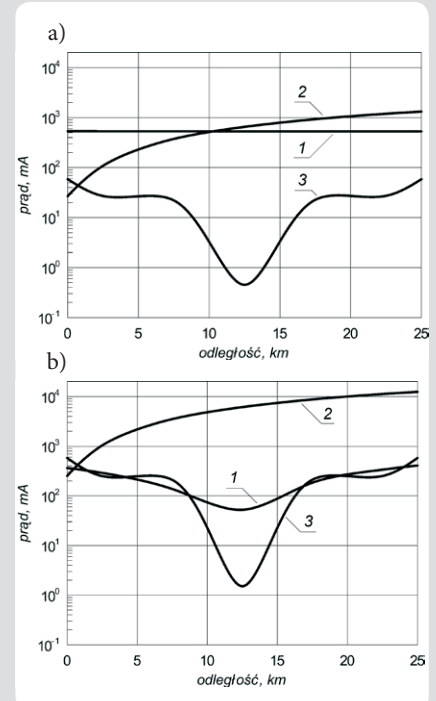
Rys. 8. Przebiegi prądów w linii 400 kV podczas zwarcia jednofazowego oraz napięć w rozdzielni C sieci 110 kV



Rys. 9. Warianty odłączenia linii 110 kV: a) brak uzziemienia, b) uzziemienia jednostronne w rozdzielni C, c) uzziemienie dwustronne w rozdzielniach C i D



Rys. 10. Wartości napięć dotykowych wzdłuż linii 110 kV w funkcji odległości od rozdzielni C: a) w stanie pracy normalnej linii 400 kV, b) podczas zwarcia jednofazowego linii 400 kV
1 – brak uzziemienia linii 110 kV; 2 – uzziemienie w rozdzielni C; 3 – uzziemienie w rozdzielniach C i D



Rys. 11. Wartości prądów rażeniowych wzdłuż linii 110 kV w funkcji odległości od rozdzielni C: a) w stanie pracy normalnej linii 400 kV, b) podczas zwarcia jednofazowego linii 400 kV
1 – brak uzziemienia linii 110 kV; 2 – uzziemienie w rozdzielni C; 3 – uzziemienie w rozdzielniach C i D

Bibliografia

- Bąchorek W. i in., Problemy projektowania i eksploatacji napowietrznych linii elektroenergetycznych w aspekcie pól elektromagnetycznych, V Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektroenergetyczne linie napowietrzne”, PTPiREE, Dźwirzyno, 15 maja 2012, s. 6–11.
- Szostek T., Kurpanik B., Wojciechowski J., Analiza indukowanych napięć w obustronnie odłączonej linii 750 kV Chmielnicka Elektrownia Jądrowa – Rzeszów, *Energetyka* 1988, nr 10, s. 365–370.
- Nowak W. i in., Analiza warunków eksploatacyjnych linii 110 kV Klikowa-Połaniec i 220 kV Klikowa-Niziny w aspekcie oddziaływania elektromagnetycznego, *Energetyka* 2006, nr 2, s. 118–123.
- Nowak W. i in., Analysis of overhead lines working conditions – case study of electromagnetic coupling effect, 51. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 11–15 September 2006, dysk optyczny [CD], s. 1–10.
- Nowak W., Tarko R., Komputerowa analiza pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej wytwarzanego przez linie i stacje elektroenergetyczne, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2008, nr 25, s. 111–114.
- PSE Operator SA, Linia napowietrzna 400 kV, Standardowe Specyfikacje Techniczne, Konstancin-Jeziorna, 2009.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 roku w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. nr 217, poz. 1833, z późn. zm.).

Wiesław Nowak

dr inż. hab.

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej. Od 1987 roku zatrudniony w swojej macierzystej uczelni, obecnie jako profesor nadzwyczajny AGH. Jego specjalnością naukową jest elektroenergetyka, a główne zainteresowania naukowe dotyczą analizy sieci elektroenergetycznych.

Rafał Tarko

dr inż.

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej. Od 2001 roku pracuje w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą analizy narażeń eksploatacyjnych i elektromagnetycznych stanów przejściowych w sieciach elektroenergetycznych.