

doi:10.15199/48.2024.01.07

Analiza przypadku awarii dławików kompensujących zasilania zakładu produkcyjnego

Streszczenie. Niniejszy artykuł przedstawia analizę rzeczywistego przypadku awarii dławików kompensujących w nowo wybudowanym układzie zasilania dużego zakładu produkcyjnego. Zidentyfikowano, że eksplozje i pożary dławików występowały jedynie po naprawach technicznych i podczas załączania dławika. W celu zrozumienia przyczyn awarii, przeprowadzono studium przypadku, obejmujące analizę topologii sieci, parametrów elektrycznych projektu oraz zastosowano modelowanie rozwiązań przy użyciu programu EMTP-RV. Przy użyciu symulacji komputerowych dokonano analizy przebiegów przebiegów oraz ich kształtów w miejscu awarii dławika. Analiza wykazała, że mimo zasady umieszczania zabezpieczeń jak najbliżej chronionego obiektu, projekt przewidywał zainstalowanie ograniczników w znacznej odległości od dławika. To spowodowało powstanie przebiegów, które znacznie przekraczały zapas koordynacji izolacji.

Abstract. This article presents an analysis of a real case of failures in compensating chokes within a newly constructed power system of a large manufacturing plant. It was identified that chokes' explosions and fires occurred only after technical repairs and during choke energization. To understand the causes of these failures, a case study was conducted, including an analysis of the network topology, electrical parameters of the design, and the application of modeling solutions using the EMTP-RV software. By utilizing computer simulations, an analysis of overvoltage waveforms and their shapes at the choke failure location was performed. The analysis revealed that despite the principle of placing protections as close as possible to the protected object, the design involved installing surge arresters significantly far from the chokes. This resulted in the generation of overvoltages that significantly exceeded the insulation coordination margin. **(Case analysis of compensating chokes failure in a production facility power supply)**

Słowa kluczowe: dławiki kompensacyjne, koordynacja izolacji, symulacje EMTP-RV, wytrzymałość izolacji.

Keywords: compensation chokes, insulation coordination, EMTP-RV support, insulation resistance.

Wstęp

Awaria dławików kompensujących stanowi istotne zagrożenie dla stabilności i bezpieczeństwa układu zasilania. Szczególnie w przypadku nowo wybudowanych układów zasilania, zwłaszcza w dużych zakładach produkcyjnych, niezwykle istotne jest dokładne zrozumienie przyczyn awarii oraz odpowiednie zastosowanie zabezpieczeń. W niniejszym artykule przedstawiona została analiza przypadku awarii dławików, które ulegały uszkodzenia podczas załączania.

W omawianym przypadku stwierdzono, że stosowane zabezpieczenia były umieszczone w znacznej odległości od chronionego obiektu, jakim jest dławik. Pomimo powszechnej wiedzy [1] na ten temat, projektanci tworząc topologię sieci nie zawsze uwzględniają możliwość występowania zjawisk indukcyjności na szynach, które, zgodnie z danymi literaturowymi [2], mogą znacznie wpłynąć na kształt pojawiających się przebiegów.

Jednym z kluczowych aspektów analizowanego przypadku było zidentyfikowanie czynników odpowiedzialnych za awarię dławików kompensujących. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na dokładne zrozumienie mechanizmu uszkodzeń i wskazanie kluczowych obszarów, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas projektowania i eksploatacji układów pracy z zainstalowanymi dławikami.

Wpływ zjawisk indukcyjności na kształt przebiegów stanowi jeden z istotnych elementów modelowania. Badania literaturowe potwierdzają, że występowanie indukcyjności na szynach może prowadzić do znaczących przekroczeń wartości maksymalnych przebiegów [2], poprzez występowanie dodatkowych oscylacji na czole oraz szczycie przebiegów, co może mieć istotne konsekwencje dla działania dławików i innych elementów sieci.

W celu zapewnienia większej niezawodności i bezpieczeństwa układów zasilania, konieczne jest wzięcie pod uwagę dodatkowych oscylacji występujących na przebiegu. Projektanci powinni uwzględnić te czynniki podczas projektowania topologii sieci, identyfikując potencjalne obszary ryzyka i dostosowując zabezpieczenia w odpowiedni sposób.

Kolejnym aspektem wartym uwagi jest analiza odpowiednich odległości umieszczenia zabezpieczeń od kluczowych elementów układu zasilania. Poprawne rozplanowanie lokalizacji zabezpieczeń może skutecznie minimalizować ryzyko awarii i uszkodzeń, a także zapewnić szybką i precyzyjną reakcję na występujące zakłócenia.

Ostatecznie, wyniki analizy awarii dławików kompensujących oraz wpływu zjawisk indukcyjności na przebiegów dostarczają cennych informacji dla inżynierów i operatorów systemów elektroenergetycznych. Ich uwzględnienie pozwoli na poprawę projektów układów zasilania, minimalizację ryzyka awarii oraz zapewnienie stabilności i niezawodności pracy systemu. Przedstawione wnioski mają zastosowanie praktyczne w dziedzinie projektowania i eksploatacji systemów elektroenergetycznych, w szczególności w kontekście zapewnienia bezpiecznego i niezawodnego dostarczania energii w różnych sektorach przemysłu i infrastruktury.

Opis przypadku

W przedstawionym przypadku wystąpienia awarii dławików kompensujących, eksplozje i pożary miały miejsce podczas załączania dławika po wykonaniu przerw technicznych. Zbierając dostępne informacje dotyczące topologii sieci, parametrów elektrycznych projektu oraz dokładnych danych dotyczących awarii, przystąpiono do analizy i modelowania zjawiska w programie EMTP-RV.

Dostępne w literaturze rozwiązania [3,8] pozwalają na zaimplementowanie schematu zastępczego dławika kompensacyjnego do dalszych analiz. Przedstawiony na rysunku 1 model, w którym parametry gałęzi podłużnej R_T , X_T , Z_T są wyznaczone na podstawie napięcia zwarcia dla potrzeb własnych. Parametry poprzeczne X_D , R_D są wyznaczone na podstawie mocy kompensacyjnej dławika oraz strat kompensacyjnych. Do obliczeń można zastosować poniższe formuły:

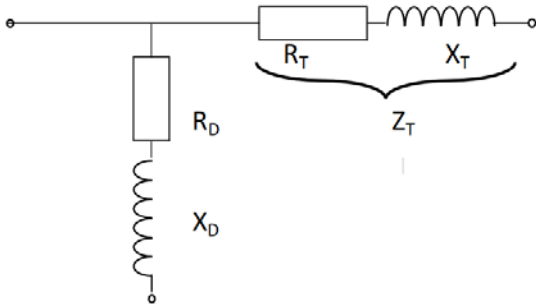
$$(1) \quad Z_T = \frac{U_{Z\%} U_n^2}{100 S_n} \quad [\Omega]$$

$$(2) \quad R_D = \frac{P_C U_n^2}{Q_n^2} \quad [\Omega]$$

$$(3) \quad R_T = \frac{P_{pw} U_n^2}{S_n^2} \quad [\Omega]$$

$$(4) \quad X_D = \frac{U_n^2}{S_n} \quad [\Omega]$$

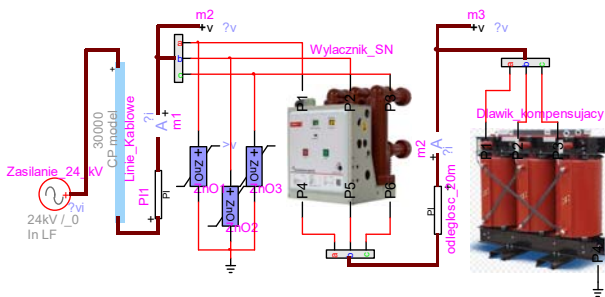
gdzie: P_{pw} – straty uzwojenia potrzeb własnych, P_C – straty kompensacyjne, U_n – napięcie znamionowe, S_n – moc potrzeb własnych, Q_n – moc kompensacyjna, $U_z\%$ – napięcie zwarcia uzwojenia potrzeb własnych.



Rys.1. Przyjęty schemat zastępczy dławika z uzwojeniem potrzeb własnych [3]

Przyjęte modele do symulacji

W celu zrozumienia przyczyn występowania awarii dławika kompensującego przeprowadzono symulacje komputerowe, wykorzystując program EMTP-RV. Modelowanie obejmowało uwzględnienie topologii sieci, parametrów elektrycznych oraz szczegółowe informacje dotyczące dławików kompensujących i systemów kablowych. Przykładowy model przedstawiony na rysunku 2 odzwierciedla rzeczywisty układ połączeń.

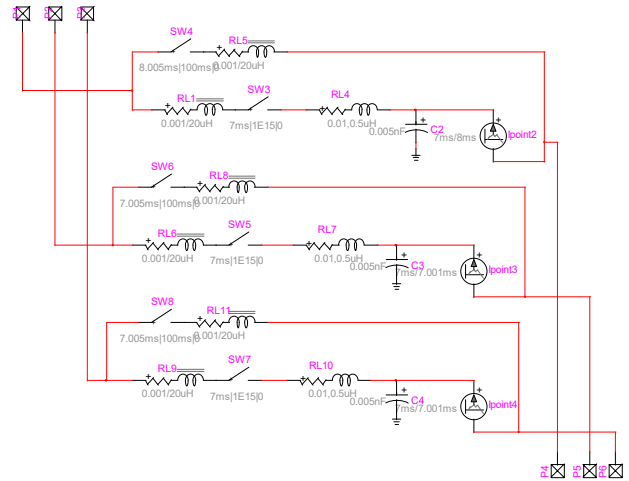


Rys.2. Przyjęty model symulacyjny układu połączeń dławika kompensującego z systemem kablowym oraz rozmieszczonymi zabezpieczeniami

Najistotniejsze parametry uproszczonego modelu, przedstawionego na rysunku 2, dotyczą modelu linii kablowych, który został zaimplementowany jako model Constant Parameter (CP) dla modelu linii/kabla wielofazowego, oraz modelu Pi device, z uwzględnieniem przyjętych parametrów: rezystancji $R=15,75 \Omega$, indukcyjności $L=30\mu\text{H}$ oraz pojemności $C=6,6 \mu\text{F}$. Wartości tych parametrów zostały zaczerpnięte z dostępnych kart katalogowych producentów kabli [9]. Ograniczniki przepięć zostały zamodelowane za pomocą modelu Arrester Data Calculation, wprowadzając standardowe parametry pracy dla napięć znamionowych 24 kV. Istotnym elementem analizy jest odległość między wyłącznikiem a dławikiem, która wynosiła około 20m. Połączenia te realizowane były za pomocą szyn obejściowych, które zamodelowane zostały za pomocą układu PI z następującymi parametrami dane takie jak $R=0,001\Omega$, $L=20\mu\text{H}$ oraz $C=0,05\text{nF}$.

W trakcie symulacji przeprowadzono pomiary prądów punkcie (m2 – rysunek 2) oraz napięć w punkcie (m3 – rysunek 2) na wejściu dławika. Analizując przebiegi tych wielkości, można określić jakie zagrożenia występowały podczas załączania lub wyłączania wyłącznika SN.

Przedstawione na rysunku 2 modele wyłącznika oraz dławika, są zaimplementowanymi modelami do programu EMTP-RV, których szczegółowe schematy przedstawione są na rysunkach 3 oraz 4. Celem zamodelowania wyłącznika SN było uwzględnienie zjawiska występowania łuku elektrycznego między stykami elektrod podczas procesu załączania i wyłączania. Czas zamykania wyłącznika ($\leq 45 \text{ ms}$) oraz czas trwania łuku elektrycznego ($\leq 15 \text{ ms}$) zostały przyjęte na podstawie danych z kart katalogowych wyłącznika SN e2 BRAVO [10].



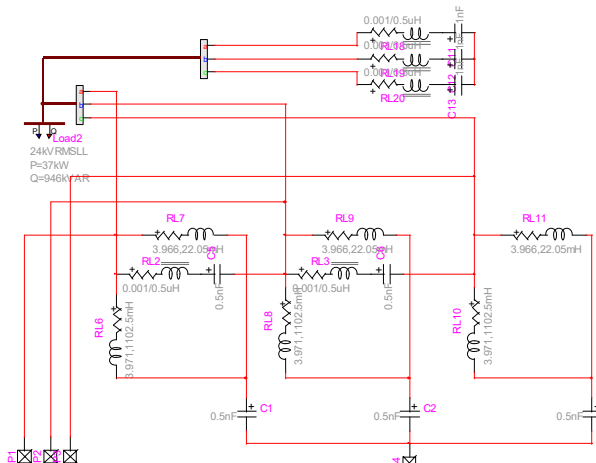
Rys.3. Wyłącznik SN, z zaimplementowanym modelem zjawiska łuku elektrycznego podczas procesu zamykania

Realizowany proces zamykania wyłącznika na każdej fazie osobno jest realizowany przez wyłącznik SW3, SW5, SW7, a zastosowane parametry są zgodne z danymi dostępnymi w literaturze [10], gdzie zamodelowano występowanie łuku elektrycznego jako zwiększenie wartości prądu do wartości znamionowych obciążenia [11]. Natomiast czas trwania łuku jest określony przez działanie wyłączników SW4, SW6, SW8 dla poszczególnych faz.

Prowadzenie analizy pracy wyłączników trójfazowych uwzględnia możliwość występowania różnych czasów zamykania lub otwierania ich styków. Przyjęcie danych katalogowych, gdzie czas zamykania wynosi $\leq 45 \text{ ms}$, jest mniej istotne w kontekście analizy, ponieważ najważniejszym parametrem jest występowanie łuku elektrycznego, który wprowadza przepięcie do sieci. Czas trwania łuku, podany przez producenta jako mniejszy/równy 15 ms, stanowi istotny czynnik wpływający na narażenie izolacji dławika, zwłaszcza gdy ograniczniki przepięć są zainstalowane przed wyłącznikiem. Przyjęty model pracy poszczególnych styków faz zakłada występowanie łuku elektrycznego tylko na jednej fazie "A", gdzie czas trwania łuku wynosi 1 ms. Pozostałe czasy trwania łuku elektrycznego dla faz "B" i "C" przyjęto jako mniejsze niż $1 \mu\text{s}$. W uproszczonym schemacie można założyć, że zjawisko łuku pojawia się tylko na jednej fazie, podczas gdy pozostałe fazy zamykają się w równych odstępach czasu.

Istotą modelowania dławika w dalszych analizach jest przyjęcie parametrów RLC, które są określone wzorami (1-4), parametrami producenta oraz danymi z literatury [3,7]. W artykule przyjęto model dławika przedstawiony na rysunku 4, który obciąża się samodzielnie prądami

znamionowymi do 26 A. Badanie impulsów przepięciowych występujących na izolacji każdej fazy dławika jest realizowane przez pomiar napięcia w punkcie (m3 – rysunek 2).



Rys.4. Przyjęty schemat zastępczy dławika dla trzech faz. z uwzględnieniem występowania indukcyjności wzajemnych.

Analiza przebiegów przepięć oraz ich kształtów została przeprowadzona, odnosząc się do wartości wytrzymałości określonej w zasadach koordynacji izolacji [4]. Podczas wykonywania symulacji modelu z rysunku 2, uwzględniano zagrożenie wynikające z nierównomiernego zamykania się poszczególnych faz wyłącznika SN.

Należy również zaznaczyć, że analizy przeprowadzono dla różnych scenariuszy obciążenia, uwzględniając zmienne warunki pracy systemu. Badano wpływ obciążenia na zachowanie dławika oraz potencjalne zagrożenia związane z przeciążeniem i przepięciami. Wyniki tych analiz dostarczają informacji na temat najbardziej krytycznych warunków eksploatacyjnych oraz pozwalają na zidentyfikowanie potencjalnych obszarów ryzyka.

W trakcie analizy uwzględniono również wpływ różnych typów ograniczników przepięć na zachowanie systemu. Porównano skuteczność różnych typów ograniczników i oceniono ich wpływ na poziom ochrony dławika oraz innych elementów sieci. Ograniczniki przepięć stanowią kluczowy element w ochronie przed uszkodzeniami wynikającymi z przepięć, dlatego dokładna analiza ich działania jest niezwykle istotna w kontekście bezpieczeństwa i niezawodności systemu.

Podczas symulacji uwzględniono także różne scenariusze zakłóceń [6], takie jak wystąpienie łuku elektrycznego na sykach pozostałych faz. Powstałe zakłócenia ocenia się na podobnym poziomie, co w przypadku analizy jednej fazy.

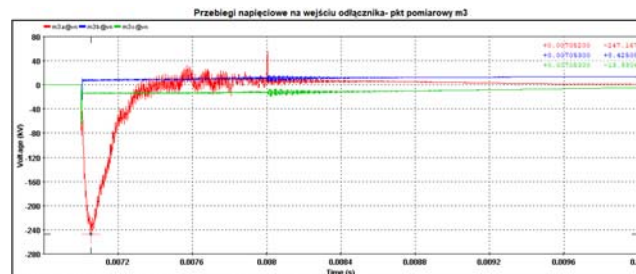
Ocena wpływu tych zakłóceń na działanie dławika i określenie jego zdolności do odpowiedniej reakcji na zmienne warunki pracy, jest istotną wiedzą, która pozwala na właściwe rozumienie występujących zjawisk w podobnych sieciach.

Symulacja możliwych stanów pracy

Analizując przypadek uszkodzenia dławika w zaprojektowanym modelu – przedstawionym na rysunku 2 – symulacje przeprowadzono w sytuacjach różnych czasów rozchodzenia się styków wyłącznika SN. W przypadku gdy awaria następowała w rzeczywistości na jednej tylko fazie „A”, w pierwszej kolejności przyjęto, że styki rozłącznika SN „B,C” zamykają się w identycznym czasie $T \leq 1\mu s$. W takiej sytuacji czas trwania łuku będzie również mieścił się w tym czasie na fazach „B,C”, natomiast na fazie „A” zamodelowano czas trwania łuku $T = 1 ms$. Co z reguły jest

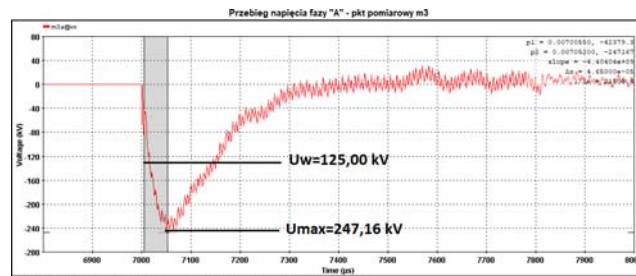
bardzo długim czasem, należy jednak wziąć pod uwagę możliwość występowania takich czasów, choćby ze względu na dane producenta [10], gdzie szacuje się, że czas zamykania może wynosić $\leq 45ms$ a czas trwania łuku nawet do 15ms.

Przyjmując powyższe założenia, gdzie czas trwania łuku wyniósł 1 ms w fazie „A”, w pozostałych natomiast poniżej 1 μs , wyniki przebiegów napięciowych pokazuje rysunek 5.



Rys.5. Zarejestrowane przebiegi napięciowe na wejściu odłącznika. Kolor czerwony Faza „A”, kolor niebieski faza „B” oraz kolor zielony faza „C”.

Zarejestrowana odpowiedź napięciowa zamodelowanego układu RLC na prąd łukowy, wskazuje że na fazie „A” występuje przepięcie o wartości szczytowej 247,16 kV, które zdecydowanie przekracza zakładaną normatywnie w koordynacji [4] izolacji wartość wytrzymawaną 125 kV. Pojawienie się takiego przepięcia – przedstawionego szczegółowo na rysunku 6 – zdecydowanie przekracza wartości zaprojektowanej wytrzymałości elektrycznej cewek dławika.

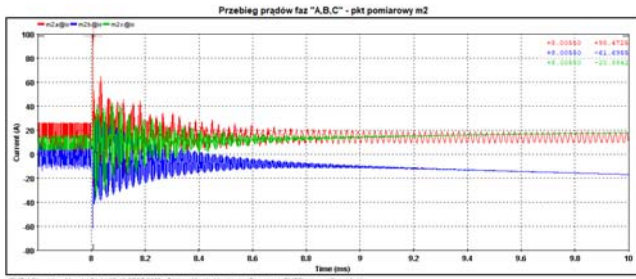


Rys.6. Szczegółowy przebieg zarejestrowanego przepięcia na fazie „A”, Czas trwania udaru $T_1 = 45 \mu s$

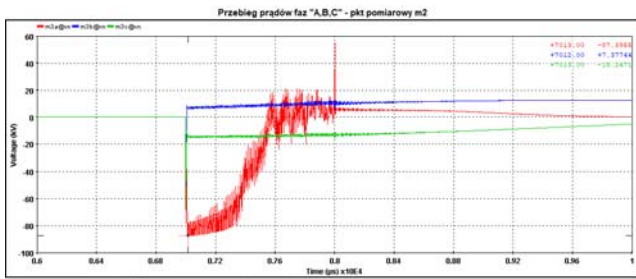
Należy zwrócić uwagę na fakt, że wartość wytrzymawana $U_w = 125 kV$ określana w normach koordynacji izolacji [4], jest wymagana dla udarów o przebiegach 1,2/50 μs . W sytuacji, gdy wartość czasu T_1 trwania czoła udaru rośnie wytrzymałość naturalnie maleje [5]. Przekroczenie jednak wartości nominalnych o 122 kV, przy przebiegach przepięć łączeniowych spowodowało systematyczne uszkodzenia stanu izolacji, co w efekcie doprowadziło do awarii.

Analizując również przebiegi prądowe – mierzone w punkcie m2 – rysunek 2, należy zwrócić uwagę na wartości prądów, których wartości dla fazy „A” wynosiły 98 A, w porównaniu z parametrami nominalnymi dławika maksymalnych prądów znamionowych 26 A. Rysunek 7 przedstawia przebiegi prądów mierzone na wejściu dławika dla każdej z faz.

Analizując powyższy przypadek, można z całą pewnością stwierdzić, że zastosowane zabezpieczenia przepięciowe w postaci ograniczników, instalowane zgodnie z stanem faktycznym w zakładzie produkcyjnym, nie zadziałały. W sytuacji prawidłowego zainstalowania ograniczników przepięć, tuż przy chronionym obiekcie jakim jest dławik przebiegi napięciowe wyglądały jak na rys. u 8.



Rys.7. Przebiegi prądów rejestrowane na wejściu dławika dla wszystkich faz.



Rys.8. Przebiegi napięciowe rejestrowane na wejściu dławika z zastosowanymi ogranicznikami przepięć również na wejściu dławika.

Analizując przebiegi na rysunku 8, gdy zostały zastosowane w modelu dodatkowe ograniczniki przepięć tuż na wejściu dławika, wskazują one na to, że wpływ zainstalowanych ograniczników przepięć skutkuje obniżeniem przepięcia do wartości 87 kV dla fazy "A", co mieści się w granicach przyjętej koordynacji izolacji [4].

Kontynuując badania na rzeczywistym modelu, w którym ograniczniki pozostają zainstalowane w znacznej odległości od chronionego obiektu, przeprowadzono symulacje, które pokazują zmianę maksymalnej wartości przepięcia w zależności od czasu trwania łuku. Wyniki symulacji zostały przedstawione w tabeli 1. Symulacje zostały przeprowadzone w dwóch różnych przypadkach: gdy przebieg prądu osiągał wartość szczytową oraz gdy napięcie osiągało wartość szczytową.

Tabela 1. Modelowanie różnych czasów zamykania wyłącznika

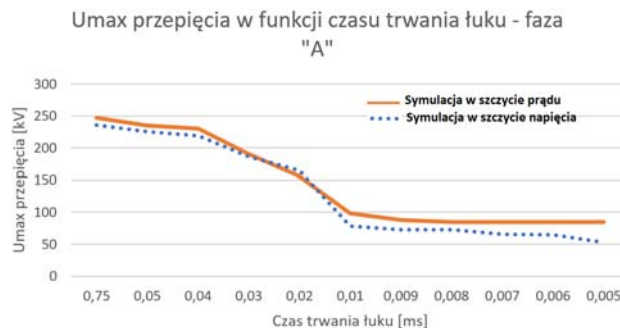
LP.	Czas łukowy [ms]	Przepięcie faza „A” U_{max} [kV]	
		Dla I_{max}	Dla U_{max}
1	0,75	247	235
2	0,05	235	244
3	0,04	230	219
4	0,03	190	186
5	0,02	155	164
6	0,01	84	78
7	0,009	79	72
8	0,008	84	72
9	0,007	84	65
10	0,006	84	64
11	0,005	84	52

W wyniku przeprowadzonych symulacji zauważono, że czas trwania łuku ma istotny wpływ na zmianę przepięcia [8,12]. W przypadku pierwszego wariantu, gdy przebieg prądu osiągał wartość szczytową, zaobserwowano większe wartości przepięcia w porównaniu do drugiego wariantu, gdzie napięcie osiągało wartość szczytową. zależności te zostały przedstawione na rysunku 9.

Analiza danych zawartych w Tabeli 1 ukazuje, że zastosowanie dodatkowych ograniczników przepięć na wejściu dławika skutecznie zmniejsza ryzyko wystąpienia przepięć i utrzymuje napięcie na akceptowalnym poziomie zgodnym z wymaganiami izolacyjnymi.

Warto zaznaczyć, że w praktyce zastosowanie ograniczników przepięć jest kluczowym elementem ochrony urządzeń elektrycznych przed niepożądanymi skokami napięcia, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń i awarii.

Dodatkowo, wyniki symulacji mogą być użyteczne przy projektowaniu bardziej efektywnych i precyzyjnych systemów ograniczania przepięć, szczególnie w obszarach, gdzie występują znaczące fluktuacje napięcia.



Rys.9. Rejestrowane wartości maksymalne przepięć w funkcji zmiany czasu trwania łuku.

Podsumowanie

Studium przypadku awarii dławików kompensujących w nowo wybudowanym układzie zasilania zakładu produkcyjnego podkreśla konieczność uwzględnienia wpływu odległości zainstalowanych ograniczników od chronionego urządzenia na kształt przepięć. Analiza symulacji komputerowych pozwoliła na uzyskanie wniosków dotyczących przyczyn awarii oraz dostarczyła informacji niezbędnych do poprawy projektowania systemów zabezpieczeń.

W przedstawionym artykule przeprowadzono analizę skuteczności zastosowania dodatkowych ograniczników przepięć na wejściu dławika w celu zapewnienia bezpieczeństwa działania systemów elektroenergetycznych. Wyniki symulacji wykazały, że ograniczniki przepięć działają efektywnie, redukując napięcie obniżone dla fazy "A" do akceptowalnego poziomu zgodnie z wymaganiami izolacyjnymi.

Następnie porównano dwa warianty symulacji dla szczytów prądu oraz napięć w funkcji zmniejszania się czasu trwania łuku zamykanych styków wyłącznika SN. Wyniki wskazały na istotny wpływ tego parametru na maksymalną wartość przepięcia.

Wnioski z analizy danych zawartych w Tabeli 1 oraz rysunku 9 potwierdzają, że zastosowanie dodatkowych ograniczników przepięć na wejściu dławika jest kluczowe dla ochrony urządzeń elektrycznych przed niepożądanymi skokami napięcia. Efektywne zastosowanie ograniczników przepięć ma istotne znaczenie dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa działania systemów elektroenergetycznych, zwłaszcza w warunkach zmiennych i ekstremalnych.

Podkreśla się również, że wyniki symulacji mogą stanowić cenną podstawę dla projektowania bardziej precyzyjnych i efektywnych rozwiązań w dziedzinie ograniczania przepięć. Optymalne rozmieszczenie ograniczników przepięć oraz odpowiednie dobranie parametrów ich działania są kluczowe dla zwiększenia poziomu ochrony urządzeń i zapewnienia stabilności działania sieci elektrycznych.

Istotą jest również konieczność regularnego monitorowania i konserwacji ograniczników przepięć, aby utrzymać ich skuteczność i niezawodność w długim okresie eksploatacji. Analiza danych z symulacji jest nieodzownym

elementem w procesie projektowania bezpiecznych rozwiązań dla systemów elektroenergetycznych.

Wnioski z artykułu wskazują, że właściwe wdrożenie i wykorzystanie ograniczników przepięć w sieci elektroenergetycznej przyczynia się do zapewnienia stabilności i bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej, co ma kluczowe znaczenie dla funkcjonowania współczesnych systemów elektroenergetycznych.

Należy również podkreślić, że w kontekście aspektów ekonomicznych wielu producentów podejmuje decyzję o rezygnacji z izolacji wzmocnionych urządzeń elektroenergetycznych, chyba że klient wyrazi takie życzenie. Wytrzymałość elektryczna takiej izolacji wobec normalnych udarów nie przekracza oczekiwanych wartości, często spełniając jedynie minimalne wymagania podczas standardowych testów. Skutkiem takiego podejścia jest częste przypisywanie odpowiedzialności za awarie projektantom sieci, ponieważ wystarczy, że występujące przepięcie – jego maksymalna wartość – niewiele przekracza określaną w normach [4] wartość wytrzymałościową, co skutkuje uszkodzeniem izolacji. Należy również mieć świadomość rażących błędów w projektach, które, podobnie jak w tym przypadku, mogą prowadzić do awarii oraz znacznych konsekwencji finansowych. Zastosowanie zabezpieczeń w znacznych odległościach od chronionego urządzenia mogło prowadzić do niekorzystnych zjawisk, takich jak dodatkowy wzrost narażenia, wynikający z oscylacji na szczycie przepięcia [2], co mogło dodatkowo wpłynąć na zwiększenie maksymalnej wartości przepięcia.

Omawiana sytuacja awarii miała miejsce po zainstalowaniu dławika oraz jego pracy przez około jeden miesiąc, a także po zmianie dławika na nowy w podobnym okresie czasu. Warto zauważyć, że awarie występowały podczas załączania dławika od razu po jego zainstalowaniu lub po zakończeniu przerwy technicznej. Dławiki były eksploatowane a w trakcie pracy, często były wyłączane i włączane. To wszystko potwierdza, że wartości przepięć, które się pojawiały, były bliskie granicznej wytrzymałości chronionej izolacji, co w efekcie częstych narażeń spowodowało proces osłabiania izolacji i w konsekwencji jej całkowite uszkodzenie.

Przeprowadzone dodatkowe analizy poprzez stosowanie różnego typu ograniczników oraz różnych scenariuszy obciążenia nie mają istotnego wpływu na przedstawione wyniki.

Wnioski z tego studium przypadku mogą mieć zastosowanie praktyczne w projektowaniu i utrzymaniu bezpieczeństwa układów zasilania.

Zastosowanie zaawansowanych technologii w dziedzinie elektroenergetyki odgrywa kluczową rolę w zapewnianiu stabilności i niezawodności działania współczesnych systemów zasilania. Rozwój przemysłu wymaga coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań, które muszą sprostać rosnącym wymaganiom efektywności i bezpieczeństwa. W tym kontekście studium przypadku przedstawione w artykule jest cennym źródłem informacji, które może wspomóc projektantów i inżynierów w doskonaleniu swoich rozwiązań.

Wieloaspektowa analiza wyników symulacji komputerowych pozwoliła na wskazanie krytycznych punktów w układzie zasilania, które wymagają szczególnej

uwagi w kontekście ochrony przed przepięciami. Odpowiednie zabezpieczenia oraz optymalne rozmieszczenie ograniczników przepięć mogą znacznie zwiększyć poziom bezpieczeństwa i wydajności systemu.

Niezawodność działania systemów elektroenergetycznych jest szczególnie ważna w przypadku zakładów produkcyjnych, gdzie awarie mogą prowadzić do poważnych strat finansowych oraz przerw w produkcji. Dlatego też, analizy i badania w tym obszarze są niezwykle istotne dla poprawy jakości i niezawodności dostaw energii elektrycznej.

Współpraca między naukowcami, inżynierami i producentami w dziedzinie elektrotechniki przyczynia się do szybszego rozwoju nowoczesnych technologii. Artykuł stanowi doskonały przykład tego, jak nauka i praktyka mogą wzajemnie się uzupełniać, prowadząc do coraz lepszych rozwiązań.

Autorzy: dr inż. Marcin Mackiewicz, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: marcin.mackiewicz@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Vishwakarma D.N., Badri Ram, "Power System Protection and Switchgear," McGraw-Hill Education – Europe, 2011.
- [2] Mackiewicz M.M., "Wpływ niestandardowych udarów napięciowych piorunowych na wytrzymałość izolacji linii i stacji wysokich napięć," Przegląd Elektrotechniczny, 1/2006, 155-157.
- [3] Dziura J., "Nowoczesne warianty dławików kompensacyjnych w sieciach średnich napięć," Maszyny Elektryczne – Zeszyty problemowe, Nr 1/2019 (121), 49.
- [4] PN – EN 60071 – 1: 2008, "Koordynacja izolacji Część 1: Definicje, zasady i reguły."
- [5] Mackiewicz M.M., "Wpływ narostu czoła udaru na wytrzymałość elektryczną rzeczywistych układów linii i stacji wysokiego napięcia," Przegląd Elektrotechniczny, 10/2008, 272-275.
- [6] Roger C., Dugan, Santoso S., McGranaghan M.F., Beaty W.H., "Electrical Power Systems Quality," McGraw-Hill Professional Engineering, 2002.
- [7] Wen C., Yang Z., Lu Y., Huang Y., Lin H., Zhang Z., Chen T., Liu Y., "Study on Very Fast Transient Overvoltage Characteristics of Gas-Insulated Switchgear Substation Based on Hybrid Reactive Power Compensation," Hindawi Mathematical Problems in Engineering, Volume 2022, Article ID 2914983, 10.
- [8] Filipovic B., Franc B., Uglesic I., Keitoue S., Murat I., Ivankovic I., "Monitoring of Transient Overvoltages on the Power Transformers and Shunt Reactors – Field Experience in the Croatian Power Transmission System," Centre of Excellence for Transformers 4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management," Pula, Croatia, May 10-12, 2017.
- [9] HELUKABEL.pl, "Parametry elektryczne kabli SN."
- [10] Karta katalogowa Elektrometal Energetyka SA, "Wyłączniki SNe2 BRAVO."
- [11] Christina A.J., Rahman Q.M., Shamsul Md., Wen F., Ang S.P., Hasan S., "Partial Discharge Modelling with Increasing Applied Voltages across Different Void Sizes," International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 28-30 September Dhaka, Bangladesh, 2017.
- [12] Kulas S., Supronowicz H., "Analiza łuku elektrycznego awaryjnego i sposoby ograniczania jego skutków," Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, R.25 nr 6, 43-49, 2014.