

Michał GWÓZDŹ¹
Ryszard PORADA²
Zygfryd GLUCHY³

ZASILANIE MASZYNY ELEKTRYCZNEJ Z QUASI-LINIOWEGO STEROWANEGO ŹRÓDŁA NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono wybrane aspekty współpracy silnika indukcyjnego klatkowego z falownikiem MSI. Dokonano analizy jakościowej wpływu właściwości falownika na parametry układu napędowego. Pokazano wyniki badań laboratoryjnych układu napędowego zasilanego z quasi – liniowego źródła napięcia sterowanego procesorem sygnałowym. W części końcowej przedstawiono przemienniki częstotliwości SINVERTER realizujące w praktyce koncepcję takiego źródła.

1. WPROWADZENIE

Przemienniki częstotliwości z falownikami MSI pozostają od wielu lat najszybciej rozwijającą się gałęzią światowego przemysłu energoelektronicznego. Jednocześnie prowadzone są badania związane z negatywnymi zjawiskami, jakie wywołuje szerokie stosowanie falowników tego typu, szczególnie w napędzie elektrycznym. Dotyczy to między innymi wpływu zasilania silnika z falownika MSI na jego trwałość i niezawodność, a także oddziaływań całego układu napędowego na otoczenie. Problemy te rzutują zarówno na kompatybilność elektromagnetyczną napędu (EMC), jak również wpływem wytwarzanego hałasu oraz drgań na środowisko. Zwiększony poziom hałasu oraz awaryjność napędów częstotliwościowych z MSI występują szczególnie wtedy, gdy po pracach modernizacyjnych napędów, przemienniki częstotliwości współpracują z silnikami indukcyjnymi starszych typów, przystosowanymi raczej do bezpośredniego zasilania z sieci elektroenergetycznej. Stosowanie falowników MSI do zasilania maszyn elektrycznych powoduje również szereg problemów typowo eksploatacyjnych, jak na przykład: błędne działanie zabezpieczeń, możliwość pojawienia się potencjału na obudowie silnika, przepięcia w obwodzie falownika lub silnika czy elektroerozja łożysk.

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, tel.: 061/6652630, e-mail: porada@put.poznan.pl

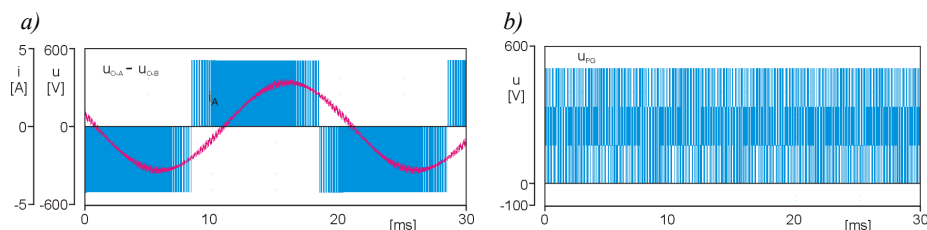
² Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, tel.: 061/6652646, e-mail: michal.gwozdz@eranet.pl

³ ALFINE P.E.P., ul. Poznańska 30-32, 62-080 Tarnowo Podgórne, tel.: 061/8966934, e-mail: gluchy@alfine.pl

2. WPLYW ZASILANIA Z FALOWNIKA MSI NA PRACĘ SILNIKA INDUKCYJNEGO

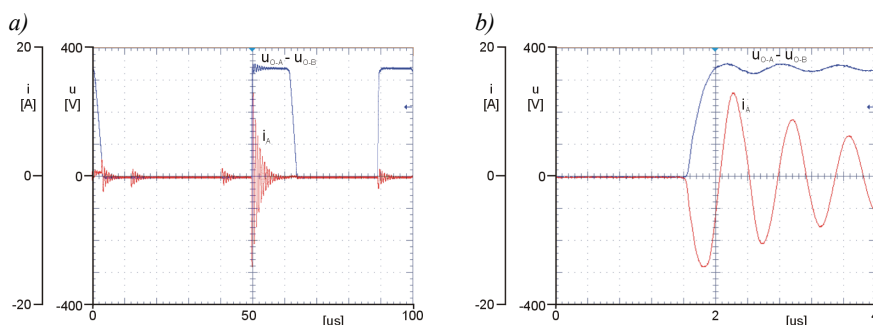
Badania wpływu na parametry układu napędowego sposobu zasilania maszyny elektrycznej, prowadzone w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania Politechniki Poznańskiej oraz ALFINE P.E.P., pozwoliły ocenić niektóre wskaźniki ilościowe oraz jakościowe charakteryzujące pracę elektrycznego układu napędowego. Należą do nich przede wszystkim: sprawność energetyczna, poziom zakłóceń elektromagnetycznych oraz poziom emitowanego hałasu.

Głównym powodem niekorzystnego oddziaływania falownika MSI na maszynę elektryczną jest bardzo duża stromość zmian napięcia na jego wyjściu – rzędu kilku kV/ μ s. Wynika ona z coraz lepszych parametrów dynamicznych nowoczesnych zaworów półprzewodnikowych mocy (IGBT, MOS), które, z jednej strony pozwalają na zwiększenie jakości sterowania i sprawności energetycznej samego przekształtnika, z drugiej rodzą nowe problemy techniczno – eksploatacyjne układu. Na rys. 1 pokazano przebiegi napięcia międzyfazowego, prądu fazy oraz napięcia punktu gwiazdowego silnika klatkowego małej mocy zasilanego ze standardowego falownika MSI.



Rys. 1. Przebiegi napięcia międzyfazowego i prądu fazowego (a) oraz napięcia punktu gwiazdowego (b) silnika klatkowego małej mocy zasilanego ze standardowego falownika MSI

Przebieg prądu zawiera widoczne składowe MSI (a), a potencjał punktu gwiazdowego (b) podlega bardzo dużym i szybkim zmianom – w następstwie zmian napięć na wyjściach poszczególnych gałęzi falownika. Rys. 2 ilustruje przebieg prądu fazowego związanego z momentem przełączenia zaworów jednej z gałęzi przekształtnika.



Rys. 2. Przebieg prądu fazowego (kolor czerwony) związanego z momentem przełączenia zaworów w jednej z gałęzi przekształtnika (kolor niebieski) (a); na rysunku (b) – szczegóły obu przebiegów przy rozszerzonej podstawie czasu

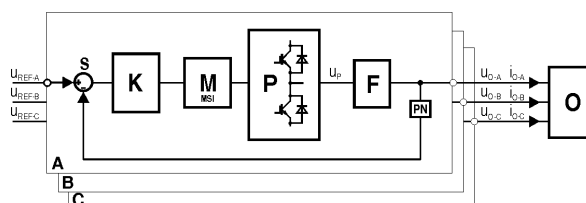
Rejestracji dokonano w krótkim przedziale czasu (rys. 2 b), co pozwala ocenić szczegóły zachodzących zjawisk. Przepływ prądu ma tutaj charakter udarowy (periodyczny – o częstotliwości ponad 1 MHz i długim czasie zaniku drgań – rys. 2b) i spowodowany jest pasożytniczymi pojemnościowymi sprzężeniami międzyfazowymi oraz faz z uziemionym korpusem maszyny. Bezpośrednie następstwa, jakie powoduje przepływ tego prądu są wielorakie: miejscowe uszkodzenia izolacji, dodatkowe straty cieplne (a więc spadek sprawności maszyny) oraz elektroerozja łożysk.

W układzie falownik – silnik mogą wystąpić również inne niekorzystne zjawiska związane ze złożoną naturą samego silnika oraz linii transmitującej energię (kabel). Są to: rezonansowe wzmocnienie niektórych składowych przebiegu MSI – w obwodzie RLC, jaki stanowi sam silnik oraz zjawisko powstawania fal odbitych – przy większej długości kabla zasilającego. Zwłaszcza drugie z nich jest groźne dla samego falownika, gdyż w efekcie może powodować przepięcia o amplitudzie nawet 2,5 krotnie przewyższającej ustaloną wartość napięcia obwodu DC. Oprócz tego powodują one pogorszenie jakości sterowania.

Kolejnym źródłem pogorszenia sprawności energetycznej układu napędowego są starty w obwodach magnetycznych maszyny, związane z przepływem prądów wirowych oraz histerezą, będącymi z kolei wynikiem znaczących, wysokoczęstotliwościowych (do kilku MHz) składowych napięcia zasilającego.

3. QUASI-LINIOWE ENERGOELEKTRONICZNE ŹRÓDŁA STEROWANE

Zadaniem układów energoelektronicznych (przekształtników) jest przekształcanie energii elektrycznej pobieranej ze źródła o określonych (najczęściej narzuconych) parametrach, na napięcie (prąd) o kształcie i częstotliwości wymaganej przez odbiornik energii elektrycznej, a także sterowanie przepływem tej energii. Zgodnie z obecnymi tendencjami związanymi z zadaniami polepszania jakości energii, przekształtniki nie powinny zakłócać pracy źródeł energii, pobierając z nich jedynie energię wymaganą do wykonania określonej pracy przez odbiornik za pośrednictwem odpowiednich sygnałów (energetycznych) napięcia lub prądu – w sposób optymalny ze względu na zadania realizowane przez odbiornik [1,2,3]. Rozumiane w ten sposób zdania realizują m.in. energoelektroniczne sterowane źródła napięć lub prądów.

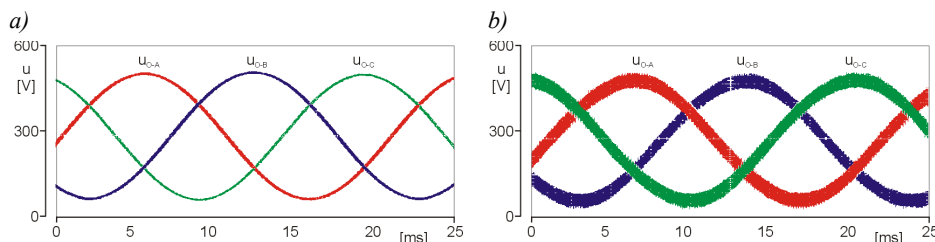


Rys. 3. Schemat blokowy energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia pracującego w układzie 3 – fazowym

Zastosowane tam rozwiązania wykorzystują koncepcję układów zamkniętych (pracujących w pętli ujemnego, napięciowego sprzężenia zwrotnego), czasowo – dyskretnych, sterowanych w systemie MSI (przy stałej wartości częstotliwości nośnej)

oraz jednoczesnym zastąpieniem klasycznych regulatorów szerokopasmowymi przestrajalnymi filtrami cyfrowymi. Dzięki temu możliwy stał się znaczący wzrost jakości sygnałów napięcia (prądu) na wyjściu energetycznym układów w stosunku do sygnałów zadanych (tzn. wierności odwzorowania w nich tychże sygnałów) [4,6,8].

Schemat blokowy energoelektronicznego, niezależnego, sterowanego źródła napięcia, pracującego w układzie 3 – kanałowym (tutaj tożsamym z układem 3 – fazowym) pokazano na rys. 3. Składają się nań następujące elementy (bloki funkcjonalne) – realizujące zadania sterowania dla każdej z faz niezależnie: układ sumacyjny (S), regulator szerokopasmowy w torze sterowania (K), modulator szerokości impulsów (M), falownik energoelektroniczny (P), pasywny filtr wyjściowy (F) oraz przetwornik pomiarowy (PN). Zadaniem filtra wyjściowego jest tłumienie w przebiegu wyjściowym wysokoczęstotliwościowych produktów MSI, szczególnie niepożądanych przy sterowaniu dyskretnym w czasie [7]. Struktura i charakterystyka częstotliwościowa tego filtra jest zależna od zastosowania układu oraz, w pewnej mierze, rodzaju odbiornika. Jest to najczęściej filtr dolnoprzepustowy o strukturze Γ . Przykładowe przebiegi napięcia wyjściowego prototypu laboratoryjnego energoelektronicznego źródła sterowanego pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi napięcia wyjściowego energoelektronicznego źródła sterowanego pracującego w układzie 3 – fazowym dla sinusoidalnego sygnału zadanego o częstotliwości 50 Hz i częstotliwości granicznej filtra (F) 2,7 kHz (a) oraz 7,1 kHz (b); częstotliwość nośna MSI: 16 kHz

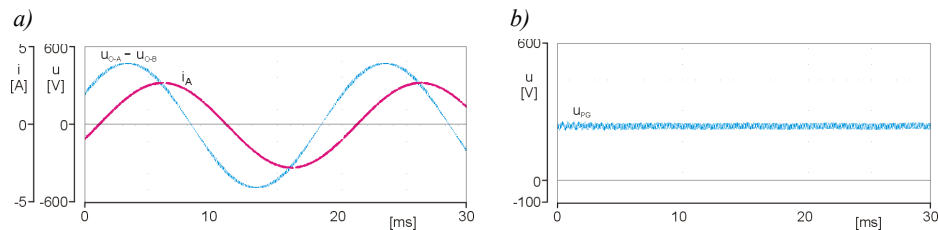
Zniekształcenia nieliniowe (THD) przebiegu wyjściowego (dla sinusoidalnego sygnału zadanego o częstotliwości 50 Hz) nie przekraczają 0,5 % w paśmie 1 kHz. Oznacza to, że jakość napięcia zasilającego odbiornik jest wyższa niż przy zasilaniu go bezpośrednio z przemysłowej sieci energetycznej [5,6], gdzie wartość współczynnika THD jest na ogół znacznie większa – sięga poziomu nawet kilku procent.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, że sterowane źródło napięcia może, w zakresie swojego pasma przenoszenia, generować przebiegi o dowolnym (zadany) kształcie (w tym składową stałą).

4. PRZEKSZTAŁNIKI ENERGOELEKTRONICZNE SINVERTER

Przekształtniki SINVERTER [9] realizują koncepcję energoelektronicznego sterowanego źródła napięcia, którego przebieg wyjściowy odwzorowuje przebieg sterujący (zadany). Wykorzystują one technologię cyfrowych procesorów sygnałowych (DSP) oraz nowoczesnych zaworów IGBT (zintegrowanych z lokalnymi układami sterowania i zabezpieczeń w moduły IPM).

Przekształtniki SINVERTER przeznaczone są do stosowania w układach napędowych oraz urządzeniach energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia, jak generatory przebiegów wzorcowych dużej mocy. Zapewniają one praktycznie sinusoidalne, regulowane napięcie wyjściowe o dużej dokładności odwzorowania sygnałów zadanych. Typowe przebiegi napięć i prądu fazowego przekształtnika pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyczne przebiegi w przekształtniku SINVERTER w postaci napięcia międzyfazowego i prądu fazowego (a) oraz napięcia punktu gwiazdowego (b) silnika klatkowego małej mocy dla częstotliwości granicznej filtru wyjściowego wynoszącej 2,8 kHz; częstotliwość nośna MSI: 12,8 kHz

Jak łatwo zauważyć, przebiegi w układzie, przy zastosowaniu filtru wyjściowego o odpowiednio małej częstotliwości granicznej (rys. 5a oraz 5b) praktycznie pozbawione są wysokoczęstotliwościowych składowych MSI. Współczynnik THD nie przekracza tutaj wartości 1,0 % (w paśmie 1 kHz – dla współczynnika głębokości modulacji o wartości ponad 0,9).

Zastosowanie przemienników SINVERTER znacząco poprawia parametry techniczne układów napędowych, na co składają się: wzrost sprawności energetycznej silnika, praktyczna eliminacja przepięć w linii zasilającej silnik, znaczące ograniczenie poziomu zakłóceń elektromagnetycznych, redukcja hałasu oraz wibracji wytwarzanych przez napęd. Wszystkie wymienione elementy wnoszą szereg istotnych korzyści ekonomicznych, wynikających z: ograniczenia zużycia energii elektrycznej, skrócenia czasu napraw oraz konserwacji (wzrost trwałości mechanicznej napędu), wydłużenie czasu eksploatacji urządzeń, ograniczenie niekorzystnego oddziaływania układu napędowego na środowisko oraz możliwość zastosowania w układzie napędowym standardowego (a więc tańszego) silnika.

5. ZAKOŃCZENIE

Zwiększone wymagania techniczne związane z dokładnością sterowania, szybkością reakcji oraz odpornością na zakłócenia zarówno ze strony odbiornika, jak i zasilania powodują, że wzrasta zapotrzebowanie na układy energoelektroniczne – liniowe ze względu na relacje pomiędzy wejściem i wyjściem. Do takich układów zaliczają się m.in. energoelektroniczne sterowane źródła napięcia. Jednym z ważniejszych obszarów ich zastosowań są układy napędowe, gdzie pozwalają na znaczącą poprawę parametrów technicznych, jak również istotne ograniczenie niekorzystnego oddziaływania eksploatowanych urządzeń na środowisko.

Mimo znacznego zaawansowania technicznego, obecnie, koszt realizacji układów technicznych tego typu niewiele przekracza koszt układów standardowych. Jest to

wynikiem zastosowania w ich konstrukcji nowoczesnych, wysoko zintegrowanych komponentów – w tej liczbie: mikrokontrolerów opartych o technikę DSP, modułów mocy (IPM), czy też elementów pasywnych (filtrów).

6. LITERATURA

1. Walczak J.: *Optymalizacja energetyczno –jakościowych właściwości obwodów elektrycznych w przestrzeni Hilberta*. Monografia, ZN. Pol. Śl., Elektryka, Z. 125, Gliwice 1992.
2. Siwczyński M.: *Metody optymalizacyjne w teorii mocy obwodów elektrycznych*. Inżynieria Elektryczna, Nr 183, Kraków 1995.
3. Porada R.: *Minimal active current in circuits with real sources*. Proc. of 7-th PEMC'96, Budapest, September 1996, 1, 405-409.
4. Porada R., Gwóźdź M.: *Zastosowanie adaptacyjnych filtrów cyfrowych w układach sterowania energoelektronicznych źródeł napięcia i prądu*. Mat. Konf. IC-SPETO'00, Gliwice-Ustroń, 24-27 maja 2000, 329-332.
5. Seliga R. , Koczara W.: *High Quality Sinusoidal Voltage Inverter for Variable Speed AC Drive Systems*, EPE-PEMC2002 Cavtat & Dubrovnik, 9-11 September 2002.
6. Gwóźdź M., Porada R., Frackowiak L.: *3 – Phase Inverter with Sinusoidal Output Voltage*. Proc. of 3-rd International Workshop Compatibility in Power Electronics, CPE'2003, Gdańsk-Zielona Góra, Poland, maj 2003, s. 121 (Abstract), CD-ROM (full paper - s. 170-173).
7. Gwóźdź M., Porada R.: *Wpływ zjawiska aliasingu na pracę szerokopasmowych przekształtników energoelektronicznych*, Mat. XXVII Międzynarodowej Konferencji z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Niedzica, IC-SPETO'04, 26-29 maj 2004, t. 2, s. 293-296.
8. Gwóźdź M., Porada R., Frackowiak L.: *Accurate Power Electronics Current Source for Magnetotherapy*, EPE-PEMC2004 Riga, 2-4 September 2004.
9. *Przekształtniki energoelektroniczne SINVERTER*, Nota techniczna, ALFINE P.E.P., Poznań, 2003.

THE AC MOTOR FED FROM QUASI-LINEAR POWER ELECTRONICS VOLTAGE SOURCE

The paper presents some damaging phenomena within circuit consisting of MSI frequency converter and AC motor. Next, chosen investigation results of DSP controlled adjustable speed drive utilizing power electronics quasi –linear voltage source are described. Finally, industry prototype of such 3 –phase voltage source (SINVERTER) is described too.