

Kompatybilność elektromagnetyczna i niezawodność układów napędowych zasilanych za pośrednictwem przekształtników częstotliwości

Jarosław Czornik

Współczesne układy napędowe powinny zapewnić regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie, jak również umożliwić przeprowadzenie „łagodnego rozruchu” maszyny elektrycznej. Obecnie powszechnym i najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie falownika napięcia jako źródła zasilającego. Oprócz oczywistych zalet takiego rozwiązania oraz biorąc pod uwagę jego rosnącą popularność, ważna jest znajomość problemów wynikających ze stosowania przekształtników częstotliwości. Głównymi problemami przy zastosowaniu takiego sposobu zasilania są negatywne skutki oddziaływania falowników na sieć zasilającą (wyższe harmoniczne w prądzie zasilającym, a tym samym wzrost poboru mocy biernej) oraz na zasilany silnik (wzrost hałasu, straty dodatkowe, przyspieszone starzenie się izolacji, erozja łożysk).

Zdecydowana większość obecnie stosowanych przemienników częstotliwości pracuje w oparciu o zasadę modulacji impulsów wyjściowych (PWM – *Pulse Width Modulation*). Uzyskane w ten sposób napięcie nie ma przebiegu sinusoidalnego tylko odkształcony, w postaci szeregu impulsów o bardzo krótkich czasach narastania (dużej stromości). Korzystne jest to z punktu widzenia falownika, ponieważ krótkie czasy przełączania zaworów pozwalają na utrzymanie małych strat w przemienniku. Jednak duża stromość napięciowa (du/dt) impulsów wyjściowych oraz coraz wyższe częstotliwości przełączeń zaworów stosowane w falownikach są powodem występowania zjawisk pasożytniczych w kablach zasilających silniki, jak i w samych silnikach. Zjawiska te znacząco wpływają na skrócenie żywotności silnika oraz zwiększają prawdopodobieństwo awarii całego układu napędowego.

Najczęściej spotykane problemy to:

- duże stromości narastania napięcia (du/dt) – przy małych odległościach pomiędzy falownikiem a silnikiem duże stromości narastania napięcia wyjściowego falownika (rys. 1 b) oddziałują bezpośrednio na izolację kabla i uzwojeń silnika. W nowoczesnych przekształtnikach stromości te docho-

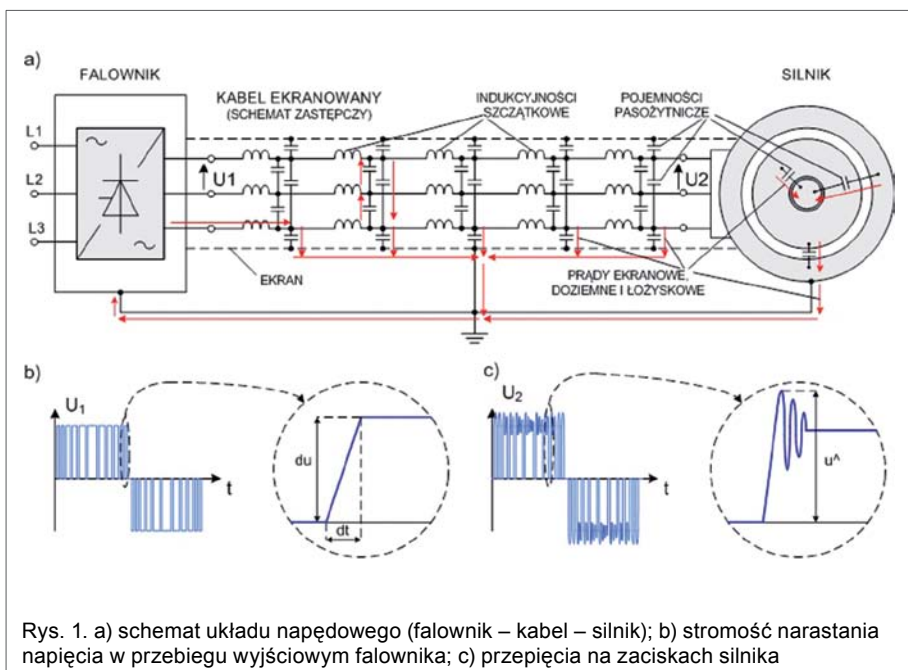
dzą do 10, a nawet 12 kV/ μ s, podczas gdy w silnikach dopuszczalna stromość narastania napięcia nie powinna przekraczać 1 kV/ μ s;

- przepięcia na zaciskach silnika – to efekt występowania zjawisk falowych. Już przy długościach kabla ok. 10 m można zauważyć znamiona tzw. „linii długiej”. Schemat zastępczy takiego kabla można przedstawić w postaci połączenia drabinkowego pojemności pasożytniczych i szczytkowych indukcyjności (rys. 1 a). Zasilanie nawet małej indukcyjności ciągiem impulsów napięcia o dużej stromości powoduje generowanie się na niej przepięć (rys. 1 c). Wraz ze wzrostem długości kabla rośnie jego indukcyjność wypadkowa, a zjawiska falowe i przepięcia nasilają się, mogąc uszkodzić izolację silnika;
- dodatkowe straty w silniku i kablu zasilającym – wyższe harmoniczne występujące w napięciu i prądzie powodują straty dodatkowe w kablu zasilającym, rdzeniu silnika oraz w uzwojeniach, szczególnie w klatce wirnika. Obniża to sprawność silnika i całego układu napędowego. Straty dodatkowe wydzielane są w postaci ciepła i podnoszą temperaturę pracy silnika i kabla, co przyspiesza starzenie się izolacji

Ze względu na bardzo szeroki zakres zagadnienia artykuł ten obejmuje wyłącznie współpracę falownika z silnikiem. Występujące problemy i zjawiska pasożytnicze w tego typu układach są często niestudnie bagatelizowane. Artykuł ma na celu uzmysłowić czytelnikowi skalę problemu, jak również wskazać rozwiązania, które pozwolą na ograniczenie negatywnych skutków oddziaływania falownika na silnik i kabel zasilający.

i znacząco skraca ich żywotność, negatywnie wpływając na niezawodność układu;

- prądy ekranowe, doziemne i łożyskowe – pojemności wewnętrzne silników indukcyjnych niskiego napięcia oraz pojemności pasożytnicze kabli zasilających są parametrami praktycznie pomijalnymi przy zasilaniu sieciowym. Wartości tych pojemności mieszczą się w przedziale od kilku do kilkunastu [nF] i nie mają one istotnego znaczenia dla użytkowników. Problem pojawia się dopiero przy zasilaniu silników z falowników PWM. Impedancja wypadkowa pojemności pasożytniczych kabla i silnika maleje przy dużych częstotliwościach kluczowania zaworów. Im mniejsza jest wartość wypadkowej impedancji pojemnościowej, tym większy prąd płynie przez pojemności pasożytnicze. Wartości pasożytniczych prądów ekranowych, doziemnych i łożyskowych sumują się z właściwym obciążeniem przekształtnika (rys. 1 a), co w krytycznym przypadku (np. w aplikacjach z długimi kablami) prowadzi do konieczności przewymiarowania mocy falownika i przekroju kabla zasilającego;
- emisja zakłóceń elektromagnetycznych – przebieg wyjściowy napięcia



Rys. 1. a) schemat układu napędowego (falownik – kabel – silnik); b) stromość narastania napięcia w przebiegu wyjściowym falownika; c) przebiegięcia na zaciskach silnika

falownika PWM składa się z harmonickej podstawowej (Hz), pasma częstotliwości fali nośnej (kHz) oraz harmonicjnych wyższego rzędu (MHz), które wynikają z krótkich czasów przełączania kluczy tranzystorowych. To właśnie ostatni zakres częstotliwości odpowiada za emisję zakłóceń elektromagnetycznych do otoczenia. Zakłócenia te rozchodzą się równomiernie we wszystkich kierunkach, a kabel silnikowy w układzie z falownikiem PWM stanowi podstawowe źródło zakłóceń elektromagnetycznych całego układu automatyki maszyny;

- wytwarzanie hałasu o podwyższonym poziomie – oprócz wymienionych wyżej negatywnych skutków występowania wyższych harmonicjnych w napięciu wyjściowym falownika pozostaje jeszcze kwestia hałasu. Harmoniczne o wyższych częstotliwościach powodują piski i „skwierczenie” silnika, co nie jest bez znaczenia dla komfortu obsługi układu napędowego.

Opisane wyżej zjawiska można skutecznie ograniczać lub nawet całkowicie wyeliminować poprzez stosowanie odpowiednich dławików lub filtrów.

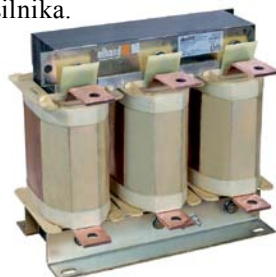
Dławiki ograniczające du/dt (ED3dU) – efektem ich działania jest ograniczenie stromości przebiegów impulsowych w napięciu przewodowym oraz ograniczenie ujemnych skutków prądów zakłócających. Efektywnie tłumią zakłócenia elektromagnetyczne w przedziale częstotliwości od 1 do 30 MHz. Dławiki te są skuteczne przy niewielkich długościach kabli zasilających i niskich częstotliwościach



Dławik ograniczający du/dt

ciach kluczenia. Ograniczają stromość narastania napięcia kilkukrotnie i są niezbędnym minimum, które użytkownik powinien zapewnić dla prawidłowej pracy układu napędowego.

Dławiki silnikowe (ED3S) – mają większe indukcyjności od dławików ograniczających, a zatem lepiej kompensują pojemności między przewodami fazowymi oraz między przewodami a potencjałem ziemi. Bardzo skutecznie ograniczają stromość narastania napięcia oraz zmniejszają amplitudę przebiegów na zaciskach silnika. Dławiki silnikowe eliminują zakłócenia elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości i zmniejszają straty energii w kablu i silniku. Dodatkowo efektywnie zmniejszają hałas silnika.



Dławik silnikowy ED3S

Wyróżnia nas jakość

TRANSFORMATORY

moc od 0,05 kVA do 1600 kVA

DŁAWIKI

silnikowe, sieciowe, filtracyjne, kompensacyjne, wygładzające, sprzęgające, specjalne

FILTRY LC

ZASILACZE DC

URZĄDZENIA SPECJALNE

Tabela 1. Zalecany dobór dławików wyjściowych lub filtrów LC przy zasilaniu silników z falowników PWM, w zależności od parametrów układu i warunków pracy

Częstotliwość kluczowania	Warunki pracy	Długość kabla silnikowego			Zasilanie układów napędowych starszego typu	Praca równoległa silników	Silniki w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem
		< 30 [m]	30 [m] – 100 [m]	> 100 [m]			
≤ 2,5 kHz	ED3dU ED3S EF3LC	ED3dU ED3S EF3LC	ED3dU ED3S EF3LC	EF3LC	EF3LC	EF3LC	EF3LC
2,5–8 kHz	ED3dU ED3S EF3LC	ED3S EF3LC	EF3LC	EF3LC			
8–16 kHz	ED3S EF3LC	EF3LC	EF3LC	EF3LC			

ED3dU – dławik ograniczający du/dt; ED3S – dławik silnikowy; EF3LC – filtr sinusoidalny

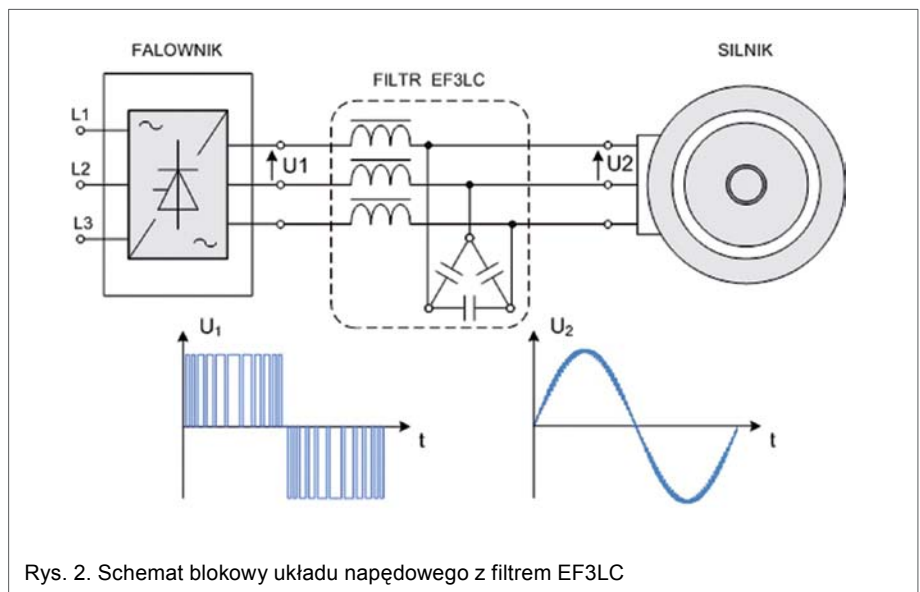
Filtry sinusoidalne (EF3LC) – zamieniają napięcie impulsowe przekształtnika PWM na napięcie sinusoidalne (rys. 2), skutecznie ograniczają lub całkowicie eliminują wszystkie wyżej wymienione zjawiska pasożytnicze. Współczynnik odkształceń THDU napięcia wyjściowego filtrów typu EF3LC jest mniejszy niż 5%, a zatem warunki pracy silników są analogiczne jak przy zasilaniu sieciowym. Prąd i napięcie mają przebieg sinusoidalny, dlatego nie ma problemu ze stromością narastania napięcia i przepięciami na zaciskach silnika. Straty dodatkowe w kablu i silniku oraz zakłócenia elektromagnetyczne ograniczone są do minimum, a cały układ jest kompatybilny elektromagnetycznie. Filtry sinusoidalne najczęściej stosowane są przy długich połączeniach kablowych (umożliwiają zastosowanie kabli nieekranowanych – dużo tańszych) oraz do układów napędowych w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem (eliminując ryzyko wystąpienia przepięć na zaciskach silnika). Filtry okazują się niezbędne w przypadku kilku silników pracujących równoległe, zasila-



Filtr 3-fazowy typu EF3LC-0, 18_360

nych z jednego falownika oraz w przypadku modernizacji układów napędowych starszego typu, gdzie silnik i kabel nie były dostosowane do współpracy z falownikiem.

W zależności od częstotliwości kluczowania, długości kabla zasilającego pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem



Rys. 2. Schemat blokowy układu napędowego z filtrem EF3LC

oraz od miejsca zainstalowania napędu należy wybrać optymalne rozwiązanie nie tylko pod względem ceny całego układu, ale również pod względem kosztu jego eksploatacji, niezawodności i okresu użytkowania. Bardzo często początkowe wydatki w rezultacie prowadzą do wymiernych oszczędności, ponieważ można oszacować straty wynikające z ewentualnej awarii i przestoju napędzanej maszyny. Ważne jest, aby już na etapie projektu uwzględnić wszystkie czynniki wpływające na poprawną pracę, bezawaryjność i energooszczędność napędu elektrycznego.

Firma Elhand Transformatory ma w swojej ofercie zarówno dławiki ograniczające, silnikowe, jak i filtry sinusoidalne, które zwiększą niezawodność i żywotność układu napędowego.

Literatura

[1] ŁASTOWIECKI J.: *Elementy magnetyczne w układach napędowych*. Warszawa, WNT 1982.

[2] PIROG S.: *Energoelektronika*. Kraków, Wydawnictwa AGH 2006.
 [3] TRAJDOS M., PASTUSZKA R., SOSNOWSKI I.: *Znaczenie pojemności kabla w układach zasilających silniki indukcyjne za pośrednictwem przekształtników częstotliwości*. ZP-ME nr 74/2006.
 [4] BERKAN W., MAZUREK P., MICHALSKI A., PYTLAK A., ŚWIĄTEK H.: *Analiza prądów zasilania i prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtnika częstotliwości z falownikiem tranzystorowym w układzie napędowym prądu przemiennego*. PIE 2003.
 [5] ZIENTEK P.: *Prądy łożyskowe i prąd uziomu w układach napędowych zasilanych z falowników PWM*. ZP-ME nr 74/2006.
 [6] ZIENTEK P.: *Wpływ parametrów wyjściowych falowników PWM i kabla zasilającego na zjawiska pasożytnicze w silnikach indukcyjnych*. ZP-ME nr 71/2005.

Jarosław Czornik – jest pracownikiem ELHAND TRANSFORMATORY Sp. z o.o.