

*XV Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2005**  
Oddział Gdański PTETiS

**WPLYW STEROWNIA BEZSTYKOWEGO OGRANICZNIKA  
PRĄDÓW ZWARCIOWYCH NA JAKOŚĆ ENERGII  
ELEKTRYCZNEJ**

**Piotr LEŚNIEWSKI<sup>1</sup>, Łukasz TLUSTOCHOWICZ<sup>2</sup>**

1. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk  
tel: (058) 347 14 66      fax: (058) 347 21 36      e-mail: plesn@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk  
tel: (058) 347 14 66      fax: (058) 347 21 36      e-mail: ltlus@ely.pg.gda.pl

W artykule przedstawiono działanie bezstykowego ogranicznika prądów zwarciovych w oparciu o symulację komputerową. Szczególną uwagę zwrócono na problem jakości dostarczanej energii elektrycznej poprzez ograniczanie zapadów napięcia w sieci elektroenergetycznej za pomocą bezstykowego ogranicznika prądów zwarciovych. Przedstawiono podstawowe problemy sterowania pracą ogranicznika oraz podstawowe wymagania układu sterującego. Analizę przeprowadzono w oparciu o symulację komputerową.

## **1. WSTĘP**

Dążenie do poprawy jakości energii wiąże się ściśle, między innymi, z redukcją zapadów napięcia w sieci, możliwą dzięki szybkiemu wyłączaniu z równoczesnym ograniczaniem dużych prądów przetężeniowych, głównie zwarć. W przypadku umiarkowanych prądów roboczych i dużych mocy zwarciovych dobre rezultaty przynosi stosowanie bezpieczników ograniczających. Gdy prądy robocze są większe - pozostają kosztowne wyłączniki ograniczające, których szybkość działania w porównaniu z bezpiecznikami jest jednak ograniczona, oraz kosztowne wyłączniki statyczne lub hybrydowe. Jedno z pierwszych rozwiązań wyłącznika hybrydowego zostało zaproponowane przez P. Collard'a i S. Pellichero [1], którzy opracowali szybki wyłącznik hybrydowy prądu stałego, wyłączający za pomocą przeciwprądu. Należy podkreślić, że w Polsce również bardzo szybko podjęto tematykę łączników hybrydowych [2, 3, 4]. Niestety, w skład wyłączników hybrydowych musi zawsze wchodzić łącznik zestykowy przewodzący prądy robocze, wyposażony w napęd. W przypadku łączników ograniczających, a więc szybkich, napęd wymaga znacznych energii. Wyeliminowanie tych wad zostało zaproponowane przez Wolnego [5, 6, 7] przez zastosowanie superkrótkiego bezpiecznika [8] w miejsce łącznika zestykowego. Ogranicznik nazwano CHCL (Contactless Hybrid Current Limiter). Optymalne działanie

takiego ogranicznika wymaga jednak precyzyjnegoysterowania elementu półprzewodnikowego równoległego do superkrótkiego bezpiecznika [8].

## 2. WPLYW CHCL NA JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

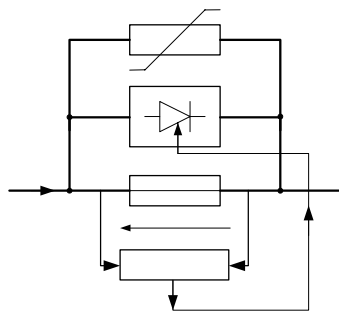
Jednym z głównych problemów jakości energii elektrycznej są zapady napięcia [9, 10, 11], które definiowane są jako nagłe zmniejszenie się napięcia zasilającego do wartości zawartej w przedziale od 90% do 1% napięcia deklarowanego, po którym w krótkim czasie następuje jego wzrost do wartości poprzedniej. Umownie czas trwania zapadu napięcia wynosi od 10 ms do 1 min [9]. Zapady napięcia charakteryzuje się za pomocą dwóch parametrów:

- czasu trwania  $\Delta t$ ;
- głębokości zapadu  $\Delta U$  - definiowana jako różnica między minimalną wartością skuteczną napięcia w czasie trwania zapadu a napięciem deklarowanym.

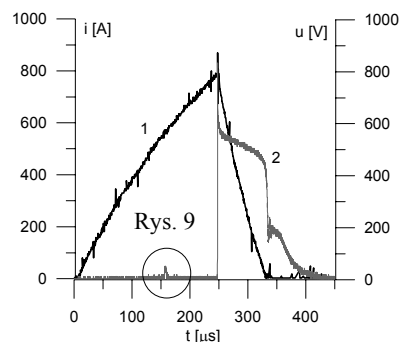
Zapady napięcia są wynikiem między innymi zwarć w systemie elektroenergetycznym. Głębokość zapadu związana jest z impedancją systemu oraz sposobem połączeń transformatorów [11], natomiast czas trwania zależy od czasu eliminacji zwarcia przez urządzenia zabezpieczające. W przypadku sieci niskiego napięcia są to głównie bezpieczniki oraz wyłączniki zestykowe. Czas działania wyłączników wynosi dziesiątki milisekund. Tak długi czas trwania zapadu napięcia nie może być tolerowany, szczególnie w odniesieniu urządzeń elektronicznych [12]. Poprzez zastosowanie CHCL można osiągnąć czas eliminacji zakłócenia znacznie poniżej 1 ms [5], jeśli zapewni się precyzyjne sterowanie przejmującego prąd IGBT, wpływając na czas łukowy i wytrzymałości powrotnej.

## 3. BUDOWA CHCL

Ogranicznik CHCL składa się z następujących podstawowych elementów: bezpiecznik krótkotopikowy (USF), element półprzewodnikowy wyłączalny (SD), absorber energii (MOV) pochłaniający energię pola magnetycznego wyłączanego obwodu oraz mikroprocesorowy układ sterowania (CS). Schemat CHCL przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat CHCL prądu stałego [5]



Rys. 2. Przebieg prądu i napięcia CHCL;  
1 – prąd, 2 – napięcie

Wymagania jakie powinien spełniać bezpiecznik krótkotopikowy przedstawiono w pracy [6, 8]. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prądów i napięcia podczas działania CHCL. Eksperyment wykonano w obwodzie drgającym LC o częstotliwości 488 Hz i spodziewanym prądzie zwarcia 1000 A. Zastosowano częstotliwość większą około 10 razy

większą od 50 Hz, w celu otrzymania dużej stromości prądu, przy stosunkowo niewielkiej wartości szczytowej prądu. Impuls sterujący IGBT kształtowany jest poprzez pomiar spadku napięcia na rozpadającym się USF.

#### 4. MODEL MATEMATYCZNY OGRANICZNIKA CHCL

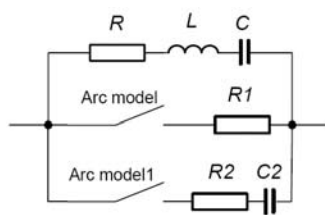
Przeprowadzenie symulacji działania ogranicznika CHCL wymaga starannego doboru modeli: bezpiecznika krótkotopikowego, równoległego urządzenia półprzewodnikowego oraz obwodu komutacyjnego. W literaturze dostępny jest bogaty wybór modeli urządzeń półprzewodnikowych i warystorów nadających się do symulacji działania CHCL. Najważniejszym problemem jest dobór odpowiedniego modelu bezpiecznika krótkotopikowego. Trudność wynika z silnego osiowego chłodzenia elementu topikowego [6, 8]. Ponieważ bardzo pracochłonne jest opracowanie modelu odzwierciedlającego wszystkie zjawiska fizyczne w bezpieczniku [13], często stosuje się modele uproszczone.

Modelowanie łuku i jego zapłonu w bezpieczniku krótkotopikowym do symulacji przerwania prądu oparto na bilansie energetycznym. Dobre wyniki uzyskano modyfikując model zaciskowy Cassiego, dostępny w pakiecie MATLAB [14]. Modyfikacja polega na wprowadzeniu dwuetapowości działania: „przed zapłonem” i „po zapłonie” oraz zastosowaniu dodatkowych elementów rozpraszania i pochłaniania energii w postaci rezystorów i kondensatorów (rys. 3). Zastosowany model opisuje następująca zależność 1:

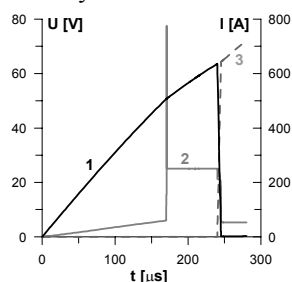
$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie  $g$  – przewodność elektryczna łuku,  $u$  – napięcie łukowe,  $i$  – prąd łuku,  $\tau$  – stała czasowa łuku,  $U_c$  – stała związana z warunkami chłodzenia łuku, o wymiarze napięcia

W obliczeniach numerycznych, współczynniki zależności (1) dobrano empirycznie na podstawie analizy procesu komutacji prądu CHCL. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w obwodzie drgającym LC o częstotliwości 480 Hz i spodziewanym prądzie zwarcio-wym o wartości 1,2 kA. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Model bezpiecznika krótkotopikowego



Rys. 4. Komutacja prądu pomiędzy bezpiecznikiem a tranzystorem (MATLAB)

1 – prąd zwarcia, 2- napięcie łuku, 3 – prąd tranzystora

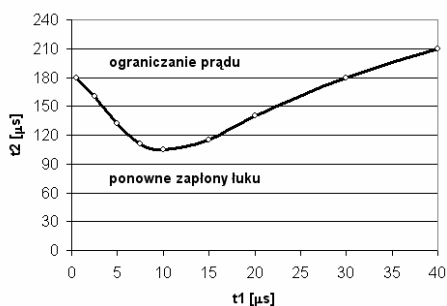
Model tranzystora IGBT i warystora przyjęto z biblioteki programu MATLAB. W modelu absorbera energii uwzględniono pojemności i indukcyjności wewnątrz warystora i zewnętrznego toru prądowego, w celu odzwierciedlenia jego charakterystyki statycznej i dynamicznej.

## 5. STEROWANIE TRANZYSTORA IGBT

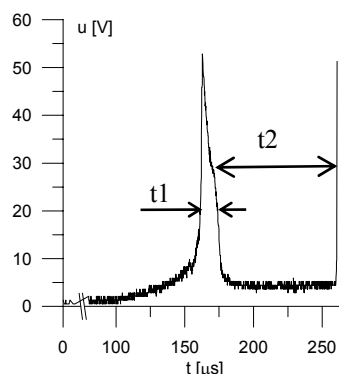
W działaniu CHCL bardzo ważnym problemem jest właściwe sterowanie elementem półprzewodnikowym [8]. Zbyt późne załączenie tranzystora, powoduje zbędne powiększenie wartości prądu ograniczonego, wytworzenie łuku o większej objętości i silniej zjonizowanej plazmie, co wydłuża czas dejonizacji. Zbyt wczesne wyłączenie może natomiast spowodować, że przerwa w wytopionym topiku będzie jeszcze zbyt krótka, co obniży wytrzymałość powrotną bezpiecznika krótkotopikowego a także może spowodować sytuację, w której nie można będzie wyłączyć tranzystora IGBT. Wynika stąd, że element energoelektroniczny musi być załączony jak najszybciej po przetopieniu się topika, ale jednak nie wcześniej niż po czasie potrzebnym do pełnej destrukcji topika, aby nie skrócić wytworzonej przerwy. Wszelkie opóźnienia w procesie wyłączania prądu są niekorzystne i powodują wzrost ograniczanego prądu i energii przepuszczanej przez ogranicznik, zwiększenie czasu eliminacji zakłócenia.

Czasy wytapiania topika i narastania wytrzymałości powrotnej zależą od prądu spodziewanego, zaś napięcie powrotne, które musi być wytrzymywane przez ogranicznik zależy od aktualnego stanu systemu elektroenergetycznego.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność między czasem łukowym ( $t_1$ ) a czasem dejonizacji ( $t_2$ ). Zależność wyznaczono w układzie drgającym LC o częstotliwości 488 Hz i prądzie spodziewanym 1 kA. Zastosowano topik miedziany  $\Phi 0,13$  mm o długości 1 mm.



Rys. 5. Zależność między czasem łukowym  $t_1$  a czasem dejonizacji  $t_2$  (czasem przewodzenia tranzystora IGBT);



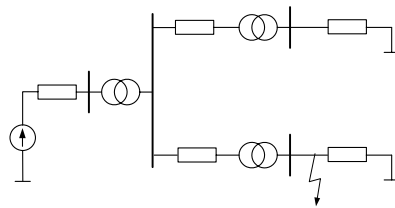
Rys. 6. Zależność między czasem łukowym  $t_1$  a czasem dejonizacji  $t_2$  (czasem przewodzenia tranzystora IGBT);

## 6. SYMULACJA DZIAŁANIA CHCL

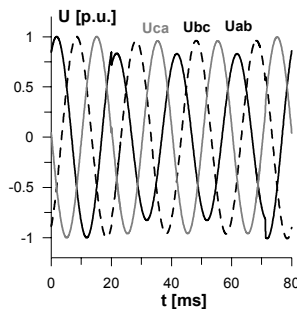
Eksperyment numeryczny przeprowadzono w programie MATLAB. Na rysunku 7 przedstawiono fragment systemu elektroenergetycznego, dla którego przeprowadzono obliczenia wyłączenia zwarcia jednofazowego z ziemią za pomocą klasycznego wyłącznika zestykowego oraz za pomocą CHCL. Podczas wystąpienia zakłócenia napięcie w miejscu zwarcia osiąga wartość bliską zero, natomiast napięcie na szynach najbliższego GPZ zależy od odległości miejsca zwarcia. Czas trwania zakłócenia zależy od szybkości eliminacji zwarcia, czyli zastosowanego aparatu zabezpieczającego.

Na rysunku 8 i 9 przedstawiono przebiegi napięcia, otrzymane w wyniku symulacji na szynach średniego napięcia  $U_{MV}$  podczas wyłączenia zwarcia jednofazowego z ziemią,

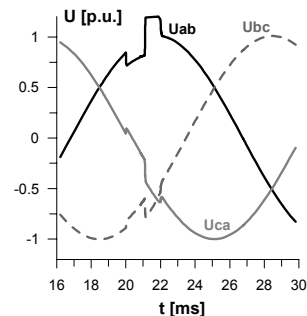
które powstało w punkcie A (rys. 7) przez klasyczny wyłącznik zestykowy (rys. 8) oraz ogranicznik CHCL (rys. 9). Dla wyłącznika klasycznego przyjęto czas własny 40 ms [15]. Modelując eliminację zakłócenia za pomocą CHCL przyjęto czas załączenia i czasu przewodzenia IGBT wynikający z krzywej przedstawionej na rysunku 5. Czas eliminacji zakłócenia, będący jednocześnie czasem trwania zapadu napięcia wynosi 51 ms w przypadku zastosowania wyłącznika zestykowego oraz 2 ms w przypadku zastosowania CHCL. Tak duża szybkość działania ogranicznika powoduje, że w tym przypadku nie występuje zapad napięcia, tylko stan nieustalony.



Rys. 7. Modelowany fragment systemu elektroenergetycznego;  $Z_{SC}$  – impedancja systemu elektroenergetycznego, HV/MV – transformator 115kV/16,5kV, 6.3MVA, Yg/D11, MV/LV – transformator 630kVA, 16.75kV/400V, D1/Yg,  $Z_l$ ,  $Z_{l1}$  – impedancja obciążenia ( $0.58\Omega$ ,  $\cos\varphi = 0.86$ ),  $Z_c$ ,  $Z_{C1}$  – impedancja linii kablowej ( $0.74\Omega$ )



Rys. 8. Przebiegi napięć na szynach  $U_{MV}$  podczas wyłączenia zwarcia za pomocą klasycznego wyłącznika (symulacja):  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  – napięcie na szynach średniego napięcia  $U_{MV}$



Rys. 9. Przebiegi napięć na szynach  $U_{MV}$  podczas wyłączenia zwarcia za pomocą CHCL (symulacja):  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  – napięcie na szynach średniego napięcia  $U_{MV}$

## 7. PODSUMOWANIE

Zastąpienie łącznika zestykowego w hybrydowym ograniczniku prądów zwarciovych bezpiecznikiem krótkotopikowym znacząco redukuje rozmiary i koszty ogranicznika, przy równoczesnym zagwarantowaniu dużej szybkości działania i stopnia ograniczania prądu.

Za pomocą CHCL można osiągnąć czas eliminacji zakłócenia w czasie rzędu pojedynczych ms (rys. 9) jeśli zapewni się odpowiednio dobrane sterowanie przejmującego prąd IGBT wyłączanego w najkorzystniejszym momencie i wyłączanego dopiero wówczas, gdy jest gwarancja, że obszar połukowy bezpiecznika krótkotopikowego został skutecznie zdejonizowany. Badania eksperymentalne (rys. 5) wskazują na występowanie optymalnych czasów, dla których proces ograniczania prądu będzie przebiegał najszybciej.

Dobór optymalnego algorytmu sterowania pracą CHCL wpływa pozytywnie na jakość energii elektrycznej przez eliminację zapadów napięcia w systemie elektroenergetycznym.

Za pomocą symulacji możliwa jest ocena zastosowania CHCL w systemie elektroenergetycznym oraz określenie, o ile wydłuży się czas zakłócenia w obwodzie zabezpieczonym CHCL stosunku do przypadku z klasycznym wyłącznikiem zestykowym.

#### **Podziękowanie**

Autorzy składają podziękowanie i stwierdzają, że wykonanie badań było możliwe dzięki projektowi badawczemu nr 3T 10A 059 27: „Sterowanie hybrydowego bezstykowego ogranicznika prądów zwarciovych”, finansowanemu przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

1. Collart P., Pellichero S.: A new high speed DC circuit breaker: the D.H.R. Colloquium Organized by Professional Group P6 and P2, London, 1989.
2. Czucha J., Pikoń M., Żyborski J.: Ultra rapid IGBT current limiting interrupting device of very high breaking capacity. 8-th International Symposium on Short-Circuit Current in Power System, Brussels 1998, pp.219-222.
3. Żyborski J., Lipski T., Czucha J., Hassan S.: Hybrid arcless low-voltage AC/DC current limiting interrupting device, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, October 2000.
4. Batrosik M., Wójcik F.: Arcless DC hybrid circuit breaker, SAP&ETEP-97, Lodz 1997.
5. Wolny A., Semenowicz B.: Hybrid contactless short-circuit current limitation. 10-th International Symposium on “Short Circuit in Power Systems”, Lodz, 28-29 October 2002, Conf. Proc., pp.221-225, ISBN 83-914296-3-6.
6. Wolny A., Semenowicz B., Leśniewski P.: Features of a short fuse, as a main current path of a contactless hybrid current limiter. 10-th International Symposium on “Short Circuit in Power Systems”, Lodz, 28-29 October 2002, Conf. Proc., pp.227-230, ISBN 83-914296-3-6.
7. Wolny A.: A new method of current limitation, Seventh International Conference of Electric Fuses and their applications, 8-10 September, Jurata 2003, pp. 103-107, ISBN 83-88829-76-9.
8. Semenowicz B.: Bezpiecznik krótkotopikowy jako element bezstykowego hybrydowego ogranicznika prądów, Rozprawa doktorska (maszynopis), Gdańsk 2005.
9. PN-EN 50160:1998: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
10. M.F. McGranaghan, Mueller D.R., Samotyj M.J.: Voltage sags in industrial systems. IEEE Trans. Industry Applications, vol. 29, no. 2, March/April 1993, pp.379-403.
11. Bollen M.H.J.: Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three-phase systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003,
12. <http://www.itic.org> ( maj 2003).
13. Czucha J.: Arc ignition process in short fuse elements. 7-th International Conference of Electric Fuses and their applications, 8-10 September, Jurata 2003, pp. 168-173, ISBN 83-88829-76-9.
14. Schavemaker P.H.: Arc model blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blokset – User’s guide, Delft University of Technology, 2001.
15. Karta katalogowa wyłączników serii DS - APENA

### **CONTROL EFFECT OF HYBRID CONTACTLESS SHORT-CIRCUIT LIMITERS ON POWER QUALITY**

The paper presents the operation of a hybrid contactless short-circuit current limiter (CHCL) on the basis of computer simulation. Special attention has been paid to the possibility of the quality improvement of the delivered electrical energy, by means of the limitation of the voltage dips duration in the power grid owing to the application of a contactless hybrid current limiter. Basic problems concerning the control of CHCL operation and requirements for the control system have been described. The analysis has been based upon experiments and computer simulation.