

Piotr Błaszczuk
Politechnika Łódzka, Łódź

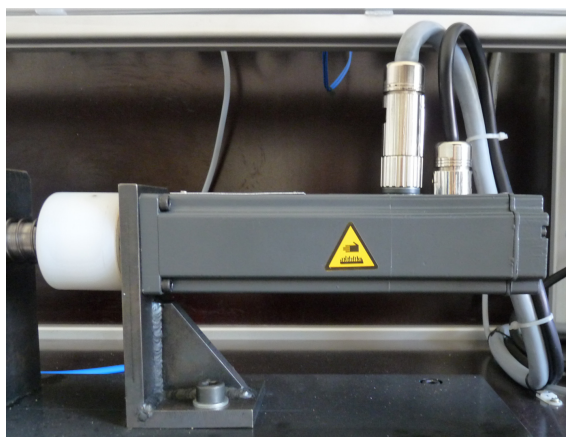
DIAGNOSTYKA STRATEGII STEROWANIA NAPĘDÓW Z SILNIKAMI PMSM

DIAGNOSTICS OF PMSM MOTORS DRIVES CONTROL STRATEGY

Abstract: Implementation of the AC drive control takes into account the wider frequency control voltage, which is the best solution in terms of power and control the economics of modern propulsion systems. Projected for this purpose frequency inverters, which are an integral part of the line converter, the circuit current and voltage of the inverter current and voltage. Widely applied to power systems voltage with a frequency pulse width modulated PWM. Use a switching frequency range of 5-50Hz, which is obtained current waveforms similar to the sine wave shape, and what makes it such propulsion systems are characterized by high efficiency and power density. Opportunities of this type power supply, determined the prevalence of high-power circuits for IGBT inverter. At power up to 150 kW are used IPM modules containing current and temperature sensors, controllers and insulated against short circuit protection systems so that the entire power system is secure and complete.

1. Wstęp

Realizacja sterowania napędami prądu przemiennego uwzględnia szeroko rozumianą regulację częstotliwości napięcia zasilającego, co jest najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia ekonomiczności zasilania i sterowania nowoczesnych układów napędowych. Projektuje się w tym celu przemienniki częstotliwości, których integralną część stanowią prostownik sieciowy, obwód prądu i napięcia stałego z falownikiem prądu i napięcia. Szerokie zastosowanie mają układy zasilania z falownikami napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM.



Rys. 1. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi firmy SIEMENS 1FT6021-6AK71-1TH0

Wykorzystują częstotliwości przełączeń rzędu 5-50Hz, przez co otrzymuje się przebiegi prądu, kształtem zbliżone do sinusoidy, co przekłada

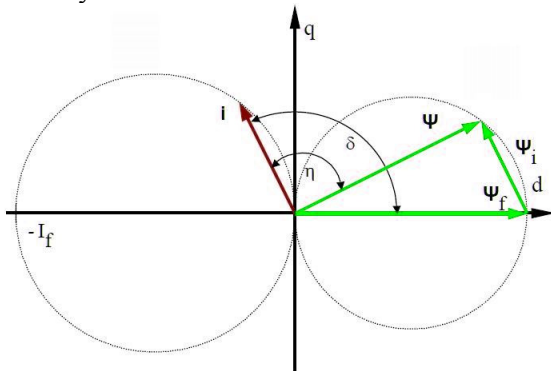
się na wysoką sprawność i gęstość mocy. Możliwości tego typu układów zasilających, zadecydowały o ich rozpowszechnieniu w zakresie wysokich mocy dla układów falownikowych z tranzystorami IGBT. Przy mocach do 150 kW stosuje się moduły IPM zawierające czujniki temperatury i prądu, izolowane sterowniki oraz układy zabezpieczające przeciw zwarciom i przepięciom, co sprawia, że układ zasilający staje się bezpieczny i kompletny. Dobór strategii sterowania dla wybranych układów napędowych, stanowi podstawowe zagadnienie przy uwzględnieniu potrzeb użytkownika napędu. Sterowanie silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi PMSM, wiąże się z uproszczeniem równań napędu ze względu na stałą wartość strumienia pola magnetycznego wirnika. Zastosowana metoda sterowania powinna uwzględniać konieczność odmagnesowania wirnika w celu uzyskania lepszych właściwości dynamicznych napędu. Najczęściej przedstawiane strategie sterowania PMSM powinny uwzględniać przyjęcie właściwego kryterium optymalności, które następnie prowadzi do odpowiednich układów sterowania. Istotne kryteria pojawiające się podczas definicji strategii sterowania silnikami synchronicznymi to:

- kryterium maksymalizacji momentu elektromagnetycznego w stosunku do prądu silnika, przy zachowaniu $\Psi_f = \text{const}$,
- kryterium maksymalizacji momentu w stosunku do strumienia stojana, przy zachowaniu $I = \text{const}$,

- kryterium zachowania stałego strumienia $\Psi = \text{const}$.

2. Metody obserwacji i analizy parametrów układów napędowych

Dedykowane metody sterowania stosowane dla układów napędowych zbudowanych w oparciu o sterownik programowalny SIMOVERT MASTERDRIVE, pozwalają na zaawansowaną regulację parametrów silnika synchronicznego SIEMENS, [1]. Otrzymane wyniki badań testowych pozwalają na przeprowadzenie analizy porównawczej, której nadrzędnym celem jest rozpoznanie przydatności układu napędowego do zadanych wymagań strukturalnych. Niestandardowe ustawienia parametrów układu napędowego SIMOVERT z regulatorem częstotliwości są możliwe do wprowadzenia, ale również ściśle zadane parametry, według określonej strategii sterowania, bywają czasem trudne do zinterpretowania na podstawie wyników pomiarowych. Wynika to z zachowania się układu napędowego w określonych warunkach pracy, a przede wszystkim z oceny charakterystyk roboczych układu.



Rys. 2. Rozkład wektorów strumienia i prądu dla strategii sterowania zorientowanego polowo

Mając do dyspozycji układ napędowy z zaimplementowaną strategią sterowania, najczęściej przyjmuje się iż jest to jeden z rodzajów strategii sterowania zorientowanego polowego. Założenie to sprowadza się do przyjęcia kąta prostego pomiędzy wektorem strumienia stojana, a prądem stojana, rys. 2, [5]. Zatem moment elektromagnetyczny wytwarzany jest przez prąd płynący w uzwojeniach fazowych silnika, który współdziała ze strumieniem magnetycznym skojarzonym z uzwojeniami poszczególnych faz, co dla układu współrzędnych dq można przedstawić następująco:

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot (\Psi \times i) \quad (1)$$

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot \begin{vmatrix} \Psi_d & \Psi_q \\ i_d & i_q \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (3)$$

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot \Psi \cdot I \cdot \sin(\eta) \quad (4)$$

Biorąc pod uwagę silne oddziaływanie twornika w maszynie synchronicznej o magnesach trwałych, należy strumień magnetyczny Ψ przedstawiać jako sumę strumienia indukowanego w uzwojeniach stojana przez prądy fazowe i strumienia wzbudzenia od magnesów trwałych:

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot [(L_s i + \Psi_f) \times i] \quad (5)$$

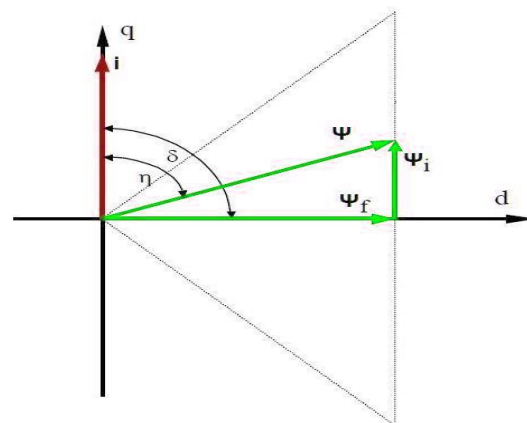
$$i \times i = 0 \quad (6)$$

$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot [\Psi_f \times i] \quad (7)$$

Po przejściu do wielkości skalarnych w układzie współrzędnych dq otrzymujemy:

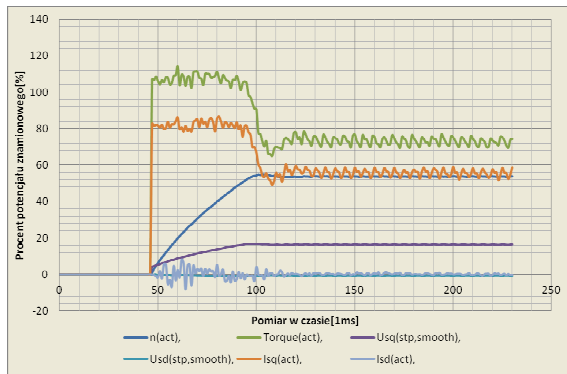
$$M_s = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_f \cdot I \cdot \sin(\delta) \quad (8)$$

Powyższe równanie zawiera definicję momentu elektromagnetycznego, proporcjonalnego do amplitudy strumienia od magnesów trwałych i amplitudy prądu oraz sinusa kąta δ pomiędzy nimi. Analizując wartość kąta δ od położenia jak na rysunku drugim do przykładu przedstawionego na rysunku czwartym, można mówić o przejściu do strategii sterowania zorientowanego wirnikowo, [5], [7].



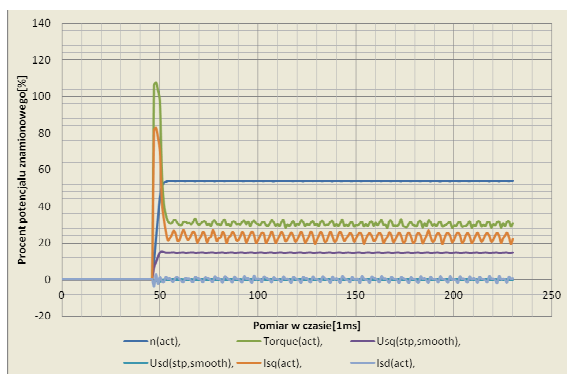
Rys. 4. Rozkład wektorów strumienia i prądu przy założeniu kryterium maksymalizacji M_e/I

Uwzględniając podstawowe dwa stany pracy układu napędowego czyli obciążenie i stan pracy jałowej, proponuje się adekwatny sposób sterowania dla wybranego trybu pracy układu napędowego.



Rys. 5. Charakterystyka rozruchowa przy obciążeniu, dla momentu znamionowego M_N

Uwzględniając nadrzędność stanu obciążenia nad stanem jałowym w pracy układu napędowego, przyjmuje się strategię sterowania adekwatną do stanu pracy nadrzędnego. Diagnozując pracę układu napędowego widać jednoznacznie bezpośredni wpływ prądu stojana na generowany w silniku moment elektromagnetyczny, rysunki 5 i 6.



Rys. 6. Charakterystyka rozruchowa bez obciążenia, dla momentu znamionowego M_N

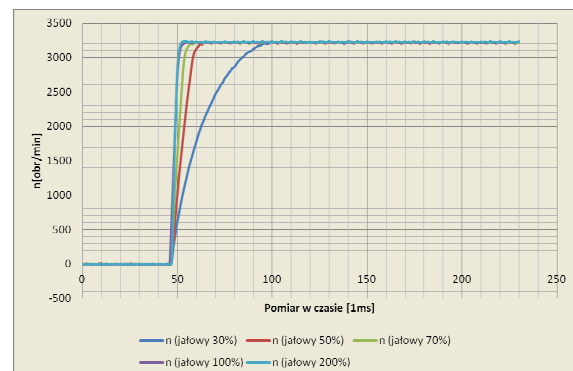
Charakterystyczna jest tutaj wartość składowej poprzecznej prądu stojana I_{sq} , która jest wprost proporcjonalna do wytwarzanego momentu, wraz ze strumieniem od magnesów trwałych. Widać na przedstawionych rysunkach generację momentu według zależności:

$$M_e = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_f \cdot I \quad (9)$$

Przy tak zadanym sterowaniu strumień stojana jest większy od strumienia wytwarzanego przez magnesy trwałe w wirniku. Kąty przestrzenne przyjmują odpowiednio wartości $\delta=90^\circ$ między prądem stojana, a strumieniem wirnika, natomiast kąt zawarty pomiędzy prądem stojana, a strumieniem stojana będzie się zmniejszał w zależności od wielkości strumienia magnetycznego wytwarzanego przez prądy fazowe Ψ_i .

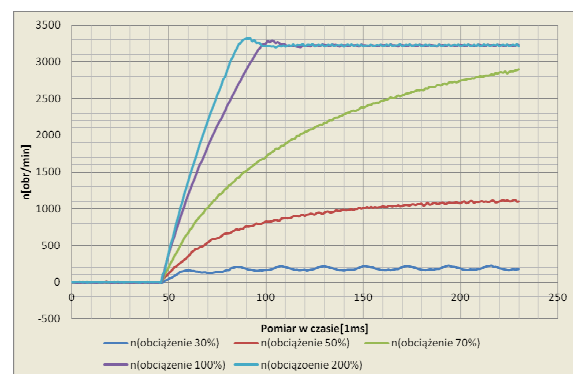
3. Diagnostyka pracy napędu z silnikiem PMSM

Badania diagnostyczne przeprowadzono dla wybranych parametrów układu napędowego z uwzględnieniem ich bezpośredniego wpływu na wybrane charakterystyki mechaniczne silnika. Problemy obserwowane przy sterowaniu układami napędowymi z silnikami indukcyjnym synchronicznym wynikają z nieliniowości obwodu magnetycznego oraz nie w pełni opisanej dynamiki wirnika z magnesami trwałymi pod wpływem zmian obciążenia, rysunki 7 i 8.



Rys. 7. Zestawienie charakterystyki prędkości dla biegu jałowego przy regulowanym momencie znamionowym

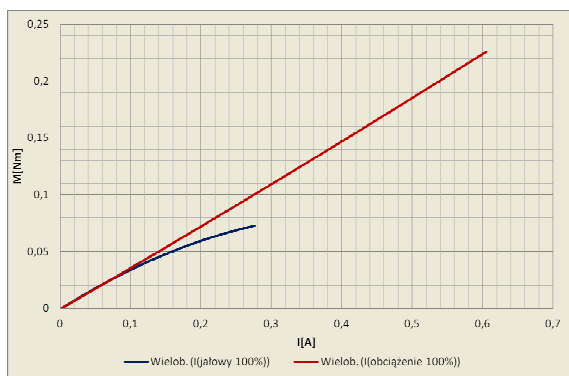
Przedstawione charakterystyki na rysunkach 7 i 8, obrazują specyfikę zachowania się napędu synchronicznego przy zastosowaniu ograniczenia procentowego momentu maksymalnego maszyny, co pośrednio wykonywane jest to przez regulację wartości wektora prądu stojana I_{sq} . [4].



Rys. 8. Zestawienie charakterystyki prędkości dla obciążenia przy regulowanym momencie znamionowym

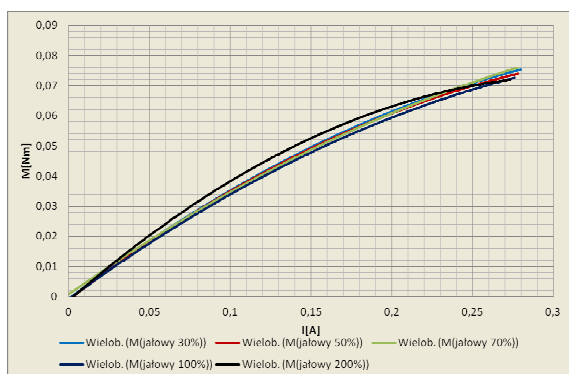
Regulacja wartości prądu stojana odbywa się w układzie dwufazowym poprzez zmianę jego składowych: I_{sd} oraz I_{sq} . Dla sterowania wektorowego zapożyczono ze sterowania silnikami

asynchronicznymi zakłada się, że pierwsza ze składowych prądu stojana I_{sd} jest odpowiedzialna za generację strumienia wzbudzenia, co w silnikach synchronicznych ze względu na strumień od magnesów trwałych nie jest istotne, natomiast druga składowa I_{sq} odpowiada za wartość momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik, rys. 7 i 8.



Rys.9. Zestawienie charakterystyk biegu jałowego i obciążenia momentu w funkcji prądu dla 100% momentu znamionowego

Dla sterowania zorientowanego wirnikowo, nie będzie występował składnik $\sin(\delta)$, który przyjmuje tutaj wartość równą jeden. Zatem strategia ta wpisuje się najkorzystniej w kryterium maksymalizacji momentu elektromagnetycznego w stosunku do prądu silnika w aspekcie diagnozowania poprawności struktury sterowania układów napędowych.



Rys. 10. Zestawienie charakterystyk biegu jałowego momentu w funkcji prądu

Badania porównawcze układu napędowego w trakcie rozruchu silnika, w pierwszych sekundach pracy, pozwala rozwiązać problem doboru odpowiedniego kryterium optymalności dla silnika synchronicznego. Bazując na tych pomiarach zauważyć można pewne cechy charakterystyczne, zwłaszcza charakterystyki pracy (9 i 10) określają zastosowaną strategię

sterowania. Świadczy o tym prosty kształt linii dla $M=f(I)$, układających się w podobny sposób przy zmianach parametrów dla momentu znamionowego.

4. Podsumowanie

Opracowanie odpowiedniej strategii sterowania układem napędowym w zależności od wymagań użytkownika stanowi najważniejsze kryterium oceny, niezależnie od zastosowanego kryterium optymalności. Liniowość charakterystyk oraz zachowanie tego samego kąta wskazują na strategię sterowania z zachowaniem stałego kąta mocy $\delta=\pi/2$, czy też kryterium maksymalizacji momentu elektromagnetycznego w stosunku do prądu stojana. Sterowanie tego rodzaju jest bardzo powszechne dla układów napędowych, przede wszystkim ze względu na bardzo dobre przetwarzanie momentu z prądu stojana. Diagnostyka zachowania napędu wskazuje jednoznacznie, że strategia ta jest korzystniejsza dla układu obciążonego. W przypadku biegu jałowego charakterystyka nie zachowuje liniowości oraz wspólnego kąta mocy, co oznacza, że sterowanie nie jest w tym przypadku odpowiednie, a zatem nie spełnia w pełni założeń przyjętej strategii.

5. Literatura

- [1]. SIMODRIVE 611 universal Function Manual. Siemens, 04/2006.
- [2]. Siemens Direct Drives of higher dynamic performance and precision, Br. Siemens, 2005.
- [3]. Janaszek M.: Optymalizacja statyczna sterowania silnika synchronicznego o magnesach trwałych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 12, 2002.
- [4]. Sieklucki G.: Automatyka napędu. Wyd. AGH Kraków, 2009.
- [5]. Krishnan R.: Electric motor drives. Modeling, analysis and control. Upper Saddle River, Prentice Hall 2001.
- [6]. 1. Błaszczyk P. Barański S.: Optymalizacja nastaw układów przekształtnikowych dla algorytmów sterowania polowo zorientowanych. Zeszyty Problemowe - KOMEL, PEMINE'2011.
- [7]. Janaszek M.: Problemy bezpośredniej regulacji momentu i strumienia silnika synchronicznego o magnesach trwałych, rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2001.

Autor

dr inż. Piotr Błaszczyk, Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.