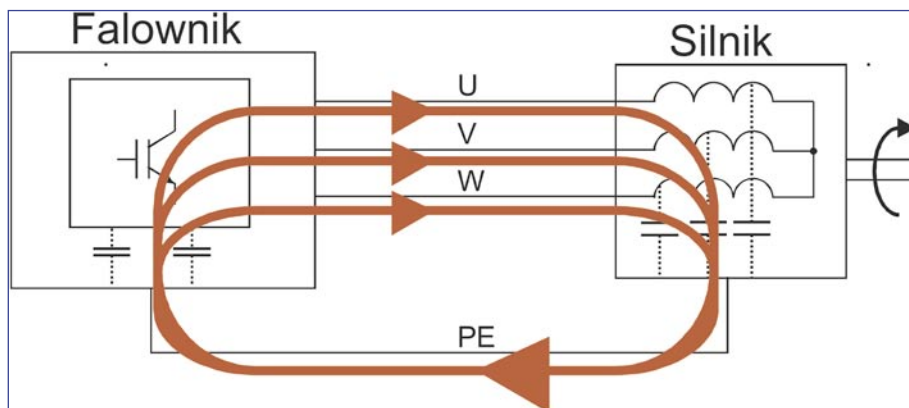


Filtr wyjściowy falownika napięcia

JAROSŁAW GUZIŃSKI, ZBIGNIEW KRZEMIŃSKI

W niektórych przypadkach konieczne jest stosowanie na wyjściu falownika napięcia filtra pasywnego. Zastosowanie odpowiedniego filtra umożliwi uzyskanie na wyjściu prądów i napięć sinusoidalnych przy równoczesnym znaczącym ograniczeniu prądów płynących do obudowy silnika i przewodu ochronnego PE. Przy doborze parametrów filtra należy zwrócić uwagę na to, aby przesunięcie fazowe prądów i napięć przed i za filtrem było jak najmniejsze. Niespełnienie tego warunku uniemożliwi poprawną pracę falowników w układach napędowych m.in. ze sterowaniem polowo zorientowanym (falowniki wektorowe) i sterowaniem z bezpośrednią regulacją momentu elektromagnetycznego silnika (falowniki DTC).

Współczesne falowniki tranzystorowe pracujące z coraz wyższymi częstotliwościami przełączeń umożliwiają precyzyjną regulację m.in. prądu i momentu elektromagnetycznego silnika. Częstotliwości przełączeń tranzystorów w obecnie stosowanych falownikach dochodzą do 15 kHz. W falownikach powszechnie stosuje się nowoczesne tranzystory IGBT o bardzo krótkich czasach załączania i wyłączania. Powoduje to występowanie dużych stromości napięć na wyjściu falownika, co może powodować pojawienie się efektów falowych w kablach zasilających silnik, powodując niebezpieczny wzrost napięcia na zaciskach silnika, występowanie przepięć i związane z tym starzenie się izolacji. Dodatkowo, jeśli na wyjściu falownika generowane są napięcia trójfazowe, których chwilowa suma jest różna od zera, to przez pojemności doziemne kabla zasilającego i silnika płynie prąd składowej zerowej. Wzrost częstotliwości przełączeń powoduje wzrost prądu płynącego przez pojemności pasozytne, jak pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony obwód prądu składowej zerowej

Prąd płynący przez pojemności pasozytne silnika płynie częściowo do wału silnika i przez łożyska do uziemionej obudowy i przewodu ochronnego PE. Przepływ tzw. prądów wałowych powoduje przyspieszoną degradację łożysk. Przepływ prądu w przewodzie PE może również uniemożliwić stosowanie wyłączników różnicowo - prądowych w układach z napędami falownikowymi.

Eliminacja wspomnianych niekorzystnych zjawisk jest możliwa przez ograniczenie stromości napięć wyjściowych falownika oraz wprowadzenie dużej impedancji dla składowej zerowej prądu w wyniku zastosowania filtrów biernych, zawierających w swojej strukturze elementy L, C i R.

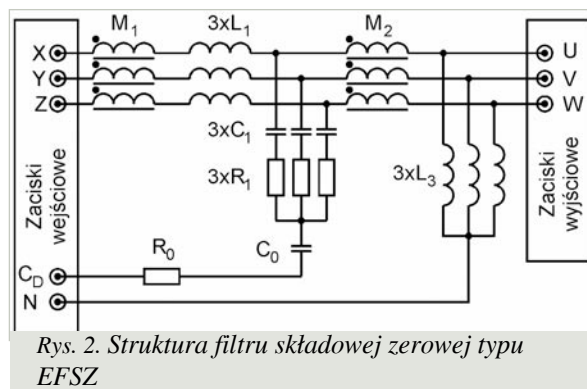
Struktura filtra składowej zerowej

Na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej zaprojektowano serię filtrów składowej zerowej typu EFSZ, bazując na strukturze przedstawionej w [1]. Do podstawowej struktury filtra dodane zostały elementy zapewniające stabilną pracę układu w stanach przejściowych. Pełna struktura zaprojektowanego filtra składowej zerowej typu EFSZ pokazana jest na rys. 2 [2]. Przedstawiony filtr oprócz funkcji ograniczenia składowej zerowej pełni rolę filtra sinusoidalnego.

Filtr składowej zerowej zawiera elementy dobierane po transformacji układu trójfazowego do układu ortogonalnego $\alpha\beta 0$. Przy spełnieniu warunków:

$M_1 \gg L_1$, $C_0 \ll C_1$ możliwy jest oddzielny dobór elementów filtra dla składowych $\alpha\beta$ i dla składowej 0 [2].

Redukcja składowej zerowej prądu wyjściowego falownika za pomocą filtra odbywa się przez włączenie w obwód dużej impedancji oraz stworzenie dodatkowego obwodu. Obwód ten jest zamknięty przez dodatni lub ujemny biegun kondensatora w obwodzie pośredniczącym. W większości falowników dostępnych na rynku dodatni biegun kondensatora wyprowadzony jest na listwę zaciskową jako punkt, do którego dołączony jest zewnętrzny rezystor hamowania. Elementami filtra dla składowej zerowej są dławik sprzężony M_1 , kondensator C_0 i rezystor R_0 . Tworzą one obwód zamykający się w czasie pracy falownika przez kondensator w obwodzie pośredniczącym. Dławik sprzężony M_2 ogranicza prąd składowej zerowej w obwodzie zewnętrznym względem filtra i falownika. Trzy dławiki L_1 , trzy kondensatory C_1 oraz trzy rezystory R_1 tworzą filtr dla składowych. Rezystory R_0 i R_1 są niezbędne do tłumienia przebiegów przejściowych w filtrach składowych. Dodatkowymi elementami w filtrze są trzy dła-



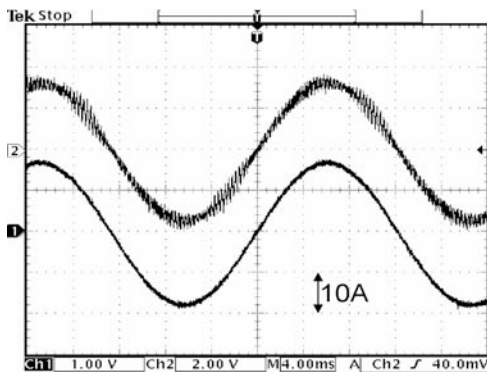
Rys. 2. Struktura filtra składowej zerowej typu EFSZ

wiki L_3 o dużej indukcyjności. Służą do redukcji składowej stałej napięcia na kondensatorach.

Badania filtra składowej zerowej w układzie z falownikiem i silnikiem

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla filtra składowej zerowej typu EFSZ-5,5/400 o prądzie znamionowym $I_n=15$ A przeznaczonym do silnika o mocy 5,5 kW. Filtr badano po włączeniu na wyjście falowników typu AMT-030 i ACS600. W układzie z falownikiem AMT-030 testy przeprowadzono przy sterowaniu $U/f=\text{const}$. oraz bezczujnikowym sterowaniu multiskalarnym z obliczaniem prędkości obrotowej. Sterowanie multiskalarnie przedstawione w [3] jest uogólnionym sterowaniem wektorowym opartym na nieliniowej transformacji zmiennych. Pomiar układu z falownikiem ACS600 przeprowadzono przy bezczujnikowym sterowaniu z bezpośrednią regulacją momentu elektromagnetycznego silnika klatkowego metodą DTC. Badania przeprowadzono dla szerokiego zakresu częstotliwości od 0,3 Hz do 100 Hz oraz przy obciążeniu zmieniającym się od biegu jałowego do znamionowego momentu silnika.

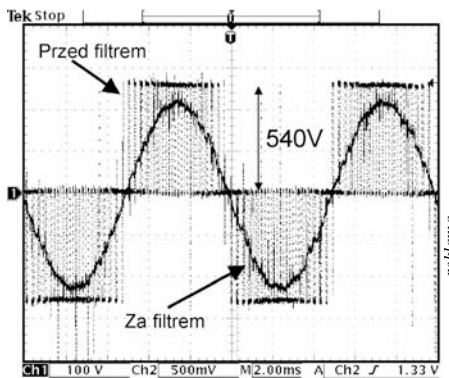
Na rys. 3 pokazano przebiegi prądu na wejściu i na wyjściu filtra przy częstotliwości wyjściowej 40 Hz i znamionowym obciążeniu silnika.



Rys. 3. Przebiegi prądów przed filtrem (2) i za filtrem (1) przy częstotliwości 40 Hz

Prąd przed filtrem zawiera składowe o częstotliwości modulacji. W przebiegu prądu za filtrem składowe te zostały znacząco wyeliminowane. Jednocześnie można stwierdzić, że przesunięcie fazowe prądu przed i za filtrem jest praktycznie równe zero.

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi napięć przed i za filtrem przy częstotliwości składowej podstawowej napięcia wynoszącej 100 Hz.



Rys. 4. Przebiegi napięcia międzyfazowego przed i za filtrem

Napięcie przed filtrem jest przebiegiem impulsowym o dużej stromości du/dt . W filtrze składowej zerowej następuje odfiltrowanie napięcia wyjściowego falownika tak, że harmoniczne napięcia wynikające z częstotliwości przełączeń tranzystorów zostają ograniczone do pomijalnego poziomu. Na wyjściu filtra pojawia się praktycznie przebieg sinusoidalny, czyli tylko składowa podstawowa napięcia wyjściowego falownika. Podobnie jak w przypadku prądów przebiegi napięć przed i za filtrem nie są przesunięte w fazie.

Włączenie na wyjściu falownika filtra o nieodpowiednio dobranej strukturze i parametrach może powodować pogorszenie działania lub całkiem uniemożliwić działanie bardziej złożonych układów sterowania silnikiem asynchronicznym np. układów sterowania połowo zorientowanego czy DTC. Jest to spowodowane wprowadzaniem przez filtr przesunięciem fazowym prądów i napięć oraz spadkiem napięcia na filtrze. Odpowiedni dobór elementów filtra pozwala jednak na zapewnienie prawidłowej współpracy filtra również w takich złożonych układach napędowych. Dobrze dobrane elementy filtra powinny zapewnić minimalizację przesunięcia fazowego prądów i napięć przed i za filtrem oraz spadek napięcia na filtrze.

Filtr EFSZ w badanym zakresie częstotliwości i obciążeń nie wprowadza zauważalnego przesunięcia fazowego prądów i napięć przed i za filtrem. Spadek napięcia na filtrze EFSZ wynosi około 3% napięcia wyjściowego falownika przy obciążeniu znamionowym i częstotliwości składowej podstawowej napięcia 50 Hz.

Na rys. 5 i rys. 6 przedstawiono efekt ograniczenia składowej zerowej prądu. W trakcie badań rejestrowano prąd płynący w przewodzie ochronnym silnika.

TRANSFORMATORY
mocy od 0,05 kVA do 800 kVA

DŁAWIKI
silnikowe
sieciowe
filtracyjne
kompensacyjne
wygładzające
sprzęgające
specjalne

ZASILACZE DC



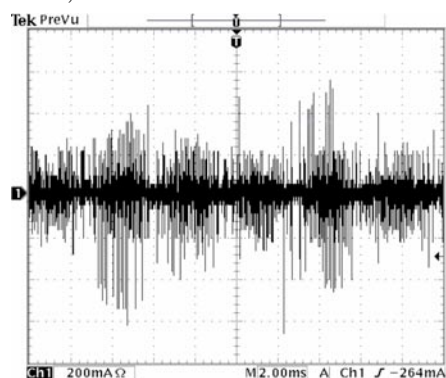
wyróżnia nas jakość

elhand 
TRANSFORMATORY

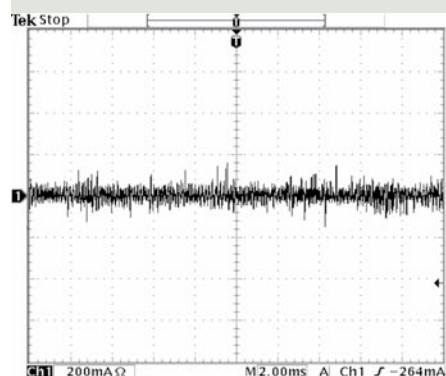
ELHAND TRANSFORMATORY
PL 42-700 Lubliniec, ul. PCK 22
tel. +48 34 353 17 10
tel. +48 34 351 32 20
fax +48 34 356 40 03
info@elhand.pl
www.elhand.pl

Na rys. 5 przedstawiono przebieg prądu w układzie bez filtra. Na skutek niesymetrii zasilania i sprzężeń pojemnościowych w silniku pojawia się znacząca składowa zerowa prądu w przewodzie PE. Maksymalne impulsy prądu osiągają amplitudę dochodząca do 4,3 A.

Zastosowanie filtra składowej zerowej powoduje znaczące ponad 8-krotne ograniczenie tego prądu, jak pokazano na rys. 6. W układzie z filtrem amplituda pojedynczych impulsów prądu nie przekracza 0,6 A.



Rys. 5. Prąd w przewodzie PE silnika bez filtra składowej zerowej



Rys. 6. Prąd w przewodzie PE silnika z filtrem składowej zerowej

Podczas badań nie zauważono wpływu metody sterowania falownikiem na przesunięcie fazowe prądów i napięcie oraz spadek napięcia na filtrze.

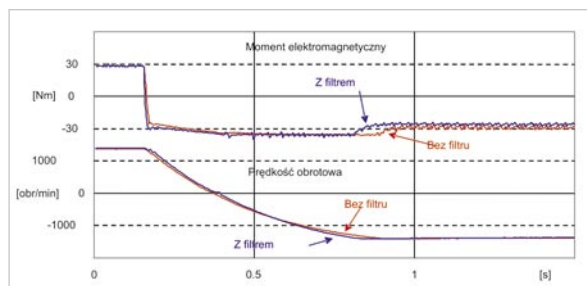
W badaniach porównano również właściwości zamkniętego układu sterowania silnikiem asynchronicznym przy zastosowaniu filtra składowej zerowej i bez zastosowania filtra. W tym celu zarejestrowano przebiegi prędkości i momentu elektromagnetycznego przy nawrocie silnika w układzie z falownikiem AMT-030 przy algorytmie sterowania multiskalarnego silnikiem asynchronicznym z odtwarzaniem prędkości obrotowej. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 7.

Pomimo włączenia filtra na wyjściu falownika napięcia ze sterowaniem bezczujnikowym napęd działa prawidłowo. Zaobserwowano niewielkie przyspieszenie przebiegów regulacji momentu elektromagnetycznego silnika i prędkości obrotowej w układzie z filtrem.

Falownik ACS600 prawidłowo współpracuje z filtrem składowej zerowej (rys. 8), nie zaobserwowano zmiany uchybu regulacji prędkości ani dynamiki działania układu.

Zakończenie

Filtr składowej zerowej ma prostą konstrukcję, podobną do dotychczas spotykanych filtrów sinusoidalnych. Jednak dobór elementów filtra składowej zerowej jest znacznie bardziej złożony i wymaga zastosowania odpowiedniej procedury. Filtr składowej zerowej znacząco ogranicza prąd płynący od silnika do przewodu PE. Przy zastosowaniu filtra EFSZ silnik zasilany jest prądem i napięciem sinusoidalnym, co zmniejsza straty w silniku i obniża jego temperaturę pracy. Umożliwia to też zmniejszenie zakłóceń generowanych przez falownik zwłaszcza w układach, w których występują bardzo długie połączenia kablowe między falownikiem a silnikiem. Aby filtr spełniał poprawnie swoją rolę, konieczne jest umieszczenie filtra jak najbliżej silnika. Przy zasilaniu silnika napięciem sinusoidalnym izolacja silnika chroniona jest przed dużymi impulsami napięcia. Z tego powodu zastosowanie filtra składowej zerowej zwiększa trwałość silnika. Dodatkowo eliminowane są problemy ze stosowaniem wyłączników różnicowo-prądowych w napędach falownikowych. Prawidłowo zaprojektowany i wykonany



Rys. 7. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika i prędkości obrotowej w układzie z falownikiem AMT-030 bez filtra oraz z filtrem składowej zerowej

filtr umożliwia włączenie go na wyjściu praktycznie każdego falownika napięcia, również falowników z tzw. sterowaniem wektorowym lub DTC.

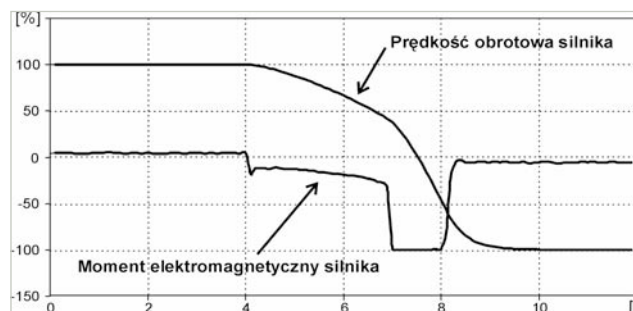
Dostępność

Dobór i wykonanie filtrów składowej zerowej można realizować w firmie:

ELHAND Transformatory,
42-700 Lubliniec, ul. PCK 22,
e-mail: info@elhand.pl
www.elhand.pl
tel. +48 34 353 17 10
fax. +48 34 356 40 03

Bibliografia

- [1] AKAGI H.: *Prospects and Expectations of Power Electronics in The 21st Century. Power Conversion Conference. PCC'2002, Osaka, Japan 2002.*
- [2] KRZEMIŃSKI Z.: *Zastosowanie filtrów składowej zerowej do ograniczania napięć i prądów współbieżnych. Seminarium Oddziału Gdańskiego SEP: Projektowanie, budowa, eksploatacja instalacji i urządzeń elektroenergetycznych oraz certyfikacji wyrobów.* Gdańsk 2004.
- [3] KRZEMIŃSKI Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi.* Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. PAN, Komitet Elektrotechniki, Seria Wydawnicza „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Tom 45, 2001.



Rys. 8. Przebiegi momentu elektromagnetycznego silnika i prędkości obrotowej w układzie z falownikiem ACS 600 ze sterowaniem DTC i filtrem składowej zerowej na wyjściu składowej zerowej

Praca finansowana przez FSNT-NOT w ramach projektu celowego nr ROW-207-2003 oraz środków Komitetu Badań Naukowych jako projekt badawczy nr 3T10A05727.