

Napędy wektorowe ANSALDO – alternatywa dla silników prądu stałego

W przemyśle najczęściej spotykanymi urządzeniami wykonawczymi są silniki elektryczne - klatkowe. Wykorzystuje się je do napędu pomp i wentylatorów, przenośników, dźwigów, maszyn technologicznych. W celu zapewnienia prawidłowej pracy napędzanych urządzeń potrzebne jest płynne sterowanie prędkością lub momentem obrotowym silnika.

Okazuje się, że najwięcej problemów przysparza regulacja wartości momentu rozwijanego przez silniki klatkowe. Moment obrotowy silnika jest proporcjonalny do prądu płynącego w klatce wirnika. Jak jednak dokonać pomiaru jego wartości, skoro na tabliczkę zaciskową wyprowadzone są jedynie końce uzwojeń stojana? Jak sterować wartością prądu wirnika, aby możliwa była płynna regulacja momentu?

WSTĘP

Do niedawna, do zastosowań gdzie konieczna była regulacja prędkości obrotowej stosowano wyłącznie silniki prądu stałego (DC) regulowane poprzez zmianę wartości napięcia zasilającego jego stojan lub wirnik. Obecnie dzięki rozwojowi techniki mikroprocesorowej i elektroniki wysokonapięciowej, sterowanie prędkością obrotową i momentem silników prądu zmiennego (AC) jest równie proste i tanie jak w przypadku napędów DC.

W zastosowaniach przemysłowych, coraz częściej układy napędowe DC są zastępowane napędami AC z silnikami klatkowymi. Podstawową zaletą zespołów napędowych AC są właśnie silniki, które w odróżnieniu od silników DC, charakteryzują się bardzo prostą budową. Poza tym nie posiadają szczotek i mechanicznego komutatora. Są zatem tańsze i mniej awaryjne, nie wymagają tak częstych napraw i konserwacji jak silniki DC. Co więcej, awaryjność przekształtników tyrystorowych - najczęściej zasilających silniki prądu stałego - jest stosunkowo duża. Dzięki zastosowaniu nowej generacji tranzystorów mocy IGBT przemienniki częstotliwości do silników AC są praktycznie niezawodne. A zatem, zastąpienie napędu DC układem napędowym AC powoduje nie tylko zminimalizowanie ceny, ale również zmniejszenie kosztów jego eksploatacji oraz zwiększenie niezawodności.

Dotychczas zamiana silnika prądu stałego silnikiem prądu zmiennego nie zawsze była możliwa. Dotyczyło to zwłaszcza zastosowań wymagających wysokiej dynamiki napędu, precyzyjnej regulacji prędkości i momentu obrotowego oraz efektywnej pracy przy niskich lub bardzo wysokich prędkościach. Układy napędowe z silnikami prądu zmiennego zaczęły nabierać znaczenia dopiero po pojawieniu się tzw. wektorowych przemienników częstotliwości. Przykładem są przemienniki częstotliwości koncernu ANSALDO, które potrafią regulować prędkość i moment obrotowy silników asynchronicznych - klatkowych. Dzięki tym własnościom, z powodzeniem mogą one zastępować układy napędowe z silnikami prądu stałego.

Napędy prądu zmiennego

Aby w pełni wykorzystać zalety silników prądu zmiennego konieczne staje się zastosowanie właściwego napędu powszechnie nazywanego przemiennikiem częstotliwości lub falownikiem.

Typowy przemiennik częstotliwości składa się z trzech jednostek: prostownika, pośredniego obwodu prądu stałego z baterią kondensatorów i z falownika napięcia.



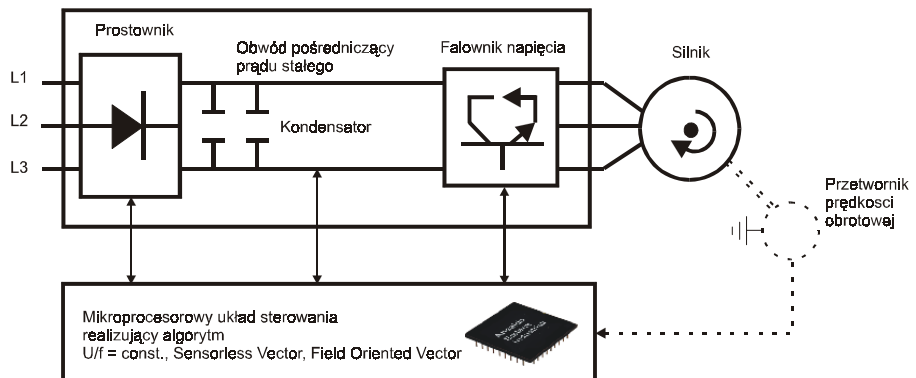
Regulacja wydajności pompy może się odbywać poprzez zmianę prędkości silnika. Płynną regulację prędkości umożliwia przemiennik częstotliwości.



W urządzeniach dźwigowych silnik powinien dysponować bardzo wysokim momentem rozruchowym nawet przy zerowej prędkości. Celowe jest tu zatem zastosowanie napędu wektorowego.

Przemiana energii elektrycznej przebiega dwustopniowo: z sieci zasilającej (najczęściej prądu zmiennego) pobierana jest energia o stałych parametrach U [V] oraz f [Hz], która za pośrednictwem prostownika sterowanego przekształcana jest w napięcie stałe. Następnie w niezależnym module falownika z napięcia stałego tworzone są 3 fazy napięcia zmiennego o odpowiedniej amplitudzie i częstotliwości.

Za funkcjonalność przemiennika częstotliwości odpowiada mikroprocesorowy układ sterujący. Jego zadaniem jest odczyt zmiennych parametrów silnika, generowanie odpowiednich załączeń tranzystorów mocy oraz kontrola stanu poszczególnych elementów przemiennika i silnika.



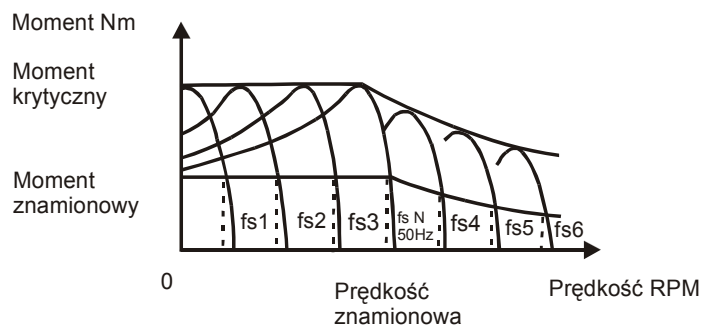
Rys.1 Schemat ogólny przemiennika częstotliwości

W ciągu jednej sekundy mikroprocesor przetwarza średnio 150 000 odczytów zmiennych oraz wypracowuje odpowiednie sterowania dla tranzystorowego falownika napięcia. Ze względu na potrzebę sterowania w czasie rzeczywistym wszystkimi elementami przemiennika coraz powszechniej jako jednostki obliczeniowe stosuje się szybkie procesory sygnałowe.

Metody sterowania prędkością i momentem

Układ sterujący przemiennika częstotliwości może realizować różne algorytmy. Każdy z nich zapewnia inną funkcjonalność i własności zespołu napędowego. Najprostszym i najczęściej stosowanym jest algorytm skalarny U/f . Prędkość obrotowa sterowana jest tu poprzez zmianę częstotliwości zasilania uzwojeń silnika. W celu zachowania względnie stałego momentu obrotowego, proporcjonalnie do zmian częstotliwości zmieniana jest również wartość napięcia podawanego na zaciski silnika. Działanie skalarnego przemiennika częstotliwości ogranicza się zatem do zadawania na zaciski silnika napięcia o określonej częstotliwości.

Przemiennik częstotliwości U/f nie reguluje zatem prędkości obrotowej a jedynie częstotliwość napięcia zasilania silnika. Ze względu na występowanie poślizgu, (różnicy pomiędzy prędkością wirowania pola w silniku a prędkością obrotową wału) prędkość obrotowa wału silnika nie jest ściśle proporcjonalna do częstotliwości. Przemienniki częstotliwości z algorytmem U/f stosuje się w aplikacjach nie wymagających dokładnej regulacji prędkości obrotowej oraz



Rys.2 Sterowanie prędkością poprzez zmianę częstotliwości

tam gdzie moment obciążenia maleje wraz z prędkością lub względnie jest stały w całym zakresie jej zmian. Do tej grupy można zaliczyć takie urządzenia jak pompy wirowe, wentylatory, sprężarki, dmuchawy oraz walcarki i taśmociągi.

Wadami przemienników skalarnych są długie stany przejściowe, oscylacje wokół prędkości zadanej, brak możliwości regulacji momentu obrotowego oraz jego niewielka wartość przy niskich częstotliwościach. Niewątpliwą zaletą jest przystępna cena, łatwość uruchamiania oraz brak konieczności stosowania dodatkowych urządzeń realizujących sprzężenie zwrotne od prędkości.

W ostatnich latach opracowano tzw. napędy wektorowe umożliwiające precyzyjną regulację prędkości (nie częstotliwości) oraz pełną kontrolę momentu rozwijanego przez silnik. Dostępne na rynku

rozwiązania różnią się od siebie sposobem pomiaru wewnętrznego „stanu silnika” oraz metodą wpływania na jego prędkość i moment obrotowy.

Najbardziej popularne jest Sterowanie Polowo Zorientowane (*ang. Field Oriented Control*). Metodę Field Oriented Control zastosowano w nowej serii przemienników częstotliwości SVTS firmy ANSALDO.

Napędy Field Oriented Control są aktualnie jednymi z najbardziej zaawansowanych przemienników częstotliwości. Umożliwiają osiągnięcie właściwości oraz parametrów pracy porównywalnych - a nawet lepszych - niż w napędach prądu stałego. Potrafią one w sposób rozdzielny sterować prądem wirnika odpowiedzialnym za rozwijanie momentu obrotowego oraz prądem magnesującym - wytwarzającym strumień. Dzięki temu, przemiennik częstotliwości może sterować prędkością i momentem obrotowym w sposób niezależny.



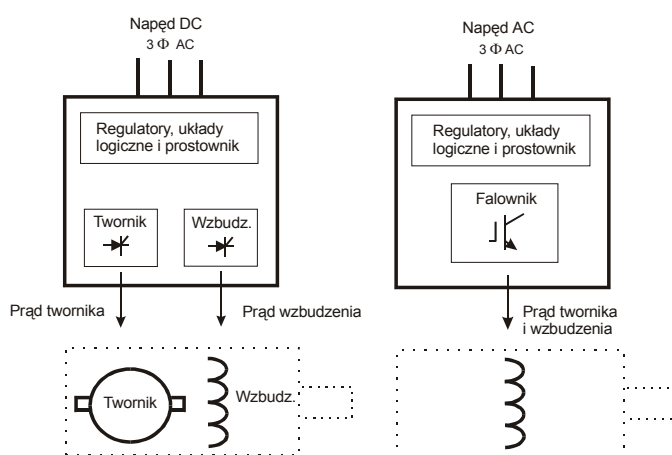
W kruszarkach i młynach zmiany obciążenia są nieregularne i bardzo gwałtowne. Napęd wektorowy, dzięki wysokiej dynamice zapewnia prawidłowy przebieg procesu rozdrabniania.

Napędy te, ze względu na swoją funkcjonalność i atrakcyjną cenę, stanowią poważną konkurencję dla układów napędowych z silnikami prądu stałego. Dzięki bezpośredniej kontroli momentu oraz możliwości wpływania na jego wartość, możliwe jest osiągnięcie wysokiej dynamiki, która charakteryzuje się szybką odpowiedzią na zmiany wartości zadanej i obciążenia silnika. Moment rozruchowy może być równy lub nawet wyższy od jego wartości znamionowej, co nie jest bez znaczenia w przypadku obracania dużych mas lub gdy tarcie spoczynkowe ma znaczne wartości. Napęd wektorowy umożliwia również wytworzenie dużego momentu chwilowego odpowiedzialnego np. za czas przyspieszania silnika w momentach zmiany prędkości zadanej. Napędy Field Oriented Control doskonale sprawdzają się w przemyśle metalurgicznym, papirniczym, tekstylnym oraz wszędzie tam, gdzie wał silnika powinien rozwijać wysoki moment obrotowy w całym zakresie prędkości – od zera do wartości maksymalnej.

Ze względu na swoją bogatą funkcjonalność, napędy te mogą być stosowane w aplikacjach, w których dotychczas wykorzystywano wyłącznie układy napędowe prądu stałego. Napędy Field Oriented Control z powodzeniem stosuje się w urządzeniach dźwigowych, nawijarkach, walcarkach, wytlaczarkach, pompach tłokowych oraz w napędach robotów.

Idea sterowania wektorowego - Field Oriented Control

Sterowanie wektorowe Field Oriented Control, najłatwiej można zrozumieć w odniesieniu do napędu prądu stałego. Patrząc na poniższy schemat można zauważyć, że napęd prądu stałego z silnikiem obcowzbudnym jest właśnie napędem wektorowym.

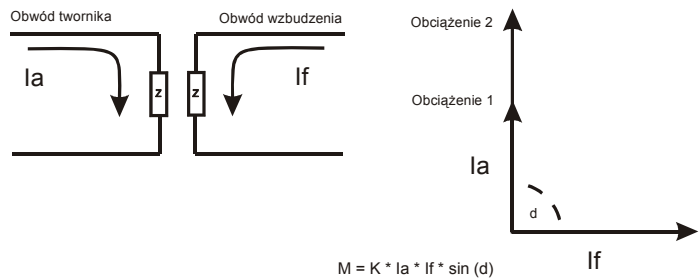


Rys.3 Porównanie cech napędów DC i AC

Zasilacz tyrystorowy steruje rozdzielnie obwodem twornika – odpowiedzialnym za rozwijanie przez silnik momentu obrotowego oraz obwodem wzbudzenia zapewniającym wytwarzanie strumienia i właściwe magnesowanie silnika. Komutator zabudowany na wirniku utrzymuje stały kąt pomiędzy wektorami

prądów twornika i wzbudzenia. Za sprawą mechanicznych zależności pomiędzy komutatorem a dotykającymi do niego szczotkami, kąt ten wynosi 90°. Zgodnie z poniższą formułą, przy kącie równym 90° rozwijany przez silnik moment obrotowy jest maksymalny.

$$M = K \times I_a \times I_f \times \sin(d)$$



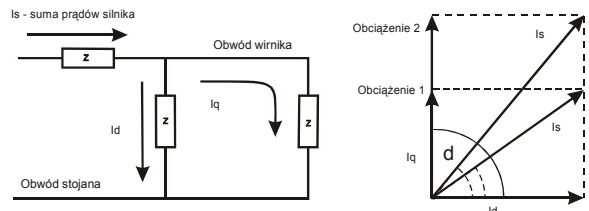
Gdzie: I_a – prąd twornika; I_f – prąd wzbudzenia;
 $\sin(d)$ – kąt pomiędzy wektorami I_a i I_f ; K - współczynnik proporcjonalności

Rys. 4 Schemat zastępczy silnika DC

Utrzymując na stałym poziomie prąd wzbudzenia, można płynnie regulować moment zmieniając tylko prąd twornika.

Zgodnie ze schematem zastępczym silnika AC, pierwszą zauważalną rzeczą jest to, że obwody „twornika” i „wzbudzenia” nie są odseparowane.

Gdzie: I_q – prąd wirnika; I_d – prąd magnesujący; $\sin(d)$ – kąt pomiędzy wektorami I_q i I_d ; K - współczynnik proporcjonalności

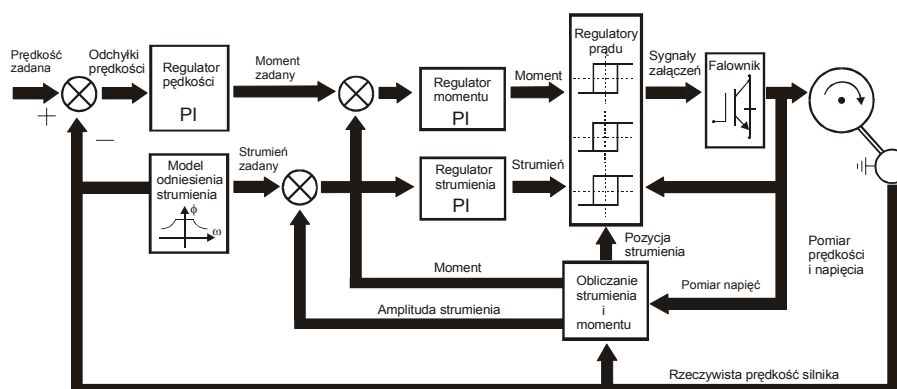


Rys.5 Schemat zastępczy silnika AC

Całkowity prąd I_s pobierany przez silnik jest więc sumą wektorową prądu wirnika I_q oraz prądu magnesującego I_d . Ponadto nie ma fizycznej możliwości pomiaru prądu twornika, gdyż na tabliczkę zaciskową wyprowadzone są jedynie końce uzwojeń stojana.

W napędach wektorowych ANSALDO, poszczególne prądy oraz kąt zawarty między nimi są określane na podstawie pomiaru napięć stojana oraz prędkości obrotowej wału silnika. Wyznaczone w ten sposób wielkości, stanowią podstawę do obliczenia wartości strumienia oraz rozwijanego w danej chwili przez silnik momentu obrotowego.

Informacja o prędkości silnika jest dodatkowo wykorzystywana przez główny regulator prędkości P.I. W przeciwieństwie do napędów U/f, regulator prędkości nie reguluje częstotliwości zasilania uzwojeń, ale moment obrotowy rozwijany przez silnik.



Rys.6 Schemat blokowy napędu Field Oriented Control

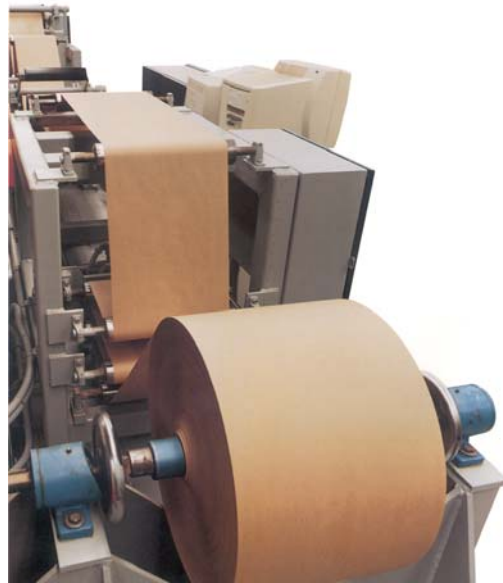
Sterowanie momentem pozwala tu na pełną kontrolę prędkości w stanach przejściowych oraz na zwiększenie dynamiki zespołu napędowego.

Jak widać na schemacie blokowym, oprócz regulatora prędkości występuje jeszcze jeden, równoległy regulator. Celem zapewnienia prawidłowego magnesowania silnika, w napędach Field Oriented Control stosuje się oddzielny regulator strumienia. Działa on niezależnie od regulatora prędkości, a jego

zadaniem jest utrzymywanie optymalnego i w miarę możliwości stałego strumienia magnetycznego. Ze względu na konieczność osłabienia pola powyżej prędkości znamionowej, wartość zadana dla regulatora strumienia uzależniona jest od aktualnej prędkości silnika i od modelu odniesienia strumienia. Powyżej prędkości znamionowej, napięcie podawane na zaciski silnika nie może bowiem przekroczyć jego wartości znamionowej. Zwiększenie napięcia silnika ponad tą wartość groziłoby przebicciem izolacji uzwojeń silnika.

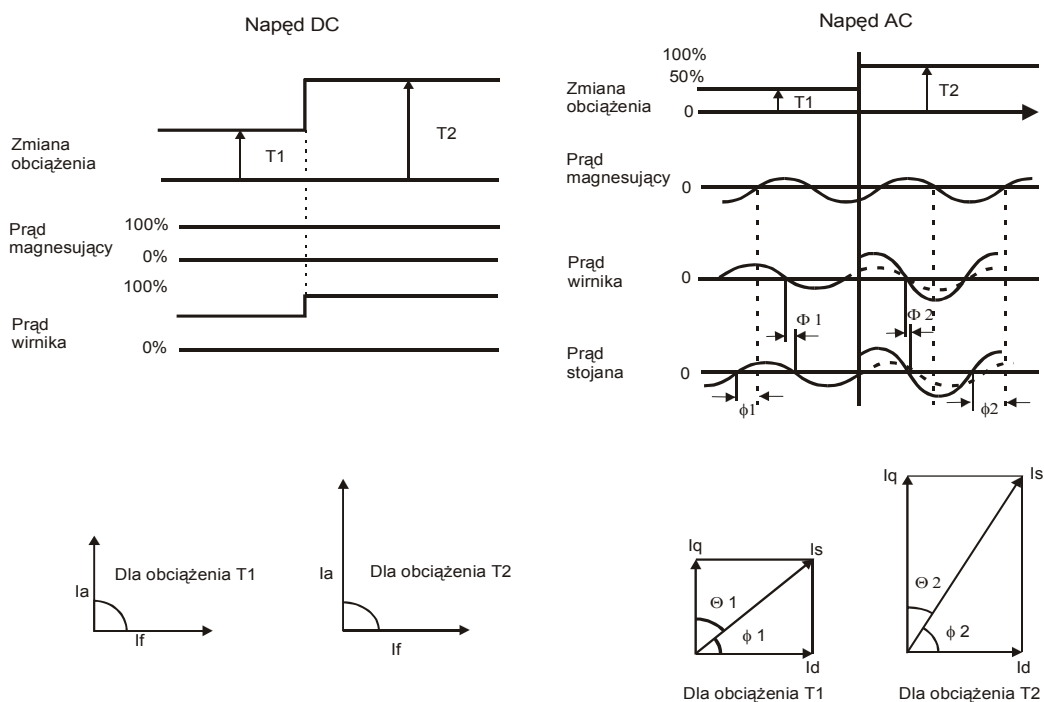
Sygnaly wypracowane przez regulatory strumienia i momentu wykorzystywane są przez blok regulatorów prądu, które generują sygnaly stanów załączeń tranzystorowego falownika PWM.

Jak widać, filozofia Field Oriented Control polega na rozdzielnym sterowaniu momentem i strumieniem silnika - analogicznie jak w napędzie z silnikiem prądu stałego. Dzięki temu dokładność regulacji prędkości wynosi 0,01%. Szybkość reakcji przemiennika na zmianę obciążenia lub wartości zadanej jest mniejsza od 5 ms. Wartość momentu rozruchowego i chwilowego - odpowiedzialnego za dynamikę układu napędowego sięga 300% momentu znamionowego.



W urządzeniach nawijających i odwijających należy kontrolować naprężenie materiału. Regulację momentu obrotowego i naprężenia nawijanego materiału umożliwia napęd wektorowy.

Efekt działania nowego przemiennika ANSALDO z algorytmem wektorowym Field Oriented Control widoczny jest w odniesieniu do napędu prądu stałego i przedstawiony jest na poniższym rysunku.



Rys. 7 Porównanie reakcji na zmianę obciążenia napędu DC i wektorowego AC

W przypadku zmiany obciążenia silnika, napęd wektorowy ANSALDO reaguje podobnie do napędu DC. Zwiększenie momentu obrotowego odbywa się poprzez zwiększenie prądu wirnika. Zarówno w silniku DC jak i AC, prąd magnesujący i kąt pomiędzy wektorami I_d oraz I_q pozostaje stały. Silnik jest zatem zawsze optymalnie namagnesowany a rozwijany przy tym moment obrotowy ma wartość maksymalną.

Podsumowanie

Dzięki niskiej cenie i wyjątkowo dużym możliwościom aplikacyjnym nowe przemienniki częstotliwości firmy ANSALDO stanowią bardzo atrakcyjną ofertę na rynku. Typowe zastosowania przemienników częstotliwości serii SVTS zostały wyszczególnione w tabelce.

W falownikach SVTS zastosowano nowe algorytmy wektorowe pozwalające na uzyskanie bardzo wysokiej dynamiki zespołu napędowego, oraz umożliwiające precyzyjną regulację prędkości i momentu obrotowego. Ze względu na swoją bogatą funkcjonalność potrafią realizować układy napędowe spełniające oczekiwania nawet najbardziej wymagających aplikacji.

Przemienniki ANSALDO mogą współpracować ze standardowymi silnikami klatkowymi. Należy pamiętać jednak, że przy prędkościach rzędu kilku lub kilkunastu obrotów na minutę wydajność zabudowanego na wale silnika wentylatora jest bardzo niska. W związku z tym, celem zapewnienia właściwego chłodzenia silnika stosuje się tzw. chłodzenie obce lub zmniejsza się obciążenie silnika.

Koszty zespołu napędowego składającego się z przemiennika wektorowego i silnika klatkowego są niewielkie w porównaniu do układów napędowych prądu stałego lub servonapędów. Funkcjonalność i właściwości napędowe są zbliżone.

Na rynku można spotkać silniki o podwyższonych parametrach przeznaczone do pracy z przemiennikami wektorowymi. Silniki te oprócz obcego chłodzenia mają lepszą i bardziej wytrzymałą elektrycznie i termicznie izolację uzwojeń oraz wirnik o zmniejszonym momencie bezwładności. Prędkości maksymalne sięgają 9500 obr/min (przykład dla silnika cztero-biegunowego).



Przenośniki wymagają zastosowania przemiennika częstotliwości do zapewnienia wysokiego momentu obrotowego i regulacji prędkości obrotowej w zakresie od kilku obr/min do prędkości maksymalnej.

Zastosowania Charakterystyka	
Wentylatory, dmuchawy i Pompy	<ul style="list-style-type: none">Prędkość obrotowa może być płynnie regulowana w zakresie od 0 do maksymalnej.Czas rozruchu i hamowania oraz kształt rampy może być dowolnie konfigurowany.Możliwe jest przejęcie kontroli nad obracającym się silnikiem (np. wentylatora wprawionego w ruch na skutek swobodnego przepływu powietrza).Dzięki wbudowanemu regulatorowi PID można regulować ciśnienie, przepływ itp.Zastosowanie falownika powoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej.
Dźwigi i Podnośniki	<ul style="list-style-type: none">Dzięki sterowaniu wektorowemu możliwe jest wytworzenie wysokiego momentu obrotowego nawet przy zerowej prędkości.Narastanie prędkości i hamowanie może odbywać się wg. krzywej „S” redukując tym samym zbędne naprężenia lin.
Młyny i Miksery	<ul style="list-style-type: none">W przypadku mieszania algorytm wektorowy umożliwia dokładną regulację i monitorowanie momentu obrotowego (pośrednio monitorowanie np. lepkości).Młyny charakteryzują się nagłymi i bardzo dużymi wzrostami obciążenia. Napęd zapewnia stabilizację prędkości i wytworzenie wysokiego momentu obrotowego.
Wirówki	<ul style="list-style-type: none">Zastosowanie falownika umożliwia rozwinięcie wysokiego momentu obrotowego – odpowiedzialnego za czas przyspieszania i hamowania dużych mas wirówki.
Przenośniki i Stoły obrotowe	<ul style="list-style-type: none">Przemiennik częstotliwości pozwala na rozwinięcie wysokiego momentu rozruchowego potrzebnego do wystartowania i wyhamowania obciążonego przenośnika.
Wytłaczarki i Nawijarki	<ul style="list-style-type: none">Wytłaczarki charakteryzują się małą inercją, dużym tarciem oraz stałym momentem obciążenia w zakresie prędkości od zera do znamionowej. Przemiennik częstotliwości umożliwia wytworzenie większego niż znamionowy momentu rozruchowego oraz dokładną regulację prędkości.W przypadku nawijarek napęd zapewnia regulację momentu obrotowego i naprężenia nawijanego materiału.