



TOMASZ BINKOWSKI¹, BOGDAN KWIATKOWSKI²

Współbieżne modele czasu rzeczywistego przekształtników energoelektronicznych w kształceniu inżynierskim

Simultaneous Real-Time Models of Power Electronics Converters

¹ Doktor inżynier, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, Polska

² Doktor inżynier, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Inżynierii Komputerowej, Polska

Streszczenie

Badanie układów energoelektronicznych zarówno do celów dydaktycznych, jak i naukowych wymaga przeprowadzania testów układów sterowania i regulacji. Testy te nie zawsze kończą się sukcesem, zwłaszcza w sytuacji nieprzewidzianych zdarzeń lub niewłaściwie dobranych parametrów sterowania. W przypadku stanowiska laboratoryjnego ewentualne zwarcia lub błędy mogą skutkować zniszczeniem wrażliwych, kosztownych elementów. W artykule przedstawiono koncepcję stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do fazy prototypowania, które w czasie rzeczywistym wykonywało współbieżnie obliczenia modeli przekształtników energoelektronicznych i realizowało zadania sterowania.

Słowa kluczowe: energoelektronika, przekształtnik, sterowanie, modele czasu rzeczywistego

Abstract

The power electronics converters study, both for the purposes of teaching and scientific research, requires the testing of control systems and regulations. These tests do not always end with success, especially in a situation not provided for events or inappropriately selected control parameters. In the case of a laboratory station possible short circuits or errors can result in the destruction of sensitive, costly items. The article shows the concept of a laboratory station intended for prototyping phase, which in real time performed calculation in parallel of the power electronic converter models and provided the control tasks.

Keywords: power electronics, converter, control, real-time models

Wstęp

Nauczanie przedmiotów z energoelektroniki i prowadzenie w tej dyscyplinie badań naukowych są procesami wymagającymi bardzo dużej ostrożności w fazie

prototypowania i prowadzenia eksperymentów. Wynika to z dużych lub bardzo dużych wartości napięć przełączanych w obwodach mocy lub wartości prądów płynących pomiędzy węzłami o różnych potencjałach. W wyniku przełączeń układów zawierających indukcyjności niezerowe wartości prądów przełączanych skutkują przepięciami, które zagrażają bezpieczeństwu i trwałości łączników półprzewodnikowych mocy. Podobnie jest w przypadku przełączeń obwodów zawierających elementy o charakterze źródeł napięcia, np. przełączając obwody z kondensatorami. Wtedy, gdy występują niezerowe napięcia pomiędzy okładkami kondensatorów, występują przetężenia. Przetężenia występujące w strukturach półprzewodnikowych zgodnie z prawem Ampera wydzielają w strukturach przewodzących energię najczęściej tak dużą, że nie są one w stanie odprowadzić jej nadmiar na zewnątrz. Wtedy dochodzi do uszkodzeń termicznych powodujących najczęściej rozerwanie półprzewodnika (Zhen, 2008). Źródłem takich sytuacji jest często niewłaściwie zaprojektowana struktura przekształtnika, ale również błędy w algorytmach sterowania lub driverach.

Chcąc prowadzić skuteczną dydaktykę, demonstracja sytuacji krytycznych jest konieczna i jest bardzo istotnym elementem procesów poznawczych. Oczywiście jest także to, że sytuacje awaryjne skutkujące uszkodzeniami elementów lub ich zniszczeniem są czasochłonnym i przede wszystkim kosztownym elementem prowadzonych badań. Biorąc pod uwagę to, że obserwacja skutków błędów jest o wiele bardziej efektywna w procesie poznawczym niż np. symulacja komputerowa, zaproponowane zostało stanowisko badawcze umożliwiające śledzenie i badanie błędów projektowych układów sterowania i regulacji urządzeń dużych mocy. Założeniem podstawowym jest eliminacja kosztów wynikających z wprowadzanych błędów sterowania. Rozwiązanie przedstawionego problemu dotyczy wykorzystania modeli badanych przekształtników energoelektronicznych i ich obciążeń, które uruchamiane wspólnie z urządzeniem sterującym pozwoliłoby na śledzenie odpowiedzi przekształtnika i jego obciążenia na generowane niezależnie i wspólnie sygnały sterujące.

Warunkiem podstawowym, jaki należy spełnić podczas realizacji zaproponowanej koncepcji, jest praca wspólna i niezależna modelu przekształtnika i obciążenia. Najbardziej wiarygodne rozwiązanie dotyczy zastosowania modeli analogowych pracujących w odpowiedniej skali. Zmniejszenie proporcjonalne wartości napięć i prądów pozwala na testowanie sterowników, przy czym umożliwia obserwację sytuacji krytycznych związanych z wytrzymałością mechaniczną struktur półprzewodnikowych. Modele analogowe umożliwiają obserwację skutków sterowania, natomiast obniżone wartości prądów generują zbyt małe energie, aby doszło do uszkodzeń struktur półprzewodnikowych. W sytuacji, gdy struktura ulegnie uszkodzeniu, element należy wymienić. Takie rozwiązanie problemu – w postaci modelu analogowego – nie eliminuje go, a jedynie ogranicza koszty eksploatacyjne procesu badawczego. Ograniczeń

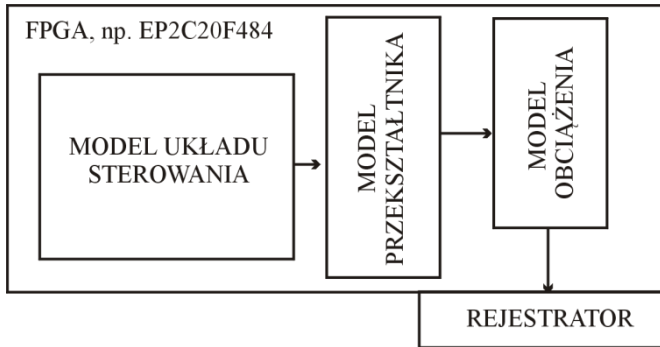
takich nie posiadają modele realizowane w sposób sprzętowy w układach dyskretnych (Anuchin, 2016).

Zakładając, że model zarówno przekształtnika energoelektronicznego, jak i obciążenia jest modelem cyfrowym, wiarygodne wyniki uzyskuje się wtedy, gdy częstotliwość taktowania modelu elementów analogowych jest przynajmniej rząd większa od częstotliwości repetycji sterowników. Najbardziej popularne przekształtniki energoelektroniczne mają częstotliwość repetycji na poziomie do 5kHz, choć zdarzają się coraz częściej przekształtniki o większej częstotliwości łączy, dochodzącej nawet do wartości 50 kHz. Wtedy okres taktowania modelu powinien być na poziomie odpowiadającym setkom kiloherców. Ograniczeniem w takiej sytuacji jest maksymalna częstotliwość pracy układu cyfrowego. Biorąc pod uwagę współbieżność zarówno obliczeń modeli, jak i obliczeń procesu regulacji stosowanie kilku procesorów o wystarczającej częstotliwości pracy nie jest efektywne. Brak efektywności wynika z tego, że do zapewnienia współbieżności wymagana jest struktura przynajmniej dwuprocessorowa, co wymusza realizację dedykowanej płytki drukowanej, na której umieszczone będą dwa współbieżnie działające procesory. Dodatkowo realizacja modeli przekształtników energoelektronicznych i obliczeń modeli obciążenia jest czasochłonna i zasobochłonna, co w przypadku struktur procesorowych jest mocnym ograniczeniem ich funkcjonalności ze względu na sekwencyjność wykonywanych operacji.

Wspomnianych wad nie posiadają układy o programowalnej logice PLD (*programmable logic device*). W układach tych struktura wewnętrzna bloków logicznych ustalana jest na etapie programowania i może być współbieżna dla różnych zadań. Obecnie na rynku dostępnych jest bardzo dużo układów z grupy PLD, wśród których wyróżniają się układy FPGA (*field programmable gate array*). Układy te posiadają możliwości ograniczone jedynie wielkością wbudowanych zasobów i częstotliwością wewnętrznej pracy. Obecnie typowe układy posiadają zasoby na poziomie tysięcy jednostek logicznych, które mogą być organizowane do pracy współbieżnej, a częstotliwości taktowania są na poziomie megaherców. Warto zaznaczyć, że karta bazowa, na której osadzony jest układ logiki programowalnej, nie musi być zaprojektowana do pracy z tak dużymi wartościami częstotliwości przebiegów zegarowych. Częstotliwość przebiegu zegarowego wprowadzanego do układu może być mniejsza, a następnie powielona wewnątrz układu za pomocą wbudowanej pętli synchronizacji fazy PLL (*phase locked loop*).

Zaproponowana koncepcja stanowiska laboratoryjnego uwzględniająca wykorzystanie układu o programowalnej logice odnosi się do wykorzystania jednego układu scalonego, w którym współbieżnie wykonywane są obliczenia modelu przekształtnika, obciążenia, modulacji przebiegów i regulacji wielkości wyjściowych. Wszystkie te modele mogą mieć różne, niezależne sygnały zegarowe taktujące ich pracę, a częstotliwości rzędu megaherców pozwalają skutecznie

modelować wszystkie procesy zachodzące w przekształtnikach energoelektronicznych. Dodatkowym atutem jest to, że sygnały generowane przez układy sterujące podane na modele przekształtników pozwalają znaleźć nieprawidłowości algorytmów sterowania, a w przypadku ich braku mogą być jednocześnie przekierowane na zewnątrz układu i wykorzystane do sterowania modelem laboratoryjnym. Blokowa struktura stanowiska laboratoryjnego do badań przekształtników energoelektronicznych pokazana jest na rysunku 1.



Rysunek 1. Struktura blokowa stanowiska badawczego

Źródło: opracowanie własne.

Modele czasu rzeczywistego przekształtników energoelektronicznych

Przekształtniki energoelektroniczne składają się z określonej struktury liczby przyrządów półprzewodnikowych mocy. W przypadku przekształtników sterowanych muszą występować półprzewodnikowe elementy, które przynależą do grupy elementów sterowanych w pełni lub elementów nie w pełni sterowanych. Elementy półprzewodnikowe mocy sterowane są w ten sposób, że mogą pozostawać tylko w jednym z dwóch stanów. Pierwszy stan odnosi się do pełnego otwarcia półprzewodnika, czyli jego przewodzenia. Drugi stan to stan blokowania. Pozwala to na prostą implementację modelu półprzewodnikowego elementu mocy w środowisku dyskretnym, gdzie wysokiemu stanowi logicznemu przypisuje się stan przewodzenia łącznika, a niskiemu stanowi logicznemu – stan blokowania. W przypadku łączników sterowanych w pełni zarówno proces załączenia, jak i wyłączenia łącznika jest kontrolowany przez urządzenie sterujące. W przypadku łącznika nie w pełni sterowanego tylko jeden z procesów jest kontrolowany przez urządzenie sterujące. Drugi proces dynamiczny wynika ze stanu, w jakim znajduje się łącznik.

Oprócz elementów półprzewodnikowych przełączalnych w przekształtnikach energii mogą wystąpić elementy półprzewodnikowe niesterowalne, np. diody, oraz elementy rezystancyjne i bierne. Prawidłowo skonfigurowany model przekształtnika powinien zatem uwzględniać wszystkie te elementy, które połą-

czone ze sobą powinny odpowiednio reagować na sygnały sterujące przy założonym wymuszeniu napięciem bądź prądem oraz przy założonym obciążeniu. Najpowszechniej stosowanymi elementami półprzewodnikowymi sterowanymi są tranzystory mocy (np. IGBT, MOSFET, BJT) oraz tyrystory. W przypadku tranzystorów ich model matematyczny realizowany cyfrowo może, ale nie musi uwzględniać procesów komutacyjnych. Do celów weryfikacji algorytmu sterowania wystarczający jest model uproszczony przyjmujący proces komutacji natychmiastowej. W przypadku dowolnego typu tranzystora jego model polega na realizacji funkcji przejścia prądu i napięcia. Dla modelu uproszczonego jest to przekazanie prądu na wyjście, gdy sygnał sterujący jest w stanie wysokim, lub przyjęcie zerowej wartości prądu dla sygnału sterującego będącego w stanie niskim. Model łącznika tranzystorowego może być zatem opisany w języku opisu sprzętu VHDL jako jednostka projektowa, której architektura realizuje opis funkcji łącznika. W reakcji na zmianę sygnału sterującego G (bramki) przekazywany jest prąd wejściowy CI (kolektora) na wyjście EI (emitera) lub przypisywana jest mu wartość zera. Odpowiednia reakcja dotyczy określania napięcia kolektor–emiter. Przykładowy opis architektury łącznika IGBT może być wykonany następująco:

```

ARCHITECTURE tranzystor_architecture OF tranzystor IS
BEGIN
process (G) begin
if (G='0') then      EI<="0000000000";UCE<=CU;      else      EI<=CI;
UCE<="0000000000";end if;
end process;
END tranzystor_architecture;

```

Przyrządy półprzewodnikowe mocy nie w pełni sterowane, np. tyrystory SCI, mogą być zamodelowane w analogiczny sposób jak tranzystory mocy, przy czym przekazywanie prądu i określanie napięcia pomiędzy anodą i katodą odbywać ma się w inny sposób dla procesu załączania, a w inny dla wyłączenia. Wymaga to zdefiniowania jednostki projektowej w analogiczny sposób jak dla tranzystora. Różnica dotyczy przede wszystkim zmiany nazw sygnałów i zmiany architektury przypisanej do jednostki projektowej. Dla 10-bitowych sygnałów prądu i potencjału anody AI, AU oraz prądu wypływającego z katody KI i napięcia na łączniku UAK w reakcji na sygnał sterujący i napięcie anodowe model tyrystora można opisać następująco:

```

ARCHITECTURE tyrystor_architecture OF tyrystor IS
BEGIN
process (G,AU) constant Ioff : integer :=50; begin
if (G'event and G='1' and conv_integer(unsigned(AU))>=512) then
KI<=AI;UAK<="0000000000"; end if;

```

```

if(conv_integer(unsigned(AI))<=512+Ioff) then KI<="0000000000";
UAK<=AU; end if;
end process;
END tyrystor_architecture;

```

Wyłączenie tyrystora następuje zawsze po osiągnięciu przez łącznik wartości mniejszej lub równej prądowi podtrzymania Ioff. Załączenie następuje przy odpowiedniej polaryzacji w chwili pojawienia się impulsu bramkowego. Na podstawie przedstawionych modeli łączników oraz modeli elementów rezystancyjnych i biernych (Anuchin, 2016) (stosując model Eulera) przebadane zostały podstawowe struktury przekształtników energoelektronicznych. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Przebiegi zarejestrowane narzędziem SignalTapII modeli falownika (napięcie fazowe i międzyfazowe) i prostownika tyrystorowego (sygnały sterujące, napięcia wejściowe, napięcie i prąd wyjściowe)

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule koncepcja stanowiska laboratoryjnego do badania przekształtników energoelektronicznych poprzez implementację współbieżną procesów sterowania i modelowania jest doskonałą alternatywą prototypowych badań laboratoryjnych przekształtników. Jest ona niezwykle przydatna w dydaktyce, ale także jest doskonałym narzędziem wykorzystywanym w badaniach

naukowych. Modelowanie półprzewodnikowych przyrządów mocy jako elementów dyskretnych umożliwia dowolne ich łączenie w postać pożądaną topologii, a przez to modelowanie dowolnych przekształtników energii.

Literatura

- Anuchin, A. (2016). *Real-time Model of Switched Reluctance Drive for Educational Purposes*, 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvia.
- Zhen, R. (2008). Analysis of IGBT Damage under Load Fluctuation and Optimal Design of Driving Circuit. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 28 (4), 111–113.