

ANALIZA MOŻLIWOŚCI REDUKCJI NAPIĘĆ INDUKOWANYCH W WIELOTOROWYCH LINIACH NĄPOWIETRZNYCH

Rafał TARKO¹, Wiesław NOWAK², Waldemar SZPYRA³

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

1. tel.: 12 617 36 53; e-mail: rtarko@agh.edu.pl

2. tel.: 12 617 28 24; e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl

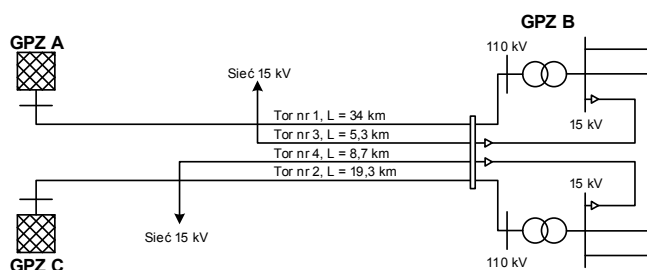
3. tel.: 12 617 32 47; e-mail: wszpyra@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia oddziaływań elektromagnetycznych w czterotorowej, dwunapięciowej linii elektroenergetycznej. Rozwiązania takie są coraz częściej stosowane w praktyce, ze względu na istniejące trudności w budowie nowych linii elektroenergetycznych. Rozwiązania takie posiadają również wady, wśród których wymienić należy oddziaływania elektromagnetyczne 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.

Słowa kluczowe: linie elektroenergetyczne wielotorowe, linie elektroenergetyczne wielonapięciowe, redukcja napięć indukowanych.

1. WPROWADZENIE

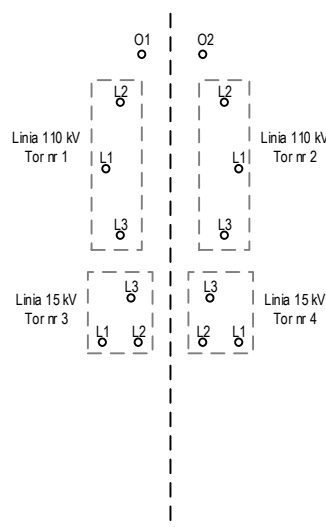
Trudności w pozyskaniu terenu pod budowę nowych linii elektroenergetycznych coraz częściej wymuszają zastosowanie specyficznych rozwiązań, np. w postaci usytuowania projektowanej linii w pasie technologicznym linii istniejącej [1, 2] czy konstrukcji linii wielotorowych o różnych poziomach napięć znamionowych. Rozwiązania takie implikują jednak szereg problemów, wśród których szczególnie podkreślić należy oddziaływania elektromagnetyczne i ich skutki w postaci indukowania napięć i prądów w przewodach [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 której schemat przedstawiono na rysunku 1.



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

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 rysunku 2.



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

Usytuowanie linii 15 kV pod liniami 110 kV daje ewidentne korzyści z punktu widzenia wykorzystania dostępnego dla lokalizacji terenu. Posiada jednak szereg wad, wśród których wymienić można 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 dotkliwe skutki praktyczne, ze względu na fakt występowania napięć na odłączonej 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 przekąźnikiem blokady łączeniowej, uniemożliwiającym zamknięcie uziemnika, jeżeli napięcia fazowe uziemianej linii są wyższe niż 10% wartości napięcia znamionowego.

Sytuacja powyższa zaistniała w linii przedstawionej na rysunku 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 (rys. 2). Rozważono cztery warianty pracy linii 110/15 kV, przedstawione w tabeli 1. Wyniki pomiarów wraz z wynikami obliczeń otrzymanych za pomocą opracowanego modelu matematycznego, dla wariantów 2, 3 i 4 zestawiono w tabeli 2.



Rys. 2. Stanowisko do badań skutków oddziaływań w analizowanej linii

Tabela 1. Warianty pracy 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	dłączony, obustronnie uziemiony	pod napięciem	odłączony, jednostronnie uziemiony
2	pod napięciem	odłączony, obustronnie uziemiony	pod napięciem	odłączony, odziemiony
3	pod napięciem	pod napięciem	pod napięciem	odłączony, odziemiony
4	pod napięciem	pod napięciem	pod napięciem	odłączony, jednostronnie uziemiony

Tabela 2. Wyniki obliczeń i pomiarów dla wariantów 2 i 3

Faza	Napięcia indukowane		Prądy indukowane po uziemieniu przewodów na stanowisku pomiarowym	
	zmierzone	obliczone	zmierzone	obliczone
Wariant 2				
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	–	–
Wariant 3				
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	–	–
Wariant 4				
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	–	–

Przeprowadzone badania wykazały, że podczas eksploatacji analizowanej linii elektroenergetycznej dochodzi do indukowania w torach 15 kV napięć i prądów, mogących wpłynąć na jej eksploatację. Podstawowe znaczenie ma oddziaływanie pojemnościowe pomiędzy pracującymi torami 110 kV, a wyłączonymi i nieuziemiającymi 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 do kilkunastu woltów i są proporcjonalne do wartości prądów płynących w torach 110 kV.

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

3. ANALIZA MOŻLIWOŚCI OGRANICZANIA ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Wykorzystując opracowany i przetestowany w praktyce model komputerowy rozważanej sieci, przeprowadzono analizę różnych sposobów ograniczenia lub całkowitej eliminacji negatywnych skutków oddziaływania pomiędzy torami 110 kV a torami 15 kV. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki analizy następujących sposobów ograniczania napięć indukowanych:

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

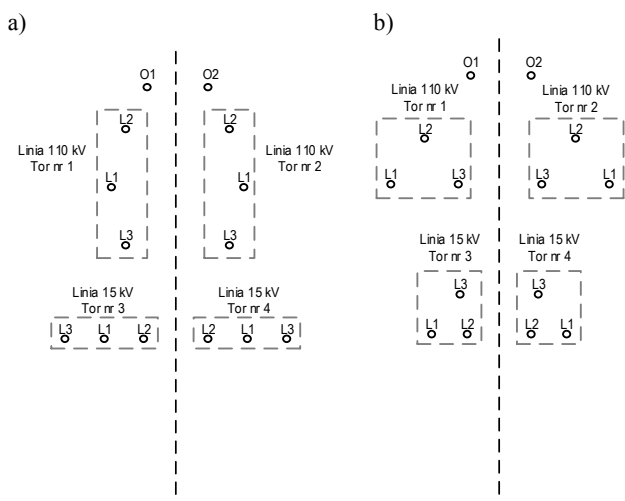
3.1. Wpływ przeplecenia przewodów

Przeprowadzona 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. Poza tym, przeplecenie skutkowałoby koniecznością wyłączenia obu torów linii 110 kV w przypadku wykonywania prac na jednym z torów linii 15 kV.

Z analizy wpływu zmiany kolejności przewodów fazowych w torach 110 kV wynika, że najkorzystniejszy z punktu widzenia napięć indukowanych w torach 15 kV jest układ, w którym znajdujące się najniższe przewody fazowe torów 110 kV są różnoimienne. Jednak zachodzące w tym przypadku ograniczenie wartości napięcia 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 zmiany układu przewodów

Zbadano dwa warianty zmiany układu przewodów w analizowanej linii: układ trójkątny pionowy przewodów torów 110 kV i płaski torów 15 kV (rys. 3a) oraz trójkątny zarówno torów 110 kV jak i 15 kV (rys. 3b)



Rys. 3. Badane układy przewodów torów 110 kV i 15 kV

Wyniki badania wpływu układu przewodów torów 110 kV i 15 kV na wartości napięć indukowanych w układzie jak na rysunku 3a zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości napięć indukowanych przy różnych konfiguracjach przewodów fazowych

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

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiana układu przewodów wpływa na poziom napięć fazowych i międzyfazowych indukowanych w torach linii 15 kV. Jednak zmniejszenie wartości indukowanych napięć jest niewystarczające dla poprawy warunków eksploatacji analizowanych linii oraz nie pozwala na uziemienie torów 15 kV.

3.3. Wpływ zmiany pionowej odległości przewodów

Badania wpływu zmiany pionowej odległości przewodów wykonano dla istniejącej konfiguracji przewodów zakładając maksymalne możliwe obniżenie przewodów torów 15 kV. Obliczone wartości napięć indukowanych we wszystkich przewodach uległy obniżeniu o około 40%, nadal jednak poziom napięć uniemożliwia uziemienie torów 15 kV.

3.4. Wpływ dołączenia baterii kondensatorów

Badania możliwości redukcji indukowanych napięć, w wyniku dołączania kondensatorów do odłączonych od zasilania i nieziemionych torów 15 kV wykonano przy założeniu, 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. Obliczenia wykonano zarówno dla uziemionego jak i izolowanego punktu gwiazdowego kondensatorów. Obliczenia wykazały istotny wpływ dołączonych pojemności na wartości indukowanych napięć fazowych i międzyprzewodowych. Wyniki obliczeń i pomiarów napięć indukowanych przy uziemionym punkcie gwiazdowym kondensatorów zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Obliczone i zmierzone wartości napięć indukowanych w torach 15 kV z dołączonymi bateriami kondensatorów

Faza	Badany układ					
	istniejący	z baterią kondensatorów o mocy 3×40 kvar (3×1,55 μ F)		z baterią kondensatorów o mocy 3×80 kvar (3×3,10 μ F)		
		napięcia indukowane w V				
	obl.	pom.	obl.	pom.	obl.	pom.
L1	4 699	3 885	222,4	201	111,7	101
L2	4 792	3 945	213,4	200	106,3	96
L3	7 553	6 840	436,2	428	219,6	218
L1-L2	171	30	18,4	2	20,5	0,9
L2-L3	2 761	2 985	224,4	230	115,6	120
L3-L1	2 879	3 060	213,9	230	108,1	119

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 linii.

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.

5. 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*, no. 1/14, 2013, pp. 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*, nr 32, 2013, s. 19–22.
3. Bąchorek W., Kot A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R., 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. 6-1-6-11.
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., Tarko R., Jaglarz A., Kozioł J., Analiza warunków eksploatacyjnych linii 110 kV Klikowa-Połaniec i 220 kV Klikowa-Niziny w aspekcie oddziaływania elektromagnetycznego, *Energetyka*, 2006, nr 2, s. 118–123.

ANALYSIS POSSIBILITY TO REDUCE TENSIONS INDUCED IN MULTI-CIRCUIT OVERHEAD LINES

The paper presents the electromagnetic interaction in four-circuit, dual voltage power line. Such solutions are increasingly being applied in practice, due to the difficulties with the acquisition of area for the construction of new power lines. Such solutions have some disadvantages, among which should be mentioned electromagnetic interactions and their consequences in terms of inducing voltage. These issues are considered in relation to the existing four-circuit line of voltage levels of 110 kV and 15 kV. Presents the results of the effects of interactions in a real system and the analysis of selected ways to reduce stress induced in the 15 kV line.

Keywords: multi-circuit power lines, multi-voltage power lines, reduction of induced voltages