

Grzegorz GROCHOWSKI

WPŁYW CZASÓW MARTWYCH NA PRACĘ PRZEKSZTAŁTNIKÓW DUŻEJ MOCY NA PRZYKŁADZIE TYRYSTOROWEGO FALOWNIKA NAPIĘCIA O MOCY 1 MVA

STRESZCZENIE *W artykule przedstawione są prace związane z analizą tyrystorowego falownika napięcia. Pokazany jest wpływ czasów martwych na pracę falownika – zniekształcenie kształtu napięcia wyjściowego i niestabilność pracy obciążenia szczególnie dla małych częstotliwości. Przedstawione są różne sposoby kompensacji czasów martwych. W zakończeniu przedstawione są wyniki pracy modelu napięciowego falownika tyrystorowego.*

Słowa kluczowe: *układy tyrystorowe, czasy martwe, kompensacja*

1. WSTĘP

W artykule przedstawione są prace badawcze związane z analizą tyrystorowego falownika napięcia i wpływem na jego pracę czasów martwych. Tego typu przekształtniki, głównie o dużej mocy, są opracowywane i budowane na indywidualne zamówienie klienta. Mogą one służyć do napędu wentylatorów lub pomp. Warunkiem oferowania tych urządzeń klientom jest wyposażenie w nowoczesne układy sterowania razem z systemem diagnostyki i transmisji

mgr inż. Grzegorz GROCHOWSKI

e-mail: groch@wp.pl

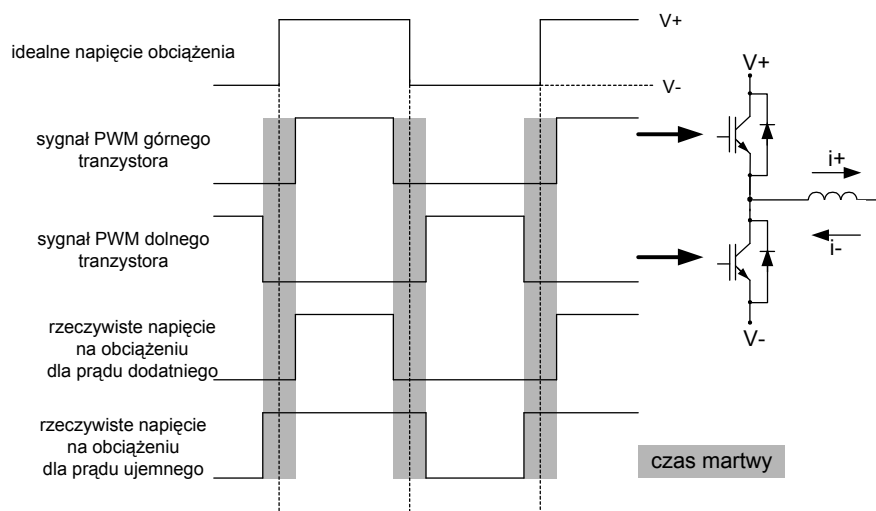
Zakład Przekształtników Mocy
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 238, 2008

danych. Rozwiązanie w/w zagadnień ma na celu poprawę parametrów funkcjonalnych, dynamiki, zwiększania bezpieczeństwa obsługi i urządzenia oraz umożliwia jego współpracę z nadrzędnym systemem sterowania.

2. PRZYCZYNY POWSTANIA CZASÓW MARTWYCH I SPOSOBY ICH KOMPENSACJI

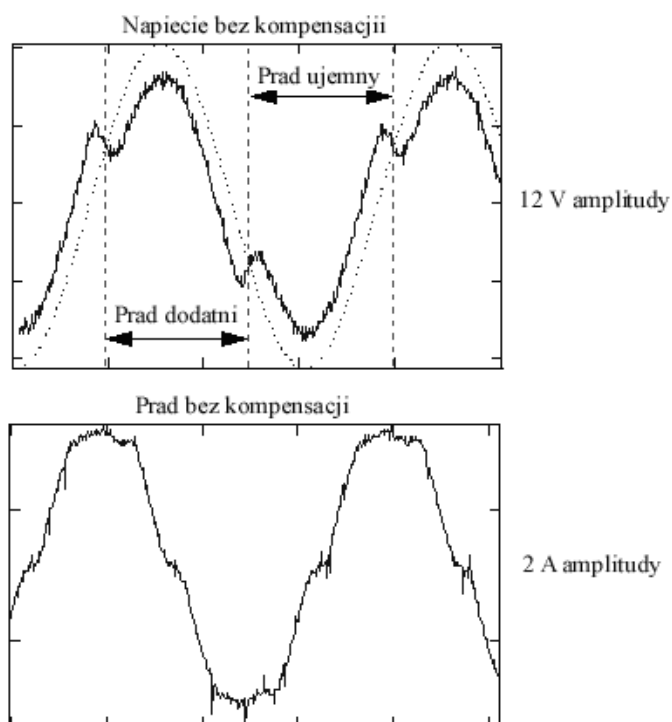
Układy tyrystorowe charakteryzują się długimi czasami załączenia oraz wyłączenia łącznika. W analizie pracy przetwornicy DC/AC, stosując modulację sinusoidalną PWM, zakłada się idealne przebiegi czasowe. W rzeczywistości przebiegi wyjściowe napięcia odbiegają od idealnych. Jednym z głównych powodów jest aranżacja mająca na celu uniemożliwienie jednoczesnego przewodzenia obu łączników w gałęzi, co może powodować krótkotrwałe zwarcia obwodu pośredniczącego. Wprowadza się krótkie przedziały czasu między wyłączeniem górnego łącznika a załączeniem dolnego zwane czasem martwym. W tym czasie oba łączniki nie przewodzą, a wyjściowy potencjał zależy od kierunku prądu wyjściowego i indukcyjności układu. Sygnały PWM z uwzględnieniem czasów martwych przedstawione są na rysunku 1.



Rys. 1. Sygnały PWM z uwzględnieniem czasów martwych, rzeczywiste napięcie na obciążeniu

W trakcie czasu martwego indukcyjność obciążenia przeciwdziała zanikowi prądu. Indukowane jest napięcie „podtrzymujące” przepływ prądu przez diody. Powoduje to przesunięcie wyjściowego napięcia oraz

zniekształcenie fali prądowej (rys. 2). Dla układów tyrystorowych ma to większe znaczenie, w porównaniu z układami tranzystorowymi, gdyż czasy te są rzędu kilkudziesięciu – kilkuset mikrosekund wobec kilku mikrosekund dla tranzystorów.



Rys. 2. Kształt prądu i napięcia bez kompensacji czasów martwych

Wprowadzenie dodatkowego czasu, kiedy nie przewodzą oba łączniki wywołuje istotne zniekształcenia przebiegów napięć generowanych przez falowniki z modulacją szerokości impulsów (rys. 2). Dodatkowym źródłem zniekształceń są spadki napięcia na przewodzących tranzystorach i diodach zwrotnych falownika. Pod pojęciem *wpływu czasu martwego* zazwyczaj rozumie się łącznie oba rodzaje zniekształceń. Wpływ czasu martwego można wyrazić za pomocą *napięcia błędu*, czyli różnicy pomiędzy napięciem na wyjściu falownika idealnego i napięciem rzeczywiście uzyskiwanym dla danego sterowania. Napięcie błędu można rozpatrywać jako złożenie zniekształceń liniowych (błędy amplitudy i fazy podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego) i zniekształceń harmonicznym (nieliniowym). Jeśli chodzi o te ostatnie, najistotniejsze są piąta i siódma harmoniczne.

Zniekształcenia spowodowane występowaniem czasu martwego są niekorzystne zarówno w otwartym, jak i zamkniętym układzie sterowania. W układzie otwartym, np. przy zachowaniu stałego stosunku napięcia do

częstotliwości (U/f), brak kompensacji czasu martwego prowadzi często do niestabilnej pracy układu napędowego (dla niskich częstotliwości), zmniejszenia napięcia wyjściowego, zniekształcenia prądu silnika i pulsacji momentu na wale silnika. W układzie zamkniętym, z kolei znaczna rozbieżność pomiędzy wartością zadaną napięcia a jego wartością rzeczywistą może w istotny sposób utrudniać estymację strumienia lub prędkości kątovej silnika zasilanego z falownika. Ponadto, zniekształcenia harmoniczne prądu fazowego wywołują dodatkowe pulsacje momentu i prędkości maszyny oraz prowadzą do zmniejszenia sprawności energetycznej układu napędowego.

Zagadnieniu wpływu kompensacji czasu martwego poświęcono wiele publikacji. Przedstawione w literaturze metody kompensacji można podzielić na dwie zasadnicze grupy ze względu na charakter napięcia kompensującego. Do pierwszej grupy należą metody wykorzystujące prostokątne napięcie kompensujące o znaku zależnym od zwrotu prądu. Drugą grupę natomiast stanowią metody, w których napięcie kompensacji jest ciągłą funkcją wartości chwilowych prądu fazowego.

W artykule [6] zaprezentowano układ sprzętowy, który zmienia przebiegi sygnałów PWM, w zależności od znaku prądu fazowego wydłużając lub skracając impulsy. Zmianę czasów załączeń można przeliczyć na napięcie o stałej wartości dodawane lub odejmowane od napięcia zadanego. Metoda przedstawiona w [5] należy również do pierwszej grupy: tu wartość napięcia kompensującego uzależniono od wartości podstawowej harmonicznej prądu fazowego, w celu kompensacji spadku tej harmonicznej napięcia. Metoda wprowadza napięcie kompensujące w kształcie prostokąta, który sam jest źródłem zniekształceń harmonicznych napięcia wyjściowego. Do drugiej grupy należy metoda opisana w [4], w której zaproponowano obserwator zniekształceń (dla falownika zasilającego maszynę synchroniczną). Ma on na celu wyznaczenie składowych napięcia kompensacji w czasie rzeczywistym. W metodzie tej wymagana jest estymacja siły elektromotorycznej silnika na podstawie pomiaru prądu i prędkości kątovej. Algorytm zaprezentowany w [3] wykorzystuje nieliniową kompensację wpływu czasu martwego, przy czym wartość odkształceń od czasów martwych uzależniono od wartości prądów fazowych, natomiast składowa napięcia błędu zależy od spadku napięcia na przewodzących elementach półprzewodnikowych, uzależniono dodatkowo od temperatury. Metoda ta pozwala na precyzyjne odtwarzanie napięcia zadanego przez falownik, jednak wymaga wyznaczenia charakterystyk przewodzenia tranzystora i diody. W artykule [2] zaprezentowano sposób pomiaru napięcia błędu jako ciągłej nieliniowej funkcji prądu fazowego. Metoda ta zapewnia w miarę dokładne odwzorowanie podstawowej harmonicznej na wyjściu falownika oraz ograniczenie zniekształceń nieliniowych. Wymaga

ona jednak wykonania pomiaru napięcia błędu (wymagany jest dostęp do obwodu pośredniczącego).

Metody, które zapewniają wysoką jakość kompensacji, są zależne od szczegółowej wiedzy o parametrach obciążenia falownika (przewodu łączącego falownik z maszyną i samej maszyny). Symulowanie falownika i jego obciążenia wymaga przeprowadzenia szeregu pomiarów, a dowolna zmiana w układzie powoduje uzyskanie parametrów dalekich od optymalnych.

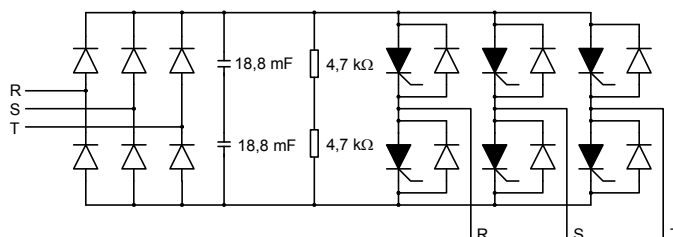
3. WYNIKI PRACY MODELU TYRYSTOROWEGO FALOWNIKA NAPIĘCIA

W ramach badań został zbudowany i uruchomiony model tyrystorowego falownika napięcia o mocy 100 kW przedstawiony na rysunku 3.



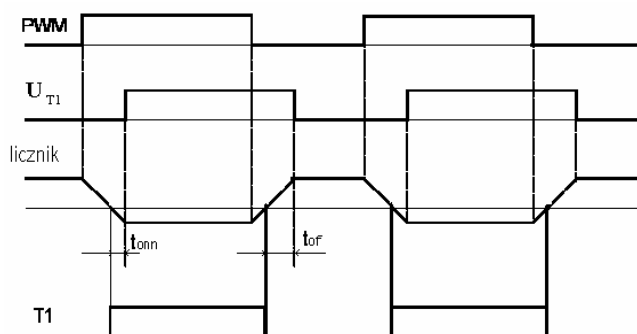
Rys. 3. Układ badawczy falownika napięcia o mocy 100 kW

Schemat obwodu głównego przekształtnika częstotliwości zaprezentowany jest na rysunku 4. Wybrane przebiegi zostały umieszczone w pracy.



Rys. 4. Schemat obwodu głównego przekształtnika

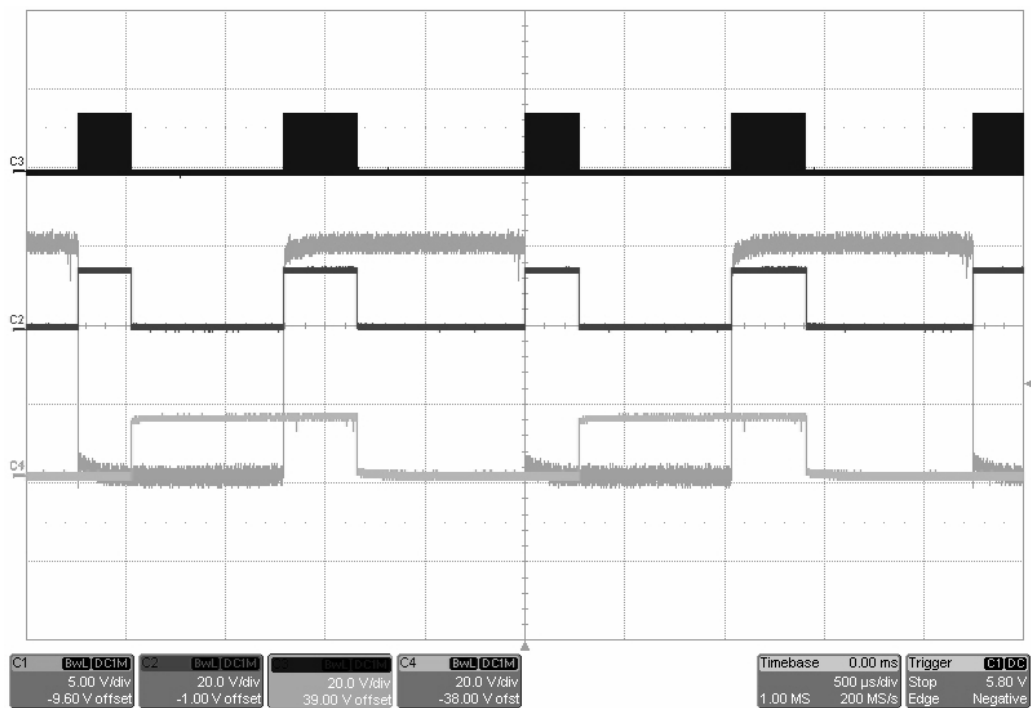
Obecnie trwają prace nad implementacją programową kompensacji czasów martwych. W procesorze SAB166, który generuje sygnały PWM, jest modyfikowany program aby mógł, na podstawie pomiarów, zrealizować algorytm kompensacji czasów martwych. Był on wcześniej realizowany w sposób sprzętowy. Zasadę działania zastosowanego algorytmu przedstawiono na rysunku 5. Polega on na porównaniu sygnału wypracowanego przez modulator szerokości impulsów (przebieg PWM) z sygnałem napięcia dla danej fazy falownika (U_{T1}) i całkowaniu różnicy tych sygnałów. Chwila przejścia przez zero wartości całki wyznacza początek i koniec impulsu sterującego dany tyrystor. Wysoki stan sygnału oznacza załączenie T1, a niski jego wyłączenie. Czas załączenia i wyłączenia oznaczono jako t_{on} i t_{off} . Przebiegi pokazujące pracę układu korekcji czasów martwych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



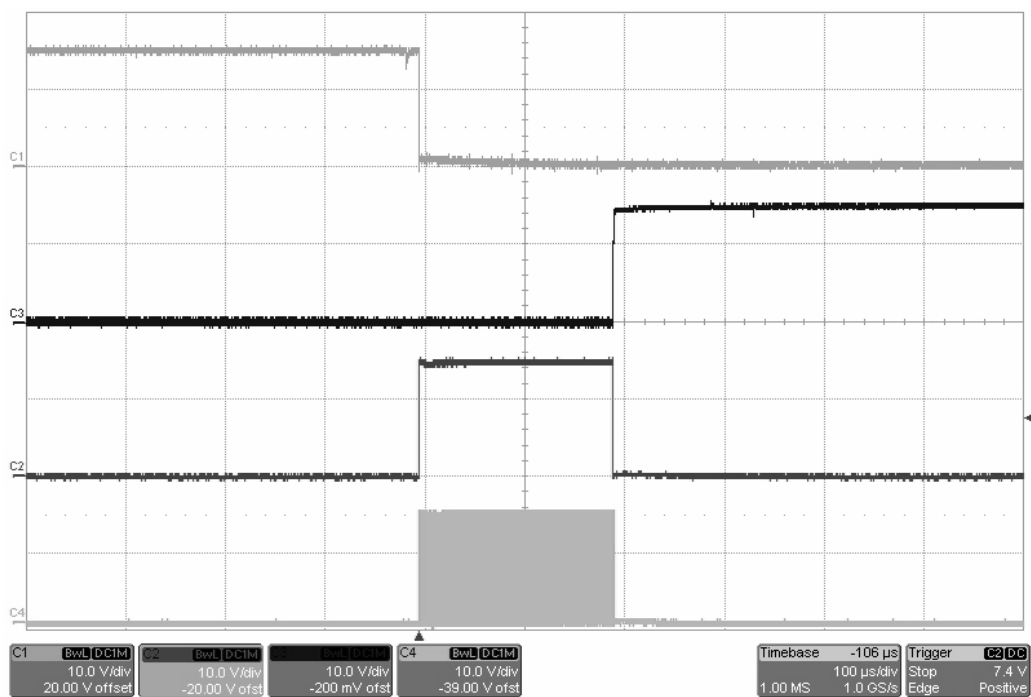
Rys. 5. Zasada działania korekcji czasów martwych

Na rysunkach 8 i 9 przedstawione są przebiegi obrazujące pracę układu. Na oscylogramach przedstawione są przebiegi PWM dla górnego i dolnego tyrystora (RH i RL). Na lewym oscylogramie jest pokazany przebieg prądu silnika z kompensacją czasów martwych, natomiast na prawym zamieszczono przebieg prądu bez kompensacji czasów martwych. Przebiegi te zostały zarejestrowane w układzie z sprzętową kompensacją czasów martwych.

a)

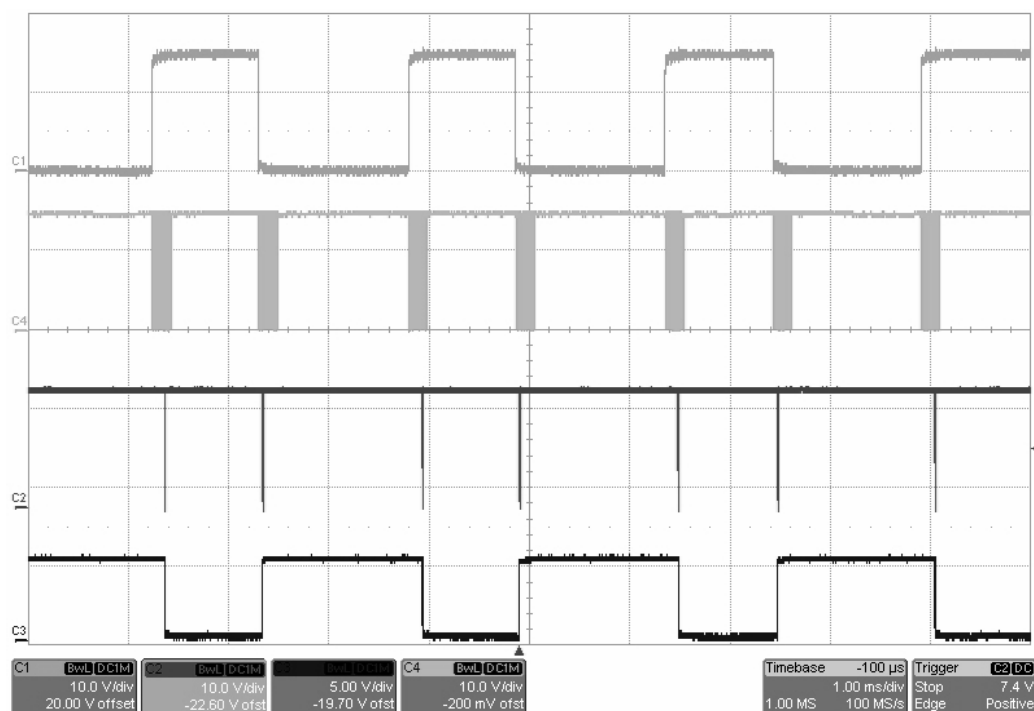


b)

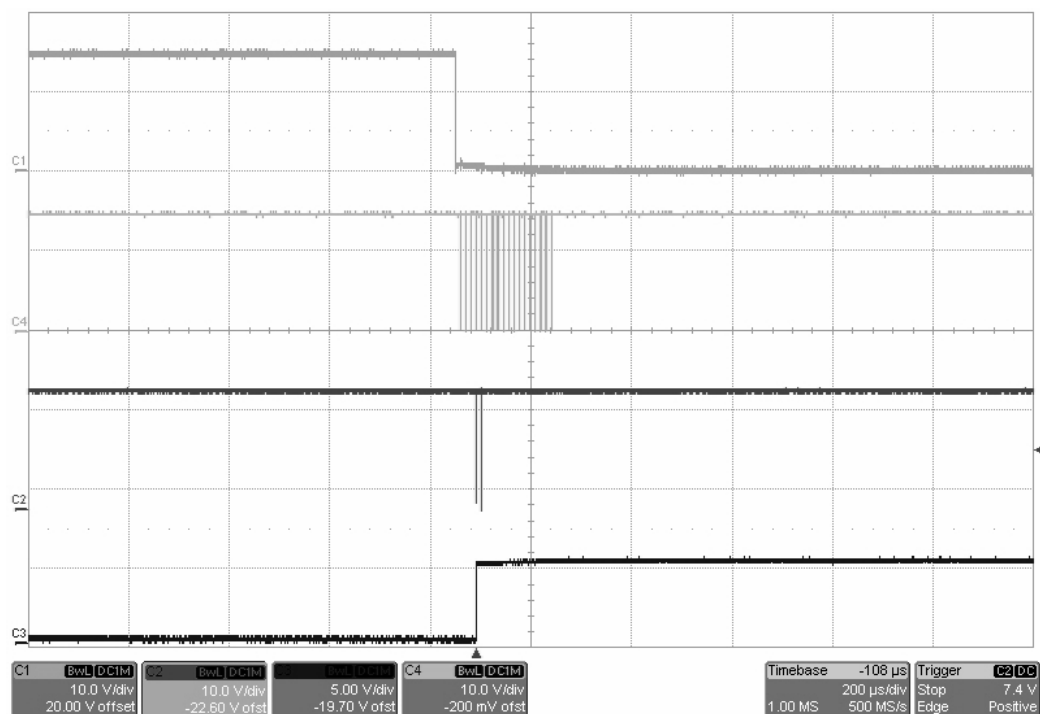


Rys. 6. Komparacja sygnału PWM (C1): a) z zanegowanym sygnałem napięcia na tyrystorze (C4), b) powiększony przebieg pracy liczników

a)

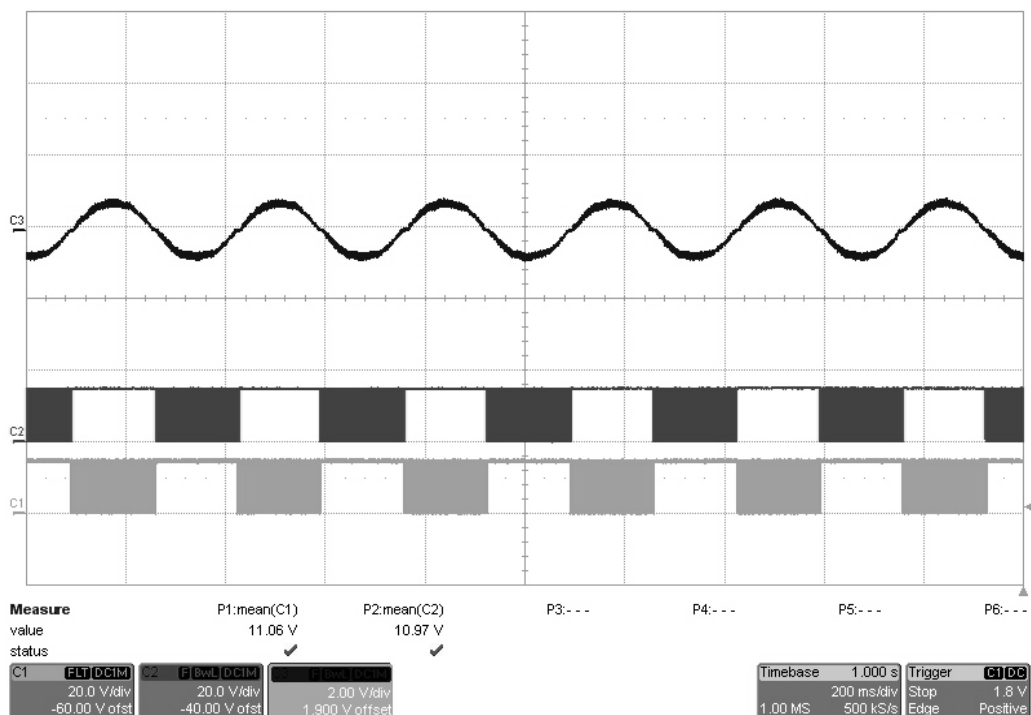


b)

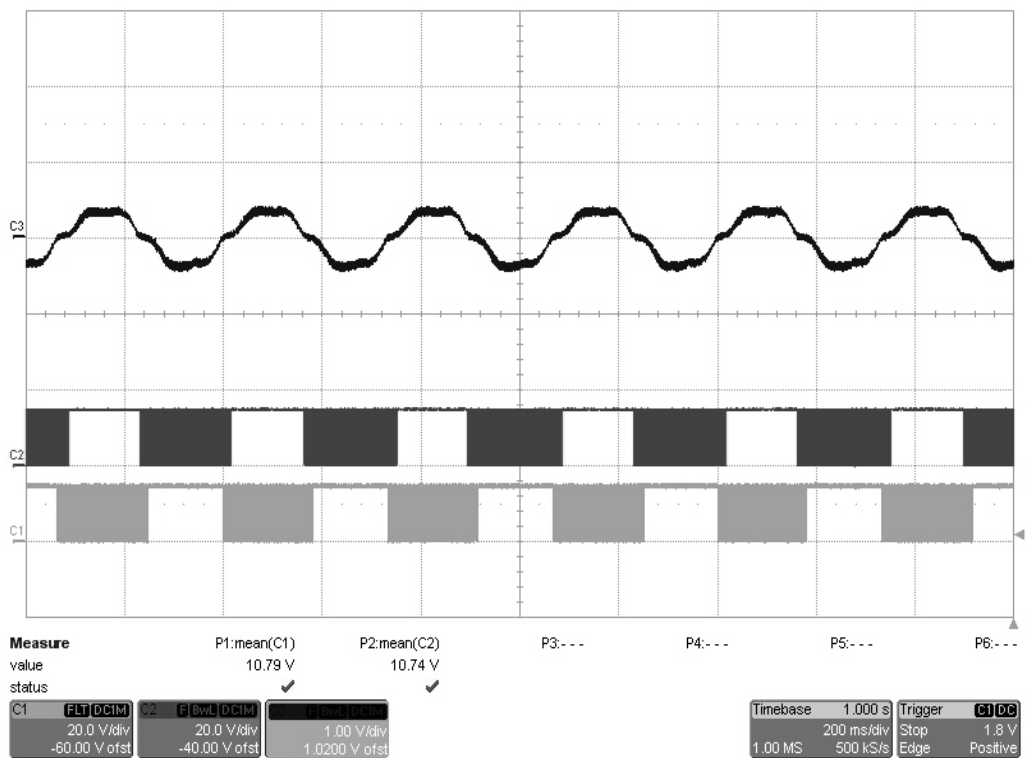


Rys. 7. Analiza pracy układu kompensacji czasów martwych a): sygnał PWM (C1), wyjście młodszej części licznika (C4); wyjście starszej części licznika (C2), sygnał PWM na wyjściu układu kompensacji czasów martwych (C3) b) powiększony fragment przebiegu poprzedniego

a)

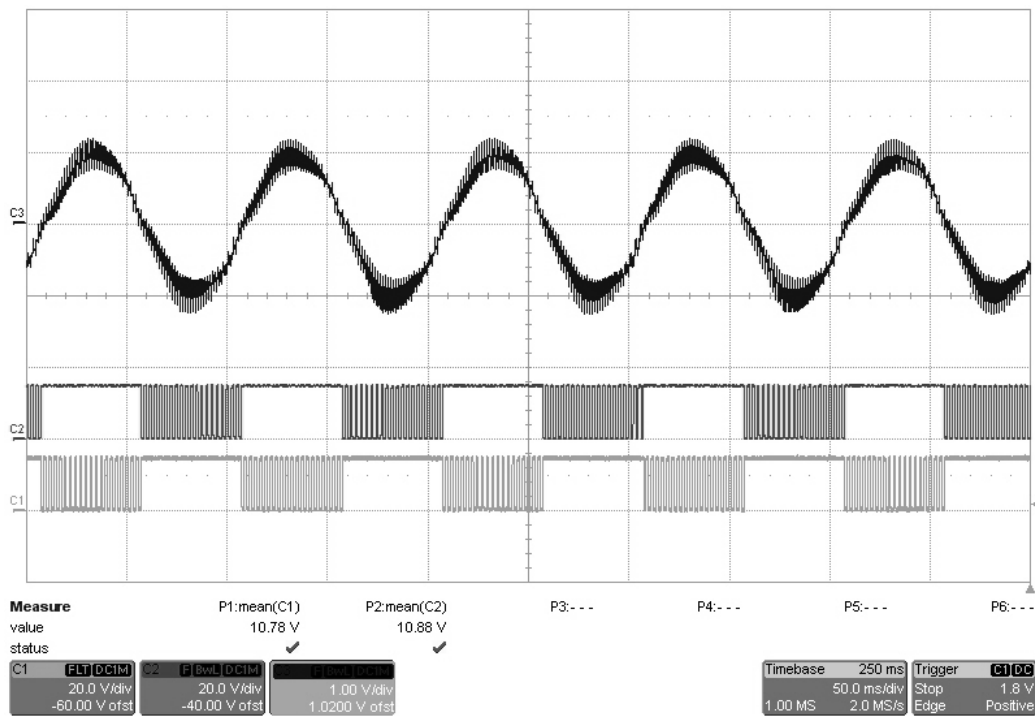


b)

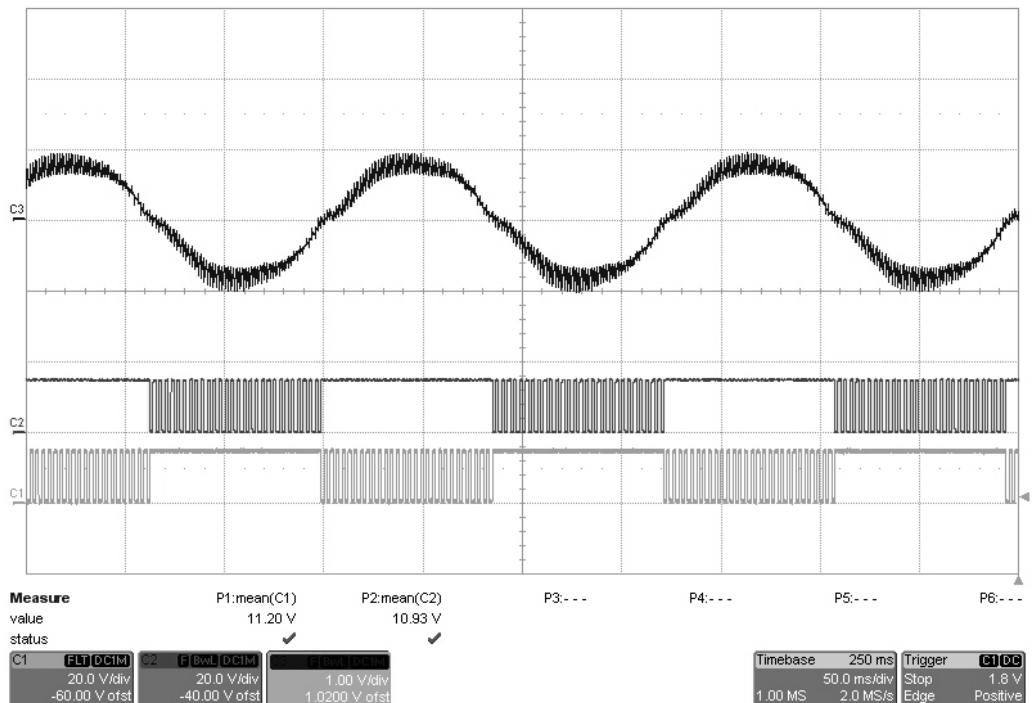


Rys. 8. Prąd silnika: a) z kompensacją czasów martwych, b) bez kompensacji; C3 – prąd silnika fazy R; C1 i C2 – przebiegi PWM dla RH i RL; dla prądu wzбудzenia $I_{wzb} = 1$ A i częstotliwości wyjściowej $f = 3$ Hz.

a)



b)



Rys. 9. Prąd silnika: a) z kompensacją czasów martwych, b) bez kompensacji; C3 – prąd silnika fazy R ; C1 i C2 – przebiegi PWM dla RH i RL; dla prądu wzbudzenia $I_{wzb} = 1A$ i częstotliwości wyjściowej $f = 5$ Hz.

Na powyższych rysunkach jest pokazany kształt prądu dla 3 i 5 Hz. Praca falownika z obciążeniem dla niskich częstotliwości (poniżej 10 Hz) bez kompensacji jest niestabilna, utrudniony jest rozruch silnika. Powodem jest zawartość wyższych harmoniczných, szczególnie dla niskich częstotliwości i małego obciążenia i zniekształcenie napięcia wyjściowego falownika.

4. ZAKOŃCZENIE

W artykule przedstawione są wyniki związane z analizą tyrystorowego falownika napięcia i wpływem czasów martwych na jego pracę. W Zakładzie Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki został zbudowany i uruchomiony model badawczy tyrystorowego falownika napięcia. Do sterowania przekształtnikiem wykorzystano mikroprocesorowy układ sterowania oraz układ do kompensacji czasów martwych zrealizowany w sposób sprzętowy. Układy te zostały opracowane dla tyrystorowego falownika napięcia o mocy 1 MW. Układy mikroprocesorowe realizujące kompensację czasów martwych zajmują mniej miejsca i są łatwiej modyfikowalne w porównaniu z układami realizującymi kompensację sprzętowo.

Nowoczesne układy sterowania pozwalające na lepszą diagnostykę, zwiększają niezawodność układu, oraz umożliwiają jego współpracę z nadrzędnym systemem sterowania.

LITERATURA

- 1 Weichbold P., Raumer T.: Influence of Dead Time Effects of PWM-VSI I on Current Control. *EPE2001. Graz 2001.*
- 2 Kerkman. R. J., Legatte D., Schlegel D. W., Winterhalter C.: Effects of Parasitics on the Control of Voltage Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, 2003.
- 3 Kim H.-S., Moon H.-T., Youn M.-J.: On-line Deadtime Compensation Method Using Disturbance Observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, No. 6, 2003, str. 1336-1345.
- 4 Choi J. - W . , Sul S.-K.: A New Compensation Strategy Reducing Voltage/Current Distortion in PWM VSI Systems Operating with Low Output Voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, 1995.
- 5 Munoz A. R., Lipo T. A.: On-Line DeadTime Compensation Technique for Open-Loop PWM-VSI Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 4, 1999.
- 6 Holmes D.G., Lipo T. A.: Pulse Width Modulation for Power Converters. *IEEE Press series on Power Engineering*, 2003.

- 7 Leggate D., Kerkman R. J.: *Pulse Based Dead Time Compensator for PWM Voltage Inverters*; *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002.
- 8 Bartosiewicz L., Zakrzewski Z.: *Przekształtnik z tyrystorami GTO o mocy 1 MVA*, Zakład Przekształtników Mocy, IEL, 1994.
- 9 Cichowski A., Nieznański J.: Adaptacyjna kompensacja wpływu czasu martwego w falowniku napięcia z modulacją szerokości impulsów *Przegląd Elektrotechniczny* nr 10/2004.

Rękopis dostarczono dnia 3.11.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Stefan F. FILIPOWICZ

DEAD TIME INFLUENCE ON HIGH POWER CONVERTERS WORK BASED ON 1MVA THYRISTOR VOLTAGE INVERTER

Grzegorz GROCHOWSKI

ABSTRACT *This article presents research connected with thyristor voltage inverter analysis. Paper shows influence of dead time on inverter work - output voltage shape distortion, instability at low frequency work. Author presents a comparison of different dead time compensation methods, and concludes with the results of research on 100kW thyristor voltage inverter.*