

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Розглянуто основні стратегії керування синхронними двигунами з постійними магнітами: нульового струму по осі d, максимального моменту на одиницю струму, одиничного коефіцієнта потужності, сталого потоку у повітряному проміжку, мінімізації втрат у міді. Проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності різних стратегій керування.

Рассмотрены основные стратегии управления синхронными двигателями с постоянными магнитами: нулевого тока по оси d, максимального момента на единицу тока, единичного коэффициента мощности, постоянного потока в воздушном промежутке, минимизации потерь в меди. Проведен сравнительный анализ энергетической эффективности различных стратегий управления.

The article reviews the main control strategies for permanent magnet synchronous motors: zero d-axis current, maximum torque per unit current, unity power factor, constant mutual flux linkage and minimizing power loss in copper. The efficiency of different control strategies is compared and analyzed.

Постановка проблеми. Вентильні електричні приводи на базі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ) мають високу ефективність, добрі масо-габаритні показники, простоту керування та охолодження, низькі експлуатаційні витрати, велику довговічність та надійність [1, 3]. Для керування такими електроприводами використовуються різні підходи, аналіз та дослідження ефективності яких є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [4] наведено теоретичні основи та динамічні характеристики різних стратегій керування. Детальний аналіз стратегій керування з мінімізацією втрат двигуна проведено у [2]. Використання кожної з розглянутих у [2, 4] стратегій керування є доцільним, виходячи як з умови забезпечення максимального електромагнітного моменту, так і енергетичної ефективності.

Мета статті. Отримання математичних виразів критеріїв для стратегій керування СДПМ у відносних одиницях (в.о.). Дослідження енергетичної ефективності різних стратегій керування СДПМ.

Викладення матеріалу. Аналіз режимів роботи СДПМ найпростіше виконувати в обертовій та зорієнтованій за вектором потокозчеплення ротора системі координат d-q. Тоді математична модель СДПМ без врахування втрат у сталі має вигляд [1]:

$$\begin{cases} U_d = I_d(R_s + L_d s) - \omega L_q I_q; \\ U_q = I_q(R_s + L_q s) + \omega(L_d I_d + \Phi_0), \end{cases} \quad (1)$$

де U_d, U_q, I_d, I_q – проєкції векторів напруг та струмів на відповідні осі обертової системи координат; R_s – активний опір обмоток статора; L_d, L_q – індуктивності обмоток статора по відповідних осях; ω – кругова частота, Φ_0 – магнітний потік, що створюється одним полюсом постійних магнітів.

Для отримання загального результату аналізу стратегій керування СДПМ перейдемо до відносних одиниць (в.о.) Якщо за базову величину приймемо

напругу U_δ , то відповідно базові величини струму і кругової частоти будуть $I_\delta = U_\delta / R_s$, $\omega_\delta = U_\delta / \Phi_0$. Тоді математична модель СДПМ (1) у в.о.

$$\begin{cases} U_d^* = I_d^* - \omega^* I_q^* T_q^*; \\ U_q^* = I_q^* + \omega^* I_d^* T_d^*, \end{cases} \quad (2)$$

де $U_d^*, U_q^*, I_d^*, I_q^*, \omega^*$ – відповідні змінні двигуна у в.о.; $T_d^* = (\omega_\delta L_d) / R_s$; $T_q^* = (\omega_\delta L_q) / R_s$.

Електромагнітний момент СДПМ

$$M = \frac{3}{2} p \Phi_0 I_q + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_d I_q, \quad (3)$$

де p – кількість пар полюсів СДПМ.

Прийнявши за базову величину моменту $M_\delta = 3 p \Phi_0 I_\delta / 2$ та поділивши на неї обидві частини (3), отримаємо у в.о.

$$M^* = I_q^* + (T_d^* - T_q^*) I_d^* I_q^*. \quad (4)$$

У даній роботі, при розрахунку енергетичної ефективності різних стратегій керування, враховуються лише втрати у міді, які у в.о. можна розрахувати (приймавши $P_\delta = 3 U_\delta I_\delta / 2$)

$$\Delta P^* = I_d^{*2} + I_q^{*2}. \quad (5)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = 1 - \Delta P^* / (M^* \omega^*). \quad (6)$$

У випадку використання стратегії нульового струму по осі d ($I_d = 0$) кут між векторами потоку та струму підтримується на рівні 90° . Така стратегія є широко розповсюджена, оскільки залежність між струмом I_q та електромагнітним моментом є лінійною, що спрощує керування. В той же час відмінний від нуля струм I_d збільшує магнітний потік у повітряному проміжку, що дає змогу збільшити електромагнітний момент. Ця особливість використовується у всіх інших стратегіях.

Стратегія максимального моменту на одиницю струму мінімізує сумарний струм СДПМ за

конкретного значення моменту. Загальний вираз критерію у в.о. для даної стратегії

$$I_q^* = \sqrt{I_d^*(I_d^* + 1/(T_d^* - T_q^*))}. \quad (7)$$

Максимальний момент для даної стратегії керування обмежується мінімально можливими втратами, тому вираз (7) є критерієм і для стратегії мінімізації втрат у міді [4].

Для стратегії одиничного коефіцієнта потужності критерій у в.о.

$$I_q^* = \sqrt{-\frac{T_d^* I_d^{*2} + I_d^*}{T_q^*}}. \quad (8)$$

Стратегії сталого потоку у повітряному проміжку у в.о.

$$I_q^* = \sqrt{\frac{1 - (1 + T_d^* I_d^*)^2}{T_q^{*2}}}. \quad (9)$$

На підставі виразів (7)-(9) для різних стратегій керування на рис.1 представлені графічно критеріальні залежності $I_q^*(I_d^*)$ для СДПМ з такими параметрами (прийнято $U_0 = 80$ В): $R_s = 0,25$ Ом, $\Phi_0 = 0,4$ Вб, $p = 8$, $L_d = 1,5$ мГн, $L_q = 2,5$ мГн, $n_n = 500$ об/хв, $M_n = 500$ Н·м.

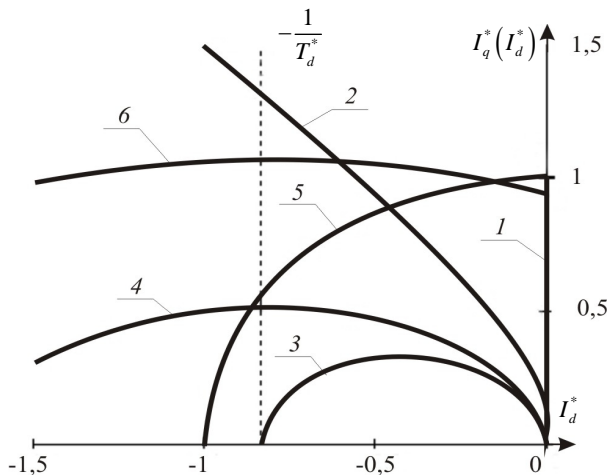


Рис. 1. Критеріальні залежності $I_q^*(I_d^*)$:

1 – нульового струму по осі d ; 2 – максимального моменту на одиницю струму; 3 – одиничного коефіцієнта потужності; 4 – сталого потоку у повітряному проміжку 5 – обмеження за максимальним струмом; 6 – обмеження за максимальною напругою при номінальній швидкості

З метою аналізу енергетичних показників для усіх стратегій за виразом (6) на рис.2 побудовані енергетичні характеристики СДПМ в залежності від навантаження при номінальній кутовій швидкості (номінальне значення моменту у в.о. $M_n^* = 0,326$).

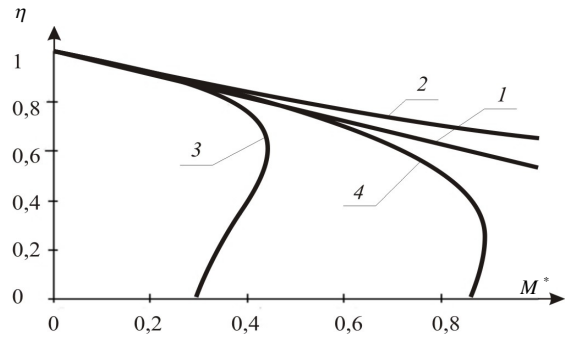


Рис. 2. Залежність $\eta(M^*)$ для стратегій керування: 1 – нульового струму по осі d ; 2 – максимального моменту на одиницю струму; 3 – одиничного коефіцієнта потужності; 4 – сталого потоку у повітряному проміжку

Висновки. При виборі стратегії керування СДПМ необхідно враховувати увесь комплекс факторів: максимальний момент та енергетичну ефективність в залежності від навантаження (рис.2), а також обмеження за струмом та напругою (рис.1).

Список використаної літератури

1. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В.М. Перельмутер — Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
2. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наук. пр. Донецьк. націон. техн. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11(186). – С. 392-395.
3. Ehsani M. Moder Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi // CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2010. – 534 p.
4. Monajemy R. Comparison of Torque Control Strategies Based on the Constant Power Control System for PMSM / R.Monajemy, R.Krishnan // Control in power electronics. Selected problems. – Academic press, 2002. – Pp. 225-250.

Отримано 12.07.2011



Шур Ігор Зенонович,
д-р техн. наук, проф. каф.
ел.приводу та автоматизації
промислових установок НУ
"Львівська політехніка",
тел. (032) 258-26-20,
e-mail: i_shchur@meta.ua



Мандзюк Максим
Феодосійович,
аспірант каф. охорони праці
НУ "Львівська політехніка",
e-mail: mandzyuk@ua.fm