

Czasy wyłączania magnetowdmuchowych wyłączników szybkich prądu stałego

Artur ROJEK¹

Streszczenie

Wyłączniki szybkie są podstawowym zabezpieczeniem przed przepływem nadmiernej wartości prądu w obwodach sieci trakcyjnej oraz zasilanych z niej pojazdów. Prądy zwarciove muszą być wyłączone w jak najkrótszym czasie, aby zminimalizować ryzyko uszkodzenia chronionych przez wyłączniki elementów systemu zasilania trakcji elektrycznej.

Jednym z istotnych parametrów wyłącznika szybkiego jest czas wyłączania prądu, określany od chwili przekroczenia przez prąd nastawy wyzwalacza wyłącznika do chwili wyłączenia prądu. Zakres badań wyłączników szybkich prądu stałego na zgodność z normami obejmuje określenie tego czasu jedynie dla dużych wartości prądu, znacznie przekraczających poziom prądów roboczych, oraz dla prądów o wartościach bardzo małych – prądów krytycznych. Podczas eksploatacji wyłączników szybkich najczęściej wyłączeń następuje w wyniku zwarć odległych lub przeciążeń.

W celu określenia rzeczywistych czasów wyłączania prądów o wartościach porównywalnych z poziomem nastawy wyzwalacza wyłącznika szybkiego, przeprowadzono badania przy różnych wartościach stałej czasowej obwodu, w wyniku których określono czas łukowy oraz czas własny wyłącznika w zależności od wartości wyłączanego prądu. Badaniom poddano magnetowdmuchowy wyłącznik szybki prądu stałego typu BWS, który jest najczęściej używanym w Polsce wyłącznikiem w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych.

Słowa kluczowe: wyłącznik szybki, zwarcia, czas własny, czas łukowy

1. Wstęp

Wyłączniki szybkie prądu stałego są głównymi urządzeniami wyłączającymi prądy zwarciove w kolejowych systemach elektrotrakcyjnych. Znajdują zastosowanie w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych oraz taborze kolejowym. Większość producentów wyłączników szybkich przy badaniach na zgodność z normą PN-EN 50123-2 [11] skupia się na parametrach związanych z wartościami prądów znamionowych oraz łącznością prądów zwarciowych. Tematykę badań wyłączników szybkich na zgodność z normami omówiono między innymi w artykule [17]. Wiele prac realizowanych przez Instytut Kolejnictwa, m.in. [12-14, 16, 18, 19] dotyczyło badań zdolności łączeniowej prądów zwarciowych o dużych wartościach. Również pracownicy naukowcy innych ośrodków zajmowali się tym zagadnieniem, o czym świadczą liczne publikacje, m.in. [9, 10, 21] oraz wiele innych.

W Polsce, podstawowymi typami wyłączników szybkich zainstalowanych w kolejowych obiektach zasilania i w taborze są wyłączniki BWS i WSe (WSp).

Wyłączniki typu BWS są również stosowane w metrze oraz w podstacjach trakcyjnych zasilających sieci tramwajowe i trolejbusowe. Wyłączniki typu WSe (WSp), obecnie nie produkowane, są sukcesywnie zastępowane innymi typami, głównie BWS. Na sieci kolejowej w Polsce, w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych pracuje około 5000 wyłączników typu BWS, a około 1000 sztuk tych wyłączników zainstalowano w pojazdach trakcyjnych. Wyłączniki BWS są również eksploatowane w innych krajach europejskich, w tym w Belgii, Hiszpanii, Czechach, Słowacji.

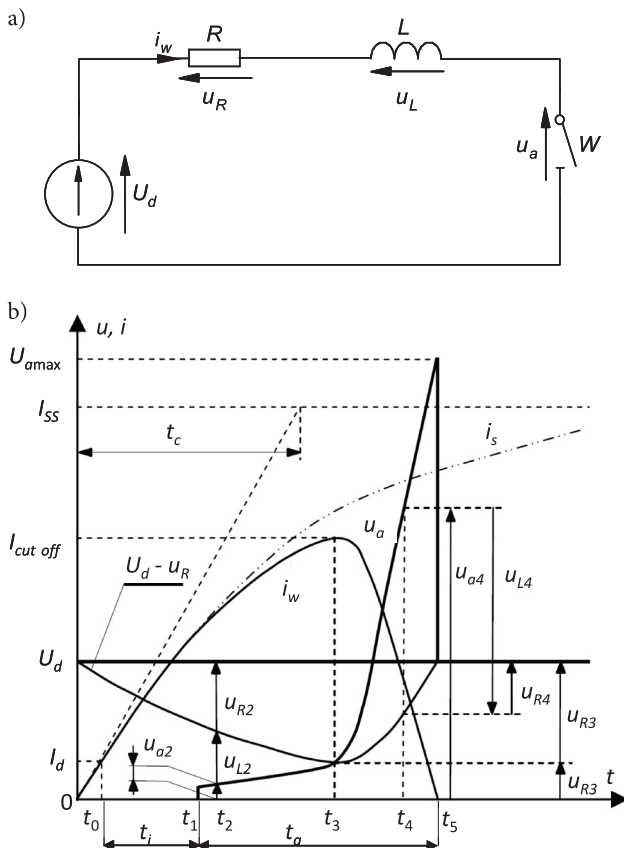
Podczas normalnej eksploatacji, występowanie zwarć bliskich o dużych wartościach di/dt jest rzadkie. Znacznie częstsze jest wyłączanie przez wyłączniki szybkie prądów przeciążeniowych oraz zwarć odległych, przy których wartości i stromość narastania prądu są ograniczone przez rezystancję oraz indukcyjność sieci trakcyjnej. Z tego względu w laboratorium zwarciowym Instytutu Kolejnictwa przeprowadzono badania wyłączania przez wyłącznik typu BWS tego rodzaju prądów w zależności od parametrów obwodu zwarciowego [20].

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

2. Wyłączanie prądu stałego i czasy wyłączenia

Czas wyłączenia prądu t_w , określany od chwili przekroczenia nastawy wyzwalacza wyłącznika do chwili wyłączenia prądu jest jednym z istotnych parametrów wyłącznika szybkiego. Jest on niezwykle ważny w przypadku wyłączania prądów zwarciovych; im ten czas jest dłuższy, tym większe jest ryzyko uszkodzeń urządzeń w obwodzie, w którym nastąpiło zwarcie.

Aby wyłączyć prąd stały w układzie przedstawionym na rysunku 1a należy zapewnić taki wzrost wartości oporności łuku, aby napięcie łuku (jego charakterystyka) w czasie wyłączenia przekraczało napięcie wynikające z charakterystyki układu [2, 8, 21, 23]. Proces wyłączenia prądu stałego można podzielić na kilka etapów, których czasy trwania zależą od parametrów wyłącznika, obwodu bądź obydwu tych elementów. Na rysunku 1b przedstawiono uproszczone przebiegi prądu i napięcia podczas wyłączenia prądu stałego.



Rys. 1: a) uproszczony schemat obwodu zwarciovego; b) przebiegi prądu zwarciovego i napięcia na zaciskach wyłącznika szybkiego: I_d – nastawa wyłącznika; $I_{cut\ off}$ – maksymalna wartość ograniczona prądu zwarcia; I_{SS} – wartość ustalona prądu zwarcia; i_s – spodziewany prąd zwarcia; t_c – stała czasowa obwodu zwarcia; t_i – czas własny wyłącznika; t_a – czas palenia się łuku; U_{amax} – wartość maksymalna napięcia łuku [21], oznaczenia na podstawie [11]

W klasycznych magnetowdmuchowych wyłącznikach szybkiego prądu stałego, w pierwszym etapie prąd wzrasta do poziomu nastawy wyłącznika I_d . Czas potrzebny do osiągnięcia przez prąd zwarciovą wartości prądu nastawionego jest zależny od stromości narastania tego prądu, tj. od parametrów obwodu zwarciovogo. Od tej chwili rozpoczyna się proces wyłączenia.

Po czasie własnym wyłącznika t_p w chwili t_1 następuje rozwarcie styków i zapalenie łuku o napięciu u_a , którego wartość wynosi:

$$-u_L = \Delta u_a = -L \frac{di_w}{dt} \quad (2)$$

Pod wpływem napięcia łuku następuje odchylenie przebiegu prądu i_w od krzywej wykładniczej prądu i_s . W chwili t_3 następuje ograniczenie prądu i_w do wartości $I_{cut\ off}$. Wówczas równanie (1) można zapisać w postaci:

$$U_d - u_{R3} - u_{a3} = 0 \quad (3)$$

Dalsze zmniejszanie się prądu i_w po chwili t_3 jest możliwe, gdy napięcie łuku wzrasta zapewniając ujemną wartość napięcia na indukcyjności obwodu:

$$u_L = U_d - u_{R4} - u_a < 0 \quad (4)$$

Jak wynika z rysunku 1b napięcie u_L w chwili t_2 ma zwrot przeciwny do napięcia zasilającego U_d , natomiast w chwili t_4 ma zwrot zgodny. Jedynie w chwili t_3 , gdy $i_w = I_{cut\ off}$ wartość napięcia $u_L = 0$.

Czas łukowy t_a jest to czas od chwili utraty styczności styków do momentu zgaszenia łuku. Przy założeniu stałej długości łuku, czas łukowy można wyznaczyć przekształcając wzór (2) do postaci:

$$dt = \frac{-L}{\Delta U} di_w \quad (5)$$

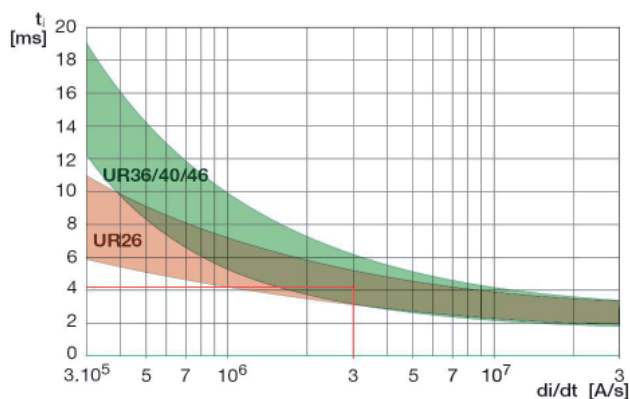
Po scałkowaniu wzoru (5) w granicach od $i_w = i_{w\max}$ do $i_w = 0$ oraz uwzględniając zależności (1) i (2) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} t_a &= L \int_{i_w=i_{w\max}}^{i_w=0} -\frac{di_w}{\Delta u_a} = -L \frac{i_{w\max}}{U_d} \int_{\frac{i_w}{i_{w\max}}=1}^{\frac{i_w}{i_{w\max}}=0} \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i_w}{i_{w\max}}\right) = \\ &= \frac{L}{R} \int_0^1 \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i_w}{i_{w\max}}\right) = t_c t_{aN} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie: $t_c = L/R$ – stała czasowa obwodu,
 t_{aN} – stała gaszenia łuku zależna od konstrukcji wyłącznika.

Czas wyłączenia zwarcia t_w jest sumą czasu własnego t_i i czasu łukowego t_a (rys. 1). Czas własny jest zależny od konstrukcji wyłącznika i stromości narastania prądu. Czas łukowy zależy od właściwości komory łukowej wyłącznika, jak również parametrów obwodu, głównie indukcyjności, w którym pracuje wyłącznik. Z tego względu podanie bezwzględnej wartości czasu wyłączenia nie jest wystarczające do dokładnego scharakteryzowania danego typu wyłącznika. Najlepszym sposobem porównania wyłączników jest przeprowadzenie prób zwarciovych w tym samym obwodzie dla wszystkich typów aparatów.

Zapewne z uwagi na powyższe, większość producentów wyłączników szybkiego nie podaje w swoich materiałach informacyjnych wartości czasów własnych i czasów łukowych [4, 5, 7, 24–30]. Jedynymi wyjątkami od tej reguły jest firma General Electric, która w dokumentacji dla wyłączników typu BWS podaje, że ich czas własny wynosi do 5 ms przy $di/dt \geq 0,5$ kA/ms [3] oraz firma Sécheron podająca w katalogu [6] zależność wartości czasu własnego od di/dt prądu wyzwalającego wyłącznik, którą przedstawiono na rysunku 2.

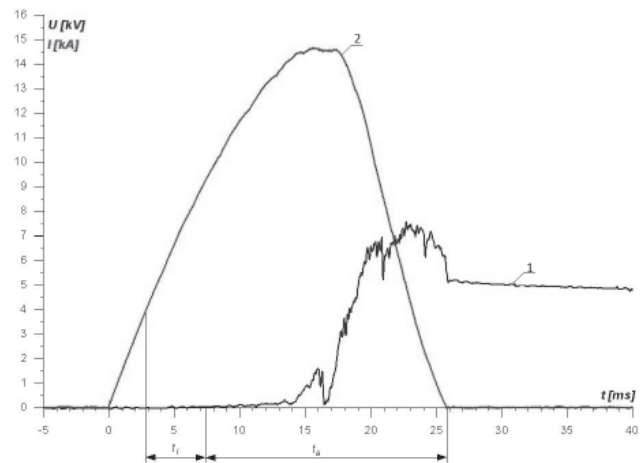


Rys. 2. Zależność wartości czasu własnego t_i od stromości narastania prądu di/dt wyzwalającego wyłączniki firmy Sécheron [6]

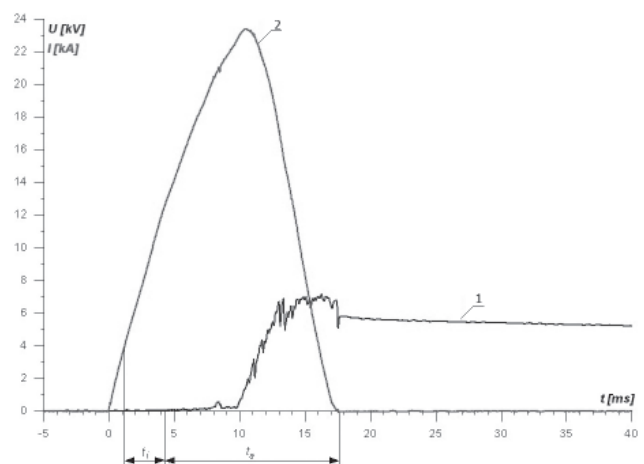
Czasy własne i czasy łukowe wyłączników szybkiego w przypadku wyłączenia prądów zwarciovych o dużej stromości narastania mają stosunkowo małe wartości. W przypadku wyłączników typu BWS czasy własne nie przekraczają 5 ms, a łukowe 20 ms. Przykładem tego mogą być przebiegi pokazane na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg napięcia na wyłączniku oraz prądu zwarciovego, którego $di/dt \approx 1,5$ kA/ms, w przypadku zwarcia bliskiego zasilanego z jednego zespołu prostownikowego, na rysunku 4 pokazane są przebiegi zarejestrowane w czasie zwarcia bliskiego zasilanego przez trzy zespoły prostownikowe, przy $di/dt \approx 3,2$ kA/ms.

Innym czasem, który charakteryzuje wyłącznik szybki prądu stałego jest czas łukowy zestykowy (t_s). Jest to czas mierzony od chwili otwarcia styków wyłącznika (t_1 na rys. 1b) do chwili osiągnięcia wartości

maksymalnej przez wyłączany prąd zwarciovym (t_3 na rys. 1b). Norma PN-EN 50123-2 11 nie charakteryzuje oraz nie obejmuje swoim zakresem tego parametru. W czasie łukowym zestykowym napięcie łuku jest na tyle niskie, że powoduje ograniczenie wyłączanego prądu w bardzo małym stopniu.



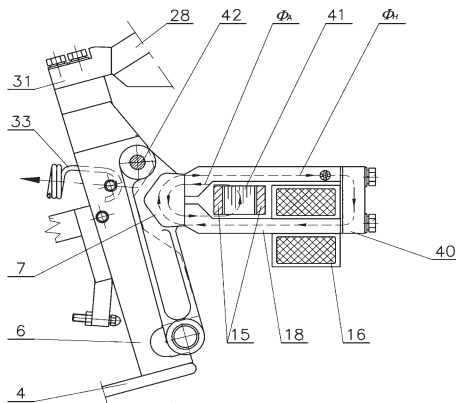
Rys. 3. Przebiegi: (1) napięcia, (2) prądu zwarciovego wyłączanego przez wyłącznik typu BWS przy $di/dt \gg 1,5$ kA/ms [12]



Rys. 4. Przebiegi: (1) napięcia, (2) prądu zwarciovego wyłączanego przez wyłącznik typu BWS przy $di/dt \gg 3,2$ kA/ms [12]

3. Zasada działania wyłącznika BWS

Magnetowdmuchowy wyłącznik szybki prądu stałego typu BWS jest wyłącznikiem z przychwytym magnetycznym. Samoczynne otwarcie wyłącznika typu BWS następuje, gdy strumień elektromagnetyczny F_A , wytworzony przez prąd płynący przez cewkę wyzwalacza nadprądowego 15, dostatecznie osłabi strumień magnetyczny cewki trzymającej F_H . Konstrukcję układu trzymającego i wyzwalacza nadprądowego przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Konstrukcja układu trzymającego i wyzwalającego wyłącznika szybkiego typu BWS z prychwytem magnetycznym: 4) złącze podatne; 6) ramię styku ruchomego; 7) zwora przychwyty magnetycznego; 15) cewka wyzwalacza nadprądowego; 16) cewka trzymająca; 18) rdzeń elektromagnesu trzymającego; 28) styk stały; 31) styk ruchomy; 33) sprężyny stykowe; 40) rdzeń elektromagnesu trzymającego; 41) rdzeń cewki wyzwalacza nadprądowego; 42) oś styku ruchomego; F_A) strumień wyzwalający; F_H) strumień trzymający [1]

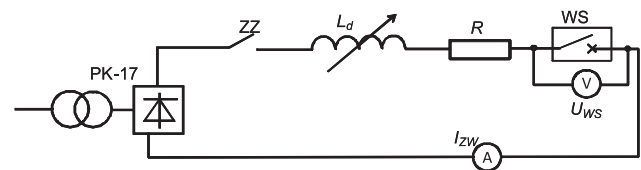
Według dokumentacji wyłącznika [1], w stanie zamkniętym zwora 7 przylega szczelnie do rdzenia elektromagnesu trzymającego 18. Cewka trzymająca 16 wytwarza strumień magnetyczny F_H przepływający przez rdzeń 18, 40 i zworę 7. Przez cewkę wyzwalacza nadprądowego 15 przepływa prąd główny (lub jego część w przypadku wyłącznika z bocznikiem indukcyjnym), który wytwarza strumień F_A przechodzący przez zworę, jednakże o kierunku przeciwnym do kierunku przepływu strumienia trzymającego F_H . Różnica tych strumieni określa wartość siły trzymania zwory 7, która jest odciągana przez sprężynę 33. Jeżeli wartość siły trzymania spadnie poniżej wartości siły pochodzącej od sprężyny 33, to nastąpi oderwanie zwory 7 od rdzenia 18 i tym samym otwarcie styków.

Dla wyższych zakresów wyzwalacza nadprądowych stosowany jest bocznik indukcyjny. Powoduje on rozptył prądu w stanie ustalonym zależny od rezystancji toru wyzwalacza 15 i bocznika, w stanie dynamicznego narastania prądu zaś zależy od ich indukcyjności. Prąd zadziałania wyzwalacza nadprądowego 15 ustala się za pomocą ruchomego rdzenia wyzwalacza 41, regulowanego przez pokrętko.

Wyłącznik BWS jest wyłącznikiem spolaryzowanym. Oznacza to, że samoczynne otwarcie wyłącznika wskutek przepływu prądu większego od prądu nastawionego na wyzwalaczu nadprądowym 15 ma miejsce tylko wtedy, gdy kierunek przepływu prądu głównego odpowiada biegunowości oznaczonej na zaciskach wyłącznika, a napięcie cewki trzymającej 16 ma biegunowość zgodną z oznaczeniami na jej zaciskach. Przy przepływie prądu w odwrotnym kierunku, lub przy zmianie biegunowości napięcia zasilania cewki trzymającej, wyłącznik nie otworzy się samoczynnie.

4. Badania

Badania przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 6. Nastawa wyłącznika wynosiła $I_d = 1500$ A. Wartości rezystancji i indukcyjności w obwodzie były dobierane tak, aby w każdej próbie otrzymać zbliżoną wartość stałej czasowej obwodu. Oznacza to, że wraz ze wzrostem spodziewanego ustalonego prądu zwarcia I_{SS} zwiększała się stromość narastania prądu zwarciego di/dt .



Rys. 6. Schemat obwodu pomiarowego

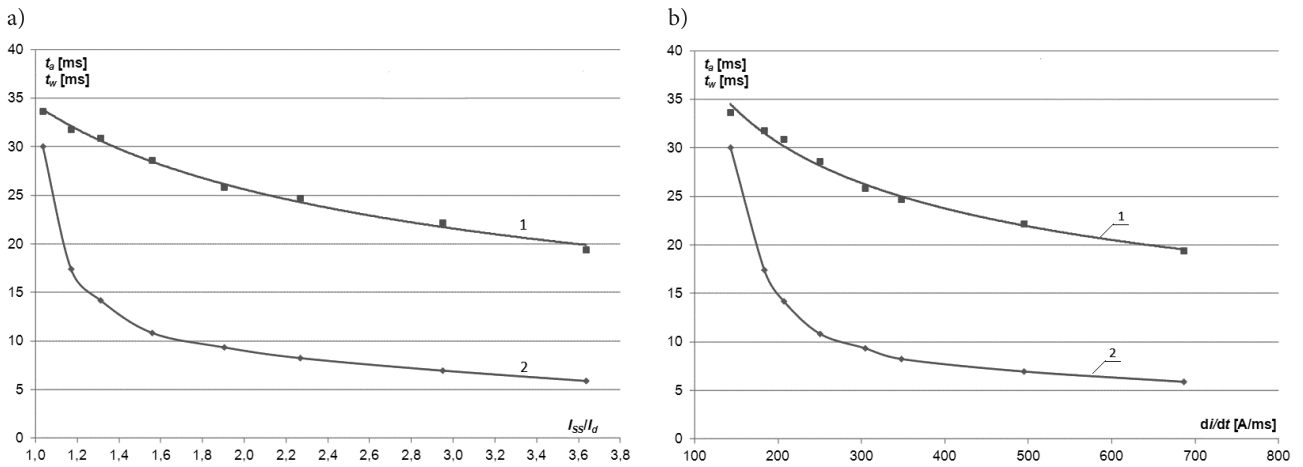
Przeprowadzono dwie serie badań: przy stałej czasowej $t_c \approx 16,4$ ms oraz $t_c \approx 9,2$ ms. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięcia na wyłączniku oraz prądu zwarciego, dla każdej próby określono czas własny wyłącznika t_i i czas palenia się łuku t_a . Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono dla każdej stałej czasowej obwodu charakterystyki czasu własnego i czasu łukowego w funkcji stromości narastania prądu zwarciego oraz wartości względnej przekroczenia nastawy wyłącznika przez spodziewany prąd zwarcia (I_{SS}/I_d). Charakterystyki te przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Przebiegi w funkcji I_{SS}/I_d oraz di/dt mają odpowiednio ten sam kształt z uwagi na to, że przy zachowaniu stałej czasowej obwodu, wzrost wartości spodziewanego prądu zwarcia powoduje wzrost wartości di/dt .

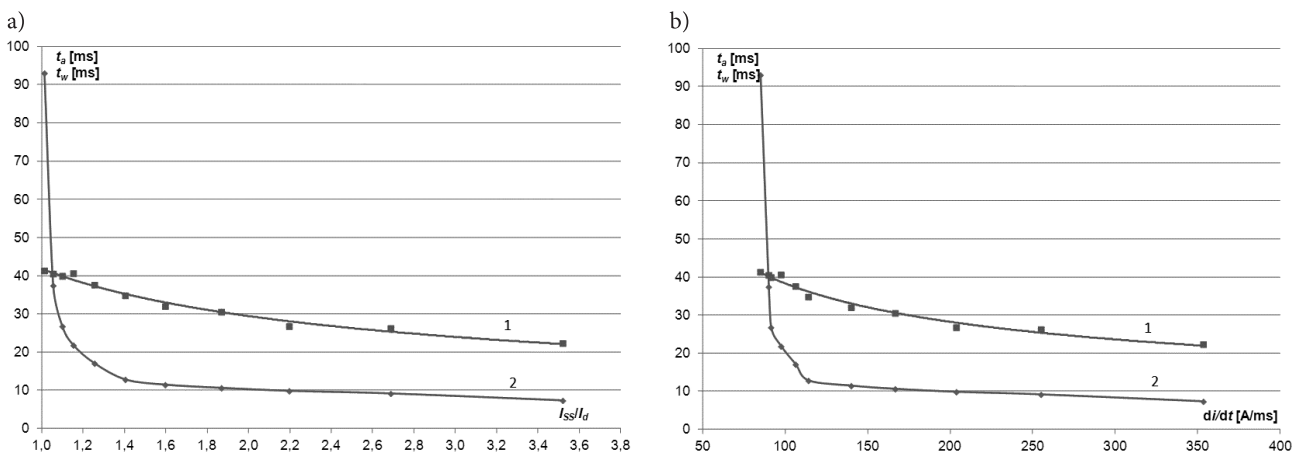
Przykładowe przebiegi prądu wyłączanego oraz napięcia na wyłączniku przedstawiono na rysunkach 9 i 10 dla stałej czasowej obwodu $t_c \approx 9,2$ ms oraz na rysunkach 11 i 12 dla $t_c \approx 16,4$ ms.

Na podstawie przebiegów zarejestrowanych podczas badań wyznaczono czas łukowy zestykowy. Na rysunku 13 przedstawiono przykładowy przebieg wyłączanego prądu oraz napięcia na wyłączniku, na którym pokazano czas łukowy zestykowy t_s . W celu uwidocznienia małej wartości napięcia łuku zaraz po otwarciu styków przebieg napięcia na wyłączniku ograniczono do 800 V.

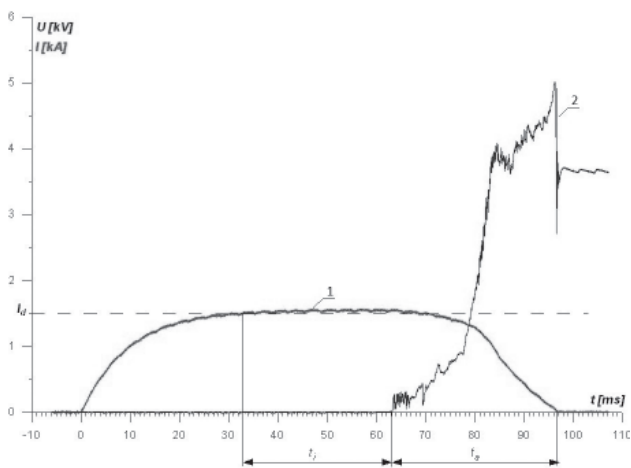
Analiza zarejestrowanych przebiegów zwarciegich wykazała, że czas łukowy zestykowy t_s ma w przybliżeniu stałą wartość dla prądów spodziewanych $I_{SS} > 1,2I_d$. W przypadku wyłącznika BWS wartość czasu łukowego zestykowego t_s zawierała się w granicach 9,5–12,5 ms, co oznacza, że ten czas jest porównywalny, a nawet większy od czasu własnego wyłącznika dla wymienionego zakresu wartości wyłączanego prądu. Dla mniejszych wartości prądu spodziewanego – poniżej $1,2I_d$, czas łukowy zestykowy miał wartości od 5,4 ms, a więc znacznie mniejsze od czasu własnego wyłącznika.



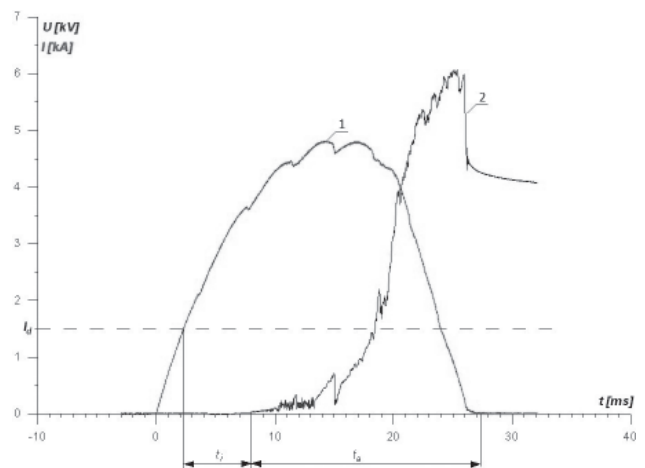
Rys. 7. Zależność czasu łukowego (1) i czasu własnego (2) wyłącznika typu BWS od stosunku prądu spodziewanego I_{SS} do wartości nastawy wyzwalacza I_d (a) oraz od stromości narastania prądu (b) przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 9,2$ ms [20]



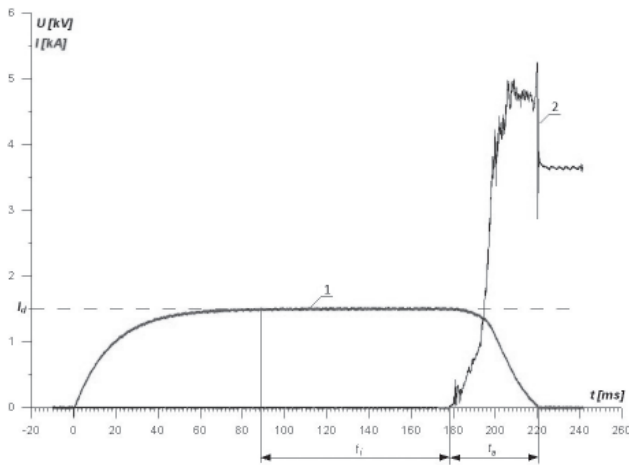
Rys. 8. Zależność czasu łukowego (1) i czasu własnego (2) wyłącznika typu BWS od stosunku prądu spodziewanego I_{SS} do wartości nastawy wyzwalacza I_d (a) oraz od stromości narastania prądu (b) przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 16,4$ ms [20]



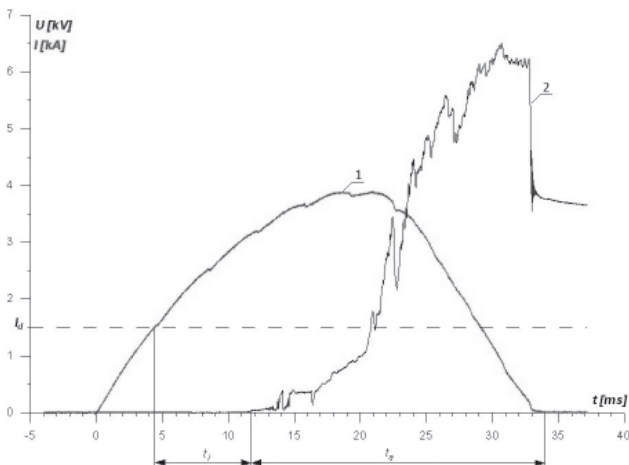
Rys. 9. Przebiegi: (1) wyłączanego prądu $I_{SS} = 1553$ A ($I_{cut\ off} = 1550$ A), (2) napięcia na wyłączniku przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 9,2$ ms [20]



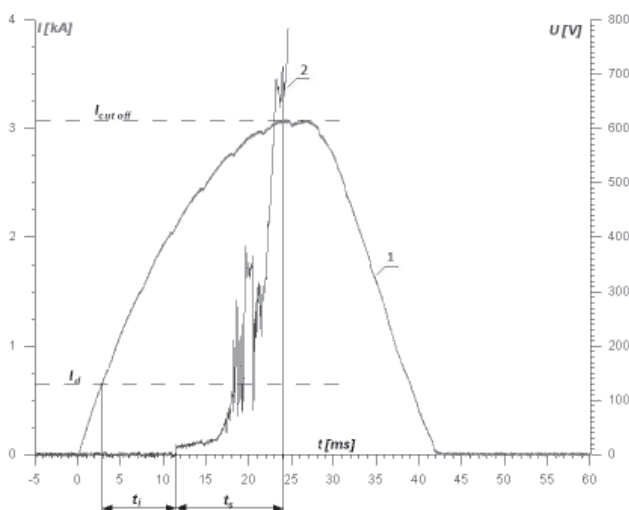
Rys. 10. Przebiegi: (1) wyłączanego prądu $I_{SS} = 5453$ A ($I_{cut\ off} = 4825$ A), (2) napięcia na wyłączniku przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 9,2$ ms [20]



Rys. 11. Przebiegi: (1) wyłączanego prądu $I_{SS} = 1520$ A ($I_{cut\ off} = 1508$ A), (2) napięcia na wyłączniku przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 16,4$ ms [20]



Rys. 12. Przebiegi: (1) wyłączanego prądu $I_{SS} = 5278$ A ($I_{cut\ off} = 3879$ A), (2) napięcia na wyłączniku przy stałej czasowej obwodu $t_c \approx 16,4$ ms [20]



Rys. 13. Przebiegi: (1) wyłączanego prądu i (2) napięcia na wyłączniku ilustrujące wartości czasu własnego t_i i czasu łukowego zestykowego t_s

Czas łukowy zestykowy tylko w małym stopniu jest zależny od stałej czasowej obwodu. Zmiana wartości stałej czasowej obwodu z $t_c \approx 16,4$ ms na $t_c \approx 9,2$ ms spowodowała skrócenie czasu t_s o około 1 ms.

5. Podsumowanie

Czas własny t_w wyłącznika zależy od jego konstrukcji i zasady wyzwalania. Samoczynne otwarcie wyłącznika typu BWS następuje, gdy strumień elektromagnetyczny wytworzony przez prąd płynący przez cewkę wyzwalacza nadprądowego F_A dostatecznie osłabi strumień magnetyczny cewki trzymającej F_H . Im stromość narastania prądu di_w/dt jest mniejsza, tym dłużej trwa wytworzenie dostatecznej wartości strumienia F_A .

W wyłączniku szybkim, jako urządzeniu mechanicznym, występują różnego rodzaju opory ruchu. Dodatkowo przepływ prądu przez styki wyłącznika powoduje ich punktowe rozgrzanie i nadtopienie, czego konsekwencją jest „zgrzanie” się małej powierzchni styków. Przy bardzo małej różnicy strumienia trzymającego F_H i cewki wyzwalacza F_A , opory ruchu oraz nadtapianie styków znacząco wydłuża czas własny, co jest wyraźnie widoczne na rysunkach 7 i 8. Przy wyższych wartościach prądu oraz większej wartości di_w/dt zjawiska te przestają mieć tak duży wpływ na wartości czasu własnego t_w , a jego zmiany stają się niemal liniowe w funkcji wartości wyłączanego prądu i jego stromości narastania.

Analizując i porównując wartości czasu łukowego t_a przedstawione na rysunkach 7 i 8 można stwierdzić, że czas łukowy jest zależny od wartości wyłączanego prądu oraz stałej czasowej obwodu t_c . Zmniejszenie wartości stałej czasowej obwodu t_c o około 44% powoduje skrócenie czasu łukowego t_a o ponad 71%, gdyż aby wyłączyć prąd stały należy zapewnić taki wzrost wartości oporności łuku, żeby napięcie łuku (jego charakterystyka) w czasie wyłączenia przekraczało napięcie wynikające z charakterystyki układu. Ze wzorów (1) i (2) wynika, że napięcie łuku jest zależne od wartości indukcyjności w obwodzie. Z kolei wzory (5) i (6) wskazują wprost, że czas łukowy t_a zależy od stałej czasowej obwodu t_c , czyli wartości indukcyjności w nim zawartej.

Wzrost wartości spodziewanego prądu zwarcia I_{SS} przy zachowaniu stałej wartości t_c wymusza wzrost stromości narastania prądu di_w/dt . Oznacza to, że nawet przy stałej wartości czasu własnego t_w (a tak nie jest), wartość prądu i_w w jednostce czasu osiągnie większą wartość. Siła wytworzona przez cewkę wydmuchową wzrasta z kwadratem wartości prądu, co znacząco wpływa na szybsze wydłużenie łuku i jego zgaszenie, czyli spadek wartości czasu łukowego t_a .

Wynika stąd, że czas własny i czas łukowy wyłącznika nie są parametrami stałymi. Zależą one od para-

metrów obwodu i wartości wyłączanego prądu, a przy małych wartościach prądu, zbliżonych do poziomu wyzwania, również od stanu technicznego układu mechanicznego wyłącznika.

Istotnym czynnikiem wpływającym na szybkość wyłączania prądu jest wartość czasu łukowego zestykowego. Czas ten w bardzo małym stopniu jest zależny od stałej czasowej obwodu oraz wartości prądu zwarcowego, w przeciwieństwie do czasu własnego. Oznacza to, że z uwagi na zmniejszanie się czasu własnego wyłącznika wraz ze wzrostem wartości wyłączanego prądu, czas łukowy zestykowy może być porównywalny, a w przypadku dużych wartości wyłączanego prądu znacznie większy od czasu własnego.

Literatura

1. Dusza J.: *Dokumentacja Techniczno-Ruchowa. Wyłączniki szybkie prądu stałego BWSe z komorą KBD -3/50b*, DTR Nr: APN467946, GE Power Controls Sp. z o.o. Bielsko-Biała 2013.
2. Dzierzbicki S.: *Aparaty elektryczne*, PWN, Warszawa 1970.
3. Katalog – *Wyłączniki szybkie prądu stałego BWS*, GE Power Controls Sp. z o.o. Bielsko-Biała 2013.
4. Katalog *DC High Speed Circuit Breakers*, Microelettrica Scientifica S.p.A., Mediolan 2012.
5. Katalog *High Speed DC Circuit Breaker Gerapid 2607, 4207, 6007, 8007 with arc chute 1X2, 1X4, 2X2, 2X3, 2X4*. GE Consumer & Industrial GmbH, Neumünster 2012.
6. Katalog *High-speed DC circuit-breakers for fixed installations (EN / IEC standards) – Type UR*. Sécheron SA, Genewa 2014.
7. Katalog *Выключатели автоматические быстросрабатывающие постоянного тока серии ВАБ-206. ДАК-энергетика*, Днепропетровск.
8. Klajn A.: *Właściwości dyfuzyjnego wyładowania łukowego w próżni w warunkach wymuszonego wyłączania prądu*, Prace Naukowe Instytutu Energoelektroniki Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
9. Maciołek T., Mierzejewski L., Szela A.: *Wyłączanie zwarć w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy*, Technika Transportu Szynowego, nr 3/2001.
10. Mierzejewski L., Szela A.: *Badania zwarć i przepięć w obwodach trakcji elektrycznej prądu stałego z transformacją jednostopniową napięcia 110/3 kV*, IV Międzynarodowa Konferencja MET'99.
11. PN-EN 50123-2:2003: *Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Wyłączniki prądu stałego*.
12. Przybylska M. i inni: *Badania wyłącznika BWS*, Praca IK nr 3902/12, Warszawa 2012.
13. Przybylska M., Rojek A.: *Próby zdolności łączeniowej prądów zwarcowych wyłącznika typu DCN*, Praca CNTK nr 3251/12, Warszawa 2007.
14. Przybylska M.: *Badanie wyłącznika szybkiego prądu stałego typu Gerapid 4207 1X2, 4200A, 900V*, Praca IK nr 5192/12, Warszawa 2012.
15. *Railway Applications – High Speed DC Circuit Breakers & Solutions*. GE Power Controls Sp. z o.o., Bielsko-Biała 2013.
16. Rojek A., Borsiak J.: *Wyniki badań łączalności prądów zwarcowych ultraszybkich wyłączników próżniowych typu DCN i DCN-L*, XIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEM-TRAK 2008, Zakopane 2008.
17. 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.
18. Rojek A., Sochoń A., Wadas Z.: *Badania zdolności łączeniowej wyłącznika szybkiego typu BWS-50 w celce rozdzielnic prądu stałego typu RPS/K*, CNTK, Warszawa 1999.
19. Rojek A., Sochoń A., Wadas Z.: *Badania zdolności łączeniowej wyłącznika szybkiego typu BWS-50 w kontenerowej rozdzielnic prądu stałego typu KRWN-3*, CNTK, Warszawa 1999.
20. Rojek A.: *Badania łączalności prądów przez wyłączniki szybkie prądu stałego stosowane w Polsce przy różnych parametrach obwodu prądowego*, Praca IK nr 8801/12, Warszawa 2012.
21. Wójcik F.: *Analiza możliwości poprawy skuteczności działania wyłączników magnetowydmuchowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, nr 5/2011.
22. Wójcik F.: *Ultraszybkie wyłączanie silnoprądowych obwodów prądu stałego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 1071, Rozprawy Naukowe, Z. 396, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010.
23. Wróblewski L.: *Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.

Źródła Internetowe

23. www.gepowercontrols.com [dostęp: 01.12.2015 r.].
24. www.icpe.ro [dostęp: 10.12.2015 r.].
25. www.microelettrica.com [dostęp: 01.12.2015 r.].
26. www.secheron.com [dostęp: 01.12.2015 r.].
27. www.sub.cz/mep-postrelmov/ [dostęp: 10.12.2015 r.].
28. www.uetm.ru [dostęp: 10.12.2015 r.].
29. www.woltan.com.pl [dostęp: 01.12.2015 r.].

Switching-off Time of Electromagnetic Blow-out High-speed DC Circuit Breaker

Summary

The high-speed circuit breakers are an essential safeguard against the flow of an excessive current in the circuit overhead line and vehicles being powered by it. The short circuit currents must be switched off as soon as possible to minimize the risk of damage, protected by circuit breakers, elements of an electric traction power supply system.

The switching-off time is one of the main parameters of high-speed circuit-breaker. This time is specified from moment of exceeding of the circuit breaker tripping level by the current until cut off the current. The scope of high-speed DC circuit breakers tests for compliance with standards includes determining this time only for large currents, greatly exceeding the operating currents, and the currents of the very small – critical currents. However, during exploitation of high-speed circuit-breakers many faults clearance occurs by distant short-circuits or overloads.

In order to determine the actual switching times of currents, which values are comparable with the tripping level researches and tests were performed for different values of the time constant, which were base of specifying value of arcing and opening time, depending on the value of breaking currents. The study involved electromagnetic blow-out high-speed DC circuit breaker BWS type, which is the most common breaker in traction substations and sectioning cabins in Poland.

Keywords: high-speed circuit-breaker, short-circuit, opening time, arcing time

Времена выключения магнито-продувочных быстродействующих выключателей постоянного тока

Резюме

Быстродействующие выключатели являются основным средством защиты от чрезмерного значения тока в цепи контактной сети и питанных им подвижных единиц. Ток короткого замыкания должен быть отключен в максимально коротком времени, чтобы сократить риск повреждения защищаемых выключателями элементов системы контактной связи.

Одним из главных параметров быстродействующего выключателя является время отключения тока, определяемое с момента пересечения током настройки триггера выключателя до момента отключения тока. Диапазон исследований быстродействующих выключателей постоянного тока на соответствие нормам включает определение этого времени только для высоких значений тока, значительно превышающих уровень рабочего тока, а также для очень низкого значения тока – критического тока. Однако во время эксплуатации быстродействующих выключателей большинство отключений выступает впоследствии далекого короткого замыкания или перегрузки.

Для определения фактического времени отключения тока о значении сравнимым с уровнем настройки проведено исследования для разных значений постоянной времени цепи, в результате которых определено время горения дуги и собственное время выключателя в зависимости от значения отключаемого тока. Исследованиям подвергал магнито-продувочный выключатель постоянного тока типа BWS, который чаще всего используется в тяговых подстанциях и постах секционирования в Польше.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель, короткое замыкание, собственное время, время горения дуги