

Trójfazowy dwupoziomowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania

Streszczenie. Łagodne przełączanie tranzystorów w falownikach napięcia wymaga najczęściej stosowania kondensatorów i dławików indukcyjnych. W proponowanym układzie łagodnego przełączania, w odróżnieniu od istniejących rozwiązań, nie występuje niebezpieczeństwo udarowego rozładowania kondensatora przez tranzystor główny falownika oraz nie ma ryzyka przerwania prądu dławika, co grozi uszkodzeniem tranzystorów. Przedstawiono zasady pracy układu, wytyczne doboru elementów oraz wyniki badań laboratoryjnych.

Abstract. Soft switching systems in voltage source inverters usually require the use of additional transistors, capacitors and induction chokes. Contrary to existing solutions, in the proposed system there is no danger of abrupt discharge of the capacitors through the conductive transistor. Moreover, there is no risk of interruption of the induction choke current which usually causes damage of transistors. The principles of the system operation, rules of components selection, and laboratory test results are presented in this paper (**Three-phase two-level voltage source inverter with a transistor soft switching system resistant to control disruptions**).

Słowa kluczowe: falownik napięcia, łagodne przełączanie tranzystorów, straty przełączania.

Keywords: voltage source inverter, soft switching of transistors, switching losses.

Straty przełączania tranzystorów

Straty mocy powstające w tranzystorach falowników napięcia są sumą strat przewodzenia i strat przełączania. Na pierwszy rodzaj strat użytkownicy falowników nie mają wpływu, gdyż straty te zależą od wartości prądu tranzystora i napięcia między kolektorem a emiterem w czasie jego przewodzenia. Napięcie to zawiera się przeważnie w przedziale od 1,5 V do 2,5 V. Ograniczenie strat przewodzenia możliwe jest przez zmiany technologiczno-konstrukcyjne elementów półprzewodnikowych, prowadzące do zmniejszenia napięcia przewodzenia tych elementów. Straty przewodzenia tranzystora są wyznaczone według ogólnego wzoru:

$$(1) \quad P_{con} = \frac{I}{T_p} \int_0^{t_{con}} i_C(t) u_{CEsat}(t) dt$$

gdzie: T_p – okres przełączania, i_C – prąd kolektora, u_{CEsat} – napięcie między kolektorem a emiterem w czasie przewodzenia, t_{con} – czas przewodzenia tranzystora.

Straty przełączania powstają w procesie załączania i wyłączania tranzystora. Przyczyną tych strat jest jednoczesna zmiany prądu i napięcia tranzystora w czasie trwania procesu przełączania. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczone, poglądowe przebiegi prądu i napięcia tranzystora podczas jego załączania i wyłączania [1-3]. W czasie obu tych procesów powstają straty, których moc zależy nie tylko od prądu tranzystora i napięcia występującego na nim w czasie nieprzewodzenia ale także od czasów przełączeń oraz częstotliwości pracy. Straty te można oszacować na podstawie zależności:

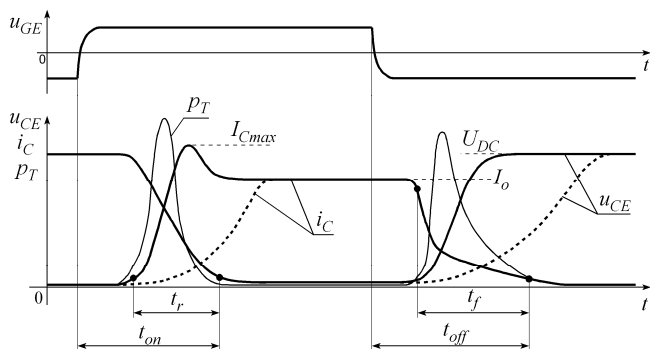
$$(2) \quad P_{sw} = \frac{I}{T_p} \left(\int_0^{t_{onr}} i_{Cr}(t) u_{CEr}(t) dt + \int_0^{t_f} i_{Cf}(t) u_{CEf}(t) dt \right)$$

gdzie: i_{Cr} , i_{Cf} , u_{CEr} , u_{CEf} – prąd i napięcie tranzystora odpowiednio w procesie załączania i wyłączania, t_{onr} – przedział czasu od chwili gdy prąd kolektora osiągnie 10 % wartości maksymalnej do chwili, w której napięcie kolektor emiter zmniejszy się do 10 % wartości napięcia zasilania w procesie załączania, t_f – czas zmniejszania się prądu w procesie wyłączania.

Udział strat przełączania w całkowitych stratach mocy występujących w tranzystorze rośnie wraz ze wzrostem

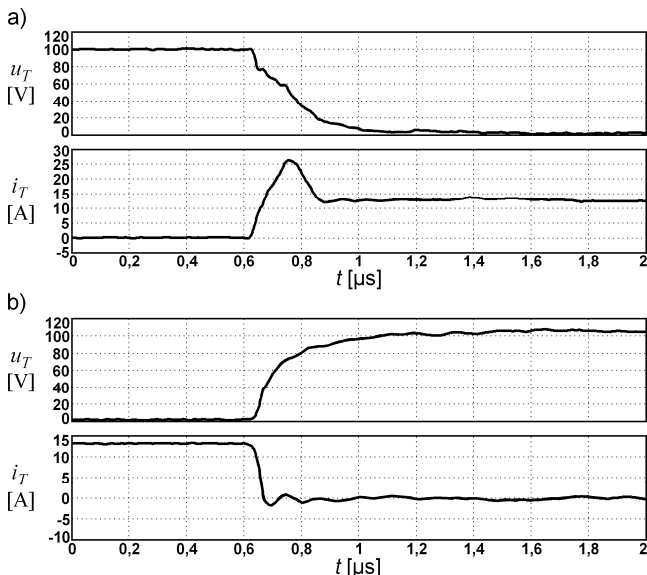
częstotliwości. Zagadnienie to dotyczy zwłaszcza falowników napięcia pracujących z modulacją szerokości impulsów. Już przy częstotliwościach kilku kiloherców straty przełączania mogą być większe od strat przewodzenia. Wzrost strat prowadzi nie tylko do zmniejszenia sprawności falowników, ale przede wszystkim powoduje problemy z odpowiednim chłodzeniem tranzystorów. Wyznaczając straty przełączania w falowniku należy także uwzględnić straty występujące podczas wyłączania diod zwrotnych falownika. Wielkość tych strat jest jednak znacznie mniejsza od strat przełączania tranzystorów.

W odróżnieniu od strat przewodzenia straty przełączania mogą być znacznie ograniczone przez stosowanie układów łagodnego przełączania tranzystorów, nazywanych również układami wspomaganymi przełączania. Istota łagodnego przełączania polega na takim kształtowaniu załączania i wyłączania tranzystorów, aby procesy te przebiegały przy prądzie lub napięciu tranzystora bliskim zeru. W pierwszym przypadku proces przełączania określa się jako załączanie lub wyłączanie przy zerowym prądzie, w drugim przypadku jako proces przełączania przy zerowym napięciu. Uproszczone przebiegi prądu i napięcia w czasie łagodnego przełączania przedstawiono na rysunku 1 za pomocą linii przerywanej. Ograniczenie strat przełączania zależy od wartości prądu w chwili zakończenia procesu załączania tranzystora oraz od wartości napięcia tranzystora w momencie zakończenia procesu jego wyłączania.



Rys.1. Uproszczone przebiegi prądu tranzystora i_C , napięcia tranzystora u_{CE} oraz strat mocy p_T w procesie załączania i wyłączania tranzystora; u_{GE} przedstawia zmiany napięcia bramka-emiter; linie przerywane – zmiany prądu i napięcia podczas łagodnego przełączania

Na rysunku 2 zamieszczono przekładowe przebiegi prądu i napięcia jednego z tranzystorów typu IRG4PH50KD (1200 V, 24 A) trójfazowego, laboratoryjnego falownika napięcia podczas tzw. twardego przełączania. Prąd tranzystora po jego załączeniu wynosił 12 A, a napięcie po zakończeniu procesu wyłączenia było równe 100 V; czasy t_{onr} i t_f tego tranzystora wynoszą odpowiednio 390 ns i 72 ns. Straty przełączania tranzystora w jednym cyklu pracy przy częstotliwości 3 kHz wynosiły około 1,17 W przy podanych wartościach prądu i napięcia.



Rys.2. Zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia tranzystora trójfazowego falownika napięcia podczas: a) załączania, b) wyłączenia

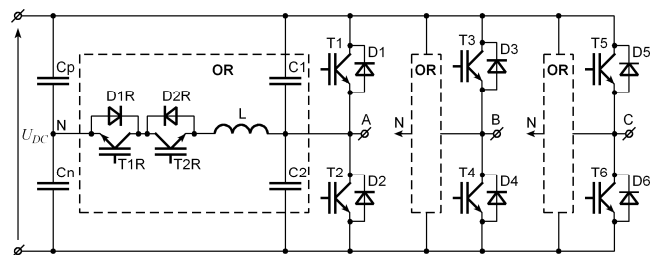
Problem ograniczenia strat przełączania dotyczy również innych elementów sterowanych a zwłaszcza tyrystorów GTO stosowanych w falownikach napięcia dużej mocy oraz w mniejszym stopniu tyrystorów SCR ze względu na ich ograniczoną częstotliwość pracy.

Łagodne przełączanie tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia

Układy łagodnego przełączania stosowane w trójfazowych, dwupoziomowych falownikach napięcia można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmuje przypadki, w których falownik zawiera jeden układ łagodnego przełączania dla wszystkich tranzystorów falownika [4-16]. Mankamentem tych układów jest możliwość łagodnego przełączania tranzystorów w stosunkowo wąskim zakresie zmian częstotliwości. Tego typu układy łagodnego przełączania tranzystorów znajdują zastosowanie m. in. w prostownikach pracujących z modulacją szerokości impulsów dołączonych do sieci napięcia przemiennego o stałej częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz [17, 18].

Druga grupa obejmuje układy, które wspomagają przełączanie tranzystorów indywidualnie w poszczególnych fazach. Te układy mogą być stosowane przy stosunkowo dużej częstotliwości przełączania tranzystorów, szczególnie przy pracy falowników z modulacją szerokości impulsów. W najczęściej stosowanych układach indywidualnego, łagodnego przełączania tranzystorów w każdej fazie falownika stosowane są dodatkowo dwa tranzystory pomocnicze, jeden lub kilka dławików indukcyjnych oraz dwa kondensatory, najczęściej równolegle dołączone do poszczególnych tranzystorów głównych w danej fazie falownika napięcia [19-26]. W niektórych rozwiązaniach

łagodnego przełączania tranzystorów stosowane są obwody z transformatorami sprzęgającymi obwody główne z obwodami wspomagającymi przełączanie tranzystorów [24, 27-29]. Przykładowy układ trójfazowego falownika napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów indywidualnie w każdej fazie [10, 19, 22, 24]

Zasadniczymi wadami dotychczas stosowanych układów łagodnego przełączania tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia jest niebezpieczeństwo załączenia tranzystorów głównych przy nierozładowanych kondensatorach lub niebezpieczeństwo wyłączenia tranzystorów pomocniczych przy różnym od zera prądzie dławika szeregowo połączonym z tranzystorem pomocniczym. Może to być spowodowane błędnym sterowaniem lub wystąpieniem zakłóceń. W pierwszym przypadku załączenie tranzystora przy nierozładowanym kondensatorze równoległe do niego dołączonym powoduje przepływ przez tranzystor udarowego prądu rozładowania kondensatora, co najczęściej prowadzi do uszkodzenia tranzystora na skutek przepływu zbyt dużego prądu. W drugim przypadku wyłączenie tranzystora pomocniczego przy niezerowym prądzie dławika indukcyjnego prowadzi do powstania przepięcia, które prowadzi do uszkodzenia tranzystora na skutek wystąpienia na nim zbyt dużego napięcia. Należy tu zaznaczyć, że w niektórych rozwiązaniach łagodnego przełączania zakłada się wykorzystanie pasywności pojemności wyjściowej tranzystora, jednakże propozycje te dotyczą łagodnego przełączania w układach małej mocy, zbudowanych przede wszystkim na bazie tranzystorów MOSFET. W falownikach średniej i dużej mocy nie jest to możliwe ze względu na małe wartości tych pojemności wynoszące około 1-2 nF.

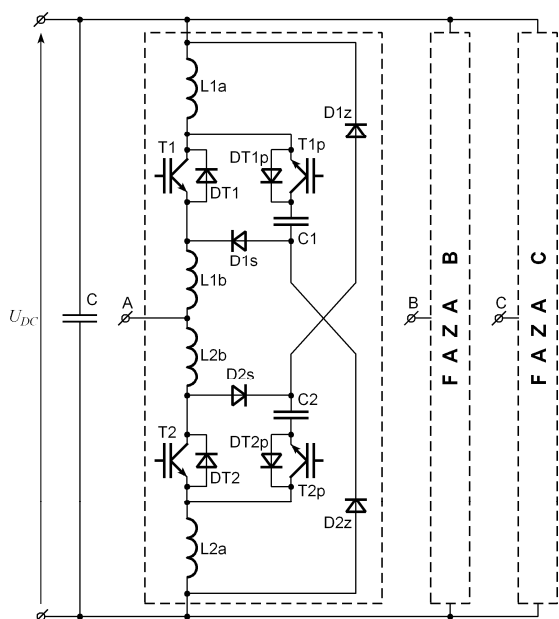
Mankamentem dotychczasowych układów łagodnego przełączania w trójfazowych falownikach napięcia jest również dość złożone sterowanie tranzystorów. Najczęściej przed załączeniem jednego z dwóch tranzystorów głównych danej fazy musi być ze ściśle określonym wyprzedzeniem załączony odpowiedni tranzystor pomocniczy, co rozpoczyna proces rezonansowego rozładowania kondensatora dołączonego równoległe do tranzystora głównego. Prowadzi to do znacznej komplikacji algorytmu przełączania tranzystorów zwłaszcza przy pracy falownika z modulacją szerokości impulsów.

Układ łagodnego przełączania w trójfazowym falowniku napięcia odporny na zakłócenia sterowania

Wady dotychczasowych układów łagodnego przełączania wymienione w poprzednim rozdziale nie występują w układzie łagodnego przełączania przedstawionym na rysunku 4, na którym zamieszczono schemat połączeń jednej fazy trójfazowego, dwupoziomowego falownika napięcia [30]. Na każdy z tranzystorów głównych falownika przypada jeden układ wspomagający przełączanie, wyposażony w jeden tranzystor pomocniczy oraz elementy magazynujące

energiją tj. kondensator i dwa dławiki indukcyjne. W układach łagodnego przełączania zarówno tranzystory główne jak i tranzystory pomocnicze powinny być załączane i wyłączane przy ich prądzie lub napięciu bliskim zeru.

Kolektor górnego tranzystora głównego T1 połączony jest za pośrednictwem dławika L1a z dodatnim zaciskiem źródła zasilania, które składa się z rzeczywistego źródła napięcia stałego i równoległe dołączonego kondensatora, a emiter tego tranzystora połączony jest przez dławik L1b z zaciskiem wyjściowym falownika (faza A). Z kolei kolektor dolnego tranzystora głównego T2 połączony jest z zaciskiem wyjściowym falownika za pośrednictwem dławika L2b o tej samej indukcyjności jak dławik L1b. Emiter tranzystora T2 jest połączony z ujemnym zaciskiem źródła zasilania za pośrednictwem dławika L2a o tej samej indukcyjności jak dławik L1a. Z każdym tranzystorem pomocniczym (T1p, T2p) połączony jest szeregowo kondensator (C1, C2).



Rys.4. Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania

Istotną cechą topologii proponowanego układu łagodnego przełączania jest brak bezpośredniego szeregowego połączenia tranzystorów z dławikami indukcyjnymi oraz bezpośredniego równoległego połączenia tranzystorów z kondensatorami. Pozwala to uniknąć ryzyka nagłego przerwania prądu dławika lub zwarcia naładowanego kondensatora w przypadku wystąpienia zakłóceń w układzie sterowania i tym samym uszkodzenia tranzystora. Dołączenie kondensatorów C1, C2 do tranzystorów głównych T1, T2 za pośrednictwem diod zwrotnych tranzystorów pomocniczych T1p, T2p oraz diod D1s, D2s ma na celu ograniczenie szybkości narastania napięcia na tranzystorach głównych w czasie procesu ich wyłączania. Podstawową rolę dławików L1a i L2a jest ograniczenie szybkości narastania prądów tranzystorów głównych podczas procesu załączania. Te dławiki oraz dławiki L1b i L2b nie pozwalają na udarowe rozładowanie kondensatora przez źródło zasilania.

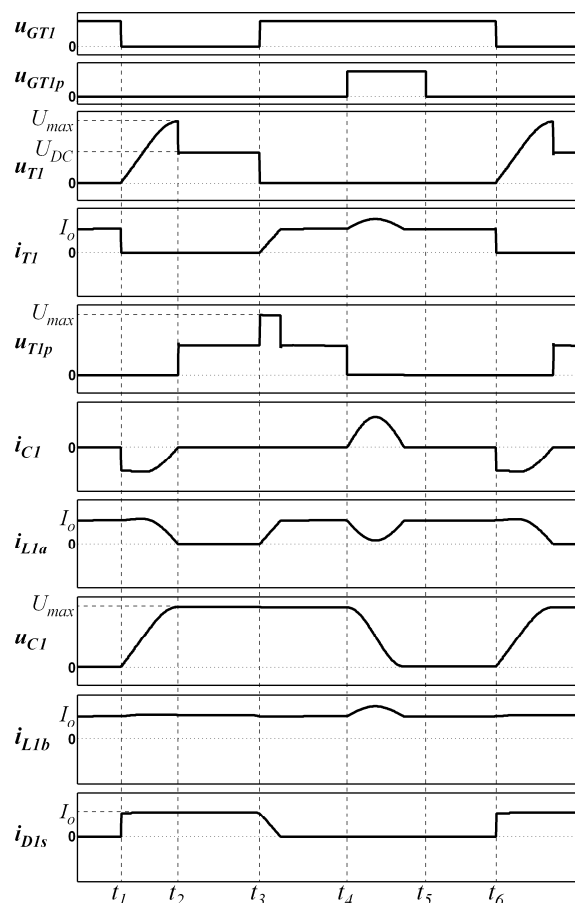
Opis działania układu łagodnego przełączania tranzystorów

Tranzystory pomocnicze są załączane z niewielkim opóźnieniem względem chwil załączania odpowiednich tranzystorów głównych, zależnym od czasu narastania prądu tranzystorów głównych do wartości prądu odbiornika.

Z kolei ich wyłączenie następuje po zakończeniu procesów rozładowania rezonansowego kondensatorów, lecz nie później niż wyłączenie odpowiadających im tranzystorów głównych. Wyłączenie tranzystorów pomocniczych może zatem następować równocześnie z wyłączeniem odpowiednich tranzystorów głównych. Dla uproszczenia opisu działania założono, że w jednym cyklu przełączania tranzystorów wartość chwilowa prądu fazy odbiornika nie ulega znaczącym zmianom. Zatem można przyjąć, że prąd wpływający do fazy odbiornika ma wartość stałą w jednym cyklu przełączania tranzystorów. Jako stan wyjściowy do analizy pracy układu łagodnego przełączania przyjęto:

- tranzystor T1 jest w stanie przewodzenia, pozostałe tranzystory są w stanie nieprzewodzenia,
- kondensator C1 jest rozładowany, natomiast kondensator C2 jest naładowany do napięcia źródła zasilania,
- prąd płynie od dodatniego zacisku źródła zasilania przez dławik L1a, tranzystor główny T1, dławik L1b, fazę A odbiornika.

Poglądowe przebiegi ilustrujące działanie układu łagodnego przełączania tranzystorów jednej fazy falownika napięcia przedstawione są na rysunku 5, na którym zamieszczono sygnały sterujące tranzystora głównego T1 i tranzystora pomocniczego T1p, przebiegi napięcia i prądu tranzystora głównego T1, napięcia tranzystora pomocniczego T1p, prądu i napięcia kondensatora C1, prądy dławików L1a i L1b oraz prąd diody D1s.



Rys.5. Poglądowe przebiegi prądów i napięć w układzie łagodnego przełączania: u_{GT1} , u_{GT1p} – sygnały sterujące pracą odpowiednio tranzystora głównego T1 i tranzystora pomocniczego T1p, i_{TI} , u_{TI} – prąd i napięcie tranzystora głównego T1, u_{TIp} – napięcia tranzystora pomocniczego T1p, i_{C1} , u_{C1} – prąd i napięcia kondensatora C1, i_{L1a} , i_{L1b} – prądy dławików L1a i L1b, i_{D1s} – prąd diody D1s

W chwili t_1 następuje wyłączenie tranzystora głównego T1, którego prąd maleje skokowo do zera. Kondensator C1 ładuje się rezonansowo do napięcia wyższego od napięcia źródła zasilania U_{DC} , a prąd tego kondensatora płynie przez: L1a, DT1p, C1, D1s, L1b i fazę A odbiornika. Prąd dławika L1a i kondensatora C1 maleje do zera, natomiast napięcie kondensatora C1 i napięcie tranzystora T1 narasta i osiąga wartość maksymalną w chwili t_2 . Prąd fazy A odbiornika płynie od ujemnego zacisku źródła zasilania częściowo przez D2z, D1s, L1b a częściowo przez L2a, DT2 i L2b. W tym przypadku rozptyw prądów zależy od indukcyjności wymienionych dławików, ich rezystancji oraz od spadków napięć na diodach w czasie ich przewodzenia. Napięcie na tranzystorze głównym T1 ustala się na poziomie napięcia źródła zasilania U_{DC} . Ponieważ napięcie na tranzystorze głównym T1 podczas wyłączenia jest bliskie zeru z uwagi na ładowanie kondensatora C1, to tranzystor T1 jest wyłączany łagodnie przy napięciu bliskim zeru.

W przedziale t_2, t_3 tranzystor T1 nie przewodzi, napięcia na poszczególnych elementach nie zmieniają swojej wartości w tym przedziale pracy falownika.

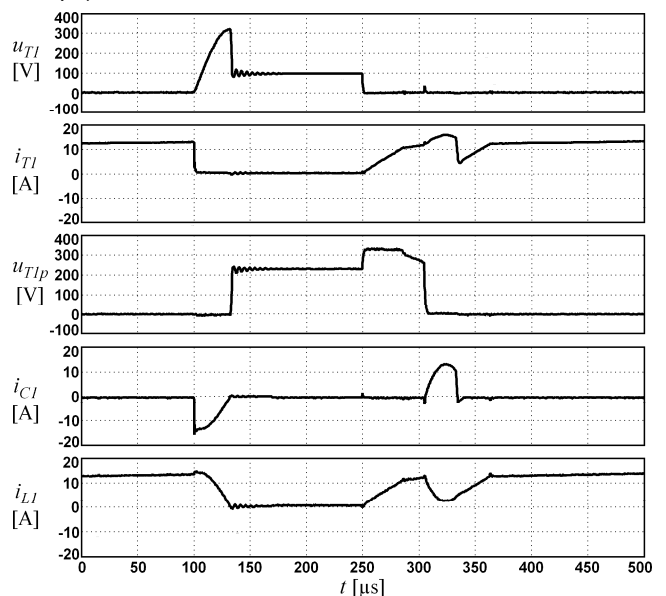
W chwili t_3 następuje załączenie tranzystora głównego T1. Prąd dławika L1a i tranzystora T1 zaczyna narastać łagodnie do wartości prądu odbiornika. Natomiast prąd płynący przez diody D1s i D2z oraz prąd płynący przez L2a, DT2 i L2b zaczynają maleć łagodnie do zera. Ponieważ załączenie tranzystora głównego T1 następuje przy prądzie bliskim zeru ze względu na charakter narastania prądu w dławiku L1a, to tranzystor główny T1 jest załączany łagodnie. Gdy prąd dławika L1a osiągnie wartość prądu odbiornika, to prąd płynący przez diody D1s i D2z oraz prąd płynący przez L2a, DT2 i L2b osiągną wartość równą zeru. W chwili t_4 załączany jest tranzystor pomocniczy T1p i rozpoczyna się proces rezonansowego rozładowania kondensatora C1 w obwodzie C1, T1p, L1a, źródło zasilania, D2z. Prąd dławika L1a zmniejsza się, co świadczy o zmniejszeniu się energii pobieranej ze źródła zasilania przez odbiornik. Tranzystor pomocniczy T1p zostaje wyłączony w chwili t_5 po zakończeniu procesu rozładowania rezonansowego kondensatora C1, jednak nie później niż wyłączenie tranzystora głównego T1. W chwili t_6 następuje ponowne wyłączenie tranzystora głównego T1 i rozpoczyna się następny cykl pracy układu. Ze względu na rezonansowy charakter prądu kondensatora C1 tranzystor pomocniczy T1p jest załączany i wyłączany przy prądzie równym zeru, a więc przełączanie tego tranzystora jest także ładne. Dla poprawnie dobranych kondensatorów i dławików, kondensator rozładuje się do napięcia równego zeru. W czasie rozładowania kondensatora zmniejszeniu ulega prąd dławika L1a, co oznacza że ze źródła zasilania pobierana jest mniejsza ilość energii. Od chwili t_5 tranzystor pomocniczy T1p jest w stanie nieprzewodzenia, natomiast tranzystor główny T1 nadal przewodzi. Prąd płynie od dodatniego zacisku źródła zasilania przez L1a, T1, L1b do fazy A odbiornika. Kondensator C1 pozostaje rozładowany; stan ten trwa do chwili ponownego wyłączenia tranzystora T1.

Dla przeciwnego kierunku prądu odbiornika drugi tranzystor główny T2 danej fazy oraz drugi tranzystor pomocniczy T2p są załączane analogicznie jak tranzystor główny T1 oraz tranzystor pomocniczy T1p.

Weryfikacji poprawności pracy zaproponowanego układu łagodnego przełączania tranzystorów falownika napięcia dokonano w laboratoryjnym układzie o mocy około 3 kW zbudowanym z wykorzystaniem tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką typu G4PH50KD. Falownik zasilany był ze źródła napięcia stałego o wartości 100 V, a maksymalny prąd odbiornika wynosił 14 A. Na rysunku 6 przedstawione są przykładowe przebiegi prądów i napięć

trójfazowego falownika napięcia z proponowanym układem łagodnego przełączania tranzystorów. Rejestracji przebiegów dokonano dla następujących wartości elementów i parametrów pracy układu: $C1=C2=1\mu F$, $L1a=L2a=300\mu H$, $L1b=L2b=300\mu H$, częstotliwość przełączeń – 1 kHz, współczynnik modulacji amplitudy – 0,75. Maksymalne napięcia kondensatorów nie przekroczyły wartości 320 V. Prąd tranzystora T1 w procesie załączania osiągnął wartość około 0,06 A przy prądzie odbiornika wynoszącym 12 A w danym cyklu pracy, a napięcie tego tranzystora w procesie wyłączania wynosiło około 8 V ($U_{DC}=100$ V). Należy również zaznaczyć, że prąd tranzystora pomocniczego T1p po zakończeniu procesu jego załączania osiągnął wartość około 0,5 A, natomiast wyłączenie tego tranzystora następuje przy napięciu równym zeru z uwagi na przewodzenie tranzystora głównego T1. Straty mocy przełączania tranzystora głównego i pomocniczego wynosiły odpowiednio około 0,18 W i 0,09 W (w odniesieniu do 3 kHz). Sumaryczne straty przełączania tranzystorów w zaproponowanym układzie stanowiły około 23 % strat przy „twardym” przełączaniu jednego tranzystora w falowniku bez wspomaganie przełączania.

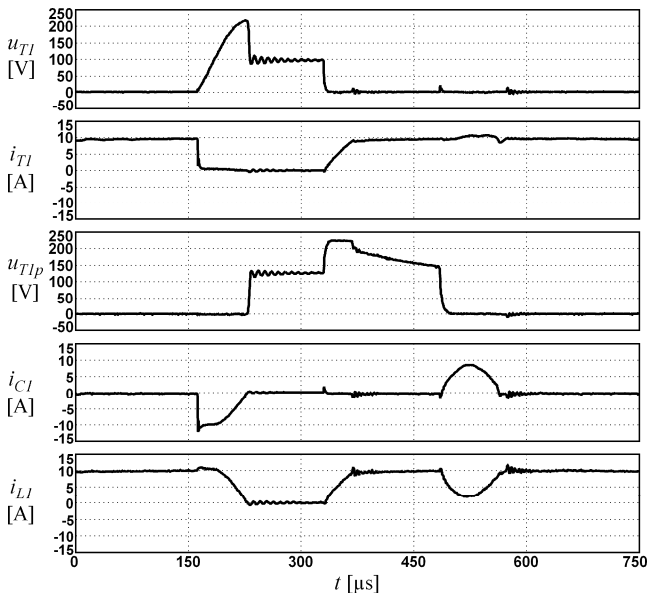
Przy analizie przebiegów zamieszczonych na rysunku 6 warto zwrócić uwagę na proces rozładowania kondensatora C1, który rozpoczyna się w czasie około 305 μs . Kondensator C1 rozładowuje się częściowo przez źródło zasilania, powodując zmniejszenie się prądu dławika L1a, oraz przez tranzystor T1 i fazę A odbiornika. W chwili gdy napięcie kondensatora zmniejszy się do zera (w czasie około 335 μs) następuje szybkie zmniejszenie się prądu tranzystora T1, a prąd fazy A odbiornika płynie częściowo przez diody D2z i D1s od ujemnego zacisku źródła zasilania. Diody te przestają przewodzić w chwili gdy prąd tranzystora T1 osiągnie wartość prądu odbiornika (około 370 μs).



Rys.6. Przebiegi wybranych napięć i prądów zarejestrowane w laboratoryjnym falowniku napięcia z proponowanym układem łagodnego przełączania tranzystorów: $i_{DC} = 12$ A, $f_i = 1$ kHz, $m_a = 0,75$, pojemność kondensatorów – 1 μF , indukcyjność dławików – 300 μH ; oznaczenia przebiegów jak na rysunku 5

Na rysunku 7 zamieszczono analogiczne przebiegi napięć i prądów zarejestrowane dla przypadku, w którym indukcyjność dławików L1a i L2a wynosiła około 100 μH , a częstotliwość przełączeń była równa 3 kHz. Zmniejszenie indukcyjności tych dławików powoduje szybsze narastanie

prądu po załączeniu tranzystora głównego, co skutkuje jednak zwiększeniem strat załączania. Również rosną straty załączania tranzystora pomocniczego. Sumaryczne straty przełączania obu tych tranzystorów są nieznacznie większe niż poprzednio i wynoszą około 0,33 W. Należy jednak podkreślić, że zmniejszenie indukcyjności dławików L1a i L2a prowadzi do obniżenia maksymalnej wartości napięcia kondensatora, która dla prawidłowej pracy układu łagodnego przełączania powinna być około dwukrotnie większa od wartości napięcia źródła zasilania.



Rys. 7. Przebiegi napięć i prądów zarejestrowane w laboratoryjnym falowniku napięcia z proponowanym układem łagodnego przełączania tranzystorów dla przypadku, którym indukcyjność dławików L1a, L2a wynoszą $100 \mu\text{H}$, $f_i = 3 \text{ kHz}$; oznaczenia przebiegów jak na rysunku 5

Dobór elementów układu łagodnego przełączania

Rolą dławików łączących kolektory górnych tranzystorów głównych z dodatnim zaciskiem źródła zasilania i emiterów dolnych tranzystorów głównych z ujemnym zaciskiem tego źródła jest ograniczenie szybkości narastania prądów tranzystorów tak, aby załączanie tranzystorów przebiegało przy prądzie bliskim zeru. Nie popełniając zbyt dużego błędnie można założyć, że po załączeniu tranzystora głównego jego prąd narasta od zera liniowo względem czasu. Jeśli przyjąć, że $L1a=L2a=L_a$, to przebieg prądu tranzystora można wyrazić wzorem:

$$(3) \quad i_{T1}(t) = \frac{U_{DC}}{L_a} t$$

Jeśli przyjąć, że prąd tranzystora po zakończeniu procesu załączania nie może być większy od iloczynu maksymalnej wartości prądu tranzystora I_{Tmax} (maksymalnej wartości prądu odbiornika) i współczynnika m_r , który może przyjmować wartości od zera do jeden, to indukcyjność dławików L1a i L2a określa zależność:

$$(4) \quad L_a = \frac{U_{DC}}{m_r I_{Tmax}} t_r$$

gdzie: t_r – czas narastania prądu tranzystora od 10 % do 90 % wartości maksymalnej, określony na podstawie danych katalogowych, m_r – stosunek prądu tranzystora w chwili t_r do wartości I_{Tmax} .

Ograniczenie strat załączania wymaga zmniejszenia wartości współczynnika m_r , jednak konieczne jest wówczas zwiększenie indukcyjności dławików L1a i L2a.

Zapewnienie łagodnego wyłączenia tranzystorów wymaga, aby kondensator przed wyłączeniem danego tranzystora był całkowicie rozładowany. Ten warunek będzie spełniony, jeśli maksymalna wartość napięcia U_{max} kondensatora będzie co najmniej dwukrotnie większa od napięcia zasilania U_{DC} źródła zasilania falownika. Z drugiej strony, napięcie U_{max} nie może być dowolnie duże ze względu na napięcie pracy tranzystorów. Po wyłączeniu tranzystora głównego T1 (rys. 4) prąd dławika L1a płynie przez diodę zwrotną tranzystora pomocniczego T1p i kondensator C1, a energia pola magnetycznego dławika L1a zamieniana jest na energię pola elektrycznego kondensatora C1. Jeśli przyjąć, że $C1=C2$ i korzystając z warunku zachowania energii, pojemność kondensatorów można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$(5) \quad C = L_a \frac{I_{Tmax}^2}{(k_C U_{DC})^2}$$

gdzie: k_C – krotność maksymalnej wartości napięcia na kondensatorze względem napięcia zasilania U_{DC} .

Określenie wartości współczynnika k_C zależy od napięcia pracy falownika i maksymalnej wartości prądu odbiornika. Dla prądów rzędu 400-500 A dostępne są seryjnie produktowe tranzystory o napięciach nawet 3,3 kV. Należy pamiętać, że wszystkie tranzystory muszą być dobrane względem maksymalnego napięcia, jakie wystąpi na kondensatorze; stanowi to pewien mankament proponowanego układu łagodnego przełączania.

Określenie indukcyjności dławików L1a i L2a oraz pojemności kondensatorów C1 i C2 determinuje czas rozładowania rezonansowego kondensatorów oraz istotnie wpływa na szybkość narastania prądu rozładowania kondensatorów przez tranzystory pomocnicze. Straty załączania tranzystorów pomocniczych zależą od wartości prądu rozładowania kondensatorów po zakończeniu procesu załączania tranzystorów pomocniczych. Wartość tego prądu można określić na podstawie wyrażenia:

$$(6) \quad i_{T1p}(t_r) = (U_{Cmax} - U_{DC}) \sqrt{\frac{C}{L_a}} \sin \frac{t_r}{\sqrt{L_a C}}$$

Dławiki L1b, L2b mają zapobiegać udarowemu rozładowaniu kondensatorów przez źródło zasilania. Dobór ich indukcyjności nie jest krytyczny, a badania laboratoryjne wskazują, że indukcyjność tych dławików może być taka sama jak indukcyjność dławików łączących tranzystory z dodatnim lub ujemnym zaciskiem źródła zasilania.

Podsumowanie

W proponowanym układzie łagodnego przełączania kondensatory nie mogą rozładować się udarowo przez przewodzący tranzystor oraz nie ma możliwości przerwania prądu w indukcyjnościach na skutek błędnego sterowania. W przypadku braku koordynacji chwil załączania i wyłączenia tranzystorów pomocniczych względem momentów przełączania tranzystorów głównych wystąpi „twarde przełączanie” tranzystorów, nie zaś awaria urządzenia. Wszystkie tranzystory główne i pomocnicze są przełączane łagodnie.

Sposób sterowania przełączaniem tranzystorów jest prosty, gdyż tranzystory pomocnicze są załączane z niewielkim opóźnieniem względem załączania tranzystorów głównych, a wyłączenie tranzystorów pomocniczych

następuje po zakończeniu procesów rozładowania rezonansowego kondensatorów.

Proponowane rozwiązanie poza wspomaganie przełączania tranzystorów pełni także funkcję zabezpieczenia przeciwprzepięciowego tranzystorów. Ograniczenie przez dławiki indukcyjne szybkości narastania prądów tranzystorów ma również znaczenie w przypadku ewentualnego, niezamierzonego występowania do przewodzenia obu tranzystorów głównych danej fazy. Wolniejsze narastanie prądu daje więcej czasu na zadziałanie układu zabezpieczenia przeciwzwarciowego, co ma istotne znaczenie zwłaszcza w falownikach średniej i dużej mocy.

Ograniczenie strat przełączania nie tylko podnosi sprawność falowników napięcia, ale również upraszcza system chłodzenia tranzystorów, co dla falowników napięcia średniej i dużej mocy może mieć zasadnicze znaczenie. Należy jednak podkreślić, że układy łagodnego przełączania tranzystorów w falownikach napięcia wprowadzają pewne ograniczenia dotyczące maksymalnej częstotliwości przełączania i zakresu dopuszczalnych zmian współczynnika modulacji amplitudy. Problem ten jest obecnie tematem dalszych prac teoretycznych i laboratoryjnych dotyczących zagadnień sterowania falownika napięcia z proponowanym układem łagodnego przełączania.

Autorzy: dr hab. inż. Witold Mazgaj, E-mail: pemazgaj@cyfronet.pl; mgr inż. Bartosz Rozegnał, E-mail: b.rozegnal@gmail.com; dr inż. Zbigniew Szular, E-mail: zsular@pk.edu.pl, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

LITERATURA

- [1] Frąckowiak L., Januszewski S., *Energoelektronika, Część I – Półprzewodnikowe przyrządy i moduły energoelektroniczne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań (2001)
- [2] Maswood A.I., A switching loss study in SPWM igbt inverter, *2nd IEEE International Conference on Power and Energy*, PECon 08, Johor Baharu, Malaysia, 1-3 December (2008), 609-613
- [3] Rajapakse A.D., Gole A.M., Wilson P.L., Approximate Loss Formulae for Estimation of IGBT Switching Losses through EMTP-type Simulations, *International Conference on Power Systems Transients*, IPST'05, Montreal, Canada, 19-23 June (2005), Paper No. 184
- [4] Amini M.R., Farzanehfarid H., Three-Phase Soft-Switching Inverter With Minimum Components, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, June (2011), Iss. 6, 2258-2264
- [5] Hiraki E., Tanaka T., Nakaoka M., Zero-Voltage and Zero-Current Soft - Switching PWM Inverter, *36th Power Electronics Specialists Conference*, PESC '05, Recife, Brazil, 12-16 June (2005), 798-803
- [6] Keyhani H., Toliyat H.A., A soft-switching three-phase ac-ac converter with a high-frequency ac link, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, ECCE, Raleigh, 15-20 Sept. (2012), 1040-1047
- [7] Khalilian M., Farzanehfarid H., Adib E., A novel quasi-resonant three-phase soft-switching inverter, *3rd Power Electronics and Drive Systems Technology*, PEDSTC, (2012), 471-476
- [8] Liu Y., Wu W., Blaabjerg F., Chung H.S., A modified two-level three-phase quasi-soft-switching inverter, *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, APEC, (2014), 261-267
- [9] Mandrek S., Pośredni przemiennik częstotliwości z quasi-rezonansowym obwodem równoległym, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk, (2007)
- [10] Nowak M., Barlik R., Poradnik inżyniera energoelektronika, WNT Warszawa, (1998)
- [11] Panda B., Bagarty D.P., Behera S., Soft-switching dc-ac Converters: A brief literature review, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2 (2010), 7004-7020
- [12] Shukla J., Fernandes B.G., Three-phase soft-switched PWM inverter for motor drive application, *Electric Power Applications*, IET, Vol. 1, Jan. (2007), 93-104
- [13] Kempski A., Schmidt S., Analiza pracy falowników napięcia z twardą i miękką komutacją w kontekście kompatybilności elektromagnetycznej (EMC), *Przegląd Elektrotechniczny*, (2004), nr. 6, 620-623
- [14] Tunia H., Winiarski B., *Podstawy energoelektroniki*, WNT Warszawa, (1987)
- [15] Wang K., Jiang Y., Dubovsky S., Hua G., Boroyevich D., Lee F.C., Novel DC-Rail Soft-Switched Three-Phase Voltage-Source Inverters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33 (1997), 509-517
- [16] Wu W., Geng P., Chen J., Ye Y., A Novel Three-Phase Quasi-Soft-Switching DC/AC Inverter, *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, PEDG, Hefei, China, 16-18 June (2010), 477-480
- [17] Vlatkovic V., Boroyevich D., Lee F. C., Patent US5432695, Zero-voltage switched three-phase PWM rectifier inverter circuit, US (1995)
- [18] Xu D., Feng B., Novel ZVS Three-Phase PFC Converters and Zero-Voltage-Switching Space Vector Modulation (ZVS-SVM) Control, *IEEE First International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China (2004), 30-37
- [19] Chandhaket S., Yoshida M., Eiji H., Nakamura M., Konishi Y., Nakaoka M., Multi-functional Digitally-Controlled Bidirectional Interactive Three-phase Soft-Switching PWM Converter with Resonant Snubbers, *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, PESC, Vol. 2, Vancouver, Canada (2001), 589-593
- [20] Chao K.H., Liaw C.M., Three-phase soft-switching inverter for induction motor drives Iyomori-Three, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, Vol. 148, Jan (2001), 8-20
- [21] Galea C., New topology of three phase soft switching inverter using a dual auxiliary circuit, *15th European Conference on Power Electronics and Applications*, EPE (2013), 1-9
- [22] Karyś S., Power loss comparison for the ARCP resonant inverter regard to control method, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr. 11, 64-68
- [23] Li Y., Lee F.C., Boroyevich D., A Three-Phase Soft-Transition Inverter with a Novel Control Strategy for Zero-Current and Near Zero-Voltage Switching, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 16, Sep (2001), 710-723
- [24] Martinez B., Li R., Ma K., Xu D., Hard Switching and Soft Switching Inverters Efficiency Evaluation, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, ICEMS, Wuhan, China, 17-20 October (2008), 1752-1757
- [25] Keir A. S., Patent US5576943, Soft switched Tyree-phase inverter with staggered resonant recovery system, US (1996)
- [26] Yamamoto M., Yoshida M., Iwamoto H., Hiraki E., Sugimoto S., Kouda I., Nakaoka M., Three-phase voltage source NPC soft-switching inverter for interactive energy storage plants, *The 21st International Telecommunication Energy Conference*, INTELEC '99 (1999), 492
- [27] Karyś S., Three-Phase Soft-Switching Inverter with Coupled Inductors, Experimental Results, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, 59, Warsaw, Grudzień (2011), Zeszyt 4, 535-540
- [28] Zhang H., Chu E., Liu X., Wang Q., Hou L., Patent CN101478258 (A), Resonance electrode type three phase soft switch inverter circuit, China (2010)
- [29] Sun P., Lai J., Qian H., Yu W., Smith C., Bates J., High Efficiency Three-Phase Soft-Switching Inverter for Electric Vehicle Drives, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, VPPC '09, Dearborn, USA, 7-10 Sept. (2009), 761-766
- [30] Mazgaj W., Rozegnał B., Szular Z., Sposób łagodnego przełączania tranzystorów trójfazowego, dwupoziomowego falownika napięcia oraz układ łagodnego przełączania tranzystorów trójfazowego, dwupoziomowego falownika napięcia, zgłoszenie patentowe P.412114 (2015)