

Politechnika Radomska

Zakład Eksploatacji Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

Prof. dr hab. Inż. Emil Mitew

Dr inż. Jerzy Szymański

Napięciowy przemiennik częstotliwości o ulepszonej współpracy z silnikiem.

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 umożliwia rozruch częstotliwościowy przy zmniejszonej zawartości wyższych harmonicznym w napięciu zasilania silnika.

Przedstawiono korzyści z zastosowania takiego rozwiązania: zwiększenie sprawności napędu, poprawa warunków kompatybilności elektromagnetycznej, zwiększenie żywotności kondensatorów obwodu stałonapięciowego przemiennika częstotliwości i silnika.

1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowane przemienniki częstotliwości z falownikiem napięciowym 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 harmonicznym napięcia zasilania silnika z powodu konieczności stosowania głębokiej modulacji, dla zapewnienia wartości skutecznej napięcia międzyfazowego na poziomie, nawet 10-20% napięcia zasilania przemiennika.

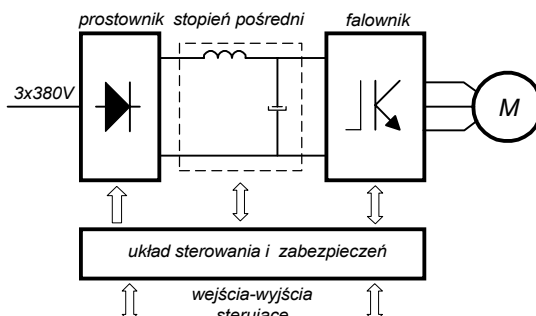
Przedmiotem opracowania jest przedstawienie rozwiązania technicznego powodującego zwiększenie momentu rozruchowego silnika w zakresie małych prędkości, przez zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznym napięcia zasilania, przy jednoczesnym ograniczeniu i symetryzacji prądów fazowych silnika zasilanego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

W dalszej części zaprezentowano strukturę obwodu mocy napięciowego przemiennika z kształtowaniem napięcia wyjściowego metodą PWM, która zapewnia zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznym w napięciu wyjściowym 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 napięciem sinusoidalnym bez wyższych harmonicznym 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). Oddziaływanie przemienników częstotliwości na sieć zasilania obecnie ograniczana jest poprzez stosowanie dławika umieszczonego między wyjściem stałonapięciowym prostownika i kondensatorem obwodu pośredniego - dla ograniczenia wyższych harmonicznym prądu niskiego rzędu, przez co następuje wzrost współczynnika mocy - P/S (tutaj: $S=(P^2+D^2)^{1/2}$). Dla ograniczenia emisji elektromagnetycznej promieniowanej do otoczenia o częstotliwościach radiowych, na wejścia zasilania przemienników częstotliwości dołącza się filtry radioelektryczne. Wyjścia mocy przemienników ze względu na dużą zawartość wyższych harmonicznym 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 powodują zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznym napięcia zasilania silnika, w szczególności częstotliwości radiowych, co w efekcie powoduje zmniejszenie emisji radioelektrycznej kabli silnikowych i sil-

nika 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 umożliwi wykonanie instalacji zgodnie z wymogami kompatybilności elektromagnetycznej, jednak instalacja ta jest kosztowna.



Rys. 1 Schemat blokowy obwodu mocy przetwornicy częstotliwości.

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 reakcyjnej 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 przeciwzwarceniowe 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.

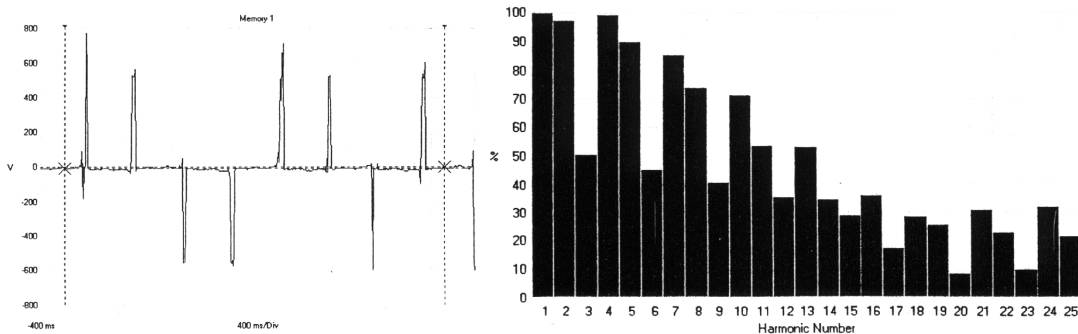
3. Sztuczne krótkotrwałe zwiększenie rezystancji wyjściowej przemiennika częstotliwości.

Analiza widma harmonicznych napięć wyjściowych napięciowego przemiennika częstotliwości, przedstawionych na rys. 2 i 3, prowadzi do wniosku, że zwiększenie momentu rozruchowego silnika, można osiągnąć przez zwiększenie wartości skutecznej początkowego napięcia rozruchu na wyjściach mocy przemiennika częstotliwości przy jednoczesnym zwiększeniu jego rezystancji wyjściowej, tak aby napięcie na zaciskach silnika nie uległo nadmiernemu zwiększeniu. W takim przypadku rozruch silnika będzie prowadzony przy zmniejszonym współczynniku głębokości modulacji PWM i tym samym mniejszy będzie udział wyższych harmonicznych napięcia.

Obniżenie napięcia na zaciskach silnika można osiągnąć przez krótkotrwałe włączenie między zaciski wyjściowe przemiennika częstotliwości i kable silnikowe dodatkowej rezystancji w początkowej fazie rozruchu silnika, rys. 4. W tym przypadku uzyskuje się możliwość rozruchu silnika ze zmniejszoną zawartością wyższych harmonicznych napięcia i dokonując pomiaru prądów fazowych silnika można skutecznie wysymetryzować rezystancyjnie obciążenie przemiennika częstotliwości. Zapewnia to uzyskanie symetrycznych prądów fazowych silnika dla niskich częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia zasilania. Po zakończeniu początkowej fazy rozruchu odciążonego silnika, tj. po osiągnięciu przez przemiennik częstotliwości 10-15 Hz, rezystancja dodatkowa jest zbędna i może być odłączona.

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

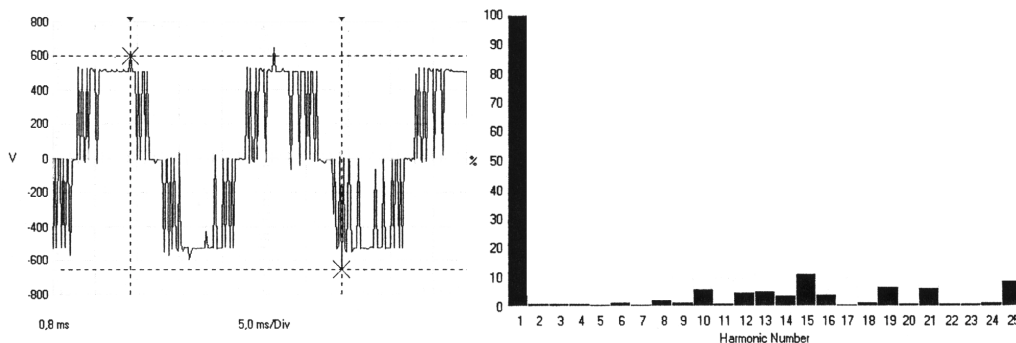
Widmo harmonicznych napięcia;
 RMS=136V, Peak=768V, Kfact=333,93
 THDr=98,14%, THDf=510,92%



Rys.2 Napięcie międzyfazowe silnika zasilanego z napięciowego falownika PWM dla podstawowej harmonicznej o częstotliwości 5Hz i wartości skutecznej 136V.

Napięcie na zaciskach silnika: $f_{h1}=50\text{Hz}$
 ($U_{\max}=768\text{V}$, $U_{\min}=-600\text{V}$)

Widmo harmonicznych napięcia;
 RMS=420V, Peak=648V, Kfact=62,79
 THDr=46,37%, THDf=52,34%

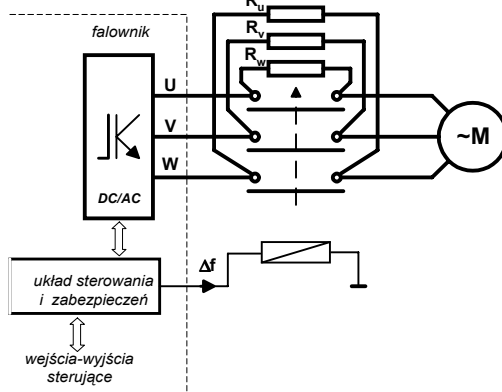


Rys.3 Napięcie międzyfazowe silnika zasilanego z napięciowego falownika PWM dla podstawowej harmonicznej o częstotliwości 50Hz i wartości skutecznej 420V.

Wzrost udziału składowej reaktancyjnej impedancji fazowej silnika wraz ze wzrostem częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego przemiennika, powoduje ograniczenie zależności prądu silnika od składowej rezystancyjnej jego impedancji międzyfazowej. Innym powodem usunięcia dodatkowej rezystancji z obwodu mocy jest wzrost strat proporcjonalny do czasu przewodzenia prądu silnika. Przy stało momentowej charakterystyce obciążenia w funkcji prędkości obrotowej silnika i nominalnej wartości momentu obciążenia, prąd silnika ma wartość zbliżoną do znamionowej w całym zakresie prędkości obrotowych ($0-n_n$ obr/min).

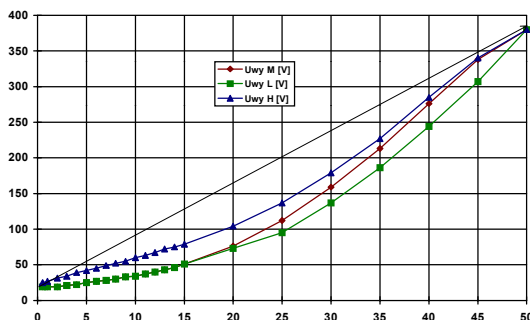
4. Zastosowanie rezystancji dodatkowej w rzeczywistym napędzie.

W czasie prób rozruchu napędu dmuchaw powietrza HR 23 firmy Holmes - Dresser z silnikami asynchronicznymi Sg 200 L2B, zasilanymi z przemienników częstotliwości o charakterystyce rozruchowej typu wentylatorowego, stwierdzono brak możliwości rozruchu tych dmuchaw. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że dmuchawy HR 23 charakteryzują się stało momentowym obciążeniem w zakresie regulacji ich wydajności 5-50Hz, a moment obciążenia jest funkcją głębokości zanurzenia w wodzie kolektora napowietrzającego. W badanym zastosowaniu obciążenie silników dmuchaw wynosiło 25kW.



Rys.4 Schemat połączenia rezystancji dodatkowej między wyjściami napięciowego przemiennika częstotliwości PWM i zaciskami silnika.

Przebieg napięć rozruchowych zastosowanych przemienników częstotliwości, przedstawiono na rys. 5. Przeprowadzona analiza wykazała, że istnieje możliwość zapewnienia odpowiedniego momentu rozruchowego silników dmuchaw, mimo że zastosowano przemienniki z charakterystyką rozruchową dla obciążeń typu wentylatorowego, zamiast przemienników z charakterystyką rozruchową dla obciążeń typu stało momentowego.



Rys.5: Przebieg napięć rozruchowych dla obciążeń typu wentylatorowego przemysłowego przemiennika częstotliwości. (Oś x częstotliwość napięcia zasilania silnika w [Hz], oś y napięcie zasilania silnika w [V])

Analiza przebiegu momentu rozruchowego dla zmniejszonego obciążenia silnika.

Określenie rzeczywistych i nominalnych mocy oraz momentu obciążenia silnika (na podstawie danych pomiarowych i parametrów nominalnych silnika):

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \phi \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot 380V \cdot 67A \cdot 0,89 \cdot 0,938 \approx 37kW \quad (4.1)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot 380V \cdot 45A \cdot 0,89 \cdot 0,938 \approx 25kW \quad (4.2)$$

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 380V \cdot 67A = 44,09kVA \approx 44kVA \quad (4.3)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 380V \cdot 45A = 30,40kVA \approx 30kVA \quad (4.4)$$

$$M_n [Nm] \approx 9,55 \frac{P_n [W]}{n_n [\text{obr./min}]} = 9,55 \frac{37000}{2960} Nm \approx 120Nm \quad (4.5)$$

$$M [Nm] \approx 9,55 \frac{P}{n[\text{obr./min}]} = 9,55 \frac{25000}{2965} Nm \approx 80Nm \quad (4.6)$$

po przekształceniu wyrażenie (4.6) można przedstawić do postaci

$$M [Nm] \approx A \frac{S [VA]}{f [Hz]} \quad \text{gdzie} \quad A = \frac{\cos \phi \cdot \eta \cdot p}{2 \cdot \pi} = \frac{0,89 \cdot 0,938 \cdot 1}{2 \cdot \pi} = 0,132 \quad (4.7)$$

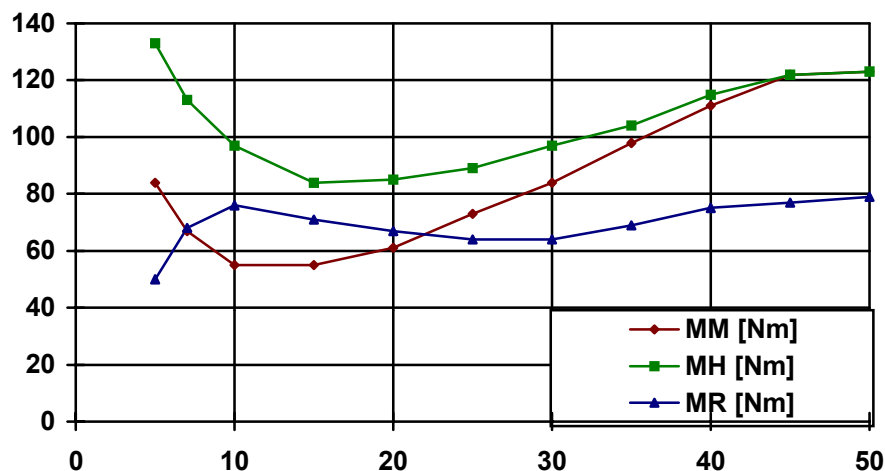
W równaniach (4.1) - (4.7) występują następujące wielkości:

P_n, P - moce na wale silnika w [W], przy znamionowych i dowolnych wartościach napięcia zasilania i prądu silnika,
 U_n, U - napięcie zasilania silnika w [V], znamionowe i dowolne,
 I_n, I - prąd silnika w [A], znamionowy i dowolny,
 S_n, S - moc pozorna silnika w [VA], znamionowa i dowolna,
 M_n, M - moment silnika w [Nm], znamionowy i dowolny,
 n_n, n - prędkość obrotowa silnika w [obr./min], znamionowa i dowolna,
 p - liczba par biegunów silnika,
 f - częstotliwość napięcia zasilania w [Hz].

Przebiegi momentów rozruchowych przemiennika częstotliwości o maksymalnym prądzie 65 A ilustrują przebiegi na rys. 6, do danych z tabeli 1. Przebieg MM przedstawia maksymalny moment rozruchowy przemiennika dla obniżonego napięcia wyjściowego w początkowej fazie rozruchu. Przebieg MH przedstawia maksymalny moment rozruchowy przemiennika dla podwyższonego napięcia wyjściowego i zastosowaniu dodatkowej rezystancji obciążenia w początkowej fazie rozruchu dla ograniczenia prądu silnika. Przebieg MR przedstawia rzeczywisty moment obciążenia silnika w funkcji prędkości obrotowej.

Tabela 1

f [Hz]	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50
U_{Mwy} - dla MM [V]	26	29	34	51	75	112	155	212	237	338	380
MM [Nm]	84	67	55	55	61	73	62	98	96	122	123
U_{Hwy} - dla MH [V]	41	49	60	78	105	137	179	226	285	340	380
MH [Nm]	133	113	97	84	85	89	97	104	115	122	123
I [A]	29	42	59	64	59	54	50	47	45	47	48
S[kVA]	2.0	3.6	6.1	8.6	10.7	12.8	15.5	18.4	22.2	27.6	31.6
MR[Nm]=A x [S/f]	50	68	76	71	67	64	64	69	75	77	79



Rys. 6. Przebiegi maksymalnych momentów rozruchowych przemiennika częstotliwości i rzeczywistego momentu obciążenia przy nastawach programowych dla średniego i ciężkiego obciążenia typu wentylatorowego. (Oś x częstotliwość napięcia zasilania silnika w [Hz], oś y moment w [Nm])

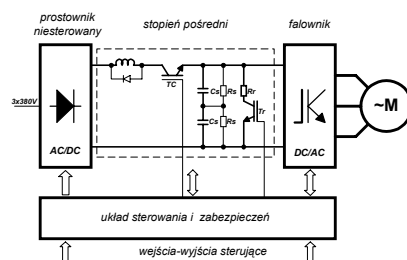
Na podstawie analizy rys. 6 stwierdzono, że rozruch silnika obciążonego momentem według przebiegu MR jest możliwy przy zastosowaniu charakterystyki o podwyższonym przebiegu napięcia wyjściowego przemiennika – U_{Hwy} w funkcji częstotliwości.

Brak możliwości zadawania w przemienniku częstotliwości, początkowej (startowej) wartości napięcia i częstotliwości rozruchu silnika powodował, że w chwili rozpoczynania rozruchu przemiennik był wyłączany przez układ zabezpieczenia przeciw przeciążeniowego lub układ zabezpieczenia prze-

ciw zwarcioviego. Zastosowanie układu przedstawionego na rys.4, umożliwiło właściwe przeprowadzenie rozruchu silnika bez ograniczania własności regulacyjnych wydajności dmuchaw.

5. 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.7, 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.7. 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 wartości skutecznej napięcia międzyfazowego 380V, rys.3.

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 harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego falowania dla zapewnienia szybkich zmian prędkości obrotowej silnika. W takim przypadku nastąpi chwilowe zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym falownika, 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 harmonicznych w napięciu wyjściowym falownika będzie występował przejściowo.

6. Wnioski

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

- przedłużenie żywotności kondensatorów obwodu pośredniego,

IV Krajowa Konferencja Naukowa SENE'99 Łódź 17-19 XI/99

- zmniejszenie napięcia silnika w początkowej fazie rozruchu, przy jednoczesnej symetryzacji prądów przewodowych silnika poprzez zmniejszenie udziału zawartości wyższych harmonicznych,
- znaczne ograniczenie promieniowania elektromagnetycznego kabli silnikowych,
- zmniejszenie kosztów budowy i gabarytów filtrów wyjściowych LC dla uzyskania sinusoidalnego napięcia zasilania silnika bez zawartości wyższych harmonicznych,
- zwiększenie sprawności silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości poprzez ograniczenie udziału wyższych harmonicznych 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 falownika 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.

7. Literatura

1. Dmowski A., Szymański J., „Modulacja sinusoidalna napięcia falownika 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. Ptaszyński L., "Przetwornice częstotliwości – Budowa, dobór, zastosowanie i eksploatacja", Envirotech, Poznań 1996