

Krzysztof ZYMMER
Stanisław SAKOWICZ

PROJEKTOWANIE PRZEKSZTAŁTNIKÓW DUŻEJ MOCY W ASPEKTCIE DOBORU PRZYRZĄDÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH DO WARUNKÓW ZWARTYCH ORAZ WYBORU ZABEZPIECZEŃ PRZECIWKO NARAŻENIOM PRĄDOWYM*)

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono wpływ parametrów układu zasilania przekształtników dużej mocy (takich jak: moc zwarcia sieci zasilającej, rodzaj i długość linii zasilającej transformator przekształtnikowy oraz jego napięcie zwarcia) na prądy w diodach prostownika zasilającego sieć trakcyjną PKP podczas zwarć na jego wyjściu. Wartości tych prądów stanowią jeden z głównych czynników doboru przyrządów półprzewodnikowych przekształtnika. Dla konkretnego rozwiązania technicznego wykonano analizy mające na celu wyznaczenie prądów w diodach przy różnych rodzajach zwarć zewnętrznych oraz wewnątrz zespołu prostownikowego. Porównano szeregowę i równoległą konfigurację łączenia przyrządów energoelektronicznych oraz układów w przekształtnikach dużej mocy w aspekcie wytrzymałości zwarcia urządzenia. Omówiono występujące zagrożenia uszkodzenia przyrządu oraz jego eksplozji, przy różnych rodzajach obudów elementów energoelektronicznych, w przypadku wystąpienia stanów awaryjnych. Przedstawiono sposoby zabezpieczenia różnych przyrządów półprzewodnikowych przed skutkami zwarć.*

*) Artykuł opracowany w ramach projektu badawczego KBN nr 8T 10A 029 17 pt.: Zjawiska zwarcia w przekształtnikach dużej mocy w aspekcie zabezpieczeń przyrządów energoelektronicznych.

dr inż. Krzysztof ZYMMER, mgr inż. Stanisław SAKOWICZ

Zakład Przekształtników Mocy
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 210, 2002

1. WPROWADZENIE

Urządzenia energoelektroniczne stosowane w warunkach przemysłowych można podzielić na dwie grupy:

- Układy małej i średniej mocy (do około 500 kW) zasilane z sieci wewnętrznych o napięciu 3×380 bądź 3×660 V. Są to na ogół przekształtniki typowe wytwarzane seryjnie przez wyspecjalizowane firmy i wyposażone w odpowiednie układy ochrony nadprądowej, przeciwprzepięciowej itp. Jako przykłady układów tego rodzaju wymienić można prostowniki, przekształtniki napędowe do regulacji prędkości kątowej silników prądu stałego i prądu przemiennego, układy rezerwowego zasilania i inne;
- Układy dużej mocy (osiągające moc od jednego do kilku, a w szczególnych przypadkach do kilkudziesięciu MW) zasilane z sieci energetycznych przez transformatory dopasowujące napięcie zasilające do wymagań odbiornika. Przekształtniki tego rodzaju o napięciu wyjściowym nie niższym niż kilka kilowoltów projektowane są indywidualnie dla określonych zastosowań oraz warunków zainstalowania [6]. Do urządzeń takich zaliczyć można przekształtniki napędowe dużej mocy, prostowniki przeznaczone do zasilania wadzeń w procesie rafinacji metali kolorowych, sprzęgi między sieciami przesyłowymi prądu stałego i przemiennego czy też prostowniki zasilające sieci trakcyjne prądu stałego o napięciu 3,3 kV. Szczególną uwagę przy projektowaniu urządzeń należy poświęcić układowi ochrony nadprądowej i przeciwprzepięciowej. Układy tego rodzaju muszą bowiem być odporne nie tylko na stany awaryjne powstające w urządzeniu ale również na zagrożenia przychodzące z sieci zasilającej oraz odbiorczej jak przepięcia łączeniowe i atmosferyczne oraz różnego rodzaju zwarcia w obwodach wyjściowych po stronie prądu stałego i przemiennego. Należy również pamiętać, iż urządzenia tego rodzaju, często wartości milionów złotych, mogą być eksploatowane w ruchu ciągłym i każda awaria pociąga za sobą istotne straty ekonomiczne wywołane zarówno koniecznością naprawy jak i przerwą w eksploatacji spowodowaną serwisem układu. Tak więc proces projektowania powinien uwzględnić wieloletnią bezawaryjną pracę przekształtnika oraz minimalizację szkód wywołanych w przypadku wystąpienia uszkodzenia.

Osiąga się to przez uwzględnienie następujących czynników:

- Wpływu parametrów układu zasilania na dobór głównych elementów i podzespołów;
- Koordynacji zabezpieczeń nadprądowych;

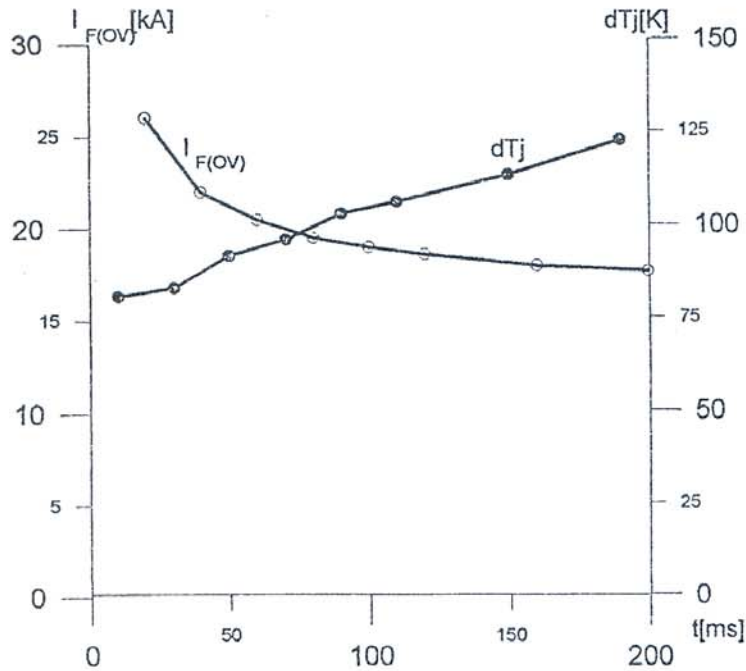
- Koordynacji zabezpieczeń przeciwko przepięciom łączeniowym i atmosferycznym;
- Zapewnienie określonych lecz uzasadnionych ekonomicznie rezerw przy doborze półprzewodnikowych przyrządów mocy zarówno dla warunków roboczych jak i stanów zwarciovych;
- Rozwiązanie konstrukcyjne winno zapewnić ochronę pozostałych elementów przekształtnika oraz obsługi w przypadku eksplozji przyrządu energoelektronicznego lub innych zjawisk powodujących powstanie łuku elektrycznego w określonym fragmencie układu.

Dodatkowe utrudnienie przy projektowaniu przekształtników dużej mocy do warunków zwarciovych stanowi fakt, iż w układach tych, zwłaszcza o napięciu kilku kilowoltów, unika się stosowania bezpieczników topikowych do ochrony przyrządów energoelektronicznych [1, 3, 9]. Projektowanie tego rodzaju układów oprócz niezbędnej wiedzy inżynierskiej wymaga wieloletniego doświadczenia i związanego z nim wyczucia konstruktorskiego, zwłaszcza w zakresie rezerw napięciowych i prądowych stosowanych przy doborze przyrządów energoelektronicznych oraz systemów ochrony przeciwdziałających stanom awaryjnym, co zapewni długoletnią bezawaryjną pracę urządzenia przy jednocześnie konkurencyjnej cenie umożliwiającej jego sprzedaż w warunkach gospodarki rynkowej.

W niniejszym artykule zaprezentowano zagadnienia związane z doбором diod mocy prostownika zasilającego linię trakcyjną PKP prądu stałego o napięciu 3,3 kV przy uwzględnieniu różnego rodzaju zwarć, które mogą wystąpić po stronie odbioru oraz w układzie zasilania prądem zmiennym. Zespół prostownikowy zasilany jest z linii energetycznej o napięciu 110 kV z jedno-stopniową transformacją napięcia. Zespoły tego rodzaju, wprowadzane obecnie na linie główne PKP w ramach modernizacji istniejących układów zasilania, charakteryzują niewielkie wahania napięcia w sieci jezdnej przy zmiennym rytmie pracy taboru trakcyjnego o dużych mocach silników napędowych pojazdów. Wynika to z dużych mocy zwarciovych linii energetycznych o napięciu 110 kV w stosunku do stosowanych dotychczas układów zasilania o napięciu 15-30 kV.

Przykładowe analizy mające na celu zaprezentowanie wpływu parametrów układu zasilania na prąd diody w przypadku zwarcia na zaciskach wyjściowych wykonane zostały dla trakcyjnych zespołów prostownikowych zasilanych z sieci energetycznej o napięciu 15 kV, które doprowadzone jest obecnie do znaczącej części podstacji trakcyjnych PKP. Dla doboru diod do warunków zwarciovych wykorzystano, opracowaną w ramach niniejszej pracy, metodę opartą na kryterium temperatury złącza [8] wyznaczonej na podstawie parametrów cieplnych przyrządu oraz deklarowanej dopuszczalnej przeciążalności prądowej (półsinusoidalnymi impulsami prądowymi o czasie trwania 10 ms) w

funkcji trwania cyklu przeciążeniowego. Do tego celu opracowano oryginalny program komputerowy. Przebiegi i wartości prądu zwarcia w diodach prostownika wyznaczone zostały przy wykorzystaniu programu symulacyjnego TCAD. Obliczenia prowadzono dla prostownika PD-1,7/3,3 o układzie dwóch mostków trójfazowych połączonych szeregowo zasilanych z transformatora trójzwojowego o napięciach uzwojeń wtórnych przesuniętych o 30° el. Dzięki czemu uzyskiwane jest napięcie wyprostowane o przebiegu 12-pulsowym zaś emisja wyższych harmonicznych prądu do sieci zasilającej ograniczona do poziomu zgodnego z wymaganiami stawianymi przez energetykę. Jako diody prostownika dobrano przyrządy o prądzie nominalnym $I_{FAV}=3000$ A i napięciu $U_{RRM}=2500$ V.



Rys.1. Przeciężalność graniczna - $I_{F(OV)}$ dla różnych czasów przeciążenia oraz odpowiadające jej przyrosty temperatury - dT_j struktury diody o prądzie $I_{FAV}=3000$ A.

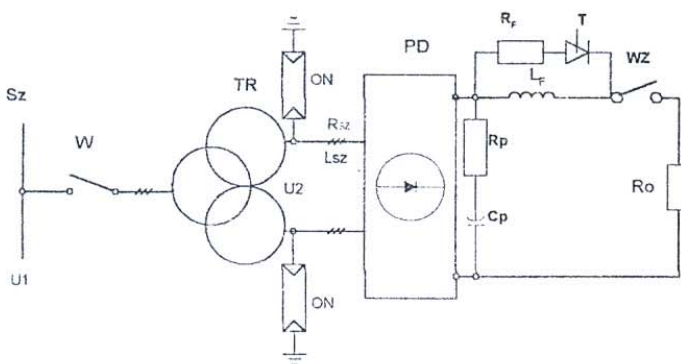
Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę dopuszczalnej przeciężalności prądowej diody (dla półsinusoidalnych impulsów o czasie trwania równym 10 ms) oraz analitycznie wyznaczone przyrosty temperatury struktury w chwilach czasowych po zakończeniu impulsu prądowego o wartości deklarowanej jako dopuszczalna dla cyklu przeciężeniowego o danym czasie trwania.

W każdym ramieniu łączono po dwa przyrządy równolegle i trzy szeregowo co zapewnia wymaganą w warunkach kolejowych przeciężalność robo-

czą, wytrzymałość przepięciową na poziomie 15 kV i zwarciovą, przy założeniu iż zespół prostownikowy chroniony jest podstawowo wyłącznikiem (umieszczonym po pierwotnej stronie transformatora) o czasie działania do 200 ms. Warunki te wymagane są dla układów zasilania sieci trakcyjnej niezależnie od tego iż stosowane są, (wcześniej bądź obecnie wprowadzane) systemy zabezpieczeń nadprądowych o krótszym czasie działania, jak wyłączniki zasilaczowe prądu stałego, systemy różnicowo-prądowe czy też wyłączniki szybkie prądu zmiennego.

2. WPŁYW PARAMETRÓW UKŁADU ZASILANIA NA WARTOŚCI PRĄDÓW ZWARCIOWYCH DIOD PROSTOWNIKA

Parametry układu zainstalowania, takie jak: moc zwarcia sieci zasilającej, napięcie zwarcia transformatora układu, rodzaj zasilającej sieci energetycznej (kablowa, napowietrzna), rodzaj i długość połączeń między transformatorem a przekształtnikiem mają istotny wpływ na wartości prądu zwarcia występującego w przekształtniku przy różnych rodzajach zwarć zarówno zewnętrznych jak i występujących wewnątrz przekształtnika. Czynnikiem ten determinuje dobór przyrządów energoelektronicznych do układu o danych parametrach znamionowych w takim samym stopniu jak znamionowy prąd obciążenia przekształtnika czy też wymagana przeciążalność robocza, jak to ma miejsce w układach zasilania trakcji elektrycznej.



Rys.2. Schemat ideowy zespołu prostownikowego zasilającego sieć trakcyjną PKP.

Oznaczenia:

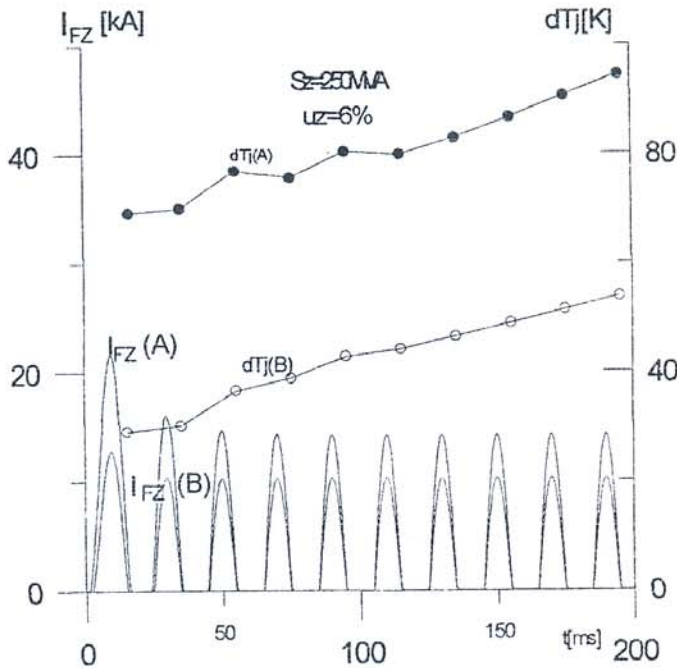
Sz - linia zasilająca, W - wyłącznik zespołu, TR - transformator zespołu, ON - ochronniki napięciowe, PD - prostownik diodowy, R_{sz} - rezystancja połączeń, L_{sz} - dławik filtru, R_p - rezystancja obciążenia, WZ - wyłącznik zasilaczowy.

W niniejszym rozdziale przedstawiono kilka typowych przypadków oddziaływania układu zainstalowania na wartości prądu $I_{F(OV)}$ w diodach prostownika PD-1,7/3,3 w przypadku zwarcia na jego wyjściu. Prostownik zasilany jest z sieci energetycznej o napięciu 15 kV poprzez transformator zespołu o mocy 6,3 MVA, napięciu zwarcia równym 6% oraz 8% i napięciu wyjściowym 2×1350 V. Układ prostownika omówiony został w punkcie 1. Schemat ideowy układu przedstawiony został na rys.2 oraz rys.6 (wraz z oznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia).

Na rysunku 3 przedstawiono oddziaływanie rodzaju i długości linii zasilającej trakcyjny zespół prostownikowy PD-1,7/3,3 z sieci energetycznej o mocy zwarciowej 250 MVA na wartość prądu w diodzie prostownika w przypadku zwarcia na szynach wyjściowych. Jeżeli układ prostownikowy zasilany jest krótką linią kablową, to wartość szczytowa impulsu prądu diody wynosi 22 kA, natomiast ustalony prąd diody 14 kA. Odpowiednie wartości prądu diody przy zasilaniu zespołu linią napowietrzną o długości 5 km wynoszą 14 kA i 10 kA. Na rysunku przedstawiono również przebieg przyrostu temperatury diody prostownika o prądzie $I_{FAV} \approx 3000$ A wywołany przepływem podanych prądów zwarciowych. Przebieg dopuszczalnego przyrostu temperatury struktury tej diody dla czasów trwania cyklu przeciążeniowego do 200 ms przedstawiony na rys.1. Dla obydwóch rodzajów linii zasilającej przyrosty temperatury struktury diody prostownika wywołane prądem zwarcia symetrycznego o czasie trwania 200 ms (95 K i 55 K) są mniejsze od obliczonego przyrostu dopuszczalnego wynoszącego około 125 K. Dla zespołu zasilanego krótką linią kablową rezerwę przyrostu temperatury diody od prądu zwarcia w stosunku do obliczonego jako dopuszczalny wynoszącą 30 K należy uznać jako technicznie i ekonomicznie uzasadnioną. Zapewnia ona wielokrotne znoszenie przeciążeń i długoletnią bezawaryjną eksploatację oraz wykorzystanie przeciążeniowych zdolności przyrządu. W przypadku zasilania zespołu długą linią napowietrzną odpowiednia rezerwa wynosi 70 K. Prostownik z pewnością pracował będzie przez wiele lat znosząc bezawaryjnie stany zwarciowe. Jednak przy tych warunkach zasilania można zaproponować urządzenie z tańszymi diodami o mniejszej przeciążalności prądowej co stanowiłoby bardziej racjonalne rozwiązanie ekonomicznie. Inną oszczędność stanowi możliwość zastosowania tańszego (o mniejszym prądzie wyłączalnym) wyłącznika zespołu o napięciu 15 kV.

Rysunki 4 i 5 prezentują oddziaływanie napięcia zwarcia transformatora zespołu na wartość prądu zwarcia diody prostownika zespołu zasilanego z sieci o mocy zwarciowej 50 MVA oraz 250 MVA. W dotychczasowych rozwiązaniach układów zasilania sieci jezdnej PKP stosowano transformatory zespołów prostownikowych o napięciu zwarcia około 11%. Powodowało to z jednej strony ograniczenie prądu zwarcia i możliwość stosowania do ochrony zespołów pro-

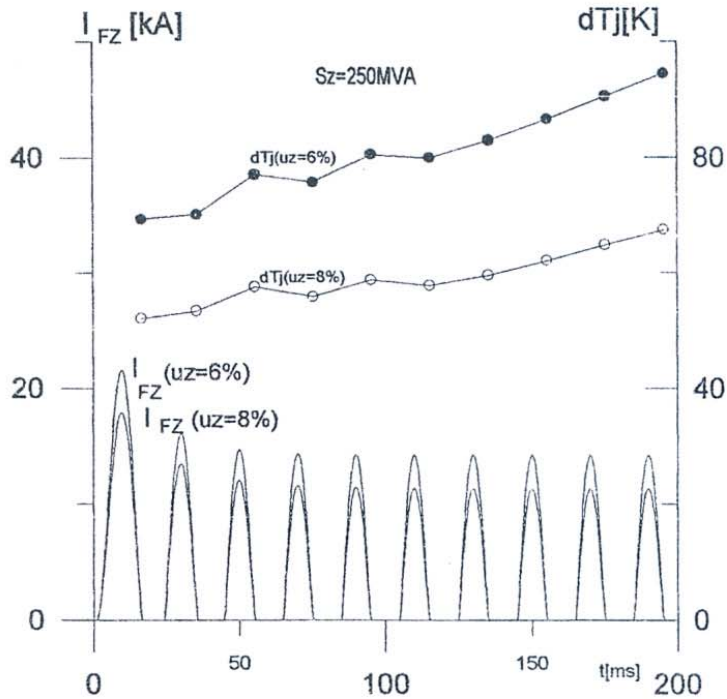
stownikowych dostępnych wówczas wyłączników krajowych natomiast wiązało się z większą zależnością napięcia w sieci jezdnej od prądu pobieranego przez tabor trakcyjny. Obecnie w wyniku stosowania lokomotyw o większej prędkości i mocy silników napędowych oraz dostępnością wyłączników o dużych prądach wyłączalnych wystąpiła tendencja do wprowadzania transformatorów o mniejszym napięciu zwarcia co ogranicza wahania napięcia w sieci trakcyjnej przy zmiennym rytmie pracy pojazdów. Wiąże się to jednak ze wzrostem prądu zwarcia zarówno w diodach prostownika jak i w linii zasilającej zespoły prostownikowe. Dla nowo projektowanych bądź modernizowanych podstacji trakcyjnych przewidywane są transformatory o napięciu zwarcia równym 8%, a nawet 6%.



Rys.3. Przebieg prądu oraz przyrostu temperatury struktury diody prostownika PD-1,7/3,3 w przypadku zwarcia na zaciskach wyjściowych. Moc zwarciova sieci zasilającej 250 MVA napięcie sieci 15kV. Zasilanie zespołu:
 A - linią kablową o długości 500m i przekroju $50mm^2$, B - linią napowietrzną o długości 5km i przekroju $50mm^2$.

Rysunek 4 prezentuje oddziaływanie napięcia zwarcia transformatora zespołu na wartość prądu zwarcia diody prostownika oraz przyrostu temperatury struktury w czasie trwania cyklu przeciążeniowego. Zmiana w napięciach

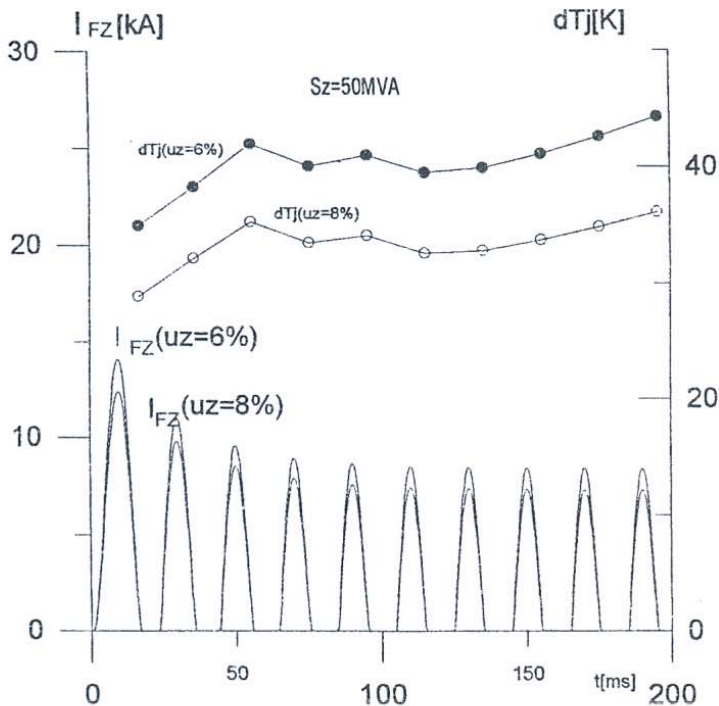
zwarcia tego transformatora powoduje różnicę w wartościach szczytowych pierwszego impulsu prądu zwarciego diody wynoszącą 4 kA (22 i 18 kA) oraz różnicę w ustalonych wartościach tych impulsów 3 kA (14 i 11 kA). Wyraźnie różne są również wartości przyrostu temperatury diody na końcu cyklu zwarciego 95 K ($u_z=6\%$) oraz 67 K ($u_z=8\%$). Również w tym przypadku dla transformatora o $u_z=8\%$ można zastosować w prostowniku przyrządy energoelektroniczne o mniejszej przeciążalności prądowej.



Rys.4. Przebieg prądu oraz przyrostu temperatury diody prostownika PD - 1,7/3,3 w przypadku zwarcia na zaciskach wyjściowych. Zespół prostownikowy zasilany z sieci o mocy zwarciowej 250 MVA linią kablową o długości 500m i przekroju 50mm².

Rysunek 5 prezentuje przebiegi prądu zwarcia w diodach prostownika zespołu zasilanego z sieci o mocy zwarciowej wynoszącej 50 MVA, napięcia zwarcia transformatorów wynoszą 6% i 8%. Wartości ustalone prądu I_{FZ} wynoszą tutaj 7 kA ($u_z=8\%$) i 8,4 kA ($u_z=6\%$). przyrosty temperatury struktury na końcu cyklu zwarciego osiągają wartości 49 K oraz 37 K. Dla obydwóch rozwiązań układu zasilania przyrosty temperatury diody są wyraźnie mniejsze niż wyznaczone jako dopuszczalne jak również niższe od odpowiednich wartości określonych dla układów prostownikowych zasilanych z linii energetycznej o mocy zwarciowej równej 250 kVA. Dla tego rodzaju układu zasilania (z sieci

zasilania (z sieci o małej mocy zwarciowej) napięcie zwarcia transformatora zespołu nie wywiera istotnego wpływu na dobór diod prostownika. Dla transformatora o napięciu zwarcia wynoszącym zarówno 6% jak i 8% stosunkowo nieduże prądy zwarciowe pozwalają na zastosowanie przyrządów o niższej dopuszczalnej przeciążalności prądowej. Natomiast różnica w napięciach zwarcia transformatorów zespołu i wynikająca stąd różnica w prądach diod prostownika jest zbyt mała, aby oddziaływać istotnie na dobór przyrządów energoelektronicznych. Powyższe przykłady aczkolwiek nie wyczerpują zagadnienia wpływu elementów układu zainstalowania na dobór przyrządów energoelektronicznych do przekształtnika dużej mocy (o danych parametrach znamionowych) wykazują jednak jak istotny wpływ mają parametry układu zasilania na wartości prądów w diodach prostownika w przypadku zwarcia na szynach wyjściowych układu. W dalszej części omówione zostaną różne przypadki zwarć na przykładzie konkretnego zespołu prostownikowego, zainstalowanego na jednej z podstacji trakcyjnych zasilających centralną magistralą kolejową. Niektóre z takich stanów awaryjnych wystąpiły już podczas dotychczasowej eksploatacji urządzenia.



Rys.5. Przebieg prądu oraz przyrostu temperatury struktury diody prostownika PD-1,7/3,3 w przypadku zwarcia na zaciskach wyjściowych. Transformator zespołu o mocy 6,3 MVA i napięciu zwarcia 6% oraz 8% zasilany z sieci energetycznej o napięciu 15 kV i mocy zwarciowej 50 MVA linią kablową o przekroju 50mm^2 i długości 500 m.

3. UKŁAD ZASILANIA SIECI TRAKCYJNEJ PKP O NAPIĘCIU 3,3 kV Z JEDNOSTOPNIOWĄ TRANSFORMACJĄ NAPIĘCIA ZE 110 kV

Na rysunku 2 przedstawiono ideowy schemat układu zainstalowania zespołu prostownikowego z prostownikiem PD-1,7/3,3 kV na podstacji trakcyjnej w miejscowości Huta Zawadzka. Układ zasilany jest linią napowietrzną o napięciu 110 kV i składa się z wyłącznika zespołu, transformatora trójzwojowego o dwóch uzwojeniach wtórnych (gwiazda, trójkąt), dwóch trójfazowych układów szynoprzewodów L_{sz} łączących uzwojenia wtórne transformatora z prostownikiem (długość 60 m), ograniczników przepięciowych ON włączonych między fazy uzwojeń wtórnych transformatora a ziemię, 12-pulsowego prostownika diodowego PD składającego się z dwóch układów mostkowych połączonych szeregowo, dławika L_f filtra wygładzającego w obwodzie prądu stałego oraz rezystancji obciążenia R_o . Parametry poszczególnych elementów obwodu oraz wyliczone wartości obwodu zastępczego zestawiono poniżej.

- Moc zwarciowa sieci zasilającej $S_z = 1400$ MVA.
- Moc transformatora prostownikowego $S_1 = 6,3$ MVA.
- Napięcie GN transformatora $U_1 = 110$ kV~.
- Napięcie DN transformatora $U_2 = 2 \times 1,3$ kV.
- Indukcyjność połączeń między transformatorem a prostownikiem $L_{sz} = 13,8$ μ H.
- Rezystancja tych połączeń $R_{sz} = 1$ m Ω .
- Prostownik diodowy 12-pulsowy 2 diody SD 2500 połączone równolegle w ramieniu mostka.
- Indukcyjność dławika filtra $L_f = 6$ mH.
- Rezystancja obciążenia $R_o = 2$ Ω .

3.1. Wyliczone parametry zastępcze obwodu

- Indukcyjność sieci zasilającej $L_2 = 4,2$ μ H.
- Indukcyjność transformatora obliczona dla jednej fazy przy zwarcium symetrycznym $L_T = 187$ μ H.
- Indukcyjność transformatora obliczona dla jednej fazy przy zwarcium asymetrycznym (wewnętrzny w prostowniku) $L_{T1} = 94$ μ H.
- Rezystancja transformatora obliczona dla jednej fazy $R_T = 2,5$ m Ω .

- Indukcyjność całkowita obwodu (fazy) dla zwarcia symetrycznego $L_C = 205 \mu\text{H}$.
- Indukcyjność całkowita obwodu (fazy) dla zwarcia niesymetrycznego $L_{C1} = 112 \mu\text{H}$.
- Rezystancja całkowita obwodu (fazy) zwarcia $R_C = 3,6 \text{ m}\Omega$.
- Kąt opóźnienia między napięciem zasilającym a chwilą wystąpienia zwarcia odpowiadający maksymalnej wartości prądu udarowego.
- Rezystancja połączenia transformatora z prostownikiem (szynoprzewód) $R_{sz} = 1,1 \text{ m}\Omega$.
- Indukcyjność szynoprzewodu $L_{sz} = 13,8 \mu\text{H}$.
- Rezystancja zwiernika $R_z = 0$.

4. RODZAJE ZWARĆ WYSTĘPUJĄCYCH W TRAKCYJNYM ZESPOLE PROSTOWNIKOWYM ZASILAJĄCYM SIĘC JEZDĄ PKP

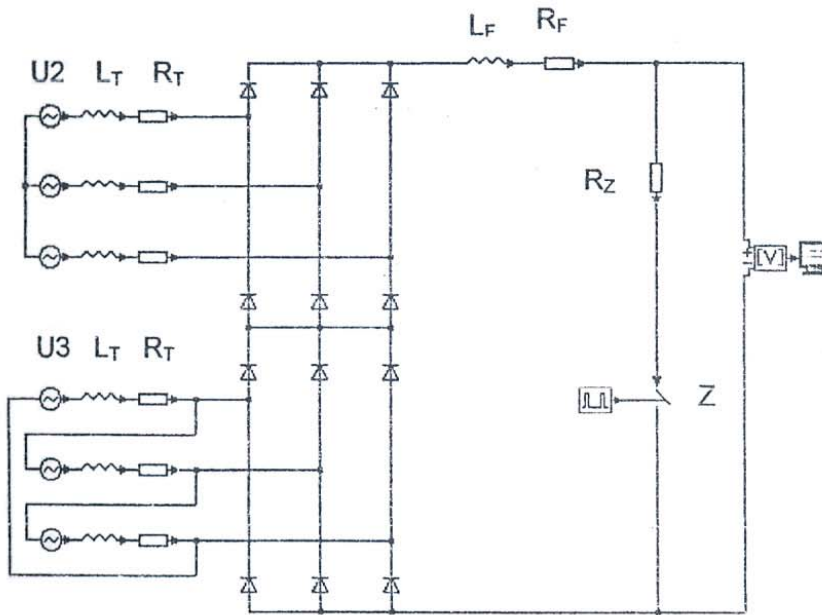
Przeanalizowano kilka rodzajów zwarć możliwych do wystąpienia w trakcyjnym zespole prostownikowym. Szczegółowe parametry układu przedstawiono powyżej. Jako materiał wynikowy prowadzonych analiz symulacyjnych zaprezentowano największy prąd (w odniesieniu do prądu pozostałych diod) płynący przez nieuszkodzoną pojedynczą diodę w przypadku wystąpienia określonego stanu zwarciego. Jako drugi element wynikowy zaprezentowano wartości przyrostu temperatury struktury tej diody wyznaczone dla chwili czasowej określonej zakończeniem kolejnego impulsu prądu zwarciego. Wartości te zostały odniesione do odpowiednich temperatur wyznaczonych dla impulsów prądu przeciążeniowego deklarowanego przez wytwórcę jako dopuszczalny przy danym czasie trwania zwarcia. Zaprezentowane wyniki analiz dotyczyły następujących przypadków stanów awaryjnych:

- zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym (za dławikiem urządzenia wygładzającego);
- zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym bezpośrednio na szynach wyjściowych zespołu prostownikowego;
- przebicie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem ujemnym;
- zwarcie do szyny ujemnej fazy transformatora zasilającego mostek prostownikowy połączony z biegunem dodatnim;
- zwarcie do szyny ujemnej fazy transformatora zasilającego mostek połączony z biegunem ujemnym.

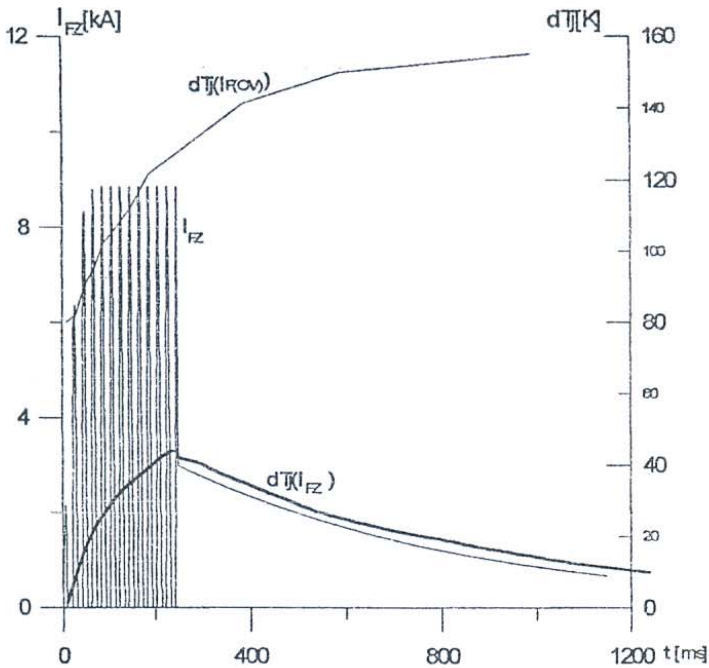
Należy podkreślić, iż wyniki obliczeń prądów zwarciovych były zweryfikowane praktycznie w czasie prób prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych na podstacji trakcyjnej. Pomierzony metodą oscyloskopową prąd zwarcia symetrycznego (za dławikiem urządzenia wygładzającego) różnił się od odpowiedniej wartości określonej metodą obliczeń symulacyjnych jedynie o wartości wynikające z uchybów pomiarów i dokładności obliczeń ($\pm 5\%$).

4.1. Zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym (za dławikiem urządzenia wygładzającego)

Stan awaryjny tego rodzaju występuje w warunkach trakcyjnych stosunkowo często a wywołany może być zjawiskiem ognia okrężnego powstającego na komutatorach silników trakcyjnych napędzających pojazdy szynowe, zwarciami w tych silnikach bądź innych podzespołach zasilanych 3,3 kV (prądnicą ogrzewcza). Zwarcia te wyłączane są podstawowo wyłącznikami zasilaczowymi prądu stałego o krótkim czasie działania (około 20 ms). W warunkach trakcyjnych przyjmowana jest możliwość zarówno uszkodzenia jak i nie zadziałania tego zabezpieczenia. Zwarcie wyłączone jest w tym przypadku wyłącznikiem zespołu. Na rysunku 6 przedstawiono ideowy schemat zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia, na rys.7 przebieg impulsów prądu diod prostownika (dla tego rodzaju zwarcia poszczególne przyrządy energoelektroniczne obciążone są równomiernie), odpowiadający mu przyrost temperatury diod oraz dopuszczalne przyrosty tej temperatury. Dla tego rodzaju zwarcia pomimo wyłączenia zasilania w czasie 200 ms w diodach prostownika będzie nadal płynął prąd wywołany energią zgromadzoną w dławiku filtru o dużej indukcyjności. Przyrost temperatury od prądu pochodzącego z układu zasilania wynosi ok. 50 K. Natomiast prąd wywołany energią dławika filtru, który rozkłada się między równolegle połączone przyrządy prostownika nie wywołuje dalszego wzrostu temperatury diod. Aczkolwiek rezerwa w stosunku do dopuszczalnego przyrostu temperatury (125 K) jest znaczna i mogłaby sugerować dobór przyrządów o mniejszej przeciążalności dopuszczalnej to bez uwzględnienia innych zagrożeń nie powinno się podejmować takiej decyzji. Ponadto dla tego rodzaju często występującego stanu awaryjnego zachowanie rezerwy temperaturowej korzystnie wpływa na trwałość przekształtnika. Bowiem każdy szybki przyrost prądu i temperatury stanowi szok termiczny i mechaniczny dla struktury krzemowej. Większa liczba tego rodzaju narażeń prowadzi do degradacji charakterystyk napięciowo prądowych struktury, mikropęknięć i w efekcie



Rys.6. Schemat ideowy obwodu prostownika dla zwarcia za dławikiem filtru.



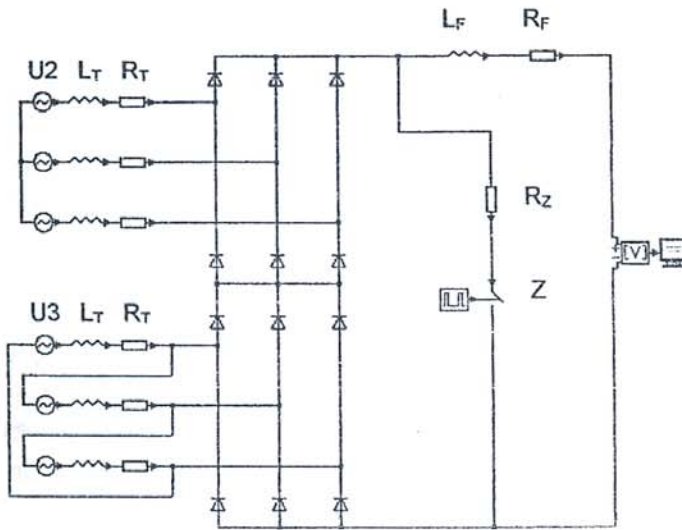
Rys.7. Przebieg prądu - I_{FZ} i przyrostu struktury diody - $dT_j(I_{FZ})$ oraz dopuszczalnego przyrostu temperatury - $dT_j(I_{F(OV)})$ dla zwarcia zewnętrznego prostownika za dławikiem urządzenia wygładzającego.

do uszkodzenia przyrządu. Producenci przyrządów energoelektronicznych podają iż nie powinny one być narażone na przeciążenia prądowe odpowiadające wartościom deklarowanym więcej niż 100 razy. W przypadku większej liczby spodziewanych narażeń wynikających ze stanów awaryjnych lub wymaganej przeciążalności roboczej urządzenia, należy przyjąć rezerwy w stosunku do danych deklarowanych. Brak jest w tym zakresie konkretnych zaleceń ponieważ badania trwałościowe są kosztowne i czasochłonne. Przy opracowywaniu przekształtnika o wymaganej niezawodności a jednocześnie konkurencyjnej cenie istotne znaczenie ma więc szczegółowa znajomość warunków eksploatacyjnych oraz doświadczenia i wycucie projektanta urządzenia.

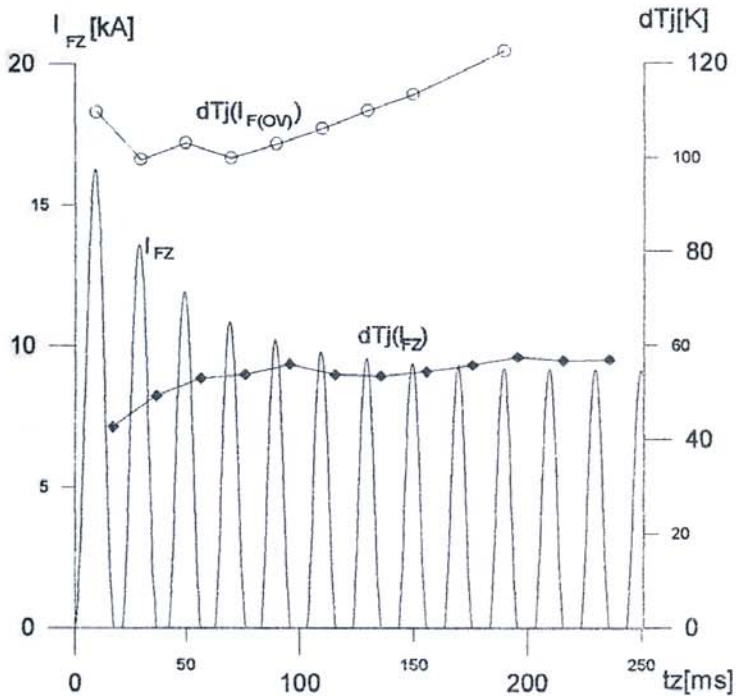
4.2. Zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym na szynach wyjściowych zespołu prostownikowego

Zwarcia tego rodzaju, aczkolwiek uznać je można za zdarzenia losowe, występują w warunkach eksploatacyjnych (taki stan awaryjny wydarzył się w czasie badań eksploatacyjnych omawianego w niniejszej pracy zespołu prostownikowego). Powstają one na przykład w wyniku pomyłek montażowych zaistniałych przy instalowaniu bądź przeglądach urządzeń, powodują je również pozostawione na konstrukcji narzędzia i części metalowe, które w wyniku drgań wywołanych pracą układu spadają na umieszczone w dolnej części urządzenia szyny wyjściowe. Zwarcia tego rodzaju wywoływane są również przez zwierzęta, które w okresie jesienno-zimowym przebywają na terenie podstacji, a zwłaszcza przy urządzeniach stanowiących źródła ciepła jak obciążone prostowniki i tory prądowe. Te stany awaryjne zabezpieczane są jedynie przez wyłączniki zespołu. Przy projektowaniu trakcyjnych zespołów prostownikowych przyjmowane jest założenie, że winny one wytrzymać wielokrotne zwarcia na szynach wyjściowych prostownika.

Na rysunku 8 przedstawiono schemat zespołu prostownikowego z oznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia. Na rysunku 9 przebieg prądu diod prostownika podczas tego stanu awaryjnego i przebieg przyrostu temperatury struktury przyrządu dT_j w czasie trwania zwarcia oraz dopuszczalne wartości tego przyrostu obliczone na podstawie danych deklarowanych w materiałach firmowych. Wyznaczony w tym przypadku przyrost temperatury struktury po czasie 200 ms wynosi około 60 K wobec określonego jako dopuszczalny w tych warunkach - około 125 K. Można wnioskować iż rezerwa ta zapewni wielokrotne znoszenie opisanych wyżej zwarć (wobec 100 przeciążeń zgodnych z warunkami deklarowanymi określonych jako dopuszczalne) i wieloletnią bezawaryjną pracę urządzeń.



Rys.8. Schemat obwodu prostownika dla zwarcia na szynach wyjściowych zespołu prostownikowego.



Rys.9. Przebieg prądu diod prostownika - I_{FZ} , przyrostu temperatury struktury - $dT_j(I_{FZ})$ oraz $dT_j(I_{F(OV)})$ dla zwarcia między biegunem dodatnim a ujemnym na zaciskach wyjściowych zespołu prostownikowego.

4.3. Przebicie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem ujemnym

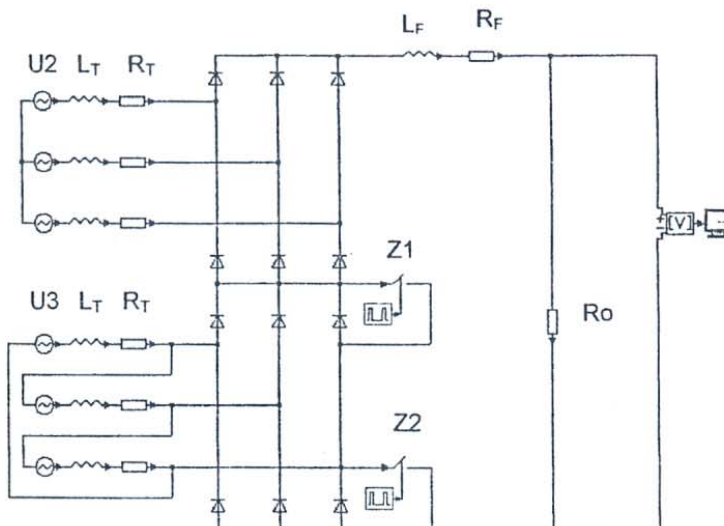
Awaria tego rodzaju rzadko występuje w praktyce. Może być ona wywołana na przykład przegrzaniem i w efekcie przebicciem jednej z diod wywołanym nierównomiernym przepływem prądu w przyrządach łączonych równolegle oraz równoczesnym uszkodzeniem drugiej diody przepięciem przychodzącym od strony zasilania. Dane z praktyki eksploatacyjnej wykazują, iż zdecydowana większość uszkodzeń diod i tyrystorów ma charakter napięciowy. Uszkodzenia wywołane są bądź przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi powstającymi w układach zasilania i odbioru przekształtnika bądź degradacją charakterystyk napięciowo-prądowych przyrządu w kierunku wstecznym lub obydwoma zjawiskami równocześnie. Degradacja charakterystyk napięciowo-prądowych związana jest z długoletnią eksploatacją urządzeń zwłaszcza w warunkach zmiennego obciążenia (jak to ma miejsce w prostownikach zasilających sieć trakcyjną). Innym czynnikiem powodującym to zjawisko są niedokładności procesu technologicznego przy wytwarzaniu struktur krzemowych, obróbce mechanicznej detali oraz montażu końcowym. Należy podkreślić, iż w populacjach przyrządów wytwarzanych nawet przez czołowe firmy światowe pewien procent elementów półprzewodnikowych wykazuje gorsze właściwości, które tylko w pewnej części wykryć można przez kontrolę parametrów przed zamontowaniem w przekształtniku. Inne przyrządy o gorszych właściwościach ujawniają swoje niedoskonałości dopiero w czasie eksploatacji urządzenia.

Nierównomierny rozptyw prądu w przyrządach łączonych równolegle wywołany jest na ogół niestarannym montażem (przy założeniu prawidłowego doboru elementów do pracy grupowej) modułów (przyrząd energoelektroniczny - radiator) lub złą jakością połączeń wewnątrz grupy przyrządów. Efekt nierównomiernego rozptywu prądu w przyrządach łączonych grupowo może być również wynikiem utleniania kontaktów przyrząd-radiator (zmiana rezystancji połączeń) oraz degradacji charakterystyk napięciowo-prądowych elementów w kierunku przewodzenia, które to zjawiska towarzyszą długotrwałej eksploatacji przekształtników mocy. Jest jeszcze wiele innych przyczyn uszkodzeń przyrządów energoelektronicznych, z którymi spotykano się w eksploatacji, w niniejszym opracowaniu przedstawiono jedynie przypadki najbardziej typowe, występujące stosunkowo często w praktyce eksploatacyjnej przekształtników dużej mocy.

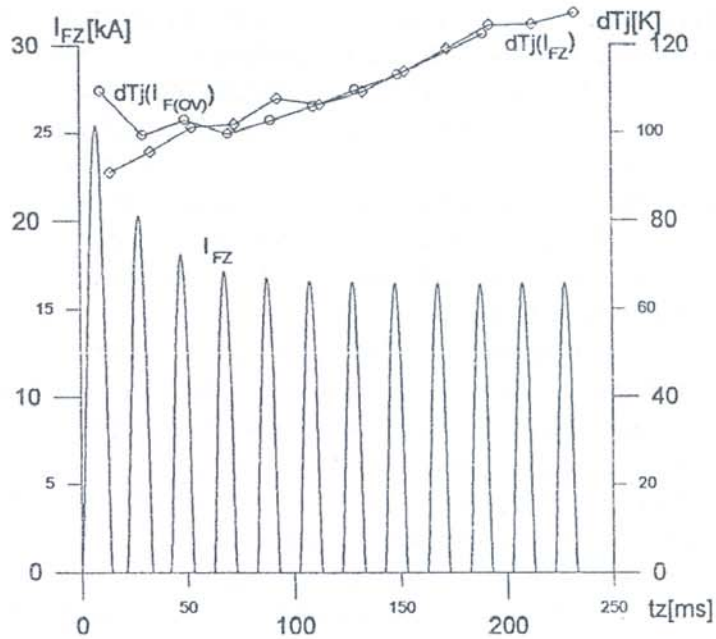
Przeciwdziałać takim stanom awaryjnym można poprzez pomiary kontrolne charakterystyk napięciowo-prądowych w kierunku wstecznym i przewodzenia modułów z przyrządami energoelektronicznymi. Badaniom tego rodzaju winny być poddane przyrządy przed zamontowaniem w przekształtniku. Jak wykazała praktyka około 2÷3% zakupionych przyrządów pochodzących nawet z renomowanych firm wykazywało nieprawidłowości w przebiegach charaktery-

styk napięciowo-prądowych. Kolejnym ważnym czynnikiem przeciwdziałającym opisanym wyżej stanom awaryjnym są okresowe pomiary charakterystyk napięciowo-prądowych modułów (łącznie z połączeniami śrubowymi) prowadzone podczas okresowych przeglądów urządzeń. Podczas tego rodzaju badań wykrywane są dość liczne przypadki pogorszenia właściwości przyrządów, jak również połączeń występujące nawet po stosunkowo krótkim okresie eksploatacji (1÷2 lat). Pomiary te powinny być prowadzone z częstotliwością nie mniejszą niż raz na rok - a w warunkach ciągłej eksploatacji (w cyklu całodobowym) nawet co pół roku. Badaniom tego rodzaju poddawane są prostowniki zasilające kolejową sieć jezdnią.

Na rysunku 10 przedstawiono schemat ideowy obwodu prostownika z zaznaczonymi miejscami wystąpienia zwarcia. Na rysunku 11 pokazano przebieg prądu nieuszkodzonej diody prostownika I_{FZ} o największej wartości prądu w jednym z przyrządów układu podczas trwania stanu awaryjnego. Prąd diody jest w tym przypadku wyraźnie większy niż dla omówionych powyżej zwarc symetrycznych. Przyrost temperatury diody po czasie wynoszącym 200 ms osiąga wartość 125 K i odpowiada wartości wyznaczonej jako dopuszczalna. Biorąc pod uwagę stosunkowo niewielkie prawdopodobieństwo wystąpienia awarii tego rodzaju oraz margines bezpieczeństwa (który jest zachowywany przy deklarowaniu wartości dopuszczalnych w stosunku do prądu powodującego uszkodzenie przyrządu) również w tym przypadku można uznać, iż pozostałe przyrządy przekształtnika nie ulegną uszkodzeniu podczas zaistnienia omawianego powyżej stanu awaryjnego.



Rys.10. Schemat ideowy obwodu prostownika dla zwarcia wywołanego przebiegiem dwóch diod w jednym ramieniu mostka prostownika.

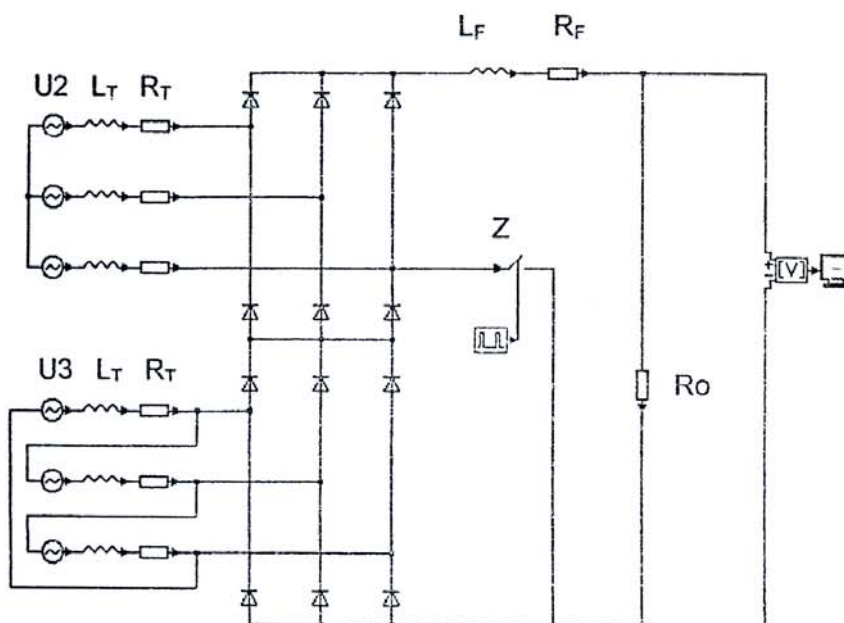


Rys.11. Przebieg prądu prostownika - I_{FZ} oraz przyrostu temperatury struktury - $dT_j(I_{FZ})$ dla zwarcia wywołanego przebiciem dwóch diod w ramieniu mostka prostownikowego dołączonego do biegunu ujemnego.

4.4. Zwarcie do szyny ujemnej fazy transformatora zasilającego mostek prostownikowy połączony z biegunem dodatnim

Stan awaryjny tego rodzaju może być wywołany przebiciem jednego z izolatorów przez które wyprowadzone są końce strony wtórnej uzwojenia transformatora prostownikowego, przebiciem izolatora przewodu szynowego łączącego transformator zespołu z prostownikiem bądź izolatora wspierającego szynę doprowadzającą w samym prostowniku. Inną przyczyną takiego zwarcia jest przebicie ogranicznika przepięć włączonego między fazę transformatora a ziemią. W każdym przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego jakiegokolwiek elementu zespołu prostownikowego (łącznie ze stroną wtórną transformatora zespołu) następuje bowiem połączenie potencjału bieguna ujemnego i ziemi, a więc zamknięcie pętli zwarciowej. Zwarcia te są na ogół wywoływane

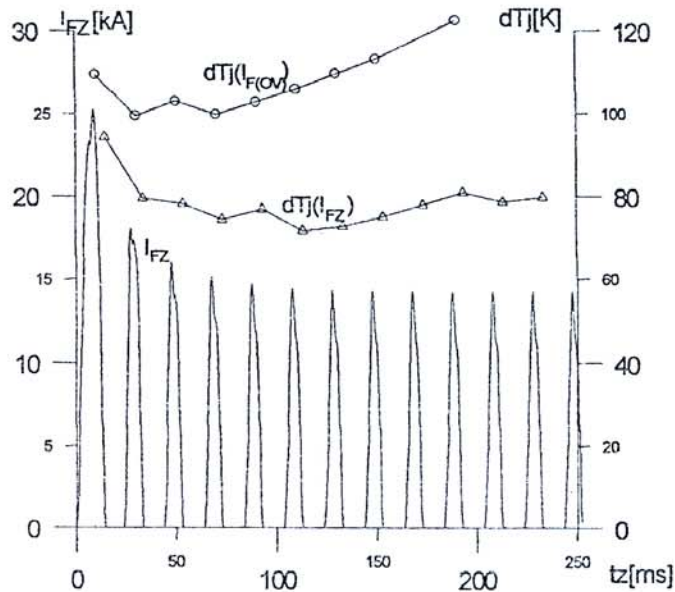
przez przepięcia atmosferyczne, łączeniowe oraz uszkodzenia elementów izolujących podzespoły zespołu prostownikowego od bieguna ujemnego bądź układów ochrony przeciwprzepięciowej dołączonych do bieguna ujemnego lub ziemi. Jeden z takich przypadków spowodowany przebiciem ogranicznika przepięciowego dołączonego między jedną z faz wtórnego uzwojenia transformatora (zasilającego mostek prostownikowy dołączony do bieguna dodatniego) a ziemię wystąpił w trakcie wprowadzania do ruchu zespołu z prostownikiem PD-1,7/3,3 na jednej z podstacji trakcyjnych zasilających centralną magistralę kolejową. Schemat ideowy zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem opisanego wyżej zwarcia doziemnego przedstawiono na rys.12.



Rys.12. Schemat ideowy obwodu prostownika dla przypadku zwarcia do biegunu ujemnego fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostownikowy dołączony do bieguna dodatniego.

Na rysunku13 zaprezentowano przebieg prądu diody prostownika dla tego przypadku zwarcia, odpowiadający mu przyrost temperatury struktury oraz obliczoną wartość tego przyrostu odpowiadającą prądom przeciążeniowym deklarowanym przez wytwórcę jako dopuszczalne. Przyrost temperatury struktury diody po czasie 200 ms wynosi tutaj 80 K wobec określonego jako dopuszczalny 125 K. Można więc stwierdzić iż diody prostownika są chronione przed skutkami zwarcia, jeżeli zostanie ono wyłączone po czasie nie dłuższym niż 200 ms. Aczkolwiek omawiane zwarcia nie występują często jednak (jak pokazało

doświadczenie) trudno je wykluczyć. Przeciwdziałać ich powstawaniu można przez stosowanie kilkustopniowej systemowej ochrony zwłaszcza przeciwko przepięciom atmosferycznym. Innym czynnikiem zabezpieczającym jest okresowa kontrola stanu izolacji zespołu prostownikowego a zwłaszcza izolatorów, które w czasie długoletniej eksploatacji ulegają zabrudzeniu, co sprzyja wyładowaniom powierzchniowym oraz pęknięciom spowodowanym zmianami temperatury połączeń części przewodzącej, jak to ma miejsce w odniesieniu do izolatorów przepustowych.



Rys.13. Przebieg prądu diody prostownika - I_{FZ} oraz przyrostu temperatury struktury $dT_j(I_{FZ})$ dla zwarcia doziemnego fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostowniczy dołączony do bieguna dodatniego.

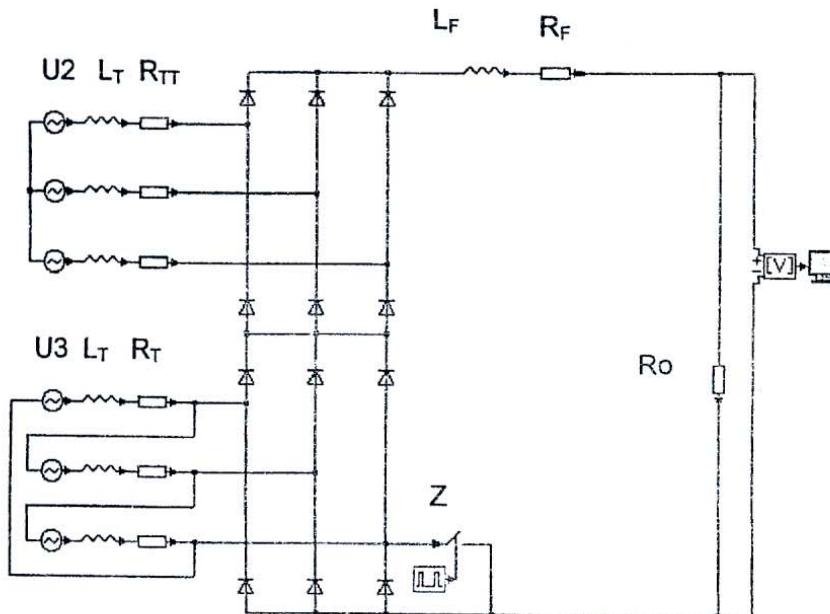
4.5. Zwarcie do szyny ujemnej fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostownikowy połączony z biegunem ujemnym

Przyczyny awarii tego rodzaju są takie same jak zaprezentowane w punkcie 4.4. Identyczne są również sposoby przeciwdziałania powstawaniu tego zwarcia. Natomiast skutki dla diod prostownika są zdecydowanie groźniej-

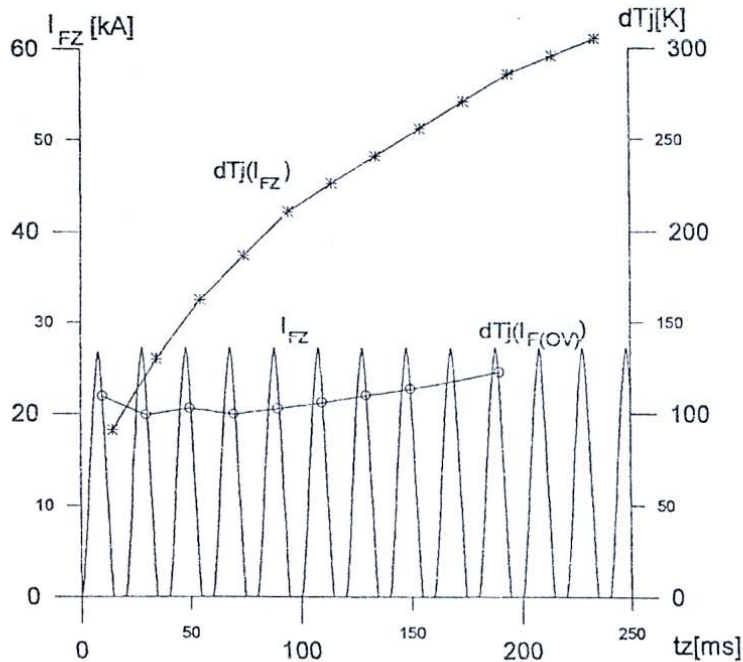
sze. Na rysunku 14 przedstawiono schemat ideowy zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia.

Na rysunku 15 zaprezentowany jest przebieg prądu diody $I_{F(OV)}$ w czasie trwania cyklu zwarciego, odpowiadający mu przyrost temperatury struktury $dT_j(I_{FZ})$ oraz dopuszczalny przyrost temperatury $dT_j(I_{FOV})$ wyznaczony na podstawie danych deklarowanych przez wytwórcę. Wartość szczytowa impulsów prądu zwarciego diody prostownika wynosi ok. 27 kA, natomiast przyrost temperatury struktury po 200 ms wynosi 290 K wobec dopuszczalnego (po tym czasie trwania przeciążenia) przyrostu 125 K. Jedynie po pierwszym impulsie prądu zwarciego powstający w jego efekcie przyrost temperatury struktury jest mniejszy od dopuszczalnego. Tak więc dla tego przypadku zwarcia w zespole prostownikowym jedynie bezpieczniki mogą ochronić diody przed uszkodzeniem. Zastosowanie innych zabezpieczeń w postaci na przykład szybkich wyłączników o czasie działania nie dłuższym niż 100 ms nie chroni diod prostownika przed zniszczeniem.

Praktycznie (w odniesieniu do układu bez bezpieczników, którym jest prostownik trakcyjny) jedyny czynnik eliminujący tą możliwość stanowi zastosowanie przyrządów energoelektronicznych o większej dopuszczalnej przeciążalności prądowej.



Rys.14. Schemat ideowy obwodu prostownika dla zwarcia do bieguna ujemnego fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostownikowy połączony z biegunem ujemnym zespołu.

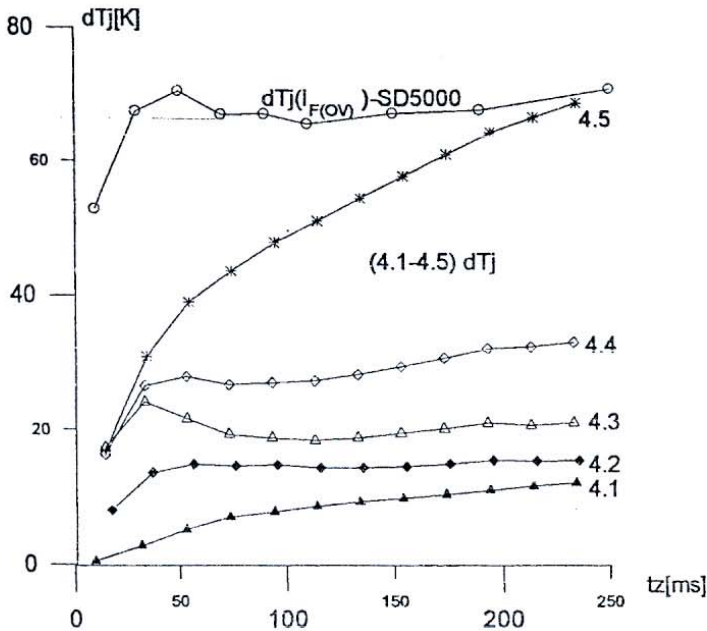


Rys.15. Przebieg prądu diody - I_{FZ} oraz przyrostu temperatury struktury $dT_j(I_{FZ})$ dla zwarcia do bieguna ujemnego fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostownikowy dołączony do tego bieguna.

Odpowiednie analizy przeprowadzono dla diody o prądzie $I_{FAV}=5000$ A. Rysunek 16 prezentuje wynik analiz, dla wszystkich omówionych poprzednio przypadków zwarc, w postaci przyrostów temperatury diody oraz wyznaczonego dla tego przyrządu przyrostu dopuszczalnego. Krzywe 4.1 ... 4.5 odpowiadają stanom awaryjnym omówionym w odpowiednich punktach opracowania.

Jak to wynika z przedstawionych analiz zastosowanie w prostowniku PD-1,7/3,3 diod o prądzie 5000 A zabezpieczy urządzenie przed skutkami wszystkich omówionych powyżej stanów awaryjnych. Jednak moduł składający się z diody, radiatora i kłamy dociskowej będzie w tym rozwiązaniu nie mniej niż dwukrotnie droższy od odpowiedniego modułu z diodą o prądzie $I_{FAV}=3000$ A. Ponieważ koszt modułów diodowych stanowi około 1/3 ceny całego urządzenia to w przypadku zastosowania przyrządów o prądzie 5000 A w miejsce proponowanych diod o prądzie 3000 A cena prostownika wzrosłaby również o 33%. Innym skutkiem tego rozwiązania byłoby również wyraźne zwiększenie gabarytów przekształtnika. Producentowi pozostaje więc wybór czy oferować urządzenie droższe zapewniające maksimum odporności na różnego rodzaju stany

awaryjne, czy też przekształtnik o niższej konkurencyjnej cenie licząc się jednocześnie z tym, iż niektóre (sporadycznie występujące) stany awaryjne mogą doprowadzić do uszkodzenia układu. W niniejszym rozwiązaniu wybrano tę drugą możliwość (z diodami o $I_{FAV}=3000$ A) zwłaszcza, iż konkurenci oferowali rozwiązania o gorszych parametrach przeciążeniowych.



Rys.16. Dopuszczalne przyrosty temperatury diody o prądzie $I_{FAV}=5000$ A dla różnych czasów trwania cykli przeciążeniowych oraz przyrosty temperatury tej diody wywołane prądem zwarcia dla stanów awaryjnych jak w punktach 4.1 ... 4.5.

Należy podkreślić, iż w związku z nadprodukcją urządzeń technicznego wyposażenia gospodarki, która powoduje ostrą konkurencję na rynku dóbr inwestycyjnych, w wyrobach z krajów rozwiniętych daje się zaobserwować tendencję do jak największego wykorzystywania możliwości elementów i podzespołów oraz miniaturyzacji układów. Natomiast inwestorzy, zwłaszcza krajowi, nie zawsze zdają sobie sprawę, iż odbywa się to kosztem odporności na stany awaryjne czy też zakłócenia przychodzące z sieci zasilającej bądź urządzeń wykonawczych. Krajowi inwestorzy przy zakupie urządzeń kierują się najczęściej ceną oraz ewentualnie renomą producenta, natomiast nie wnikają w szczegóły techniczne rzutujące na warunki przyszłej eksploatacji, dotyczące zwłaszcza odporności na zakłócenia przychodzące z sieci zasilającej oraz na

stany awaryjne wywoływane złym stanem technicznym elementów wykonawczych. Jako przykład postępowania innego rodzaju przedstawić można dobór prostownika do modernizowanych obecnie systemów zasilania głównych linii kolejowych. Jedna z firm z krajów rozwiniętych oferowała stosunkowo tanie przekształtniki jednak o znacznie gorszej wytrzymałości w zakresie przeciążalności prądowej i wytrzymałości przepięciowej. W wyniku starannej analizy techniczno-ekonomicznej zdecydowano się na rozwiązania krajowe - droższe ale o wyraźnie korzystniejszych parametrach w omawianym zakresie. Urządzenia te wprowadzone do ruchu pracują bezawaryjnie pomimo przypadków „ciężkich” zwarć, które wystąpiły zwłaszcza w początkowym okresie eksploatacji. Również inne urządzenia energoelektroniczne opracowane i wykonane w Polsce jak przekształtniki napędowe prądu stałego i przemiennego, przekształtniki elektrotermiczne, układy bezprzerwowego zasilania, napędy tramwajów i inne znalazły uznanie u użytkowników przemysłowych i komunalnych. Ważny jest tutaj również tani i szybki serwis. Należy jedynie ubolewać, iż ilość tych urządzeń w stosunku do całkowitej sprzedaży układów energoelektronicznych realizowanej na rynku krajowym jest obecnie niewielka (około 10%). Wystąpił w tym zakresie wyraźny regres w stosunku do lat 70 i 80, kiedy to urządzenia wytwarzane w Polsce dominowały na rynku krajowym, a często były także przedmiotem eksportu.

6. DOBÓR PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH I TOPOLOGII PRZEKSZTAŁTNIKA W ASPEKCIE UZYSKANIA WYMAGANEJ WYTRZYMAŁOŚCI ZWARCIOWEJ URZĄDZENIA

Na dobór przyrządów energoelektronicznych do przekształtników dużej mocy (w aspekcie uzyskania wymaganej wytrzymałości zwarciowej) w istotny sposób oddziałują parametry układu zainstalowania urządzenia. Wymagana przeciążalność prądowa przekształtnika wręcz decyduje często o doborze przyrządów energoelektronicznych do układów użytkowanych w określonych warunkach eksploatacyjnych. Należy tu wyróżnić układy o chłodzeniu powietrzem naturalnym oraz wymuszonym bądź cieczowym. Te ostatnie są o wiele bardziej narażone na skutki zwarć ponieważ przy tej samej mocy znamionowej są w nich stosowane przyrządy półprzewodnikowe o mniejszych powierzchniach struktury i mniejszej przeciążalności prądowej. Chłodzenie naturalne, pomimo większego kosztu urządzeń stosowane jest z reguły w układach bezobsługowych współ-

pracujących z systemami zdalnego sterowania pracą urządzeń i diagnozowania ich stanu technicznego oraz ciągłego pomiaru parametrów eksploatacyjnych. Przypadek taki ma miejsce w nowoczesnych podstacjach trakcyjnych zasilających kolejową sieć jezdnią. Każda awaria układu chłodzenia wymagałaby wyłączenia układu i dojazdu ekipy remontowej w celu usunięcia uszkodzenia. Układ chłodzenia wymuszonego powietrznego oraz cieczowego jest dodatkowym elementem zwiększającym awaryjność urządzenia.

Innym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość zwarciovą przekształtnika jest topologia jego układu elektrycznego. Urządzenia energoelektroniczne dużej mocy wymagają z reguły grupowego łączenia przyrządów, układów bądź stosowania obydwóch rozwiązań równocześnie. Łączenie mostków trójfazowych w prostownikach wymuszone jest również wymogiem ograniczenia harmonicznych prądu generowanych przez przekształtnik do sieci zasilającej. W modernizowanych układach zasilania sieci jezdnej wprowadzane są obecnie prostowniki 12-pulsowe. Generalnie można stwierdzić, iż konfiguracje szeregowo są korzystniejsze od równoległych zwłaszcza w przypadkach zwarć wewnętrznych przekształtnika. Na przykład przy połączeniu równoległym n mostków prostowniczych trójfazowych wartość średnia prądu obciążenia jednego przyrządu wyniesie $I_d/3n$, gdzie przez I_d oznaczono prąd wyprostowany na wyjściu układu. Przy projektowaniu urządzenia do tej wartości prądu zostanie dobrany przyrząd półprzewodnikowy prostownika. W przypadku zwarcia zewnętrznego symetrycznego prąd przeciążeniowy rozłoży się równomiernie na wszystkie przyrządy i nie spowoduje uszkodzeń przekształtnika. Jeżeli natomiast wystąpi zwarcie wewnętrzne jednej lub dwóch diod w ramieniu przekształtnika całkowity prąd zwarcia, wynikający z mocy zwarciowej sieci zasilającej oraz impedancji obwodu, popłynie przez jeden uszkodzony przyrząd półprzewodnikowy. Doprowadza to często do eksplozji elementu i dewastacji urządzenia. W przypadku mostków łączonych szeregowo dioda dobierana jest na prąd obciążenia wynoszący $I_d/3$, czyli n razy większy niż w układzie równoległym. Dla tego rozwiązania zagrożenie eksplozją przyrządu w przypadku zwarcia wewnętrznego praktycznie nie występuje.

W prostownikach trakcyjnych oraz w innych układach dużej mocy dość powszechnie stosowana jest obecnie konfiguracja szeregowego łączenia mostków prostowniczych zasilanych z transformatora trójuzwojeniowego o dwóch uzwojeniach wtórnych, których wektory napięć przewodowych przesunięte są o 30° el. Taki właśnie układ zastosowano w opracowanych w kraju zespołach prostownikowych przeznaczonych dla zasilania PKP.

Podobne skutki wynikają z równoległego bądź szeregowego łączenia przyrządów energoelektronicznych. Obecnie na rynku dostępna jest szeroka gama diod, tyrystorów i tranzystorów. W przypadku diod graniczne parametry

prądowo-napięciowe osiągają $I_{FAV}=6000$ A oraz $U_{RRM}=6000\div 8000$ V, podobne wartości parametrów granicznych występują w przypadku tyrystorów, sygnalizowane w literaturze maksymalne napięcie U_{CE} tranzystora IGBT wynosi obecnie 6500 V. Konstruktor przekształtnika mocy ma więc wybór czy (przy danej mocy przetwarzanej w układzie) stosować więcej przyrządów mniejszych łączonych grupowo czy też mniej elementów o wyższych parametrach napięciowo-prądowych. Istotnym czynnikiem określającym wybór rozwiązania jest końcowa cena urządzenia przy czym pewien wpływ na konfigurację układu mają również uwarunkowania techniczne. Korzystne wydają się być rozwiązania pośrednie. Jak już wspomniano, konfiguracje równoległe w przypadku zwarć wewnętrznych tworzą zagrożenia eksplozyjne. Jednak łączenie dwóch do trzech elementów (jak to występuje w omawianym prostowniku trakcyjnym) jeszcze nie powoduje zagrożeń tego rodzaju. Z drugiej strony, przyrządy o dużych prądach są stosunkowo drogie i konieczność ich wymiany w przypadku awarii bądź pogorszenia parametrów pociąga za sobą znaczne koszty. Również w celu zapewnienia wymaganej wytrzymałości napięciowej układu korzystniej jest stosować elementy łączone szeregowo niż jeden przyrząd o tym samym napięciu U_{RRM} . Na przykład w przypadku prostownika trakcyjnego wymagana wytrzymałość (jednego mostka diodowego) na przepięcia przychodzące z linii prądu stałego wynosi 15 kV. Można więc stosować w ramieniu mostka jedną diodę o napięciu $U_{RRM}=7,5$ kV (najczęściej wykonywana na specjalne zamówienie użytkownika a więc o wysokiej cenie zakupu), 2 diody o napięciu 3,8÷4 kV lub 3 na napięciu 2,5 kV. Przy czym ostatnie rozwiązanie można ocenić jako korzystniejsze z punktu widzenia warunków eksploatacji układu. Dla mostka o jednym przyrządzie w ramieniu w przypadku jego uszkodzenia wystąpi zwarcie wewnętrzne w przekształtniku co pociąga za sobą natychmiastowe wyłączenie zespołu. Natomiast jeżeli w ramieniu mostka połączone są szeregowo trzy przyrządy to uszkodzenie jednego z nich umożliwia dalszą pracę układu przy obniżonej wytrzymałości napięciowej przekształtnika do 12,5 kV. Wytrzymałość ta jest wystarczająca dla większości zagrożeń występujących w warunkach eksploatacyjnych. Pozwala to na dalszą ciągłą eksploatację zespołu i wymianę uszkodzonego elementu w dogodnym terminie.

Należy podkreślić, iż dobór przyrządów energoelektronicznych i wynikająca stąd wytrzymałość napięciowa przekształtnika jest szczególnie ważnym parametrem eksploatacyjnym ponieważ ponad 80% uszkodzeń przyrządów energoelektronicznych powodowanych jest przez zjawiska o charakterze napięciowym wynikające zarówno z degradacji parametrów przyrządów jak i powstające w wyniku niewytłumionych przepięć łączeniowych oraz atmosferycznych.

Przy doborze przyrządu na warunki zwarcia należy uwzględnić także rodzaj obudowy, w której umieszczona jest struktura półprzewodnikowa. W diodach i tyrystorach na prądy powyżej kilkuset amperów stosowane są powszechnie obudowy pastylkowe, które są stosunkowo odporne na prądy zwarcia wewnętrznych występujące w przypadku uszkodzenia przyrządu. Badania wykazały, iż eksplozja tego rodzaju obudowy występuje przy przepływie prądu nie mniejszym niż 5-krotna wartość dopuszczalnego prądu przeciążeniowego deklarowanego w materiałach firmowych. O około 20% mniejsze prądy powodują eksplozję obudów o konstrukcji wkręcanej. Ogólnie można stwierdzić, iż przyrządy energoelektroniczne o obudowach tradycyjnych (pastylkowych i wkręcanych) są dość odporne na przepływ dużych prądów zwarcia i eksplozję obudów występują tutaj jedynie sporadycznie. Zagrożenie tego rodzaju występuje jedynie w przypadku kilku elementów lub układów łączonych równolegle i uszkodzenia jednego z nich wskutek awarii systemu zabezpieczeń bądź w układzie, kiedy obwód zwarty zasilany jest również od strony odbioru (jak to ma miejsce w układach prostownikowych przeznaczonych do zasilania wanien w procesach elektrolitycznej rafinacji metali kolorowych). Elektrolit stanowi tutaj źródło energii, które zasilą obwód zwarty w przekształtniku.

Zdecydowanie mniejsza odporność eksplozyjna charakteryzuje obudowy modułowe z tworzywa sztucznego. Są one stosowane w diodach i tyrystorach o prądach do kilkuset amperów oraz powszechnie używane w tranzystorach IGBT o prądzie do 1600 A. Prądy powodujące eksplozję tych obudów są kilkakrotnie mniejsze niż w przypadku przyrządów o obudowach klasycznych i tej samej obciążalności prądowej [9]. Badania przeprowadzone na przyrządach o prądzie około 300 A wykazały iż prądy powodujące eksplozję obudów z tworzyw sztucznych są 6÷8 razy mniejsze od odpowiednich prądów wywołujących to zjawisko w elementach o obudowach klasycznych. Należy podkreślić iż układy energoelektroniczne z przyrządami o obudowach z tworzyw sztucznych winny być zabezpieczone bezpiecznikami szybkimi, które (w przypadku tranzystorów) nie ochronią przyrządu przed uszkodzeniem jednak zapobiegają zjawisku eksplozji obudowy. W praktyce eksploatacyjnej napotkano liczne przypadki eksplozji uszkodzonych przyrządów o obudowach modułowych instalowanych zarówno w układach impulsowych regulacji napięcia stałego jak i w falownikach napięcia. Zagadnienie jest o tyle ważne, iż konstruktorzy chętnie stosują przyrządy półprzewodnikowe o obudowach elektroizolowanych (zwłaszcza w układach małej i średniej mocy) ze względu na prostotę montażu i integralną izolację elektryczną struktury półprzewodnikowej od radiatora, natomiast producenci nie podają danych dotyczących zagrożeń eksplozyjnych dla elementów tego rodzaju. Z tego między innymi względu niektóre firmy (Westcode z Wielkiej Brytanii) wprowadziły do produkcji tranzystory mocy w obudowach pastylko-

wych (metalowo-ceramicznych) przeznaczone dla układów energoelektronicznych dużej mocy takich jak przekształtniki częstotliwości do indukcyjnego nagrzewania metali lub regulacji prędkości pojazdów trakcyjnych.

7. ZABEZPIECZENIA PRZYRZĄDÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH PRZED SKUTKAMI ODDZIAŁYWANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

Jak już wspomniano, układy przekształtnikowe z tranzystorami mocy takie jak falownik napięcia oraz układy impulsowej regulacji prądu stałego, winny być zabezpieczone bezpiecznikami, które co prawda nie ochronią przyrządów energoelektronicznych przed uszkodzeniem jednak zapobiegają zjawisku eksplozji obudowy. W falownikach napięcia bezpieczniki umieszczone są z reguły w przewodach fazowych zasilających prostownik układu, natomiast w układach czoperyowych bezpiecznik umieszczony jest w obwodzie głównym kluczującego tranzystora. Są jednak przypadki kiedy stosowanie bezpiecznika jest niewskazane, jak na przykład impulsowe układy hamowania pojazdów trakcyjnych. Przerwanie obwodu wywołane przepaleniem bezpiecznika wstrzymałoby proces elektrycznego hamowania pojazdu, który stanowi funkcję nadrzędną dla tego rodzaju urządzenia. Jedyne rozwiązanie przeciwdziałające skutkom zwarcia stanowi w tym przypadku zdecydowane „przewymiarowanie” prądowe tranzystora czopera (tak aby nie nastąpiła jego eksplozja do wyłączenia zasilania przez wyłącznik główny). W tranzystorowych falownikach napięcia nie stosuje się bezpiecznika w obwodzie prądu stałego ze względu na konieczność minimalizacji długości połączeń między baterią kondensatorów filtru prostownika a tranzystorami falownika. Nawet niewielkie długości tych połączeń wywołują przepięcia komutacyjne na tranzystorach zagrażające uszkodzeniem tych przyrządów. W prostownikach sterowanych oraz układach AC/AC z prostownikami sterowanymi na wejściu dobre wyniki daje stosowanie blokady bramkowej przyrządów prostownika, połączonej z czujnikami prądowymi umieszczonymi na przewodach zasilających. W efekcie przekroczenia zadanej wartości prądu wywołanego stanem awaryjnym następuje blokada przyrządów prostownika i przerwany przepływ prądu w obwodzie zwartym. W prostownikach tyrystorowych czas działania tego rodzaju ochrony nie przekracza 6 ms natomiast w układach tranzystorowych proces ten dokonuje się w czasie pojedynczych mikrosekund. Ten rodzaj zabezpieczenia przeciwzwarciego jest powszechnie stosowany również w innych układach z tranzystorami mocy (jak falowniki i czopery) przy czym czynnikiem inicjującym działanie blokady bramkowej może

być poziom napięcia nasycenia tranzystora. Wadą rozwiązania jest to, iż przestaje on działać w momencie uszkodzenia tranzystorów. System blokady bramkowej jest szczególnie efektywny w przypadku prostowników tyrystorowych zasilających falowniki prądu w aspekcie ochrony tyrystorów bądź tranzystorów falownika. W przypadku wystąpienia zwarcia (przewrotu) w falowniku prąd narasta stopniowo (ze stałą czasową wynoszącą nie mniej niż dziesiątki milisekund), co spowodowane jest oddziaływaniem indukcyjności szeregowej. Układ blokady bramkowej wyłączy prąd zwarciovowy kiedy nieznacznie (o 20% - 30%) przekroczy on zadaną wartość prądu ograniczenia. Pozwoli to ochronić tyrystory falownika przed uszkodzeniem a tranzystory przed eksplozją bez potrzeby stosowania bezpieczników. Podobny efekt uzyskać można przez instalowanie na wejściu przekształtnika z prostownikiem diodowym łącznika tyrystorowego. Jednak rozwiązanie to jest niechętnie stosowane do zabezpieczeń przekształtników dużej mocy ze względu na koszt łącznika tego rodzaju, kilkakrotnie przekraczający cenę aparatu stykowego. Inna sytuacja występuje w falownikach napięcia, gdyż układ blokady bramkowej prostownika, w przypadku wystąpienia zwarcia w falowniku nie przeciwdziała rozładowaniu baterii kondensatorów filtru przez przyrządy półprzewodnikowe falownika, co może powodować uszkodzenie tyrystorów, a w przypadku tranzystorów eksplozję obudów tych przyrządów.

W falownikach napięcia z tyrystorami klasycznymi bądź wyłączalnymi GTO i IGCT dopuszczalna, a nawet wskazana jest indukcyjność szeregową (ze względu na ograniczoną dopuszczalną stromość narastania prądu w tych przyrządach) pomiędzy baterią kondensatorów filtru a falownikiem. W układach tego rodzaju dobre wyniki w zakresie ochrony tyrystorów przed skutkami zwarcia falownika daje układ składający się z bezpiecznika oraz czujnika pomiarowego umieszczonego w torze prądu stałego połączonego z bramką tyrystora impulsowego, włączonego między szyny dodatnią a ujemną zasilającą falownik. W przypadku wystąpienia zwarcia wewnętrznego bądź w układzie zasilanym przez falownik - w ciągu kilku mikrosekund włączony zostanie tyrystor impulsowy, który przejmie prąd zasilający obwód zwarty chroniąc tyrystory falownika. Równocześnie nastąpi przepalenie bezpiecznika w obwodzie prądu stałego, a więc odłączenie obwodu zwartego od źródła zasilania i baterii kondensatorów filtru. Układ ten zastosowany w falowniku napięcia z tyrystorami GTO przeznaczonymi do regulacji prędkości kątowej silników indukcyjnych o mocy 700-800 kW i napięciu 3×660 V z powodzeniem chronił tyrystory falownika przed skutkami występujących w czasie badań układu stanów awaryjnych. Z kolei brak tego układu ochronnego w odpowiednim układzie pochodzącym z importu eksploatowanym w jednej z elektrowni krajowych stanowił przyczynę nie tylko, występujących w czasie awarii, uszkodzeń tyrystorów (GTO) falownika ale równoczesnej dewastacji układu sterowania urządzenia. W układach z tyrystorami

GTO (bez omówionego powyżej układu zwiernika) ważny czynnik ochrony tyristorów przed uszkodzeniem stanowi system blokady impulsów wyłączających w stanie kiedy prąd tyristora przekroczy wartość dopuszczalnego prądu wyłączającego I_{TORM} . Stan taki może wystąpić w przypadku zwarcia skrośnego (między biegunem dodatnim a ujemnym). Próba wyłączenia przyrzędu w tych warunkach powoduje z reguły uszkodzenie przyrzędu. Inną przyczyną uszkodzenia tyristora GTO stanowi zbyt szybkie podanie impulsu wyłączającego w odniesieniu do chwili załączenia przyrzędu. Tyristor przewodzi wtedy jedynie częścią powierzchni struktury i wyłączenie prądu nawet mniejszego od I_{TORM} powoduje zniszczenie struktury w obszarze przybramkowym powodując przebiecie całego przyrzędu. Jest to istotna różnica w stosunku do tranzystorów mocy, w których przez działanie blokady bramkowej można wyłączyć prąd obwodu głównego w dowolnie krótkim czasie. Tak więc w przekształtnikach z tyristorami GTO nie powinno się wyłączać prądów zwarcia przez układy blokady bramkowej powodującej wyłączenie tyristorów. Wyjątek stanowią układy o długiej stałej czasowej narastania prądu zwarciovego jak na przykład falowniki prądu.

W podsumowaniu należy stwierdzić, iż przekształtniki energoelektroniczne są układami bardziej wrażliwymi na narażenia prądowe i napięciowe niż urządzenia elektrotechniki klasycznej takie jak maszyny elektryczne, transformatory czy aparaty. Przy zabezpieczeniu tych układów przed tymi narażeniami zaleca się przestrzeganie następujących zasad:

- stosowanie odpowiednich rezerw w zakresie wytrzymałości napięciowej i przeciążalności prądowej przy doborze przyrządów energoelektronicznych;
- wprowadzanie kilku równolegle działających systemów w zakresie ochrony przeciwprzepięciowej i nadprądowej przekształtników. Jako przykład systemu zabezpieczeń przekształtnika dużej mocy przedstawiono poniżej odpowiedni układ ochrony prostownika trakcyjnego.

Zespół prostownikowy PD-1,7/3,3 (rys.2) wyposażony jest w następujące systemy zabezpieczeń nadprądowych:

- Wyłącznik główny zespołu, który wyłącza selektywnie zasilanie po stronie wysokiego napięcia przy wszystkich rodzajach zwarć w prostowniku i w transformatorze. Układ wyzwala nadmiarowego jest na ogół wyposażony w system opóźniający tak, aby wyłączenie zasilania nie występowało w przypadku zwarć w sieci trakcyjnej wyłączanych przez szybkie wyłączniki zasilaczowe prądu stałego oraz przyzwarciach w układach potrzeb własnych zasilanych z dodatkowego uzwojenia umieszczonego w transformatorze głównym i wyłączanych w inny sposób. Dlatego też nawet w przypadku stosowania wyłączników szybkich

(o czasie działania poniżej 100 ms) przyjmuje się, iż ich działanie pobudzone nadmiarowo następuje w czasie nie krótszym niż 200 ms. Układ wyzwalania tego wyłącznika pobudzony jest dodatkowo z systemu różnicowo-prądowego połączonego z przekładnikami prądowymi umieszczonymi na przewodach łączących transformator z prostownikiem. Układ ten powoduje szybkie (w czasie poniżej 100 ms) wyłączenie zasilania w przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego bądź wewnętrznego w prostowniku i w efekcie tego asymetrii prądów w przewodach zasilających przekształtnik. Wyłącznik ten chroni zespół prostownikowy również przed skutkami zwarcia między biegunem dodatnim a ujemnym, które występuje bezpośrednio na szynach wyjściowych prostownika (przed dławikiem filtru i wyłącznikiem zasilaczowym), ponadto działa kiedy zawiodą inne systemy zabezpieczeń;

- Wyłącznik zasilaczowy prądu stałego instalowany na wyjściu z podstacji w linii zasilającej sieć jezdną. Jego funkcją jest szybkie wyłączenie (w czasie około 20 ms) zwarć w sieci jezdnej.

Ochrona przeciwprzebiegiowa prostownika realizowana jest w sposób następujący:

- Od przepięć atmosferycznych przychodzących z linii zasilającej przekształtnik chroniony jest przez ograniczniki przepięciowe (odgromniki) włączone między fazy uzwojeń wtórnych transformatora a ziemię;
- Do każdej diody prostownika dołączony jest układ RC, którego celem jest tłumienie przepięć komutacyjnych i łączeniowych powstających w obwodzie zasilania;
- Na wyjściu mostków diodowych prostownika włączone są układy RC, które chronią przekształtnik przed przepięciami atmosferycznymi i łączeniowymi generowanymi w sieci jezdnej;
- Na słupach podtrzymujących sieć trakcyjną instalowane są iskierniki włączone między biegun dodatni a ziemię, które tłumią przepięcia o wartości szczytowej większej niż 13÷15 kV;
- Dławik filtru zbocznikowany jest rezystorem połączonym szeregowo z tyrystorem, którego włączenie inicjowane jest przez układ pomiarowy w przypadku jeżeli wartość szczytowa napięcia na dławiku przekroczy określony poziom (na przykład przy wyłączeniu prądu zwarcia przez wyłącznik zasilaczowy). Energia dławika wytracona zostaje wówczas w tym rezystorze.

8. WNIOSKI

1. Wymagana wytrzymałość zwarciova przekształtników mocy warunkująca dobór przyrządów energoelektronicznych do układu o określonych danych znamionowych w istotny sposób zależy od parametrów układu zainstalowania przekształtnika takich jak:

- moc zwarciova sieci zasilającej;
- rodzaj (napowietrzna, kablowa) i długość linii zasilającej układ;
- napięcie zwarcia transformatora zespołu.

2. Przyrządy energoelektroniczne są elementami wrażliwymi na narażenia prądowe a zwłaszcza napięciowe. Przy ich doborze do określonych układów przekształtnikowych wskazane jest stosowanie odpowiednich rezerw w stosunku do parametrów napięciowo-prądowych deklarowanych przez wytwórcę. W układach dużej mocy szczytowa wartość napięcia na przyrządzie nie powinna przekroczyć połowy napięcia deklarowanego jako dopuszczalne (rezerwa 50%). W zakresie obciążalności prądowej odpowiednie rezerwy zależne są od rodzaju chłodzenia przekształtnika, w przypadku chłodzenia wymuszonego winny być większe niż dla układów z chłodzeniem naturalnym.

3. Projektowanie przekształtnika dużej mocy z uwzględnieniem warunków zwarciowych jest przedsięwzięciem zarówno technicznym jak i ekonomicznym. Urządzenie powstające w wyniku projektu stanowi zwykle kompromis między wymaganiami co do odporności na różnego rodzaju zagrożenia a ceną. Analizy prowadzone przy opracowaniu urządzenia winny uwzględniać wszystkie możliwe zagrożenia powstające w samym przekształtniku jak i pochodzące z sieci zasilającej oraz z układu zasilanego. Istotny czynnik stanowi analiza narażeń o dużym prawdopodobieństwie ich wystąpienia i zaprojektowanie samego przekształtnika oraz systemu zabezpieczeń tak, aby układ był na nie odporny. Ważny jest tutaj element subiektywny jak doświadczenie i wyczucie projektanta.

4. Ważnym czynnikiem ochrony przekształtników przed skutkami zwarc jest zapobieganie eksplozjom obudów przyrządów energoelektronicznych jako efektu prądów zwarciowych o dużych wartościach. Przy projektowaniu przekształtników należy uwzględnić rodzaj obudowy elementu energoelektronicznego. Przyrządy o obudowach modułowych z tworzywa sztucznego ulegają eksplozji przy prądzie kilkakrotnie mniejszym niż odpowiednie elementy o obudowach tradycyjnych (metalowo-ceramicznych). Układy z przyrządami o obudowach modułowych winny być chronione bezpiecznikami, które (w przypadku tranzystorów mocy) chociaż nie zabezpieczą przyrządu przed uszkodzeniem to przeciwdziałają będą eksplozji obudowy i uszkodzeniu innych fragmentów przekształtnika.

5. Przy projektowaniu przekształtników dużej mocy, ze względu na wytrzymałość na zwarcia wewnętrzne, korzystniejsze są konfiguracje szeregowo przyrządów bądź układów niż równoległe. W przypadku konfiguracji równoległej całkowity prąd zwarcia wewnętrznego (wywołanego przebicciem przyrządu półprzewodnikowego) zamyka się przez uszkodzony przyrząd (o mniejszej obciążalności prądowej). Może to doprowadzić do eksplozji jego obudowy nawet ceramiczno-metalowej. Dla tego rodzaju rozwiązania, kiedy łączonych jest równoległe więcej niż 4÷5 przyrządów bądź układów konieczne jest stosowanie bezpieczników topikowych.

6. Jedną z głównych przyczyn uszkodzeń przyrządów energoelektronicznych w przekształtnikach mocy i wywołanych tym zwarciami wewnętrznymi jest degradacja charakterystyk napięciowo prądowych tych przyrządów występująca w trakcie długotrwałej eksploatacji urządzeń. Istotnym czynnikiem zapobiegającym stanom awaryjnym jest okresowa (na przykład raz w roku) kontrola charakterystyk i wymiana przyrządów o parametrach gorszych od deklarowanych.

7. Doświadczenia wykazują iż 3-5% przyrządów energoelektronicznych dostarczanych przez producentów wykazuje gorsze parametry napięciowo-prądowe od deklarowanych w katalogach firmowych. Dlatego też przed zamontowaniem elementów w przekształtniku należy sprawdzić ich główne parametry przy pomocy wyspecjalizowanej aparatury. Należy unikać montowania w urządzeniach zwłaszcza przyrządów o niestabilnych charakterystykach napięciowo-prądowych.

8. Przyrządy energoelektroniczne są elementami wrażliwymi na narażenia napięciowe i prądowe. Ochrona przekształtników dużej mocy zwłaszcza zasilanych bezpośrednio z sieci energetycznych bądź zasilających odbiory zewnętrzne winna obejmować nie mniej niż 2÷3 systemy ochrony przetężeniowej oraz odpowiednio przeciwprzepięciowej.

9. W przekształtnikach energoelektronicznych o szybko narastającym prądzie zwarcia, z tyrystorami wyłączalnymi (kiedy niewskazane jest instalowanie bezpieczników do ochrony tych przyrządów) należy stosować układy blokujące impulsy wyłączające wraz z wystąpieniem prądu o dużej wartości. Próba wyłączenia przez tyrystor prądu przekraczającego wartość dopuszczalną - I_{TORM} powoduje z reguły zniszczenie przyrządu. Uszkodzenie tyrystora GTO może nastąpić również przy wyłączaniu prądu mniejszego od I_{TORM} kiedy impuls wyłączający zostanie podany w zbyt krótkim czasie po załączeniu przyrządu (tyrystor przewodzi wtedy jedynie częścią powierzchni struktury).

10. Pomimo stosowania kilku zabezpieczeń nadprądowych i przeciwzwarceniowych, przy projektowaniu przekształtnika mocy należy się liczyć z tym, iż mogą one zawieść (wypadki takie wystąpiły w praktyce). Układ energoelektroniczny winien być skonstruowany w ten sposób aby w przypadku zwarcia we-

wnętrznego i eksplozji obudowy przyrządu półprzewodnikowego ograniczyć oddziaływanie tego zjawiska na inne fragmenty przekształtnika oraz wyeliminować zagrożenie dla obsługi, które pojawia się wraz z przerzuceniem łuku elektrycznego do obudowy urządzenia. Do głównych środków przeciwdziałających zagrożeniom tego rodzaju należą: metalowe osłony umieszczone między poszczególnymi fragmentami przekształtnika oraz między torem prądowym a obudową jak również odpowiedni poziom izolacji między obwodem głównym a układem sterowania (zgodny z zaleceniami norm). Osłony te mogą równocześnie stanowić elementy układu chłodzenia przekształtnika.

LITERATURA

1. Januszewski S., Zymmer K.: Some experiences concerning of starting and service of high power IGBT converters. European Conference on Power Electronics and Applications - September 1997, Trondheim, Norway.
2. Januszewski S., Zymmer K.: Problemy eksploatacji układów energoelektronicznych z tyrystorami wyłączalnymi GTO. Prace Instytutu Elektrotechniki Nr.198/98.
3. Januszewski S., Zymmer K.: Stany awaryjne w eksploatacji przekształtników dużej mocy. VI Konferencja „Racjonalizacja Użytkowania Energii i Środowiska”. Październik 1998, Gdańsk.
4. Januszewski S., Zymmer K.: An overcurrent protection coordination in converters with IGBT transistors. 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control - September 2000, Kosice, Slovak Republic.
5. Januszewski S., Zymmer K., Sakowicz S.: Influence of semiconductor device explosion strength on safe design of high power converters. 14th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics 3-5 October 2001, the High Tatras, Slovak Republic.
6. Mohan N., Underland T.M., Robbins W.P.: Power Electronics Converters, Applications and Design (2nd ed.) New York J. Wiley 1995.
7. Pytlik A., Świątek H., Zakrzewski Z., Zymmer K.: Analiza zwarć występujących w przekształtnikach częstotliwości i metody ich ochrony. Prace Instytutu Elektrotechniki Nr 203/99.
8. Sakowicz S., Zymmer K.: Analiza stanów zwarciovych w półprzewodnikowych przyrządach mocy. Prace Instytutu Elektrotechniki nr 204/2000.
9. Sakowicz S., Zymmer K.: Badania wytrzymałości eksplozyjnej obudów przyrządów energoelektronicznych i zagrożenia występujące w układach przekształtnikowych. Prace Instytutu Elektrotechniki nr 209/2001.
10. Zymmer K., Sakowicz S., Januszewski S.: High power semiconductor device thermal stresses during short-circuit states. European Conference on Power Electronic and Application - EPE'99 September 1999 Lausanne, Switzerland.

Rękopis dostarczono, dnia 21.12.2001 r.

Opiniował: prof. dr inż. Henryk Tunia

HIGH POWER CONVERTERS DESIGNING IN ASPECT
OF SEMICONDUCTOR POWER DEVICES CHOICE
FOR SHORT CIRCUIT CONDITIONS AND CHOICE
OF OVERCURRENT PROTECTION SYSTEMS

K. ZYMMER, S. SAKOWICZ

SUMMARY *Influence of parameters of the convertor supply system (as short circuit voltage of convertor transformer the ratio of the short circuit power of supply system and kind and length of the supply line) on the rate short circuit current in diods of rectifier. These simulation analysis was conducted for of supply system of electric traction DC line of voltage 3,3 kV. The results of analysis for different events of short circuit states occurred inside and outside rectifier is presented. The serious and parallel connections of semiconductor power devices and rectifiers are compared in aspect of endurance of installation against short circuit phenomena. The problem of explosion effect of different semiconductor power devices cases in short circuit conditions is also presented. The means of protection of different semiconductor power devices against of short circuit results are described.*

Doc. dr inż. Krzysztof Zymmer ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1962 r. i w tym też roku rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Podczas swojej praktyki zawodowej zajmował się opracowywaniem metod badań, układów pomiarowych oraz badaniami własności półprzewodnikowych przyrządów mocy w stałej współpracy z Z.E."Lamina" z Piaseczna. Obszar szczególnych zainteresowań autora stanowiły:

- wytrzymałość przeciążeniowa i zwarciova przyrządów energoelektronicznych,
- zjawiska dynamiczne w stanach przejściowych oraz obciążalność prądowa tych elementów przy podwyższonych częstotliwościach.



Pracę doktorską obronił w 1983 r., a na stanowisko docenta w Instytucie Elektrotechniki został powołany w 1990 roku. Od 1991 roku kieruje Zakładem Przekształtników Mocy w Instytucie Elektrotechniki. Jest autorem i współautorem około stu artykułów i referatów na krajowe i międzynarodowe konferencje naukowe.



Mgr inż. Stanisław Sakowicz urodzony w roku 1942. Wydział Elektryczny Politechniki Łódzkiej ukończył w 1966 r. W latach 1967 do 1972 pracował w Biurze Konstrukcyjnym Przekształtników w Zakładach ELTA w Łodzi. Od roku 1973 pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jest współautorem wielu prac naukowo-badawczych dla przemysłu oraz ponad dwudziestu publikacji z zakresu układów przekształtnikowych.