

DOI: 10.5604/20830157.1093207

ANALIZA ZAKŁÓCEŃ W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYWOŁANYCH WYŁADOWANIAM PIORUNOWYMI

Mariusz Benesz, Rafał Tarko

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Streszczenie. W artykule przedstawiono złożoność problematyki analizy stanów nieustalonych napięć pojawiających się w układzie elektroenergetycznym wskutek bezpośrednich wyładowań piorunowych do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej. Analiza zakłóceń eksploatacyjnych wywołanych wyładowaniami piorunowymi dotyczy układu elektroenergetycznego o napięciu znamionowym 110 kV. Przedstawione wyniki stanowią przykład analizy narażeń napięciowych układów izolacyjnych aparatów stacyjnych z uwzględnieniem różnych wariantów zastosowanej ochrony przepięciowej w analizowanej stacji. Symulacje opisywanego zakłócenia zostały dokonane przy pomocy programu The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

Słowa kluczowe: zakłócenia, efekty falowe, wyładowania piorunowe, EMTP-ATP

ANALYSIS OF DISTURBANCES IN ELECTRIC POWERS SYSTEMS CAUSED BY LIGHTNING DISCHARGES

Abstract. This paper deals with analyzing specific transient states of voltages in electric power systems of high voltages. The paper presents the results of the analysis of operational disturbances caused by lightning discharges in 110 kV power system. Furthermore, the analysis results of lightning surges as well as the optimization results of a surge protection system installed in a 110 kV substation are presented. A model of an electric power system (overhead lines and substation) and all simulations were performed using computer software Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP). This model is based on a set of appropriately connected elements (distributed and lumped parameter elements) taking wave effects and nonlinear effects into consideration.

Keywords: disturbances, travelling waves, lightning discharges, EMTP-ATP

Wstęp

W systemie elektroenergetycznym występują zakłócenia eksploatacyjne, mogące doprowadzić do uszkodzenia zainstalowanych w nim aparatów i urządzeń. Jednym z zakłóceń są przepięcia, będące niezamierzonymi eksploatacyjnie wzrostami napięć powyżej najwyższych dopuszczalnych napięć roboczych. Mogą one prowadzić do degradacji lub uszkodzenia układów izolacyjnych urządzeń.

Najistotniejszymi z punktu widzenia zagrożeń układów izolacyjnych są przepięcia wywołane przez wyładowania piorunowe. Charakteryzują się one krótkim czasem trwania (rzędu kilkuset mikrosekund), dużymi wartościami szczytowymi (dochodzącymi do kilku megawoltów) oraz znacznymi stromościami narastania (rzędu kilku megawoltów na mikrosekundę).

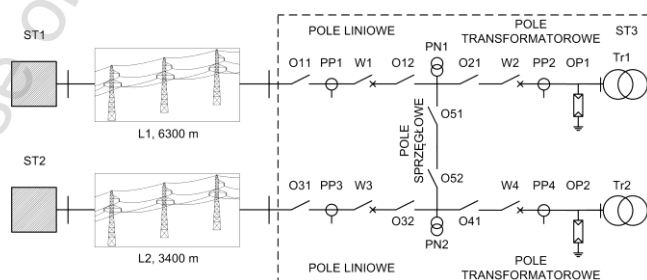
Przepięcia atmosferyczne powstawać mogą zarówno jako efekt indukcji elektromagnetycznej wywołanej przepływem prądu w kanale pioruna, jak również jako skutek bezpośrednich uderzeń pioruna do obiektów elektroenergetycznych. Stosowana w stacjach elektroenergetycznych ochrona odgromowa powoduje, że bezpośrednio uderzenie pioruna do urządzeń stacyjnych jest niemożliwe. Również linie wysokich i najwyższych napięć wyposaża się w ochronę w postaci przewodów odgromowych.

Ochrona odgromowa linii nie jest całkowicie niezawodna, a tym samym możliwe jest uderzenie pioruna w przewód fazowy i powstanie fali udarowej napięcia, stanowiącej zagrożenie nie tylko dla izolacji linii, ale również przyłączonych do niej stacji. O poziomie przepięć atmosferycznych decydują warunki ich powstawania w linii, a także efekty falowe wewnątrz stacji oraz zastosowane środki ochrony przeciwpięciowej. Jeżeli wyładowanie piorunowe zostanie przechwycone przez przewody odgromowe linii, to istnieje ryzyko, że w niesprzyjających warunkach nastąpi utrata wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, nazywana przeskokiem odwrotnym.

W artykule przedstawiono analizę pewnego zakłócenia w sieci 110 kV wywołanego wyładowaniami piorunowymi do linii zasilającej stację elektroenergetyczną. Konsekwencją tego zdarzenia było uszkodzenie aparatury stacyjnej. W celu dokonania analizy omawianego zakłócenia opracowano w programie EMTP-ATP model fragmentu sieci elektroenergetycznej. Opracowany model uwzględnia istotne z punktu widzenia prowadzonej analizy zjawiska fizyczne zachodzące w analizowanym układzie.

1. Opis analizowanego zakłócenia

Przedmiotem analizy jest sieć o napięciu 110 kV, której schemat przedstawiono na rysunku 1. W sieci tej znajduje się stacja 110 kV/SN (ST3) zasilana dwoma jednoradziowymi liniami 110 kV (L1, L2) ze stacji ST1 i ST2.



Rys. 1. Schemat rozpatrywanego układu sieci 110 kV (ST - stacja elektroenergetyczna, L - linia napowietrzna, O - odłącznik, PP - przełącznik prądowy, PN - przewodnik napięciowy, W - wyłącznik, OP - ogranicznik przepięci, Tr - transformator)

W analizowanym układzie sieci 110 kV doszło do złożonego zakłócenia będącego konsekwencją bezpośrednich wyładowań piorunowych do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej L2. Efektem opisywanego zakłócenia było uszkodzenie wyłącznika W3 znajdującego się w polu liniowym stacji ST3.

Odtworzenie możliwego scenariusza zaistniałego zakłócenia było możliwe na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądów i napięć w stacjach, do których przyłączona jest linia L2. W czasie opisywanego zakłócenia w okolicy panowała burza z licznymi wyładowaniami piorunowymi, które niewątpliwie przyczyniły się do powstania omawianego zakłócenia – potwierdzają to wyniki rejestracji systemu automatycznej detekcji wyładowań piorunowych (LIMET).

Na wskutek wyładowania piorunowego do linii elektroenergetycznej L2 doszło w niej do zakłócenia w postaci zwarcia jednofazowego. Zakłócenie to zostało wyeliminowane poprzez zadziałanie automatyki zabezpieczeniowej przez obustronne wyłączenie linii w stacjach ST2 i ST3. Po około 170 ms od tego zakłócenia, doszło do ponownego uderzenia pioruna w linię L2, w konsekwencji którego doszło do uszkodzenia aparatury stacyjnej w stacji ST3.

2. Model analizowanej sieci elektroenergetycznej

W celu analizy zakłócenia przedstawionego w rozdziale 1 opracowano w programie EMTP-ATP model systemu 110 kV, przedstawiony na rysunku 1. Model ten złożony jest z modeli cząstkowych odzwierciedlających właściwości poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz istotne z punktu widzenia prowadzonej analizy zjawiska fizyczne zachodzące w analizowanym układzie [4, 5, 7, 8]. Model składa się z dwóch zasadniczych części: 1) modelu linii L1 i L2; 2) modelu rozdzielni 110 kV.

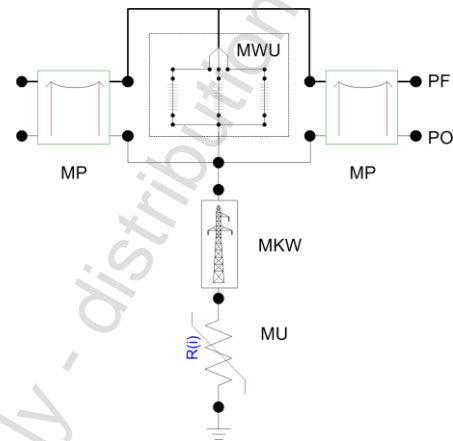
Linie napowietrzne odwzorowano jako zbiór szeregowo połączonych modeli cząstkowych. Uwzględniają one zasadnicze zjawiska zachodzące podczas wyładowania piorunowego do linii. Fragment modelu linii przedstawiono na rysunku 2. Wyróżnić w nim można modele pręseł linii oraz modele zjawisk zachodzących w konstrukcjach wsporczych.

Model przęsał linii (elementy MP na rysunku 2) odwzorowano w programie EMTP-ATP jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości. W modelu konstrukcji wsporczej uwzględniono trzy istotne zjawiska: efekty falowe w konstrukcji wsporczej, zjawiska nieliniowe w uziemieniu słupa oraz wytrzymałość udarowa izolacji linii. Model konstrukcji wsporczej zawiera więc trzy elementy (rysunek 2) [1, 7, 8]:

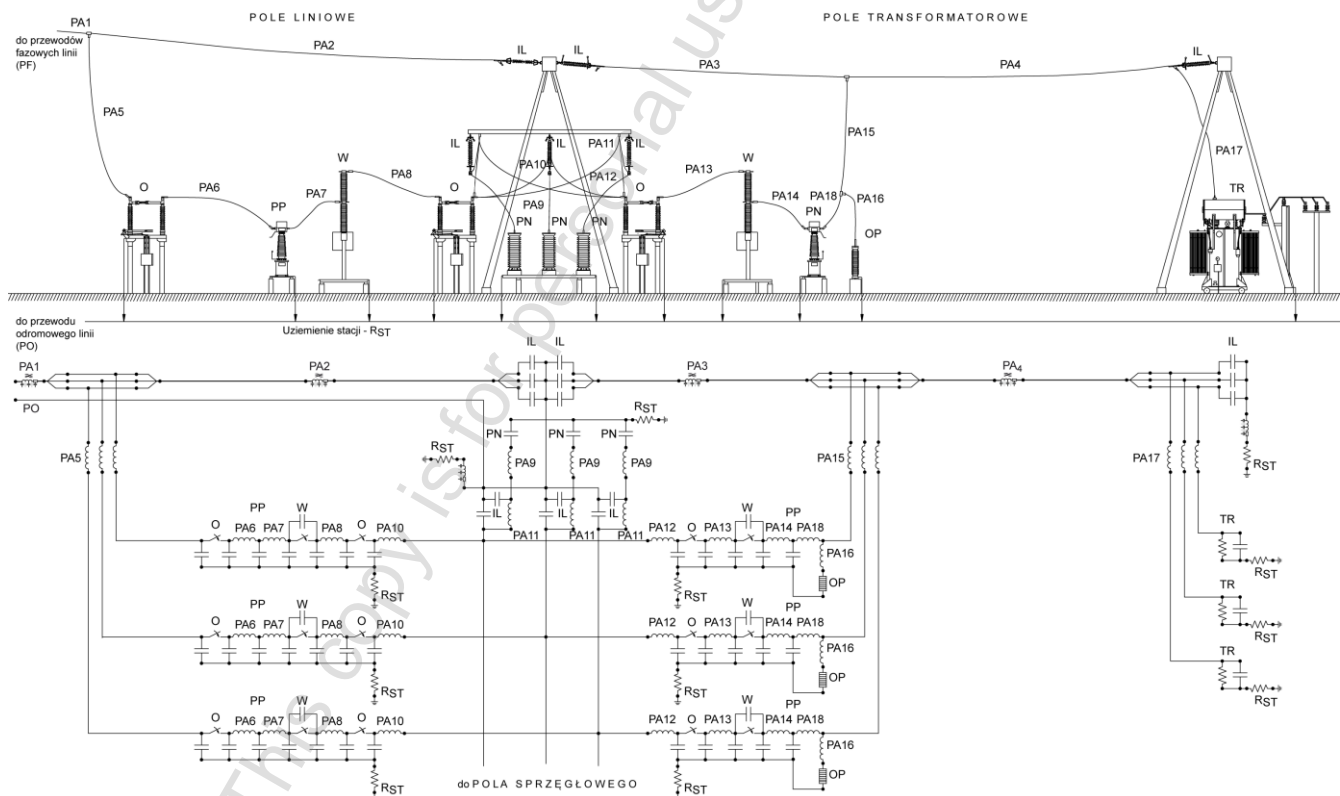
- element MKW stanowiący model zjawisk falowych w konstrukcji wsporczej, odwzorowany jako jednoprzewodowa bezstratna linia długa;
- element MU stanowiący model uziomu konstrukcji wsporczej podczas przepływu prądu pioruna, który odwzorowano w oparciu o wytyczne CIGRE i IEEE;
- element MWU stanowiący model wytrzymałości udarowej izolacji linii napowietrznej; model ten opracowano w oparciu o metodę rozwoju lidera LDM.

Stację elektroenergetyczną odwzorowano jako zbiór elementów odzwierciedlających poszczególne aparaty i urządzenia elektroenergetyczne, stanowiące wyposażenie stacji.

Fragment modelu stacji elektroenergetycznej, wykonany przy użyciu programu EMTP-ATP, został przedstawiony na rysunku 3. Model stacji elektroenergetycznej opracowano w oparciu o następujące założenia [2, 8]: przewody łączące (do 15 m długości) odwzorowano jako indukcyjność o wartości 1 $\mu\text{H/m}$, przewody łączące (ponad 15 m długości) odwzorowano jako modele linii wieloprzewodowej o parametrach rozłożonych, pojemności doziemne zainstalowanych urządzeń odwzorowano jako pojemności o wartościach z zakresu 100 pF – 1 nF, transformatory przedstawiono jako równoległe połączone pojemność i rezystancję. Istotnym elementem jest model ograniczników przepięć. Dla przepięć atmosferycznych, model ogranicznika powinien uwzględniać zjawiska fizyczne zachodzące w strukturze warystorów. Modelem, który ma zastosowanie w analizie przepięć atmosferycznych, jest między innymi model proponowany przez IEEE [9].



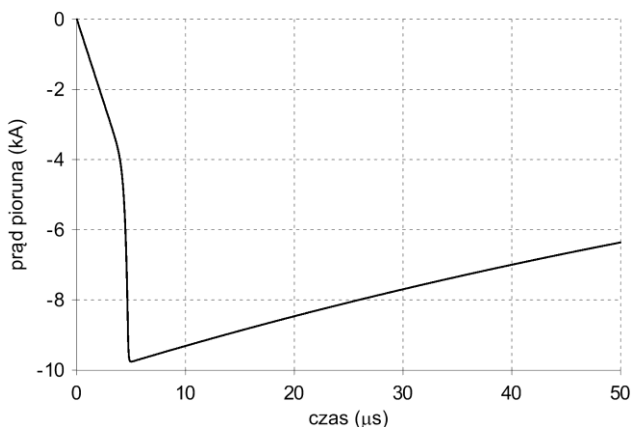
Rys. 2. Fragment modelu linii napowietrznej wykorzystany w badaniach symulacyjnych (PF – przewód fazy, PO – przewód odgromowy, MP – model przęsał, MWU – model wytrzymałości udarowej izolacji, MKW – model konstrukcji wsporczej, MU – model uziomu)



Rys. 3. Fragment modelu stacji elektroenergetycznej wykorzystany w badaniach symulacyjnych (O – odłącznik, PP – przekładnik prądowy, PN – przekładnik napięciowy, W – wyłącznik, OP – ogranicznik przepięć, TR – transformator, IL izolator liniowy, PA – połączenia między wyposażeniem stacji)

3. Wyniki przeprowadzonej analizy

Opracowany model sieci 110 kV stał się podstawą analizy narażeń eksploatacyjnych wywołanych wyładowaniami piorunowymi do linii zasilającej stację. Podczas badań symulacyjnych wykorzystano model prądu pioruna o kształcie przedstawionym na rysunku 4. Model ten został odwzorowany za pomocą źródła prądu o wklęsłym czole i zmiennej wartości maksymalnej.



Rys. 4. Model kształtu prądu pioruna wykorzystany w badaniach symulacyjnych

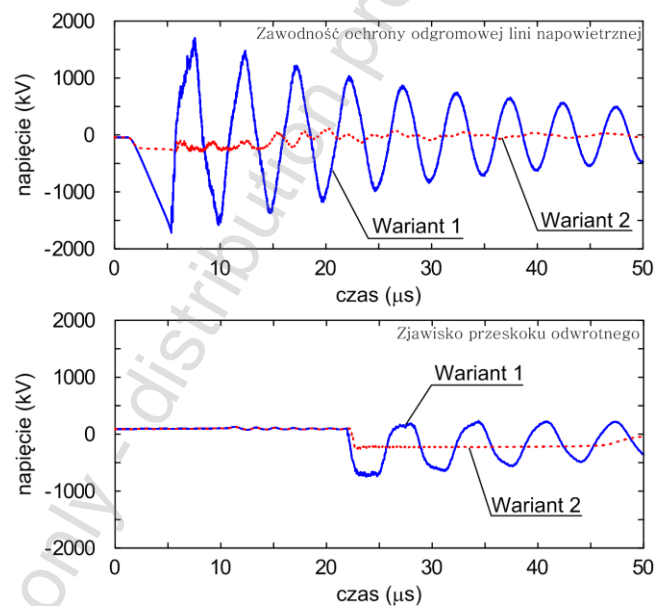
Celem przeprowadzonych symulacji była ocena poziomu przepięć w stacji elektroenergetycznej 110 kV, wywołanych bezpośrednim wyładowaniem piorunowym do linii napowietrznej L2. Przyjęto następujące założenia:

- przepięcia docierające do stacji wywołane są wyładowaniami piorunowymi do linii napowietrznej L2;
- w myśl teorii elektromagnetycznej [5] możliwe jest uderzenie pioruna w przewód fazowy linii, jeżeli wartość szczytowa jego prądu jest mniejsza od wartości krytycznej; przeprowadzona analiza wykazała, że wartość ta wynosi 9,79 kA;
- przy wyładowaniach pioruna do słupów lub przewodów odgromowych możliwe jest wystąpienie przeskoku odwrotnego [3, 6, 7] będącego przyczyną przepięć w stacji; Przeprowadzona analiza wykazała, że krytyczna wartość szczytowa prądu powyżej której zjawisko to występuje wynosi 116,5 kA;
- wyładowanie piorunowe do linii L2 jest w odległości 350 m od stacji ST3.
- w analizie uwzględnia się najmniej korzystny wpływ przemiennego napięcia roboczego linii 110 kV;
- nieliniowe właściwości uziemienia konstrukcji wsporczej odwzorowano przy pomocy nieliniowej rezystancji o charakterystyce wyznaczonej na podstawie wartości rezystywności gruntu $\rho = 300 \Omega\text{m}$ i rezystancji statycznej uziemienia $R_T = 10 \Omega$ [1,2].
- obliczenia przeprowadzono dla wartości rezystancji uziemienia stacji $R_{ST} = 0,56 \Omega$;
- analiza dotyczy stanu rozdzielni po zadziałaniu automatyki zabezpieczeniowej w wyniku zaistniałego zakłócenia przedstawionego w rozdziale II (otwarty wyłącznik W3 w polu liniowym stacji ST3).

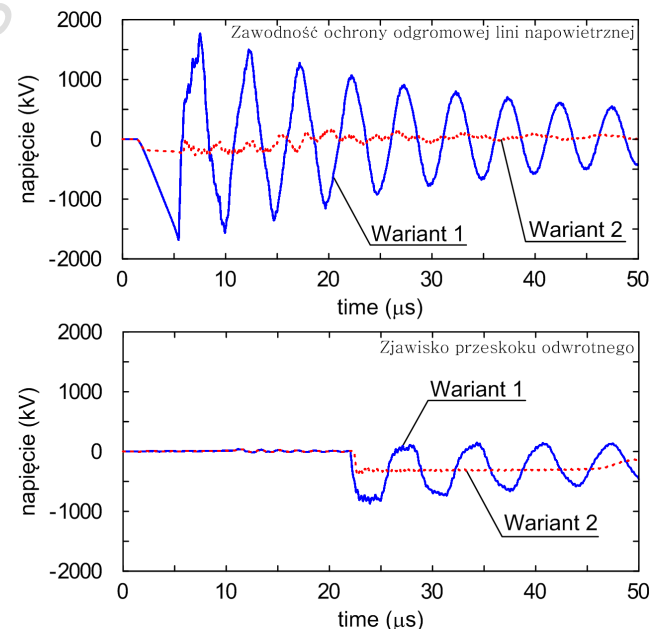
Celem analizy było wyznaczenie przepięć w charakterystycznych miejscach rozdzielni:

- w punkcie przyłączenia linii L2 do rozdzielni ST3;
- na stykach otwartego wyłącznika W3;
- na zaciskach transformatora Tr2.
- Rozważono dwa warianty ochrony przeciwprzepięciowej:
- wariant 1: ograniczniki przepięć zainstalowane są tylko w polach transformatorowych stacji (wariant istniejący);
- wariant 2: ograniczniki przepięć zainstalowane są w polach liniowych i transformatorowych stacji.

Na rysunkach 5-7 przedstawiono wybrane przebiegi czasowe przepięć w charakterystycznych punktach rozdzielni. Pokazują one złożone zjawiska falowe zachodzące wewnątrz rozdzielni. Na kształt i wartości szczytowe przepięć wpływa wiele czynników, przy czym najistotniejszym z nich jest zastosowana ochrona przepięciowa. Zainstalowanie ograniczników przepięć tylko w polach transformatorowych powoduje obniżenie przepięć na zaciskach transformatora, lecz jednocześnie skutkuje znaczącą intensyfikacją przepięć w pozostałych miejscach rozdzielni – rysunek 8. Z tego powodu bezwzględnie wymagane jest również zastosowanie ograniczników w polach liniowych.



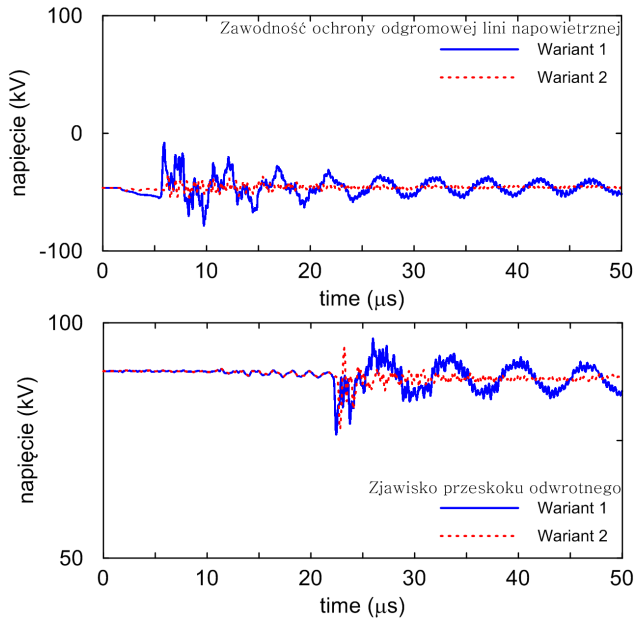
Rys. 5. Zarejestrowane przebiegi czasowe napięcia w polu liniowym stacji ST3



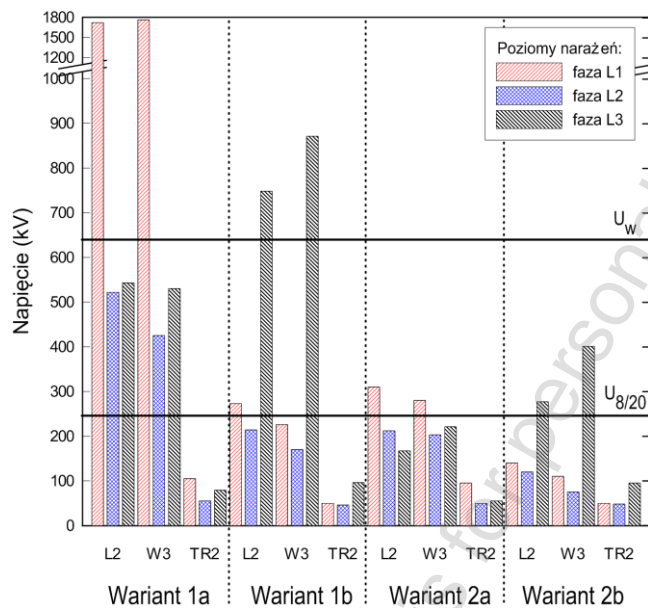
Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi czasowe napięcia na stykach otwartego wyłącznika W3 w polu liniowym stacji ST3

Z przedstawionych na rysunku 8 wartości szczytowych przepięć wynika, że przy zastosowaniu ograniczników przepięć tylko w polach transformatorowych, możliwe jest wystąpienie na zaciskach otwartego wyłącznika W3 przepięć o wartościach szczytowych znacznie przekraczających wytrzymałość udarową piorunową wyłącznika wynoszącą 550 kV. Może to skutkować

przebiegiem przerwy międzystykowej wyłącznika W3, a w efekcie prowadzi do podania napięcia roboczego od strony rozdzielni ST1 na zwarcie powstałe w wyniku uderzenia pioruna do linii L2. Konsekwencją tego może być przepływ prądu zwarciego i uszkodzenie wyłącznika W3. Można więc sformułować wniosek, że przyczyną uszkodzenia wyłącznika W3 był brak właściwej ochrony przepięciowej rozdzielni ST3.



Rys. 7. Zarejestrowane przebiegi czasowe napięcia na zaciskach transformatora TR2 w stacji ST3



Rys. 8. Poziomy narażeń napięciowych w wybranych punktach stacji ST3 (U_W – wytrzymałowe napięcie udarowe izolacji wyłącznika W3, $U_{8/20}$ – napięcie obniżone ogranicznika przepięć dla prądu wyladowczego 10 kA i kształcie 8/20 μ s; wariant 1a, 2a – zawodność ochrony odgromowej linii; wariant 1b, 2b – przeskok odwrotny)

4. Podsumowanie i wnioski

Bezpośrednie wyladowania piorunowe w przewod fazy linii napowietrznej, a także przeskok odwrotny, mogą stanowić źródło przepięć o znacznych wartościach szczytowych. Szczególnie groźnym przypadkiem jest sytuacja, w której nie stosuje się ograniczników przepięć w polach liniowych stacji. Pojawiają się wówczas przepięcia, których wartości mogą znacznie przekraczać udarową wytrzymałość izolacji stosowanych urządzeń.

Z analizy narażeń przepięciowych rozpatrywanej sieci 110 kV wynika, że najbardziej prawdopodobną przyczyną uszkodzenia zainstalowanego w tej rozdzielni wyłącznika był brak właściwej ochrony przepięciowej rozdzielni.

Literatura

- [1] Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E.: Estimation of Lightning Incidence to Overhead Transmission Lines, IEEE Trans. on Power Del., vol. 25, issue 3, July 2010, pp. 1855-1865.
- [2] Nowak W.: Modelling and computer simulation of lightning surges in high voltage outdoor substations, 3th Intern. Scientific Symposium on Electrical Power Engineering EE2005, Stará Lesná, Slovakia, 21-23 September 2005, pp. 1-8.
- [3] Nowak W.: The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines, Archives of Electrical Engineering, vol. 54, no. 3, 2005, pp. 321-341.
- [4] Nowak W.: The computer simulations of lightning surges in high voltage transmission line, 3th Intern. Scientific Symposium on Electrical Power Engineering EE2005, Stará Lesná, Slovakia, 21-23 September 2005, pp. 1-10.
- [5] Nowak W., Tarko R.: Computer Modelling and Analysis of Lightning Surges in HV Substations due to Shielding Failure, IEEE Trans. on Power Del., vol. 25, no. 2, April 2010, pp. 1138-1145.
- [6] Takami J., Okabe S., Zaima E.: Lightning Surge Overvoltages at Substations Due to Backflashover With Assumed Lightning Current Waveforms Based on Observations, IEEE Trans. on Power Del., vol. 25, issue 4 October 2010, pp. 2958-2969.
- [7] Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines CIGRE Publication No. 63 1991, CIGRE Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination.
- [8] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, Modeling guidelines for fast front transient, IEEE Trans. on Power Del., vol. 11, no. 1, January 1996, pp. 493-506.
- [9] IEEE Working Group 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Trans. on Power Del., vol. 7, no. 1, January 1992, pp. 302-309.

Mgr inż. Mariusz Benesz
e-mail: mariusz.benesz@agh.edu.pl



Studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka, ukończył na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie (2006). Od 2008 roku pracuje w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH w Krakowie, na stanowisku asystenta. Jego zainteresowania dotyczą szeroko rozumianej problematyki narażeń eksploatacyjnych w układach elektroenergetycznych. Jest współautorem czternastu publikacji, w tym 6 referatów i 8 artykułów.

Dr inż. Rafał Tarko
e-mail: rafal.tarko@agh.edu.pl



Pracuje w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą analizy narażeń eksploatacyjnych i elektromagnetycznych stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych.