

ZASTOSOWANIE ŁĄCZNIKÓW HYBRYDOWYCH DO JEDNOFAZOWEGO WYŁĄCZANIA TRÓJFAZOWYCH ZWARĆ ŁUKOWYCH

Piotr LEŚNIEWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

tel: (58) 347-14-66 fax: (58) 347-21-36 e-mail: p.lesniewski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono działanie bezstykowego ogranicznika prądów zwarciovych (CHCL). Bezpiecznik krótkotopikowy stanowi główny tor prądowy ogranicznika, a jego charakterystyki decydują o własnościach CHCL. Omówiono również wyniki modelowania matematycznego wyłączania 3-fazowych zwarć łukowych w rozdzielnicach niskonapięciowych za pomocą aparatów umieszczanych jedynie w środkowej fazie płaskiego układu szyn zbiorczych. Jako aparaty wyłączające stosowano: bezpieczniki oraz łączniki hybrydowe, szczególną uwagę zwracając na możliwość zastąpienia wyłącznika WACH ogranicznikiem CHCL. Po wyłączeniu w środkowej fazie 3-fazowe zwarcie łukowe przechodzi w zwarcie 2-fazowe, z łukiem palącym się między fazami skrajnymi. Zwarcia 2-fazowe, na skutek samoistnego gaśnięcia łuku przy najbliższym przejściu prądu przez zero, wyłączają się samoczynnie.

Słowa kluczowe: zwarcia łukowe, ograniczniki prądu.

1. INFORMACJE OGÓLNE

Zapłon łuku w rozdzielnicy, zwanego łukiem awaryjnym zawsze stanowi poważne zagrożenie dla systemu elektroenergetycznego. Z licznych publikacji wiadomo, że energia takiego łuku mniejsza niż 100 kJ nie wywołuje większych szkód, ale od poziomu 200 kJ problemy narastają [1]. Utrzymanie zwarcia przez ułamek sekundy, przy prądzie zwarciovym kilkadziesiąt kA, powoduje wydzielanie energii 200 kJ, przy napięciu łuku ok. 100 V. Dlatego sprawą ważną jest jak najszybsze wyłączenie prądu łuku awaryjnego, a jeśli to możliwe - z ograniczeniem prądu, aby jak najbardziej zredukować wydzielaną energię.

Łuk awaryjny jest dużym zagrożeniem, ale prawdopodobieństwo jego zaistnienia jest niewielkie. Najczęściej jest wywoływany przez zwierzęta lub nieostrożność obsługi. Zabezpieczenie się przed jego skutkami można traktować jako zabezpieczenie życiowe. Powinno ono być natychmiastowe, bez opóźnienia wynikającego z selektywności zabezpieczeń, najlepiej z ograniczeniem prądu.

Choć w systemie niskiego napięcia (nn) z uziemionym punktem neutralnym zwarcie bez udziału ziemi zdarza się dość rzadko, to w przypadku trójfazowego łuku awaryjnego palącego się między szynami w rozdzielnicy istotny udział zwarcia doziemnego jest mniej prawdopodobny. Odległości torów prądowych do uziemionych przewodzących osłon i elementów konstrukcyjnych zwykle są znacznie większe niż odstępy

międzyfazowe, zaś napięcia fazowe są $\sqrt{3}$ razy mniejsze. Dlatego łuk doziemny w niskonapięciowej rozdzielnicy ma tendencję do samoistnego gaśnięcia. Często zdąży jednak wywołać łukowe zwarcie międzyfazowe, które okazuje się najistotniejszym zagrożeniem dla rozdzielnicy nn.

Celowe jest poszukiwanie sposobów zminimalizowania skutków cieplnych i elektrodynamicznych podczas zwarć łukowych, polegających przede wszystkim na skracaniu czasów trwania zwarć. W systemach niskonapięciowych można stosować urządzenia o bardzo krótkim czasie wyłączania, np. ultraszybkie wyłączniki półprzewodnikowe, bezpieczniki ograniczające lub hybrydowe bezstykowe ograniczniki prądów z bezpiecznikami krótkotopikowymi [2, 3]. Przy szybkim wyłączaniu energia zwarć łukowych będzie zależała też od napięcia, prądu znamionowego wkładki bezpiecznikowej lub prądu zadziałania wyłącznika oraz konstrukcji rozdzielnicy.

W rozdzielnicach nn ciekawym rozwiązaniem jest możliwość gaszenia łuku zwarcia trójfazowego (bez udziału ziemi) w płaskim układzie szyn przez wyłączenie prądu tylko w jednej, środkowej fazie. Wówczas łuk może się palić wyłącznie między szynami skrajnymi, co wymaga zwiększenia jego długości. W konsekwencji zwiększone napięcie łukowe redukuje prąd w tych fazach i powoduje jego przerwanie przy najbliższym przejściu przez zero [4].

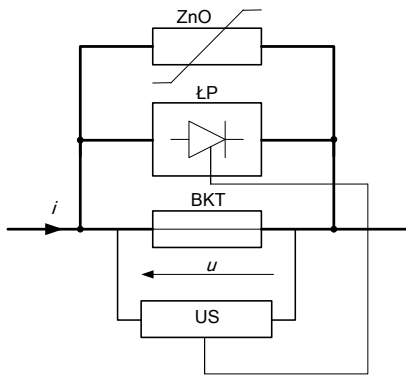
Do zabezpieczania rozdzielnicy w takich przypadkach hybrydowy bezstykowy ogranicznik prądów zwarciovych (CHCL) zainstalowany w środkowej szynie płaskiego układu szyn może okazać się niezwykle praktyczny i ekonomiczny, szczególnie w przypadku dużych prądów roboczych.

2. BEZSTYKOWY OGRANICZNIK PRĄDU ZWARCIOWEGO

2.1. Budowa

Ogranicznik CHCL (rys. 1) składa się z trzech równoległych torów prądowych: bezpiecznika krótkotopikowego (BKT), łącznika półprzewodnikowego (ŁP), absorbera energii (ZnO) pochłaniającego energię zgromadzoną w polu magnetycznym wyłączanego obwodu oraz mikroprocesorowego układu sterowania (US), którego zadaniem jest załączenie oraz wyłączenie w odpowiednim momencie łącznika półprzewodnikowego. W przypadku

rozpatrywanego CHCL jako ŁP zastosowano tranzystor IGBT. Schemat CHCL przedstawiono na rysunku 1.

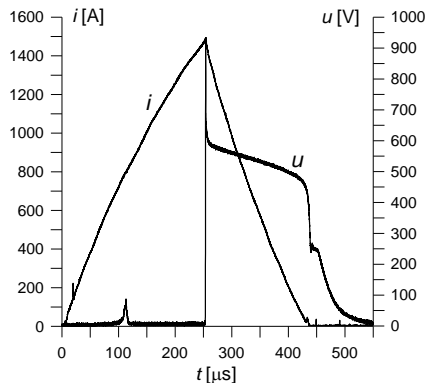


Rys. 1. Schemat CHCL prądu stałego [3]

2.2. Zasada działania

W warunkach roboczych prąd w CHCL płynie tylko przez bezpiecznik [2, 3]. W czasie zwarcia w zabezpieczonym obwodzie następuje rozpad topika i zapłon łuku. Między zaciskami BKT pojawia się napięcie łukowe, znacznie przewyższające napięcie przepustowe łącznika półprzewodnikowego, a więc wystarczające do wymuszenia przerzutu prądu do łącznika półprzewodnikowego (ŁP).

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów i napięcia podczas działania CHCL. W bezpieczniku wykorzystano topik Ag o średnicy 0,13 mm. Eksperyment wykonano w obwodzie drgającym RLC o częstotliwości 488 Hz i spodziewanym prądzie zwarcia 1,8 kA. Zastosowano więc częstotliwość prądu probierczego około 10 razy większą od częstotliwości sieciowej w celu otrzymania dużej stromości narastania prądu, przy stosunkowo niewielkiej jego wartości szczytowej.

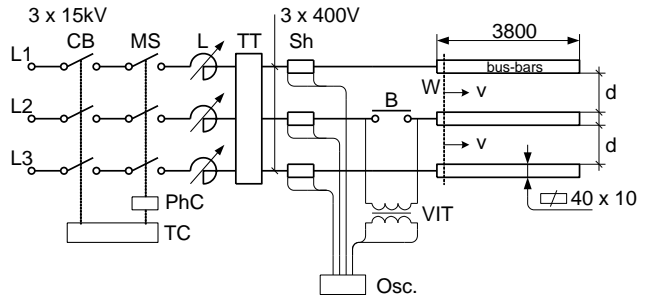


Rys. 2. Przebieg prądu i napięcia CHCL

3. JEDNOFAZOWE WYŁĄCZANIE TRÓJFAZOWYCH ZWARĆ ŁUKOWYCH

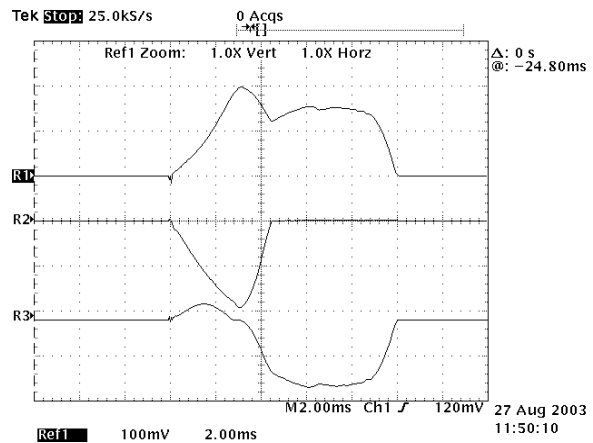
W Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych PG od wielu lat są prowadzone badania nisko- i średnionapięciowego łuku zwarciego w rozdzielnicach osłoniętych [1,4]. Badania, których wyniki przedstawiono w referacie, były wykonywane w układzie probierczym przedstawionym na rysunku 3, przy prądach spodziewanych do ok. 38 kA, przy napięciu 400 V i $\cos\varphi=0,1...0,2$. Odstęp między szynami wynosiły od 50 mm do 100 mm. Do wyłączenia stosowano bezpieczniki WT 160, wyłącznik ograniczający Limitor LN200 firmy ABB oraz wyłącznik hybrydowy WACH [5]. Łuk inicjowano drutem miedzianym o średnicy 0,12 mm. Rejestrowano

prądy fazowe i napięcie na łączniku. Układ był przystosowany również do pomiaru mocy i energii zwarć łukowych. Parametry łączeniowe aparatów stosowanych do jednofazowego wyłączenia były tak dobrane, aby przy danej geometrii szyn i parametrach zwarcioowych energia zwarcia nie przekraczała wartości bezpiecznej równej 100 kJ.

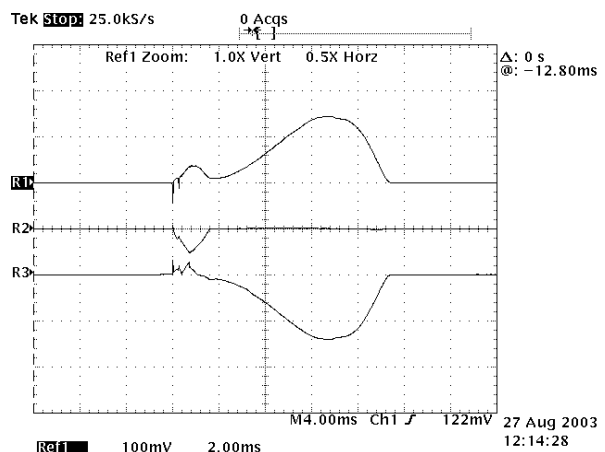


Rys. 3. Schemat układu do badań 1-fazowego wyłączenia 3-fazowych zwarć łukowych na szynach rozdzielnic niskonapięciowych; CB – wyłącznik bezpieczeństwa, MS – załącznik zwarcioowy, L – dławiki do regulacji prądu probierczego, TT – transformator wieloprądowy, Sh – boczniki pomiarowe, B – bezpiecznik lub wyłącznik, W – miejsce inicjowania zwarcia łukowego, V – kierunek ruchu łuku elektrycznego, d – odstęp międzyszynowy, PhC – nastawnik fazowy, TC – nastawnik czasowy, VIT – przekładniki napięciowe, Osc. – oscyloskop

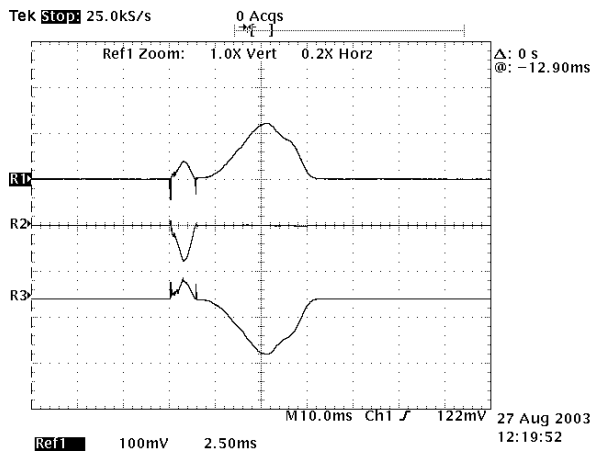
Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 4-7 [4].



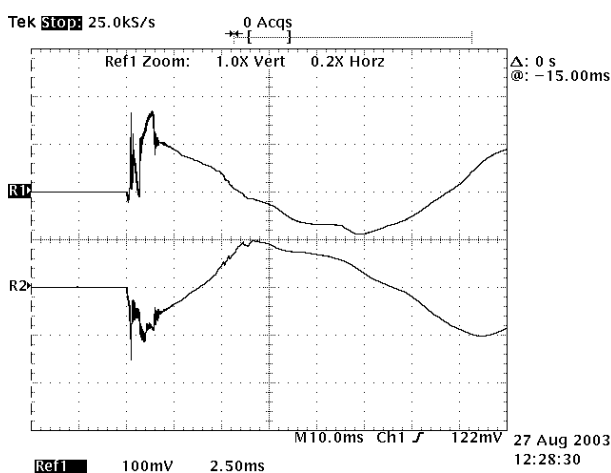
Rys. 4. Oscylogram jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przy pomocy bezpiecznika WT 160; napięcie probiercze $U_b=460$ V, spodziewany prąd zwarcioowy $I_k=11,7$ kA, kąt fazowy napięcia $\psi=27^\circ$, $d=50$ mm, Cu.; R1 – prąd i_{L1} , R2 – prąd i_{L2} , R3 – prąd i_{L3} , stała $k_f=4$ kA/dz.



Rys. 5. Oscylogram jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przy pomocy wyłącznika WACH; $U_b=403$ V, spodziewany prąd zwarcioowy $I_k=11,7$ kA, prąd dyskryminatora 1000 A, $d=60$ mm, Al; R1 – prąd i_{L1} , R2 – prąd i_{L2} , R3 – prąd i_{L3} , stała $k_f=4$ kA/dz



Rys. 6. Oscylogram jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przy pomocy wyłącznika WACH; napięcie probiercze $U_b=403$ V, spodziewany prąd zwarcioowy $I_k=19,7$ kA, prąd dyskryminatora 1100 A, $d=60$ mm, Al; R1 – prąd i_{L1} , R2 – prąd i_{L2} , R3 – prąd i_{L3} , stała $k_i= 4$ kA/dz.



Rys.7. Oscylogram jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przy pomocy wyłącznika WACH; napięcie probiercze $U_b=403$ V, spodziewany prąd zwarcioowy $I_k=19,7$ kA, prąd dyskryminatora 1100 A, $d=60$ mm, Al; R1 – napięcie $u_{L1,L2}$, R2 – napięcie $u_{L2,L3}$, stała $k_u= 0,55$ kV/dz

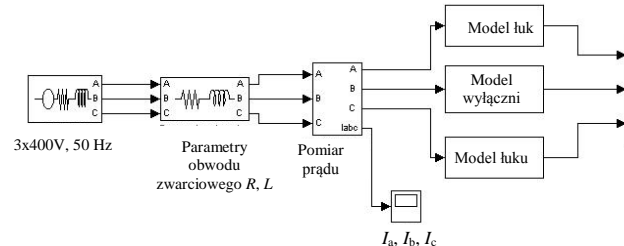
Jak wynika z oscylogramów na rysunkach 4, 5, 6 i 7 po wyłączeniu w środkowej fazie trójfazowe zwarcie łukowe przechodzi w zwarcie dwufazowe z łukiem palącym się między fazami (szynami) zewnętrznymi, a następnie przez wydłużanie i zwiększanie napięcia prąd łuku jest sprowadzany do zera. Maksymalna wartość prądu zwarcia dwufazowego jest niższa niż wartość prądu zwarcia trójfazowego, co świadczy o znacznym ograniczeniu prądu, przede wszystkim na skutek ponad dwukrotnego wydłużenia łuku.

Porównując oscylogramy przedstawione na rysunku 4 i 5 można stwierdzić, iż przy zbliżonych wartościach prądu spodziewanego I_k przy czasie wyłączenia w środkowej fazie ok. 4,5 ms, czas trwania zwarcia wynosi ok. 10 ms (rys. 5), a przy znacznie krótszym czasie wyłączenia, wynoszącym ok. 1,5 ms – czas zwarcia wynosi ok. 9,2 ms (rys. 6). Mimo znacznego skrócenia czasu wyłączenia w środkowej fazie czas trwania zwarcia niewiele się zmniejsza. To wynika przede wszystkim z warunków palenia się łuku i możliwości sprowadzenia prądu do zera. Przedstawione na rysunkach 4 i 5 oscylogramy dotyczą sytuacji, gdy w danych warunkach zwarcioowych czasy trwania zwarcia są najdłuższe z

możliwych, tzn. po wyłączeniu w środkowej fazie w każdym przypadku powstaje zwarcie dwufazowe.

4. MODELOWANIE JEDNOFAZOWEGO WYŁĄCZANIA ZWARC ŁUKOWYCH

W analizie jednofazowego wyłączenia zwarc trójfazowych duże znaczenie posiada modelowanie komputerowe. W obliczeniach ważną rolę odgrywa właściwy dobór modelu matematycznego analizowanego zjawiska. Niestety, opracowanie pełnego modelu matematycznego badanego procesu jest najczęściej kosztowne i pracochłonne. Często wykorzystuje się modele uproszczone, które pozwalają jednak na analizę zjawiska. Do analizy jednofazowego wyłączenia zwarc trójfazowych wykorzystano program MALAB-SIMULINK z biblioteką SimPowerSYSTEM. Symulację przeprowadzono w oparciu o schemat blokowy przedstawiony na rysunku 8.



Rys.8. Schemat blokowy modelu jednofazowego wyłączenia zwarc trójfazowych.

Do obliczeń przyjęto zaciskowy model łuku Cassiego [6]. Opisany jest on następującym równaniem różniczkowym:

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

gdzie:

- g – konduktancja łuku;
- u – napięcie łuku;
- i – prąd łuku;
- τ – stała czasowa łuku;
- U_c – wartość stała napięcia łuku.

Model łuku opisany zależnością (1) jest modelem łuku stacjonarnego, dlatego w analizie wprowadzono dodatkowe elementy zmieniające rezystancję łuku wraz ze zmianą położenia palącego się między szynami łuku. Parametry występujące w zależności (1) przyjęto na podstawie analizy oscylogramów z rzeczywistych eksperymentów. Pełne odzwierciedlenie zachodzących w poruszającym się łuku zjawisk łukowych nie było przedmiotem badań. Napięcie łuku zwarcioowego, w przybliżeniu niezależne od czasu, wynosi [7]

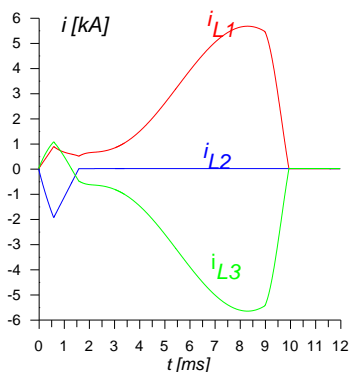
$$U_c = 35 + 1,6d + 6,6I_L \quad (2)$$

gdzie:

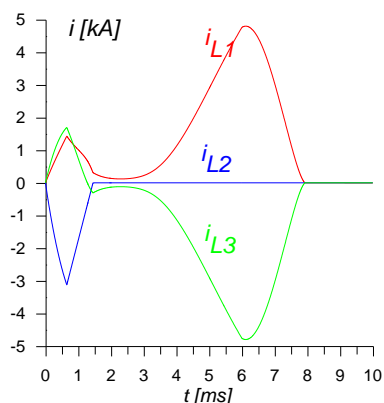
- d – odległość między szynami, [mm]
- I_L – prąd łuku, [kA].

4.1. Wyniki symulacji

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki symulacji wyłączenia jednofazowego zwarc łukowych za pomocą łącznika hybrydowego WACH.



Rys. 9. Wyniki obliczeń jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przez wyłącznik WACH; i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} – prądy fazowe, spodziewany prąd zwarciovy $I_k=11,7$ kA, kąt nastawnika fazowego $\varphi=115^\circ$, prąd dyskryminatora 1000 A, $d=60$ mm



Rys. 10. Wyniki obliczeń jednofazowego wyłączenia trójfazowego zwarcia łukowego przez wyłącznik WACH; i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} – prądy fazowe, spodziewany prąd zwarciovy $I_k=19,7$ kA, kąt nastawnika fazowego $\varphi=115^\circ$, prąd dyskryminatora 1100 A, $d=60$ mm

Skuteczność zastosowania łączników hybrydowych do jednofazowego wyłączenia zwarć łukowych została potwierdzona w badaniach eksperymentalnych z wykorzystaniem zamiast WACH-a ogranicznika CHCL może przynieść większe korzyści, szczególnie, że nie zawiera on kosztownego i zajmującego dużo miejsca kondensatora pozwalającego na bardzo szybkie otwarcie styków. Jedyną niedogodnością jest konieczność wymiany bezpiecznika po wyłączeniu zwarcia, co nie powinno stanowić problemu, gdyż i tak jest wymagana interwencja obsługi celem określenia przyczyny awarii. Ogranicznik CHCL może dodatkowo współpracować z układami wykrywającymi zwarcia łukowe, działającymi na zasadzie detekcji błysku światła w momencie zapłonu łuku. Bezpiecznik BKT jest

zamknięty w obudowie i nie generuje żadnego widocznego na zewnątrz błysku światła w momencie rozpadu topika. W kluczowych z punktu widzenia zasilania rozdzielnicach dodatkowy układ detekujący łuk może pełnić w stosunku do CHCL redundantny układ zabezpieczeń. CHCL w stosunku do wyłącznika WACH jest znacznie szybszy, co wynika z wykorzystanych do jego budowy tranzystorów IGBT.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W rozdzielnicach osłoniętych niskonapięciowych istnieją możliwości znacznego ograniczania czasów trwania zwarć łukowych, a więc energii tych zwarć przez stosowanie szybko działających urządzeń wyłączających. Przy płaskim ułożeniu szyn istnieje możliwość wyłączenia zwarć łukowych przy pomocy urządzeń jednofazowych, jako oszczędnościowych. Przy bardzo dużych prądach zwarciovych spodziewanych i jednocześnie przy dużych prądach znamionowych szyn do szybkiego wyłączenia i ograniczania czasów trwania zwarcia można stosować 1-fazowe ultra szybkie wyłączniki hybrydowe.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Partyka R.: The measurement and calculation of gas temperature inside a switchgear during fault arc period. *Archiwum Elektrotechniki* 2004.
2. Wolny A., Semenowicz B.: Hybrid contactless short-circuit current limitation, 10-th International Symposium on "Short Circuit in Power Systems", Łódź, 28-29 October 2002, Conf. Proc., p. 221-225.
3. Wolny A.: A new method of current limitation, Seventh International Conference of Electric Fuses and their applications, 8-10 September, Jurata 2003, p. 103-107.
4. Partyka R.: Badanie Skutków zwarć łukowych w rozdzielnicach osłoniętych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Seria Monografie - nr 70, Gdańsk, 2006r.
5. Żyborski J., Hassan S.: Wyłączenie prądu zwarciovygo przemiennego metodą wstrzykiwania prądu obwodowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej "Elektryka"* nr 9, Gdańsk 1996.
6. Schavemaker P. H., van der Sluis L.: The arc model blockset, Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS, Crete 2002.
7. Koch B.: Zwarcia łukowe. Podstawowe charakterystyki, *Elektroinstalator* nr 3, 2002.
8. Czucha J., Partyka R., Żyborski J.: Ultraszybkie urządzenia do ograniczania prądu przy zwarciach łukowych w instalacjach niskiego napięcia, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej*, Nr 9, Gdańsk 1996

THE APPLICATION OF THE HYBRID CURRENT LIMITER TO SINGLE-PHASE SWITCHING OFF A THREE-PHASE FAULT ARC

Key-words: fault arc, current limiter

A new idea of a hybrid contactless current limiter and the properties of existing current limiter are discussed. On the substitution of a special ultra-short fuse for a contact switch in the hybrid current limiter a new device has been obtained, suitable for fast short-circuit fault cleaning. Experimental investigations carried out, of the fault arc in 3-phase 1.v. switchboards show that it is possible to interrupt this fault by means of 1-phase interrupting apparatus. As a protective apparatus a fuse or circuit-breaker placed only in one central bar was used. After switching off the feeding by this fuse of the bar, the short-circuit goes into a 2-phase arcing fault between the outermost bars. Then this open arc is interrupted finally by the quenching at its natural current nearest to zero.