

Marek Bartosik, Ryszard Lasota, Franciszek Wójcik

Nowa rodzina synchronizowanych wyłączników próżniowych SWT do systemów trakcji kolejowej zasilanych wysokimi napięciami przemiennymi

Zwiększanie przewozów pociągami dużych prędkości jest znacznie szybsze, niż innymi środkami transportu. Dzięki sukcesywnie rozszerzanej sieci szybkich przewozów, udział kolei w rynku transportowym zwiększa się, stając coraz ważniejszy i wpływający na wzrost gospodarczy składnik międzynarodowego i krajowych systemów transportowych. Takie są dotychczasowe doświadczenia większości państw Unii Europejskiej i strategiczne założenia rozwoju transportu, na co mają również wpływ walory ekologiczne transportu kolejowego.

W ostatnich latach polityka transportowa Polski preferowała transport samochodowy, który bieżąco przynosi do budżetu wysokie dochody podatkowe. Brak nowoczesnej, szybkiej kolei będzie w przyszłości stanowił poważną barierę rozwoju gospodarczego kraju. Dlatego obecnie kształtują się szeroko zakrojone koncepcje uruchomienia kolei dużych prędkości. Prowadzone są zaawansowane prace studialne nad budową nowych, wydzielonych linii kolei dużych prędkości (do 350 km/h), najpierw na trasie Warszawa – Łódź – węzeł Kalisz – Poznań – granica zachodnia (włączenie do europejskiego systemu kolei dużych prędkości *via* Berlin), z odgałęzieniem węzeł Kalisz – Wrocław. Łączną długość linii, zasilanej napięciem przemiennym 25 kV 50 Hz, można oszacować na ponad 500 km.

Polskie koleje dużych prędkości, chcąc skutecznie konkurować na rynku europejskim, będą musiały pokonać przeszkody techniczne, wynikające z sąsiedowania dwóch odmiennych systemów zasilania sieci trakcji kolejowej – planowanego w Polsce 25 kV 50 Hz i niemiecko-szwajcarskiego 15 kV 16,7 Hz. Pociągi eksploatowane na liniach zagranicznych w ruchu pasażerskim i towarowym powinny być przystosowane do napięć używanych w obydwóch systemach, tj. pewna liczba lokomotyw powinna być dwusystemowa.

Podjęcie decyzji wykonawczych w tym zakresie i przystąpienie do realizacji takiego programu powinno w jak największym zakresie stać się impulsem rozwojowym dla polskich jednostek naukowych i podmiotów gospodarczych, pracujących na rzecz rozwoju transportu kolejowego, a jak największa część aparatów trakcyjnych i wyposażenia powinna być wytwarzana przez polskich producentów, na poziomie w pełni odpowiadającym standardom europejskim.

Jednym z najważniejszych aparatów elektrycznych, o podstawowym znaczeniu dla niezawodności ruchu kolejowego oraz bezpieczeństwa pasażerów, są wyłączniki trakcyjne. Stałe zwiększa-

nie zadań przewozowych, stawianych kolejowemu transportowi pasażerskiemu i towarowemu, stwarza coraz większe wymagania systemom zasilania trakcji kolejowej, a więc i wyłącznikom podstacijnym oraz taborowym.

W obwodach trakcyjnych prądu przemiennego stosowane są zazwyczaj jednofazowe wyłączniki próżniowe o tradycyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i relatywnie małej szybkości działania. W coraz mniejszym stopniu mogą spełniać stawiane im współcześnie wymagania. Dotyczy to zarówno spodziewanej granicznej zdolności wyłączalnej oraz trwałości łączeniowej w warunkach roboczych, przeciążeniowych oraz zwarciovych, jak i przepięć łączeniowych, a także wyposażenia wyłączników, zwłaszcza wyzwalaczy lub przekaźników nadprądowych. Konieczna jest zdecydowana poprawa selektywności wyłączników, żeby zwarcia w pojazdach były zawsze wyłączane przez wyłączniki pojazdowe, a nie przez zbyt szybko uruchamiane wyłączniki podstacyjne, wyłączające całe odcinki trakcyjne.

Prócz tego nadal zwiększają się, bardzo już wysokie, wymagania niezawodnościowe, wynikające z międzynarodowego charakteru transportu kolejowego oraz konieczności zapewnienia wysokiego bezpieczeństwa i płynności ruchu. W świetle obowiązujących norm konieczne jest stosowanie w wyłącznikach konstrukcji i materiałów neutralnych, ze względu na ochronę środowiska naturalnego. Na to nakładają się szczególne wymagania europejskie z zakresu interoperacyjności transportu kolejowego. W sąsiadujących systemach AC o napięciach 25 kV i 15 kV, w przypadku eksploatacji lokomotyw dwusystemowych, racjonalne wydaje się zastosowanie jednego wyłącznika, zdolnego do pracy w obu systemach.

Na świecie nie są obecnie produkowane nowoczesne wyłączniki, w pełni odpowiadające takim wymaganiom. Istnieje zatem pilna potrzeba opracowania nowych wyłączników trakcyjnych prądu przemiennego, zwanych dalej SWT, spełniających wszystkie współczesne wymagania, zdolnych do ekonomicznego i technicznego konkurowania z istniejącymi na rynkach światowych konstrukcjami.

Współczesne uwarunkowania technologiczne, zwłaszcza szybki postęp w zakresie technologii próżniowych, materiałowych i elektronicznych, stwarzają nowe możliwości rozwiązania tego problemu. Podjęcie – z niezbędnym wyprzedzeniem – prac rozwojowych w zakresie aparatury trakcyjnej, jest warunkiem koniecznym uzyskania w tym zakresie poziomu technicznego i technologicznego, odpowiadającego współczesnym wymaganiom. Polska nauka i polski przemysł powinny być aktywnymi uczestnikami tego procesu.

Wymagania techniczne i dane znamionowe wyłączników SWT

W przedstawionych systemach trakcyjnych prądu przemiennego występują określone wymagania napięciowe, częstotliwościowe i prądowe dla wyłączników SWT. Za podstawę do sprecyzowania wymagań przyjęto notyfikowane przez Polskę odpowiednie normy i decyzje Komisji Europejskiej dotyczące specyfikacji technicznej dla interoperacyjności tzw. podsystemu energia transeuropejskiego systemu kolei. Wobec braku szczegółowych danych projektowych, wzięto także pod uwagę dane techniczne znanych europejskich kolei dużych prędkości, gdzie największe moce znamionowe pociągów dwugłowicowych (tj. dwie głowice napędowe na końcach pociągu) wynoszą (TGV II i III generacji) 8,8 MW (Thalys), 9,6 MW (POS) i 12,2 MW (Eurostar).

Wymagania napięciowe dla wyłączników SWT

Zestawienie warunków napięciowych dla systemów 25 kV 50 Hz oraz 15 kV 16,7 Hz podano w tabeli 1.

Tabela 1

Napięcia znamionowe, dopuszczalne graniczne wielkości napięć oraz czasy ich trwania

Częstotliwość napięcia systemu	f [Hz]	50	16,7
Napięcie znamionowe	U_n [V]	25 000	15 000
Najwyższe napięcie długotrwałe	U_{max1} [V]	27 500	17 250
Najniższe napięcie długotrwałe	U_{min1} [V]	19 000	12 000
Najwyższe napięcie krótkotrwałe	U_{max2} [V]	29 000 ¹⁾	18 000 ¹⁾
Najniższe napięcie krótkotrwałe	U_{min2} [V]	17 500 ²⁾	11 000 ²⁾

¹⁾ Czas trwania napięcia o wielkości między U_{max1} i U_{max2} nie powinien przekraczać 5 min.

²⁾ Czas trwania napięcia o wielkości między U_{min1} i U_{min2} nie powinien przekraczać 2 min.

Wymagania szczegółowe dla napięcia pracy U sieci trakcyjnej (rozumianego jako rzeczywiste napięcie na pantografie), będącego dla wyłącznika napięciem łączeniowym w warunkach roboczych, są następujące:

- w normalnych warunkach napięcie pracy U powinno być zawarte w granicach $U_{min1} \leq U \leq U_{max1}$;
- w warunkach odbiegających od normy dopuszczalne są wielkości U w zakresie $U_{min2} \leq U \leq U_{max2}$;
- po każdym wystąpieniu U_{max2} powinno nastąpić obniżenie U na czas nieokreślony do wielkości $U \leq U_{max1}$;
- w warunkach odbiegających od normy U_{min2} jest dolną granicą napięcia U , dla którego przewiduje się funkcjonowanie pociągów (U_{min2} jest najniższym napięciem eksploatacyjnym);
- napięcie szyny zbiorczej w podstacji przy otwartych wyłącznikach nie powinno być większe od U_{max1} ;
- stałe lub regulowane napięcie zadziałania U_{zp} przekaźników lub wyzwalaczy podnapięciowych (stacjonarnych lub pokładowych) powinno być zawarte w granicach $0,85 U_{min2} \leq U_{zp} \leq 0,95 U_{min2}$;
- wyłączniki pojazdowe SWT powinny samoczynnie otwierać się w ciągu trzech sekund od zaniku napięcia na pantografie;
- w trakcie przywracania zasilania wyłączniki pojazdowe SWT nie powinny zamykać się przed upływem trzech sekund od pojawienia się napięcia na pantografie (zwłoka czasowa podczas przywracania zasilania umożliwia sprawdzenie, czy na linii nie występują zwarcia nieprzemijające).

Są to wymagania determinujące zakresy parametrów nastawczych układu sterowania i blokad wyłączników SWT.

Dane te pozwalają stwierdzić, że wyłącznik SWT obsługujący wszystkie systemy trakcyjne AC powinien mieć napięcie znamionowe izolacji 30 kV oraz dwuzakresowy system sterowania i blokad działający w zakresie napięcia 25 kV 50 Hz lub 15 kV 16,7 Hz, z ewentualnymi wykonaniami, specjalnymi dla innych wielkości napięć i częstotliwości.

Wymagania prądowe dla wyłączników SWT

Wielkości znamionowych prądów ciągłych oszacowano przy założonej mocy maksymalnej pobieranej przez pojazd. Różnią się one ze względu na zróżnicowane moce pojazdów, w zależności od rodzaju ruchu, linii lub pociągu, liczby pociągów na odcinku itp. Prąd znamionowy ciągły wyłącznika pojazdowego można zatem oszacować na 250 A przy 25 kV 50 (60) Hz lub 400 A przy 15 kV 16,7 Hz. Maksymalne prądy, pobierane dorywczo przez pociągi, mogą być większe. Na podstawie tych przesłanek prądy znamionowe wyłączników SWT zestawiono w tabeli 2, w której zamieszczone zostały również największe wielkości prądu zwarciego występujące w określonym systemie trakcyjnym.

Tabela 2

Znormalizowane wielkości prądów znamionowych ciągłych wyłączników SWT

System zasilania trakcji	Wielkości znamionowych prądów ciągłych [A]			Maks. prąd zwarcia do szyny [kA]	Wielkości prądów
	opcjon.	podst.	rozwojow.		
25 kV 50 Hz	400	250 ¹⁾ , 630 ²⁾	800	15 ³⁾	potrzebne
15 kV 16,7 Hz	630	400	800, 1250	40	
Główny człon łączeniowy SWT	630	400 ¹⁾ , 800 ²⁾	1250	40	przyjęte ⁴⁾

1) Wyłącznik pojazdowy.

2) Wyłącznik podstawiczny.

3) Poprzednio dopuszczalna była zwykle wielkość 12 kA.

4) Znamionowe prądy ciągłe i zdolność wyłączalna są takie same przy napięciach 25 kV 50 Hz i 15 kV 16,7 Hz.

Graniczna zwarciova zdolność wyłączalna wyłączników SWT nie może być mniejsza od maksymalnego prądu zwarcia, jaki może wystąpić w określonym systemie trakcyjnym. Wielkości prądów zwarciowych podane w tabeli 2 są zarazem dla wyłączników SWT niezbędnymi granicznymi zdolnościami wyłączalnymi przy danym napięciu.

Wybrane wymagania eksploatacyjne dla wyłączników SWT

Wymagania eksploatacyjne dotyczące między innymi przejazdów przez sekcje separacji międzyfazowej, automatycznego ponownego załączania, koordynacji zabezpieczeń (tj. selektywności działania wyłączników) etc. będą spełniane przez wyłączniki SWT zgodnie z obowiązującymi przepisami.

1. Przejazdy pociągu przez sekcje separacji międzyfazowej

Podczas przejazdu z jednego odcinka do sąsiadującego z nim drugiego, o innej fazie zasilania, pociągi nie mogą powodować zwierania tych dwóch odcinków. Odcinki zasilane z różnych faz są łączone za pomocą tzw. sekcji separacji. Nadto w systemie trakcyjnym 15 kV 16,7 Hz są dwa rodzaje zasilania: scentralizowane i zdecentralizowane. Przy zasilaniu scentralizowanym energia elektryczna dostarczana jest z dwóch źródeł – z kolejowej dwufazowej sieci energetycznej o napięciu 2×110 kV 16,7 Hz, transformowanym na 15 kV 16,7 Hz, lub z krajowej trójfazowej sieci energetycznej o napięciu 3×110 kV 50 Hz, transformowanym na

15 kV 50 Hz i przetwarzanym na 16,7 Hz. Przy zasilaniu zdecentralizowanym energia elektryczna dostarczana jest z krajowej trójfazowej sieci energetycznej 3×110 kV 50 Hz w bardziej skomplikowany sposób, po przetransformowaniu na napięcie pośrednie odpowiednie dla zasilania trójfazowego silnika synchronicznego, przekształceniu za pomocą układu złożonego z napędzanej tym silnikiem (poprzez sztywny sprzęg) jednofazowej prądnicy o częstotliwości 16,7 Hz, a następnie przetransformowaniu na napięcie 15 kV 16,7 Hz. Ponieważ napięcia zasilania w systemie scentralizowanym i zdecentralizowanym nie są ze sobą synchronizowane, odcinki trakcyjne zasilane z różnych systemów również muszą być łączone poprzez sekcje separacji.

We wszystkich tych lub podobnych przypadkach, sekwencje niezbędnych operacji łączeniowych wyłączników SWT podczas przejazdów przez sekcje separacji zależą od typu zasilania i kierunku przejazdu, a także od budowy i długości sekcji separacji, rozmieszczenia pantografów na pojeździe oraz prędkości przejazdu.

Możliwe są dwa rodzaje przejazdu pociągu przez sekcje separacji międzysystemowej:

- 1) z podniesionymi pantografami, mającymi kontakt z przewodem jezdny;
- 2) z opuszczonymi pantografami, nie mającymi kontaktu z przewodem jezdny.

Przyjęto, że z różnych względów eksploatacyjnych pierwszy sposób będzie podstawowy i wyłączniki SWT będą do niego przystosowane. Do zapewnienia takiego ich działania właściwy podsystem sterowania ruchem powinien wysyłać do pojazdu trakcyjnego niezbędne sygnały sterujące, by w trakcie przejazdu przez sekcję separacji wyłącznik pojazdowy SWT dokonywał odpowiednich przełączeń bez udziału maszynisty, otwierając we właściwym czasie zespół łączeniowy tak, by urządzenia elektryczne pojazdu odcinające zasilanie zostały całkowicie wyłączone przed ponownym załączeniem zasilania. Podłączone mogą pozostać jedynie te układy elektryczne pojazdu, które są zdolne do natychmiastowego dostosowania się do zmiany fazy napięcia zasilania na pantografie.

W przypadku braku automatycznego sterowania zewnętrznego uruchamiającego odpowiednie działanie wyłącznika, własny układ sterowania wyłącznika SWT będzie umożliwiał, w zależności od potrzeb, wykrywanie wyjazdu z jednego układu i wyłączanie właściwych układów elektrycznych w pojeździe, a następnie automatyczne rozpoznawanie napięcia na pantografie w nowym układzie zasilania w celu załączenia urządzeń pokładowych.

W zależności od potrzeb, w sytuacjach awaryjnych będzie istniała możliwość automatycznego opuszczenia pantografów bez udziału maszynisty. Analogicznie będzie rozwiązywany problem przejazdów przez wszystkie sekcje separacji. Zostanie przy tym przeanalizowany i ewentualnie uwzględniony fakt, iż na niektórych istniejących liniach sekcje separacji faz nie są kompatybilne z aktualnie obowiązującymi wymaganiami dotyczącymi rozstawu trzech kolejnych pantografów większego od 143 m.

2. Selektowność działania wyłączników podstacyjnych i pojazdowych (koordynacja zabezpieczeń)

Selektowność (koordynacja) działania wyłączników podstacyjnych i pojazdowych pozwala na ograniczenie obszaru wyłączenia do niezbędnego minimum, w zależności od miejsca i rodzaju

zwarcia. Można wyróżnić trzy przypadki selektywnego działania wyłączników:

- selektowność pełna – zwarcie w pojeździe jest wyłączane zawsze przez wyłącznik taborowy, bez uruchomienia wyłącznika podstacyjnego;
- selektowność częściowa – przy zwarcu w pojeździe uruchamiane są obydwa wyłączniki, ale zwarcie w pojeździe jest wyłączane zawsze przez szybciej działający wyłącznik taborowy, natomiast wyłącznik podstacyjny otwiera się bezprądowo i może z minimalnym opóźnieniem wykonać SPZ;
- brak selektowności – zwarcie w pojeździe jest wyłączane zawsze przez obydwa wyłączniki, podział energii zwarcia między wyłączniki zależy od wielu czynników, jest nierównomierny i niemożliwy do przewidzenia.

Pożądana jest oczywiście selektowność pełna, by awaria w układzie elektrycznym pociągu nie powodowała wyłączenia całego odcinka trakcyjnego. Niestety w przypadku wyłączników tradycyjnych, w tym próżniowych, regułą jest brak selektowności. Wynika to ze zbyt małych różnic prądów nastawczych wyzwalaczy nadprądowych współpracujących wyłączników oraz zbliżonych i niedostatecznie dużych szybkości działania tych wyłączników, a nadto relatywnie małych wielkości prądów nastawczych wyzwalaczy w stosunku do zakresu wielkości szczytowych prądów zwarciovych.

Dwie podstawowe właściwości wyłączników SWT – ultraszybkie działanie i przyjęte zasady synchronicznego sterowania, umożliwiają uzyskanie pełnej selektowności w dowolnym systemie trakcyjnym prądu przemiennego. Możliwe są dwa warianty współpracy: ultraszybkiego wyłącznika taborowego SWT z tradycyjnym wyłącznikiem podstacyjnym oraz dwóch wyłączników SWT.

W przypadku pełnej selektowności wyłącznik taborowy musi działać szybciej niż podstacyjny, tj. musi mieć mniejszy czas wyłączenia, liczony od chwili zadziałania wyzwalacza nadprądowego do chwili ostatecznego dojścia prądu do zera.

W wyłącznikach SWT parametrami możliwymi do wykorzystania jest różnica prądów zadziałania wyłączników oraz zwłoka czasowa.

Należy wprowadzić ogólną zasadę, że podstacyjny wyłącznik SWT po zadziałaniu wyzwalacza nadprądowego nie reaguje przed pierwszym spodziewanym zerem prądu (niezależnie od czasu trwania pierwszej półfali prądu zwarciovego, który może być różny wskutek występowania składowej nieokresowej prądu), lecz reaguje przed drugim spodziewanym zerem prądu, natomiast wyłącznik taborowy reaguje bezwzględnie.

Pełna selektowność jest wówczas zawsze zapewniona (tj. zwarcie w ez lub lokomotywie jest wyłączane zawsze synchronicznie przez wyłącznik taborowy, bez uruchomienia wyłącznika podstacyjnego).

W przypadku zwarcia w sieci trakcyjnej poza pojazdem, zwarcie jest również zawsze wyłączane synchronicznie przez ultraszybki wyłącznik podstacyjny, co daje korzyści eksploatacyjne opisane w zakończeniu.

Przy współpracy wyłącznika taborowego SWT z tradycyjnym wyłącznikiem podstacyjnym zazwyczaj brak selektowności, przy czym większość energii zwarcia obciąża wyłącznik podstacyjny (nawet do 95%), natomiast selektowność pełna jest również możliwa w przypadku wykorzystania w wyłączniku podstacyjnym ok. półokresowego opóźnienia chwili zadziałania tego wyłącznika.

Wymaga to jednak dodatkowego wyposażenia istniejących wyłączników podstacyjnych w nowe układy wyzwalające, umożliwiające realizację takiego opóźnienia.

3. Inne wymagania eksploatacyjne Automatyczne ponowne załączenie

Systemy automatycznego ponownego załączenia (jeśli są stosowane) dotyczą wyłączników w podstacji i umożliwiają szybkie przywrócenie zasilania linii. W takim przypadku wyłączniki w podstacji mogą zostać ponownie zamknięte jedynie po zadziałaniu wyłączników w pojazdach trakcyjnych znajdujących się w strefie zasilanej z tej podstacji. Dla spełnienia tego wymagania pojazdy wyłączniki SWT będą posiadały odpowiednie blokady podnapięciowe powodujące otwarcie wyłącznika po zaniku napięcia sieci, przy czym będzie możliwość samoczynnego załączenia wyłącznika po ponownym pojawieniu się tego napięcia na pantografie, o ile przed zanikiem napięcia nie wystąpiło zwarcie w obwodach pojazdu.

Hamowanie odzyskowe

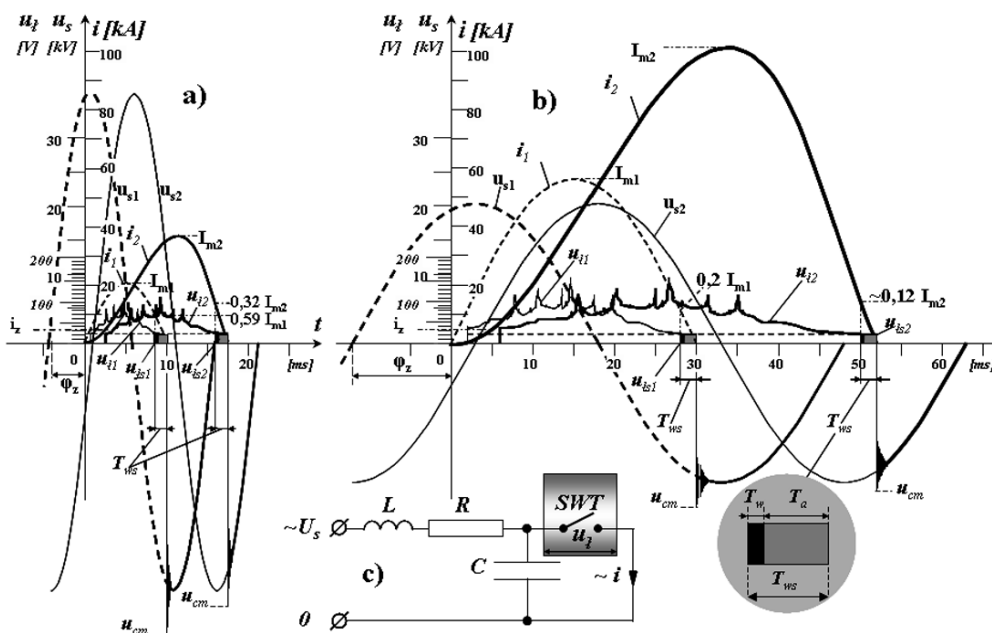
Dopuszczalność hamowania odzyskowego jest określana dla danych warunków systemowych. Problem nie ma wpływu na pracę wyłączników SWT.

Charakterystyka zjawisk podczas synchronizowanego wyłączenia zwarć Przebiegi łączeniowe prądów i napięć podczas wyłączenia synchronizowanego

Spełnienie podanych wymagań jest możliwe przy wykorzystaniu w ultraszybkich wyłącznikach SWT zasady synchronizowanego wyłączenia prądów w próżni.

Wyłączenie synchronizowane prądu przemiennego polega na otwarciu zestyku komory próżniowej bezpośrednio przed tym zerem prądu, w którym nastąpi zgaszenie łuku. Czas wyprzedzenia synchronicznego T_{ws} , liczony od chwili rozdzielenia się styków do chwili zera prądu, powinien być możliwie krótki (minimalizacja energii łuku), a zarazem wystarczająco długi dla uzyskania przerwy zestykowej o dostatecznej wytrzymałości powrotnej, co narzuca konieczność ultraszybkiego działania wyłącznika. Są to dwa przeciwstawne kryteria optymalizacji działania wyłącznika próżniowego o określonych właściwościach elektrycznych i kinetycznych.

Zasadę działania wyłącznika synchronizowanego prądu przemiennego SWT przedstawiono na rysunku 1, przy czym na rysunku 1a pokazano przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączeniu zwarcia w systemie 25 kV 50 Hz, natomiast na rysunku 1b w systemie 15 kV 16,7 Hz. Na obu rysunkach skale napięć, prądów oraz czasów są jednakowe. W obu przypadkach przebiegi przedstawiono dla wyłączenia granicznych prądów zwarciovych określonych w wymaganiach dla wyłączników podanych w tabeli 2.



Rys. 1. Stylizowane przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączeniu zwarcia a) w systemie 25 kV 50 Hz; b) w systemie 15 kV 16,7 Hz; c) usytuowanie wyłącznika SWT w obwodzie zwarciovym o parametrach zwarciovych R , L , C ; w każdym systemie po dwa przypadki wyłączenia przez wyłącznik próżniowy obwodu zwartego załączanego w chwilach zera (indeksy 1) oraz maksimum (indeksy 2) zwarciovego prądu spodziewanego; przebiegi napięcia sieci tak przesunięto, by chwila załączenia w obu przypadkach odpowiadala początkowi układu współrzędnych; t – czas; napięcia: u_s – napięcie sieci trakcyjnej, u_l – napięcie łuku przy wyłączeniu niesynchronizowanym, u_{ls} – napięcie łuku przy wyłączeniu synchronizowanym, T_a – czas łukowy, T_w – czas własny, T_{ws} – czas wyprzedzenia synchronicznego; prądy: I_m – prądy szczytowe, i_1 – prąd zwarciovym symetrycznym, i_2 – prąd zwarciovym niesymetrycznym, i_z – prąd zadziałania wyłącznika; φ_z – kąt fazowy obwodu zwarciovego; skale: $k_i = 10$ kA/dz, $k_{us} = 5$ kV/dz, $k_{ul} = 10$ V/dz, $k_t = 5$ ms/dz; warunki symulacji zwarc: a) $U_s = 25$ kV 50 Hz; $I_1 = 15$ kA; $\cos \varphi_z \approx 0,2$; b) $U_s = 15$ kV 16,7 Hz; $I_1 = 40$ kA; $\cos \varphi_z \approx 0,2$; przebiegi prądów roboczych pominięto

W danych warunkach układowych rzeczywisty przebieg prądu zwarciovego zależy w znany sposób od chwili wystąpienia zwarcia względem przebiegu spodziewanego prądu zwarciovego. Tylko w przypadku powstania zwarcia w chwili zera prądu spodziewanego wyłaczana jest sinusoidalna półfala prądu symetrycznego i_1 . W pozostałych przypadkach występuje składowa nieokresowa zniekształcająca sinusoidę prądu zwarciovego, powodująca wzrost jego amplitudy i wydłużenie, w granicznym przypadku, czasu trwania zdeformowanej półfali tego prądu do wielkości według rysunku 1a oraz 1b (prądy niesymetryczne i_2 przy powstaniu zwarcia w chwili maksimum prądu spodziewanego).

Bardziej skomplikowane przypadki, np. zwarcia powstałego ze stanu roboczego lub niewyłaczonego zwarcia powstałego przed zerem prądu spodziewanego itp., pominięto dla jasności rysunku; nie są one niezbędne dla porównania zjawisk przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłaczaniu zwarcia.

W każdym z pokazanych na rysunku 1 przypadków osiągnięcie przez wzrastający prąd zwarciovym wielkości prądu i_2 powoduje zadziałanie wyłącznika.

Przy niesynchronizowanym wyłaczaniu zwarcia, po krótkim czasie własnym następuje otwarcie zestyku komory próżniowej i zapłon łuku, który występuje podczas prawie całej półfali prądu zwarciovego aż do jego naturalnego dojścia do zera (założono tzw. wyłaczanie półfale, tj. w chwili najbliższego zera prądu).

Przy synchronizowanym wyłaczaniu zwarcia układ sterowania wyłącznika identyfikuje wybrane parametry prądu zwarciovego i oblicza czas do przewidywanego zera prądu, uruchamiając ultrazwyczkę napęd wyłącznika z możliwie krótkim czasem wyprzedzenia synchronicznego T_{ws} przed tym zerem prądu, w którym łuk gaśnie.

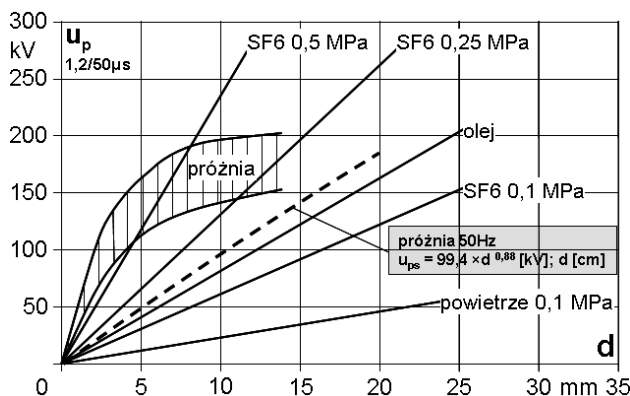
Zjawiska przy wyłaczaniu synchronizowanym

Warunkiem koniecznym do niezawodnego wyłaczania synchronizowanego jest stworzenie takich warunków po chwili dojścia prądu do zera, by wytrzymałość powrotna próżni skokowo wzrastała do wytrzymałości statycznej zimnej przerwy próżniowej (tj. możliwie największej przy danej odległości styków). Wytrzymałość elektryczna próżni jest bardzo duża w stosunku do innych dielektryków, co pokazano na rysunku 2.

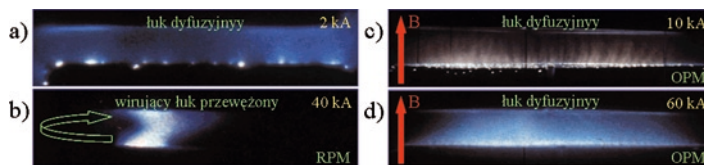
Statyczne natężenie przeskoku jest zdecydowanie mniejsze od udarowego ze względu na różnicę przebiegu zjawisk połukowych mogących spowodować elektryczny zapłon łuku. Jest ono jednak bardzo duże, rzędu 10 kV/mm. Dlatego wyłaczanie prądu w próżni może się odbywać przy relatywnie małych odległościach styków. Jest to możliwe, jeśli w komorze próżniowej stworzone zostaną warunki do utrzymania podczas wyłaczania prądu zwarciovego tylko dyfuzyjnej formy łuku.

Wówczas anoda jest pasywnym kolektorem jonów i elektrodów nieemitującym par metalu do przestrzeni międzystykowej, a średnia droga swobodna atomów po dojściu prądu do zera bezwzłocznie staje się większa od odległości styków. W takich warunkach nie może być spełniony warunek Townsenda samoistnego wyładowania elektrycznego i nie występuje termiczny zapłon łuku. Po dojściu prądu do zera nie następuje więc ponowny zapłon łuku, jeśli napięcie powrotne nie przekroczy statycznego napięcia przeskoku. Łuk dyfuzyjny występuje przy odległości styków większej od ok. 0,1–0,3 mm i prądach mniejszych od wielkości granicznej, ocenianej na ok. 9 kA, w zestyku płaskim nie generującym pola magnetycznego, ale bardzo silnie wzrastającej ze

wzrostem natężenia składowej osiowej pola magnetycznego w przerwie zestykowej (rys. 3).



Rys. 2. Udarowe napięcie przeskoku u_p w zależności od odległości elektrod d w zimnej przerwie próżniowej oraz w innych środowiskach wykorzystywanych w technice wyłaczania silnych prądów przemiennych: w oleju, sześćiofluorku siarki SF_6 pod trzema różnymi ciśnieniami oraz w powietrzu; elektrody płaskie; udar znormalizowany 1,2/50 μs ; dla odległości $d \leq 4$ mm $u_p \approx K_p \times d$, gdzie średnie udarowe natężenie przeskoku $K_p \approx 25$ kV/mm
 u_{ps} – statyczne napięcie przeskoku; krzywa $u_{ps} = f(d)$, obliczona ze wzoru empirycznego według pomiarów napięciem przemiennym 50 Hz w zakresie $d \leq 2$ cm; $K_{ps} \approx 10$ kV/mm



Rys. 3. Wpływ wielkości prądu oraz pola magnetycznego na formy łuku w próżni
RPM – radialne pole magnetyczne, OPM – osiowe pole magnetyczne, B – indukcja magnetyczna

Struktura łuku dyfuzyjnego jest wielokanałowa, przy stanie elektrod: katoda – aktywna, anoda – pasywna i braku lokalnych ognisk termicznych na anodzie. Przepływ plazmy w każdym kanale jest dyfuzyjny (bezzderzeniowy). Ruch kanałów jest szybki, beładny, po całej powierzchni styków. Erozja styków jest równomierna. Średnie napięcie łuku dyfuzyjnego, w zależności od materiału styków, jest zawarte w granicach $u_a = 10\text{--}27$ V \approx const.

Przy typowych dla większości obwodów trakcyjnych stromościach dojścia prądu zwarciovego do zera, osiągnięcie wielkości prądu zwarciovego mniejszych od wspomnianej wielkości granicznej wymaga czasu wyprzedzenia synchronicznego 2–3 ms. Czas ten oraz charakterystyka statyczna próżni są podstawowymi czynnikami determinującymi parametry kinetyczne organu rucho- mego wyłącznika SWT.

Zjawiska przy wyłaczaniu niesynchronizowanym

Przy wyłaczaniu niesynchronizowanym przebieg zjawisk jest całkowicie odmienny. Dla typowych wielkości początkowych stromości wzrostu prądu zwarciovego do 5 kA/ms, charakteryzujących zwarciovym obwody trakcyjne, osiągnięcie przez wzrastający prąd zwarciovym wielkości granicznej dla łuku dyfuzyjnego może nastąpić już po niespełna 2 ms od chwili wystąpienia zwarcia. W tym czasie zostaje już uruchomiony wyłącznik wskutek przekroczenia prądu zadziałania, a następnie po czasie własnym

otwiera się zestyk komory próżniowej przy wielkości prądu z reży większej od granicznej, przy której łuk dyfuzyjny przekształca się w łuk przewężony (konstrykcyjny) z aktywną anodą (rys. 3b), będącą silnym emitorem par metalu ze stopy anodowej do przestrzeni międzystykowej, co zupełnie zmienia właściwości łuku i zachowanie się na stykach. W praktyce przez większość okresu palenia się łuku występuje łuk przewężony. Napięcie łuku wzrasta, pojawiają się na nim wysokoamplitudowe oscylacje. W tego typu przypadkach w komorach próżniowych z magnetycznym polem poprzecznym powstaje obwodowa siła elektrodynamiczna wymuszająca wirowanie łuku przy dostatecznie dużych wielkościach prądu (rys. 3b). Niestety przy wyłaczaniu niesynchronizowanym wyłącznik zawsze otwiera zestyk przy relatywnie małej wielkości prądu, zależnej od prądu nastawczego i czasu własnego oraz stromości wzrostu prądu, po czym przewodzi duży prąd zwarciový przez pozostałą część półokresu. Istnieje wówczas zagrożenie powstania przewężonego łuku stacjonarnego (nieruchomego), najbardziej niszczącego styki. Najgorsze warunki dla komory występują przy zwiarcjach pojawiających się w drugiej ćwiartce półokresu spodziewanego prądu symetrycznego (po I_{m1}), czemu odpowiadają wymienione maksymalne czasy łukowe (rys. 9). Im bliżej zera pojawiają się zwiarcia, tym bardziej sytuacja się poprawia, bo warunki zbliżają się do występujących przy wyłaczaniu prądu symetrycznego. Ponieważ wyłącznik nie jest ultraszybki, więc przy zbyt małych czasach łukowych nie uzyskuje dostatecznej wytrzymałości powrotnej. Następuje wówczas ponowny zapłon łuku i wyłączenie dopiero po następnym półokresie prądu zwarciového.

Korzyści uzyskiwane przy wyłaczaniu synchronizowanym w stosunku do niesynchronizowanego

Przebiegi pokazane na rysunku 1 wskazują na ogromne korzyści, wynikające z wyłaczania synchronizowanego zwiarc. Zjawiska są jakościowo podobne w obydwóch systemach 25 kV 50 Hz oraz 15 kV 16,7 Hz, ale ilościowo występują znaczne różnice i dlatego będą podawane podwójne wielkości oszacowanych parametrów. Pierwsza wielkość, bez nawiasów, dotyczy systemu 25 kV 50 Hz, druga wielkość, w nawiasach, dotyczy systemu (15 kV 16,7 Hz).

Ponieważ prawdopodobieństwo wystąpienia zwiarcia w dowolnej chwili względem sinusoidy napięcia sieci trakcyjnej jest jednakowe, a napięcie łuku w próżni jest małe w stosunku do tego napięcia i nie wpływa na przebieg prądu, to w granicznych warunkach zwarciových czas trwania półfali prądu niesymetrycznego może przekraczać 15 ms (50 ms), a prąd udarowy może sięgać 38 kA (100 kA). Maksymalne wielkości czasów łukowych zawarte są w przedziale 7–15 ms (27–52 ms), natomiast średni czas łukowy będzie wynosił około 11 ms (38 ms).

Maksymalne wielkości energii wydzielanej z łuku przy wyłaczaniu niesynchronizowanym są bardzo duże. W granicznych warunkach zwarciových energia ta osiąga wielkości do 11 kJ (60 kJ) przy wyłaczaniu prądu symetrycznego oraz 30 kJ (130 kJ) – przy wyłaczaniu prądu niesymetrycznego.

Erozja materiału styków emitowanego do otoczenia zestyku jest proporcjonalna do energii wydzielonej z łuku do styków. Zużycie styków pracujących w tak trudnych warunkach energetycznych jest powodem bardzo poważnego ograniczenia trwałości łączeniowej wyłącznika w warunkach zwarciových, a także robo-

czych. Dlatego, w zależności od warunków, próżniowe wyłączniki niesynchronizowane są zdolne wyłaczyć jedynie kilkadziesiąt zwiarc (dane na ten temat nie są znane z dostępnej literatury dla 16,7 Hz; dla 50 Hz w zakresie napięć średnich niektórzy znani producenci wyłączników próżniowych podają – nie katalogowo – trwałości do 50 zwiarc ciężkich – w warunkach granicznych w cyklu łączeniowym – lub 75 do 100 w pozostałych warunkach; konferencja *Łączniki '06*, Piecyszka, 16–18 maja 2006 r.). Warunki energetyczne pracy komory są znacznie gorsze przy częstotliwości 16,7 Hz niż przy 50 Hz.

Przy ultraszybkim wyłaczaniu synchronizowanym te problemy zostają wyeliminowane. Czas łukowy jest krótki i praktycznie stały. Wyłaczanie odbywa się zawsze na opadającym zboczku krzywej prądu. Wielkości szczytowe prądu łuku zmieniają się w niewielkich granicach i są zazwyczaj mniejsze od wielkości granicznej dla łuku dyfuzyjnego, przy czym są one zawarte w granicach 30–58% (10–20%) amplitudy prądu zwarciového (np. przy $T_{ws} = 2$ ms jest to ok. 12 kA (15 kA)). W praktyce występuje tylko łuk dyfuzyjny o prawie stałym i najniższym z możliwych napięciu, a skokowo wzrastająca wytrzymałość powrotna jest największa z możliwych i praktycznie zależy jedynie od odległości styków w chwili zera prądu. Średnia energia wydzielana z łuku jest wówczas ponad dwudziestokrotnie (studwudziestokrotnie) mniejsza niż przy wyłaczaniu niesynchronizowanym. W granicznych warunkach zwarciových przy T_{ws} zawartym we wspomnianych granicach 2–3 ms jest ona rzędu 200–400 J (300–500 J) przy wyłaczaniu prądu symetrycznego i niesymetrycznego. Podobnie jest w warunkach przeciążeniowych i roboczych. Dlatego trwałość łączeniowa wyłączników SWT będzie wielokrotnie większa niż wyłączników tradycyjnych dotychczas stosowanych w układach trakcyjnych.

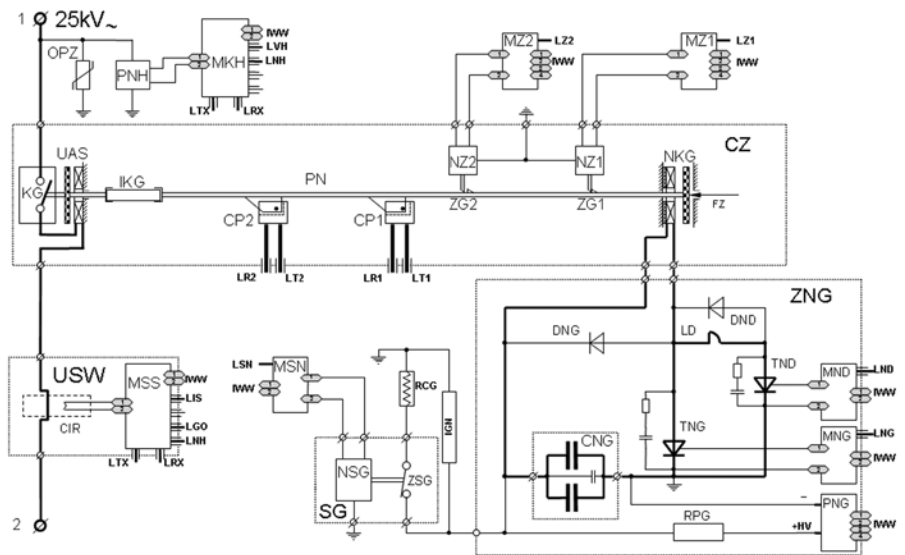
Warunki napięciowe pracy komory próżniowej są natomiast ostrzejsze w systemie 25 kV ze względu na 66-procentową różnicę napięć znamionowych determinującą przebiegi napięcia powrotnego i poziomy ograniczania przepięć oraz napięcie znamionowe izolacji komory próżniowej.

Wyłącznik synchronizowany musi się charakteryzować możliwie dużym przyspieszeniem organu ruchomego i dużą prędkością rozchodzenia się styków, by można było uzyskać wymaganą ze względu na wytrzymałość elektryczną przerwę zestykową przy możliwie krótkim czasie T_{ws} , co oznacza minimalizację energii łuku, ograniczenie erozji styków i uzyskanie pożądanego wzrostu trwałości łączeniowej. Ograniczeniem w zakresie ultraszybkiego działania wyłącznika jest wytrzymałość mechaniczna komór próżniowych. Osiągnięcie takiego działania wyłączników wymaga zastosowania wielkich sił napędowych elementów ruchomych wyłączników. Przy występujących w praktyce masach tych elementów powstają w nich wielkie udarowe naprężenia mechaniczne, często o falowym charakterze. Przekroczenie wielkości naprężeń dopuszczalnych dla stosowanych materiałów konstrukcyjnych powoduje bardzo szybkie zmniejszanie się trwałości mechanicznej wyłącznika lub jego zniszczenie. Jest to nieprzekraczalna bariera fizyczna praktycznie wykluczająca w realnych uwarunkowaniach konstrukcyjnych możliwość zmniejszenia czasu własnego wyłącznika poniżej 100–200 μ s. Wystarcza to jednak w zupełności do uzyskania średniej prędkości styku ruchomego potrzebnej podczas wyłaczania synchronizowanego.

Budowa i zasady synchronizowanego działania wyłączników SWT

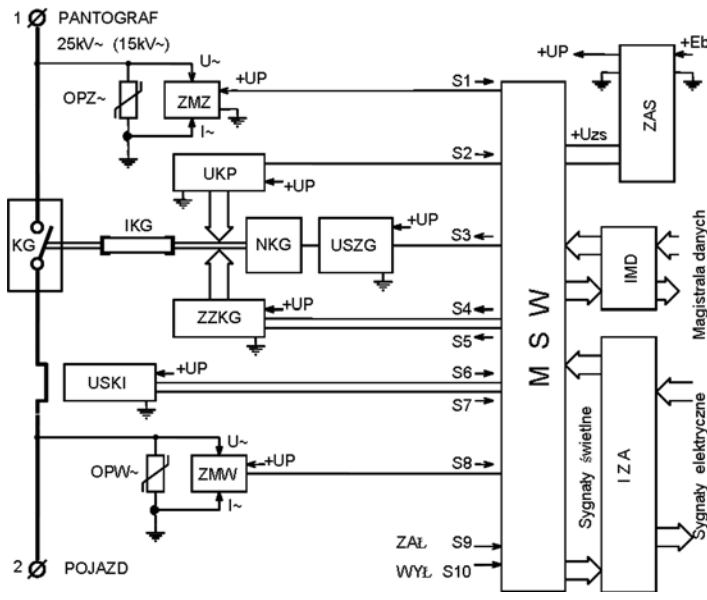
Ogólne zasady budowy

SWT jest jednofazowym, próżniowym wyłącznikiem synchronizowanym, z ultraszybkim napędem impulsowym i bezprzechyłowym, zamkowym organem ruchomym o trwałym stanie zamknięcia, wyposażonym w autonomiczny system ograniczania przepięć zewnętrznych i wewnętrznych, sterowanym synchronicznie za pomocą specjalnego synchronizatora elektronicznego wykorzystującego detekcję progową i stromościową prądów zwarciovych, który będzie przystosowany do pracy przy częstotliwościach 50 Hz (60 Hz) lub 16,7 Hz. Czas palenia się łuku w komorze próżniowej nie przekracza 2–3 ms, dzięki czemu trwałość łączeniowa wyłącznika będzie relatywnie duża zarówno w warunkach roboczych, jak i zwarciovych. Wyłączniki SWT mają budowę modułową, umożliwiającą w typowych granicach dostosowywanie przestrzennego układu wyłączników do wymiarów przeznaczonych dla nich komór (cel) w rozdzielnicach podstacji i pojazdów trak-



Rys. 5. Uproszczony schemat ideowo-blokowy członu zestykowego CZ z zasilaczem ZNG napędu NIG oraz elementami układów do pomiaru i analizy napięcia (przekładnikiem PNH, modulem MKH) oraz prądu (układ USW z cewką Rogowskiego CIR i modulem MSS – w składzie USKI na rys. 4)

UAS – układ antyszczepieniowy, CP – czujniki położenia, ZG – zamki, NZ – napędy zamków, MZ – moduły sterujące napędów NZ; FZ – siła zwrotna; zasilacz ZNG (w składzie USZG na rys. 4); CNx – kondensatory, TNx – tyrystory, DNx – diody, MNx – moduły sterujące, PNG – przetwornica, RP – rezystor; SG – stykniek do rozładowywania CNG (zestyk ZSG z napędem elektromagnesowym NSG) z modulem sterującym MSN oraz rezystorem RCG i optycznym wskaźnikiem napięcia ING; Lxx – wyjścia/wejścia światłowodowe do modułów, IWW – wyjścia/wejścia elektryczne do/z interfejsu IWW (interfejs we/wy sterownika MSW na rys. 4); pozostałe oznaczenia jak na rys. 4



Rys. 4. Schemat blokowy wyłącznika SWT

IKG – izolator komory głównej, IMD – interfejs magistrali danych, IZA – interfejs zjazdu awaryjnego, KG – główna komora próżniowa, MSW – sterownik wyłącznika, NKG – napęd ultraszybki komory; OPW, OPZ – ograniczniki przepięć wewnętrznych i zewnętrznych, USKI – układ synchronizacji napędu i kontroli prądu głównego, UKP – układ kontroli położenia, USZG – układ sterowania i zasilania napędu, ZAS – zasilacz sterownika; ZMW, ZMZ – zespoły monitorowania ograniczników przepięć, ZZKG – zespół zamków komory; sygnały: S1 – sygnał nieprawidłowego stanu ogranicznika OPZ; S2 – sygnał kontroli położenia styku komory KG; S3 – sygnał sterowania napędu NKG; S4, S5 – sygnały sterowania zamków komory KG; S6 – sygnał z progowego detektora prądu; S7 – sygnał synchronizujący działanie napędu NKG; S8 – sygnał nieprawidłowego stanu ogranicznika OPW; S9, S10 – sygnały załączenia i wyłączenia wyłącznika

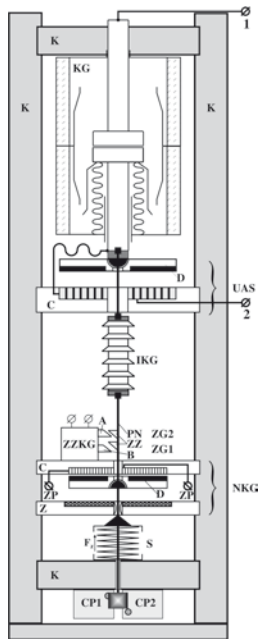
cyjnych. Ogólne zasady budowy wyłącznika SWT, wykorzystującego opisane zasady działania, pokazano na rysunku 4.

Moduł MSS przy wyłączeniu prądu roboczego inicjowany jest sygnałem LGO ze sterownika MSW (po podaniu zewnętrznego sygnału S9 wg rys. 4). W odpowiedniej chwili generowany jest jako odpowiedź impuls synchronizujący LIS uruchamiający otwieranie wyłącznika. Na wejście LNH podawane są w sposób ciągły impulsy detekcji zera napięcia obwodu, generowane przez układ MKH. Komunikacja z głównym sterownikiem MSW (rys. 4) odbywa się przez łącze LTX – LRX.

W przypadku zwarcia, MSS zgodnie z założonym algorytmem sam podejmuje decyzję o generacji impulsu LIS i uruchomieniu procedury wyłączenia.

Próżniowy członu zestykowy

W skład próżniowego członu zestykowego wchodzi elementy (rys. 4 i 5): KG, IKG, NKG oraz ZZKG, złożony z ZG i NZ. Schemat kinematyczny zespołu pokazano na rysunku 6.

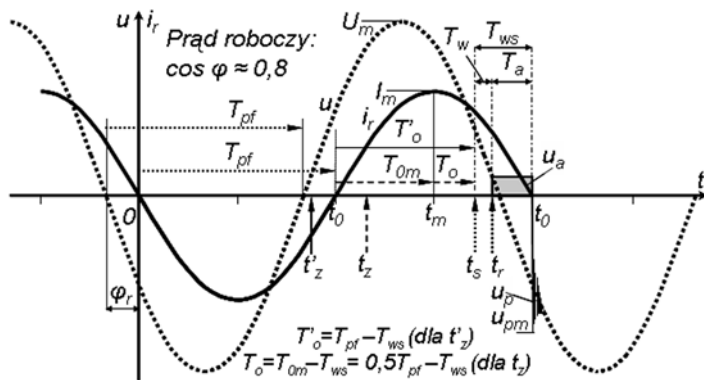


Rys. 6. Schemat kinematyczny członu zestykowego CZ wyłącznika SWT
 K – elementy korpusu nośnego zespołu, KG – komora próżniowa, IKG – izolator komory próżniowej, PN – pręt napędowy, S – sprężyna o sile zwrotnej FZ; NKG – ultraszybki napęd komory KG; C – cewka z zaciskami przyłączowymi ZP, D – dysk, Z – zderzak; ZZKG – zespół zamków komory: ZG2 – zamek przechwytyjący (rygiel A), ZG1 – zamek główny (rygiel B), ZZ – zaczepy zamków; UAS – układ antyszczipieniowy: D – dysk, C – cewka; CP – czujniki położenia organu ruchomego; pozostałe oznaczenia jak na rys. 4 i 5

Zespół łączeniowy ma zwartą budowę dzięki usytuowaniu jego podzespołów wewnątrz korpusu nośnego złożonego z elementów K, stanowiących sztywne bazy odniesienia umożliwiające precyzyjną regulację wzajemnego położenia podzespołów.

Podstawowym elementem łączeniowym jest komora próżniowa KG, której styk ruchomy napędzany jest za pomocą izolatora

IKG ultraszybkim napędem indukcyjno-dynamicznym NKG, w którym metalowy dysk D, pracujący jako zwój zwarty, jest odrzucany od cewki napędowej C, przez którą przepływa impuls wieloprądowy wytwarzany przez rozładowanie kondensatora. Badania wykazały, że napędy indukcyjno-dynamiczne są najbardziej niezawodne, charakteryzują się prostotą budowy i relatywnie dużą trwałością mechaniczną. Napędy te potrafią krótkotrwale wytwarzać wielkie siły nadające organowi ruchomemu wyłącznika, w zależności od masy, przyspieszenia nawet rzędu 10^4 – 10^6 m/s². Dysk D połączony jest z izolatorem IKG prostym prętem napędowym PN z zaczepami zamków ZZ współpracującymi z zespołem ZZKG dwóch zamków ZG1 i ZG2, z których każdy utrzymuje styki komory KG w stanie otwarcia przy innej odległości międzystykowej. Umożliwia to etapowe zamykanie KG przy załączaniu, co jest konieczne ze względu na masy i duże prędkości ruchomych elementów oraz minimalne czasy gotowości zamków dla zapewnienia właściwej pracy wyłącznika w przypadku załączenia obwodu zwartego. Po zadziałaniu napędu wyłącznik jest zatrzymywany w położeniu otwarcia przez zamek ZG1. Przy załączaniu zamek ZG2 otwiera się, ale komora KG jest krótkotrwale utrzymywana w stanie otwarcia przez zamek ZG2, podczas gdy zamek ZG1 powraca do stanu gotowości. Dopiero wtedy otwarcie zamka ZG2 powoduje zamknięcie wyłącznika pod działaniem sprężyny S. Sterowniki obu zamków (rys. 5) uruchamiane są oddzielnymi sygnałami S4 i S5. Bezprzechwyłowy napęd prostowodowy styku ruchomego jest najkorzystniejszy dla komory próżniowej ze względu na minimalizację udarowych narażeń mechanicznych i naprężeń bocznych podczas pracy wyłączeniowej. Umożliwia to uzyskanie dużego przyspieszenia początkowego i dużej średniej prędkości organu ruchomego, rzędu 1–2 m/s, a dzięki temu czas własny otwierania wyłącznika jest rzędu 400 μ s i czasy wyłączenia mogą być bardzo krótkie. Napęd NKG jest zasilany impulsem wieloprądowym z zasilacza ZNG, w którym źródłem energii jest zespół kondensatorów CNG ładowany z przetwornicy PNG zasilanej napięciem pomocniczym, sterowany synchronicznie tyrystorowo w układzie USZG. Ze względu na duże wielkości udarowych prądów zwarciovych i wymagane wówczas duże wielkości docisków zestykowych, wykorzystano elektrodynamiczne oddziaływanie prądu zwarciovego za pomocą układu antyszczipieniowego UAS, zwiększającego docisk zestykowy w zakresie wielkich prądów (proporcjonalnie do kwadratu wielkości chwilowej prądu). UAS jest dodatkowym napędem indukcyjno-dynamicznym działającym odwrotnie do napędu NKG. Między cewką C a dyskiem D układu UAS jest relatywnie duża szczelina robocza. Cewka C tego układu jest połączona szeregowo z zestykiem komory KG i płynie przez nią prąd główny, dzięki czemu dysk D skutecznie dociska zestyk komory KG w zakresie szczytu sinusoidy prądu zwarciovego. Oddziaływanie to szybko maleje, gdy prąd dąży do zera i w chwili zadziałania napędu NKG jest znacznie mniejsze od siły napędowej. Dzięki temu można ograniczyć siłę zwrotną FZ, co poprawia warunki pracy komory KG (mniejsze prędkości zamykania) i zamków ZG (mniejsze siły statyczne i dynamiczne, mniejsze siły napędów NZ tych zamków).



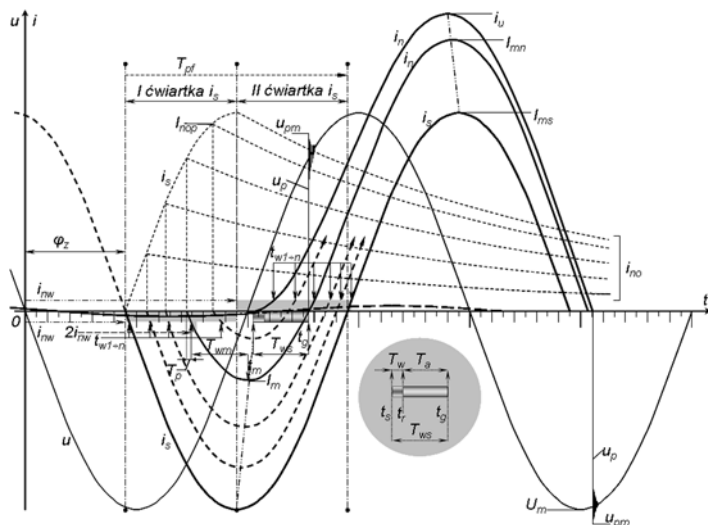
Rys. 7. Synchronizowane wyłączenie prądu roboczego lub przeciążeniowego metodą stałego opóźnienia względem zera lub maksimum prądu
 u – napięcie sieci, u_a – napięcie łuku; u_p – napięcie powrotne, u_{pm} – wielkość szczytowa u_p; i_r – prąd; i_m – wielkość szczytowa i_p; t'_z, t_z – chwila pojawienia się zewnętrznego sygnału sterującego WYŁ (S10, rys. 4), t₀ – chwila zera prądu, t_m – chwila maksimum prądu, t_s – chwila synchronicznego załączenia napędu NKG, t_r – chwila rozdzielenia się styków komory KG; T_{pf} – czas półokresu prądu lub napięcia o częstotliwości f, T_{0m} – czas mierzony od t₀ do t_m; T'₀, T₀ – czas opóźnienia, T_w – czas własny wyłącznika, T_a – czas łukowy, T_{ws} – czas wyprzedzenia synchronicznego

Metody synchronizowanego sterowania

Zapewnienie praktycznie stałego czasu T_{ws} (rys. 1) jest zadaniem złożonym ze względu na niemożliwe do określenia zmiany warunków zwarciovych, zależne przypadkowo od ruchu pociągu na odcinku trakcyjnym, miejsca i rodzaju zwarcia. Zmienne losowo są

Synchronizowane wyłączenie zwarć w zakresie tzw. dużej półfali prądu zwarcioowego, gdy występują największe prądy zwarcioowe o amplitudach I_{mn} w zakresie $I_{ms}-i_u$, pokazano na rysunku 8 dla dwóch granicznych przypadków wyłączania prądu symetrycznego (8a) i maksymalnie niesymetrycznego (8b).

Pokazane na rysunku 8 ciężkie warunki zwarcioowe występują w przypadku pojawienia się zwarcia w dowolnej chwili podczas II ćwiartki półfali spodziewanego prądu symetrycznego. Przebieg prądu jest wówczas losowo zmienny w zakresie od $i_{zs}(t)$ do $i_{zn}(t)$. Rodzinę przebiegów prądu zwarcioowego dla różnych chwil t_z wystąpienia zwarcia pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Rodzina prądów zwarcioowych dla różnych chwil wystąpienia zwarcia i_s – prądy symetryczne, i_n – prądy niesymetryczne; i_{no} – rodzina składowych nieokresowych o wielkościach początkowych I_{nop} ; pozostałe oznaczenia jak na rys. 8

Przy założonej wielkości czasu T_{ws} , dla danego przebiegu rzeczywistego prądu zwarcioowego $i_z(t)$, problem sprowadza się do określenia czasu opóźnienia T_o względem chwili t_m , po którym zostanie uruchomiony napęd NKG. Chwila t_m jest jedyną bazą odniesienia możliwą do określenia na podstawie pomiaru prądu i analizy jego pochodnej, bowiem tylko przy lokalnym ekstremum prądu I_m jest $(di/dt)_m = 0$.

Gdy zwarcie wystąpi podczas I ćwiartki półfali spodziewanego prądu symetrycznego, wyłączenie synchronizowane ma miejsce podczas tzw. małej półfali prądu zwarcioowego, gdy występują znacznie mniejsze prądy zwarcioowe. W miarę wzrostu opóźnienia chwili t_w względem poprzedzającego zera spodziewanego prądu zwarcioowego symetrycznego, amplitudy półfal prądu maleją w zakresie $I_{ms}-0$, a czasy kolejnych półfal maleją w zakresie $T_{pf}-0$. Półfale te są również niesymetryczne, ale ich druga ćwiartka ma czas niewiele dłuższy od pierwszej, tj. odmiennie niż w przypadku dużej półfali. Maleją także stromości dojścia prądu do zera. Jest to istotne z punktu widzenia wyłączania synchronizowanego, bowiem większość zwarć występujących w I ćwiartce będzie wyłączana podczas małej półfali. Gdy czas tej półfali jest zbyt krótki, nie można określić T_{ws} i wyłączenie następuje po najbliższym zerze prądu, tj. podczas dużej półfali.

Tylko w przypadku pokazanym na rysunku 8a półfala prądu jest symetryczna względem t_m . W innych przypadkach, aż do granicznego pokazanego na rysunku 8b, czas I ćwiartki jest dłuższy

od czasu II ćwiartki dużej półfali prądu, natomiast stromości zmian prądu: $|s_{sn}| < |s_o|$.

W opisanych warunkach dla określenia czasu T_o przyjęto następującą procedurę:

- w obwodzie płynie prąd roboczy i_r , przebieg prądu zwarcioowego rozpoczyna się zawsze od wielkości $i_r(t_z)$;
- na podstawie pomiaru napięcia określana jest częstotliwość f oraz czas T_{pf} ;
- po osiągnięciu przez prąd i_{zn} wielkości i_{nw} w chwili t_w , na podstawie pomiaru prądu i jego pochodnej mierzony jest czas T_{wm} ;
- czas II ćwiartki półfali prądu niesymetrycznego, równy sumie czasów $T_o + T_{ws}$, jest obliczany na podstawie porównania czasów T_{wm} oraz T_{pf} ;
- do skorygowania skrócenia czasu T_{wm} wskutek pominięcia pomiaru prądu w zakresie i_r-i_{nw} jest wprowadzana poprawka $T_p = i_{nw}/s_{sn}$;
- średnia stromość wzrostu prądu $s_{sn} = di/dt$ jest mierzona w zakresie prądów $i_{nw}-2i_{nw}$ (rys. 9);
- dla $T_{wm} + T_p \geq 0,5T_{pf}$ czas T_o jest określany z zależności: $T_o = 0,5T_{wm} + 1,5T_p - 0,25T_{pf} - T_{ws}$;
- dla $T_{ws} \leq T_{wm} + T_p < 0,5T_{pf}$ czas T_o jest określany z zależności: $T_o = T_{wm} + T_p - T_{ws}$;
- dla $T_{wm} + T_p < T_{ws}$ wyłączenie nie jest możliwe i dokonywane jest podczas następnego półfali prądu.

Zakładając przy napięciu 25 kV współczynnik przebiegu 1,2 oraz $K_p = 10$ kV/mm (rys. 2) można przyjąć: $u_{pm} = 40$ kV, stąd $d_{min} = 4$ mm. Przy $v_s = 2$ m/s oraz $T_w = 0,5$ ms, $T_a = 2$ ms, stąd w wyłącznikach SWT musi być stosowany czas wyprzedzenia synchronicznego $T_{ws} \geq 2,5$ ms.

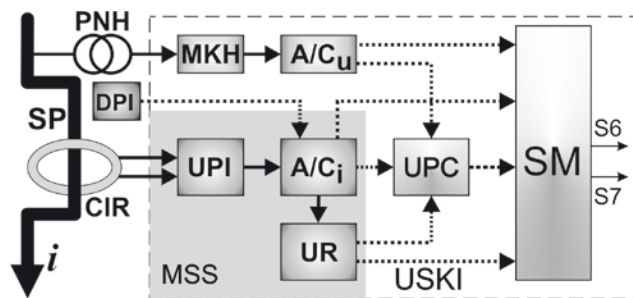
Układy synchronizowanego sterowania

Pracą wyłącznika SWT zarządza sterownik MSW (rys. 4), wysyłający sygnały sterujące poszczególnymi podzespołami, odbierający sygnały z czujników i układów pomiarowych wyłącznika, prowadzący diagnostykę wybranych podzespołów, zapewniający ciągłą dwustronną komunikację z systemem sterowania pojazdu lub z komputerem serwisowym, archiwizujący wybrane zdarzenia pracy wyłącznika, dokumentujący jego ewentualne niesprawności lub niewłaściwą eksploatację. Wszystkie sygnały robocze są przesyłane siecią światłowodową. Ponieważ współczesne układy trakcyjne wyposażane są z reguły w mikroprocesorowe układy sterujące, wyłącznik SWT ma możliwość współpracy z nimi poprzez interfejs magistrali danych – IMD. Niezależnie od tego wyłącznik jest wyposażony w interfejs zjazdu awaryjnego IZA, umożliwiającą sterowanie wyłącznikiem w sposób tradycyjny za pomocą sygnałów elektrycznych.

Sterownik mikroprocesorowy MSW jest w zasadzie specjalizowanym mikrokomputerem, współpracującym z podstawowym lub pokładowym systemem sterowania, wykorzystującym detekcję progową i stromościową prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarcioowych. W wersji podstawowej jest przystosowany do pracy przy napięciu 25 kV o częstotliwości 50 (60) Hz lub napięciu 15 kV o częstotliwości 16,7 Hz, ma także łącza rezerwowe dla ewentualnych wymagań wprowadzanego na główne międzynarodowe korytarze kolejowe jednolitego systemu sterowania pociągami ETCS (European Train Control System).

Głównym zespołem realizującym wyłączenie synchronizowane jest mikroprocesorowy układ synchronizacji wyłącznika i kon-

trouli prądu w torze głównym USKI (rys. 4), wykorzystujący sygnały z pracujących pod wysokim potencjałem urządzeń do pomiarów prądu i napięcia oraz do progowej detekcji prądu. Zasady budowy tego układu pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Schemat blokowy układu synchronizacji wyłącznika i kontroli prądu USKI oraz współpracujących urządzeń

SP – szyna pomiarowa głównego toru prądowego, PNH – przeładnik napięciowy, MKH – moduł kontroli i analizy przebiegu napięcia, MSS – moduł kontroli i analizy przebiegu prądu, CIR – cewka Rogowskiego, UPI – układ pomiaru prądu, UR – układ różniczkujący, DPI – detektor progowej prądu, UPC – układ pomiaru czasów, SM – synchronizator mikroprocesorowy; A/C_U, A/C_I – przetworniki a/c napięciowy i prądowy; S6, S7 – sygnały według rys. 4

Układ USKI łączy w sobie funkcję wieloparametrycznego przełącznika nadprądowego, pozwalającego między innymi na ustawienie progu zadziałania, stromości prądu i kształtowanie czasowo-prądowych charakterystyk przeciążeniowych, z synchronizatorem elektronicznym realizującym procedury synchronizacji uprzednio opisane. Z układu USKI wysyłany jest sygnał S6 informujący sterownik MSW o przekroczeniu wielkości nastawczych prądu zwarciovego lub przeciążeniowego oraz sygnał S7 synchronizujący wyłączenie. Położenie impulsu synchronizującego względem przebiegu prądu można programować z zewnętrznego PC w zależności od czasu własnego właściwego organu ruchomego zespołu łączeniowego, czasu T_{ws} i innych wymagań. O sposobie uruchomienia i rodzaju procedury wyłączania decyduje sterownik MSW po otrzymaniu sygnałów S6 i S7.

Przekroczenie nastawionego progu DPI (sygnał S6) uruchamia procedurę wyłączania synchronizowanego. Zbiór pierwotnych danych wejściowych stanowią przebiegi napięcia i prądu próbkowane z dużą częstością przez przetworniki A/C_U oraz A/C_I oraz sygnał pochodnej prądu z modułu MSS. Sygnały te są doprowadzane do układu UPC, określającego przedziały czasu między charakterystycznymi chwilami w przebiegach prądu i napięcia, takimi, jak chwile wielkości zerowych i maksymalnych prądu oraz napięcia, skokowych zmian pochodnej prądu, przejścia przez zadane wielkości itp., a także do synchronizatora SM będącego mikroprocesorem działającym według specjalnego oprogramowania, opracowanego na potrzeby wyłączania synchronizowanego prądu o dowolnej częstotliwości, określanej na podstawie sygnału napięciowego. Synchronizator SM we właściwej chwili t_s (rys. 7, 8, 9), określanej w sposób uprzednio opisany, wysyła sygnał synchronizujący S7 (rys. 4) powodujący synchroniczne załączenie napędu NKG (rys. 5, 6).

Ograniczniki przepięć

Zarówno procesy łączeniowe, zachodzące przy wyłączaniu synchronicznym, jak i czynniki zewnętrzne powodują powstawanie przepięć pojawiających się przed i za wyłącznikiem. Do ochrony podzespołów wyłącznika i układów zewnętrznych przed oddziaływaniem tych przepięć służą ograniczniki przepięć zewnętrznych – OPZ i wewnętrznych – OPW (rys. 4). Są to warystory tlenkowe.

Pomimo dobrze opanowanych technologii ich produkcji, podlegają one degradacji, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszania się napięcia charakterystycznego, a w perspektywie do uszkodzenia całej gałęzi ochronnej. W wyłącznikach SWT wprowadzone zostały zespoły ZMZ monitorowania ogranicznika OPZ oraz ZMW monitorowania ogranicznika OPW, mające za zadanie z odpowiednim wyprzedzeniem sygnalizować potrzebę wymiany ogranicznika o obniżonych parametrach. Są to mikroprocesorowe, autonomiczne układy kontrolujące prąd i napięcie charakterystyczne ograniczników i porównujące je z wielkościami wprowadzonymi z PC dla danego ogranicznika. Przekroczenie zadanych parametrów powoduje wystąpienie sygnału S1 (w przypadku zespołu ZMZ) lub sygnału S8 (w przypadku ZMW) do sterownika MSW (rys. 4).

W wyłącznikach taborowych dla lokomotyw dwusystemowych każdy ogranicznik OPZ lub OPW będzie złożony z zestawu dwóch szeregowo połączonych ograniczników o napięciach odpowiednio 15 kV oraz 10 kV, wyposażonych jak wspomniano. Przy zmianie napięcia systemu trakcyjnego z 25 kV 50 Hz na 15 kV 16,7 Hz, lub odwrotnie, przełączenie zestawu ograniczników będzie się odbywało samoczynnie wraz z cyklem operacji dostosowawczych lokomotywy (urządzenia służące temu celowi pominięto na rys. 4 i 5).

Zakończenie

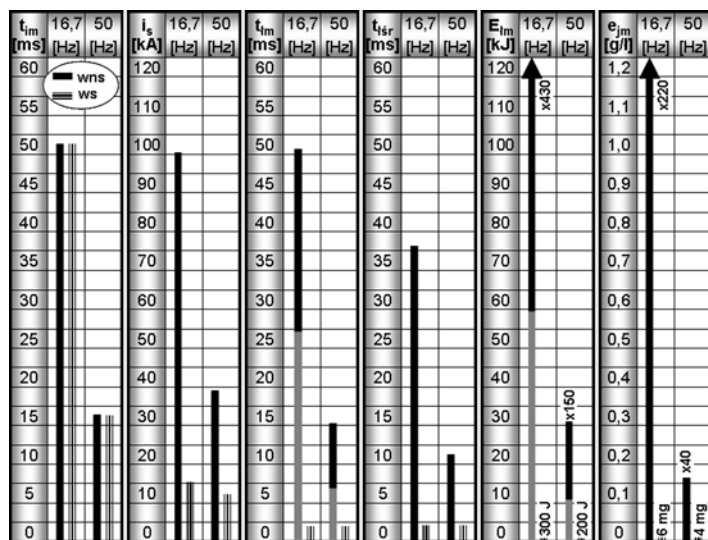
Technika wyłączania synchronizowanego jest najlepszym i najtańszym sposobem zwiększenia trwałości łączeniowej wyłącznika, szczególnie w warunkach zwarciovych.

O dużej przewadze technicznej i eksploatacyjnej ultraszybkich próżniowych wyłączników synchronizowanych SWT nad próżniowymi wyłącznikami niesynchronizowanymi świadczy zestawienie porównawcze wybranych wielkości charakteryzujących wyłączenie prądów, w szczególności zwarciovych, pokazane na rysunku 11, a także inne cechy eksploatacyjne wyłączników.

Jak wynika z zestawienia (rys. 11), synchronizacja wyłączenia, w połączeniu z zastosowaniem ultraszybkiego napędu komory próżniowej, umożliwia tak znaczne ograniczenie czasu łukowego oraz energii wydzielonej z łuku, że erozja łukowa materiału styków przestaje w praktyce być czynnikiem ograniczającym trwałość łączeniową wyłącznika SWT, nawet w warunkach zwarciovych, a więc trwałość ta jest zbliżona do trwałości mechanicznej. Jeden wyłącznik SWT staje się więc równoważnikiem eksploatacyjnym wielu próżniowych wyłączników niesynchronizowanych, eliminując konieczność ich zakupu.

Do innych walorów użytkowych wyłączników SWT należy także zaliczyć:

- selektywne działanie przy przeciążeniach i zwarciach wyłączników taborowych w stosunku do podstawczych;
- brak potrzeby przeglądów i konserwacji w całym okresie eksploatacji, tj w zakresie trwałości łączeniowej;



Rys. 11. Zestawienie wielkości charakteryzujących wyłączenie niesynchronizowane (linie wns z lewej) i synchronizowane (linie ws z prawej) w każdej z kolumn oznaczonych częstotliwością napięcia systemu trakcyjnego; oszacowanie wielkości tych wielkości przeprowadzono dla warunków zwarciovych według rys. 1

t_{im} – maksymalny czas trwania półfali prądu zwarcia, i_s – prąd szczytowy łuku, t_{fm} – maksymalny czas łukowy, t_{fm} – średni czas łukowy, E_{fm} – maksymalna energia łuku, e_{fm} – jednostkowa (podczas jednego wyłączenia zwarcia) erozja materiału styków komory próżniowej (przy założeniu jednokrotnej erozyjności katody i anody $e_{AK} = 200 \mu\text{g/C}$ dla Cu, gdyż brak danych dla CuCr, używanego w wyłącznikach)

- wyposażenie w autonomiczny system przeciwprzepięciowy ograniczający narażenia elementów obwodów głównych taboru oraz systemów zasilania sieci jezdnej, skutecznie zmniejszający liczbę ich awarii, pozwalający zarazem na redukcję innych środków systemowych ochrony od przepięć zewnętrznych;
- spełnianie wymagań norm europejskich z zakresu trakcji, elektrotechniki, ochrony środowiska, kompatybilności elektromagnetycznej itp., a nadto stosownych dyrektyw KE;
- małe koszty eksploatacyjne wyłącznika;
- zdolność do pracy w dowolnym systemie trakcyjnym prądu przemiennego.

Korzyści ekonomiczne powstające wskutek wprowadzania wyłączników do eksploatacji w pojazdach trakcyjnych i systemach ich zasilania będą się kumulowały u ich użytkowników.

Zakres stosowalności elektrotrakcji prądu przemiennego jest bardzo szeroki. Systemy 25 kV 50 Hz są stosowane na obszarach 30 krajów, 25 kV 60 Hz – 4 krajów, 15 kV 16,7 Hz – 4 krajów, inne przemiennie napięcia trakcyjne (20 kV 50 lub 60 Hz; 11 kV 16,7 lub 25 Hz; 12,5 kV 60 Hz) na obszarach 3 krajów.

Zdolność wyłączników SWT do pracy w dowolnym systemie trakcyjnym prądu przemiennego sprawia, że potencjalny rynek zbytu będzie dla nich bardzo duży.



Literatura

- [1] Bartosik M.: *Wyłączanie synchroniczne obwodów nn*. Praca habilitacyjna. ZNPL nr 37, ROZPRAWY NAUKOWE, 1981. Tamże zamieszczony jest obszerny spis literatury własnej i obcej (176 poz. lit.) dotyczącej wyłączania synchronicznego prądu przemiennego w powietrzu i próżni.
- [2] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Modern DC circuit breakers*. Technika Transportu Szynowego 9/2006, s. 25–32.
- [3] Janiszewski J., Purczyński A.: *High current vacuum arc in axial magnetic field*. Proceedings of the X-th International Conference on Switching Arc Phenomena SAP'2005.
- [4]. Shioiri T., Homma M., Kaneko E., Miyagawa M. and Ohshima I.: *Insulation characteristics of vacuum interrupter for a new 72/84 kV C-GIS*. XVIIIth ISDEIV, Eindhoven, Netherlands, August 1998.
- [5] *Decyzja Komisji Europejskiej z 30 maja 2002 r. dotycząca specyfikacji technicznej dla interoperacyjności podsystemu energia transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości określonego w art. 6 ust. 1 dyrektywy 96/48/WE*.
- [6] *Decyzja Komisji Europejskiej z 30 maja 2002 r. dotycząca specyfikacji technicznej dla interoperacyjności podsystemu tabor transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości określonego w art. 6 ust. 1 dyrektywy 96/48/WE (notyfikowany zgodnie z C(2002) 1952) (EOG) (2002/735/WE)*.
- [7] *TSI (2002/733/EG) z 30 maja 2002 r.*
- [8] Rostkowski W.: *Sieci trakcyjne prądu przemiennego i przejścia między systemami*. Materiały na kurs Nowoczesna trakcja elektryczna. Politechnika Warszawska, Centrum Doskonałości EESEMC. 18.03.2005 r.
- [9] Praca zbiorowa pod kier. A. Massela: *Wstępne studium wykonalności budowy linii dużych prędkości*. Wrocław/Poznań, Łódź, Warszawa. CNTK, Warszawa 2005.
- [10] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Synchronizowany wyłącznik próżniowy SWT dla kolei dużych szybkości*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK '2006, Zakopane, 19–21 października 2006 (s. 183–198).

Autorzy

prof. Marek Bartosik

dr inż. Ryszard Lasota

dr inż. Franciszek Wójcik

Instytut Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej

Zakład Aparatury Elektrycznej WOLTAN Sp. z o.o.

90-536 Łódź, ul. Gdańska 138

tel. 042 636 61 22, fax 042 636 14 03, e-mail: woltan@woltan.com.pl



Producent ultraszybkich wyłączników próżniowych nowej generacji dla trakcji elektrycznej

Nasza oferta obejmuje pełną gamę wyłączników do pojazdów trakcyjnych i podstacji trakcyjnych systemu prądu stałego:

trakcja kolejowa

- do zespołów trakcyjnych i lokomotyw małej mocy – wyłączniki typu: DCU 3/800; 630; 400; 250
- do lokomotyw – wyłączniki typu: DCN-L 3/1,2; 1,6; 2,5
- stacyjne dla trakcji 3 kV – wyłączniki typu: DCN 3/1,6; 2,5; 3,15 są to wyłączniki z komorą próżniową, z zasadą działania opartą na wyłączeniu przeciwpłędem

trakcja miejska

- wyłączniki pojazdowe typu: DCH 0,8/400; 250
- wyłączniki stacyjne typu: DCN-T 0,8/1,25; 2,5; 3,15 są to wyłączniki hybrydowe próżniowo-tranzystorowe
- wyłączniki pojazdowe typu: DCH-S 0,8/400 są to wyłączniki hybrydowe powietrzno-tranzystorowe (hybryda szeregową – tranzystor łączy prądy, jak również przewodzi)

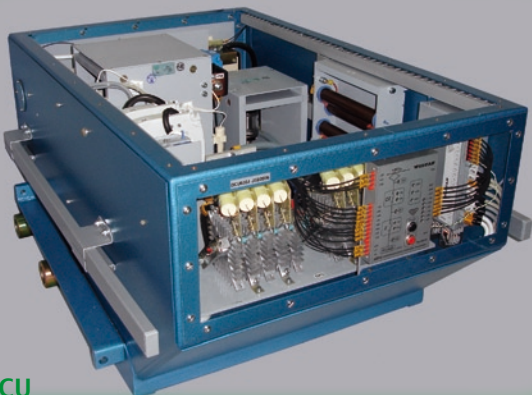
Do napięć 0,8 kV; 1,5 kV; 3 kV mogą być wyprodukowane wyłączniki na prądy ciągłe od 250 A do 3150 A, zgodnie z życzeniem klienta.

Wyłączniki nasze, w porównaniu z dotychczasowymi wyłącznikami mechanicznymi, charakteryzują się:

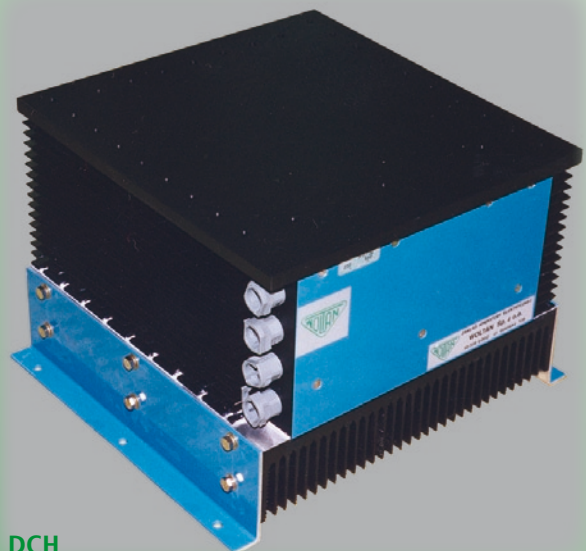
- lepszymi parametrami technicznymi (czas wyłączenia, współczynniki ograniczania pędu zwarciovego)
- wielokrotnie większą trwałością łączeniową
- minimalnymi kosztami eksploatacyjnymi
- atrakcyjną ceną.



DCN-L



DCU



DCH