

XVI Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2006
Oddział Gdański PTETiS
Referat nr 2

**KOMPENSACJA ZNIEKSZTAŁCEŃ NAPIĘCIA
WYJŚCIOWEGO FALOWNIKA W PRZYPADKU
ZMIENNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI NOŚNEJ**

**Artur CICHOWSKI¹, Janusz NIEZNAŃSKI², Wojciech ŚLESZYŃSKI³,
Andrzej WOJEWÓDKA⁴**

Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk,

- | | | |
|--------------------|----------------|------------------------------|
| 1. tel: 347-25-48, | fax: 341-08-80 | e-mail: arcich@ely.pg.gda.pl |
| 2. tel: 347-16-75, | fax: 341-08-80 | e-mail: jniez@ely.pg.gda.pl |
| 3. tel: 347-29-54, | fax: 341-08-80 | e-mail: wslesz@ely.pg.gda.pl |
| 4. tel: 347-25-48, | fax: 341-08-80 | e-mail: awojew@ely.pg.gda.pl |

Przedstawiono zastosowanie metody adaptacyjnej w przypadku zmiennej wartości częstotliwości nośnej. Metoda adaptacyjna umożliwia automatyczne dopasowanie parametrów kompensacji do aktualnych parametrów falownika i obciążenia, np. po zmianie przewodu łączącego falownik z obciążeniem. Adaptacja do nowych warunków polega na dostrajaniu wartości parametrów zależności opisującej napięcie błędu w funkcji prądu fazowego.

1. WPROWADZENIE

Źródłem zniekształceń napięć wyjściowych falownika są nieidealne charakterystyki statyczne i dynamiczne tranzystorów i diod zwrotnych oraz interakcje falownika z maszyną i przewodem łączącym falownik z maszyną [1]. Tranzystory IGBT cechuje dłuższy czas wyłączenia niż załączania, zatem w celu uniknięcia jednoczesnego przewodzenia obu tranzystorów w danej gałęzi falownika wprowadza się czas martwy, który opóźnia załączanie poszczególnych tranzystorów. Efektem czasu martwego jest generacja najbardziej znaczącej składowej zniekształceń na wyjściu falownika. Oprócz zniekształceń wynikających bezpośrednio z czasu martwego istotny jest także wpływ asymetrii opóźnień propagacyjnych tranzystorów IGBT i ich sterowników. Na zniekształcenia napięcia wyjściowego falownika wpływają także pojemności pasożytnicze elementów półprzewodnikowych, przewodu łączącego falownik z maszyną oraz maszyny [1]. Obok czasu martwego, istotnym czynnikiem wpływającym na zniekształcenia napięcia są spadki napięcia na przewodzących tranzystorach i diodach zwrotnych.

Zniekształcenia napięć powodują zmniejszenie sprawności układu napędowego, pulsacje momentu elektromagnetycznego, fluktuacje prędkości kątowej, a nawet niestabilną

pracę układu napędowego w przypadku sterowania w układzie otwartym z zachowaniem stałego stosunku U/f [3]. W przypadku sterowania w układzie zamkniętym zniekształcenia napięcia powodują dodatkowo pogorszenie jakości estymacji strumienia [4], prędkości kątowej i parametrów modelu maszyny.

2. ISTOTA METODY ADAPTACYJNEJ

Charakterystyczną cechą metod, które zapewniają stosunkowo wysoką jakość kompensacji (np. [1, 5]) jest ich zależność od szczegółowej wiedzy na temat warunków obciążenia falownika (parametry maszyny, przewodu łączącego falownik z maszyną i in.). Teoretyczne i/lub eksperymentalne modelowanie falownika i jego obciążenia wymaga przeprowadzenia szeregu pomiarów przez odpowiednio wykwalifikowany personel. Ponadto po ewentualnych modyfikacjach układu, choćby pozornie nieznacznych (np. wymiana przewodu) uzyskane wartości parametrów mogą okazać się dalekie od optymalnych.

Zniekształcenia harmoniczne napięcia wyjściowego falownika są bezpośrednią przyczyną odpowiednich zniekształceń harmonicznych prądu fazowego. A zatem wyznaczając na bieżąco poziom zniekształceń nieliniowych prądu można oceniać jakość zastosowanej kompensacji i odpowiednio modyfikować jej parametry.

Aby możliwe było automatyczne strojenie algorytmu kompensacji napięcia zniekształceń, konieczne jest wyrażenie napięcia kompensującego za pomocą modyfikowalnych parametrów.

$$\Delta\hat{u}_{a0} = \begin{cases} -\frac{\Delta\hat{T}}{T_c}u_{dc} - \frac{\hat{C}_{TD}u_{dc}^2}{T_c i_a} & \text{dla } i_a \leq -\frac{2\hat{C}_{TD}}{\Delta\hat{T}}u_{dc} \\ \frac{\Delta\hat{T}^2}{4\hat{C}_{TD}T_c}i_a & \text{dla } -\frac{2\hat{C}_{TD}}{\Delta\hat{T}}u_{dc} < i_a < \frac{2\hat{C}_{TD}}{\Delta\hat{T}}u_{dc} \\ \frac{\Delta\hat{T}}{T_c}u_{dc} - \frac{\hat{C}_{TD}u_{dc}^2}{T_c i_a} & \text{dla } i_a \geq \frac{2\hat{C}_{TD}}{\Delta\hat{T}}u_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: $\Delta\hat{u}_{a0}$ – estymowane napięcie zniekształceń, $\Delta\hat{T}$ – pierwszy parametr charakterystyki napięcia zniekształceń, \hat{C}_{TD} – drugi parametr charakterystyki napięcia zniekształceń, u_{dc} – napięcie obwodu pośredniczącego, T_c – okres modulacji.

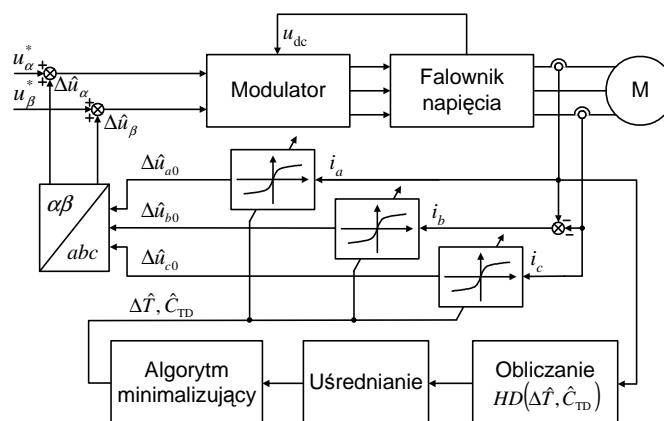
Wskaźnik zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu prądu, wykorzystywany jako miara jakości kompensacji, miał następującą postać [2]:

$$HD(\Delta\hat{T}, \hat{C}_{TD}) = \frac{I_5^2 + I_7^2}{I_1^2} \quad (2)$$

gdzie: I_1 – amplituda podstawowej harmonicznej, I_5 – amplituda piątej harmonicznej, I_7 – amplituda siódmej harmonicznej.

Jako algorytm optymalizacyjny wykorzystano metodę gradientową bazującą na tzw. eksperymencie gwiazdowym dwustronnym. Ogólny schemat blokowy adaptacyjnego algo-

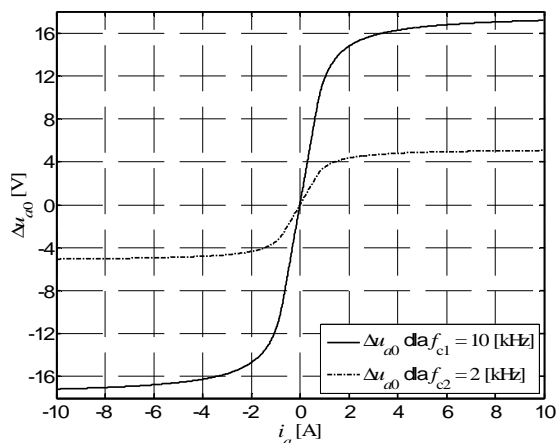
rytmu kompensacji wpływu czasu martwego przedstawiono na rysunku 1. Bardziej szczegółowo metodę adaptacyjną kompensacji napięcia zniekształceń omówiono w [2].



Rys. 1. Schemat blokowy przedstawiający proponowany algorytm strojenia i kompensacji zniekształceń napięć wyjściowych falownika.

3. ZASTOSOWANIE METODY ADAPTACYJNEJ W PRZYPADKU ZMIENNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI NOŚNEJ

Adaptacyjnej metody kompensacji napięcia zniekształceń nie można bezpośrednio zastosować w przypadku zmiennej wartości częstotliwości nośnej. Uzyskiwane wartości parametrów zależności opisującej napięcie zniekształceń w funkcji chwilowych wartości prądu fazowego (1) są słuszne tylko dla danej częstotliwości nośnej (rys. 2).



Rys. 2. Charakterystyki napięcia zniekształceń otrzymane na podstawie adaptacji przeprowadzonych dla częstotliwości nośnej $f_{c1} = 10$ kHz i $f_{c2} = 2$ kHz

W celu umożliwienia wykorzystania proponowanej metody w przypadku zmiennej wartości częstotliwości nośnej należy wykonać dekompozycję napięcia zniekształceń na dwie składowe. Jedną, której wartości nie zależą od częstotliwości nośnej i drugą, której wartości zależą liniowo od częstotliwości nośnej. Dekompozycję można wykonać na podstawie wyników adaptacji algorytmu kompensacji dla dwu różnych wartości częstotliwości nośnej (rys. 2). Odejmując od siebie otrzymane charakterystyki napięcia zniekształceń, można wyznaczyć składową o wartościach zależnych od częstotliwości nośnej:

$$\Delta \hat{u}_{a0_dt}(i_a, f_c) = \frac{\Delta \hat{u}_{a0_fc1}(i_a) - \Delta \hat{u}_{a0_fc2}(i_a)}{f_{c1} - f_{c2}} f_c \quad (3)$$

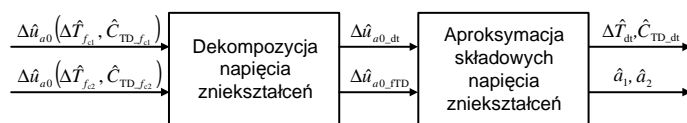
gdzie: $\Delta \hat{u}_{a0_dt}(i_a, f_c)$ – estymata składowej napięcia błędu o wartościach zależnych od częstotliwości nośnej, $\Delta \hat{u}_{a0_fc1}(i_a), \Delta \hat{u}_{a0_fc2}(i_a)$ – charakterystyki napięcia zniekształceń odpowiadające dwóm stałym wartościom częstotliwości nośnej f_{c1} i f_{c2} , f_c – bieżąca wartość częstotliwości nośnej.

Składową, której wartości nie zależą od częstotliwości nośnej można wyznaczyć jako różnicę otrzymanej charakterystyki napięcia zniekształceń dla danej wartości częstotliwości nośnej i składowej o wartościach zależnych od częstotliwości nośnej:

$$\Delta \hat{u}_{a0_rtd}(i_a) = \Delta \hat{u}_{a0_fc1}(i_a) - \Delta \hat{u}_{a0_dt}(i_a, f_{c1}) \quad (4)$$

gdzie: $\Delta \hat{u}_{a0_rtd}(i_a)$ – estymata składowej napięcia błędu o wartościach niezależnych od częstotliwości nośnej.

Obie otrzymane charakterystyki składowych napięcia zniekształceń można stosunkowo precyzyjnie aproksymować funkcją sklejaną o postaci (1). Podsumowując, obliczenia prowadzone off-line sprowadzają się do wyznaczenia dwu par parametrów, $\Delta \hat{T}_{dt}, \hat{C}_{TD_dt}$ i \hat{a}_1, \hat{a}_2 , na podstawie dwu otrzymanych adaptacyjnie charakterystyk, które opisane są następującymi parami parametrów $\Delta \hat{T}_{fc1}, \hat{C}_{TD_fc1}$ i $\Delta \hat{T}_{fc2}, \hat{C}_{TD_fc2}$ (rys. 3).



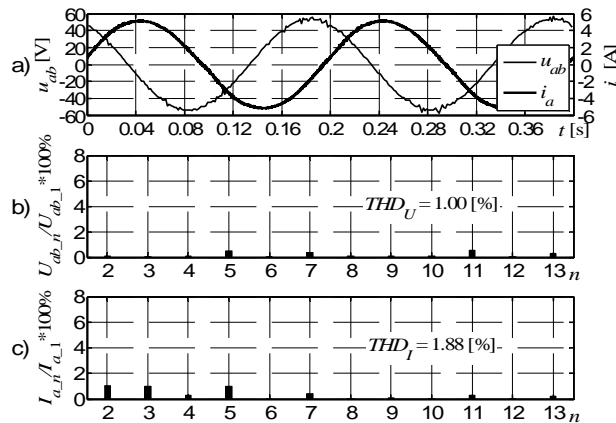
Rys. 3. Schemat ilustrujący procedurę wyznaczania parametrów charakterystyk składowych napięcia zniekształceń

4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

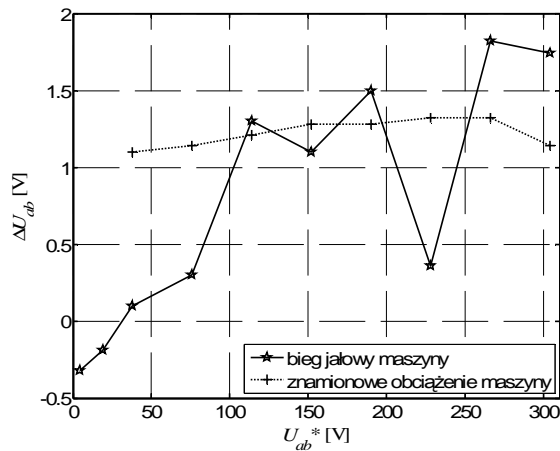
Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych w przypadku otwartego układu sterowania przy zachowaniu stałego stosunku U/f (38V/5Hz), jednakże algorytm kompensacji z powodzeniem testowano także w układzie sterowania połowo zorientowanego. Falownik

jest zbudowany z trójfazowego mostka tranzystorowego MG50Q6ES40DS o parametrach 50 A/1200 V. Generowany przez układ sterowania czas martwy wynosił 3,5 μ s, a częstotliwość nośną zmieniano w zakresie 1,6 kHz \div 14 kHz. Obciążenie falownika stanowiła maszyna indukcyjna o mocy 5,5 kW biegnąca jałowo (rys. 4, 5) i obciążona znamionowo (rys. 5). Algorytm kompensacji zrealizowano wykorzystując układ uruchomieniowy z procesorem sygnałowym TMS320C6711 i zaprojektowaną w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych kartę-córkę wyposażoną w programowalny układ logiczny Acex-1K firmy Altera. Do akwizycji danych wykorzystano szerokopasmowy analizator mocy NORMA D6000.

Na rysunku 4 przedstawiono uśredniony przebieg napięcia przewodowego i przebieg prądu fazowego oraz widma tych przebiegów w przypadku metody adaptacyjnej i zmiennej wartości częstotliwości nośnej. Błąd wartości skutecznej napięcia wyjściowego falownika przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. (a) Uśredniony przebieg napięcia przewodowego i przebieg prądu fazowego w przypadku zastosowania metody adaptacyjnej dla zmiennej wartości częstotliwości nośnej $f_c \in [1,6 ; 14]$ kHz; (b) widmo napięcia przewodowego; (c) widmo prądu fazowego



Rys. 5. Błąd wartości skutecznej podstawowej harmonicznej napięcia przewodowego dla znamionowego obciążenia i biegu jałowego maszyny indukcyjnej w przypadku metody adaptacyjnej i zmiennej częstotliwości nośnej $f_c \in [1,6; 14]$ kHz

Zastosowanie proponowanej metody kompensacji czasu martwego prowadzi do znacznego ograniczenia zniekształceń nieliniowych zarówno dla stałej i zmiennej w szerokim zakresie częstotliwości nośnej. Można stwierdzić, iż proponowana metoda zapewnia dużą dokładność odwzorowania amplitudy podstawowej harmonicznej dla stałej i zmiennej częstotliwości nośnej. Błąd wartości skutecznej w całym liniowym zakresie zmian współczynnika głębokości modulacji, zarówno dla biegu jałowego, jak i znamionowego obciążenia maszyny, w przypadku zmiennej częstotliwości nośnej nie przekraczał 1,8 V.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiono zastosowanie adaptacyjnej metody [2] kompensacji napięcia zniekształceń w przypadku zmiennej częstotliwości nośnej. Metoda ta zapewnia staranne dopasowanie charakterystyki kompensacji do aktualnie występującej charakterystyki napięcia zniekształceń zarówno dla stałej jak i zmiennej wartości częstotliwości nośnej. Prowadzi to do występowania małych wartości zniekształceń zarówno liniowych jak i nieliniowych w przypadku wykorzystania proponowanej metody.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Kerkman.R. J., Legatte D., Schlegel D. W., Winterhalter C.: Effects of Parasitics on the Control of Voltage Source Inverters, IEEE Trans. on Power Electron., 2003, Vol. 18, no. 1, s. 140-150.
2. Cichowski A., Nieznański J.: Self-Tuning Dead-Time Compensation Method for Voltage-Source Inverters. IEEE PE Letters, , Vol. 3, No. 2, June 2005.
3. Nowacki Z., Modułacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego, Wydawnictwo PWN, 1991.
4. Shi B., Venkataramanan G., Chandorkar M. C.: Modeling and Design of a Flux Regulator for Three Phase PWM Inverters with Constant Switching Frequency, EPE 2003, Toulouse.
5. Weichbold P., Raumer T.: Influence of Dead Time Effects of PWM-VSI on Current Control, EPE 2001, Graz.

COMPENSATION OF THE OUTPUT VOLTAGE DISTORTION OF THE PWM VOLTAGE-SOURCE INVERTER IN THE CASE OF VARIABLE CARRIER FREQUENCY

This paper discusses the use of self-tuning dead-time compensation method for voltage-source inverters in the case of variable carrier frequency. The tuning, performed real-time, relies on parameter selection of a generic compensation characteristic. Experimental results illustrates the effect of the considered compensation on the linear and harmonic distortion. The approach enjoys a capability of self-tuning to the plant properties and offers high quality of the resultant compensation for both constant and variable carrier frequency.