

Wyłączanie prądów zwarciovych przez wyłączniki szybkie w podstacjach trakcyjnych

Artur ROJEK¹

Streszczenie

Wyłączniki szybkie stosowane w podstacjach trakcyjnych muszą spełniać wiele wymagań, od czego zależy ich prawidłowa praca, co przekłada się na bezpieczeństwo i ruch pociągów. Z tego względu przed dopuszczeniem do eksploatacji wyłączników szybkich, przechodzą one liczne badania laboratoryjne, w tym na zgodność z wymaganiami norm PN-EN 50123-1 i PN-EN 50123-2. Z uwagi na to, że zapisy norm są ogólne, a czasem mało precyzyjne, wyniki badań laboratoryjnych nie zawsze przekładają się na parametry wyłączników podczas eksploatacji w warunkach rzeczywistych. W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące wyłączania prądu stałego oraz wpływu parametrów obwodu na czas wyłączenia. Podano przykład, w którym ten sam typ wyłącznika badany w układzie spełniającym wymagania normy, lecz o różnych parametrach, może spełniać lub nie wymagania dotyczące całkowitego czasu wyłączenia. W artykule odniesiono się również do innego parametru wyłącznika szybkiego, jakim jest wartość przepięcia łączeniowego. Przedstawiono wyniki badań, na podstawie których określono wartość maksymalną przepięcia łączeniowego dopuszczalną dla wyłączników pracujących w podstacjach trakcyjnych w Polsce. W ten sposób odniesiono się do zapisów norm branżowych określających, że wartość przepięć łączeniowych może być określona przez użytkownika wyłączników szybkich prądu stałego.

Słowa kluczowe: czas wyłączenia, napięcie łuku, badania wyłączników szybkich

1. Wprowadzenie

Wyłącznikom szybkim stosowanym w podstacjach trakcyjnych stawia się wiele wymagań dotyczących ich parametrów elektrycznych i mechanicznych oraz wytrzymałości i niezawodności. Nieprawidłowe działanie wyłączników szybkich może być przyczyną powstania uszkodzeń i zniszczeń infrastruktury kolejowej, perturbacji w ruchu pociągów, a w skrajnych przypadkach może zagrażać zdrowiu i życiu ludzi.

Przed dopuszczeniem wyłączników szybkich do eksploatacji, poddaje się je wielu badaniom i testom laboratoryjnym. Podstawowymi dokumentami odniesienia dotyczącymi badań wyłączników szybkich, przeznaczonych do pracy w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych, są normy [8, 9].

Normy te w wielu zapisach są ogólne i dopuszczają szeroki zakres parametrów. Powoduje to, że w niektórych przypadkach interpretacja zapisów norm oraz wyników badań nie jest jednoznaczna. O tym, czy dany typ wyłącznika szybkiego można zastosować w określonej aplikacji decyduje jego docelowy eksploatator, lecz wyniki badań laboratoryjnych nie zawsze

przekładają się wprost na parametry wyłączników podczas eksploatacji. Zakres badań i związane z nim zagadnienia opisano między innymi w [10].

W warunkach rzeczywistej eksploatacji, parametry obwodów, w których pracują wyłączniki szybkie różnią się od układów laboratoryjnych. Powoduje to, że przebieg wyłączania prądów zwarciovych oraz towarzyszące im przepięcia łączeniowe mają inny charakter i wartości.

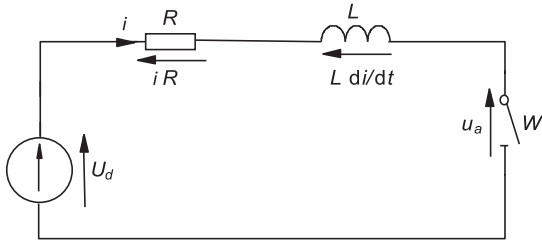
2. Wyłączanie prądu stałego

Wymuszone wyłączanie prądu stałego polega na zgaszeniu łuku elektrycznego zapalającego się między stykami wyłącznika. Parametry gaszonego łuku elektrycznego wpływają na wartość prądu ograniczając ją, a w konsekwencji zgaszenie łuku powoduje przerwanie przepływu prądu. Zjawisko to opisano w licznych publikacjach, w tym w [2–4, 6, 17–18].

System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego, z punktu widzenia wyłączania prądu, w uproszczeniu można określić jako obwód o szeregowym połączeniu

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

elementów rezystancyjnych i indukcyjnych o parametrach R (wypadkowa rezystancja elementów rezystancyjnych) i L (wypadkowa indukcyjność elementów indukcyjnych). Układ ten jest zasilany ze źródła napięciowego o wartości U_d . Uproszczony schemat zastępczy układu pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu prądu stałego [13]:
 U_d – napięcie zasilające, i – prąd wyłączany, R – rezystancja wypadkowa układu, L – indukcyjność wypadkowa układu,
 u_a – napięcie łuku na wyłączniku W

W momencie wyłączania prądu o wartości i powstaje łuk o napięciu u_a . Równanie takiego bilansu napięć ma postać:

$$U_d - Ri + L \frac{di}{dt} + u_a. \quad (1)$$

Zgodnie z [2-4, 6, 17-18], aby nastąpiło wyłączenie prądu stałego i zgaśnięcie łuku, charakterystyka statyczna łuku w całym zakresie prądów musi mieć wartości napięcia większe niż charakterystyka obwodu. Można tego dokonać zmieniając charakterystykę obwodu przez zwiększenie jego rezystancji lub podnieść charakterystykę statyczną łuku. Charakterystykę łuku można podnieść przez zwiększenie napięcia potrzebnego do palenia się łuku. Osiąga się to przez zwiększenie jego rezystancji. Ponieważ w stanie równowagi energia pobierana przez łuk musi równać się energii oddawanej, oznacza to, że można tego dokonać jedynie przez zwiększenie jego chłodzenia.

Podsumowując, aby wyłączyć prąd stały, należy zapewnić taki wzrost wartości rezystancji łuku, żeby napięcie łuku (jego charakterystyka) w czasie wyłączenia przekraczało napięcie wynikające z charakterystyki układu [2-4, 6, 17-18]. Oznacza to, że napięcie łuku musi mieć wartość:

$$u_a = U_d - Ri + Du_a. \quad (2)$$

Porównując powyższe równanie z zależnością (1), uzyskuje się:

$$\Delta u_a = -L \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Oznacza to, że wyłączeniu prądu stałego w obwodzie, w którym występuje indukcyjność, towarzyszą

przebiegi Δu_a . Wartość tych przebiegów jest proporcjonalna do wartości indukcyjności i szybkości zmian (malenia) prądu w obwodzie. Z równania (2) wynika, że wartość napięcia łuku w chwili wyłączenia prądu ($i = 0$) jest większa od napięcia źródła zasilającego układ.

Czas potrzebny na wyłączenie prądu – całkowity czas wyłączenia t_b , to czas liczony od chwili przekroczenia przez prąd wartości nastawy wyzwalacza do chwili sprowadzenia prądu do zera. Czas wyłączenia t_b jest sumą czasu własnego wyłącznika t_i i czasu łukowego t_a . Przy założeniu stałej długości łuku czas łukowy można wyznaczyć przekształcając wzór (3) do postaci:

$$dt = \frac{-L}{\Delta u_a} di. \quad (4)$$

Po scałkowaniu wzoru (4) w granicach od $i = i_{\max}$ do $i = 0$ oraz uwzględniając zależność (2) otrzymuje się:

$$t_a = \int_{i=i_{\max}}^{i=0} -\frac{di}{\Delta u_a} = L \frac{i_{\max}}{U_d} \int_{\frac{i}{i_{\max}}=1}^{\frac{i}{i_{\max}}=0} \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i}{i_{\max}}\right) = \frac{L}{R} \int_0^1 \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i}{i_{\max}}\right) = t_c t_{aN} \quad (5)$$

gdzie:

$t_c = L/R$ – stała czasowa obwodu,

t_{aN} – stała gaszenia łuku zależna od konstrukcji wyłącznika.

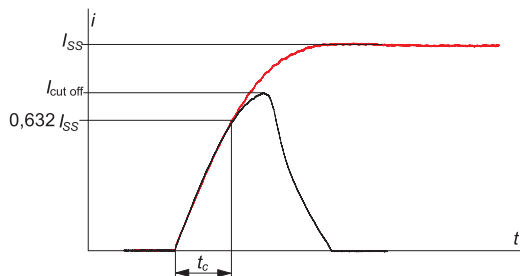
Z tych zależności wynika, że określony wyłącznik będzie miał różne wartości czasu łukowego t_a , zależne od parametrów obwodu, w którym pracuje. Również czas własny t_i zależy od parametrów obwodu, co potwierdziły badania [11].

3. Czas wyłączania prądu zwarciovego

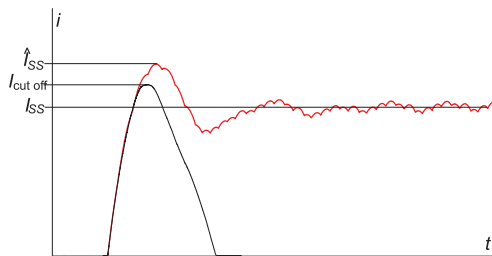
W podstacjach trakcyjnych i kabinach trakcyjnych stosowane są wyłączniki szybkie ograniczające prąd zwarciovowy. Oznacza to, że wyłączenie prądu powinno nastąpić wcześniej, niż osiągnie on wartość maksymalną, która w zależności od charakteru przebiegu prądu zwarciovowego jest wartością ustaloną lub szczytową.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przebiegi prądu zwarciovowego o różnych charakterach, lecz zbliżonej wartości prądu ustalonego I_{SS} oraz przebiegi prądu wyłączanego przez wyłącznik szybki. Wyznaczenie stałej czasowej obwodu zwarciovowego t_c w sposób opisywany przez normę [8] jest możliwe tylko wówczas, gdy prąd zwarciovowy osiąga swoją wartość ustaloną I_{SS} wykładniczo, jak na rysunku 2. W przypadku, gdy

przebieg prądu zwarciovego ma charakter jak na rysunku 3, wyznaczenie stałej czasowej obwodu nie jest możliwe.



Rys. 2. Przykładowy przebieg prądu zwarciovego do osiągnięcia wartości ustalonej (czerwony) i wyłączonego przez wyłącznik szybki (czarny) [badania wykonane przez IK]



Rys. 3. Przykładowy przebieg prądu zwarciovego o wartości szczytowej większej niż wartość ustalona (czerwony) i wyłączonego przez wyłącznik szybki (czarny) [badania wykonane przez IK]

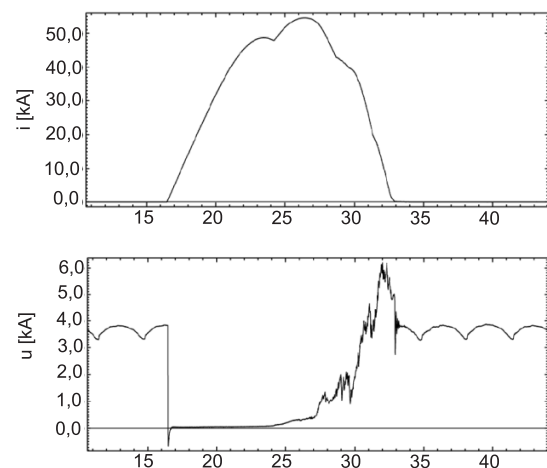
Czas własny t_i obecnie eksploatowanych wyłączników szybkich oraz poziom prądu ograniczonego $I_{cut\ off}$ są zależne od stromości narastania prądu zwarciovego oraz jego wartości maksymalnej, bez względu na to, czy ma on przebieg wykładniczy, czy jak pokazany na rysunku 3.

Wyłączniki szybkie przeznaczone do pracy w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych dzieli się między innymi pod względem szybkości ich działania oraz zdolności ograniczania prądu zwarciovego. Norma [8] określa trzy typy wyłączników: H, V i S. Obecnie w kolejowych urządzeniach zasilania stosowane są wyłączniki typu H. Zgodnie z zapisami normy, wyłącznik szybki typu H powinien zapobiegać osiągnięciu przez prąd zwarciovą wartości szczytowej, mieć czas własny t_i nie większy niż 5 ms, a całkowity czas wyłączenia t_b nie powinien przekraczać 20 ms, gdy wartość spodziewanego prądu ustalonego jest co najmniej 7 razy większa niż poziom nastawy wyzwalacza i początkowa stromość narastania prądu ma wartość minimum 5 kA/ms.

Charakterystykę wyłączników szybkich określa się podczas badań zdolności łączeniowej maksymalnych prądów zwarciovych. W punkcie 5.3.4.2, tablica 2 w normie [9] określono, że próby należy wykonać dla stałej czasowej wynikającej z parametrów obwodu, natomiast w punkcie 8.3.8.8 w tablicy 5, że stała cza-

sowa $t_c = 0$. Spełnienie tego warunku nie jest możliwe, gdyż w rzeczywistych układach zawsze występuje indukcyjność, czyli $t_c > 0$.

Biorąc pod uwagę zapisy dotyczące parametrów próby dla wyłączników szybkich typu H zawarte w normach [8, 9], próbę zdolności łączeniowej maksymalnych prądów można wykonać w układach o różnych parametrach, np. przy $di/dt = 9,5$ kA/ms lub $di/dt = 5,1$ kA/ms. Obie wartości stromości narastania prądu spełniają zapisy norm – są większe od 5 kA/ms, lecz wyniki prób są różne, co ilustrują rysunki 4 i 5. Przebiegi przedstawione na tych rysunkach zostały zarejestrowane podczas prób zwarciovych tego samego typu wyłącznika, przy zbliżonej wartości spodziewanego prądu ustalonego I_{SS} , wykonanych w różnych obwodach – w laboratorium zwarciovym w układzie bez dławika wygładzającego oraz w podstacji trakcyjnej przy wypadkowej wartości indukcyjności dławików 0,8 mH.

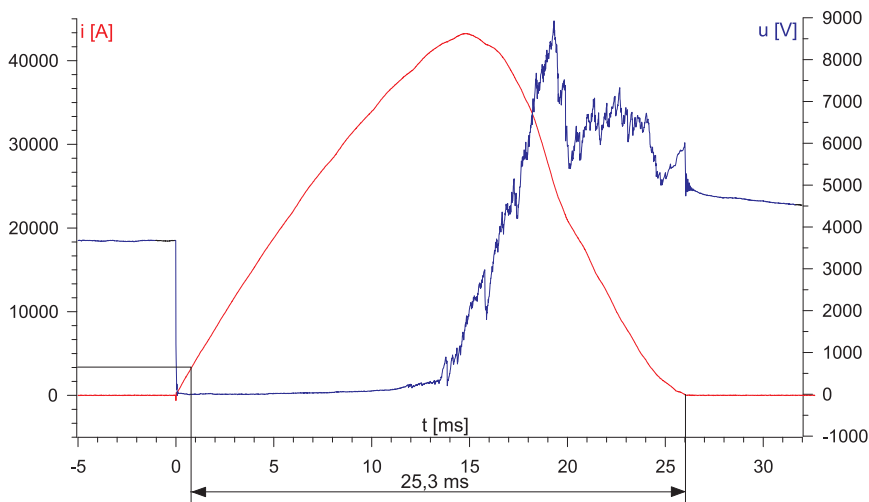


Rys. 4. Przebiegi prądu zwarciovego i napięcia na wyłączniku szybkim przy $di/dt = 9,5$ kA/ms, $t_b = 15,6$ ms [16]

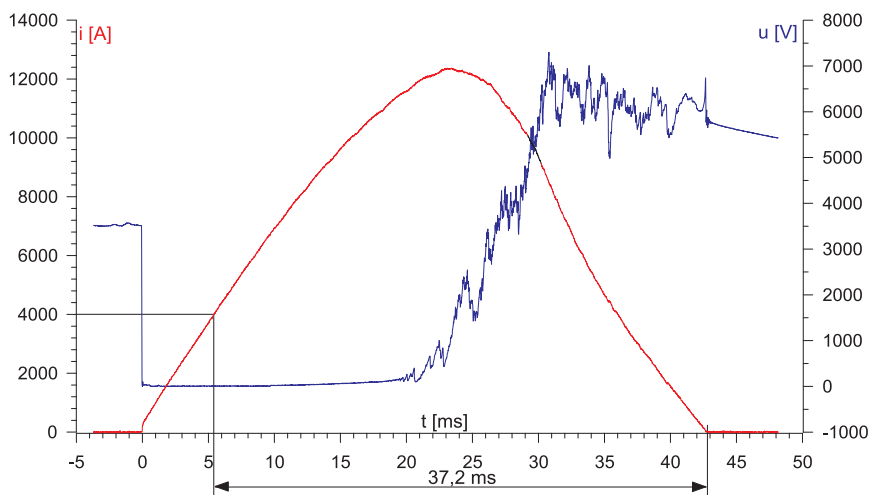
W rzeczywistych warunkach, podczas normalnej eksploatacji, wyłącznik szybki sporadycznie wyłącza tak duże wartości prądów jak przedstawione na rysunkach 4 i 5. W przypadku zdecydowanej większości podstacji trakcyjnych, wyłączniki szybkie nie wyłączają prądów powyżej 20 kA. Przykładowe przebiegi wyłączenia prądu zwarciovego na typowej podstacji trakcyjnej przedstawiono na rysunku 6. Zwarcie zostało wyłączone przez ten sam typ wyłącznika, co zwarcia pokazane na rysunkach 4 i 5.

Na rysunku 6 widoczne jest wydłużenie czasu wyłączenia w stosunku do wcześniejszych przebiegów. Jest to spowodowane większą wartością stałej czasowej obwodu zwarcia oraz niższą wartością stromości narastania prądu. Zjawisko to jest zgodne z analizami teoretycznymi przedstawionymi wcześniej w artykule.

Z tych przykładów wynika, że podanie w dokumentacji tylko informacji, że dany wyłącznik jest typu H,



Rys. 5. Przebiegi prądu zwarciego i napięcia na wyłączniku szybkim przy $di/dt = 5,1 \text{ kA/ms}$, $t_b = 25,3 \text{ ms}$ [badania wykonane przez IK]



Rys. 6. Przebiegi prądu zwarciego i napięcia na wyłączniku szybkim pracującym w typowej podstacji trakcyjnej ($di/dt = 1,55 \text{ kA/ms}$, $t_b = 37,2 \text{ ms}$) [badania wykonane przez IK]

nie określa jego parametrów w zakresie czasu wyłączenia w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Rozwiązaniem tego problemu byłoby umieszczanie przez producentów informacji o czasach wyłączenia w zależności od stromości narastania prądu na przykład w formie wykresu, jak to robi firma Sécheron odnośnie czasów własnych wyłączników 5.

4. Przepięcia łączeniowe

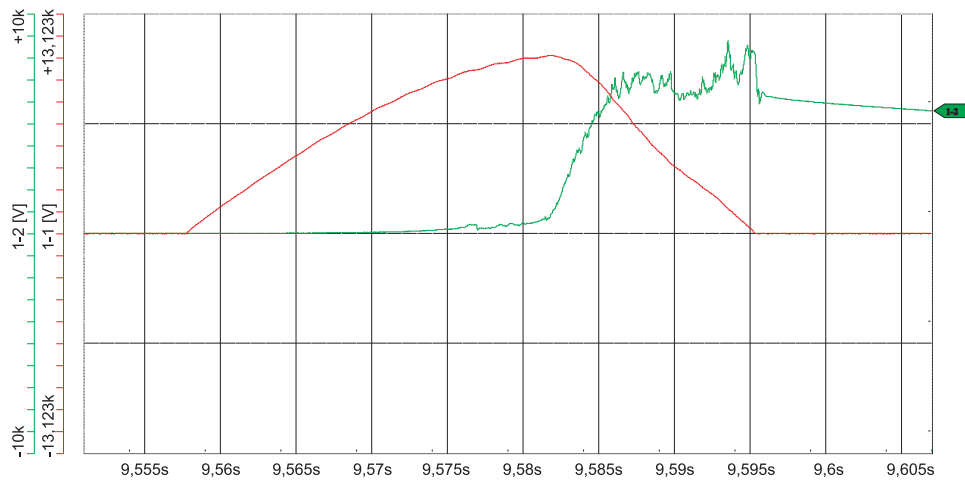
Jak wspomniano, wyłączeniu prądu stałego w obwodzie, w którym występuje indukcyjność, towarzyszą przepięcia Δu_a o wartości proporcjonalnej do wartości indukcyjności i szybkości zmian (malenia) prądu w obwodzie, równanie (3).

W trakcie badań laboratoryjnych najwyższe wartości przepięć łączeniowych zazwyczaj są rejestrowane w trakcie prób w obwodzie zwarciovym o najwyższej energii łuku. Parametry obwodu podczas tych prób są zależne od wartości znamionowej stałej czasowej

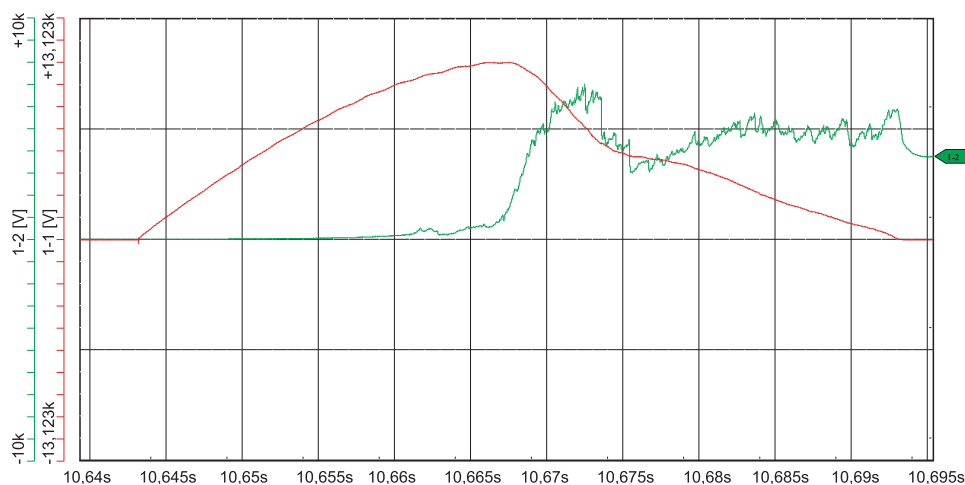
badanego wyłącznika (T_{Nc}). Wyłączany prąd ustalony oraz stała czasowa obwodu przyjmują wartości od 0,5 do 0,8 wartości znamionowych wyłącznika.

W warunkach rzeczywistej eksploatacji wyłączników szybkich, wartości przepięć łączeniowych mogą się różnić od tych zarejestrowanych podczas badań laboratoryjnych. Przyczyną tego jest to, że parametry obwodów rzeczywistych, wynikające z miejsca zwarcia, parametrów sieci trakcyjnej, podstacji trakcyjnej i układu jej zasilania, mogą znacznie odbiegać od wartości podanych w normie. Zgodnie z punktem 5.7 normy [9], maksymalne przepięcie łączeniowe może mieć wartość do czterokrotności napięcia znamionowego lub ustaloną przez użytkownika wyłącznika.

Zmniejszenie wartości przepięć łączeniowych w określonym obwodzie zwarciovym – przy stałej wartości indukcyjności, zgodnie z równaniem (3), powoduje zmniejszenie szybkości malenia prądu, a zatem wydłużenie czasu wyłączenia. Zjawisko to ilustrują przebiegi przedstawione na rysunkach 7 i 8. Przebiegi te zarejestrowano podczas prób zwarciovych w podstacji trakcyjnej



Rys. 7. Przebiegi prądu zwarciovego (czerwony) i napięcia na wyłączniku szybkim (zielony) zarejestrowane podczas prób zwarciovych w podstacji trakcyjnej: $I_{\text{cut off}} = 10,63 \text{ kA}$, $U_a = 8,83 \text{ kV}$, $di/dt = 0,97 \text{ kA/ms}$, $t_a = 31,18 \text{ ms}$, energia łuku = 428 kJ [badania wykonane przez IK]



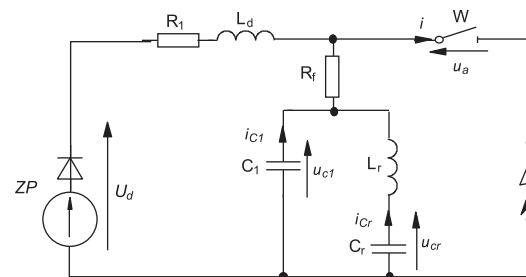
Rys. 8. Przebiegi prądu zwarciovego (czerwony) i napięcia na wyłączniku szybkim (zielony) zarejestrowane podczas prób zwarciovych w podstacji trakcyjnej: $I_{\text{cut off}} = 10,54 \text{ kA}$, $U_a = 7,03 \text{ kV}$, $di/dt = 0,97 \text{ kA/ms}$, $t_a = 44,38 \text{ ms}$, energia łuku = 545 kJ [badania wykonane przez IK]

z wykorzystaniem wyłącznika szybkiego wyposażonego w układ umożliwiający ograniczenie napięcia łuku. Wyniki tych prób pokazują, że zmniejszenie przepięcia łączeniowego o 1,8 kV powoduje wydłużenie czasu łukowego t_a o 13,2 ms. Wydłużenie czasu łukowego powoduje również zwiększenie energii łuku wydzielanej w komorze łukowej, co wpływa na żywotność wyłącznika.

Kolejowe podstacje trakcyjne pracujące w Polsce są wyposażone w urządzenia wygładzające, których kluczowymi elementami są kondensatory. Kondensatory charakteryzują się parametrami napięciowymi, wśród których, oprócz napięcia znamionowego, podawane są maksymalne napięcia powtarzalne i niepowtarzalne.

Elementem urządzenia wygładzającego, teoretycznie najbardziej narażonym na uszkodzenie w wyniku występowania przepięć łączeniowych, jest kondensator C_r w gałęzi rezonansowej (rys. 9). Według danych

katalogowych maksymalne, niepowtarzalne napięcie dla tego kondensatora wynosi 8 kV.



Rys. 9. Uproszczony schemat obwodu zwarciovego z urządzeniem wygładzającym [opracowanie własne]

W czasie występowania przepięcia łączeniowego, napięcie łuku stanowi źródło napięcia, z którego ładowane są kondensatory urządzenia wygładzającego.

Z uwagi na połączenie szeregowe kondensatora C_r i cewki L_r w gałęzi rezonansowej oraz wartości rezystora R_r mniejszej od wartości krytycznej połączenia szeregowego $C_r L_r R_r$, kondensator C_r będzie ładował się oscylacyjnie. W przypadku skokowego wzrostu napięcia łuku (o stromości $du_a/dt \rightarrow \infty$), wówczas chwilowa wartość prądu ładowania kondensatora C_r wynosiłaby jak w [1]:

$$i_{C_r}(t) = \frac{U_d}{\omega L_r} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (6)$$

a napięcie chwilowe na jego zaciskach miałyby wartość:

$$u_C(t) = U_d - \frac{U_d}{\omega \sqrt{L_r \cdot C_r}} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

gdzie: $\alpha = \frac{R_f}{2L_r}$, $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_r C_r} - \alpha^2}$, $\text{tg} \phi = \frac{\omega}{\alpha}$.

W warunkach rzeczywistych zmiana wzrostu napięcia łuku odbywa się ze skończoną stromością, zależną od parametrów wyłącznika i obwodu zwarcowego. Z tego względu, w celu określenia dopuszczalnej wartości przepięć łączeniowych, przeprowadzono próby w podstacji trakcyjnej [12], w której jest zainstalowane urządzenie wygładzające, którego układ i budowa określona jest przez standardy PKP Energetyka S.A. [15]. W uproszczeniu, układ tego urządzenia wygładzającego odpowiada schematowi pokazanemu na rysunku 9. Podczas badań wykorzystano wyłącznik szybki wyposażony w układ umożliwiający ograniczenie napięcia łuku. Podczas badań przeprowadzono kilka wyłączeń

prądu zwarcowego otrzymując prąd ograniczony o wartościach od 10 do ponad 20 kA. Przykładowe przebiegi prądów i napięć zarejestrowane w obwodzie przedstawiono na rysunkach 10, 11 i 12, na których kolorami oznaczono:

- i – kolor czerwony,
- u_a – kolor zielony,
- u_{cr} – kolor niebieski.

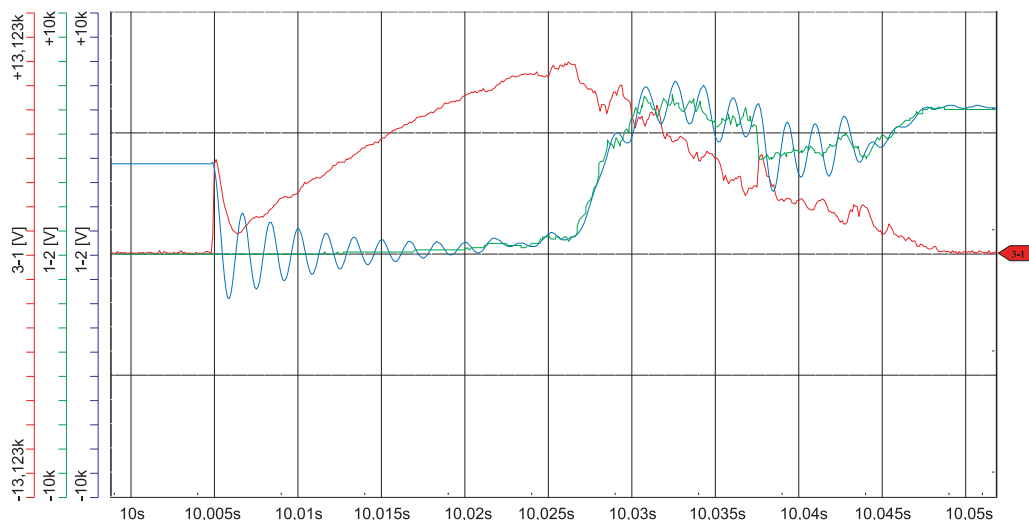
Przebiegi przedstawione na rysunkach 10 i 11 zarejestrowano podczas prób, w których wyłącznik szybki był wyposażony w układ ograniczający poziom napięcia łuku, natomiast na rysunku 12 przedstawiono przebieg bez takiego układu.

Porównując przebiegi prądu przedstawione na rysunkach 10, 11, 12 z przebiegami z rysunków 7 i 8 widoczny jest gwałtowny wzrost prądu w chwili wystąpienia zwarcia. Jest to spowodowane rozładowaniem się pojemności wchodzących w skład urządzenia wygładzającego. Wartość prądu rozładowania i czas jego występowania są zdeterminowane wartością rezystora R_p służącego ograniczeniu wartości tego prądu.

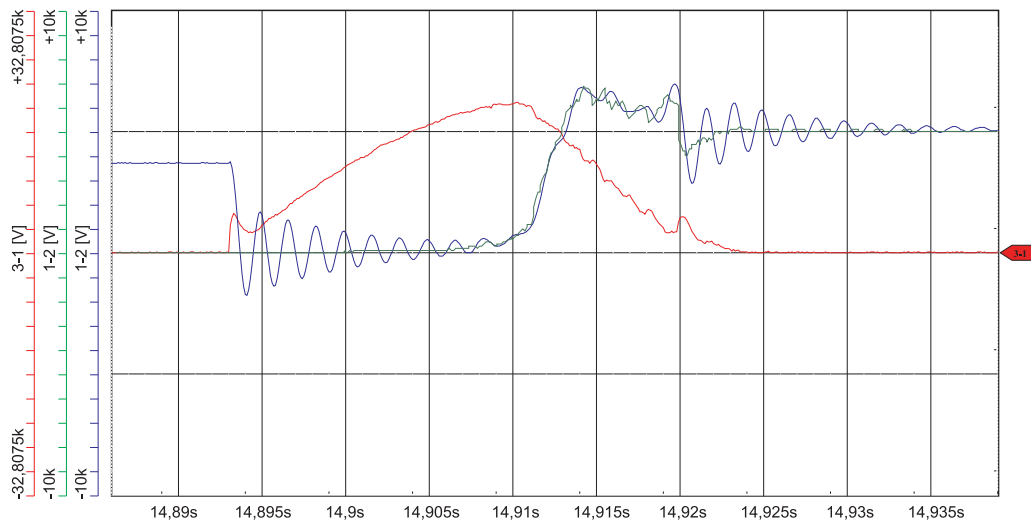
Analizując wyniki pomiarów stwierdzono, że w wyniku powstawania oscylacji maksymalne napięcie na kondensatorze C_r może przekraczać wartość przepięcia łączeniowego. W czasie badań przeprowadzonych w układzie z urządzeniem wygładzającym, którego układ i budowa określona jest przez standardy PKP Energetyka S.A. [15], zarejestrowano:

$$u_{C_{rmax}} = 1,077 U_{amax}$$

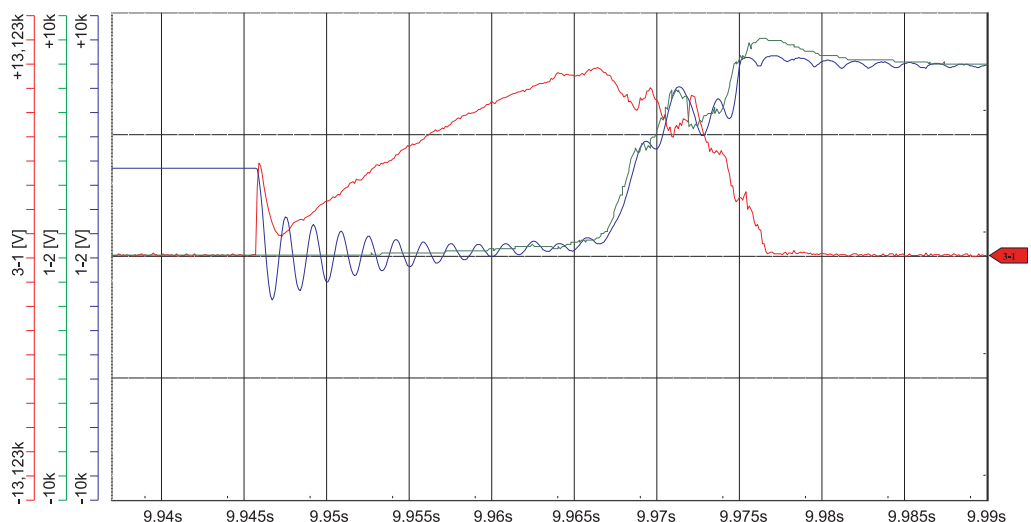
Z uwagi na to, że maksymalne napięcie niepowtarzalne kondensatora C_r w gałęzi rezonansowej nie może przekraczać 8 kV oraz przyjmując 200 V jako margines bezpieczeństwa, maksymalne przepięcie łą-



Rys. 10. Przebiegi prądu zwarcowego i napięcia na wyłączniku szybkim zarejestrowane podczas prób zwarcowych w podstacji trakcyjnej z urządzeniem wygładzającym: $I_{cut\ off} = 10,4$ kA, $U_a = 6,62$ kV, $U_{cr} = 7,13$ kV [12]



Rys. 11. Przebiegi prądu zwarciovego i napięcia na wyłączniku szybkim zarejestrowane podczas prób zwarciovych w podstacji trakcyjnej z urządzeniem wygładzającym: $I_{\text{cut off}} = 20,3 \text{ kA}$, $U_a = 6,89 \text{ kV}$, $U_{cr} = 6,96 \text{ kV}$ [12]



Rys. 12. Przebiegi prądu zwarciovego i napięcia na wyłączniku szybkim zarejestrowane podczas prób zwarciovych w podstacji trakcyjnej z urządzeniem wygładzającym: $I_{\text{cut off}} = 10,2 \text{ kA}$, $U_a = 8,89 \text{ kV}$, $U_{cr} = 8,24 \text{ kV}$ [12]

zeniowe dla podstacji trakcyjnych z wspomnianym urządzeniem wygładzającym nie powinno przekraczać wartości:

$$U_{a \text{ max}} = (8 \text{ kV}/1,077) - 200 \text{ V} \gg 7,23 \text{ kV}.$$

Należy zwrócić uwagę, że obecność pojemności w układzie powoduje ograniczenie przepięcia łączeniowego oraz to, że ograniczanie przepięć łączeniowych przez układy zewnętrzne (kondensatory, ograniczniki przepięć) bez ograniczenia wartości indukcyjności w obwodzie zwarcia powoduje wydłużenie czasu łukowego.

Wysokie napięcie, z naładowanych przepięciem łączeniowym kondensatorów urządzenia wygładzającego, przenoszone jest na szyny 3 kV rozdzielnic oraz na inne urządzenia, w tym prostownik, którego konden-

satory są również ładowane wysokim napięciem. Wartość tego napięcia spada na skutek rozładowywania się kondensatorów przez rezystory rozładowcze. W przypadku zamkniętego wyłącznika szybkiego w innym polu zasilacza przy braku jego obciążenia, napięcie z naładowanych kondensatorów podawane jest również na sieć trakcyjną. Wysokie napięcie oddziałuje na izolację innych urządzeń.

W normalnym układzie podstacji, gdy choć jeden z zasilaczy jest obciążony nawet niewielkim prądem, proces rozładowania kondensatorów powinien przebiegać szybciej, niż to zarejestrowano podczas prób. Podczas próby, w której przepięcie łączeniowe spowodowało naładowanie kondensatorów urządzenia wygładzającego napięciem przekraczającym 8 kV nastąpiło uszkodzenie tych kondensatorów.

4. Podsumowanie

Właściwy dobór wyłączników szybkich ma istotne znaczenie dla niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemu zasilania trakcji elektrycznej. Normy dotyczące badań wyłączników szybkich prądu stałego zawierają wiele zapisów ogólnych lub stwarzających możliwość różnej interpretacji wyników badań. Bezkrytyczne kierowanie się tylko wynikami badań, bez znajomości warunków ich przeprowadzenia, nie daje możliwości prawidłowego doboru wyłącznika szybkiego do konkretnego zastosowania. Niezwykle istotne jest to, że badania laboratoryjne nie pozwalają na określenie wszystkich parametrów wyłączników szybkich, którymi będą się one charakteryzować w rzeczywistych układach zasilania trakcji elektrycznej.

Czas wyłączenia prądu przez wyłącznik szybki w układzie laboratoryjnym o dużej stromości narastania prądu, a więc o małej indukcyjności tego obwodu, jest znacznie krótszy niż w obwodzie o mniejszej stromości narastania prądu, a tym bardziej w układach rzeczywistych, w których występują indukcyjności dławików wygładzających, kabli i sieci trakcyjnej. Podanie w dokumentacji wyłącznika tylko informacji, że dany wyłącznik jest typu H, nie określa jego parametrów w zakresie czasu wyłączenia w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Rozwiązaniem tego problemu byłoby podawanie przez producentów informacji o czasach wyłączenia w zależności od stromości narastania prądu na przykład w formie wykresu, jak to robi firma Sécheron odnośnie czasów własnych wyłączników [5]. Od parametrów obwodu oraz konstrukcji wyłącznika zależy wartość przepięć występujących podczas wyłączenia prądu stałego. Im szybsze jest sprowadzenie wyłączanego prądu do zera (zgaszenie łuku), tym przepięcia łączeniowe osiągają wyższe wartości. W warunkach rzeczywistych nie można dopuścić do występowania przepięć łączeniowych o dowolnych wartościach, gdyż mogą one być przyczyną uszkodzeń innych urządzeń pracujących w podstacjach lub zasilanych z sieci trakcyjnej. Z uwagi na to stosowane są różne rozwiązania systemów ograniczania przepięć. Przepięcia te powodują między innymi naładowanie się pojemności występujących w układzie (np. w urządzeniach wygładzających w podstacjach trakcyjnych), co powoduje, że wysokie napięcie oddziałuje na urządzenia przez czas potrzebny do rozładowania tych pojemności. Z tego względu maksymalne przepięcia łączeniowe generowane przez wyłączniki szybkie eksploatowane w podstacjach trakcyjnych w Polsce, wyposażonych w urządzenia wygładzające, których układ i budowa jest określona przez standardy PKP Energetyka S.A. [15], nie powinny przekraczać wartości 7,23 kV. W przypadku

innych rozwiązań urządzeń wygładzających należy przeprowadzić dalsze badania.

Literatura

1. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*. WNT, Warszawa 2008.
2. Dzierzbicki S.: *Aparaty elektryczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1970.
3. Dzierzbicki S.: *Wysokonapięciowe aparaty łączeniowe, Zasady działania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1962.
4. Dzikowski J., Kruciński K.: *Zasilanie trakcji elektrycznej*, Nakładem Politechniki Łódzkiej – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Łódź, 1960.
5. *High-speed DC circuit-breakers for fixed installations (EN/IEC standards) – Type UR*, Katalog Sécheron SA, Genewa 2014.
6. Klajn A.: *Właściwości dyfuzyjnego wyładowania łukowego w próżni w warunkach wymuszonego wyłączenia prądu*, Prace Naukowe Instytutu Energoelektroniki Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Wrocław 2006.
7. Kryński J.: *Elektryczne aparaty rozdzielcze*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Łódź – Warszawa 1964.
8. PN-EN 50123-1:2003: *Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Wymagania ogólne*.
9. PN-EN 50123-2:2003: *Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Wyłączniki prądu stałego*.
10. 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, Zeszyt 159, Warszawa 2013, s. 7–26.
11. Rojek A.: *Badania łączalności prądów przez wyłączniki szybkie prądu stałego stosowane w Polsce przy różnych parametrach obwodu prądowego*, Praca IK nr 8801/12, Warszawa 2015.
12. Rojek A.: *Określenie dopuszczalnych wartości przepięć łączeniowych i ich oddziaływanie na elementy urządzenia wygładzającego*, Praca IK nr 8367/12, Warszawa 2017.
13. Rojek A.: *Wyłączniki szybkie w transporcie szynowym*, Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2016.
14. Rojek A.: *Zasilanie trakcji elektrycznej w systemie prądu stałego 3 kV*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2012.
15. *Standardy Techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla budowy i modernizacji podstacji trakcyjnych i kabin sekcyjnych. Zeszyt VII – Rozdzielnica prądu stałego 3 kV dla podstacji trakcyjnych – Wymagania i parametry*, PKP Energetyka S.A., Warszawa 2016.
16. Type Test Report No. 04157-16-0324: IPH Berlin, Berlin, 14 June 2016.

17. Wójcik F.: *Ultraszybkie wyłączanie silnoprądowych obwodów prądu stałego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 1071, Rozprawy Naukowe, Z.396. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010.
18. Wróblewski L.: *Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

Short Circuit Current Breaking by High Speed Circuit Breakers in Traction Substation

Summary

High speed circuit breakers (HSCB) applied in traction substations must meet several requirements conditioning their proper performance, which enhances train safety and traffic. Due to this fact, prior to high speed circuit breakers placing into operation, they are subject to several laboratory tests, including tests checking compliance with PN-EN 50123-1 and PN-EN 50123-2 standards requirements. As many provisions of standards are general and sometimes not very precise, laboratory tests results do not always translate into HSCB parameters in operational use under realistic conditions. The article features the issue concerning DC breaking and the impact of the circuit parameters on the breaking time. An example was given when the same HSCB type was tested in a circuit which meets the standard requirements but bears different parameters and that type can or not fulfill the requirements relating to the total breaking time.

The article also refers to another HSCB parameter, i.e. the value of switching overvoltage. The test results were presented which were the basis to determine the maximum limit value of switching overvoltage for breakers installed in traction substations in Poland. In this way the reference was made to provisions of industry standards which state that the value of switching overvoltage may be determined by a HSCB user.

Keywords: breaking time, arc voltage, high speed circuit breakers tests

Выключение токов короткого замыкания при помощи быстродействующих автоматических выключателей в тяговых подстанциях

Резюме

Быстродействующие автоматические выключатели употребляемые в тяговых подстанциях должны выполнять целый ряд требований, от которых зависит их работа, и что влияет на безопасность и движение поездов. Поэтому перед техническим допуском быстродействующие автоматические выключатели проходят многие лабораторные тесты, в том числе тесты на совместимость с требованиями норм PN-EN 50123-1 и PN-EN 50123-2. Учитывая, что записи норм являются общими, а иногда неточными, результаты лабораторных тестов не всегда соответствуют параметрам выключателей в режиме реального времени. В нынешней статье представлен вопрос по выключении постоянного тока и влияния параметров электрической цепи на время выключения. Приводится пример, в котором тот же тип выключателя протестированный в цепи отвечающей требованиям нормы, но при разных параметрах, может отвечать или не отвечать требованиям по общему времени выключения.

В статье автор относится также к другому параметру быстродействующего автоматического выключателя, каким является значение коммутационного перенапряжения. Представляются результаты исследований, на основании которых определяется максимальное значение коммутационного перенапряжения допустимого для быстродействующих автоматических выключателей в тяговых подстанциях в Польше. Этим способом автор относится к записям отраслевых норм определяющих, что значение коммутационных перенапряжений может определяться пользователем быстродействующих автоматических выключателей постоянного тока.

Ключевые слова: время выключения, пробивное напряжение, исследования быстродействующих автоматических выключателей