

Koncepcja tramwajowego napędu falownikowego sterowanego wektorowo

W referacie przedstawiono możliwość wykorzystania do napędu wózka tramwaju grupowego układu napędowego z dwoma silnikami indukcyjnymi zasilanym z jednego falownika napięciowego. Jeden z silników sterowany jest wektorowo realizując algorytm pośredniego sterowania momentu i strumienia i pracuje w układzie zamkniętym ze sprzężeniem od prądu stojana i prędkości kątovej wirnika. Silnik towarzyszący zasilany jest tym samym napięciem co silnik sterowany i pracuje w układzie otwartym. Proponowana strategia sterowania polega na wymuszaniu prądu stojana i pulsacji poślizgu. Zamieszczono wyniki badań napędu przy wykorzystaniu symulacji komputerowej.

1. WPROWADZENIE

Ostatnio w licznych zastosowaniach przemysłowych upowszechniło się wykorzystywanie tranzystorowych falowników napięcia do regulacji prędkości obrotowej klatkowych silników indukcyjnych. Silniki indukcyjne ze względu na swoją prostą budowę, dużą niezawodność i odporność na trudne warunki eksploatacji (brak komutatora), od wielu lat stanowią podstawowy rodzaj napędu elektrycznego w różnych dziedzinach gospodarki. Rozwój energoelektroniki (pojawienie się odpowiednich tranzystorów mocy) i mikroelektroniki (opracowanie nowych coraz bardziej wydajnych systemów mikroprocesorowych) spowodowały powszechną dostępność sterowanych przekształtników częstotliwości umożliwiających wygodną i niezawodną regulację prędkości obrotowej w napędach wykorzystujących takie silniki.

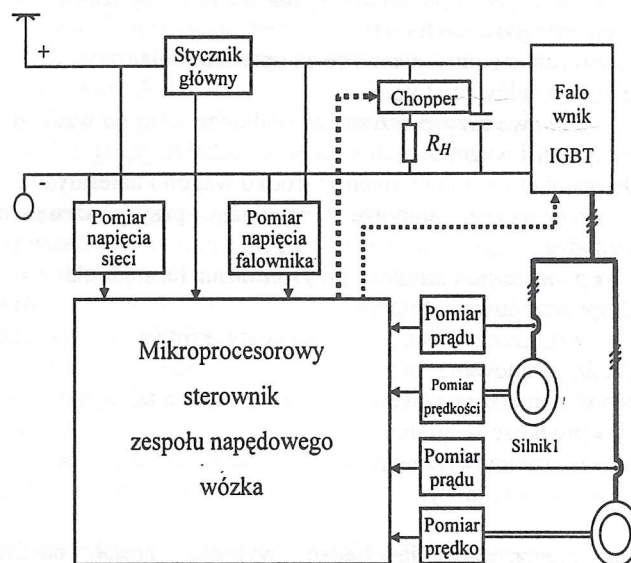
Ze względów eksploatacyjnych i ekonomicznych silniki indukcyjne są interesującą alternatywą dla szeroko do tej pory stosowanych w trakcji elektrycznej silników prądu stałego. Potrzeba modernizacji istniejącego taboru tramwajowego w kraju doprowadziła do podjęcia prób opracowania własnych propozycji wykorzystania w tym celu falownikowych układów napędowych [1]. Powszechnie stosowane metoda sterowania w tych układach ogranicza się do tzw. sterowania częstotliwościowego, polegającego na bezpośrednim kształtowaniu amplitudy i częstotliwości podstawowej harmonicznej trójfazowej fali napięcia wytwarzanej przez falownik. Metoda ta nie pozwala jednak na precyzyjną regulację momentu napędowego rozwijanego przez silnik.

W teorii napędu elektrycznego od dawna znane są bardziej złożone metody sterowania pozwalające na osiągnięcie tego celu. Oparte są one na wykorzystaniu opisu dynamiki silnika indukcyjnego za pomocą wektorów przestrzennych pozwalających na interpretowanie trójfazowych przebiegów napięć, prądów i strumieni magnetycznych jako obracających się wektorów na płaszczyźnie zmiennej zespolonej. Dla tak opisanego modelu silnika można podać różne struktury układów sterowania pozwalających otrzymywać w silniku zadaną wartość momentu [2]. Struktury te wynikają z odmiennych koncepcji podejścia do problemu syntezy sterowania i różnią się między sobą dokładnością realizacji założonego celu, stopniem komplikacji obliczeń, odpornością na niedokładną

znajomość parametrów silnika a także możliwością ograniczenia skutków awarii układów pomiarowych. Dla właściwego kształtowania dynamiki napędu bez nadmiernego rozbudowywania algorytmu obliczeniowego wskazane jest korzystanie ze sprzężeń zwrotnych od prądu stojana i prędkości kątovej wirnika.

2. STRUKTURA UKŁADU STEROWANIA

Schemat blokowy proponowanego układu napędowego pojedynczego wózka tramwajowego przedstawiono na poniższym rysunku



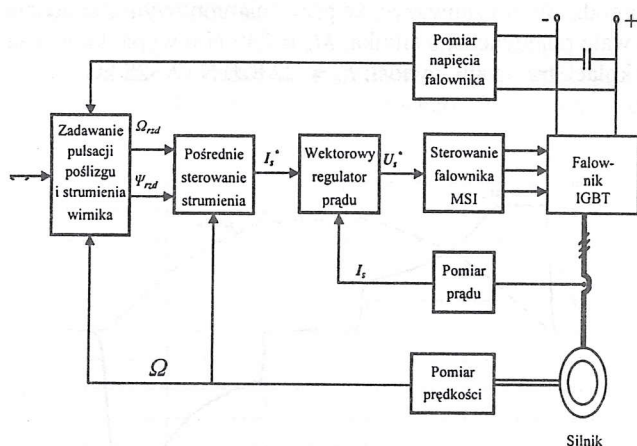
Rys. 1. Schemat blokowy napędu wózka tramwajowego. Silnik2

W układzie napędowym wykorzystane są dwa silniki indukcyjne zasilane z jednego falownika. Oba silniki w takim napędzie grupowym nie mogą być jednocześnie w pełni sterowane, ponieważ napięcie zasilające jest wspólne. Wektorowo sterowany jest więc tylko jeden z silników, ten który pracuje w układzie zamkniętym ze sprzężeniem zwrotnym od prądu stojana i prędkości kątovej wirnika. Pomiar prądu i prędkości w silniku niesterowanym (towarzyszącym) służą jedynie w celu kontroli poprawności jego pracy i zwiększeniu niezawodności napędu. W przypadku uszkodzenia układów pomiarowych w silniku

sterowanym, sterowanie może być samoczynnie przeniesione na drugi silnik. Przeniesienie sterowania może również nastąpić w przypadku stwierdzenia zbyt dużych różnic między stanami silników obserwowanych na podstawie mierzonych przebiegów prądu i prędkości kątovej.

Nadażanie silnika towarzyszącego za silnikiem sterowanym wynika z naturalnych właściwości maszyn asynchronicznych. W silnikach indukcyjnych moment napędowy jest funkcją różnicy prędkości (poślizgu) występującego pomiędzy wirującym polem magnetycznym stojana a wirnikiem. Jeśli silnik towarzyszący przyspieszy w stosunku do silnika sterowanego, to jego poślizg się zmniejszy i zmniejszy się rozwijany moment napędowy nie pozwalając na nadmierny wzrost prędkości. I odwrotnie, jeżeli silnik towarzyszący zostanie przyhamowany, to jego poślizg wzrośnie i odpowiednio wzrośnie moment napędowy pozwalając na pokonanie zwiększonych oporów.

Schemat proponowanego układu sterowania dla silnika sterowanego wektorowo przedstawia się następująco:

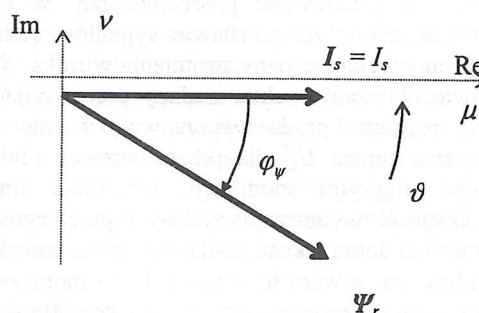


Rys. 2. Schemat układu sterowania wektorowego falownikowego napędu trakcyjnego z silnikiem indukcyjnym.

Sterownik realizuje w tym silniku algorytm polegający na jednoczesnym pośrednim sterowaniu momentu i strumienia wirnika. Możliwość zmiany strumienia jest konieczna ze względu na ograniczenie amplitudy napięcia zasilającego silnik, wprowadzane przez falownik. W każdym napędzie z silnikiem indukcyjnym wymagana amplituda napięcia stojana rośnie wraz z prędkością i dla dużych prędkości napięcie wytwarzane przez falownik okazuje się niewystarczające. Zmiana strumienia silnika pozwala także na dostosowanie wartości maksymalnej momentu (napędzającego lub hamującego), który może rozwinąć silnik, do aktualnej wartości napięcia zasilającego panującego w sieci trakcyjnej. Moment maksymalny jest określany w funkcji prędkości wirnika i jest stały przy niskich prędkościach a po przekroczeniu pewnego progu powinien maleć wraz ze wzrostem prędkości. Wynika to także z konieczności ograniczenia prądu pobieranego przez silnik z falownika.

W przedstawionym na rys. 2 układzie sterowania wykorzystano metodę tzw. pośredniego sterowania strumienia wirnika. [2], [3]. W tym celu do opisu dynamiki

silnika przyjęto układ współrzędnych związany z wektorem prądu stojana.



Rys. 3. Zasada sterowania silnikiem indukcyjnym w układzie z orientacją wektora prądu.

Silnikiem sterujemy wykorzystując rzeczywiste wielkości - amplitudę prądu stojana I_s (moduł wektora prądu) i pulsację poślizgu Ω_r . Silnik opisany jest wówczas równaniami

$$\begin{aligned} T_r \frac{d\Psi_r}{dt} + \Psi_r &= L_m I_s \cos \varphi_\psi \\ T_r \frac{d\varphi_\psi}{dt} + L_m \frac{1}{\Psi_r} I_s \sin \varphi_\psi &= -T_r \Omega_r \end{aligned} \quad (1)$$

$$M = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_s \sin \varphi_\psi$$

Jeżeli założymy stałe „wzbudzenie” silnika, to modulem prądu trzeba sterować zgodnie z podanym niżej równaniem

$$\Psi_r = \text{const} \quad \text{gdy} \quad I_s = \frac{1}{L_m} \frac{\Psi_{rz}}{\cos \varphi_\psi} \quad (2)$$

Moment jest wtedy proporcjonalny do pewnej wielkości pomocniczej Ω_{rm} stanowiącej po prostu pulsację poślizgu w stanie ustalonym i określonej przez tangens kąta zwartego pomiędzy wektorami prądu i strumienia nazywanego kątem obciążenia silnika

$$M = \frac{3}{2} p \frac{\Psi_r^2}{R_r} \Omega_{rm} \quad \text{gdzie} \quad \Omega_{rm} = -\frac{1}{T_r} \text{tg} \varphi_\psi \quad (3)$$

Aby uzyskać taką sytuację, chwilowa wartość pulsacji poślizgu musi być wymuszona zgodnie z tą wielkością pomocniczą według zależności

$$\Omega_r = \Omega_{rm} - \frac{d}{dt} \varphi_\psi \quad (4)$$

Przy powolnych zmianach wartości zdanej strumienia wirnika sterowanie może być realizowane w oparciu o przedstawiony wyżej algorytm. W przypadku potrzeby wymuszania szybszych zmian modułu strumienia w silniku algorytm staje się bardziej złożony [3].

Układ prądowo-zorientowany prowadzi do struktury sterowania prostszej obliczeniowo i łatwiejszej w praktycznym strojeniu, niż powszechnie spotykane sterowanie połowo-zorientowane, w którym układ współrzędnych jest związany z wektorem strumienia wirnika. W proponowanym układzie sterowania poprzez wartości

zadawane pulsacji poślizgu Ω_{rzd} i modułu wektora strumienia Ψ_{rzd} wpływa się na chwilowe położenie i długość wektora Ψ_r w układzie współrzędnych pokazanym na rys. 3. Zadanie to jest realizowane pośrednio, tzn. w pewnym modelu dynamicznym na podstawie sygnałów zadających jest wyznaczany wektor zadany strumienia wirnika Ψ_r^* i na tej podstawie obliczany wektor zadany prądu stojana I_s^* . Wektorowy regulator prądu wypracowuje z kolei zadany wektor napięcia stojana U_s^* dla układu sterowania falownika realizującego algorytm modulacji szerokości impulsów (MSI). Taki sposób wymuszania zadanych przebiegów prądu stojana zapewnia dobrą jakość zasilania silnika, umożliwiając lepszy wpływ na zawartość wyższych harmonicznych w porównaniu z często proponowaną regulacją prądu opartą na bezpośrednim sterowaniu kluczami falownika z wykorzystaniem regulatorów histerezowych. W układzie współrzędnych nieruchomo związanym z uzwojeniami stojana wektor I_s^* wiruje z prędkością kątową równą sumie elektrycznej prędkości kątowej wirnika i chwilowej pulsacji poślizgu wyliczonej w układzie sterowania pośredniego.

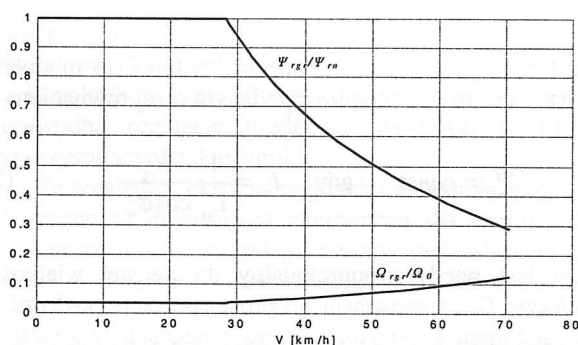
3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne przeprowadzono przyjmując dane znamionowe silnika indukcyjnego STDA 200L4 produkowanego w firmie EMIT S.A. Żychlin: moc 50 kW,

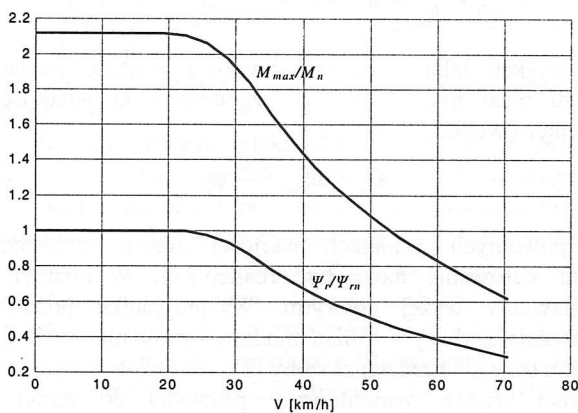
napięcie 380 V, prąd 88 A, prędkość obrot. 1917 obr/min, częstotliwość 65 Hz, liczba par biegunów 2, połączenie uzwojeń - gwiazda, wsp.mocy 0,92, sprawność 94%, rodzaj pracy S1. Do wyznaczenia parametrów modelu silnika wykorzystano poza danymi znamionowymi wyniki próby biegu jałowego i doświadczalnego pomiaru przeciążalności momentem uzyskane od producenta. Przy modelowaniu falownika założono napięcie zasilające 600 V oraz maksymalny prąd obciążenia 360 A (czyli 180 A dla jednego silnika).

W badaniach symulacyjnych przyjęto, że rozważany napęd zastosowano w tramwaju typu 105N: liczba wózków napędzanych 2 (4 silniki), masa własna 17 700 kg, przekładnia 1:7,33, średnica kół 640 mm, maksymalna prędkość 70 km/godz.

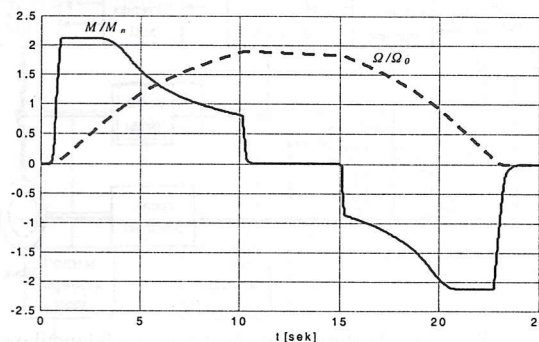
Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na wykresach w jednostkach względnych przyjmując dla napięcia, prądu, strumienia i momentu wartości odniesienia odpowiadające wartościom znamionowym silnika. Dla prędkości kątowych przyjęto jako wartość odniesienia znamionową synchroniczną elektryczną prędkość obrotową (przy zasilaniu 64 Hz) $\Omega_0 = 408,4$ rad/sek co odpowiada prędkości tramwaju $V_0 = 32,11$ km/godz. Warto zauważyć, że przy znamionowym momencie na wale pojedynczego silnika: $M_n = 249$ Nm wypadkowa siła na kołach tramwaju wynosi: $F_n = 22\ 820$ N (2 328 kG).



Rys. 4. Charakterystyki ograniczające wartości sygnałów zadawanych wynikające z danych technicznych przyjętego falownika.



Rys. 5. Charakterystyki statyczne napędu tramwaju (dla pojedynczego silnika).



Rys. 6. Wyniki badań symulacyjnych jazdy tramwaju z uwzględnieniem jednakowych charakterystyk zadawania strumienia i ograniczenia maksymalnej wartości poślizgu dla rozruchu i hamowania badanego napędu.

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki ograniczające wartości zadawanych sygnałów pulsacji poślizgu Ω_{rzd} i strumienia wirnika Ψ_{rzd} wynikające z przyjętych danych technicznych falownika. Warunki maksymalnego dopuszczalnego obciążenia określono przyjmując maksymalny prąd stojana $2,045 I_{sn} = 180$ A, a maksymalne napięcie stojana $0,966 U_{sn} = 367$ V. Przyjęty niewielki zapas napięcia zapewnia prawidłową pracę wektorowego regulatora prądu (rys. 2) w stanach dynamicznych. Na rys. 5 zamieszczono charakterystyki statyczne proponowanego napędu dla pojedynczego silnika. Przyjętą w układzie sterowania charakterystykę zadawania strumienia wygładzono w celu uniknięcia skokowej zmiany pochodnej strumienia, która stanowi niepotrzebne zakłócenie w pracy układów regulacji. W celu sprawdzenia przydatności omawianego sposobu sterowania silników indukcyjnych do napędu tramwaju przeprowadzono symulacje komputerową działania takiego napędu grupowego w stanach dynamicznych związanych z rozpędzaniem i hamowaniem nieobciążonego tramwaju. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rys. 6.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły, że proponowana koncepcja wektorowego sterowania dla

grupowego napędu z dwoma silnikami indukcyjnymi nadaje się do zastosowania w tramwaju. W normalnych warunkach pracy, gdy nie ma różnicy prędkości kół napędzanych przez oba silniki, przebiegi wszystkich wielkości w silniku towarzyszącym pokrywają się z przebiegami odpowiednich wielkości w silniku sterowanym. Należy zauważyć, że w trakcie hamowania napięcie stojana jest wyraźnie mniejsze od wprowadzanego ograniczenia. Oznacza to, że przy hamowaniu można się posłużyć inną charakterystyką zdawania strumienia, co pozwoliłoby przy tym samym napięciu zasilania falownika i prądzie obciążenia zwiększyć intensywność hamowania.

5. LITERATURA

- [1] Giziński Z.: *Falownikowy układ napędowy do nowych i modernizowanych tramwajów*. Technika Transportu Szynowego, 2001, s.75 - 79.
- [2] Dębowski A.: *O możliwościach wykorzystania w napędzie trakcyjnym silników indukcyjnych sterowanych wektorowo*. Technika Transportu Szynowego, 2002, s.77 - 84.
- [3] Dębowski A.: *Pośrednie sterowanie w napędzie elektrycznym przy wykorzystaniu stymulatora stanu*. Rozprawy Naukowe z.111, Zeszyty Naukowe Nr 552, Politechnika Łódzka, 1991.