

Politechnika Radomska - Zakład Eksploatacji Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Dr inż. Jerzy Szymański

Napięciowy przemiennik częstotliwości PWM z regulowanym napięciem w obwodzie pośrednim.

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję budowy obwodu mocy napięciowego przemiennika częstotliwości PWM do zasilania silników prądu przemiennego w którym regulacja wartości amplitudy harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego dokonywana jest poprzez regulację wartości napięcia stałego zasilania falownika. Zaproponowane rozwiązanie umożliwi rozruch silnika przy zmniejszonej zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilania.

Przestawiono korzyści z zastosowania takiego rozwiązania w porównaniu do przemienników o stałym napięciu obwodu pośredniego: zwiększenie sprawności napędu, poprawa warunków kompatybilności elektromagnetycznej, zwiększenie żywotności kondensatorów obwodu stałonapięciowego przemiennika częstotliwości, zmniejszenie prądów łożyskowych i zwiększenie trwałości izolacji uzwojeń silnika.

1. Wprowadzenie

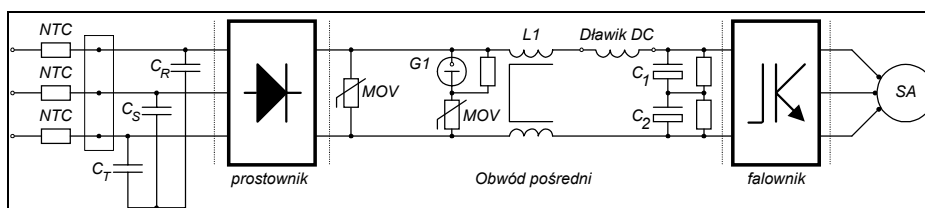
Powszechnie stosowane przemienniki częstotliwości z falownikiem napięciowym i nieregulowanym napięciem obwodu pośredniego powodują zwiększoną emisję elektromagnetyczną i zwiększone straty silnika przy pracy z małymi prędkościami obrotowymi. Dominująca przy niskich częstotliwościach napięcia zasilania silnika składowa rezystancyjna impedancji fazowej, może powodować niesymetryczny prąd fazowy uzwojeń silnika, co prowadzi do zmniejszenia jego momentu rozruchowego. Kształtowanie metodą PWM napięcia wyjściowego falownika prowadzi często, w zakresie małych prędkości obrotowych silnika, do niesymetryczności napięć międzyfazowych. Jest to skutkiem zwiększonej zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilania silnika z powodu konieczności stosowania głębokiej modulacji, dla zapewnienia wartości skutecznej napięcia międzyfazowego na poziomie, nawet 10-20% napięcia zasilania przemiennika.

Przedmiotem opracowania jest przedstawienie rozwiązania technicznego powodującego zwiększenie momentu rozruchowego silnika w zakresie małych prędkości, przez zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilania, przy jednoczesnym ograniczeniu i symetryzacji prądów fazowych silnika zasilanego z napięciowego przemiennika częstotliwości.

W dalszej części zaprezentowano strukturę obwodu mocy napięciowego przemiennika z kształtowaniem napięcia wyjściowego metodą PWM, która zapewnia zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych przy zmniejszonej wartości napięcia wyjściowego dla niskich częstotliwości harmonicznej podstawowej. W przedstawianym rozwiązaniu następuje także zmniejszenie maksymalnego napięcia - U_p oraz szybkości jego narastania - dU/dt , co przybliży warunki współpracy silnika zasilanego z przemiennika do współpracy z źródłem napięcia sinusoidalnego o regulowanej częstotliwości i amplitudzie.

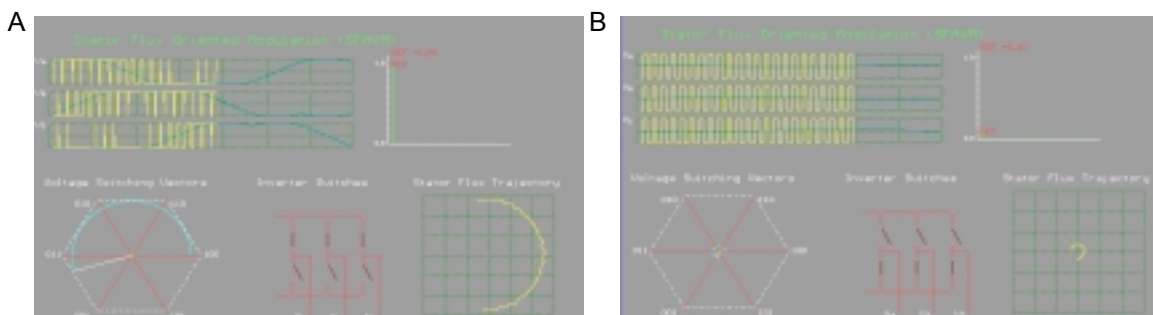
2. Napędy z przemiennikami napięciowymi.

Stosowane obecnie przemienniki częstotliwości o strukturze: prostownik niesterowany - stałonapięciowy obwód pośredni bez regulacji wartości napięcia zasilania falownika - falownik napięciowy - rys. 1, są powszechnie stosowane w regulowanych napędach trójfazowych silników prądu przemiennego. Do kształtowania napięcia wyjściowego falownika napięciowego wykorzystuje się metody modulacji będące odmianami PWM (np. VVC⁺ - 3rd generation PWM principle SFAVM -Stator Flux oriented Asynchronous Vector Modulation).



Rys. 1. Schemat blokowy obwodu mocy przetwornicy częstotliwości.

Przebiegi napięć fazowych tych przemienników uzyskane z programu symulacyjnego dla różnych głębokości współczynnika modulacji przedstawiono na rys.2. Uzyskane przebiegi wyjściowych napięć fazowych wskazują na bezpośrednią zależność zawartości wyższych harmonicznych napięć fazowych na wyjściach mocy falownika od współczynnika głębokości modulacji M . Przy $M = 0.1$ amplitudy wyższych harmonicznych napięcia niskich rzędów są porównywalne z amplitudą harmonicznej podstawowej. Zjawisko to uniemożliwia zapewnienie dużej sprawności napędu pracującego przy niskiej częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia stojana silnika.



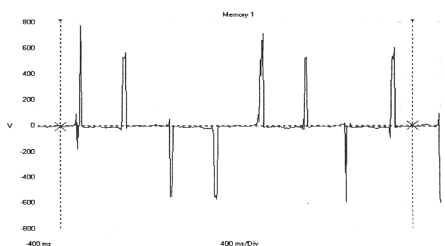
Rys.2. Przebiegi napięć fazowych napięciowego przemiennika z modulacją wektorową SFAVM:
A. przy współczynniku modulacji $M = 1$ B. przy współczynniku modulacji $M = 0.1$

Wyjścia mocy przemienników ze względu na dużą zawartość wyższych harmonicznych napięcia są łączone z zaciskami silników ekranowanymi kablami energetycznymi. Sporadycznie, przy mocach silników do ok. 45kW wykorzystuje się także wyjściowe filtry LC. Istnieją wykonania filtrów LC zapewniające zwrot części energii do obwodu DC przemiennika. Stosowanie filtrów LC powoduje zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilania silnika, w szczególności częstotliwości radiowych, co w efekcie powoduje zmniejszenie emisji radioelektrycznej kabli silnikowych i silnika oraz zwiększa sprawność silnika. Zmniejszenia się jednak sprawność całego układu napędowego: przemiennik częstotliwości - silnik. Filtry te są uciążliwe w eksploatacji i kosztowne, ponadto wymagają stałej częstotliwości przełączania zaworów półprzewodnikowych falownika, zwykle powyżej 4,0 kHz. Stosowanie szeregu zabiegów technicznych umożliwia wykonanie instalacji zgodnie z wymogami kompatybilności elektromagnetycznej, jednak instalacja ta jest kosztowna.

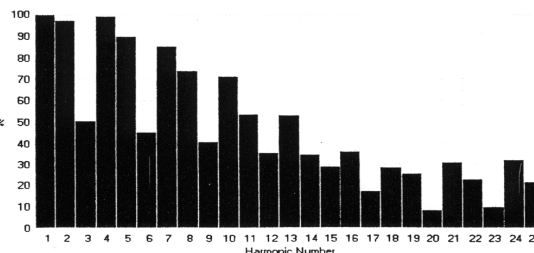
Podstawowym problemem w wielu zastosowaniach przemysłowych jest praca silnika ze zwiększonym obciążeniem przy małych prędkościach obrotowych silnika. W nowych rozwiązaniach przemienników istnieje możliwość zadawania początkowej wartości skutecznej napięcia oraz minimalnej częstotliwości rozruchu silnika. Często jednak regulacja tych parametrów nie powoduje istotnego zwiększenia momentu rozruchowego silnika. Zwiększanie wartości minimalnej częstotliwości rozruchu powoduje zwiększony udział składowej reaktancyjnej impedancji fazowej silnika, przez co następuje symetryzacja i zmniejszenie wartości skutecznej prądu, jednak wzrost poślizgu silnika często niweczy efekt zwiększenia momentu rozruchowego. Zakładając zbliżoną wartość rezystancji przewodowej na zaciskach wyjściowych przemiennika częstotliwości (rezystancja kabla energetycznego i uzwojeń silnika), często korzystny efekt można osiągnąć zadając właściwą wartość skuteczną napięcia początkowego. Jest to dość uciążliwe biorąc pod uwagę, że rezystancja ta ma niewielką wartość i zmniejsza się wraz ze wzrostem mocy silnika oraz zmienia swoją wartość w czasie jego pracy. Zadanie zbyt dużej wartości skutecznej początkowego napięcia rozruchu przy jednocześnie niskiej częstotliwości rozruchu (np. 0,5Hz) prowadzi do przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu przemiennika, co powoduje wyłączenie przemiennika przez zabezpieczenia nadprądowe, lub następuje wyłączenie przemiennika przez zabezpieczenia przeciwzwarciowe wskutek osiągnięcia zbyt dużej szybkości narastania prądu fazowego silnika – di_s/dt . Taka sytuacja może w szczególności wystąpić przy instalacjach z silnikami większych mocy o zwiększonej sprawności i krótkimi kablami silnikowymi. Zmniejszanie wartości skutecznej początkowego napięcia rozruchu powoduje natomiast wzrost zawartości wyższych harmonicznych niskiego rzędu napięcia zasilania silnika, a tym samym powoduje wzrost wartości momentów pasożytniczych i zmniejszenie wypadkowego momentu rozruchowego.

Rzeczywiste wyniki pomiarów zawartości wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym falownika z modulacją SFAVM i zmniejszonym współczynnikiem głębokości modulacji M dla uzyskania obniżonej wartości napięcia rozruchowego silnika przedstawiono na rys.3.

Napięcie na zaciskach silnika:
 $f_{h1}=5\text{Hz}$ ($U_{\max}=768\text{V}$, $U_{\min}=-600\text{V}$)



Widmo harmonicznych napięcia;
 $\text{RMS}=136\text{V}$, $\text{Peak}=768\text{V}$, $\text{Kfact}=333,93$

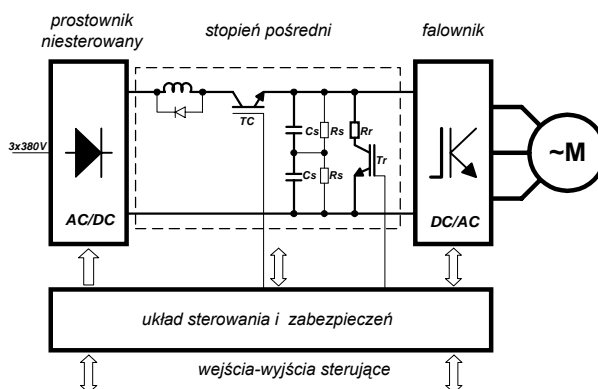


Rys.3. Napięcie międzyfazowe silnika zasilanego z napięciowego falownika PWM z modulacją. Napięcia typu SFAVM dla podstawowej harmonicznej o częstotliwości 5Hz i wartości skutecznej 136V.

Uzyskany w rzeczywistym napędzie przekształtnikowym przebieg czasowy napięcia międzyfazowego na zaciskach silnika i jego wskazuje, że przy niskich częstotliwościach pracy napędu, gdzie trzeba stosować głęboką modulację, zjawiska wynikające z niesymetryczności elementów mocy falownika i dokładności technicznej realizacji, mają istotny wpływ na powiększanie zawartości harmonicznych napięcia w stosunku do wyników uzyskiwanych na drodze teoretycznej.

3. Koncepcja struktury układu mocy napięciowego przemiennika częstotliwości z regulowaną wartością napięcia stałego w obwodzie pośrednim.

Zastosowanie struktury układu mocy napięciowego przemiennika częstotliwości, zbliżonej do struktury stosowanej w przemiennikach z kształtowaniem napięcia wyjściowego falownika metodą PAM (ang. Pulse Amplitude Modulation) rys.4, w przemiennikach z kształtowaniem napięcia wyjściowego falownika metodą PWM, może zdecydowanie poprawić warunki współpracy silnika z przemiennikiem częstotliwości oraz wpłynąć na zwiększenie sprawności całego układu napędowego: silnik – przemiennik częstotliwości. W tym przypadku napięcie wyjściowe falownika kształtowane byłoby w ten sposób, że amplituda harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości regulowana byłaby napięciem zasilania falownika, podobnie jak według metody PAM. Poprzez oddziaływanie na wartość napięcia stałego obwodu pośredniego regulowana byłaby jedynie amplituda harmonicznej podstawowej napięcia. Jego częstotliwość regulowana byłaby okresem przebiegu nośnego modulacji PWM. Takie sterowanie modulacją napięcia przemiennika częstotliwości spowoduje wymuszenie jednakowego przebiegu prostokątnego napięcia wyjściowego, dlatego rozkład amplitudowy widma harmonicznych napięcia nie będzie zależał od wartości skutecznej podstawowej harmonicznej napięcia zasilania silnika.



Rys.4. Struktura obwodu mocy przemiennika częstotliwości PWM zapewniająca możliwość regulacji amplitudy harmonicznej podstawowej napięcia zasilania silnika poprzez regulację wartości napięcia stałego zasilania falownika.

W tym przypadku nie ma konieczności regulowania amplitudy przebiegu nośnego modulacją PWM, dlatego można zapewnić stałą minimalną zawartość wyższych harmonicznych napięcia wyjściowego falownika w całym zakresie regulacji amplitudy i częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia

wyjściowego, jak dla napięcia o częstotliwości 50Hz i znamionowej wartości skutecznej napięcia międzyfazowego.

Regulacja amplitudy przebiegu nośnego modulacji PWM mogłaby być tutaj wykorzystywana do poprawy dynamiki regulacji napięcia wyjściowego, w przypadku zbyt wolnej zmiany napięcia stałego obwodu pośredniego. Takie rozwiązanie byłoby przydatne w aplikacjach z szybkimi zmianami momentu obciążenia silnika, lub szybkiej zmianie częstotliwości harmonicznnej podstawowej napięcia wyjściowego falownia dla zapewnienia szybkich zmian prędkości obrotowej silnika. W takim przypadku nastąpi chwilowe zwiększenie zawartości wyższych harmonicznnych w napięciu wyjściowym falownia, jednak brak konieczności głębokiej modulacji nie spowoduje znacznego ich wzrostu. Po osiągnięciu odpowiedniej wartości napięcia stałego w obwodzie pośrednim przemiennika sprzężenie zwrotne powinno ponownie zmniejszyć głębokość modulacji PWM, tym samym wzrost zawartości wyższych harmonicznnych w napięciu wyjściowym falownia będzie występował przejściowo.

4. Wnioski

Główne zalety proponowanego rozwiązania struktury obwodu mocy napięciowego przemiennika częstotliwości z ograniczeniem modulacji amplitudy harmonicznnej podstawowej napięć fazowych metodą PWM w skutek regulacji wartości napięcia stałego zasilania falownia przemiennika częstotliwości to:

- przedłużenie żywotności kondensatorów obwodu pośredniego,
- zmniejszenie napięcia silnika w początkowej fazie rozruchu, przy jednoczesnej symetryzacji prądów przewodowych silnika poprzez zmniejszenie udziału zawartości wyższych harmonicznnych,
- znaczne ograniczenie promieniowania elektromagnetycznego kabli silnikowych,
- zmniejszenie kosztów budowy i gabarytów filtrów wyjściowych LC dla uzyskania sinusoidalnego napięcia zasilania silnika bez zawartości wyższych harmonicznnych,
- zwiększenie sprawności silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości poprzez ograniczenie udziału wyższych harmonicznnych napięcia,
- zwiększenie żywotności silnika poprzez zmniejszenie wartości U_p i du/dt przy pracy silnika z częstotliwościami napięcia zasilania mniejszymi od znamionowej, poprzez zmniejszenie wartości napięcia zasilania falownia przemiennika częstotliwości.

Obecnie, przy możliwości zastosowania tranzystora typu IGBT w układzie przerywacza prądu obwodu stałonapięciowego przemiennika częstotliwości proponowane rozwiązanie nie jest technicznie uciążliwe i nie powinno wpłynąć na jego koszt i gabaryty. Jednoczesne regulowanie wartości napięcia stałego obwodu pośredniego przemiennika częstotliwości i współczynnika głębokości modulacji PWM, przy powszechnym stosowaniu techniki mikroprocesorowej w układach sterowania, także nie jest technicznie skomplikowane.

5. Literatura

1. Dmowski A., Szymański J., „Modulacja sinusoidalna napięcia falownia z piłokształtnym symetrycznym przebiegiem nośnym” Archiwum Elektrotechniki, Zeszyt 1/4, W-wa PAN 1990.
2. „Sprawozdanie z badań przetwornic częstotliwości do pracy silnika w strefie zagrożonej wybuchem” Nr ew. T-3045, CIG KD "Barbara", 1998
3. Mitew E., Szymański J. "Napięciowy przemiennik częstotliwości o ulepszonej współpracy z silnikiem" IV Krajowa Konferencja Naukowa SENE' 99, Łódź 17-19.11.99