

Wytrzymałość elektryczna aparatów łączeniowych prądu stałego

Artur ROJEK¹

Streszczenie

Artykuł jest poświęcony badaniom wytrzymałości elektrycznej aparatów łączeniowych prądu stałego, takich jak wyłączniki szybkie, rozłączniki i styczniki. Przedstawiono wymagania normatywne dotyczące tych badań oraz przykładowe wyniki, które otrzymano podczas badań wykonywanych w laboratorium zwarciovym Zakładu Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa. Najczęściej badane są aparaty łączeniowe o napięciach znamionowych 900, 1800 i 3600 V DC oraz prądach znamionowych nawet do 6,5 kA. Przedstawiono zjawiska i zagrożenia mogące występować podczas badań wytrzymałości elektrycznej.

Słowa kluczowe: wytrzymałość elektryczna, wyłącznik szybki, rozłącznik, stycznik, wyłączanie prądu stałego

1. Wstęp

Badaniom aparatów łączeniowych poświęcono wiele artykułów. Dotyczą one głównie wyłączników szybkich prądu stałego. Autorzy artykułów [1, 19] skupili się na wyłączaniu prądów zwarciovych. Również publikacje [9–12] opisują tę problematykę. Część artykułów jest poświęcona wybranym parametrom wyłączników szybkich, np. łączalności prądów krytycznych [12, 14, 15], szybkości działania wyłączników, w tym czasów poszczególnych faz wyłączania prądu stałego [17, 18, 20] oraz poprawy wybranych parametrów wyłączników magnetowydmuchowych [16, 21].

Badania wytrzymałości elektrycznej aparatów łączeniowych polegają na załączaniu i wyłączaniu prądu, najczęściej znamionowego. Analizując normy dotyczące aparatów łączeniowych najbardziej czasochłonne jest badanie wytrzymałości mechanicznej, lecz badanie to można skutecznie zautomatyzować, więc zaangażowanie personelu może być znacznie ograniczone. Pod względem czasochłonności badań, kolejnymi są badania wytrzymałości elektrycznej. Ze względu na sposób prowadzenia takich badań i występujące podczas nich zagrożenia, tych badań nie można w pełni zautomatyzować i nad ich przebiegiem niezbędny jest ciągły nadzór personelu.

2. Aparaty łączeniowe prądu stałego

Aparaty łączeniowe prądu stałego można podzielić pod względem funkcji oraz miejsca zastosowania.

Pod względem funkcji aparaty łączeniowe można podzielić na:

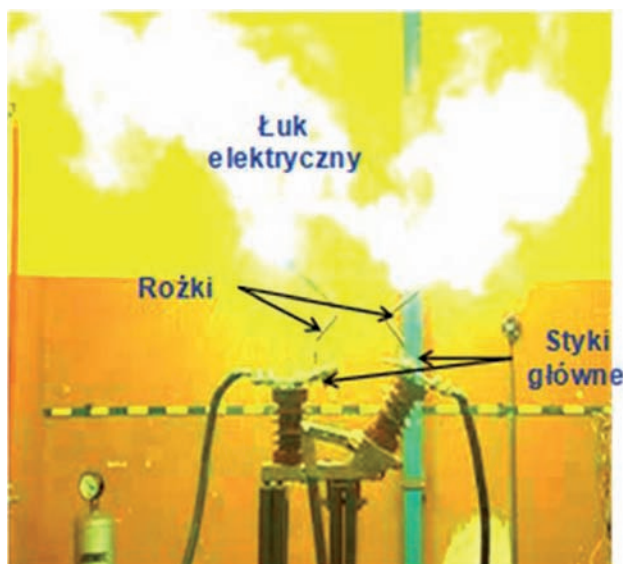
1. Wyłączniki – aparaty przeznaczone do załączania, przewodzenia i wyłączania prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych.
2. Rozłączniki – aparaty przeznaczone do załączania, przewodzenia oraz wyłączania prądów roboczych. Są one także zdolne do przewodzenia prądów przeciążeniowych i zwarciovych. Odłączają część układu tworząc widoczną przerwę izolacyjną.
3. Odłączniki – aparaty przeznaczone do załączania, przewodzenia i wyłączania napięcia w tej części układu, które tworzą widoczną przerwę izolacyjną. Są one także zdolne do przewodzenia prądów roboczych, przeciążeniowych oraz zwarciovych. Operacje łączeniowe możliwe są tylko w stanie bezprądowym.
4. Uziemniki – aparaty przeznaczone do uziemienia części obwodu, zdolne do przewodzenia prądów zwarciovych. Operacje łączeniowe możliwe są tylko w stanie bezprądowym.
5. Styczniki – aparaty przeznaczone do załączania, przewodzenia oraz wyłączania prądów roboczych. Są one także zdolne do przewodzenia prądów przeciążeniowych i zwarciovych. W odróżnieniu od rozłączników, styczniki nie tworzą widocznej przerwy izolacyjnej.

Ze względu na miejsce zastosowania, aparaty łączeniowe dzielą się na taborowe oraz do urządzeń stacjonarnych jakimi są podstacje trakcyjne, kabiny sekcyjne i sieć trakcyjna.

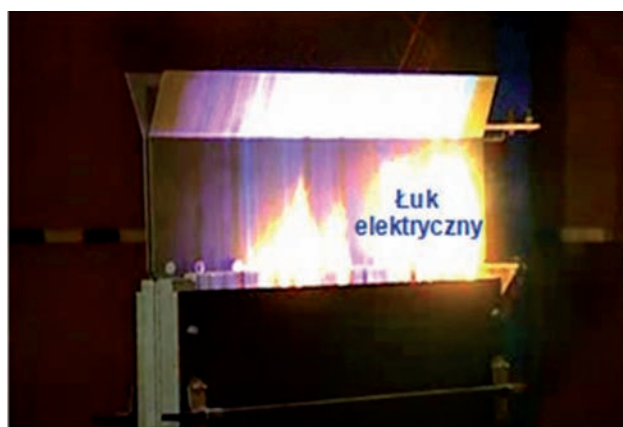
¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: rojeka@ikolej.pl.

W przeciwieństwie do prądu przemiennego, prąd stały nie ma naturalnego, okresowego przejścia przez zero. W procesie wyłączenia prądu przemiennego przejście jego wartości przez zero powoduje jego naturalne wyłączenie przy osiągnięciu odpowiedniego wzrostu wytrzymałości powrotnej pomiędzy stykami wyłącznika lub rozłącznika.

W przypadku prądu stałego, aby go wyłączyć, należy sztucznie sprowadzić jego wartość do zera i zapewnić przerwę zestykową zapobiegającą ponownemu przepływowi prądu. Są dwie metody wyłączenia prądu stałego. Jedną z nich jest wyłączenie wymuszone, polegające na sprowadzeniu prądu do zera przez wzrost napięcia łuku. Każdemu wyłączeniu wymuszonemu prądu stałego towarzyszy łuk elektryczny (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Łuk elektryczny powstający w czasie wyłączenia prądu stałego przez rozłącznik [13]



Rys. 2. Komora łukowa i łuk elektryczny powstający w czasie wyłączenia prądu stałego przez wyłącznik szybki [13]

Ogólnie można stwierdzić, że wyłączenie wymuszone prądu stałego polega na zgaszeniu łuku elektrycznego zapalającego się między stykami aparatu łączenio-

wego. Szybki wzrost napięcia łuku elektrycznego powyżej napięcia źródła zasilania wpływa na wartość prądu ograniczając ją do zera. Ze względu na to, że odłączniki i uziemniki nie są wyposażone w elementy umożliwiające gaszenie łuku, nie mogą one być wykorzystywane do wyłączenia prądu, a jedynie do odłączania części układu elektrycznego od napięcia, i tylko wówczas, gdy nie występuje przepływ prądu do lub z tej części lub uziemienia obwodu, w którym napięcie zostało już wyłączone.

3. Wymagania normatywne

Badania wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się dla aparatów łączeniowych, które są przeznaczone do załączania i wyłączenia prądu i dlatego badania te wykonuje się dla wyłączników, rozłączników i styczników. Polegają one na załączaniu i wyłączeniu prądu znamionowego (cykl CO) przez określoną normami liczbę cykli z określonym odstępem czasowym między cyklami, często w seriach.

Wymagania dotyczące wytrzymałości elektrycznej aparatów elektrycznych prądu stałego oraz sposobu przeprowadzania badań i oceny ich wyników zawarte są w dwóch seriach norm. Dla aparatów taborowych stosuje się normy serii PN-EN 60077, w tym:

- wymagania ogólne dla wszystkich rodzajów aparatów – PN-EN 60077-1 [6],
- wymagania dla rozłączników i styczników – PN-EN 60077-2 [7],
- wymagania dla wyłączników szybkich – PN-EN 60077-3 [8].

Do aparatów do urządzeń stacjonarnych stosuje się normy serii PN-EN 50123, w tym:

- wymagania ogólne dla wszystkich rodzajów aparatów – PN-EN 50123-1 [2],
- wymagania dla wyłączników szybkich – PN-EN 50123-2 [3],
- wymagania dla rozłączników w wykonaniu wewnętrznym – PN-EN 50123-3 [4],
- wymagania dla rozłączników w wykonaniu napowietrznym – PN-EN 50123-4 [5].

W normach serii PN-EN 60077, dla pojazdowych aparatów łączeniowych zawarty jest podział styczników, rozłączników i wyłączników pod względem częstości ich pracy. W przypadku styczników i rozłączników, w normie PN-EN 60077-2 [7] podano podział na urządzenia o częstości pracy:

- C1: niska częstotliwość robocza (np. element będący częścią wyposażenia zabezpieczającego i/lub izolującego, który działa tylko w przypadku wykrycia awarii);
- C2: średnia częstotliwość robocza (np. element, który jest częścią sprzętu i działa w dowolnym

z następujących przypadków: przy każdym rozpoczęciu pracy, każdym uruchomieniu, każdym zatrzymaniu i każdej sekcji neutralnej);

- C3: duża częstotliwość pracy (np. element, który jest częścią wyposażenia, i działa podczas każdej sekwencji trakcyjnej lub sekwencji hamowania, lub element, taki jak stycznik sprzężarki).

Z częstością pracy styczników oraz rozłączników związana jest także liczba serii, w jakich są wykonywane badania wytrzymałości elektrycznej. Dla częstości C1 badania są wykonywane w jednej serii, dla C2 w pięciu, a dla C3 w dziesięciu seriach.

Podobny podział określa norma PN-EN 60077-3 [8] dla pojazdowych wyłączników szybkich. Częstość ich pracy jest określona jako:

- C1: niska częstotliwość robocza (np. wyłącznik jest tylko otwierany, gdy nastąpi zwarcie);
- C2: średnia częstotliwość robocza (np. dodatkowo do C1 wyłącznik jest otwierany na polecenie wygenerowane przez przekroczenie określonej wartości granicznej, jak przepięcie lub przeciążenie);
- C3: duża częstotliwość pracy (np. dodatkowo do C2 wyłącznik otwierany jest z innych powodów, takich jak przejazd przez przerwy izolacyjne, punktu sekcjonowania sieci itp.).

Dla częstości C1 badania wytrzymałości elektrycznej wyłączników wykonywane są w jednej serii, dla C2 w dwóch, a dla C3 w czterech seriach. Całkowita liczba cykli CO wynosi:

- C1: 100 cykli;
- C2: 400 cykli;
- C3: 800 cykli.

W przeważającej liczbie przypadków, badania taborowych wyłączników szybkich przeprowadza się przez wykonanie 800 cykli. Pomiędzy seriami normy PN-EN 60077-2 [7] i PN-EN 60077-3 [8] dopuszczają wykonanie przeglądu badanego aparatu. Dodatkowo norma PN-EN 60077-2 [7] wprowadza podział styczników i rozłączników na kategorie związane z ich wykonaniem i zastosowaniem. Są to kategorie:

- A1: łączniki do obwodów pomocniczych lub obwodów niskonapięciowych (np. przekaźniki, styczniki pomocnicze i ich akcesoria itp.) niezależnie od charakteru ich sterowania, z wyjątkiem elementów ze sterowaniem ręcznym;
- A2: łączniki do obwodów elektroenergetycznych (np. styczniki mocy), niezależnie od charakteru ich sterowania, z wyjątkiem elementów ze sterowaniem ręcznym;
- A3: ręcznie sterowane urządzenia przełączające (np. przełączniki, przyciski itp. do urządzeń kontrolnych);
- A4: rozdzielnice mocy, które nie działają pod obciążeniem (np. odłącznik, przełącznik systemowy itp.);
- B: inne elementy nieobjęte powyższymi.

Należy dodać, że zgodnie z normą PN-EN 60077-2 [7] badania wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się tylko dla kategorii A1, A2 i A3.

Biorąc pod uwagę kombinacje częstości pracy i kategorii styczników i rozłączników, całkowita liczba cykli podczas badań wytrzymałości elektrycznej tych aparatów wynosi od 200 dla A2C1 do 1 000 000 dla A1C3. Jednak znaczną większość badań przeprowadza się dla styczników A2C3, czyli wykonując 8 000 cykli.

Jak wspomniano wcześniej, do aparatów łączeniowych stosowanych w urządzeniach stacjonarnych stosuje się wymagania norm serii PN-EN 50123. Norma PN-EN 50123-2 [3] wprowadza podział wyłączników szybkich na wyłączniki:

- sprzęgłowe (I), nazywane także sekcijnymi, stosowane w kabinach sekcyjnych lub w podstacjach trakcyjnych do łączenia dwóch sekcji rozdzielnic DC;
- liniowe (L), nazywane także zasilaczowymi, montowane w celkach zasilaczy rozdzielnic DC;
- prostownika (R) służące do połączenia prostowników z rozdzielnicami DC, obecnie nie są stosowane.

Badania wytrzymałości elektrycznej wyłączników szybkich przeznaczonych do urządzeń stacjonarnych wykonuje się w jednej serii. Liczba cykli CO jest następująca:

- wyłącznik typu L – 200 cykli;
- wyłącznik typu I i R – 100 cykli.

W przypadku odłączników, rozłączników i uziemników zarówno w wykonaniu wewnętrznym, jak i napowietrznym, normy PN-EN 50123-3 [4] i PN-EN 50123-4 [5] wprowadzają podział tych aparatów na kategorie:

- I: odłącznik i uziemnik stosowane w miejscach, w których nabywca podjął wszelkie środki ostrożności w celu uniemożliwienia przełączenia na prąd zwarcioowy;
- II: rozłącznik wymagany tylko do wyłączania prądu obciążenia;
- III: rozłącznik izolacyjny połączony szeregowo z polem zasilającym, wymagany tylko do załączania i wyłączania prądu znamionowego;
- IV: rozłącznik jak w III, ale wymagany do załączania i wyłączania prądu rozruchowego pociągu;
- V: odłącznik i uziemnik stosowane w miejscach, w których istnieje możliwość niezamierzonego załączenia prądu zwarcioowego;
- VI: rozłącznik jak w IV, ale wymagany do załączania prądu zwarcioowego.

Dla kategorii I nie wykonuje się badań wytrzymałości elektrycznej, natomiast dla pozostałych kategorii wykonuje się te badania odpowiednio załączając lub/i wyłączając podany w normach prąd, który może

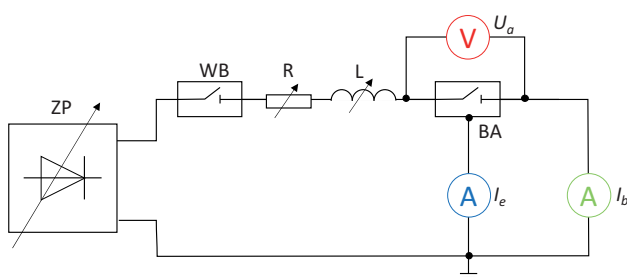
mieć wartość znamionową, trzykrotność wartości znamionowej lub ustaloną wartość prądu zwarciego. W Polsce, w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych i w układach sieci trakcyjnych stosowane są odłączniki (kategoria I) często z uziemnikami oraz rozłączniki kategorii III, również w wykonaniu z uziemnikami. Z tych względów najwięcej badań wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się dla rozłączników kategorii III, załączając i wyłączając prąd znamionowy aparatu.

Niezależnie od wykonania rozłącznika, badania wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się wykonując 50 cykli CO, przy czym można je podzielić na serie, w których jest minimum 10 cykli CO.

Niezależnie od typu aparatu łączeniowego, jego częstości pracy i kategorii, po każdej serii cykli CO oprócz przeglądu, należy sprawdzić wytrzymałość dielektryczną izolacji i przerwy międzystykowej oraz rezystancję toru głównego. W przypadku zbyt dużego, określonego normami, wzrostu tej rezystancji należy przeprowadzić próbę nagrzewania.

4. Badania

W laboratorium zwarciovym Instytutu Kolejnictwa (IK) najczęściej badane są aparaty łączeniowe o napięciach znamionowych 900, 1800 i 3600 V DC oraz prądach znamionowych nawet do 6,5 kA. Badania wytrzymałości elektrycznej wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 3, na którym kolory przyrządów pomiarowych (pomiar napięcia i prądu) odpowiadają kolorom przykładowych przebiegów napięć i prądów przedstawionych w dalszej części artykułu.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do badań wytrzymałości elektrycznej (opis w tekście) [opracowanie własne]

Układ pomiarowy do badań wytrzymałości elektrycznej aparatów łączeniowych prądu stałego jest zasilany z regulowanego zespołu prostownikowego (ZP), którego napięcie wyjściowe jest ustawiane zgodnie z potrzebami. Układ jest zabezpieczony wyłącznikiem bezpieczeństwa (WB). Żądaną wartość prądu załączanego i wyłączanego przez badany aparat łączeniowy (BA) uzyskuje się przez ustawienie re-

gulowanego rezystora (R). Badania wykonuje się przy określonej wspomnianymi wcześniej normami stałej czasowej obwodu, której uzyskanie jest zależne od wartości regulowanego dławika (L). Układ ten został opracowany z myślą o aparatach o wyłączaniu wymuszonym prądu. Obecnie coraz więcej aparatów łączeniowych wykorzystuje inne metody wyłączania prądu stałego. Z myślą o tych aparatach należałoby wprowadzić zmiany w normach wymienionych w rozdziale 2 lub opracować odpowiednie normy.

Podczas badań, niezależnie od liczby cykli CO, w każdym z nich są rejestrowane przebiegi oraz wartości napięcia i prądów przedstawionych na rysunku 3. W raporcie z badań dla wybranych cykli CO, których liczba jest ustalana ze zleceniodawcą, określone są następujące dane:

- t_d – czas pomiędzy kolejnymi cyklami CO;
- U_d – napięcie zasilania obwodu pomiarowego;
- I_b – załączany i wyłączany prąd;
- U_{amax} – maksymalne napięcie łuku;
- I_e – prąd doziemny;
- t_a – czas łukowy;
- prawidłowość załączenia i wyłączenia prądu.

Ze względu na liczbę cykli CO, którą należy wykonać podczas badań wytrzymałości elektrycznej aparatów łączeniowych, badania te są długotrwałe ponieważ w ciągu godziny można przeprowadzić od 15 do 30 cykli CO, w zależności od wartości łączonego prądu. Biorąc to pod uwagę, czas potrzebny na wykonanie 8 000 cykli CO przy prądzie powyżej 2000 A wynosi ponad 530 godzin, a do tego należy jeszcze dodać czas potrzebny na przygotowanie, sprawdzenie i uruchomienie układu pomiarowego oraz czas na przeglądy i pomiary, o których mowa w punkcie 2 artykułu.

Choć opisywane badania mogą postronnej osobie wydawać się mało skomplikowane, to jednak wymagają one dużego doświadczenia i zaangażowania personelu badawczego. Pierwszym wyzwaniem jest wspomniany czas potrzebny do realizacji badań, podczas których nie można zostawić układu pomiarowego bez nadzoru co najmniej dwóch osób. Jest to spowodowane tym, że przy dowolnym cyklu CO może dojść do niewłaściwego załączenia prądu, braku jego wyłączenia, przebicia przestrzeni między stykowej lub do uziemienia. Może zdarzyć się awaria mechaniczna badanego aparatu. Ponadto, jak wspomniano wcześniej, wyłączaniu prądu stałego towarzyszy łuk elektryczny o temperaturze osiągającej kilkanaście tysięcy stopni C oraz przepięcie łączeniowe, które stanowi zagrożenie dla wytrzymałości dielektrycznej elementów układu pomiarowego (w szczególności prostownika) oraz badanego aparatu łączeniowego. Możliwe jest częściowe zautomatyzowanie badań, lecz wymaga to wyposażenia laboratorium i komory probierczej w układy zabezpieczeń elektrycznych, przeciwpożarowych itp.

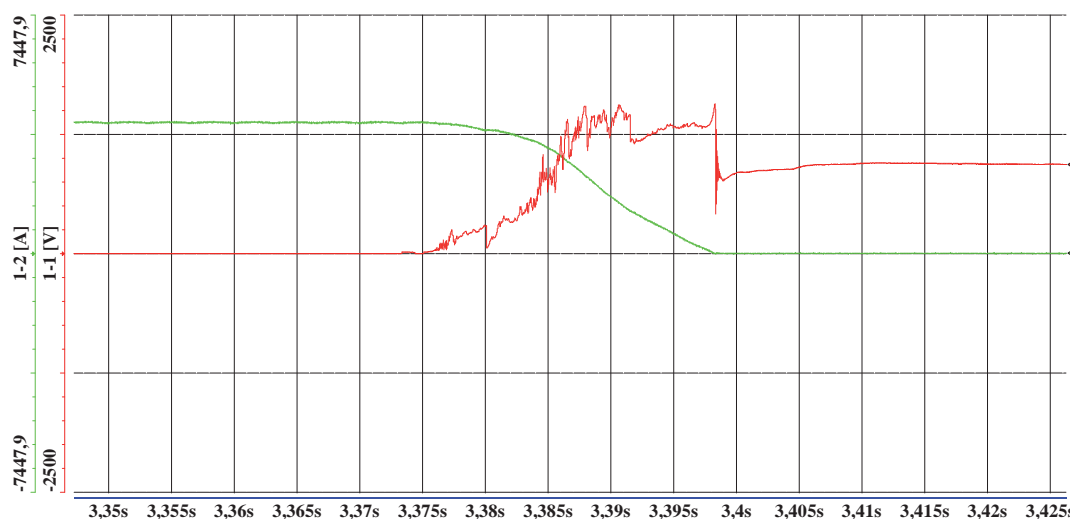
4.1. Badania wyłączników szybkich

W laboratorium zwarciovym IK dotychczas przeprowadzono badania wytrzymałości elektrycznej wyłączników szybkich przeznaczonych dla taboru i urządzeń stacjonarnych o prądach znamionowych od 1000 do 6500 A. Poza liczbą serii i cykli CO badania tych dwóch odmian wyłączników szybkich nie różnią się w znaczący sposób.

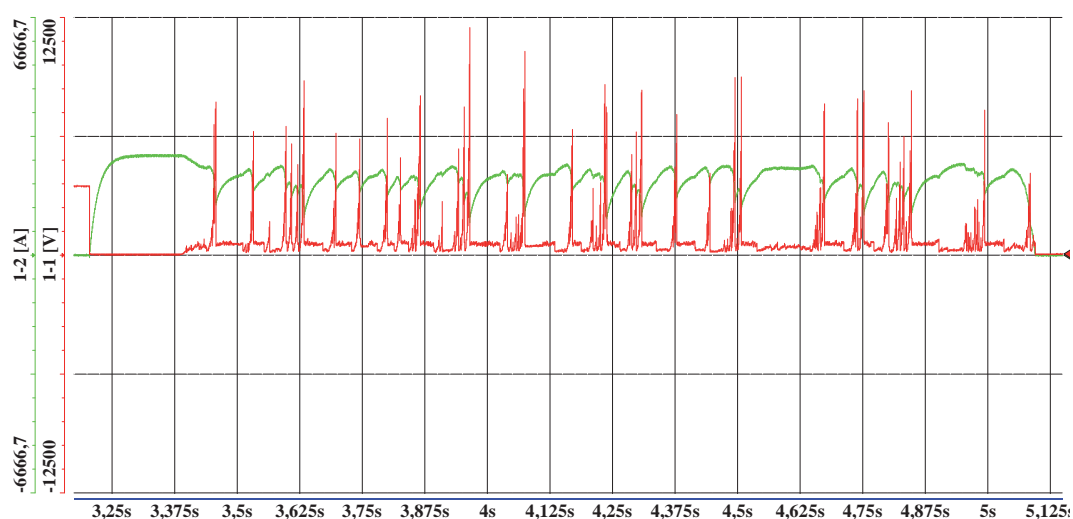
Podczas badań wytrzymałości elektrycznej wyłączników szybkich dotychczas nie zarejestrowano nieprawidłowego załączenia prądu. Jedynie usterki mechaniczne napędu wyłącznika powodowały, że nie możliwe było zamknięcie wyłącznika.

Inaczej jest podczas wyłączania prądu. Prawidłowy przebieg wyłączanego prądu przedstawiono na rysunku 4, na którym można zaobserwować krótki czas łukowy ($t_a = 25,1$ ms) oraz niewielkie przepięcie łączeniowe, gdzie $U_{amax} \approx 1,7U_d$.

Jednak nie zawsze wyłączanie przebiega prawidłowo. Na rysunku 5 przedstawiono przebieg napięcia na wyłączniku i prądu w obwodzie, gdy nastąpiło przebicie przerwy międzystykowej po otwarciu wyłącznika. W tym przypadku wyłączenie prądu nastąpiło przez zadziałanie wyłącznika bezpieczeństwa. Na rysunku 5 są widoczne przepięcia łączeniowe, w których napięcie łuku powodowało kilkukrotne przebicie przerwy międzystykowej wyłącznika i ponowne narastanie prądu w obwodzie.



Rys. 4. Przebiegi wyłączanego prądu i napięcia łuku przy prawidłowym wyłączeniu przez wyłącznik szybki²



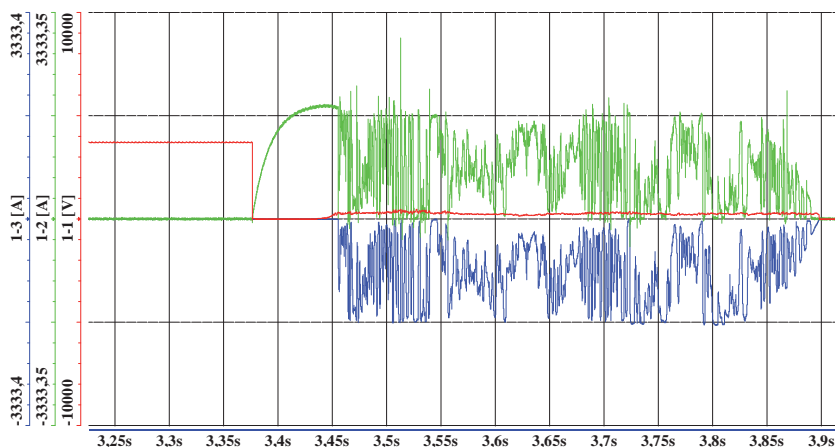
Rys. 5. Przebiegi wyłączanego prądu i napięcia łuku przy kilkukrotnym przebicciu przerwy międzystykowej wyłącznika szybkiego z powodu złego stanu technicznego komory łukowej

² W artykule nie podano źródeł rysunków przedstawiających przebiegi napięć i prądów zarejestrowanych podczas badań aparatów łączeniowych, aby uniknąć skojarzenia wyniku badania z typem aparatu lub jego producentem.

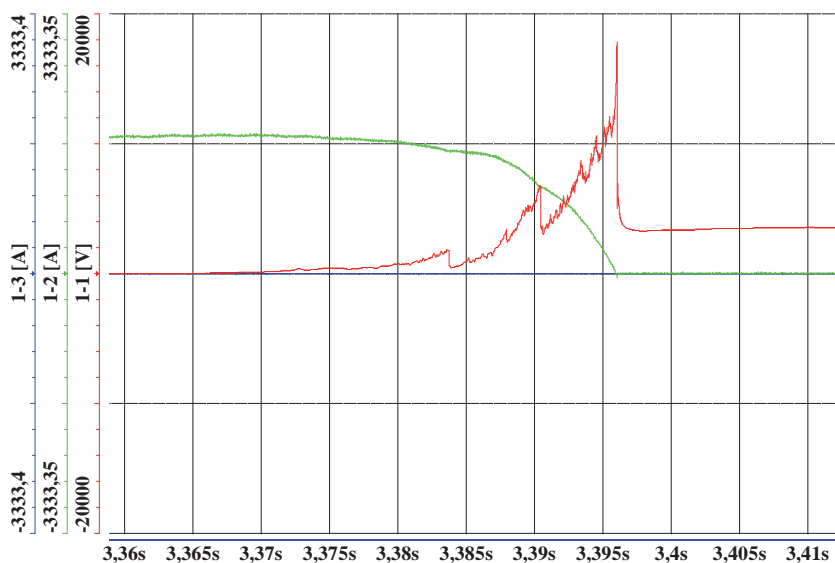
Innym niebezpiecznym zjawiskiem jest przebiecie do uziemienia. W takim przypadku łuk elektryczny zapala się między stykiem głównym a metalową częścią wyłącznika, elementem np. napędu. Przebiegi napięcia na wyłączniku i prądów w obwodzie, zarejestrowanych w przypadku przebiecia do uziemienia, przedstawiono na rysunku 6. Również w tym przypadku wyłączenie prądu nastąpiło przez zadziałanie wyłącznika bezpieczeństwa.

W wielu przypadkach przebiecie przestrzeni między-stykowej lub do uziemienia pojawia się w następstwie wysokich wartości napięcia łuku, które osłabia wytrzymałość dielektryczną izolacji wyłącznika. Rysunek 7 przedstawia przykładowy przebieg napięcia łuku, którego wartość maksymalna wynosiła prawie 18 kV, co stanowi prawie pięciokrotność wartości napięcia zasilającego obwód. Należy tu nadmienić, że maksymalna wartość napięcia łuku powinna być uzgodniona pomiędzy producentem a użytkownikiem wyłącznika. Często się przyjmuje, że $U_{amax} \leq 4U_d$, a w przypadku polskich podstacji $U_{amax} \leq 2U_d$.

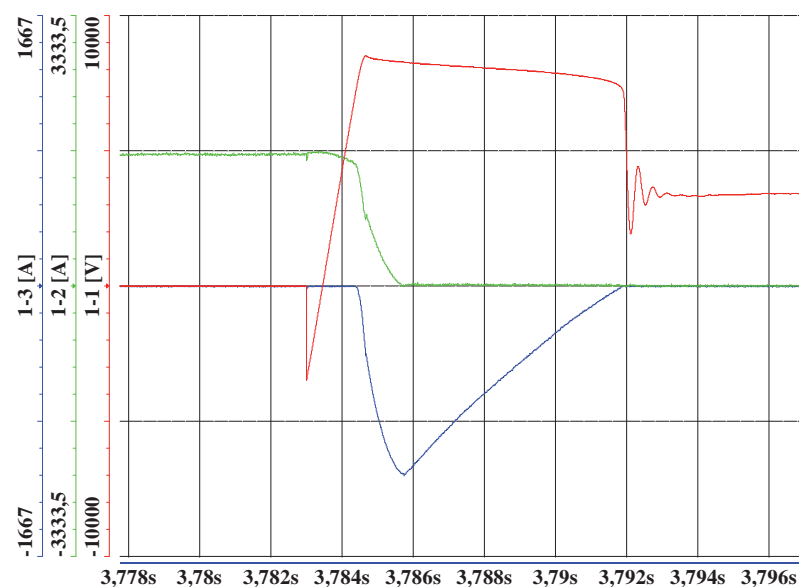
Oprócz klasycznych wyłączników magnetowydumowych, których działanie jest oparte na wymuszonym wyłączeniu prądu, w laboratorium zwarciovym Instytutu, prowadzono badania wyłącznika szybkiego (hybrydowego) o wyłączeniu przeciwprądem. Przykładowy przebieg napięć i prądów w obwodzie podczas wyłączenia prądu takim wyłącznikiem przedstawiono na rysunku 8. Charakterystyczną cechą tego typu wyłączników jest krótki czas wyłączenia (kilka milisekund), chwilowy spadek napięcia poniżej zera na wyłączniku wynikający z zadziałania układu przeciwprądu oraz widoczny przepływ prądu do uziemienia połączonego z ujemnym zaciskiem źródła zasilania, spowodowany zadziałaniem ogranicznika przepięć (niepokazany na rysunku 3), będącym wyposażeniem wyłącznika. Przepływ prądu do uziemienia, w tym przypadku, jest zjawiskiem prawidłowym. Jeżeli w układzie nie byłoby ogranicznika przepięć, przepięcie łączeniowe mogłoby osiągnąć bardzo duże wartości, co wynika z szybkości zmian prądu (di/dt) w obwodzie.



Rys. 6. Przebiegi prądów w obwodzie i napięcia łuku przy przebieciu do uziemienia



Rys. 7. Przebiegi wyłączanego prądu i napięcia łuku osiągającego zbyt wysoką wartość



Rys. 8. Wyłączenie prądu znamionowego przez wyłącznik wykorzystujący zasadę wyłączenia przeciwnym prądem (prąd ogranicznika przepięć – kolor niebieski ma celowo odwróconą polaryzację)

4.2. Badania styczników

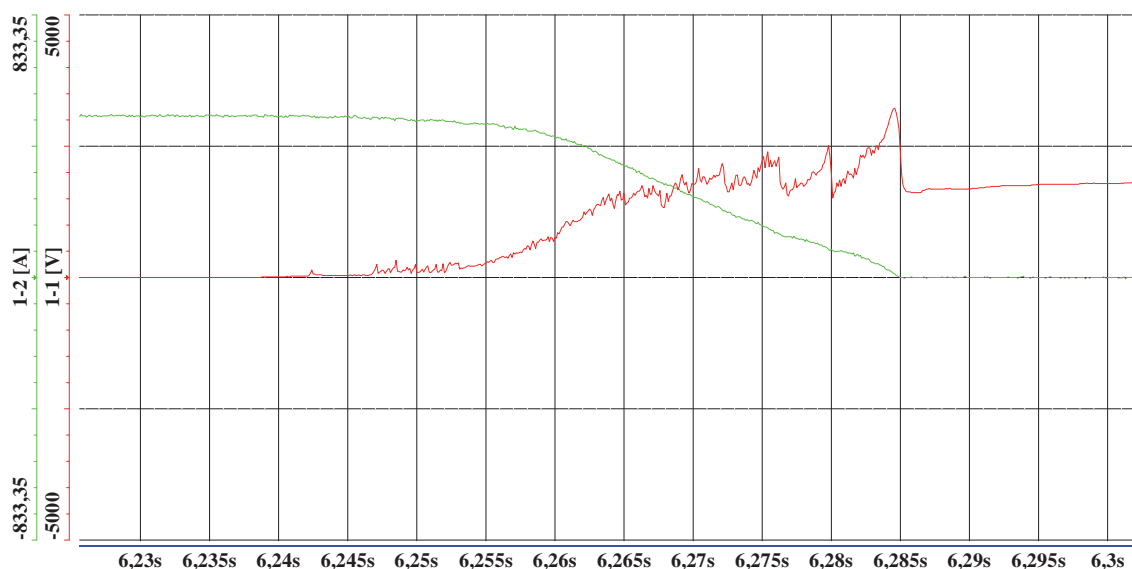
Dotychczas w laboratorium zwojowym Instytutu przeprowadzono badania wytrzymałości elektrycznej styczników głównie na podstawie norm PN-EN 60077-2 [7]. Były to aparaty o napięciu znamionowym 900, 1800 lub 3600 V i prądach znamionowych od 250 do 1700 A.

Ze względu na to, że styczniki, podobnie jak wyłączniki szybkie mają komory gaszeniowe, podczas wyłączania prądu mogą zachodzić podobne niekorzystne zjawiska, w tym nadmierne wartości napięcia

łuku, przebiecia przestani międzystykowej lub przebiecia do uziemienia.

Ponieważ podczas badań wytrzymałości elektrycznej styczników wykonuje się bardzo dużą liczbę cykli CO (najczęściej 8000), częstą przyczyną nieosiągnięcia pozytywnych wyników badań są usterki mechaniczne napędu lub przegrzanie komory łukowej.

Podstawową różnicą w wyłączaniu prądu znamionowego przez styczniki, w porównaniu do wyłączania przez wyłączniki szybkie, jest szybkość wyłączania i czas łukowy. Przeciętnie, czas łukowy styczników wynosi kilkadziesiąt milisekund (rys. 9).



Rys. 9. Typowy przebieg napięcia i prądu w czasie wyłączenia prądu przez stycznik

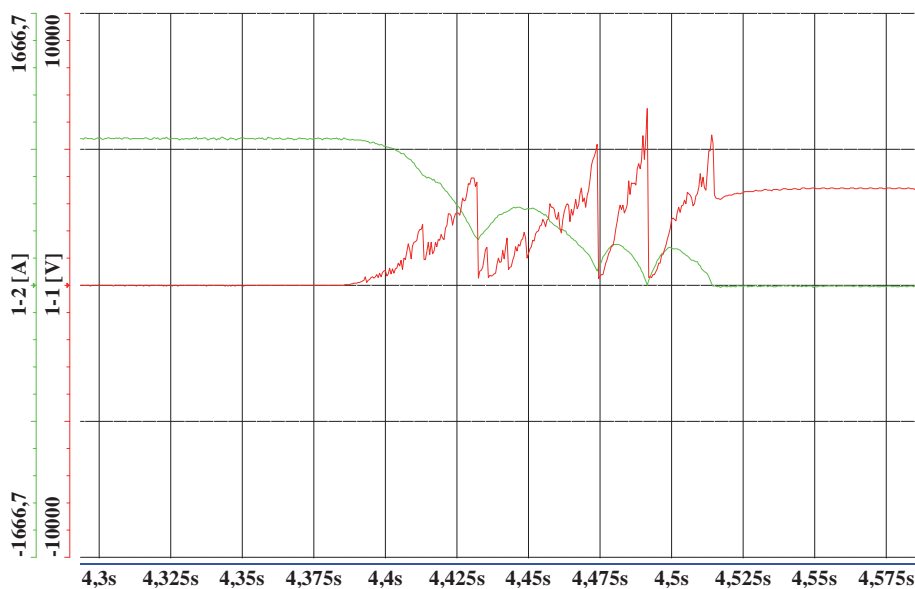
W porównaniu do wyłączników szybkich styczniki mają niewielkie komory łukowe. Konsekwencją tego są gorsze warunki do uzyskania w krótkim czasie napięcia łuku koniecznego do wyłączenia prądu. Szczególnie jest to istotne w przypadku styczników o dużej wartości napięcia znamionowego, np. 3600 V. Może to spowodować kilkakrotne zapalenie się łuku, co powoduje wzrost prądu i wydłużenie procesu wyłączenia. Przykład takiego zjawiska ilustruje rysunek 10, na którym czas łukowy wyłączenia (zbliżony do czasu łukowego) przekracza 100 ms. Długi czas łukowy powoduje znaczne nagrzewanie się komory łukowej, czego konsekwencją jest niebezpieczeństwo jej przegrzania i uszkodzenia termicznego. Wysoka temperatura komory łukowej utrudnia osiągnięcie przez łuk wartości

napięcia niezbędnego do wyłączenia prądu, skutkiem czego może być brak wyłączenia. Taką sytuację pokazano na rysunku 11, gdzie wyłączenie nastąpiło na skutek zadziałania wyłącznika bezpieczeństwa.

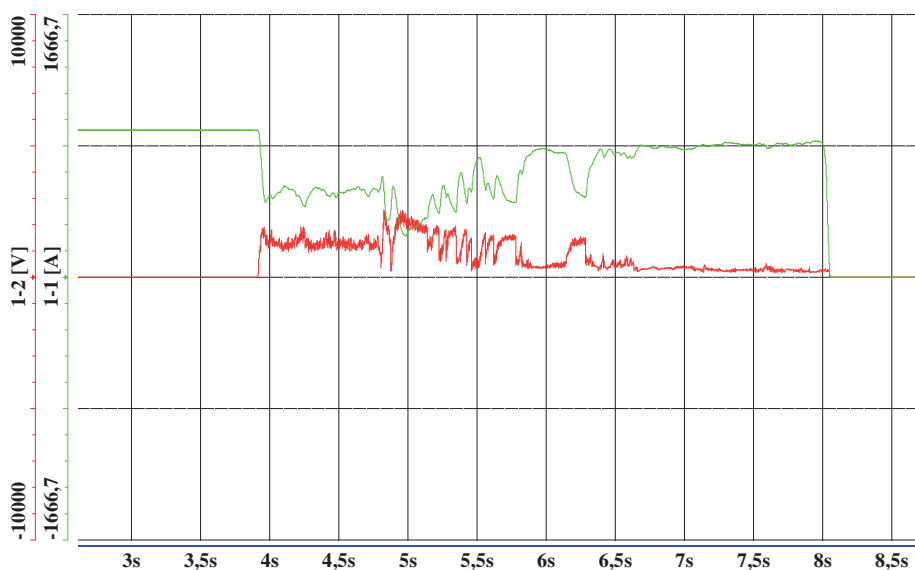
4.3. Badania rozłączników

Rozłączniki nie mają komór łukowych. Podczas wyłączenia prądów, w niektórych przypadkach również podczas załączania, łuk elektryczny pali się swobodnie w powietrzu pomiędzy różkami łukowymi, jak to pokazano na rysunku 1.

Wysoka temperatura łuku powoduje rozgrzanie otaczającego powietrza oraz nadtopienie różków łukowych. W konsekwencji tego, w wielu przypadkach,



Rys. 10. Kilkakrotne zapalenie się łuku podczas wyłączenia prądu przez stycznik z powodu złego stanu technicznego komory łukowej



Rys. 11. Brak wyłączenia prądu z powodu zbyt niskiej wartości napięcia łuku

nad rozłącznikiem pojawia się kula ognia, praktycznie plazmy, rozgrzanych, silnie zjonizowanych cząstek powietrza oraz stopionego metalu. Zjawisko takie pokazano na rysunku 12. Jest ono szczególnie niebezpieczne, gdy występuje w zamkniętych pomieszczeniach. Dotarcie kuli do elementów konstrukcyjnych, szczególnie przewodzących, oprócz uszkodzeń termicznych może spowodować zwarcie łukowe od rozłącznika do tych elementów.



Rys. 12. Kula plazmy po wyłączeniu prądu przez rozłącznik [fot. M. Marszałek]

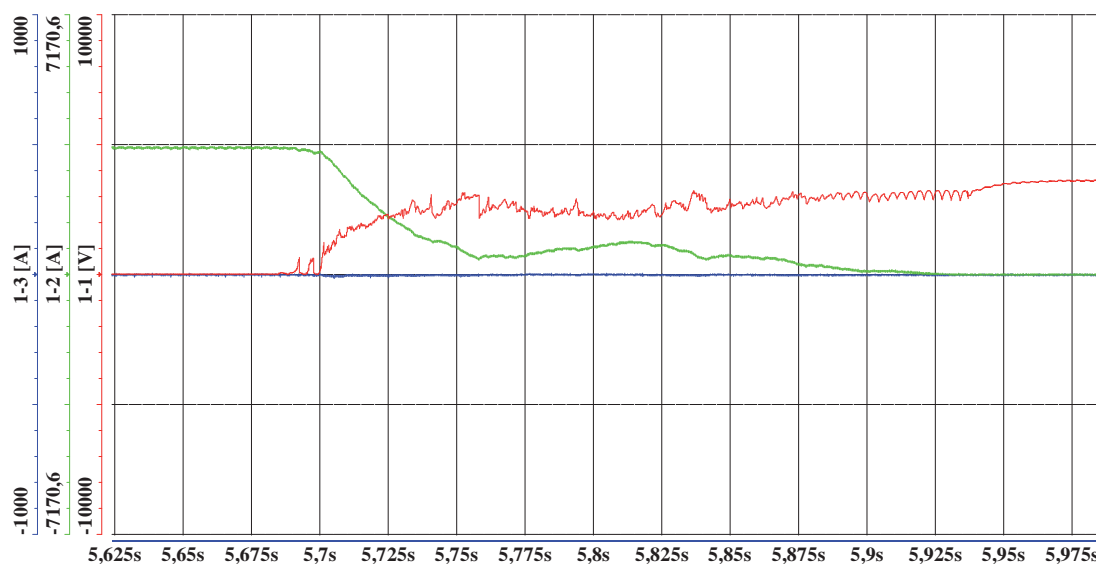
Ruch styku ruchomego rozłącznika jest dużo wolniejszy w porównaniu do wyłączników szybkich i styczników. Konsekwencją tego jest czas wyłączenia prądu,

nierzadko przekraczający 200 ms. Ilustruje to rysunek 13. Ponadto, podczas załączania, w pierwszej kolejności stykają się różki łukowe a chwilę później styki główne. Proces otwierania rozłącznika przechodzi w odwrotnej kolejności. Powoduje to, że podczas załączania i rozłączania prądu, przez pewien czas całkowity prąd przepływa tylko przez różki łukowe, których przekrój i siła docisku są znacznie mniejsze niż styków głównych. W wyniku tego już w fazie załączania prądu może pojawić się łuk elektryczny, szczególnie gdy różki łukowe są nadpalone lub nie stykają się prawidłowo. Na rysunku 14 przedstawiono przebieg prawidłowo załączonego prądu, natomiast na rysunku 15 przypadek, w którym nastąpił zapłon łuku podczas załączania.

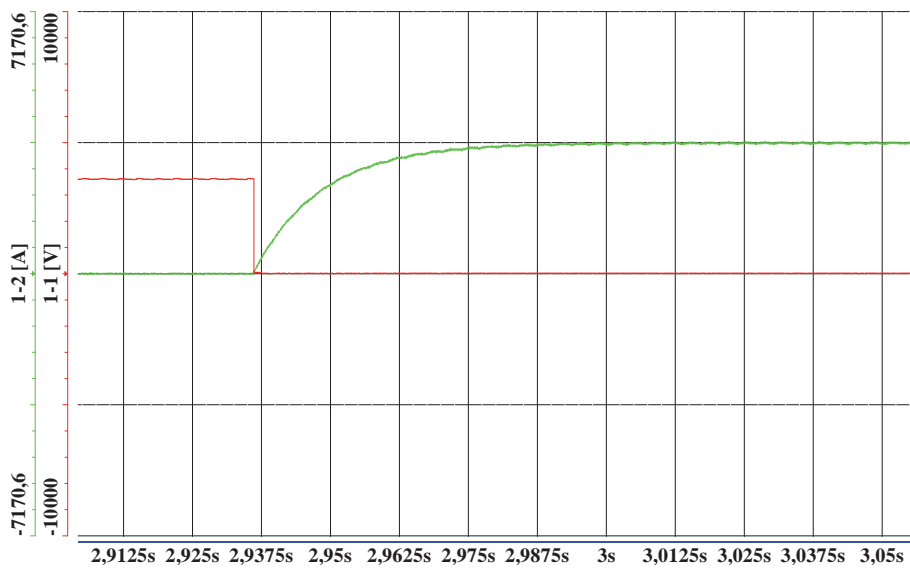
W trakcie pracy elementy rozłącznika mogą ulec zużyciu. Przykładowo, przy każdym rozłączeniu prądu różki łukowe są nadtapiane. Degradacja rozłącznika może doprowadzić do stanu, w którym łuk elektryczny zapali się pomiędzy stykami głównymi. Odległość między otwartymi stykami głównymi jest znacznie mniejsza niż końców różków łukowych. Dlatego łuk jest stosunkowo krótki i pali się stabilnie. Dopiero po pewnym czasie pod wpływem pól elektromagnetycznych oraz konwencji termicznej łuk przechodzi na różki łukowe, wydłuża się i gaśnie. Czas trwania takiego wyłączenia można liczyć w sekundach (rys. 16), a jego konsekwencją jest nadtopienie styków głównych, a więc zniszczenie rozłącznika.

5. Podsumowanie

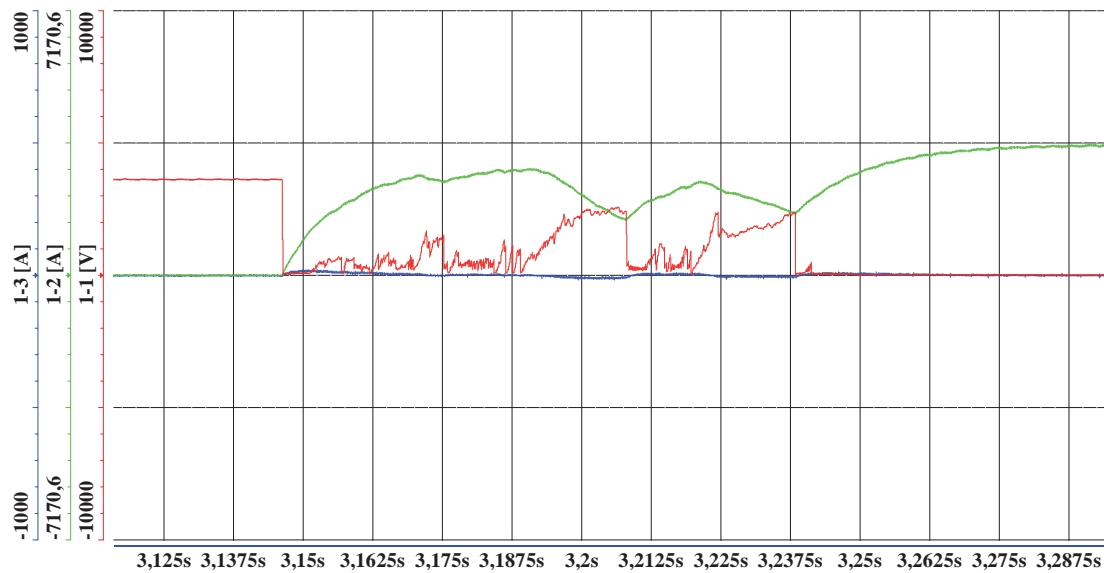
Badanie wytrzymałości elektrycznej aparatu łączeniowego wydawałoby się prostym – załączenie i wyłączenie prądu, najczęściej znamionowego oraz częstość



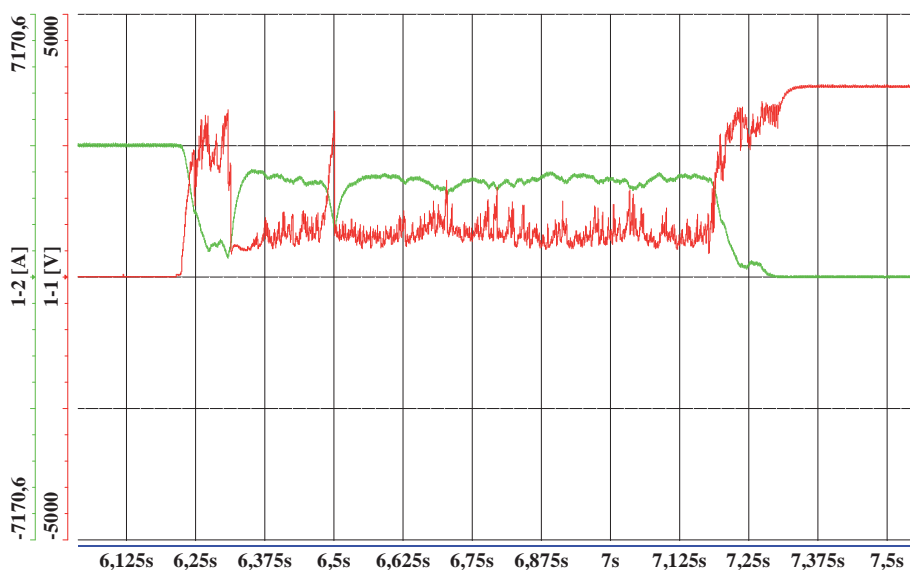
Rys. 13. Przebieg napięcia na rozłączniku i wyłączanego prądu



Rys. 14. Przebieg prawidłowo załączonego prądu przez rozłącznik



Rys. 15. Zapłon łuku podczas załączania prądu przez rozłącznik z niedostatecznego stanu styków



Rys. 16. Zapłon łuku pomiędzy stykami głównymi rozłącznika w czasie wyłączania prądu

określoną przez omówione zapisy norm przedmiotowych. Jednak, jak wykazano w artykule, badania tego typu obarczone są ryzykiem wynikającym z fizyki wymuszonego wyłączenia prądu stałego, szczególnie, że operacje łączeniowe wykonywane są dla wysokiego napięcia i dużych prądów osiągających wartości kilku tysięcy amperów. Dodatkowo należy liczyć się z przepięciami o wartościach wielokrotnie wyższych od napięcia zasilania.

Niepożądane zjawiska występujące w trakcie badań wytrzymałości elektrycznej w dużej mierze zależą od typu aparatu łączeniowego, od tego czy ma komorę łukową, czy łuk rozwija się swobodnie w powietrzu. Zależą również od liczby cykli CO, które należy wykonać podczas badań ze względu na rodzaj i przyszłe zastosowanie określonego aparatu łączeniowego.

W artykule wykazano, że badania wytrzymałości elektrycznej są długotrwałe, a personel badawczy musi je nadzorować w sposób ciągły.

Literatura

1. Maciołek T., Mierzejewski L., Szelań A.: *Wyłączenie zwarć w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy*, Technika Transportu Szynowego nr 3/2001.
2. PN-EN 50123-1:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 1: Wymagania ogólne.
3. PN-EN 50123-2:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 2: Wyłączniki prądu stałego.
4. PN-EN 50123-3:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 3: Wewnętrzne odłączniki prądu stałego, rozłączniki izolacyjne i uziemniki.
5. PN-EN 50123-4:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 4: Napowietrzne rozłączniki izolacyjne prądu stałego, odłączniki i uziemniki.
6. PN-EN 60077-1:2018-01: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 1: Podstawowe warunki eksploatacji i zasady ogólne.
7. PN-EN 60077-2:2018-01: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 2: Podzespoły elektrotechniczne – Zasady ogólne.
8. PN-EN IEC 60077-3:2020-07: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 3: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego.
9. Rojek A., Sidorowicz M.: *Researches and tests of high-speed circuit breakers for rolling stock and substations in 3 kV DC traction power system*, Problemy Kolejnictwa, 2013, z. 159.
10. Rojek A.: *Badania wyłączników szybkich prądu stałego na zgodność z normami*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89 NR 7/2013.
11. Rojek A.: *Main circuit breaker of traction vehicles in the dc system – parameters and requirements*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2021, s. 67–76.
12. Rojek A.: *Parameters of DC high-speed circuit breakers*, MATEC Web of Conferences, Volume 180, 2018.
13. Rojek A.: *Wyłączniki szybkie prądu stałego w transporcie szynowym*, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2016.
14. Rojek A.: *Wyznaczanie prądów krytycznych wyłączników szybkich prądu stałego*. Prace Instytutu Kolejnictwa, 2015, z. 148.
15. Rojek A.: *Zdolność łączeniowa prądów krytycznych wyłączników szybkich 3 kV DC*, XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEM-TRAK 2012, Zakopane 2012.
16. Rojek A.: *An Experimental Analysis of DC Magnetic Blowout Highspeed Circuit Breakers' Parameters*, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/5 (106) 2020, s. 35–40.
17. Rojek A.: *Badanie wpływu czasu łukowego zestykowego na czas wyłączenia prądu przez wyłączniki szybkie*, Prace Instytutu Kolejnictwa, 2020, z. 164, s. 19–41.
18. Rojek A.: *Czasy wyłączenia magnetowymuchowych wyłączników szybkich prądu stałego*, Problemy Kolejnictwa, 2015, z. 169, s. 53–60.
19. Rojek A.: *Wyłączanie prądów zwarciovych przez wyłączniki szybkie w podstacjach trakcyjnych*, Problemy Kolejnictwa, 2017, z. 177, s. 51–59.
20. Skrzyniarz M., Rojek A.: *Contact arc time – important parameter of DC high-speed circuit-breakers*, MATEC Web of Conferences, Volume 294, 2019.
21. Wójcik F.: *Analiza możliwości poprawy skuteczności działania wyłączników magnetowymuchowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, NR 5/2011.
22. Wójcik F.: *Ultraszybkie wyłączenie silnoprądowych obwodów prądu stałego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 1071, Rozprawy Naukowe, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010, z. 396.