ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Górnictwo z. 61 Nr kol. 406

Zbigniew Kowalski
Henryk Pudełko

PERSPEKTYWY ZWIĘKSZANIA BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH KOPALŃ METANOWYCH W OPARCIU O ULTRASZYBKIE WYŁĄCZANIE DOPŁYWU ENERGII

Streszczenie. Przedstawiono zagadnienia bezpieczeństwa eksploatacji górniczych sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia oraz perspektywy konstrukcji ultraszybkiego wyłącznika w oparciu o statyczne łączniki i elementy półprzewodnikowe. Omówiono sposób ograniczania energii w miejscu uszkodzenia izolacji oraz podano analizę przebiegu wyłączania. Opisane problemy mogą znaleźć szczególne zastosowanie przy elektryfikacji kopalń o zagrożeniu metanowym i pyłowym.

1. Wstęp

Kompleksowe bezpieczeństwo eksploatacji sieci elektroenergetycznych jest podstawowym problemem elektryfikacji podziemi kopalń, szczególnie niebezpiecznych z uwagi na występowanie pyłu węglowego i metanu.

Dalszy rozwój górnictwa związany jest z koniecznością zastąpienia energii pneumatycznej energią elektryczną i całkowitą elektryfikacją oddziałów wydobywczych. Ochrona od skutków rażenia prądem elektrycznym oraz od skutków wybuchu pyłu i metanu jest elementem kompleksowego bezpieczeństwa. Energia wydzielona w miejscu uszkodzenia izolacji stanowi główny czynnik określający skuteczność tej ochrony. Dotychczasowy system zasilania oparty jest na sieciach iskrobezpiecznych słaboprądowych i nieiskrobezpiecznych izolowanych silnoprądowych.

W warunkach elektryfikacji podziemi kopalń z nagłymi wyrzutami metanu i kopalń o zagrożeniu pyłowym przyjęte kryteria są niewystarczające . Bezpieczeństwo eksploatacji sieci elektroenergetycznych jest funkcją parametrów R, L, C układu energetycznego, czasu trwania zakłócenia, energii, mocy, napięcia i prądu. Kryteria oceny tych parametrów określone na drodze eksperymentalnej różnią się znacznie, zależnie od przyjętej metodyki badań i analizy rodzaju zagrożenia.

Występujące zagrożenia naruszenia bezpieczeństwa eksploatacji obejmują działania: wybuchowo-pożarowe i rażeniowe. Podstawowym źródłem zagrożenia wybuchowego są zwarcia łukowe doziemne i międzyfazowe, zarówno występujące w przewodach elektroenergetycznych jak i w osłonach budowy zamkniętej. Osłony ognioszczelne mogą w niekorzystnych przypadkach wewnętrznego zwarcia łukowego nie stanowić żadnej ochrony, jeżeli powstałe układy elektrod

skierują strumienie plazmy na obudowę. Przy dostatecznej energii tych strumieni nastąpi przepalenie osłony i przeniesienie zagrożenia na zewnątrz.

Minimalna energia zapłonu mieszaniny metanu i powietrza jest rzędu setek milidżuli. Energia wydzielająca się przy zwarciach łukowych wynosi kilkadziesiąt do kilku tysięcy watosekund.

Osłony ognioszczelne lokalizują miejsce ewentualnego zagrożenia, jeżeli występuje w obrębie obudowy. Z uwagi na małe moce,obwody iskrobezpieczne obejmują układy sterowania, sygnalizacji i zabezpieczeń a więc również nie rozwiązują zagadnienia kompleksowego bezpieczeństwa wybuchowego.

Ograniczenie energii w miejscu uszkodzenia wpływa decydująco na bezpieczeństwo eksploatacji sieci elektroenergetycznych. W systemie separacji źródeł energii od miejsca uszkodzenia izolacji zasadniczą rolę odgrywa czas trwania zakłócenia. Niedopuszczenie do przeniesienia wyładowania łukowego poza osłony kabli i przewodów oraz osłony ognioszczelne ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wybuchowego i rażeniowego.

System separacji miejsca uszkodzenia izolacji od źródeł energii polega na wyłączeniu głównego źródła zasilania oraz zwieraniu źródeł indukujących siły elektromotoryczne po wyłączeniu. W zakresie zagrożenia rażeniowego należy się liczyć z niebezpiecznym działaniem prądu elektrycznego na organizm człowieka powodowanym amplitudą prądu i czasem przepływu.

Rozrzut mocy i energii przy zagrożeniu wybuchowym i rażeniowym jest bardzo duży i zmienia się od przypadku do przypadku. Wybór minimalnej energii,wynikającej z analizy wszystkich zagrożeń jako kryterium bezpieczeństwa eksploatacji,jest niemożliwy z uwagi na trudności w zakresie praktycznej realizacji pomiarów. Istotnym zaś jest nie zagadnienie minimalnej energii a zagadnienie ilościowe i jakościowe przekazywania energii do miejsca zwarcia oraz w jaki sposób jej wartość zależy od parametrów obwodu elektrycznego. Stąd jedynym możliwym do przyjęcia kryterium bezpieczeństwa dla rozważanych parametrów układu sieci jest czas odseperowania uszkodzonego odcinka sieci od źródeł energii. Analiza kryteriów bezpieczeństwa sieci z izolowanym punktem zerowym z punktu widzenia zagrożenia rażeniowego ujawnia bardzo ważne właściwości. Przy pojemnościach sieci wyższych od określonej wartości wzrost rezystancji izolacji sieci powoduje zwiększenie wartości prądu uszkodzenia. W sieciach z izolowanym punktem zerowym z kompensacją prądów pojemnościowych, w przypadku przekompensowania określonej wartości indukcyjności, podwyższenie rezystancji izolacji sieci spowoduje wzrost prądu uszkodzenia. W związku z tym rezystancja izolacji faz sieci w stosunku do ziemi nie może stanowić bezwzględnego kryterium bezpieczeństwa eksploatacji. W przypadku mechanicznego uszkodzenia izolacji obwodu elektrycznego niebezpieczne rozładowanie energii w miejscu uszkodzenia powstanie niezależnie od tego, jaka wartość rezystancji izolacji poprzedzała stan zakłócenia.

Wartość pojemności sieci, przy której zwiększenie rezystancji izolacji spowoduje zwiększenie prądu przepływającego przez człowieka zależy od je-

go rezystancji. Im rezystancja będzie większa tym mniejsza będzie wartość tej pojemności. A więc pojemność sieci wyższa od określonej wartości lub indukcyjność mniejsza przy podwyższaniu rezystancji izolacji pogarszają warunki bezpieczeństwa. Uznając słuszność powyższych stwierdzeń dla kompleksowego bezpieczeństwa eksploatacji sieci stosowanie kompensacji nieautomatycznej prądów pojemnościowych, transformatorów separacyjnych, jest z punktu widzenia ochrony rażeniowej i wybuchu metanu mało skuteczne a przyjmowanie jako kryterium bezpieczeństwa tylko rezystancję izolacji nie wystarczające.

Kompleksowe bezpieczeństwo eksploatacji można zapewnić w systemie ultraszybkiego wyłączenia i separacji źródeł energii.

Mechaniczne uszkodzenia przewodów prowadzą do dwóch zasadniczych zakłóceń: zwarcia doziemnego lub zwarcia międzyfazowego. W sieciach elektroenergetycznych wartości skuteczne składowych okresowych prądów zwarcia osiągają przy napięciach do 1000 V kilka tysięcy amper. Najczęściej występują uszkodzenia przewodów w zastawkach przenośnika oraz przez wyrwanie z wpustów i sprzęgników. Zasada szybkiego wyłączania prądów i separacji źródeł energii od miejsca uszkodzenia izolacji może zapewnić bezpieczeństwo eksploatacji pod warunkiem skutecznego wyłączania w odpowiednio krótkim czasie i ograniczenia dopływu energii do miejsca uszkodzenia. Nieznane są aktualnie prędkości uszkodzeń mechanicznych prowadzących do zakłóceń elektrycznych, uszkodzeń które zachodzą przy wyrwaniu przewodów z wpustów oraz przy narażeniach mechanicznych przewodów w ścianie eksploatacyjnej. Realnie występujące uszkodzenia zarówno przy wyrywaniu jak i zgniataniu odbywają się z prędkością mniejszą niż 5 m/s. W zakresie uszkodzeń mechanicznych przewody z ekranem izolowanym znacznie korzystniej eliminują oraz zmniejszają prawdopodobieństwo wybuchu w połączeniu z układami ultraszybkiego wyłączania i separacji źródeł energii, niż przewody z ekranem uziemionym. Inaczej wygląda zagadnienie wprowadzenia przewodów do maszyn i urządzeń. W tym przypadku czynnikiem gwarantującym bezpieczeństwo może być wyłącznie sprzęgnik lub wpust z zabezpieczeniem przed wyrwaniem. Każde wyrwanie przewodu musi być związane z wcześniejszym wyłączeniem i zwarciem źródeł energii.

Z punktu widzenia kompleksowego bezpieczeństwa eksploatacji sieci elektrycznych, system ultraszybkiego wyłączania powinien obejmować zabezpieczenia od skutków:

- wyrwania przewodów z wprowadzeń do maszyn i aparatów,
- narażeń mechanicznych przewodów bez uszkodzenia zewnętrznej opony (zwarcia wewnętrzne),
- narażeń mechanicznych z uszkodzeniem zewnętrznej opony,
- przeniesienia zwarć łukowych w osłonach ognioszczelnych na zewnątrz wskutek niszczącego działania strumieni plazmy.

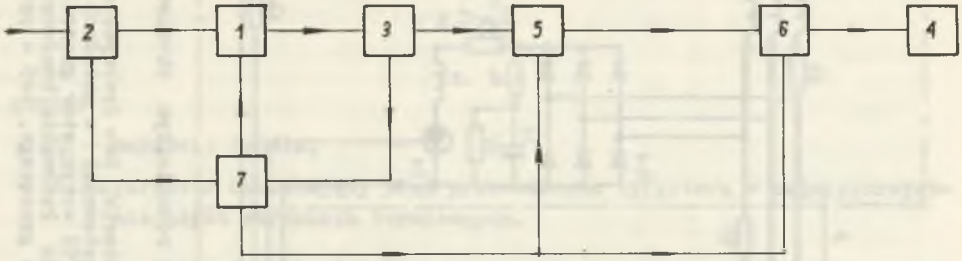
Szybkie wyłączanie prądu przy podanych rodzajach uszkodzeń znacznie zmniejsza prawdopodobieństwa zagrożenia wybuchowego i rażeniowego. Kompleksowe bezpieczeństwo powinno uwzględniać ochronę sieci z ultraszybkim wyłączaniem w przypadku zaistnienia każdego z wymienionych zagrożeń. W systemie tym istnieją realne szanse rozszerzenia zakresu stosowania żył kabli i przewodów z aluminium zamiast miedzi również w podziemiach kopalń metanowych, co miałoby poważny aspekt ekonomiczny.

Badania prowadzone w zakresie uprzedzającego wyłączania w Instytutach MAKNII i WOSTNII nasuwają istotne wnioski dla dalszych badań i opracowań konstrukcyjnych. Przy szybkim wyłączeniu i odseparowaniu miejsca uszkodzenia izolacji od źródeł energii, wyładowania elektryczne łukowe nie wydostają się na zewnątrz osłon a energia wyładowania praktycznie nie zależy od mocy transformatora, obciążenia i napięcia sieci. Odcięcie dopływu energii do miejsca uszkodzenia izolacji od źródeł zasilania oraz stwierdzone obniżenia wartości prądów i napięć uzasadniają powyższe spostrzeżenia. Spośród wielkości: energia, moc, prąd, napięcie, rezystancja i czas trwania zakłócenia, jako kryterium kompleksowego bezpieczeństwa eksploatacji można uznać jedynie czas. Czynnik czasu posiada również istotne znaczenie dla reakcji organizmu człowieka. Czas przepływu prądu ze względu na skutki rażenia oraz czas trwania zakłócenia ze względu na zagrożenie wybuchowe, odpowiadają wymaganiom kompleksowego bezpieczeństwa. W oparciu o przeprowadzone porównania, zagadnienie bezpieczeństwa eksploatacji można sprowadzić do układu z szybkodziałającymi łącznikami i zabezpieczeniami o krótkich czasach działania poniżej 1 ms. Realizacja zagadnienia w oparciu o technikę półprzewodnikową zwiększa szanse powodzenia przedsięwzięcia, umożliwia realizację krótkich czasów zadziałania przy dużej trwałości i niezawodności całego systemu.

2. Wybór układu modelowego

Badania eksperymentalne w Zakładzie Elektryfikacji Kopalń ZKMPW nad systemem ultraszybkiego wyłączania przeprowadzono w trójfazowej sieci o napięciu 220 V z transformatorem 3,5 kVA, zasilającym silnik wiertarki elektrycznej o mocy 1 kW. Schemat blokowy układu ultraszybkiego wyłączania i separacji źródeł zasilania przedstawia rys. 1. W systemie zastosowano wyłącznik w obwodzie prądu stałego o równoległym układzie gaszeniowym do łączenia punktu gwiazdowego transformatora zasilającego. Równoległy układ gaszeniowy wykazuje nieco słabsze ograniczenie prądu zwarciowego niż szeregowy układ gaszeniowy, lecz nie powoduje ostrych przepięć, które są nieodłącznym zjawiskiem układu szeregowego. Energia potrzebna do wyłączenia zgromadzona jest w kondensatorze gaszeniowym doładowywanym w sposób ciągły napięciem transformatora zasilającego. Rozładowywanie części energii sieci oraz odcięcie źródeł sił elektromotorycznych

od miejsca uszkodzenia izolacji przewodów realizują na zaciskach wyjściowych transformatora i odbiornika trójfazowe statyczne zwieracze.



Rys. 1. Schemat blokowy układu ultraszybkiego wyłączania i separacji źródeł energii

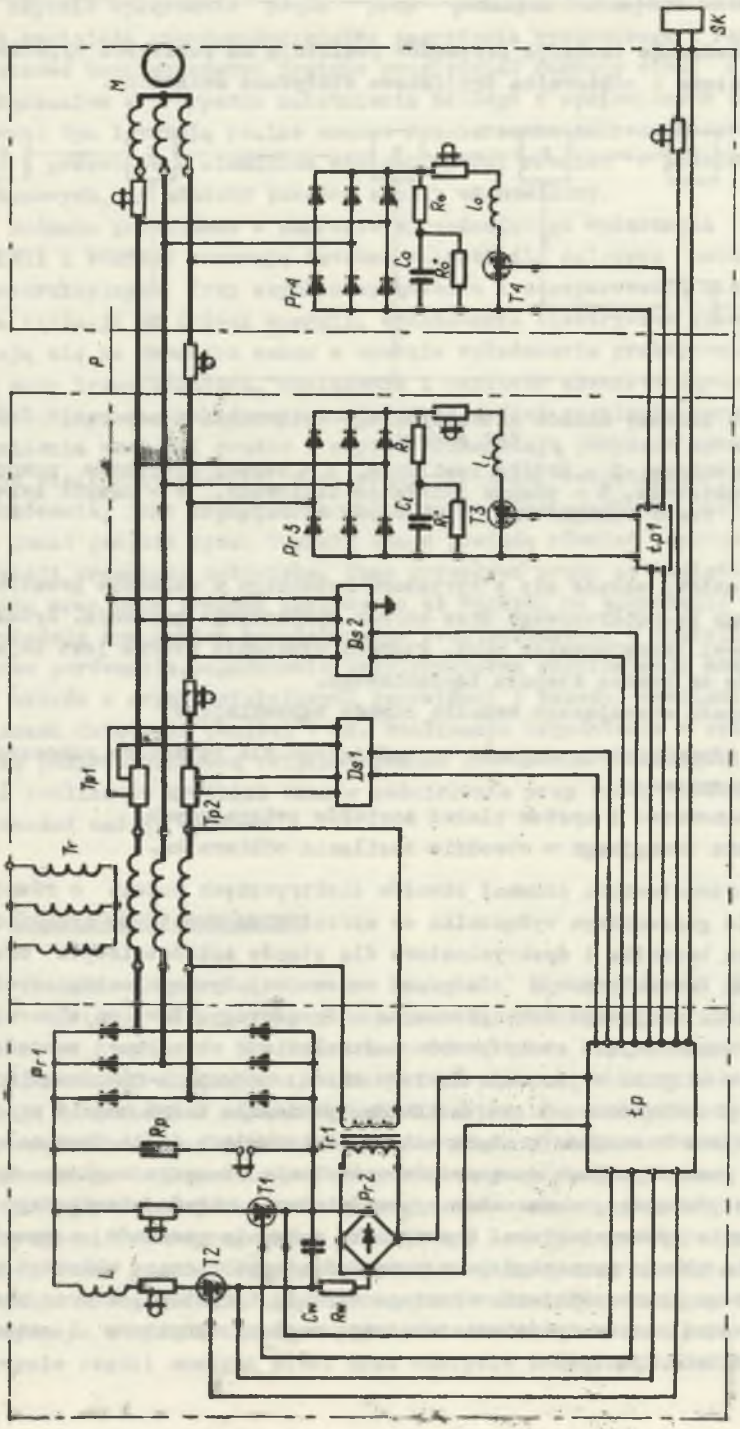
1 - zespół łączeniowy, 2 - źródło zasilania, 3 - zespół elementów pomocniczych, 4 - odbiornik, 5 - zespół zwieracza liniowego, 6 - zespół zwieracza maszynowego, 7 - zespół sterujący

Zespół łączeniowy składa się z tyrystora roboczego w układzie prostowania trójfazowego pełnookresowego oraz układu wymuszonego gaszenia. Źródło zasilania stanowi transformator mocy, którego uzwojenie wtórne jest kojarzone w gwiazdę za pomocą zespołu łączeniowego.

W skład zespołu sterującego wchodzą obwody zapewniające:

- wytworzenie odpowiedniego sygnału wyzwalającego dla tyrystora roboczego i układu gaszeniowego,
- sterowanie manewrowe i system blokad zespołów zwierających,
- detekcję stanu awaryjnego w obwodzie zasilania odbiornika.

Na rys. 2 przedstawiono schemat obwodów elektrycznych modelu o równoległym układzie gaszeniowym wyłącznika ze sprzężeniem zwrotnym, zrealizowanym za pomocą bocznika i dyskryminatora dla stanów zakłóceniowych oraz ze sterownikiem kontaktronowym dla pracy manewrowej. Dyskryminator spełnia rolę szybkodziałającego zabezpieczenia nadprądowego. Zawiera elementy przełączające zapewniające stały poziom zadziałania o określonej wartości. Dyskryminator w stopniu wejściowym zawiera człon całkująco-różniczkujący, rozróżniający przeciążenia od zwarć. Alternatywnie, dla badań modelu przewidziano w miejsce bocznika transformator różniczkujący di/dt. Czas załączania układu gaszącego jest sumą czasów opóźnienia własnego zapłonu tyrystora układu gaszącego, czasu własnego zadziałania układu sterującego i czasu zadziałania dyskryminatora. W przypadku wyrwania przewodu z wpustu, czas załączenia układu gaszącego jest sumą opóźnienia i czasu własnego układu sterującego oraz opóźnienia własnego zapłonu tyrystora, a przy pracy manewrowej sumą czasów opóźnienia własnego zapłonu tyrystora i czasu własnego układu sterującego.



Rys. 2. Układ elektryczny zwieraczy źródeł energii i ultraszybkiego wyłącznika z równoległym obwodem gaszeniowym

Tr - transformator mocy, M - silnik elektryczny, P - przewód zasilający, Tp - bocznik, Ds - dyskryminator, Zp - zespół sterujący, SK - sterownik, L - indukcyjność tłumiąca di/dt, Pr - prostowniki w układach jednofazowego i trójfazowego pełnookresowego prostowania, T1 - tyrystor roboczy, T2 - tyrystor gaszeniowy, T3, T4 - tyrystory zwieraczy liniowego i maszynowego, Tr2 - transformator obwodu ładowania kondensatora gaszącego, Cw - kondensator gaszący, R_w - rezystor obwodu ładowania kondensatora gaszącego, 1÷9 - pętlice pomiarowe

Kondensator gaszeniowy jest ładowany w sposób ciągły z wewnętrznego źródła zasilania poprzez rezystancję, której wartość spełnia warunek

$$R > \frac{U_o}{I_h}$$

gdzie:

U_o - napięcie źródła,

I_h - parametr określający prąd przewodzenia tyrystora w najniekorzystniejszych warunkach termicznych.

Kolejne załączenie jest możliwe po ponownym naładowaniu kondensatora, to jest po upływie około $t_z = 5\ T$ dla $T = RC$. Ograniczenie stromości narastania do wartości dopuszczalnej w obwodzie układu gaszącego tytystora realizuje dławik, którego indukcyjność spełnia nierówność

$$L \geq \frac{U_o}{\frac{di}{dt}_{max}}$$

gdzie:

$\frac{di}{dt}_{max}$ - dopuszczalna stromość narastania prądu anodowego.

3. Opis działania

System ultraszybkiego wyłączania ma na celu ograniczyć oraz wstrzymać dopływ energii do miejsca uszkodzenia przed powstaniem zagrożeń wybuchowych, pożarowych i rażeniowych w przypadkach uszkodzenia izolacji przewodów lub wyrwania przewodów z wpustów.

Wyposażenie elektryczne systemu stanowią: ultraszybki wyłącznik statyczny, przewód ekranowany oraz statyczne zwieracze liniowy i maszynowy.

W przypadku uszkodzenia izolacji przewodu następuje zadziałanie zabezpieczenia upływowego podającego sygnał dla działania wyłącznika. Wyłącznik odłącza źródło zasilania od uszkodzonej sieci. Równocześnie działają zwieracze od strony transformatora zasilającego i silnika.

Zgniecenie przewodu prowadzące do międzybiegunowych zwarć wewnętrznych powoduje zadziałanie zabezpieczeń zwarciowych, podanie sygnału dla działania wyłącznika i zwieraczy.

W przypadku wyrwania przewodu z wpustu następuje przed utratą ognioszczelności, połączenia przewód-skrzynka przyłączowa, przerwanie obwodu sterowania, ultraszybkie wyłączenie prądów źródła oraz zwarcie zacisków transformatora zasilającego i odbiornika.

Zwieracze mają za zadanie wytłumić energię elektromagnetyczną wirujących silników, rozładować pojemności linii przesyłowych i wyeliminować dopływ energii elektrycznej do miejsca uszkodzenia.

Wyprzedzające wyłączanie w połączeniu z przewodem z dodatkowym ekranem izolowanym zapewnia skuteczniejsze eliminowanie zakłóceń w postaci przecięcia przewodu lub zgniecenia z uszkodzeniem zewnętrznym opony. W przypadku zwarć wewnętrznych i wyrwania z wpustu kabli lub przewodów z ekranem uziemionym, ultraszybkie wyłączenie oraz separacja źródeł zasilania stanowią wystarczającą ochronę, eliminującą zagrożenie wybuchowe, pożarowe i rażeniowe.

Łączenia manewrowe dokonuje sterownik kontaktronowy przez podanie impulsu na tyrystor T1. Tyrystor kojarzy uzwojenie wtórne transformatora zasilającego Tr w gwiazdę i powoduje załączenie odbiornika M. Wyłączenie odbiornika dokonuje sterownik przez podanie impulsu w obwód sterowania tyrystora T2. Tyrystor T1 zostaje wyłączony napięciem kondensatora gaszeniowego. Szybkość zmian prądu obciążenia zewnętrznego wymusza prąd ładowania kondensatora C w obwodzie z dławikiem L i tyrystorem T2. Jeżeli prąd ładowania kondensatora zmaleje do wartości prądu podtrzymania tyrystora T2, nastąpi wyłączenie prądu obciążenia trójfazowego silnika M i załączenie zwieraczy Pr3 i Pr4.

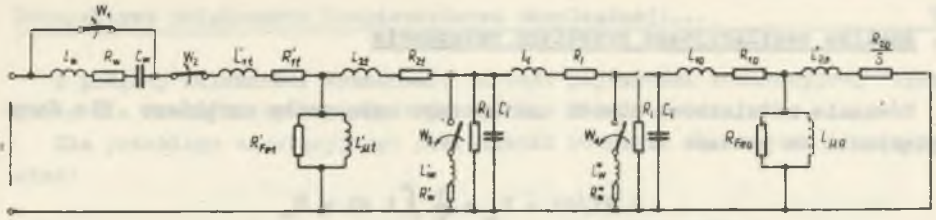
W przypadku awaryjnego wyłączania, impuls sterujący zostaje podany za pomocą boczników lub transformatorów Tp poprzez dyskryminator różniczkujący Ds i zespół aparatury pomocniczej Łp do ultraszybkiego wyłącznika oraz zwieraczy.

Mechaniczne uszkodzenie opony przewodu spowoduje podanie sygnału wyzwalającego poprzez szybkodziałające zabezpieczenie upływowe Ds1.

Wyrwanie przewodu związane jest z podaniem impulsu wyłączającego za pośrednictwem obwodu sterownika kontaktronowego SK.

4. Schemat zastępczy układu i założenia wstępne analizy

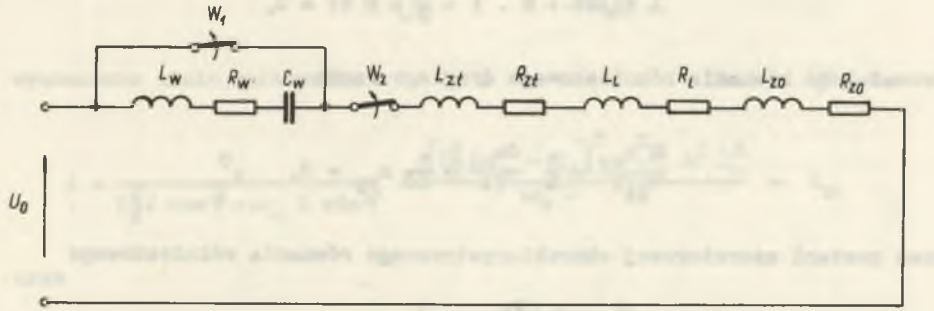
Model dla analizy przebiegów zachodzących w obwodach przy wyłączaniu obciążenia przedstawia układ jednofazowy wg rys. 3, który zawiera połączenie szeregowe 4 czwrónników. Transformator odwzorowany jest przy pomocy czwrónika "T", linia przesyłowa przy pomocy czwórnika "π", a odbiornik przy pomocy zwartego czwórnika "T". W obwodzie szeregowo znajduje się ponadto czwórnik prosty złożony z impedancji zawierającej elementy RLC, zwarte łącznikiem W1 odwzorowującym z łącznikiem W2 działanie ultraszybkiego wyłącznika. Zwieracze liniowe i maszynowe są odwzorowane przy pomocy jednobiegunowych łączników mechanicznowych W3 i W4.



Rys. 3. Schemat zastępczy układu ultraszybkiego wyłącznika i zwieraczy dla fazy wyłączania

W1 - wyłącznik symulujący tyrystor roboczy, W2 - wyłącznik symulujący tyrystor gaszeniowy, W3 - łącznik symulujący tyrystor zwieracza liniowego, W4 - łącznik symulujący tyrystor zwieracza maszynowego, Cw - pojemność gaszeniowa, Lw, Rw - indukcyjność i rezystancja tłumiące di/dt prądu obwodu gaszeniowego, Lt, Rt - parametry transformatora, Ll,Rl,Ri,Ci - parametry linii, Lo, Ro, S - parametry odbiornika

Upraszczając układ zastępczy dla wykonania obliczeń nie uwzględniono obwodów magnesujących silnika i transformatora,bocznikującego wpływu strat w żelazie oraz założono liniowe zmiany indukcyjności rozproszenia transformatora i silnika. W przedziale czasu $t_0 \leq t \leq t_1$ w którym występuje wyłączenie,przyjęto stałą wartość napięcia zasilania U_0. Ponadto w obliczeniach nie uwzględniono zamykania zwieraczy W3 i W4,przy czym moment otwarcia wyłącznika W1 przyjęto dla $t_0 = 0$. Uproszczony schemat dla analizy przebiegu wyłączania przedstawia rys.4.



Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy ultraszybkiego wyłącznika dla fazy wyłączania

Oznaczenia jak na rys. 3

Dalszym uproszczeniem układu jest przyjęcie najniekorzystniejszego przypadku odpowiadającego warunkom: $C_0 \ll 1$, $R_1 \gg 1$ i $U_2 = 0$. Rozpoczęcie przebiegu wyłączania $t_0 = 0$ odpowiada otwarciu wyłącznika W1 natomiast czas zakończenia przebiegu wyłączania t_1 (dla $I = 0$), otwarciu wyłącznika W2.

5. Analiza oscylacyjnego przebiegu wyłączania

Równanie różniczkowe obwodu zastępczego wyłącznika szybkiego dla fazy wyłączania ma postać:

$$L\, di/dt + R_i + \frac{1}{C}\int i\, dt = U_o$$

W równaniu dla uproszczenia zapisu przyjęto

$$L = L_w + L_{zt} + L_l + L_{zo}$$

oraz

$$R = R_w + R_{zt} + R_l + R_{zo}$$

Zastąpienie wielkości

$$i = C\frac{du_{cp}}{dt} \quad \text{oraz} \quad \frac{1}{C}\int i\, dt = U_{cp}$$

w równaniu charakterystycznym napięć obwodu szeregowego z elementami RLC

$$L\, di/dt + R \cdot i + \frac{1}{C}\int i\, dt = 0,$$

prowadzi do równania różniczkowego drugiego rzędu

$$\frac{d^2u_{cp}}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{du_{cp}}{dt} + \frac{1}{LC}u_{cp} = 0,$$

oraz postaci operatorowej charakterystycznego równania różniczkowego

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Charakter przebiegu zależy od parametrów obwodu, tj. pierwiastków równania charakterystycznego.

Uzyskanie krótkiego czasu wyłączania wymaga spełnienia warunku wymuszającego charakter oscylacyjny przebiegu:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Z podanej zależności wyznaczono wartość pojemności komutacyjnej tyrystora dla rzeczywistych parametrów obwodu R i L.

Dla przebiegu oscylacyjnego pierwiastki równania są urojone i mają postać:

$$p_{1,2} = -k \pm j\omega_o = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Rozwiązanie równania można zapisać

$$u_{cp} = A\sqrt{\frac{L}{C}}\, e^{-kt} \sin(\omega_o t + B)$$

Różniczkując powyższą zależność otrzymano równanie prądu

$$i = A \quad e^{-kt} \cos(\omega_o t + B + \eta)$$

Z warunków brzegowych

$$t = 0 \qquad U_c = 0,$$

$$t = 0 \qquad i = I_o$$

wyznaczono stałe całkowania

$$A = \frac{U_o}{(\frac{R}{2}) \cos\varphi - \omega_o L \sin\varphi} = \frac{\left[(\frac{R}{2}) I_o - U_o\right]^2 + \omega_o^2 L^2 I_o^2}{\omega_o L} = I_m$$

oraz

$$tg(B + \eta) = \frac{(\frac{R}{2}) I_o - U_o}{\omega_o L I_o}$$

Podstawiając zamiast

$$A = I_m \quad \text{oraz} \quad B + \eta = \varphi$$

otrzymano zapis funkcyjny prądu

$$i = I_m e^{-kt} \cos(\omega_o t + \varphi)$$

i napięcia przyłożonego do niewysterowanych elementów półprzewodnikowych

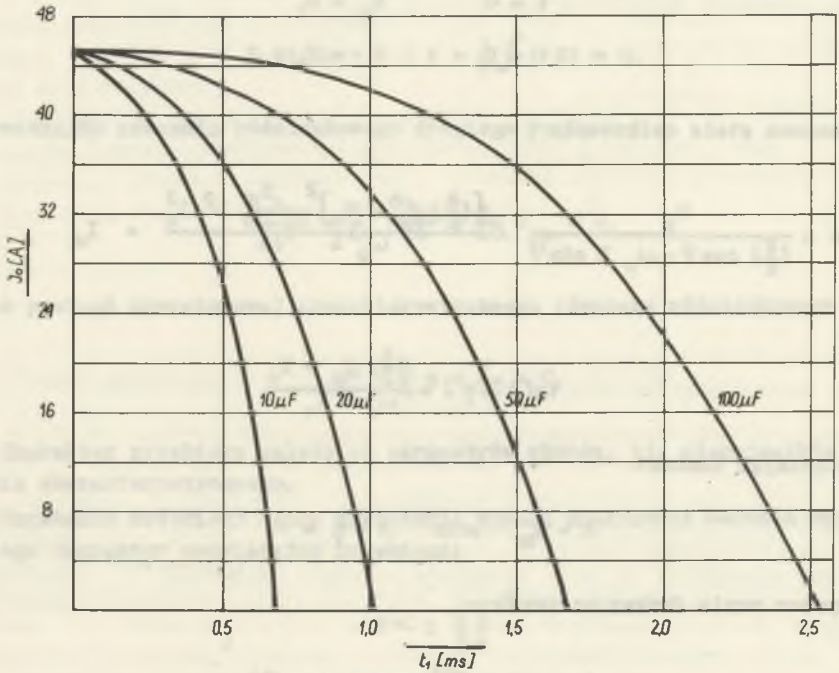
$$U_{ct} = U_o - I_m \quad e^{-kt} \left[\left(\frac{R}{2}\right) \cos(\omega_o t + \varphi) - \omega_o L \sin(\omega_o t + \varphi) \right]$$

Pojemność kondensatora komutacji musi zapewniać wymagany krótki czas wyłączania przy dopuszczalnych przepięciach łączeniowych.

Wyłączenie następuje w chwili przechodzenia prądu przez zero. Czas wyłączania określa równanie

$$\omega_o \quad t_1 + B + \eta = \frac{\pi}{2}$$

$$t_1 = \frac{\frac{\pi}{2} - (B + \eta)}{\omega_o} = \frac{\pi - 2(B + \eta)}{2\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

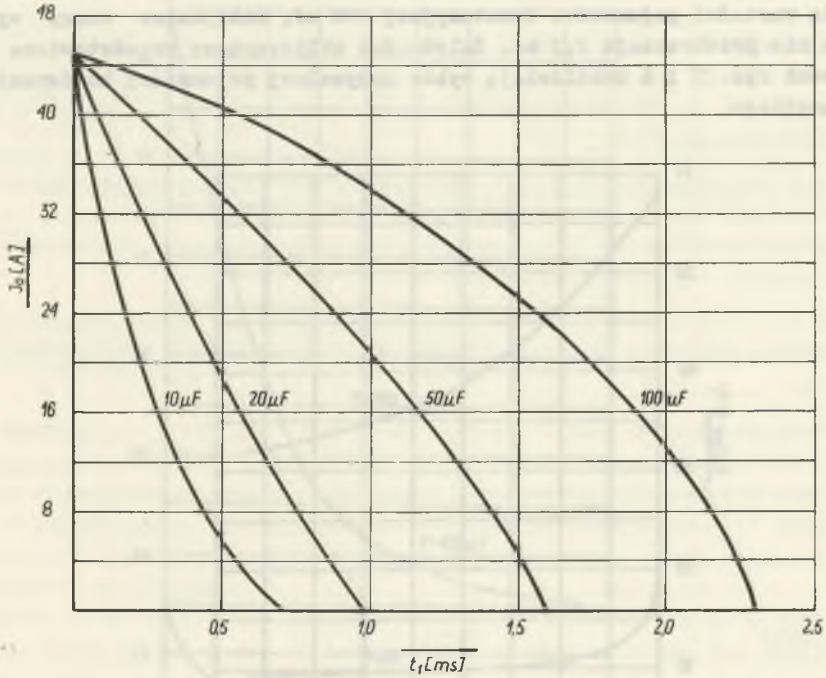


Rys. 5. Zależność prądów wyłączeniowych od czasów wyłączania i pojemności komutacyjnej obwodu modelowego układu dla $R_1 = 0$, $L_1 = 0$

Stałą całkowania η wyznacza równanie

$$tg\,\eta = \frac{R}{\sqrt{4\frac{L}{C} - R^2}}$$

Wyniki obliczeń czasów wyłączania wyłącznika szybkiego $t_1 = \frac{\pi - 2\varphi}{2\omega_o}$ dla $\frac{L}{R^2} = 3700 \cdot 10^{-6}$ przedstawiono na rysunku 5 a dla $\frac{L}{R^2} = 360 \cdot 10^{-6}$ na rysunku 6.



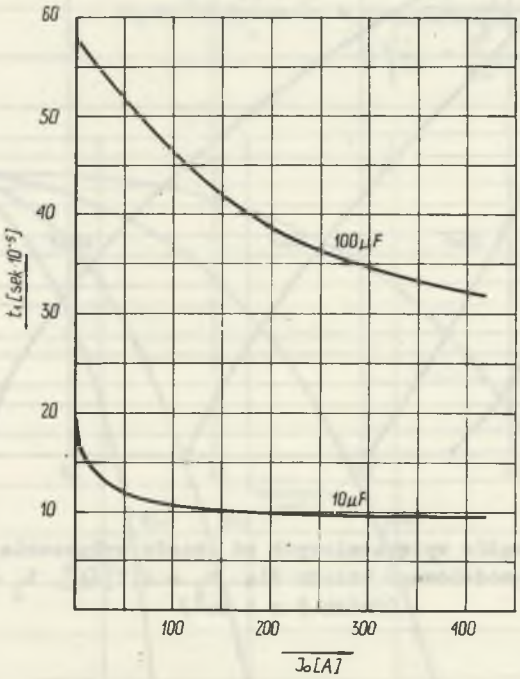
Rys. 6. Zależność prądów wyłączeniowych od czasów wyłączania i pojemności komutacyjnej obwodu modelowego układu dla $R_1 = 4,7[\Omega]$, $L_1 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ H (OnGek 5 x 4 mm²)

6. Dyskusja wyników oraz zakres badań

Analizę wpływu parametrów obwodu na czas wyłączania wyłącznika przeprowadzono przyjmując wartość składowej okresowej początkowej prądu zwarcia trójfazowego I_p = 420 A na zaciskach transformatora mocy 3,5 kVA o przekładni 500/231 V jako graniczną wartość prądu zakłóceniowego.

Maksymalne czasy wyłączania występują przy najmniejszych wartościach prądu. Dla kondensatora komutacyjnego o wartości pojemności od 10 μF do 100 μF czasy wyłączania wynoszą odpowiednio 0,2 do 0,58 ms.

Najdłuższe czasy wyłączania występują przy zahamowanym silniku przy parametrach linii zasilającej $R \approx 0$; $L \approx 0$ (rys. 5) i wynoszą dla kondensatora komutacyjnego o wartości od 10 μF do 100 μF odpowiednio 0,69÷2,53 ms. Udział parametrów linii zasilającej (rys. 6) wpływa korzystnie na ograniczenie czasów wyłączania prądów. Przy linii długości 1 km i przekroju 4 mm^2 dla wartości pojemności komutacyjnej 100 μF, maksymalne czasy wyłączania nie przekraczają 2,3 ms. Zależności obliczeniowe przedstawione na wykresach rys. 5 i 6 umożliwiają wybór optymalnej pojemności kondensatora komutacyjnego.

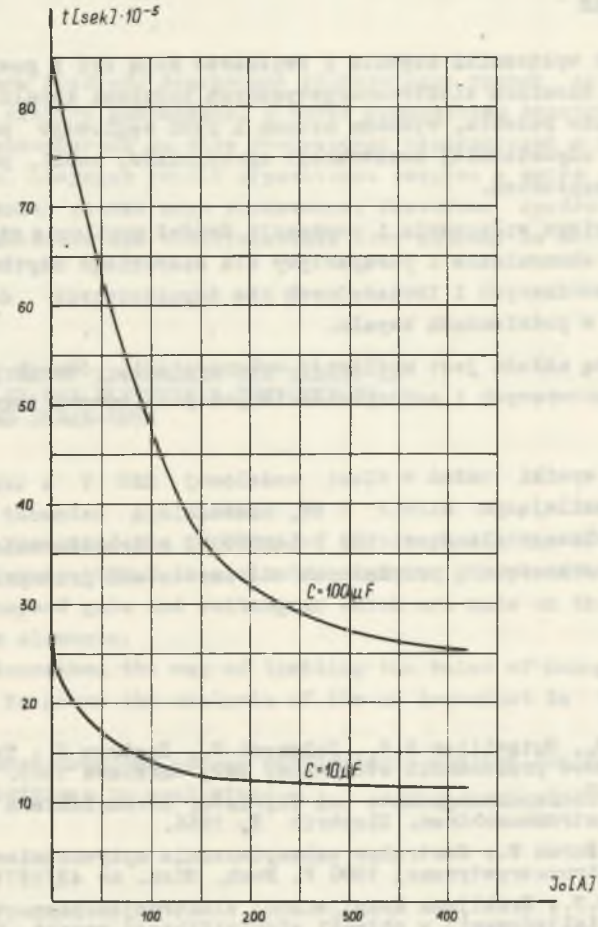


Rys. 7. Zależność czasów wyłączania t od prądu I_o i pojemności komutacyjnej C obwodu modelowego układu dla $R_1 = 0$, $L_1 = 0$

Zależności prądu od czasu dla parametrów modelowego układu wynikające z równania

$$i = I_m \quad e^{-kt} \cos(\omega_o t + \varphi)$$

przedstawiają wykresy na rys. 6 dla $R_1 = 0$ i $L_1 = 0$ i na rys. 7 dla $R_1 = 4{,}7\,[\Omega]$ i $L_1 = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ H (OnGek 5 x 4 mm^2). Zależności czasów wyłączania t od prądu I_o i pojemności komutacyjnej C przedstawiają wykresy na rys. 8 dla $R_1 = 0$ i $L_1 = 0$ i na rys. 9 dla $R_1 = 4{,}7\,[\Omega]$ i $L_1 = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ H (OnGek 5 x 4 mm^2).



Rys. 8. Zależność czasów wyłączania t od prądu I_o i pojemności komutacyjnej C obwodu modelowego układu dla $R_1 = 4{,}7\,[\Omega]$, $L_1 = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ H (OnGek 5 x 4 mm^2)

Przedstawione zależności ilościowe i jakościowe zostały potwierdzone badaniami prowadzonymi w aspekcie zagrożenia powodowanego:

- wyrwaniem przewodu z wpustów,
- zwarciem międzyfazowym wewnątrz przewodu z uziemionym ekranem bez uszkodzenia zewnętrznej opony,
- uszkodzeniem zewnętrznym opony i wewnętrznym ekran-faza, poprzedzającym zwarcie międzyfazowe przewodów,
- niebezpiecznym działaniem strumieni plazmy przy zwarciach wewnątrz osłon ognioszczelnych.

7. Podsumowanie

1. Tyrystorowe wyłączniki szybkie i zwieracze mogą być z powodzeniem wykorzystane w sieciach elektroenergetycznych podziemi kopalń jako ochrona od skutków rażenia, wybuchu metanu i pyłu węglowego pod warunkiem stosowania odpowiedniej konstrukcji sprzęgników, kabli, przewodów i układów zabezpieczeń.
2. Układ szybkiego wyłączania i separacji źródeł zasilania stwarza korzystne warunki ekonomiczne i perspektywy dla szerokiego użytkowania materiałów przewodzących i izolacyjnych nie dopuszczonych dotychczas dostosowania w podziemiach kopalń.
3. Cenną zaletą układu jest możliwość wykorzystania różnych funkcji łączeniowych, manewrowych i zabezpieczeniowych przy pomocy tego samego łącznika.
4. Pozytywne wyniki badań w sieci modelowej 220 V z transformatorem 3,5 kVA zasilającym silnik 1 kW, uzasadniają celowość opracowania układu modelowego dla sieci 500 V i 1000 V z transformatorami i silnikami o parametrach przydatnych do zastosowań przemysłowych.

LITERATURA

[1] Gentry F.E., Gutzwiller F.W., Holonyak N., Zastrow V.: Tyrystory, półprzewodnikowe prostowniki sterowane. WNT, Warszawa 1969.

[2] Stahn A.: Überspannungschutz bei Thyristor Stromrichtern zur Erregung von Gleichstrommaschinen. Elektrie 7, 1966.

[3] Bożek W., Boron W.: Centralne zabezpieczenie upływnościowe górniczej sieci elektroenergetycznej 1000 V. Mech. Górn. nr 42/1971 i 73/1971.

[4] Sziszkin N.F.: Problijema kompljeksnoj elektrobjesopasnosti i zadaczi naucznych isljedowanij w obłasti elektrifikacji szacht. Moskwa 1966.

[5] Pawelski W.: Tyrystorowe wyłączniki szybkie. Przegląd Elektrotechniczny 9/1966.

[6] Pawelski W.: Analiza pracy wyłącznika szybkiego o szeregowym układzie gaszeniowym sprzężonym transformatorowo. Przegląd Elektrotechniczny 9/1968.

[7] Żyborski J., Czucha J., Mrozowski J.: Wyłącznik szybki tyrystorowy prądu stałego. Przegląd Elektrotechniczny 6/1972.

[8] Banaszkiewicz A.: Tyrystory. Warszawa, WNT 1966.

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛОАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ШАХТАХ ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ НА БАЗЕ УЛЬТРАСКОРОСТНОГО ВЫКЛЮЧЕНИЯ

Р е з ю м е

Представлены проблемы безопасной эксплуатации горных электроэнергетических сетей низкого напряжения, а также перспективы конструкции ультраскоростного выключателя на базе статических соединителей и полупроводниковых элементов. Обсужден способ ограничения энергии в месте повреждения изоляции и указан анализ хода выключения. Описанные проблемы могут найти особенное применение при электрификации шахт опасных по метану и пыли.

THE PERSPECTIVES OF INCREASING THE SAFETY IN EXPLOITATION OF THE ELECTRICAL NETWORKS BY THE ULTRASPEED BREAK-OUT

S u m m a r y

There are presented the problems of safe exploitation of the electrical networks up to 1000 V in coal mines and the perspectives of construction of ultraspeed gate end switchgear which are made on the base of semiconductives elements.

There is described the way of limiting the value of energy in the fault place. There is given the analysis of the ac transient in the process of break.

The presented problems can be particularly applied for the methane and coal dust conditions in coal mines.