

Analysis of Possibilities to Reduce the Voltages Induced in Multi-circuit and Multi-voltage Overhead Lines

Authors

Rafał Tarko
Waldemar Szpyra
Wiesław Nowak

Keywords

power lines, multi-circuit power lines, multi-voltage power lines, induced voltage reduction

Abstract

This paper presents the issues of electromagnetic interactions in a four-circuit and dual-voltage power line. Such solutions are increasingly used in practice due to difficulties in land acquisition for the construction of new power lines. Lines of this type, however, have some disadvantages, incl. the electromagnetic interactions between the circuits and voltages induced as their consequence. These issues are considered in relation to an existing four-circuit, 110 kV and 15 kV line. Results of the studies of the interaction effects in a real system, and an analysis of selected ways to reduce the voltage induced in 15 kV line circuits are presented.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015312

1. Introduction

Difficulties in the construction of new power lines more and more often necessitate the use of specific solutions, such as the location of a proposed line in the right-of-way of an existing line [1, 2], or the construction of multi-circuit lines with different levels of rated voltage. These solutions, however, involve numerous issues which primarily include electromagnetic interactions and their consequences in the form of voltages and currents induced [3, 4, 5]. This article considers these issues in relation to an existing four-circuit line with two voltage levels of 110 kV and 15 kV.

The subject of the analysis is a section of the 110 kV and 15 kV grid, whose diagrams are shown in Fig. 1. Within this grid, the

following electric power substations: A, B, C and four overhead lines have been identified, marked as circuit no. 1–4. Circuit no. 1 and circuit no. 2 are the 110 kV lines supplying substation B, while circuit no. 3 and circuit no. 4 are 15 kV lines supplying MV distribution grids. Along a section 8.7 km long, measured from substation B, the 110 kV and 15 kV circuits are placed on the same support structure, initially in the form of a four-circuit line, and further a three-circuit line. The distribution of the conductors within the line is shown in Fig. 2 and Pic. 1.

The placement of the 15 kV line under the 110 kV lines presents obvious advantages in regard to the use of the land available for the system. However, it also has many disadvantages, which

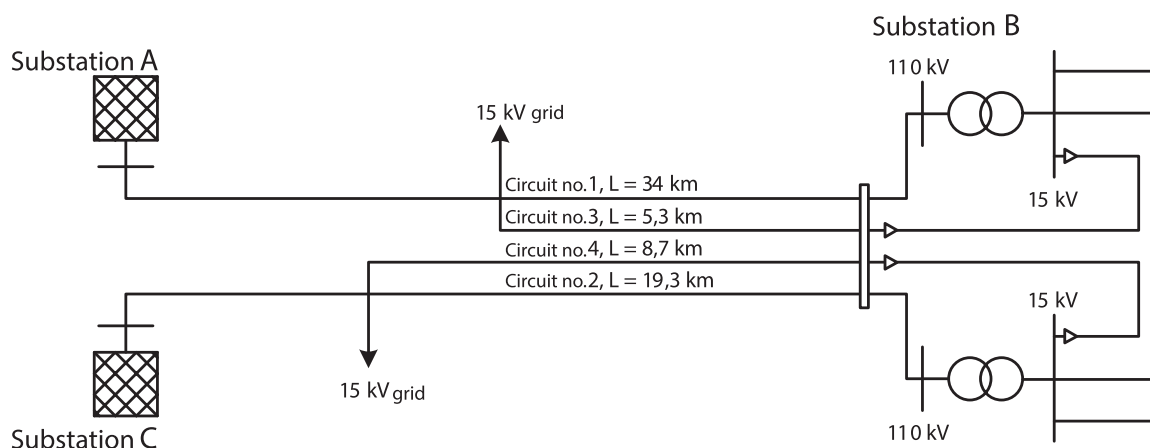


Fig. 1. Diagram of the analysed grid with the four-circuit 110–15 kV line

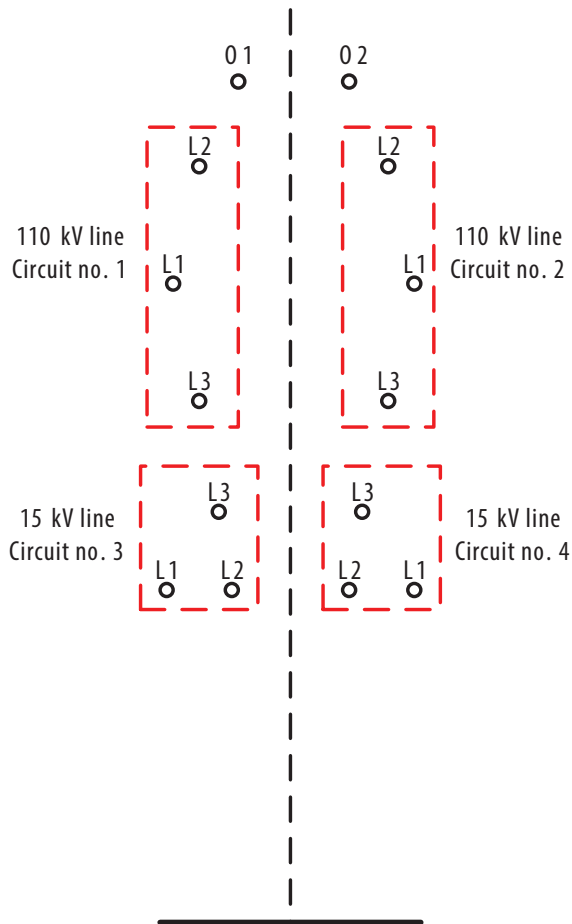
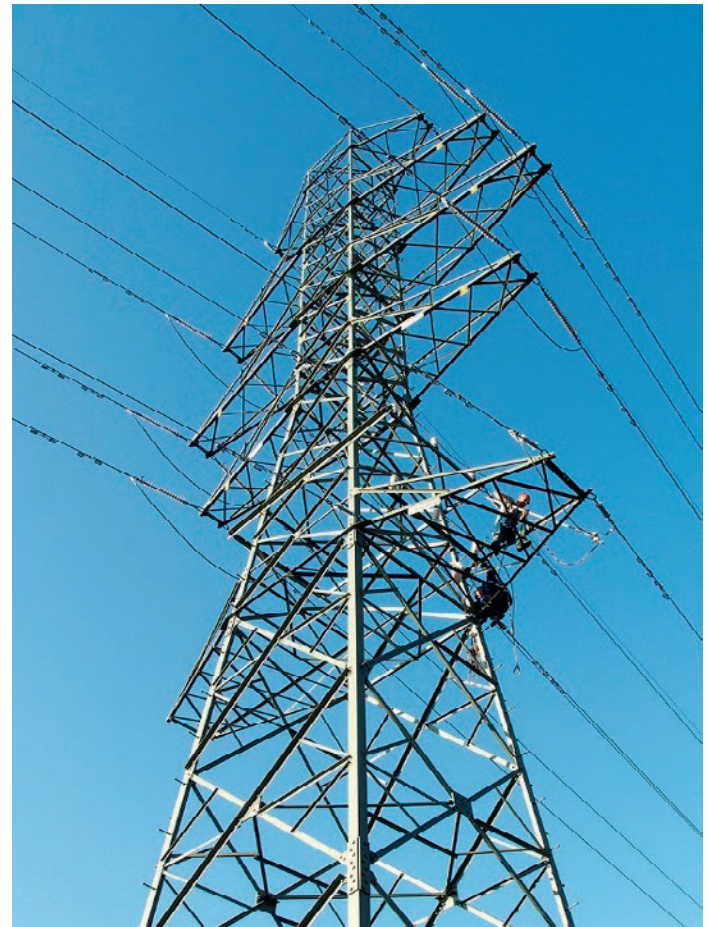


Fig. 2. A conductor system of the 110–15 kV four-circuit line



Pic. 1. A support of the line subject to analysis along the three-circuit section (two 110 kV circuits, one 15 kV circuit)

include the necessity to deactivate the 110 kV circuit in the event of performing work on the 15 kV circuit located underneath, and the voltages induced in the 15 kV circuits disconnected from the power supply, resulting from electromagnetic interactions of the 110 kV lines. It is the second aspect which has particularly adverse practical consequences due to the presence of voltages on the line disconnected from the power supply, which ultimately eliminates any possibilities of the line being earthed. As part of the currently used switchgear solutions, special stationary earthing switches are installed in feeder bays, which can be closed only in the event of voltage absence on its fixed contact. Interlocking of the earthing switch's drive most frequently cooperates with the interlocking relay which prevents the earthing switch from being closed if the phase voltage of the earthed line exceeds 10% of the rated voltage value. The situation described above is presented in Fig. 1, where there is no possibility to earth the 15 kV circuits. As a hypothesis it was assumed that the reason for this are the voltages induced as a result of electromagnetic interactions of the 110 kV circuits.

2. Analysis of interactions in the existing system

In order to verify the hypothesis assumed, the electromagnetic interactions of the 110 kV circuits and their impact on the 15 kV circuits were analysed. The research included measurements



Pic. 2. Testing station used for the analysis of consequences of interactions in a four-circuit 110–15 kV line

of voltages and currents induced within the circuit no. 4 with voltage of 15 kV as well as calculation verification of the results obtained.

Variant	110 kV lines		15 kV lines	
	Circuit no. 1	Circuit no. 2	Circuit no. 3	Circuit no. 4
1	live	• disconnected • earthed on both sides	live	• disconnected • earthed on one side
2	live	• disconnected • earthed on both sides	live	• disconnected • unearthed
3	live	live	live	• disconnected • unearthed
4	live	live	live	• disconnected, • earthed on one side

Tab. 1. Operation variants of the 110–15 kV four-circuit line

Phase	Voltages induced		Currents induced in the conductors after its earthing at the testing station	
	measured	calculated	measured	calculated
L1	5.2 V	8.1 V	0.55 A	0.82 A
L2	7.6 V	10.5 V	1.23 A	1.35 A
L3	2.5 V	7.2 V	0.27 A	0.42 A
L1-L2	3.2 V	2.6 V	–	–
L2-L3	6.0 V	3.4 V	–	–
L3-L1	3.7 V	0.9 V	–	–

Tab. 2. Values of voltages and currents induced for operation variant no. 1 of the 110–15 kV four-circuit line

Phase	Voltages induced		Currents induced in the conductors after its earthing at the testing station	
	measured	calculated	measured	calculated
L1	4026 V	4224 V	0.08 A	0.114 A
L2	4020 V	4116 V	0.08 A	0.108 A
L3	7095 V	6991 V	0.20 A	0.233 A
L1-L2	48 V	261 V	–	–
L2-L3	3111 V	2884 V	–	–
L3-L1	3161 V	2768 V	–	–

Tab. 4. Values of voltages and currents induced for operation variant no. 3 of the 110–15 kV four-circuit line

Phase	Voltages induced		Currents induced in the conductors after its earthing at the testing station	
	measured	calculated	measured	calculated
L1	915 V	954 V	0.02 A	0.022 A
L2	1484 V	1505 V	0.03 A	0.045 A
L3	1860 V	1924 V	0.04 A	0.063 A
L1-L2	594 V	552 V	–	–
L2-L3	449 V	483 V	–	–
L3-L1	984 V	981 V	–	–

Tab. 3. Values of voltages and currents induced for operation variant no. 2 of the 110–15 kV four-circuit line

Phase	Voltages induced		Currents induced in the conductors after its earthing at the testing station	
	measured	calculated	measured	calculated
L1	6.0 V	8.7 V	0.84 A	0.60 A
L2	9.0 V	10.9 V	1.50 A	1.14 A
L3	4.7 V	8.0 V	0.40 A	0.45 A
L1-L2	3.8 V	2.6 V	–	–
L2-L3	7.0 V	3.5 V	–	–
L3-L1	3.9 V	0.9 V	–	–

Tab. 5. Values of voltages and currents induced for operation variant no. 4 of the 110–15 kV four-circuit line

The measurements of the 15 kV line were performed at one of the supports, at a testing station equipped with the necessary switching and measuring devices (Pic. 2). Four operation variants of the particular circuits of the 110–15 kV line, presented in Tab. 1, were analysed. The results of the measurements and the results of the calculations obtained by means of the prepared mathematical model are presented in Tab. 2–5.

The research confirmed that the operation of the four-circuit, dual-voltage 110–15 kV electric line results in voltages and currents induced in the 15 kV circuits which can affect the operation of this line. The primary importance belongs to the capacitive interactions between the activated 110 kV circuits and deactivated and unearthed 15 kV circuits, within which the voltages induced reach several kilovolts. These voltages considerably hinder the operation of the 15 kV line, primarily as a result of the

presence of voltage exceeding 10% of the rated voltage value which prevents the line from being earthed. These voltages also pose an electric shock hazard for employees performing work on the line. Earthing on both sides or on one side of the 15 kV circuits eliminates the capacitive interactions, but resulting in, however, the presence of magnetic interactions. The values of the voltages induced have between several and a dozen or so kilovolts and are proportional to the value of the currents in the 110 kV circuits. The research has also enabled verification and detailing of the mathematical model of the analysed 110 kV and 15 kV lines. The calculations based on that model lead to results concurrent with that of the measurements made in an existing line. This applies particularly to capacitive couplings which feature the highest values of the voltages induced in deactivated line conductors. These models are used in the analysis presented below.

3. Analysis of selected possibilities of limiting electromagnetic interactions

With the use of a computer model of a specific grid, prepared and tested in practice, an analysis of the methods of limiting or completely eliminating the negative consequences of interactions between the circuits of the 110 kV line and the circuits of the 15 kV line was performed. Different variants were tested, and the following methods are discussed further in this study:

- transposition of circuits and changing the phase sequence in the 110 kV circuits
- changing the conductor layout in the 15 kV and 110 kV circuits
- changing the vertical distance between the 15 kV and 110 kV circuits
- installation of parallel capacitor batteries in the 15 kV circuits.

	Phase voltage of the 15 kV line		
	Conductor L1	Conductor L2	Conductor L3
Conductor system currently used	4676 V	4790 V	7550 V
Transposition of the circuits of the 110 kV line	4673 V	4788 V	7546 V
Changed phase sequence in the 110 kV line	3801 V	3537 V	5857 V

Tab. 6. Comparison of the values of the voltages induced in disconnected and unearthed 15 kV circuits in a transposed system and with the changed phase sequence of the 110 kV circuits

3.1. Impact of the transposition of circuits and changing the phase sequence in the 110 kV circuits

The analysis confirmed that the transposition of the 110 kV circuits on one of the supports does not impact the value of the voltages induced in disconnected and unearthed circuits of the 15 kV line, and the results obtained are practically identical to the originally used system (Tab. 6). In addition, the transposition would necessitate the need to disconnect both circuits of the 110 kV line if any work had to be performed on one of the circuits of the 15 kV line.

Also, the impact of the order of the phase conductors in the 110 kV circuits was analysed. From the point of view of the voltages induced in the 15 kV circuits, the most advantageous system ensures that the phase conductors of the 110 kV circuits located at the bottom are heterogeneous (Tab. 6). Nonetheless,

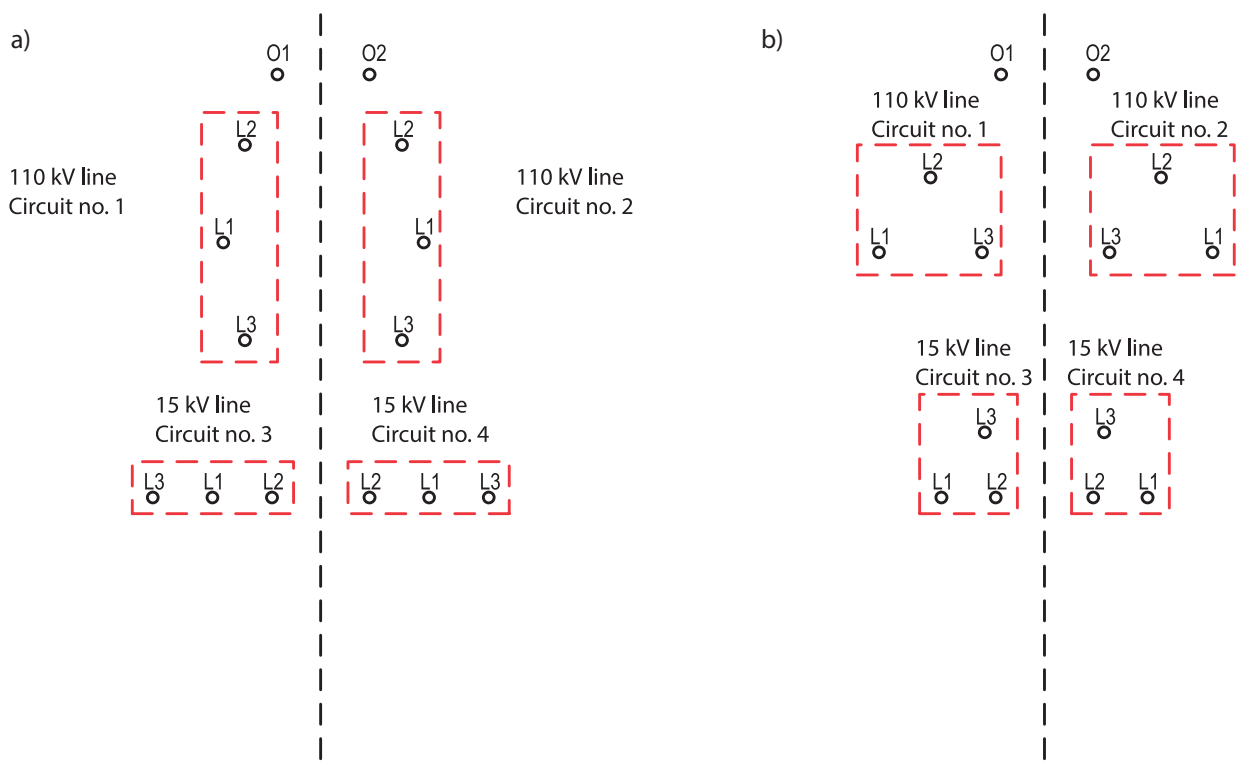


Fig. 3. Conductor layout of the 110 kV and 15 kV line: a) flat, b) triangular

the limitation of the voltage values taking place in this case is insufficient. Moreover, the difference in the voltages induced is noticeable only if both 110 kV circuits are live, as the situation does not change if one of the 110 kV circuits is disconnected and earthed on both sides.

3.2. Impact of the conductor layout in the 110 kV and 15 kV circuits

The analysis included an assessment of the impact of the conductor layout of the 110 kV and 15 kV circuits on the values of the voltages induced. The configuration of conductors in the analysed variants is shown in Fig. 3. The results obtained and referred to the values occurring in the existing layout, are presented in Tab. 7. The conducted analysis confirms that changing the conductor layout has an impact on the level of phase and inter-phase voltages induced in the circuits of the 15 kV line.

It must be observed that decreasing their value does not improve the operating conditions of the lines subject to analysis, as the voltages continue to achieve values which prevent the 15 kV circuits from being earthed.

Phase	Voltages induced in the 15 kV circuits for the conductor layout		
	existing	flat for 15 kV circuits	triangular for 110 kV circuits
L1	4699 V	4930 V	2422 V
L2	4792 V	5332 V	2641 V
L3	7553 V	3994 V	4468 V
L1-L2	171 V	585 V	731 V
L2-L3	2761 V	1380 V	1916 V
L3-L1	2879 V	966 V	2509 V

Tab. 7. Values of voltages induced for various configurations of phase conductors

Phase	Voltages induced for distances of 15 kV circuit conductors	
	existing	assumed
L1	4699 V	2736 V
L2	4792 V	2823 V
L3	7553 V	4621 V
L1-L2	171 V	109 V
L2-L3	2761 V	1798 V
L3-L1	2879 V	1886 V

Tab. 8. Values of voltages induced for various heights of conductors in the 15 kV circuits

3.3. Impact of the vertical distance between the 110 kV and 15 kV circuits

The analysis of the impact of the suspension height of the conductors of the 15 kV circuits on the values of the voltages induced assumed the same configuration as for the existing system (Fig. 2). Maximum lowering of the conductors of the 15 kV circuits was assumed, limited only by their minimal closeness to the ground with the height of the 110 kV circuits unchanged. The calculation results obtained are presented in Tab. 8.

The reduction in the value of the voltages induced occurring in these circumstances results from the increase of the distance between the circuits of the 110 kV and 15 kV lines. Within the spatial configuration assumed, the values of the voltages induced in all conductors were reduced by approx. 40%. However, the level of their value continues to prevent the 15 kV circuits from being earthed.

3.4. Impact of the capacitors connected to the 15 kV circuits

The purpose of the analysis was assessing the possibility of reducing the voltages induced as a result of capacitors being added to the disconnected and unearthed 15 kV circuits. It was assumed that the battery used will comprise three star-point single-phase capacitors with rated voltage of 9122 V. The analysis was performed for two power values of the capacitors added, equalling: 40 kVAR (1.55 μF) per phase and 80 kVAR (3.10 μF) per phase. The calculation results obtained for the voltages induced are presented in Tab. 9.

The analysis confirmed a significant impact of the added capacities on the values of the voltages induced, both phase and inter-phase, in the circuits of the 15 kV lines. The results presented were obtained while assuming star-point earthing of the added capacitors.

If the star point of the capacitor is not earthed, the values of the phase voltages will not alter significantly in relation to the existing system, but the interphase voltages will be similar to those listed in Tab. 3 and 4. It should be noted that the addition of capacitors constitutes the most effective method of reducing the voltages induced below the level of 866 V (10% of the rated voltage), enabling earthing of the 15 kV line in the power-feeding station. For this reason, measurements were performed in the existing system. The test procedure was similar to the one described in chapter 2. The difference was the addition of capacitor batteries with power of 40 kVAR or 80 kVAR. The selected results of the measurements performed are presented in Tab. 9. The measurements confirmed the potential to use parallel capacitor batteries as an efficient method of lowering the values of the voltages induced within a grid subject to analysis, in addition to the effective operation of the interlocking of the earthing switch's drive.

4. Overview

The measurements and calculations performed confirmed that the operation of a four-circuit dual-voltage 110–15 kV power line results in voltages induced within the 15 kV circuits with a value of several kilovolts. The voltages induced hinder the operation of

Phase	Values of voltages induced in 15 kV circuits for the system					
	existing		with capacitor battery 3 · 40 kVAr (3 · 1,55 µF)		with capacitor battery 3 · 80 kVAr (3 · 3,10 µF)	
	calculated	measured	calculated	measured	calculated	measured
L1	4699 V	3885 V	222.4 V	201 V	111.7 V	101 V
L2	4792 V	3945 V	213.4 V	200 V	106.3 V	96 V
L3	7553 V	6840 V	436.2 V	428 V	219.6 V	218 V
L1-L2	171 V	30 V	18.4 V	2 V	20.5 V	0.9 V
L2-L3	2761 V	2985 V	224.4 V	230 V	115.6 V	120 V
L3-L1	2879 V	3060 V	213.9 V	230 V	108.1 V	119 V

Tab. 9. Values of voltages induced in 15 kV circuits with capacitor batteries included

the 15 kV line by preventing it from being earthed. With the use of a prepared computer model, an analysis of selected methods of limiting the negative consequences of interactions between the HV and MV circuits was performed.

It was confirmed that the transposition of the circuits or phases in the line subject to analysis and changing the conductors' configuration on the supports do not significantly reduce the values of the capacitively induced voltages.

It was confirmed that the addition of star-point capacitors with power of 40 kVAr considerably decreases the values of the voltages induced (both phase and interphase) in disconnected circuits of the 15 kV line. It should be noted that the addition of capacitors may serve as a good method of decreasing the level of the voltages induced in phase conductors to the value which enables the 15 kV line in the substation to be earthed. The addition of batteries with a power of 40 kVAr within the line subject to analysis was effective, however, it is necessary to perform detailed tests in the case of similar issues present within other lines of this type.

A crucial consequence of the interaction is the energy danger to employees. When performing servicing or repair tasks on 15 kV lines it is necessary to consider the risk of dangerous touch voltages and currents. This is of particular importance if the 15 kV circuits are unearthed; however, it is also an option in the case of single-sided earthing, for instance, during assembly or dismantling portable earthing devices at workstations.

REFERENCES

1. Nowak W., Tarko R., Analysis of the feasibility of locating 110 kV line in 400 kV right-of-way in terms of electromagnetic interaction, *Acta Energetica* 2013, No. 1/14, pp. 102–113.
2. Nowak W., Tarko R., Analiza możliwości lokalizacji linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV w aspekcie oddziaływań elektromagnetycznych [Analysis of the feasibility of locating 110 kV line in 400 kV right-of-way in terms of electromagnetic interaction], *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2013, No. 32, pp. 19–22.
3. 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], 5th Scientific and Engineering Conference "Overhead Power Lines", PTPiREE, Dźwirzyno, 15 May 2012, pp. 6–11.
4. 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.
5. 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.

Rafał Tarko

AGH University of Science and Technology

e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Master of Science degree in electrical engineering, specialising in power engineering, from the Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics of AGH University of Science and Technology (2001). He obtained the academic degree of doctor at the same faculty in 2007. Since 2001, he has been working at the Department of Electrical and Power Engineering of the University of Science and Technology. His main research interests include the analysis of operational exposures and electromagnetic transients in power networks.

Wiesław Nowak

AGH University of Science and Technology

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

Graduate of AGH University of Science and Technology. Master of Science degree (1988), then the academic degree of doctor (1995) and postdoctoral degree (2006) in electrical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics 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 analyses.

Waldemar Szpyra

AGH University of Science and Technology

e-mail: wszpyra@agh.edu.pl

He obtained the diploma of engineer electrician at the Faculty of Electrical Engineering of AGH University of Science and Technology in Kraków in 1975, and PhD at the Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics of the same university in 1998. Currently, an assistant professor at the Department of Electrical and Power Engineering of his alma mater. He specialises in modelling, state estimation and optimal control of power distribution networks using artificial intelligence methods in power engineering, electrical power management and the efficiency of transmission and distribution of electrical energy.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 130–136. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Analiza możliwości redukcji napięć indukowanych w wielotorowych wielonapięciowych liniach napowietrznych

Autorzy

Rafał Tarko
Waldemar Szypra
Wiesław Nowak

Słowa kluczowe

linie elektroenergetyczne, linie elektroenergetyczne wielotorowe, linie elektroenergetyczne wielonapięciowe, redukcja napięć indukowanych

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia oddziaływań elektromagnetycznych w czterotorowej, dwunapięciowej linii elektroenergetycznej. Rozwiązania takie są coraz częściej stosowane w praktyce, ze względu na trudności w uzyskaniu terenu pod budowę nowych linii elektroenergetycznych. Linie tego typu posiadają jednak również wady, wśród których należy wymienić oddziaływania elektromagnetyczne występujące pomiędzy torami i ich skutki w postaci indukowania napięć. Zagadnienia te rozważono w odniesieniu do istniejącej linii czterotorowej o dwóch poziomach napięć 110 kV i 15 kV. Przedstawiono wyniki badań skutków oddziaływań w układzie rzeczywistym oraz analizę wybranych sposobów redukcji napięć indukowanych w torach linii 15 kV.

1. Wstęp

Trudności w budowie nowych linii elektroenergetycznych coraz częściej wymuszają zastosowanie specyficznych rozwiązań, np. w postaci usytuowania projektowanej linii w pasie technologicznym linii istniejącej [1, 2], czy konstrukcji linii wielotorowych o różnych poziomach napięć znamionowych. Rozwiązania takie implikują jednak wiele problemów, wśród których szczególnie należy podkreślić oddziaływania elektromagnetyczne i ich skutki w postaci indukowania napięć i prądów [3, 4, 5]. W niniejszym artykule zagadnienia te zostaną przedstawione w odniesieniu do istniejącej linii czterotorowej o dwóch poziomach napięć 110 kV i 15 kV.

Przedmiotem analizy jest fragment sieci 110 kV i 15 kV, której schemat przedstawiono na rys. 1. W sieci tej wyodrębniono stacje elektroenergetyczne GPZ A, GPZ B, GPZ C oraz cztery linie napowietrzne, oznaczone jako tor nr 1–4.

Tor nr 1 i tor nr 2 to linie 110 kV zasilające GPZ B, natomiast tor nr 3 i tor nr 4 stanowią linie 15 kV zasilające sieci rozdzielcze średniego napięcia. Na odcinku o długości 8,7 km, mierzonej od GPZ B, tory 110 kV i 15 kV są umieszczone na wspólnej konstrukcji wsporczej, początkowo w postaci linii czterotorowej, a następnie trójtorowej. Rozmieszczenie przewodów w linii przedstawiono na rys. 2 i fot. 1.

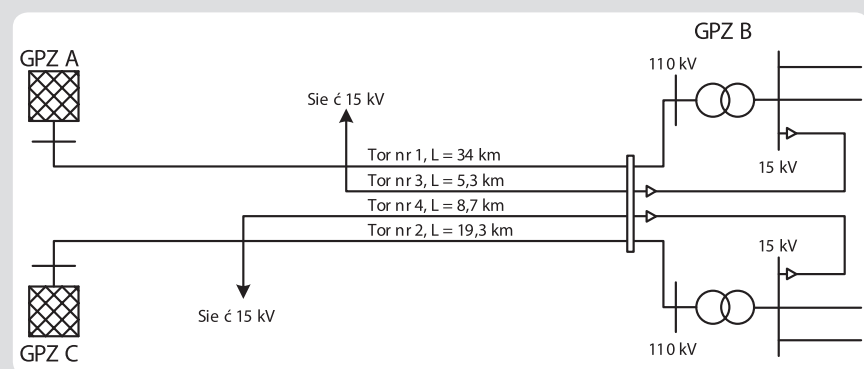
Usytuowanie linii 15 kV pod liniami 110 kV daje ewidentne korzyści z punktu widzenia wykorzystania dostępnego dla lokalizacji terenu. Posiada jednak wiele wad, wśród których można wymienić konieczność wyłączenia toru 110 kV w przypadku wykonywania prac na znajdującym się pod nim torze 15 kV oraz indukowanie w odłączonych od zasilania torach 15 kV napięć, wywołanych oddziaływaniem elektromagnetycznym linii 110 kV. Szczególnie ten drugi aspekt ma dotkliwie skutki praktyczne, ze względu na występowanie napięć na odłączonych od zasilania linii, a w dalszej konsekwencji na brak możliwości jej uziemienia.

W stosowanych obecnie rozwiązaniach rozdzielnic, w polach liniowych są stosowane stacjonarne uziemniki, których zamknięcie jest dozwolone jedynie w warunkach braku napięcia na jego styku stałym. Blokada napędu uziemnika współpracuje najczęściej z przełącznikiem blokady łączeniowej, uniemożliwiającym zamknięcie uziemnika, jeżeli napięcia fazowe uziemianej linii są wyższe niż 10% wartości napięcia znamionowego. Sytuacja powyższa zaistniała w sieci przedstawionej na rys. 1, gdzie wystąpił brak możliwości uziemienia torów 15 kV. Przyjęto hipotezę, że przyczyną takiego stanu rzeczy są napięcia indukowane wskutek oddziaływania elektromagnetycznego torów 110 kV.

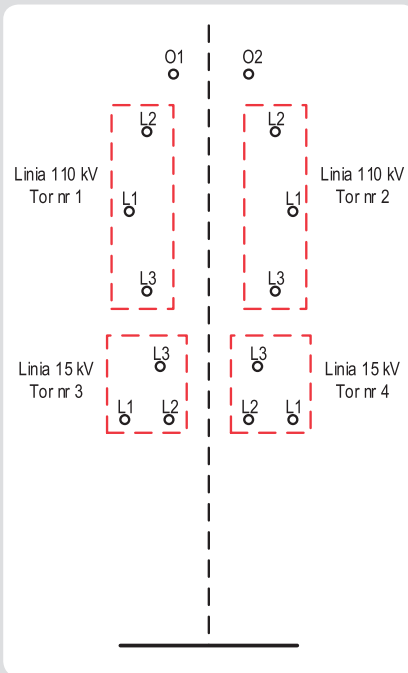
2. Badanie oddziaływań w układzie istniejącym

W celu potwierdzenia słuszności przyjętej hipotezy wykonano badania oddziaływań elektromagnetycznych torów 110 kV na tory 15 kV. Obejmowały one pomiary napięć i prądów indukowanych w torze nr 4 o napięciu 15 kV oraz weryfikację obliczeniową otrzymanych wyników. Pomiary na linii 15 kV wykonano przy jednym ze słupów, na stanowisku zawierającym niezbędną aparaturę łączeniową oraz pomiarową (fot. 2). Rozważono cztery

warianty pracy poszczególnych torów linii 110–15 kV, przedstawione w tab. 1. Wyniki pomiarów wraz z wynikami obliczeń otrzymanych za pomocą opracowanego modelu matematycznego zestawiono w tab. 2–5. Badania wykazały, że podczas eksploatacji czterotorowej dwunapięciowej linii elektroenergetycznej 110–15 kV dochodzi do indukowania w torach 15 kV napięć i prądów mogących wpłynąć na eksploatację tej linii. Podstawowe znaczenie ma oddziaływanie pojemnościowe pomiędzy pracującymi torami 110 kV a wyłączonymi i nieuziemionymi torami 15 kV, w których indukowane są napięcia rzędu kilku kilowoltów. Napięcia te istotnie utrudniają eksploatację linii 15 kV, m.in. przez brak możliwości uziemienia linii ze względu na obecność napięcia powyżej 10% wartości napięcia znamionowego. Napięcia te stanowią również zagrożenie porażeniowe dla pracowników wykonujących prace na linii. Uziemienie jedno- lub dwustronne torów 15 kV eliminuje oddziaływanie pojemnościowe, lecz uwidacznia się wówczas oddziaływanie magnetyczne. Wartości indukowanych napięć są rzędu kilku-, kilkunastu woltów i są proporcjonalne do wartości prądów płynących w torach 110 kV.



Rys. 1. Schemat analizowanej sieci z czterotorową linią 110–15 kV



Rys. 2. Układ przewodów czterotorowej linii 110–15 kV



Fot. 1. Słup rozpatrywanej linii na odcinku trójtorowym (dwa tory 110 kV, jeden tor 15 kV)



Fot. 2. Stanowisko do badań skutków oddziaływań w czterotorowej linii 110–15 kV

Wariant	Linie 110 kV		Linie 15 kV	
	Tor nr 1	Tor nr 2	Tor nr 3	Tor nr 4
1	pod napięciem	• odłączona • obustronnie uziemiona	pod napięciem	• odłączona • jednostronnie uziemiona
2	pod napięciem	• odłączona • obustronnie uziemiona	pod napięciem	• odłączona • odziemiona
3	pod napięciem	pod napięciem	pod napięciem	• odłączona • odziemiona
4	pod napięciem	pod napięciem	pod napięciem	• odłączona • jednostronnie uziemiona

Tab. 1. Warianty pracy czterotorowej linii 110–15 kV

Faza	Napięcia indukowane		Prądy indukowane po uziemieniu przewodów na stanowisku pomiarowym	
	zmierzane	obliczone	zmierzane	obliczone
L1	5,2 V	8,1 V	0,55 A	0,82 A
L2	7,6 V	10,5 V	1,23 A	1,35 A
L3	2,5 V	7,2 V	0,27 A	0,42 A
L1-L2	3,2 V	2,6 V	–	–
L2-L3	6,0 V	3,4 V	–	–
L3-L1	3,7 V	0,9 V	–	–

Tab. 2. Wartości indukowanych napięć i prądów dla wariantu nr 1 pracy czterotorowej linii 110–15 kV

Faza	Napięcia indukowane		Prądy indukowane po uziemieniu przewodów na stanowisku pomiarowym	
	zmierzane	obliczone	zmierzane	obliczone
L1	4026 V	4224 V	0,08 A	0,114 A
L2	4020 V	4116 V	0,08 A	0,108 A
L3	7095 V	6991 V	0,20 A	0,233 A
L1-L2	48 V	261 V	–	–
L2-L3	3111 V	2884 V	–	–
L3-L1	3161 V	2768 V	–	–

Tab. 4. Wartości indukowanych napięć i prądów dla wariantu nr 3 pracy czterotorowej linii 110–15 kV

Faza	Napięcia indukowane		Prądy indukowane po uziemieniu przewodów na stanowisku pomiarowym	
	zmierzane	obliczone	zmierzane	obliczone
L1	915 V	954 V	0,02 A	0,022 A
L2	1484 V	1505 V	0,03 A	0,045 A
L3	1860 V	1924 V	0,04 A	0,063 A
L1-L2	594 V	552 V	–	–
L2-L3	449 V	483 V	–	–
L3-L1	984 V	981 V	–	–

Tab. 3. Wartości indukowanych napięć i prądów dla wariantu nr 2 pracy czterotorowej linii 110–15 kV

Faza	Napięcia indukowane		Prądy indukowane po uziemieniu przewodów na stanowisku pomiarowym	
	zmierzane	obliczone	zmierzane	obliczone
L1	6,0 V	8,7 V	0,84 A	0,60 A
L2	9,0 V	10,9 V	1,50 A	1,14 A
L3	4,7 V	8,0 V	0,40 A	0,45 A
L1-L2	3,8 V	2,6 V	–	–
L2-L3	7,0 V	3,5 V	–	–
L3-L1	3,9 V	0,9 V	–	–

Tab. 5. Wartości indukowanych napięć i prądów dla wariantu nr 4 pracy czterotorowej linii 110–15 kV

Badania umożliwiły także weryfikację i udokładnienie modelu matematycznego analizowanych sieci 110 kV i 15 kV. Obliczenia prowadzone z jego wykorzystaniem dają wyniki zbliżone z pomiarami w sieci rzeczywistej. Dotyczy to zwłaszcza sprzężeń pojemnościowych, charakteryzujących się największymi wartościami napięć indukowanych na przewodach linii wyłączonych spod napięcia. W dalszej analizie posłużono się właśnie tymi modelami.

3. Analiza wybranych możliwości ograniczania oddziaływań elektromagnetycznych

Wykorzystując opracowany i przetestowany w praktyce model komputerowy rozważanej sieci, przeprowadzono analizę sposobów ograniczenia lub całkowitej eliminacji negatywnych skutków oddziaływania pomiędzy torami linii 110 kV a torami linii 15 kV. Sprawdzone zostały różne warianty, z których w dalszej części artykułu przedstawiono następujące sposoby:

	Napięcie fazowe torów 15 kV		
	Przewód L1	Przewód L2	Przewód L3
Układ przewodów obecnie eksploatowany	4676 V	4790 V	7550 V
Przeplot torów linii 110 kV	4673 V	4788 V	7546 V
Zmieniona kolejność faz w linii 110 kV	3801 V	3537 V	5857 V

Tab. 6. Porównanie wartości napięć indukowanych w odłączonych od napięcia i nieziemionych torach 15 kV w układzie z przeplotem i przy zmienionej kolejności faz torów 110 kV

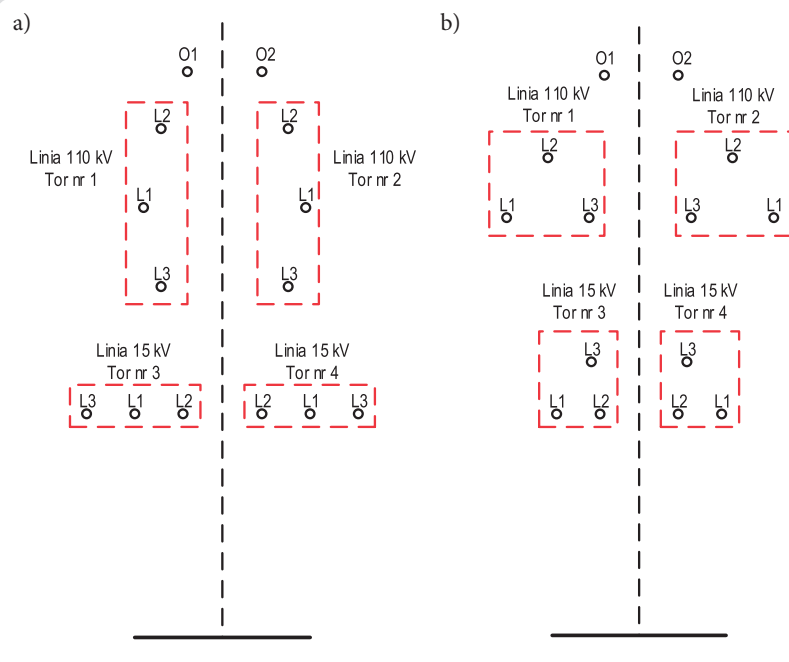
Faza	Napięcia indukowane w torach 15 kV dla układu przewodów		
	istniejącego	płaskiego torów 15 kV	trójkątnego torów 110 kV
L1	4699 V	4930 V	2422 V
L2	4792 V	5332 V	2641 V
L3	7553 V	3994 V	4468 V
L1-L2	171 V	585 V	731 V
L2-L3	2761 V	1380 V	1916 V
L3-L1	2879 V	966 V	2509 V

Tab. 7. Wartości indukowanych napięć indukowanych dla różnych konfiguracji przewodów fazowych

Faza	Napięcia indukowane dla odległości przewodów torów 15 kV	
	istniejącej	założonej
L1	4699 V	2736 V
L2	4792 V	2823 V
L3	7553 V	4621 V
L1-L2	171 V	109 V
L2-L3	2761 V	1798 V
L3-L1	2879 V	1886 V

Tab. 8. Wartości indukowanych napięć dla różnych wysokości przewodów torów 15 kV

- przeplecenie torów oraz zmiana kolejności faz w torach 110 kV
- zmiana układu przewodów w torach 15 kV i 110 kV
- zmiana pionowej odległości między torami 15 kV i 110 kV
- zainstalowanie baterii kondensatorów równoległych w torach 15 kV.



Rys. 3. Układ przewodów linii 110 kV i 15 kV: a) płaski, b) trójkątny

Faza	Wartości napięć indukowanych w torach 15 kV dla układu					
	istniejącego		z baterią kondensatorów 3 - 40 kVAr (3 · 1,55 μF)		z baterią kondensatorów 3 - 80 kVAr (3 · 3,10 μF)	
	obliczone	zmierzone	obliczone	zmierzone	obliczone	zmierzone
L1	4699 V	3885 V	222,4 V	201 V	111,7 V	101 V
L2	4792 V	3945 V	213,4 V	200 V	106,3 V	96 V
L3	7553 V	6840 V	436,2 V	428 V	219,6 V	218 V
L1-L2	171 V	30 V	18,4 V	2 V	20,5 V	0,9 V
L2-L3	2761 V	2985 V	224,4 V	230 V	115,6 V	120 V
L3-L1	2879 V	3060 V	213,9 V	230 V	108,1 V	119 V

Tab. 9. Wartości napięć indukowanych w torach 15 kV z dołączonymi bateriami kondensatorów

3.1. Wpływ przeplecenia torów oraz zmiany kolejności faz w liniach 110 kV

Analiza wykazała, że przeplecenie torów 110 kV na jednym ze słupów nie wpływa na wartości napięć indukowanych w odłączonych i nieziemionych torach linii 15 kV, a uzyskane wyniki są praktycznie identyczne jak dla pierwotnie eksploatowanego układu (tab. 6). Poza tym przeplecenie skutkowałoby koniecznością wyłączenia obu torów linii 110 kV w przypadku wykonywania prac na jednym z torów linii 15 kV. Przeanalizowano również wpływ kolejności przewodów fazowych w torach 110 kV. Najkorzystniejszy z punktu widzenia napięć indukowanych w torach 15 kV jest układ, w którym znajdujące się najniższe przewody fazowe torów 110 kV są różnoimienne (tab. 6). Jednak zachodzące w tym przypadku

ograniczenie wartości napięć jest niewystarczające. Ponadto różnica w napięciach indukowanych jest zauważalna tylko w sytuacji, gdy obydwa tory 110 kV pozostają pod napięciem, natomiast sytuacja nie zmienia się, gdy jeden z torów 110 kV jest odłączony od napięcia i uziemiony obustronnie.

3.2. Wpływ układu przewodów w torach 110 kV i 15 kV

Analiza obejmowała zbadanie wpływu układu przewodów torów 110 kV i 15 kV na wartości napięć indukowanych. Konfigurację przewodów w analizowanych wariantach przedstawiono na rys. 3. Uzyskane wyniki, odniesione do wartości występujących w układzie istniejącym, przedstawiono w tab. 7.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiana układu przewodów wpływa na poziom napięć fazowych i międzyfazowych indukowanych w torach linii 15 kV. Należy jednak zauważyć, że zmniejszenie ich wartości nie wpływa na poprawę warunków eksploatacji analizowanych linii, ponieważ napięcia nadal osiągają wartości uniemożliwiające uziemienie torów 15 kV.

3.3. Wpływ pionowej odległości między torami 110 kV i 15 kV

Przy analizie wpływu wysokości zawieszenia przewodów torów 15 kV na wartości napięć indukowanych założono konfigurację identyczną jak w układzie istniejącym (rys. 2). Założono maksymalne obniżenie przewodów torów 15 kV, ograniczone wyłącznie minimalnym ich zbliżeniem do ziemi, przy niezmienionej wysokości torów 110 kV. Otrzymane wyniki obliczeń zestawiono w tab. 8.

Zachodząca w tym przypadku redukcja wartości napięć indukowanych wynika ze zwiększenia odległości pomiędzy torami linii 110 kV i 15 kV. W założonej konfiguracji przestrzennej torów wartości napięć indukowanych we wszystkich przewodach uległy obniżeniu o ok. 40%. Nadal jednak poziom ich wartości uniemożliwia uziemienie torów 15 kV.

3.4. Wpływ kondensatorów dołączanych do torów 15 kV

Celem analizy było zbadanie możliwości redukcji indukowanych napięć w wyniku dołączania kondensatorów do odłączonych od zasilania i nieziemionych torów 15 kV. Założono, że zastosowana bateria będzie złożona z trzech połączonych w gwiazdę kondensatorów jednofazowych o napięciu znamionowym 9122 V. Analizę przeprowadzono dla dwóch wartości mocy dołączanych kondensatorów, wynoszących: 40 kVAr (1,55 μ F) na fazę oraz 80 kVAr (3,10 μ F) na fazę. Uzyskane obliczeniowo wyniki napięć indukowanych przedstawiono w tab. 9.

Analiza pokazała istotny wpływ dołączonych pojemności na wartości napięć indukowanych zarówno fazowych, jak i międzyfazowych w torach linii 15 kV. Przedstawione wyniki uzyskano przy założeniu uziemienia punktu gwiazdowego dołączonych kondensatorów. Jeżeli punkt gwiazdowy kondensatora nie zostanie

uziemiony, to wartości napięć fazowych nie zmieniają się znacząco w stosunku do układu istniejącego, ale napięcia międzyfazowe będą zbliżone to zamieszczonych w tab. 3 i 4. Należy zauważyć, że dołączenie kondensatorów stanowi najbardziej efektywny sposób na obniżenie napięć indukowanych poniżej poziomu 866 V (10% napięcia znamionowego), umożliwiając jego uziemienie linii 15 kV w stacji zasilającej. Z tego powodu przeprowadzono dla niego pomiary w układzie rzeczywistym. Procedura badawcza była podobna do opisanej w rozdziale 2. Różnica polegała jedynie na dołączaniu baterii kondensatorów o mocy 40 kVAr albo o mocy 80 kVAr. Wybrane wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono w tab. 9. Pomiary potwierdziły możliwość zastosowania równoległych baterii kondensatorów jako skutecznego sposobu obniżenia wartości napięć indukowanych w badanej sieci, a także efektywne działanie blokady napędu uziemnika.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary i obliczenia wykazały, że podczas eksploatacji czterotorowej dwunapięciowej linii elektroenergetycznej 110–15 kV dochodzi do indukowania w torach 15 kV napięć o wartościach rzędu kilku kilowoltów. Napięcia indukowane utrudniają eksploatację linii 15 kV przez brak możliwości jej uziemienia.

Wykorzystując opracowany zweryfikowany model komputerowy, przeprowadzono analizę wybranych sposobów ograniczenia negatywnych skutków oddziaływania pomiędzy torami wysokiego napięcia a torami średniego napięcia. Stwierdzono, że zastosowanie przeplecenia torów lub faz w rozważanej linii oraz zmiana konfiguracji przewodów na słupach nie prowadzi do istotnego ograniczenia wartości napięć indukowanych pojemnościowo.

Wykazano, że dołączenie kondensatorów o mocy 40 kVAr połączonych w gwiazdę, istotnie zmniejsza wartości napięć indukowanych (zarówno fazowych, jak i międzyfazowych) w wyłączonych torach linii 15 kV. Należy zauważyć, że dołączenie kondensatorów może stanowić dobry sposób na obniżenie poziomu napięć indukowanych w przewodach fazowych do wartości umożliwiającej uziemienie w stacji linii 15 kV. W analizowanej linii dołączenie

baterii o mocy 40 kVAr przyniosło zadowalające efekty, lecz w przypadku podobnych problemów pojawiających się w innych liniach tego typu niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowych badań.

Istotnym skutkiem oddziaływania jest również zagrożenie porażeniowe pracowników. W przypadku wykonywania prac eksploatacyjnych lub remontowych na torach 15 kV należy liczyć się z występowaniem niebezpiecznych napięć dotykowych i prądów rażeniowych. Ma to miejsce przede wszystkim przy braku uziemienia torów 15 kV, jednak zagrożenie może również wystąpić przy jednostronnym uziemieniu, np. podczas zakładania oraz demontażu przenośnych uziemiaczy na stanowisku pracy.

Bibliografia

1. Nowak W., Tarko R., Analysis of the feasibility of locating 110 kV line in 400 kV right-of-way in terms of electromagnetic interaction, *Acta Energetica* 2013, nr 1/14, s. 102–113.
2. Nowak W., Tarko R., Analiza możliwości lokalizacji linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV w aspekcie oddziaływań elektromagnetycznych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2013, nr 32, s. 19–22.
3. 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 r., s. 6–11.
4. 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.
5. 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.

Rafał Tarko

dr inż.

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka, ukończył na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH (2001). Stopień naukowy doktora uzyskał na tym samym wydziale w 2007 roku. 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.

Waldemar Szpyra

dr inż.

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

e-mail: wszpyra@agh.edu.pl

Dyplom inż. elektryka zdobył na Wydziale Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (1975), a stopień doktora na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki Informatyki i Elektroniki tej samej uczelni (1998). Obecnie adiunkt w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH. Zajmuje się modelowaniem, estymacją stanu pracy i optymalizacją sieci rozdzielczych, zastosowaniem metod sztucznej inteligencji w elektroenergetyce oraz gospodarką elektroenergetyczną i efektywnością przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej.

Wiesław Nowak

dr hab. inż., prof. n.

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

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

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej. Tytuł zawodowy mgr. inż. (1988), a następnie stopnie naukowe doktora (1995) oraz doktora habilitowanego (2006) w zakresie elektrotechniki uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Od 1987 roku jest zatrudniony w Akademii Górniczo-Hutniczej, obecnie jako profesor nadzwyczajny AGH. Jego specjalnością naukową jest elektroenergetyka, a główne zainteresowania naukowe dotyczą analizy sieci elektroenergetycznych.