

Krzysztof ZYMMER
Ireneusz MAŚCIBRODZKI

ANALIZA STANÓW ZWARCIOWYCH W PRZEKSZTAŁTNIKACH DUŻEJ MOCY

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono metodę określania zagrożeń uszkodzeniem przyrządów energoelektronicznych oraz eksplozją tych elementów w warunkach zwarć zewnętrznych i wewnętrznych w przekształtnikach dużej mocy. Metoda oparta jest na analizie porównawczej prądów przeciążeniowych deklarowanych przez wytwórców przyrządów półprzewodnikowych jako dopuszczalne z odpowiednimi wartościami prądów występujących w tych przyrządach w warunkach zwarciovych w zespole przekształtnikowym. W związku z różnymi przebiegami prądu deklarowanego jako dopuszczalny w stosunku do przebiegów występujących w rzeczywistości, jako kryterium porównawcze przyjęto odpowiadające tym prądom wartości całek i^2t . Jako kryterium zagrożenia eksplozją przyrządu energoelektronicznego przyjęto wartości całki i^2t , powodującej eksplozję tego przyrządu, wyznaczoną w trakcie badań eksperymentalnych prowadzonych w zwarciozni prądu przemiennego. Analizy obliczeniowe prowadzono na przykładzie trakcyjnego zespołu prostownikowego o prądzie 1700 A i napięciu wyprostowanym 3,3 kV. Analizy prowadzone były metodą symulacyjną przy wykorzystaniu programu PSIM.*

Słowa kluczowe: *przekształtniki dużej mocy, stany zwarciove, przyrządy energoelektroniczne*

dr hab. inż. Krzysztof ZYMMER, prof. IEI
e-mail: k.zymmer@iel.waw.pl

mgr inż. Ireneusz MAŚCIBRODZKI
e-mail: i.mascibrodzki@iel.waw.pl

Zakład Przekształtników Mocy, Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 258, 2012

1. WPROWADZENIE

Pomimo rozwoju techniki tranzystorowej, prostowniki diodowe i tyrystorowe są nadal stosowane w układach dużej mocy ze względu na kilkakrotnie niższą cenę tych układów w odniesieniu do przekształtników tranzystorowych.

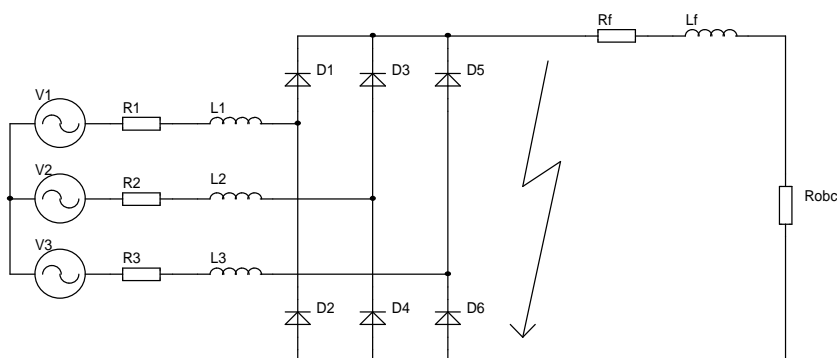
Diodowe i tyrystorowe przekształtniki energoelektroniczne o mocach kilku megawatów są z reguły zasilane z sieci elektroenergetycznej średniego napięcia przez własne transformatory dopasowujące napięcie na wyjściu układu do potrzeb odbiornika. Układy takie są projektowane indywidualnie przy uwzględnieniu zarówno wymagań stawianych przez odbiornik, jak i parametrów układu zasilania. Ważnym zagadnieniem przy projektowaniu układów tego rodzaju jest dobór przyrządów energoelektronicznych, zapewniający odporność przekształtnika na zwarcia i przeciążenia przy uwzględnieniu konkurencyjnej ceny urządzenia. Należy podkreślić, że przy projektowaniu zespołów prostownikowych dużej mocy uwzględniane są głównie zwarcia symetryczne występujące na wyjściu prostownika. Natomiast prądy występujące w diodach prostownika mogą być istotnie większe przy zwarcjach wewnętrznych zespołu. Są one powodowane uszkodzeniami przyrządów półprzewodnikowych oraz innych elementów konstrukcyjnych, a także czynnikami losowymi. Stany awaryjne tego rodzaju mogą doprowadzić do uszkodzeń innych przyrządów energoelektronicznych, a nawet do ich eksplozji i w rezultacie do dewastacji urządzenia przez drobiny metalu i łuk elektryczny. Stany te powinny być uwzględniane przy projektowaniu przekształtników dużej mocy (rzędu megawatów i napięciu powyżej 1000 V) przy doborze przyrządów energoelektronicznych oraz systemu zabezpieczeń zwarciovych.

W niniejszym artykule, na podstawie analizy stanów zwarciovych trakcyjnego zespołu prostownikowego, przedstawiono sposób weryfikacji doboru przyrządów energoelektronicznych do układu dużej mocy, przy uwzględnieniu możliwych do wystąpienia stanów awaryjnych. Obliczenia prądów zwarcia prowadzono metodą symulacyjną przy wykorzystaniu programu PSIM. Wyniki obliczeń prądu zwarcia dla wybranego przypadku zostały zweryfikowane eksperymentalnie podczas prób przeprowadzonych na kolejowej podstacji trakcyjnej po zainstalowaniu zespołu. Różnice w wartościach prądu określonego metodą symulacyjną oraz pomierzonego dla przypadku zwarcia na zaciskach wyjściowych zespołu prostownikowego (za dławikiem wygładzającym) nie przekroczyły 5%. Jako kryterium poprawności doboru diod dla danych warunków zwarciovych przyjęto całkę $i^2 t$ obliczoną na podstawie przeciążalności prądowej tych przyrządów deklarowanej przez producentów.

Prace nad zagadnieniami przeciążalności prądowej i wytrzymałości zwarcioviej przyrządów energoelektronicznych prowadzone są w Instytucie Elektrotechniki od wielu lat [2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15]. Według uzyskanych informacji prace takie prowadzone są także w innych ośrodkach badawczych, a zwłaszcza przez wytwórców tych przyrządów, jednak wyniki tych badań ujawnione są jedynie w niewielkim stopniu [5, 7].

2. PRĄD ZWARCIA W PROSTOWNIKU TRÓJFAZOWYM MOSTKOWYM

W eksploatacji przekształtników często występują przypadki, w których dane deklarowane w postaci dopuszczalnej liczby impulsów prądu o określonych parametrach nie wystarczają do określenia wytrzymałości przeciążeniowej przekształtników. Dotyczą one warunków, w których przebiegi prądów zwarciovych w obwodach z przyrządami energoelektronicznymi odbiegają od przebiegów typowych, dla których wytwórcy przyrządów deklarują odpowiednie dane [14]. Taki przypadek często występujący w praktyce charakteryzuje zmieniająca się w czasie amplituda i czas trwania impulsów prądu zwarciovego. W przekształtnikach małej mocy można dobrać wtedy przyrządy, stosując odpowiednią rezerwę w zakresie przeciążalności prądowej. Natomiast w układach dużej mocy rzędu megawatów, gdy koszt przyrządów półprzewodnikowych jest wysoki, stosowanie nadmiernej rezerwy jest ekonomicznie nieuzasadnione, ponieważ powoduje zmniejszenie konkurencyjności rynkowej przekształtników. Zagadnienie jest istotne, gdyż w przypadku tych układów często nie obciążalność prądowa, lecz wytrzymałość zwarciova stanowi główne kryterium doboru przyrządów do danego urządzenia [15]. Stąd zaistniała potrzeba opracowania optymalnego ekonomicznie doboru tych przyrządów do warunków zwarciovych występujących w przekształtnikach dużej mocy, przy uwzględnieniu stosowanych zabezpieczeń przeciwzwarciowych.



Rys. 1. Schemat ideowy przekształtnika zasilanego z sieci 3-fazowej (stan zwarcia)

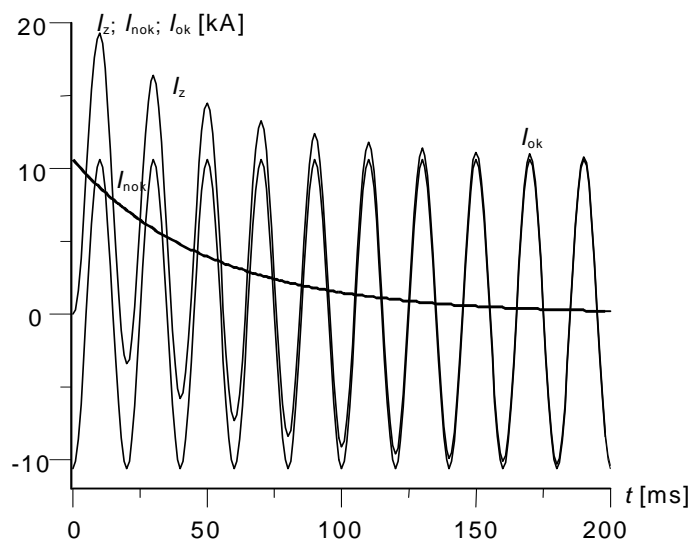
Analizy dotyczące obliczania prądów zwarcia w prostowniku trójfazowym mostkowym zawiera literatura [15]. Schemat ideowy prostownika w stanie zwarcia na zaciskach wyjściowych układu pokazano na rysunku 1.

Przykładowe obliczenia prądu zwarcia wykonano dla prostownika przeznaczonego dla układu zasilania kolejowej sieci trakcyjnej o napięciu 3,3 kV o następujących parametrach systemu:

- moc zwarciowa sieci zasilającej $S_z = 200 \text{ MVA};$
- napięcie sieci zasilającej $U_1 = 15 \text{ kV}_{AC};$
- moc pozorna transformatora prostownikowego $S_1 = 4400 \text{ kVA};$
- napięcie wtórne transformatora $U_2 = 2,6 \text{ kV};$
- napięcie zwarcia transformatora $U_z = 10,45\%;$
- straty mocy w transformatorze $\Delta P_{cu} = 36 \text{ kW}.$

Wyniki analizy symulacyjnej zilustrowane przebiegiem prądu zwarcia w połączeniu między transformatorem a prostownikiem przedstawiono na rysunku 2.

Jak wiadomo [1], przebieg prądu zwarcia zależy od kąta fazowego ψ określającego moment wystąpienia zwarcia w stosunku do napięcia na wyjściu transformatora zespołu. Największa wartość udarowego prądu zwarcia wywołana składową nieokresową I_{nok} występuje w przypadku kąta $\psi = \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg czasowy prądu w połączeniu transformatora z prostownikiem 3-fazowym mostkowym w stanie zwarcia zewnętrznego prostownika i dla kąta $\psi = \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$, gdzie I_{ok} to składowa okresowa.

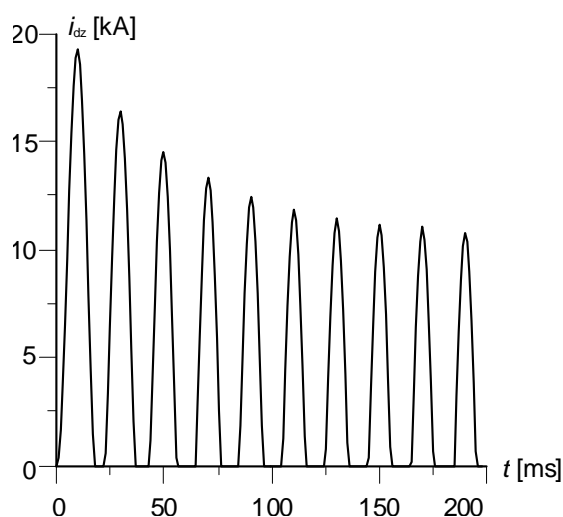


Rys. 2. Przebieg czasowy prądu w połączeniu transformatora z prostownikiem 3-fazowym mostkowym w stanie zwarcia zewnętrznego prostownika

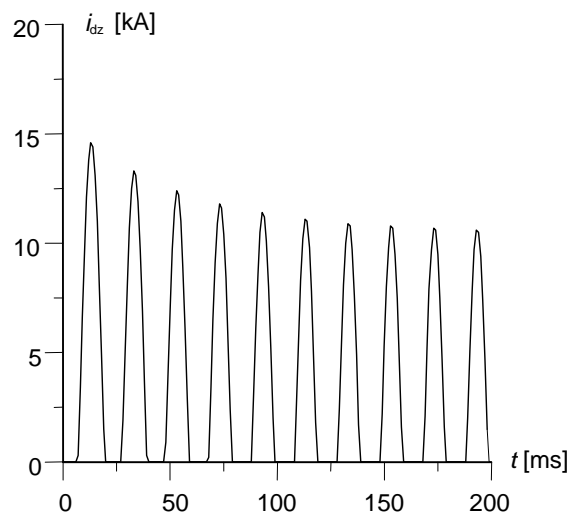
2.1. Prądy zwarcia w gałęzi mostka prostownika

Przy zwarciu symetrycznym (na wyjściu prostownika) impulsom prądowym w przewodzie doprowadzającym odpowiadają impulsy prądu wyprostowanego w gałęzi mostka prostownika. Na rysunkach 3a, 3b, 3c pokazano przebiegi tego prądu dla różnych kątów ψ :

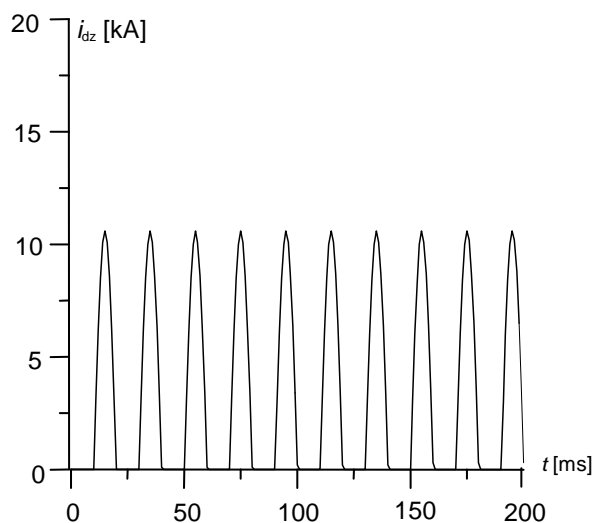
- dla kąta $\psi = \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$ odpowiadającego maksymalnej wartości prądu udarowego;
- dla kąta $\psi = 60^\circ$ odpowiadającego pośredniej wartości tego prądu;
- dla kąta $\psi = \varphi$, czyli przy braku składowej nieokresowej prądu zwarcia, a więc dla najmniejszej wartości impulsów prądu zwarciovego o stałych amplitudzie i czasie trwania.



Rys. 3a. Przebieg czasowy prądu w gałęzi prostownika przy zwarciu zewnętrznym dla maksymalnej wartości prądu udarowego $\psi = (\pi/2 + \varphi)$



Rys. 3b. Przebieg czasowy prądu w gałęzi prostownika przy zwarciu zewnętrznym (kąt $\psi = 60^\circ$)



Rys. 3c. Przebieg czasowy prądu w gałęzi prostownika przy zwarciu zewnętrznym, w przypadku, gdy kąt $\psi = \varphi$, co odpowiada warunkowi braku składowej nieokresowej

Jak to przedstawiono powyżej, dla większości przypadków zwarć, jakie mogą wystąpić w przekształtniku zasilanym z sieci elektroenergetycznej przez transformator zespołu impulsy prądu zwarciovego w gałęzi mostka, w trakcie danego cyklu zwarciovego, zmieniają zarówno amplitudę, jak i czas trwania. Przypadków takich nie obejmują dane deklarowane przez wytwórców w formie cykli dopuszczalnego prądu przeciążeniowego półsinusoidalnych impulsach prądu i czasie ich trwania równym 10 ms.

3. DOBÓR DIOD I TYRYSTORÓW DO STANÓW ZWARĆ I PRZECIĄŻEŃ

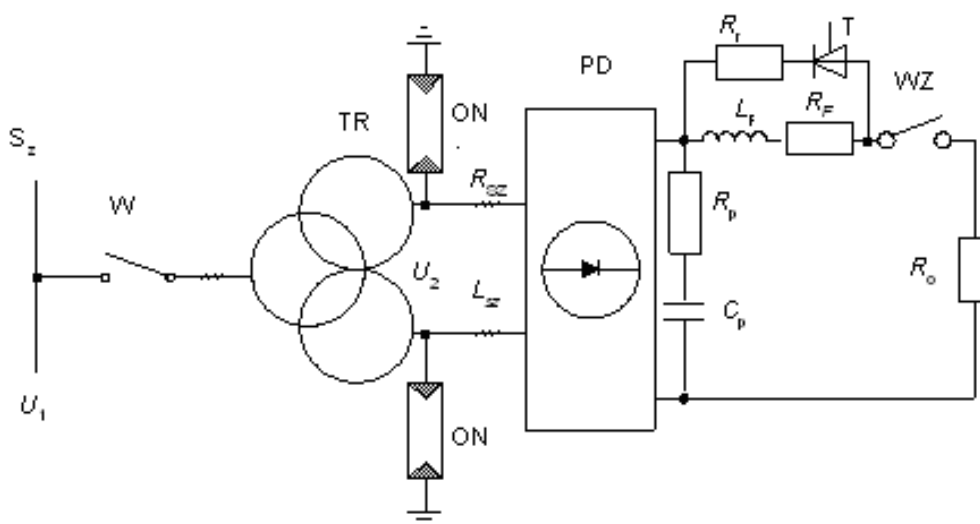
W literaturze [8, 15] przedstawiona została metoda doboru przyrządów półprzewodnikowych do stanów awaryjnych przekształtnika, oparta na śledzeniu obliczonej dla tych stanów temperatury struktury i porównywania tej wartości z odpowiednią temperaturą określoną dla prądu przeciążeniowego, deklarowanego przez producenta jako dopuszczalny. Metoda ta jest jednak dość złożona i może być trudna do stosowania praktycznego przy projektowaniu zespołów przekształtnikowych dużej mocy.

W niniejszej pracy przedstawiony zostanie sposób doboru diod i tyristorów do warunków zwarciovych, bazujący na porównywaniu całek i^2t , obliczonych dla prądów przeciążeniowych, deklarowanych jako dopuszczalne z odpowiednimi wartościami obliczonymi dla określonych przypadków zwarć możliwych do wystąpienia w danym zespole prostownikowym. Metoda ta jest stosunkowo prosta, a więc łatwiejsza do wykorzystania praktycznego.

Przykładowe obliczenia mające na celu weryfikację doboru diod prostownika do różnych stanów awaryjnych przeprowadzono dla 12-pulsowego zespołu prostownikowego o prądzie 1700 A i napięciu 3,3 kV DC i następujących parametrach poszczególnych podzespołów:

- Moc zwarciova sieci zasilającej $S_z = 1400$ MVA;
- Moc transformatora prostownikowego $S_1 = 6,3$ MVA;
- Napięcie uzwojenia pierwotnego $U_1 = 110$ kV AC;
- Napięcie uzwojenia wtórnego połączonego w trójkąt $U_2 = U_{2f} = 1,3$ kV;
- Napięcie fazowe uzwojenia połączonego w gwiazdę $U_{3f} = 750$ V;
- Napięcie zwarcia transformatora $U_z = 11\%$;
- Straty w miedzi $\Delta P_{cu} = 41,8$ kW;
- Indukcyjność połączeń między transformatorem i prostownikiem $L_{sz} = 13,8$ μ H;
- Rezystancja połączeń $R_{sz} = 1$ m Ω ;
- Indukcyjność dławika wygładzającego $L_F = 6$ mH;
- Rezystancja dławika $R_F = 7$ m Ω ;
- Prostownik diodowy z diodami DB-3 produkcji krajowej o prądzie $I_{F(AV)M} = 3500$ A i napięciu $U_{RRM} = 4$ kV.

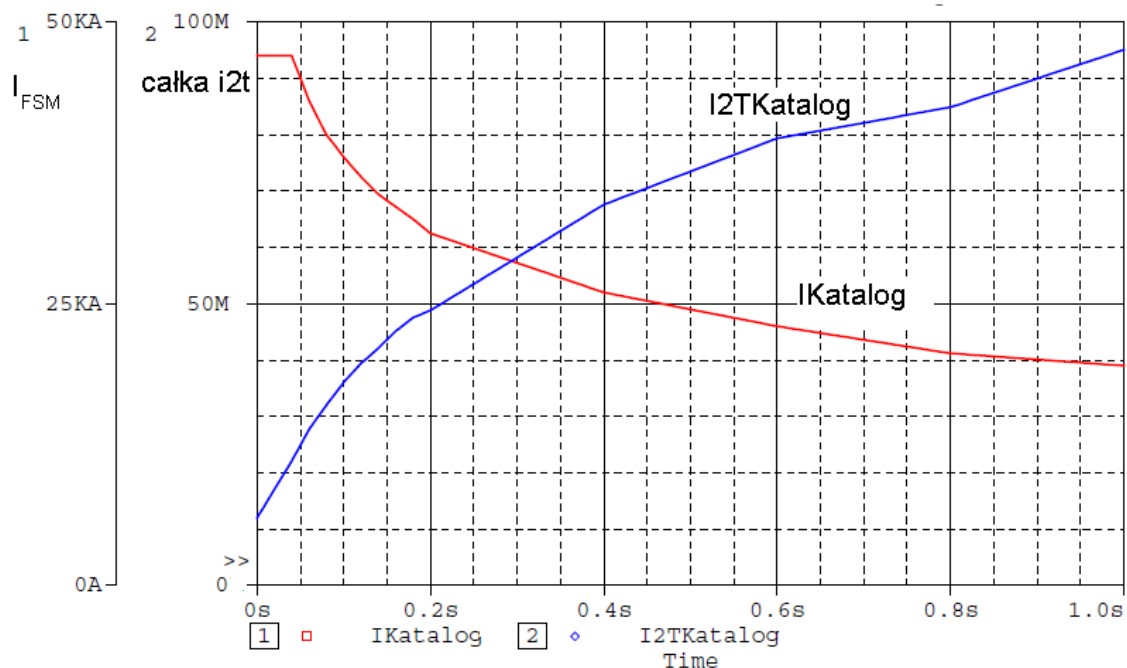
Schemat zespołu prostownikowego pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu zasilania prostownika PD – 1,7/3,3:

S_z – linia zasilająca; W – wyłącznik zespołu; TR – transformator zespołu; ON – ochronniki napięciowe; PD – prostownik diodowy; R_{sz} – szynoprzewód; L_{sz} – indukcyjność dławika wygładzającego; R_F – rezystancja dławika wygładzającego; R_o – rezystancja obciążenia; WZ – wyłącznik prądu stałego; R_p , C_p – układ przeciwprzepięciowy; R_T , T – rezystor i tyristor obwodu przeciwprzepięciowego dławika wygładzającego

Na rysunku 5 przedstawiono deklarowaną jako dopuszczalną przeciążalność prądową diod DB-3 w formie półsinusoidalnych impulsów prądu o czasie trwania 10 ms i danej wartości szczytowej określonej dla cykli przeciążeniowych o różnych czasach trwania. Dane te odniesione są do znamionowej temperatury struktury, zastosowanej w prostowniku diody krzemowej, wynoszącej 150°C i napięcia $U_R = U_{RRM}$. Na rysunku tym pokazano również wartości całek i^2t obliczonych dla poszczególnych cykli przeciążeniowych.



Rys. 5. Deklarowana przeciążalność prądowa – I_{Katalog} [kA] diod DB-3 (oś 1) i odpowiadające jej wartości całki i^2t – I^2T_{Katalog} [MA^2s] (oś 2)

4. BADANIA SYMULACYJNE WYBRANYCH STANÓW ZWARCIOWYCH WYSTĘPUJĄCYCH W TRAKCYJNYM ZESPOLE PROSTOWNIKOWYM 12-PULSOWYM

Przeanalizowano kilka rodzajów zwarcí możliwych do wystąpienia w trakcyjnym zespole prostownikowym:

- Zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym za dławikiem wygładzającym;
- Zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym bezpośrednio na zaciskach wyjściowych zespołu prostownikowego;

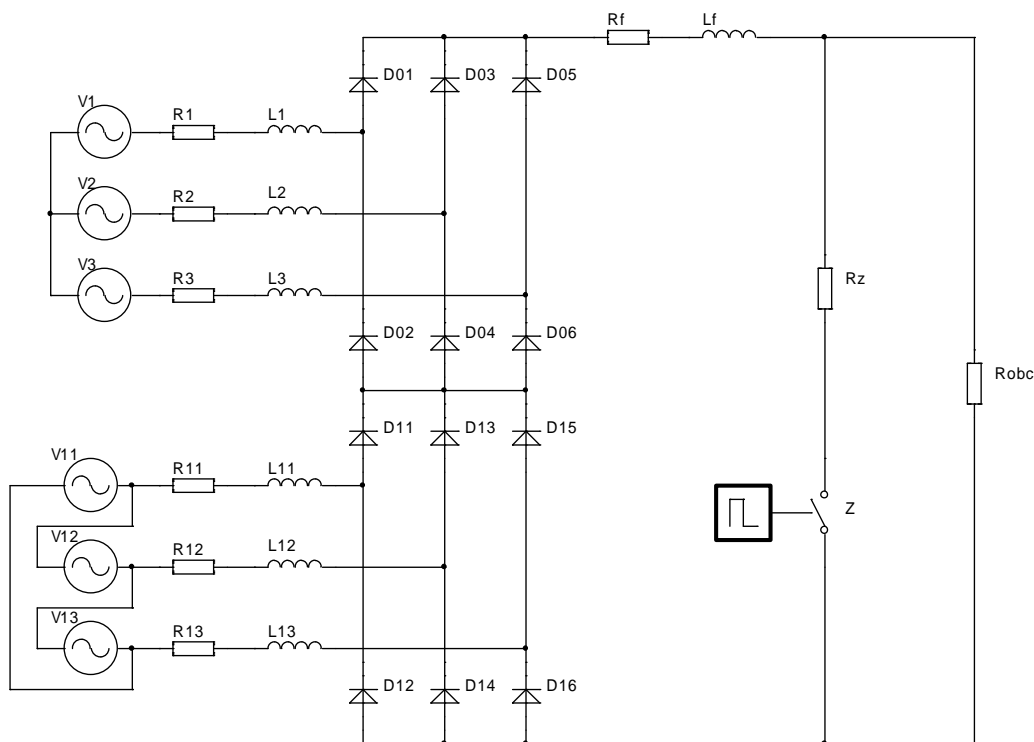
- Przebiecie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem ujemnym;
- Przebiecie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem dodatnim;
- Zwarcie do szyny ujemnej uzwojenia fazy transformatora zasilającego mostek prostownikowy połączony z biegunem dodatnim;
- Zwarcie do szyny ujemnej uzwojenia fazowego transformatora zasilającego mostek prostowniczy połączony z biegunem ujemnym (uszkodzenie diody D16 prostownika).

Dla wymienionych przypadków stanów awaryjnych przyjęto, zgodnie ze stanem faktycznym, że zwarcia wyłączane są wyłącznikami prądu przemiennego umieszczonymi po pierwotnej stronie transformatora prostownikowego. Wyłączniki tego rodzaju starszej generacji nazywane wyłącznikami małoolejowymi (powszechnie stosowanymi na kolejowych podstacjach trakcyjnych) charakteryzują się całkowitym czasem wyłączenia na poziomie 220-250 ms. Natomiast nowoczesne aparaty z komorami stykowymi wypełnionymi sześćfluorkiem siarki stosowane na podstacjach nowo budowanych lub modernizowanych osiągają czasy wyłączenia nie przekraczające 100 ms. Do tych czasów odnoszone będą wyniki obliczeń prądów zwarcia. Jedynie najmniej szkodliwe dla zespołu prostownikowego zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym za dławikiem zespołu może być wyłączane (ale nie w każdym przypadku) wyłącznikiem prądu stałego o czasie działania (20-30) ms, instalowanym na wyjściu podstacji. W analizach prowadzonych w ramach niniejszej pracy przyjęto, że wszystkie stany awaryjne zabezpieczane są wyłącznikami prądu przemiennego instalowanymi na wejściu zespołów prostownikowych.

Schemat trakcyjnego zespołu prostownikowego, na podstawie którego prowadzono analizy symulacyjne, mające na celu wyznaczenie prądów zwarcia dla wymienionych wyżej stanów awaryjnych, pokazany został na rysunku 4. Zespół prostownikowy przeznaczony do zasilania kolejowej sieci trakcyjnej składa się z transformatora trójuzwojeniowego, w którym uzwojenia wtórne o układzie gwiazda/trójkąt i napięciach przewodowych przesuniętych o 60° el. zasilają dwa połączone szeregowo mostki prostownicze. Jako wynik badań symulacyjnych dla poszczególnych stanów awaryjnych przedstawiono przebiegi prądów diod uszkodzonych i nieuszkodzonych w mostku prostownikowym wykazującym większe wartości tego prądu. Obliczenia prądów zwarciovych wykonano dla kąta $\psi = \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$, kiedy prądy zwarciovowe osiągają największe wartości początkowe.

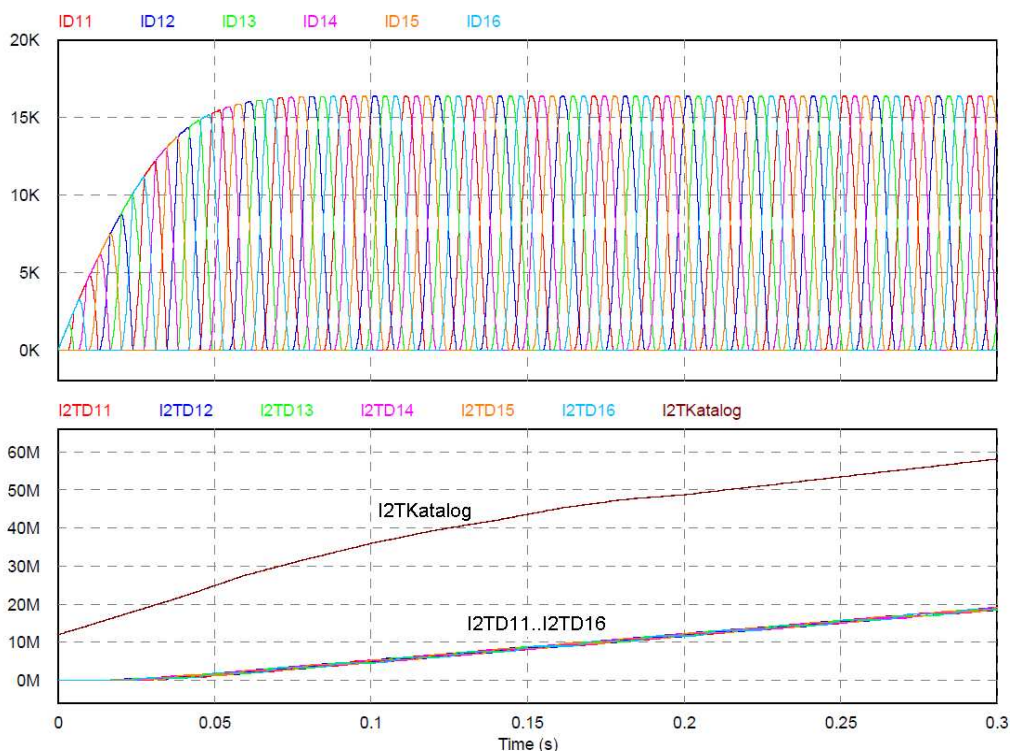
4.1. Zwarcie między biegunem dodatnim a ujemnym za dławikiem wygładzającym

Stan awaryjny tego rodzaju występuje w warunkach trakcyjnych stosunkowo często, a wywołany być może zjawiskiem ognia okrężnego powstającego na komutatorach silników trakcyjnych pojazdów szynowych, zwarcia w samych silnikach bądź w innych urządzeniach taborowych zasilanych napięciem 3,3 kV (prądnice ogrzewcze, przetwornice maszynowe lub statyczne). Stan taki może być także powodowany zdarzeniami losowymi (wyładowania atmosferyczne), powodującymi zwarcie w sieci trakcyjnej czy na szynach wyjściowych podstacji. Rysunek 6 przedstawia schemat zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem zwarcia.



Rys. 6. Zwarcie symetryczne za dławikiem wygładzającym

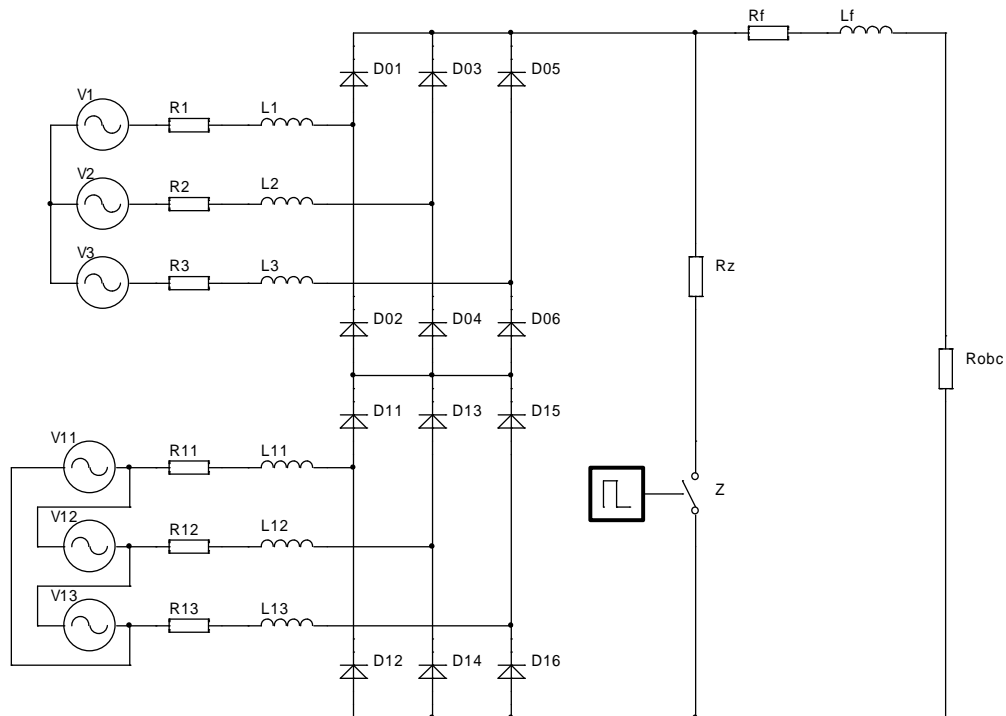
Na rysunku 7 pokazano przebiegi czasowe prądu w diodach prostownika dla tego przypadku zwarcia określone metodą symulacyjną oraz odpowiednie wartości całek i^2t odniesione do wartości określonych dla deklarowanej przeciążalności prądowej diod prostownika. Dla tego przypadku zwarcia zarówno prądy w diodach prostownika jak i odpowiednie wartości całek i^2t są istotnie mniejsze od wartości deklarowanych jako dopuszczalne przez wytwórcę tych elementów. Prostownik może więc wytrzymać wielokrotne zwarcia tego rodzaju bez uszkodzeń diod krzemowych.



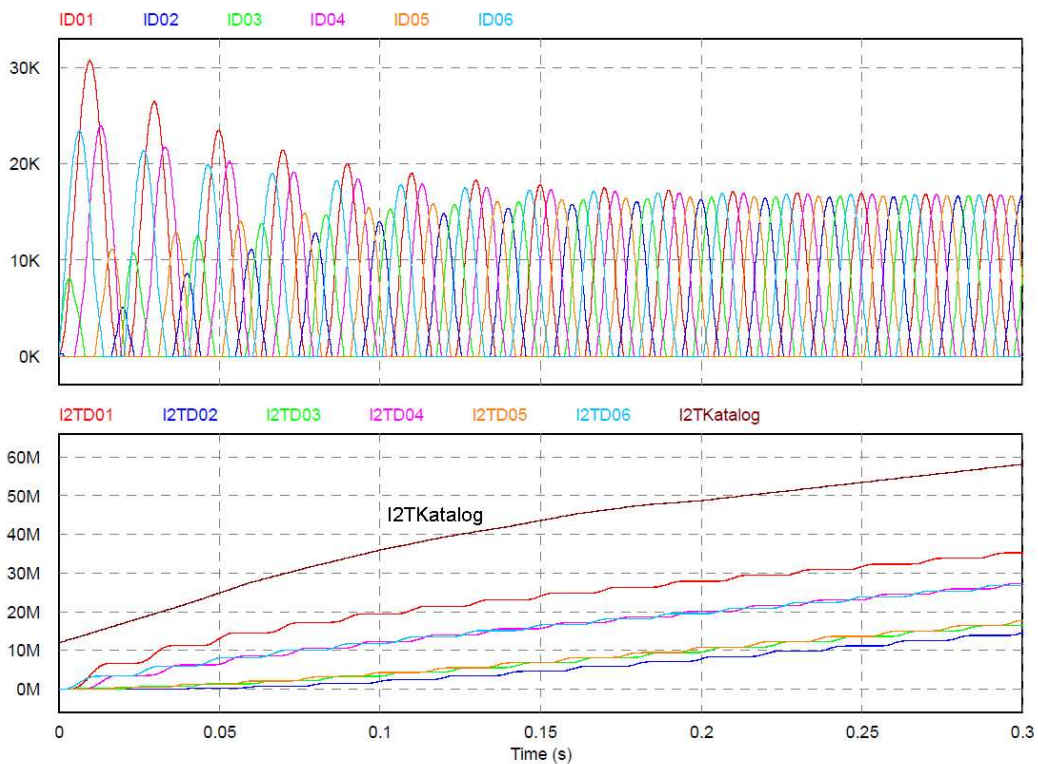
Rys. 7. Przebiegi prądów – ID11...ID16 [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – I2TD11...I2TD16 [MA^2s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 6, oraz wartości całki i^2t – I2TKatalog [MA^2s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

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 publikacji zespołu prostownikowego). Powstają one w wyniku pomyłek montażowych zaistniałych przy instalowaniu, bądź przez narzędzia pozostawione na konstrukcji przy przeglądach urządzeń, które w wyniku drgań wywołanych pracą układu spadają na umieszczone w dolnej części urządzenia szyny wyjściowe. Zwarcia tego rodzaju wywołane są również przez zwierzęta, które w okresie jesienno-zimowym przebywają na terenie podstacji, a zwłaszcza przy urządzeniach stanowiących źródło ciepła, jak obciążone prostowniki i tory prądowe. Przy projektowaniu trakcyjnych zespołów prostownikowych przyjmowane jest założenie, że winny one wytrzymać wielokrotne zwarcia na szynach wyjściowych prostownika. Rysunek 8 pokazuje schemat zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia.



Rys. 8. Zwarcie symetryczne na sznycach wyjściowych prostownika



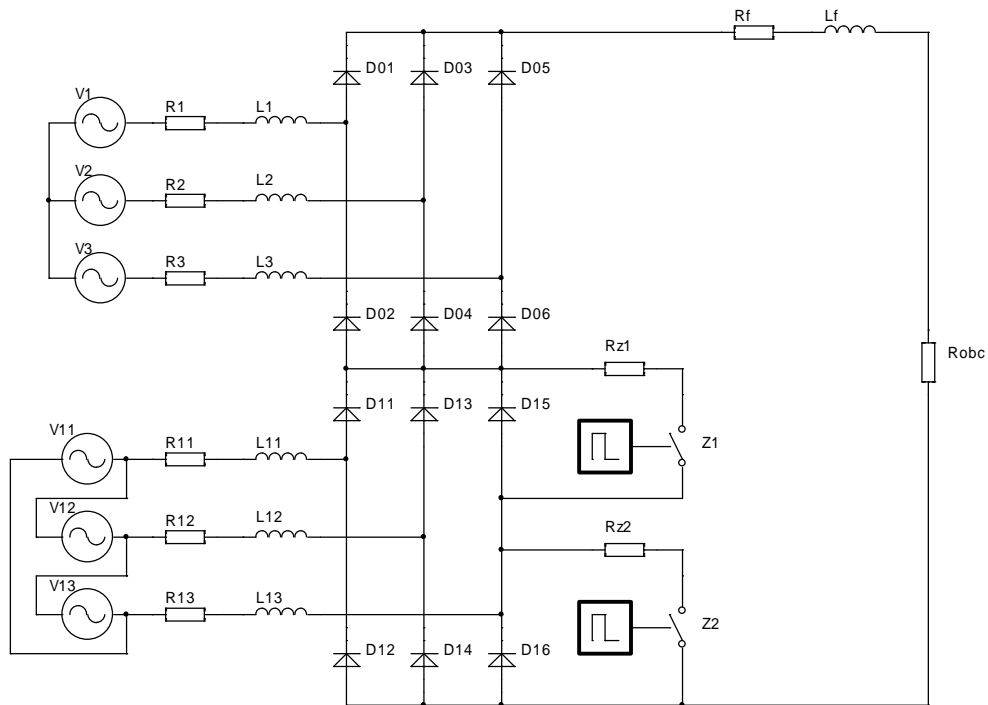
Rys. 9. Przebiegi prądów – $ID01...ID06$ [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – $I^2TD01...I^2TD06$ [MA^2s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 8, oraz wartości całki i^2t – $I^2TKatalog$ [MA^2s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

Na rysunku 9 pokazano przebieg prądu zwarcia w diodach prostownika oraz odpowiednie wartości całek i^2t . Również dla tego rodzaju zwarcia występują wyraźne rezerwy w wartościach całek i^2t diod w stosunku do odpowiednich wartości określonych na podstawie deklarowanej przeciążalności prądowej. Można wnioskować, że rezerwa taka zapewni wielokrotne wytrzymanie tego rodzaju zwarć i wieloletnią bezawaryjną pracę urządzenia.

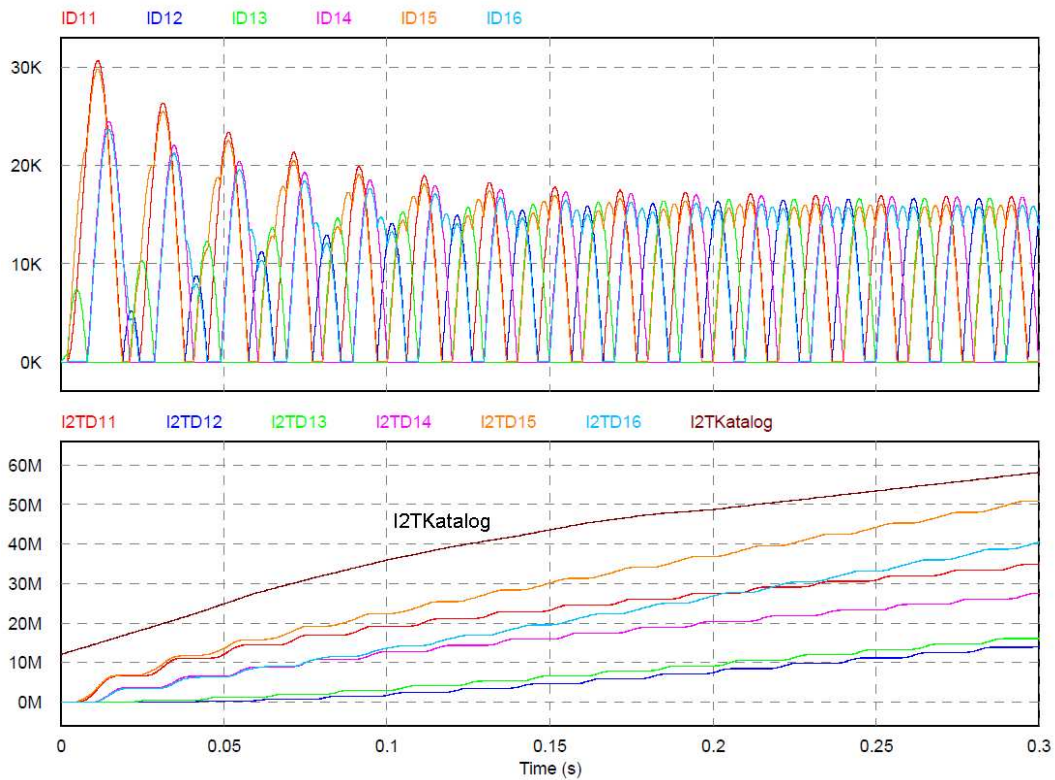
4.3. Przebicie dwóch diod (D15, D16) w ramieniu mostka połączonego z biegunem ujemnym

Awaria tego rodzaju w praktyce występuje rzadko. W prostownikach starszej generacji (z diodami łączonymi równolegle) mogła być ona wywołana przegrzaniem jednej z diod łączonych równolegle wywołanych nierównomiernym przepływem prądów i degradacją wstecznej charakterystyki napięciowo-prądowej oraz jednoczesnym uszkodzeniem drugiej diody w następstwie przepięcia od strony zasilania. Dane z praktyki eksploatacyjnej wykazują jednak, że zdecydowana większość uszkodzeń diod i tyrystorów ma charakter napięciowy. Odnosi się to zwłaszcza do prostowników nowej generacji – bez równoległego łączenia diod. Uszkodzenia wywołane są bądź przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi powstającymi w układach zasilania i odbioru przekształtnika, bądź degradacją wstecznych charakterystyk napięciowo-prądowych lub obydwoma zjawiskami równocześnie. Degradacja charakterystyk napięciowo-prądowych związana jest z długoletnią eksploatacją urządzeń, zwłaszcza w warunkach zmiennego obciążenia (jak ma to miejsce w prostownikach zasilających sieć trakcyjną). Innymi czynnikami powodującym to zjawisko są niedokładności procesu technologicznego lub montażu końcowego, które występują nawet w przyrządach renomowanych firm, a ujawniają się dopiero w trakcie eksploatacji. Na rysunku 10 pokazano schemat zespołu prostownikowego z zaznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia.

Na rysunku 11 pokazano przebiegi prądów zwarcia uszkodzonych i nieuszkodzonych diod prostownika oraz odpowiadające im wartości całek i^2t . Dla tego przypadku zwarcia także występują rezerwy w wartościach całek i^2t diod nieuszkodzonych w stosunku do odpowiednich danych obliczonych dla wartości deklarowanych. Stan awaryjny tego rodzaju nie spowoduje więc uszkodzeń innych diod prostownika.

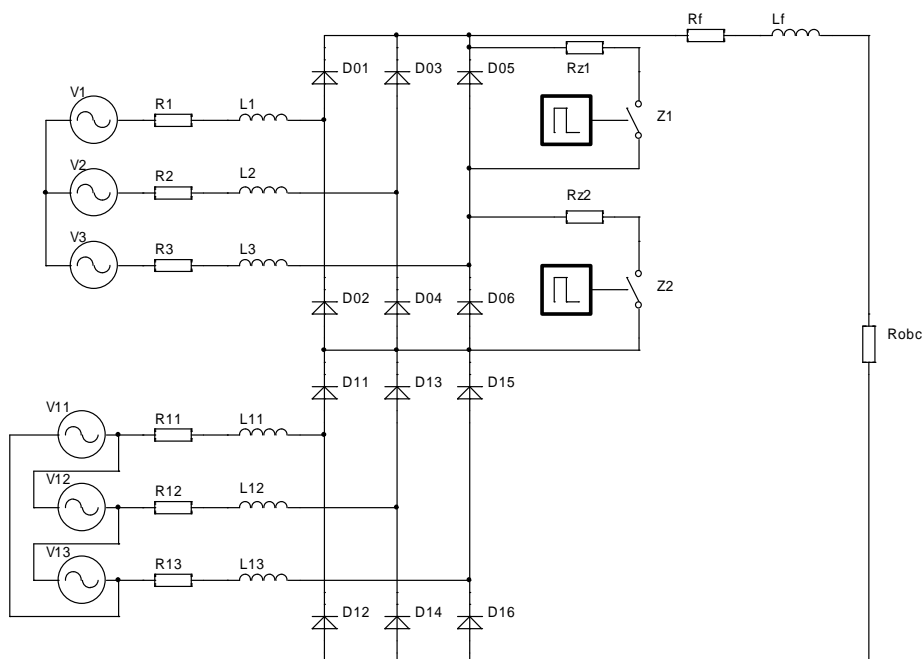


Rys. 10. Zwarcie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem ujemnym

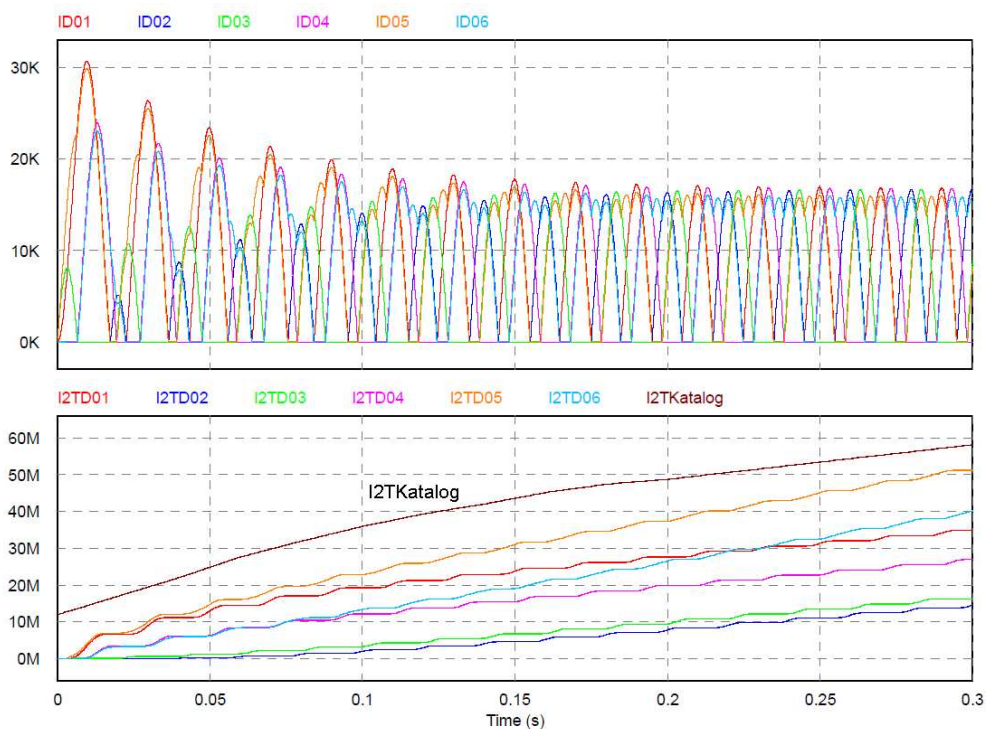


Rys. 11. Przebiegi prądów – $i_{D11} \dots i_{D16}$ [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – $I^2TD11 \dots I^2TD16$ [MA^2s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 10, oraz wartości całki i^2t – $I^2TKatalog$ [MA^2s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

4.4. Przebicie dwóch diod (D05, D06) w ramieniu mostka połączonego z biegunem dodatnim



Rys. 12. Zwarcie dwóch diod w ramieniu mostka połączonego z biegunem dodatnim

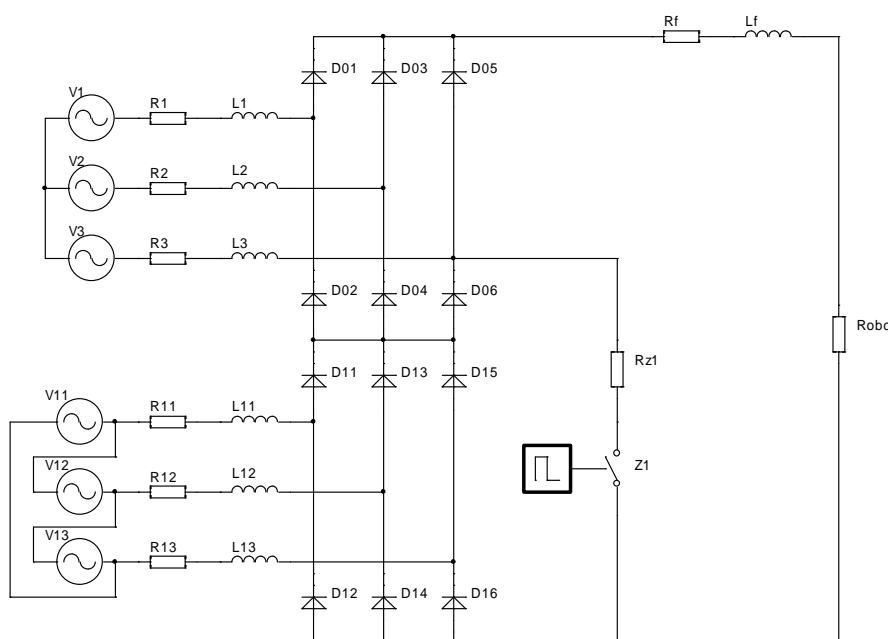


Rys. 13. Przebiegi prądów – $i_{D01} \dots i_{D06}$ [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – $I^2TD01 \dots I^2TD06$ [MA^2s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 12, oraz wartości całki i^2t – $I^2TKatalog$ [MA^2s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

Przyczyny uszkodzenia tego rodzaju rzadko występującego stanu awaryjnego są analogiczne jak to przedstawiono w podrozdziale 4.3. Schemat układu z zaznaczonym miejscem wystąpienia zwarcia pokazano na rysunku 12.

Na rysunku 13 przedstawiono przebiegi prądów zwarcia uszkodzonych i nieuszkodzonych diod prostownika oraz odpowiednie wartości całek i^2t . Dla tego stanu awaryjnego nie występuje zagrożenie uszkodzeniem innych diod układu prostownikowego.

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

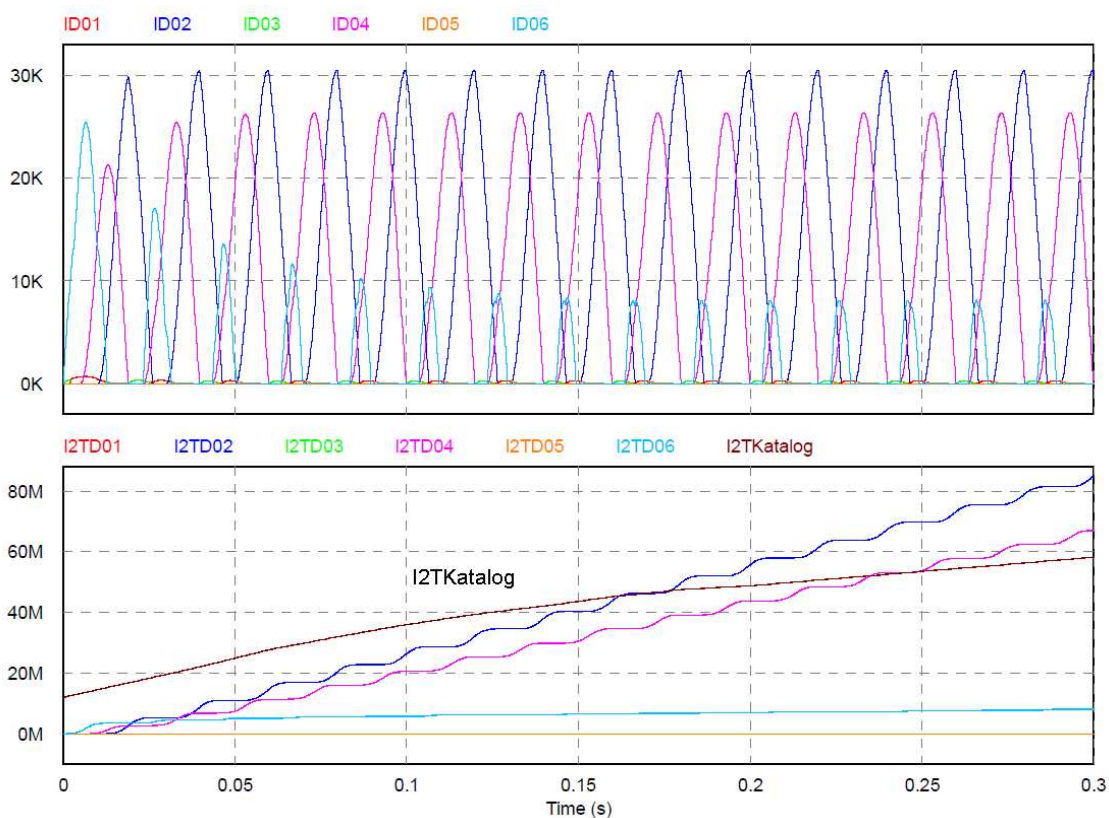


Rys. 14. Zwarcie do bieguna ujemnego fazy uzwojenia transformatora zasilającego mostek prostownikowy dołączony do bieguna dodatniego

Taki stan awaryjny może być wywołany przebiciem jednego z izolatorów, przez które wyprowadzone są końce strony wtórnej uzwojenia transformatora prostownikowego, przebiciem izolatora przewodu szynowego łączącego transformator z prostownikiem, bądź izolatora wsporczonego szyny doprowadzającej w samym prostowniku. Inną przyczyną takiego zwarcia jest przebicie ogranicznika przepięć włączonego między fazę transformatora a ziemię. Zwarcia te są wywoływane przepięciami atmosferycznymi, łączeniowymi oraz uszkodzeniami elementów izolujących podzespoły zespołu prostownikowego od bieguna ujemnego. Mogą być także spowodowane przebiciem układów ochrony przeciwprzepięciowej dołączonych do bieguna ujemnego lub ziemi.

Schemat ideowy zespołu prostownikowego zaznaczonym miejscem zwarcia doziemnego pokazano na rys. 14.

Rysunek 15 pokazuje przebiegi prądów diod mostka prostownika oraz odpowiednie wartości całek i^2t .



Rys. 15. Przebiegi prądów – ID01...ID06 [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – I2TD01...I2TD06 [MA²s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 14, oraz wartości całki i^2t – I2TKatalog [MA²s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

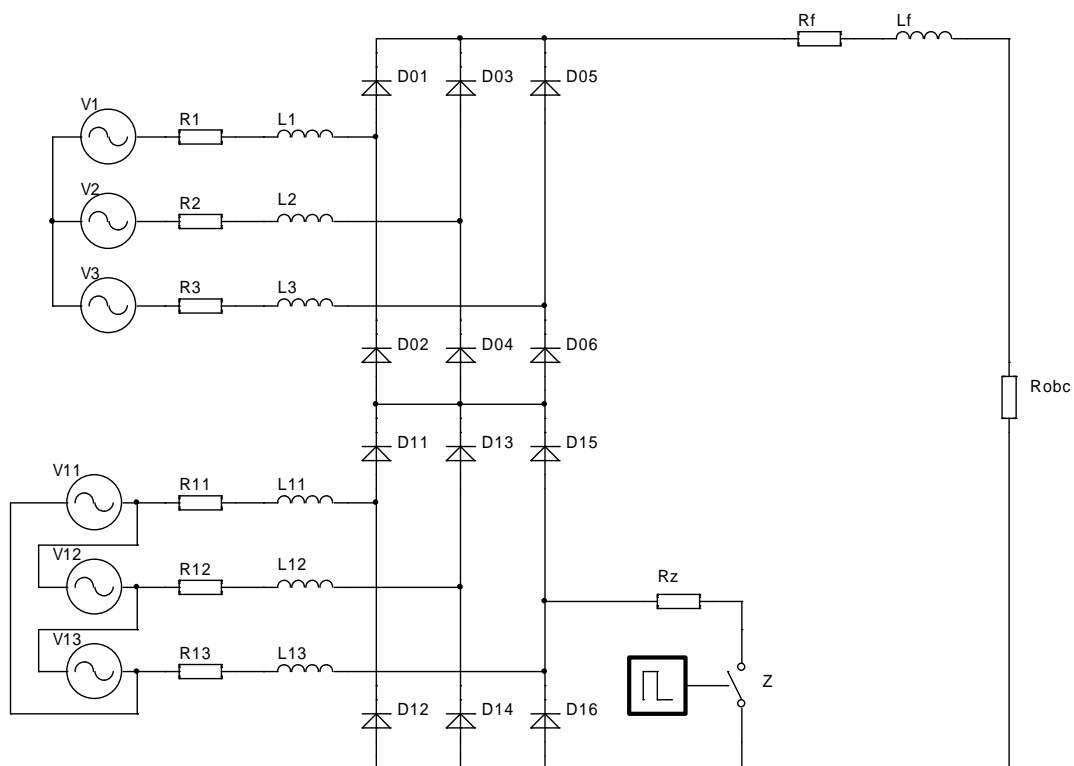
Dla tego stanu awaryjnego zagrożenie uszkodzeniem diod prostownika jest znacznie większe niż dla przypadków zwarców omówionych poprzednio. Całka i^2t diody oznaczonej jako D02 osiąga wartość równą wartości tego parametru wyznaczona na podstawie danych deklarowanych w czasie 160 ms, a po czasie 250 ms wartość tę przekracza o około 25%. Wartości całek i^2t diody D04 stają się równe deklarowanym po 230 ms.

Tak więc przy zastosowaniu nowoczesnego wyłącznika o czasie działania 100 ms nie wystąpi zagrożenie uszkodzenia diod prostownika. Zagrożenie takie pojawi się w przypadku zabezpieczenia zespołu wyłącznikiem małoolejowym, który wyłączy zwarcie po czasie około 250 ms.

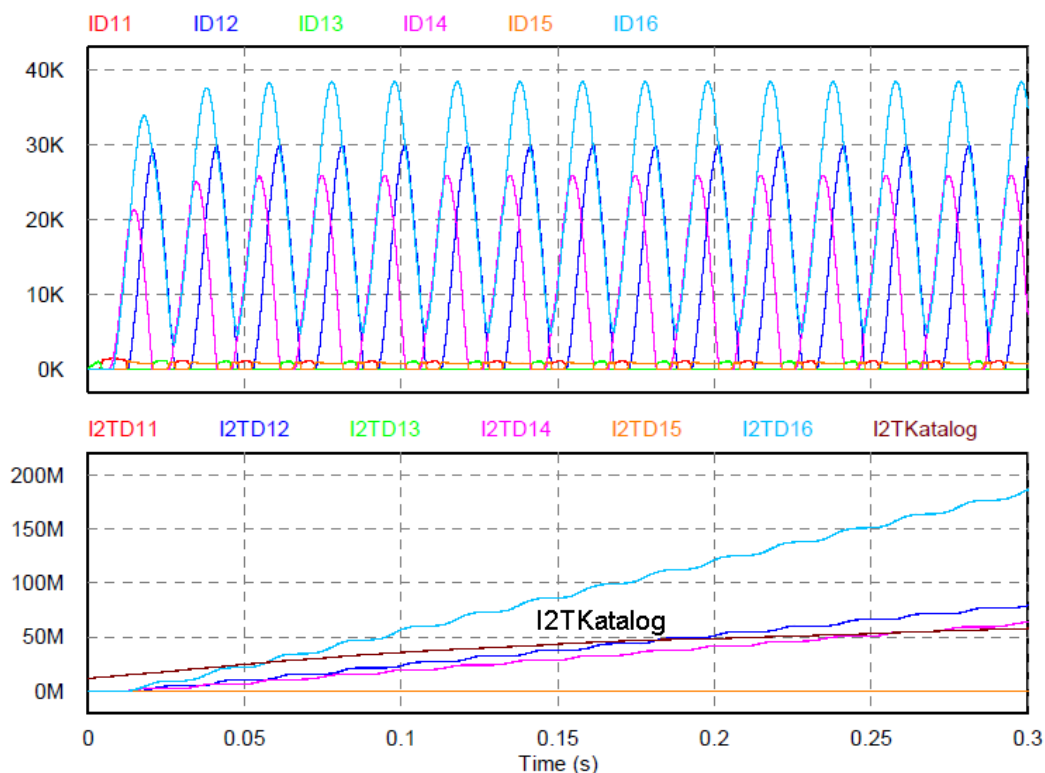
4.6. Zwarcie do szyny ujemnej (uszkodzenie diody D16) uzwojenia fazowego transformatora zasilającego mostek prostowniczy połączony z biegunem ujemnym

Zwarcie to może być wywołane przyczynami wymienionymi powyżej, jednak podstawowo jest ono spowodowane przebiciem diody dołączonej do bieguna ujemnego. Na rysunku 16 pokazano schemat układu prostownikowego z zaznaczonym miejscem zwarcia a na rysunku 17 przebiegi prądu zwarcia w diodach prostownika i odpowiednie wartości całek i^2t .

Wartości tych całek dla dwóch diod nieuszkodzonych osiągają wartości wyznaczone na podstawie danych deklarowanych – dla jednej po 180 ms, dla drugiej po 260 ms. Można więc wnioskować, że również ten stan awaryjny nie spowoduje uszkodzeń dalszych diod przekształtnika jeżeli do ochrony zespołu zastosowany zostanie nowoczesny wyłącznik o czasie działania około 100 ms.



Rys. 16. Zwarcie do szyny ujemnej (przebicie diody) uzwojenia fazowego transformatora zasilającego mostek prostownikowy z biegunem ujemnym



Rys. 17. Przebiegi prądów – ID11...ID16 [kA] w diodach prostownika i odpowiednich wartości całek i^2t – I2TD11...I2TD16 [MA²s] dla stanu zwarcia jak na rysunku 16, oraz wartości całki i^2t – I2TKatalog [MA²s] diody DB-3 na podstawie danych katalogowych deklarowanych przez producenta

5. ZAGROŻENIE EKSPLOZJĄ DIOD PROSTOWNIKA

W przypadku zwarcia wewnętrznych zespołu prostownikowego, spowodowanych uszkodzeniem diod prostownika, przez diody te płyną prądy o większych wartościach, niż przez diody nieuszkodzone. Może to doprowadzić do eksplozji tych przyrządów, jeżeli zwarcie nie zostanie wyłączone w odpowiednio krótkim czasie. Eksplozja taka w układzie dużej mocy, przy odpowiednio wysokim napięciu może doprowadzić do poważnych uszkodzeń, a nawet dewastacji urządzenia. Jest to wynikiem oddziaływania, powstającego podczas eksplozji łuku elektrycznego, który przerzuca się na inne elementy konstrukcyjne prostownika, w tym obudowę urządzenia, co może powodować zagrożenie dla obsługi. Eksplozja przyrządu wiąże się także z zanieczyszczeniem urządzenia drobinami metalu, które wyrzucane są z wnętrza uszkodzonej diody do innych elementów przekształtnika. Innym zagrożeniem

dla układu są przebiegi wywołane przerwaniem wywołanego eksplozją łuku elektrycznego. Mogą one doprowadzić do zniszczenia innych przyrządów półprzewodnikowych, kondensatorów i elementów izolacyjnych. Jak wykazują doświadczenia eksploatacyjne, narażenia wywołane eksplozją przyrządu mogą także spowodować obniżenie parametrów napięciowych wymienionych podzespołów przekształtnika, co ujawnia się dopiero po pewnym okresie pracy. Tak więc eksplozja przyrządu półprzewodnikowego o obudowie tradycyjnej – pastylkowej lub wkręcanej, doprowadza z reguły do poważnych uszkodzeń pozostałych elementów przekształtnika, a usunięcie jej skutków jest z reguły kłopotliwe i kosztowne.

W Instytucie Elektrotechniki prowadzono badania wytrzymałości eksplozyjnej przyrządów półprzewodnikowych różnych typów, w tym diod DB-3. Jako kryterium przydatne do oceniania zagrożeń eksplozją przyrządów w układach energoelektronicznych przyjęto całkę i^2t . Wartość tego parametru wyznaczonego eksperymentalnie dla wymienionych diod wynosiła $(75\div 85) \cdot \text{MA}^2\text{s}$ – dla czasów $60\div 100$ ms [16]. Do wartości tej odniesiono całki i^2t prądów diod prostownika, wyznaczone metodą symulacyjną dla różnych przypadków zwarcia rozpatrywanych powyżej. Jak wykazały analizy, jedynie w przypadku zwarcia wewnętrznego wywołanego przebiciem diody do szyny ujemnej wyznaczona wartość całki i^2t tej diody wyraźnie przekracza odpowiednią wartość powodującą eksplozję. Po czasie 100 ms całka i^2t prądu diody wynosi $60 \text{ MA}^2\text{s}$, co nie zagraża eksplozją obudowy, natomiast odpowiednie wartości dla czasów 200 i 250 ms wynoszą 120 i $150 \text{ MA}^2\text{s}$, co tworzy istotne zagrożenie eksplozją diody. Zagrożenie takie, aczkolwiek zdecydowanie mniejsze, występuje dla przypadku zwarcia do szyny ujemnej fazy uzwojenia transformatora mostka górnego, kiedy całka i^2t jednej z diod po czasie 250 ms osiąga wartość $70 \text{ MA}^2\text{s}$. Zagrożenia te są eliminowane przez zastosowanie wyłącznika szybkiego. W pozostałych przypadkach zwarcia wewnętrznych całki i^2t prądów diod uszkodzonych i nieuszkodzonych były wyraźnie mniejsze od wartości powodującej eksplozję. W podsumowaniu można wnioskować, że zastosowanie na wejściu zespołu prostownikowego nowoczesnego wyłącznika z sześciofluorkiem siarki o czasie działania ≤ 100 ms eliminuje możliwość eksplozji diody prostownika w rozpatrywanych stanach zwarciovych. Natomiast w przypadku wyłącznika małoolejowego o czasie wyłączenia $200\div 250$ ms zagrożenie takie staje się realne.

Określenie zagrożeń eksplozją obudów przyrządów energoelektronicznych napotyka na trudności, ponieważ brak jest w tym zakresie odpowiednich danych. Na podstawie wyników badań własnych [16] można wnioskować, że przekroczenie wartości całki i^2t w stosunku do wartości tego parametru, uzyskanej na podstawie deklarowanej przeciążalności prądowej o około 50%, zagraża eksplozją przyrządu. Dane te odnoszą się do diod i tyrystorów

o prądzie > 1000 A. W odniesieniu do przyrządów o małej obciążalności prądowej relacja ta jest zdecydowanie korzystniejsza [15].

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodę doboru diod prostownika do warunków zwarciovych na przykładzie zespołu prostownikowego przeznaczonego do zasilania kolejowej sieci trakcyjnej o napięciu 3,3 kV. Analizę prowadzono w oparciu o kryterium całki i^2t wyznaczonej dla określonego metodą symulacyjną spodziewanego prądu zwarcia występującego w diodach prostownika. Całkę tę porównywano z odpowiednią wartością obliczoną na podstawie deklarowanej przez wytwórcę przeciążalności prądowej tych przyrządów. W wyniku wykonanych obliczeń można wnioskować, że w przypadku wystąpienia zwarc zewnątrznych oraz wewnątrznych – wywołanych uszkodzeniem przyrządów półprzewodnikowych oraz elementów izolacyjnych zespołu, nieuszkodzone diody prostownika są chronione przed uszkodzeniem, kiedy zespół zabezpieczony jest przed skutkami zwarc wyłącznikiem prądu przemiennego o czasie działania ≤ 100 ms. Zabezpieczenie zespołu tradycyjnym wyłącznikiem małoolejowym o czasie działania 200÷250 ms powoduje zagrożenie uszkodzeniem innych diod prostownika w przypadku wybranych zwarc wewnątrznych zespołu. Zabezpieczenie zespołu wymienionym wyżej wyłącznikiem o krótkim czasie działania eliminuje także zagrożenie eksplozją diod uszkodzonych w przypadku wystąpienia zwarc wewnątrznych zespołu prostownikowego wywołanych przebicciem tych przyrządów. Przy zastosowaniu wyłącznika małoolejowego zagrożenia eksplozją diod uszkodzonych stają się realne.

Przedstawiona metoda analizy stanów zwarciovych występujących w zespołach prostownikowych dużej mocy, może być stosowana do odpowiednich analiz różnego rodzaju układów przekształtnikowych, w tym także tranzystorowych. W publikacji [15] z lat ubiegłych omówiono sposób określania zagrożeń uszkodzeniem przyrządów energoelektronicznych w stanach zwarciovych oparty na śledzeniu temperatury struktury półprzewodnikowej. Sposób ten jest stosunkowo złożony, wymaga określenia strat mocy generowanych w przyrządzie w danym stanie awaryjnym oraz umiejętności stosowania danych dotyczących parametrów modelu cieplnego przyrządu półprzewodnikowego. W celu określenia zagrożeń eksplozją obudowy wykorzystywano sposób oparty na wyznaczaniu całki i^2t dla przyrządu w określonym stanie awaryjnym. W niniejszej pracy zaproponowano stosowanie tej metody zarówno dla określenia zagrożeń uszkodzeniem przyrządu energoelektronicznego, jak i eksplozją

obudowy. Jest to szczególnie istotne ze względów praktycznych. Pozwala na zdefiniowanie obydwóch wymienionych zagrożeń w jednym cyklu obliczeniowym, poza tym analizy są w tym przypadku niezbyt skomplikowane w realizacji, a więc bardziej dostępne dla projektantów układów energoelektronicznych.

Należy podkreślić, że określanie zagrożeń zwarciovych układów energoelektronicznych jest szczególnie istotne w przypadku urządzeń dużej mocy rzędu megawatów, gdzie koszt usunięcia awarii oraz wywołanego nią przestoju może być bardzo wysoki. Jednak nawet w przekształtnikach o mocy rzędu 100 kW koszty te mogą być znaczne. Przykładowo cena jednego modułu tranzystorowo-diodowego o napięciu 6,5 kV i prądzie 400 A wynosi około 10000 PLN, przy czym najczęściej uszkodzeniu ulegają dwa takie przyrządy.

LITERATURA

1. Kahl T.: Sieci elektroenergetyczne, NNT, Warszawa, 1981.
2. Januszewski S., Stańczak W., Świątek H., Zymmer K.: The peak case nonrupture current of high power semiconductor devices, Proc. of the International Conference Power Electronics and Motion Control EPE-PEMC'94, Warszawa, wrzesień 1994.
3. Shen Z.J. i in.: Current sensing characteristics of IGBT's under short circuit conditions, Proc. of International Conference European Power Electronics and Applications EPE'95, Sevilla, wrzesień 1995.
4. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Consequences of internal short-circuits in very high power converters, Proc. of the International Symposium on Industrial Electronics ISIE'96, vol. 1, pp. 519-524, Warszawa, czerwiec 1996.
5. Ramminger S. et al.: Crack mechanism in wire bonding joints, Microelectronics Reliability, vol. 38, pp. 1301-1305, 1998.
6. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Zagrożenia eksplozją przyrządów energoelektronicznych podczas zwarc przekszałtników dużej mocy, Konferencja: Bezpieczne Urządzenia Energoelektroniczne SPES'98, Warszawa, 24-27 listopada 1998.
7. Gekenidis S. et al.: Explosion tests in IGBT high voltage modules, Proc. of International Conference ISPSD'99, Toronto, maj 1999.
8. Zymmer K., Sakowicz S.: Analiza stanów zwarciovych w półprzewodnikowych przyrządach mocy, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 204, s. 13-44, 2000.
9. Zymmer K., Sakowicz S., Januszewski S.: High power semiconductor device thermal stresses during short-circuit states, Proc. of the European Conference on Power Electronic and Motion Control, EPE-PEMC, Koszyce, wrzesień 2000.
10. Zymmer K. i wykonawcy: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN pt. "Zjawiska zwarciove w przekształtnikach dużej mocy w aspekcie koordynacji zabezpieczeń przeciążeniowych przyrządów energoelektronicznych", nr 8T 10A 029 17, Warszawa, listopad 2001.

11. Zymmer K., Sakowicz S.: Badania wytrzymałości eksplozyjnej obudów przyrządów energoelektronicznych i zagrożenia występujące w układach przekształtnikowych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 209, 2001.
12. Zymmer K., Sakowicz S., Januszewski S.: Short-circuit in high power supply systems of 3 kV DC traction lines, Proc. of the 10th International Symposium on Short Circuits in Power Systems, Łódź, październik 2002.
13. Zymmer K., Sakowicz S.: Projektowanie przekształtników dużej mocy w aspekcie doboru przyrządów energoelektronicznych do warunków zwarciovych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 210, 2002.
14. Materiały firmowe producentów przyrządów energoelektronicznych: Lamina, Siemens, Eupec, Semikron, ABB, International Rectifier, Westcode, Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, Fuji.
15. Zymmer K.: Zagrożenia zwarciovie i przetężeniowe półprzewodnikowych przyrządów energoelektronicznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 219, 2004.
16. Świątek H., Mazurek P., Zymmer K., Babiuch M.: Badania przeciążalności prądowej, Dokumentacja Instytutu Elektrotechniki Nr 21/NPM/2009, Warszawa, 2009.

Rękopis dostarczono dnia 17.05.2012 r.

ANALYSIS OF SHORT CIRCUIT CONDITIONS IN HIGH POWER DEVICES

Krzysztof ZYMMER
Ireneusz MAŚCIBRODZKI

ABSTRACT *Method of protection against failure or explosion hazard of semiconductor power devices, which can occur in high power converters, is discussed. This method base on a comparing of the permissible over current declared by manufactures, with the short-circuit current that can appear in case of failure. Different case of failure was analyzed and new criterion for protection of the semiconductor power devices is proposed. Taking the declared current, and the calculated integral i^2t as function of time, of the short circuit current, one is able to select circuit breaker operating time that should be applied in substation. This criterion assumed was verified with gut accuracy during experimental investigation in high current conditions. Tests were made at traction DC current unit of 3,3 kV and 1700 A.*

Keywords: *High Power converters, short circuit conditions, semiconductor power devices*

