

РОЗРОБКА СПРОЩЕНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ КРИТЕРІЮ ММА

Бугровий А.А., магістрант, Толочко О.І., д.т.н., проф.

НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. В даний час все більшого поширення набувають електроприводи на основі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ, англ. PMSM). SMPM являє собою машину змінного струму з трифазною обмоткою на статорі та постійними магнітами, встановленими на поверхні або в середині ротора.

Установка магнітів всередині ротора PMSM призводить до підвищення механічної міцності ротора, що дозволяє працювати на високих швидкостях. В цьому випадку електромагнітна система машини стає асиметричною [1]. Даний ефект призводить до появи додаткової реактивної складової електромагнітного моменту. Такі двигуни в англійській літературі називають IPMSM (interior permanent magnet synchronous motor). І саме для них існують додаткові можливості підвищення енергоефективності, що досягаються шляхом застосування так званих оптимальних стратегій керування. Однією з таких стратегій є максимізація відношення електромагнітного моменту до струму статора в усталених режимах, яку скорочено називають ММА (максимальний момент на ампер) або англ. МТРА (maximum torque per ampere) [2-4]. Використання оптимальних стратегій потребує ускладнення системи керування.

Мета роботи. Спрощення відомого алгоритму оптимального керування струмом при критерії МТРА для IPMSM.

Матеріали і результати досліджень. Математичний опис IPMSM в оберտальній системі координат $d-q$, що застосовується при синтезі систем векторного керування (СВК) має вигляд [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = i_d R + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q; \\ u_q = i_q R + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_q i_d + C_e \omega; \\ \omega_e = Z_p \omega; \\ M = C_m i_q + k_m (L_d - L_q) i_d i_q; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

де u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і струму статора на осі d і q ; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; R – активний опір статора; ω, ω_e – механічна та електрична кутові швидкості ротора; Z_p – кількість пар полюсів;

ψ_{pm} – потокозчеплення постійних магнітів; J – момент інерції двигуна; M – момент двигуна; $C_e = Z_p \psi_{pm}$; $k_m = \frac{3}{2} Z_p$; $C_m = k_m \psi_{pm} = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm}$.

Задача полягає у знаходженні залежності $i_{do}(i_{qo})$, яка забезпечує мінімальне значення сумарного струму статора при заданому моменті, або максимальне значення моменту при заданому струмі в усталеному режимі.

З точки зору теорії оптимального керування це класична варіаційна задача на умовний екстремум, що вирішується методом Ейлера-Лагранжа [5].

Розв'яжемо цю задачу у першій постановці. В даному випадку функція, що підлягає мінімізації має вигляд:

$$f(i_d, i_q) = i_s^2 = i_d^2 + i_q^2, \quad (2)$$

а додаткова умова складається з рівняння електромагнітного моменту (див. систему рівнянь (1)) у такий спосіб:

$$g(i_d, i_q) = M - C_m i_q - k_m (L_d - L_q) i_d i_q = 0. \quad (3)$$

Запишемо функцію Лагранжа і складемо рівняння Ейлера-Лагранжа:

$$L(i_d, i_q, \lambda) = f + \lambda g = (i_d^2 + i_q^2) + \lambda [M - C_m i_q - k_m (L_d - L_q) i_d i_q]; \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial i_d} = 2i_d - \lambda k_m (L_d - L_q) i_q = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial i_q} = 2i_q - \lambda C_m - \lambda k_m (L_d - L_q) i_d = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Виразивши λ з обох рівнянь системи (5) і прирівнявши їх, маємо:

$$\lambda = \frac{2}{k_m} \cdot \frac{i_d}{(L_d - L_q) i_q} = \frac{2}{k_m} \cdot \frac{i_q}{\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_q},$$

звідкіля можна отримати квадратне рівняння:

$$(L_d - L_q) i_d^2 + \psi_{pm} i_d - (L_d - L_q) i_q^2 = 0.$$

Розв'яжемо його відносно i_d з урахуванням того, що в електричних машинах досліджуваного типу завжди виконується співвідношення $L_d < L_q$, а d -складова струму статора може змінюватися тільки у від'ємному напрямку, здійснюючи ослаблення потокозчеплення. В результаті отримаємо

$$i_{do}(i_{qo}) = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2}. \quad (6)$$

На рис.1 суцільною лінією зображено графік функції $i_{do}(i_{qo})$, побудований за формулою (6) для IPMSM з такими параметрами:

$$\begin{aligned} n_n &= 4000 \text{ об/хв}; M_n = 1.8 \text{ Н} \cdot \text{м}; \psi_{pm} = 0.0844 \text{ Вб}; J = 0.45 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ Z_p &= 3; R = 2.21 \text{ Ом}; L_d = 9.77 \text{ мГн}; L_q = 14.94 \text{ мГн}; \end{aligned}$$

На цьому ж рисунку штрих-пунктирними лініями нанесено сімейства гіпербол для заданих постійних моментів, побудовані за формулою

$$i_q(M, i_d) = \frac{M}{k_m [\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_d]} \quad (7)$$

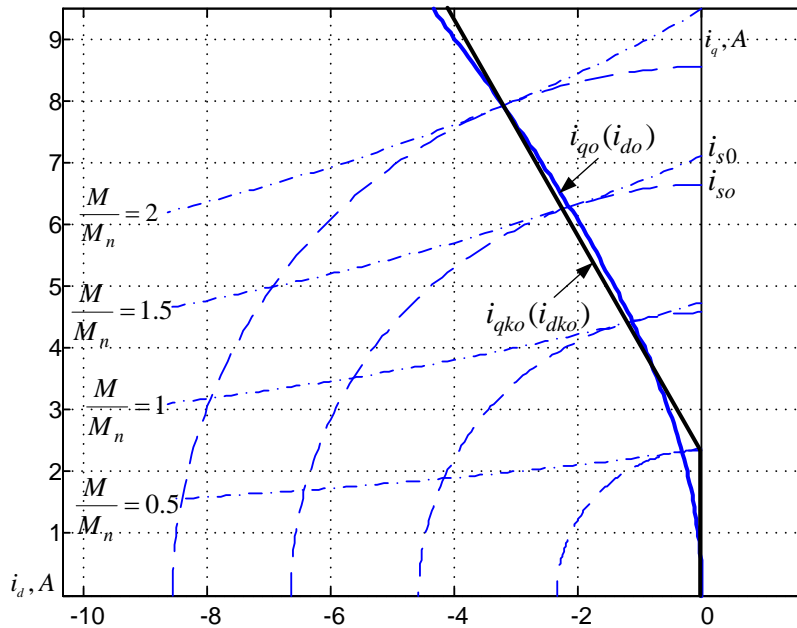


Рисунок 1

Точки перетину цих гіпербол з траєкторією ММРА визначають оптимальний розподіл складових струму статора при заданих значеннях моменту. Кола з центрами в початковій точці системи координат, проведені через ці точки пунктирними лініями, мають радіуси, що дорівнюють сумарним струмам статора при оптимальному розподілі їх складових. Тому точки перетину кіл з віссю i_q визначають струми, отримані при виконанні стратегії ММРА, а точки перетину відповідних гіпербол з віссю i_q визначають струми статора, що мають місце при типовому керуванні з підтримкою складової i_d на нульовому рівні: $i_{s0} = i_{q0} = M/C_m$.

З рис.1 видно, що ефективність стратегії МТРА, порівняно зі стратегією $i_d = 0$, збільшується при зростанні електромагнітного моменту. Для досліджуваного двигуна різниця між порівнюваними стратегіями при $M \leq 0.5M_n$ майже не існує. Тому залежність $i_{do}(i_{qo})$ за формулою (6) можна замінити спрощеною залежністю типу «зона нечутливості» $i_{dko}(i_{qko})$, яку назовемо квазіоптимальною. Така залежність, на відміну від (6), досить просто реалізується на практиці як в аналоговому, так і в цифровому вигляді, і при вдало обраних параметрах практично не знижує показників енергоефективності.

Для обраної у якості спрощеної залежності типової нелінійності треба визначити лише 2 параметри: межу нечутливості i_{qz} і коефіцієнт підсилення лінійної ділянки k_l . Для вибору межі нечутливості треба порівняти графіки

$i_{so}(M) = \sqrt{i_{do}^2(M) + i_{qo}^2(M)}$ та $i_{s0}(M) = i_{q0}(M) = M/C_m$ і визначити таке максимально можливе значення моменту M_z , при якому ще виконується умова $\frac{i_{so}(M) - i_{s0}(M)}{i_{so}(M)} \leq \varepsilon$, де ε – максимально припустиме відносне відхилення

квазіоптимального струму від оптимального всередині зони нечутливості. Наприклад, можна покласти $\varepsilon = 0.01$.

Щоб розв'язати цю задачу, з рівняння для моменту двигуна виразимо струм i_d та підставимо його у вираз (6) замість i_{do} . Після перетворень отримаємо неповне рівняння 4-ої степені відносно струму i_q у функції моменту

$$i_q^4 + \frac{M\Psi_{pm}}{k_m(L_d - L_q)}i_q - \left(\frac{M}{k_m(L_d - L_q)}\right)^2 = 0, \quad (8)$$

яке можна вирішити чисельними методами.

Графіки залежностей ортогональних складових і модуля струмів статора від електромагнітного моменту у відносних одиницях (базові величини $i_B = M_n/C_m$; $M_B = M_n$) при стратегіях МТРА та $i_d = 0$, подані на рис.2. З цього графіка легко визначити M_z , як максимальне значення моменту, при якому криві $i_{so}(M)$ та $i_{s0}(M)$ майже зливаються одна з одною, а потім визначити графічно або розрахувати i_{qz} за формулою $i_{qz} = M_z/C_m$.

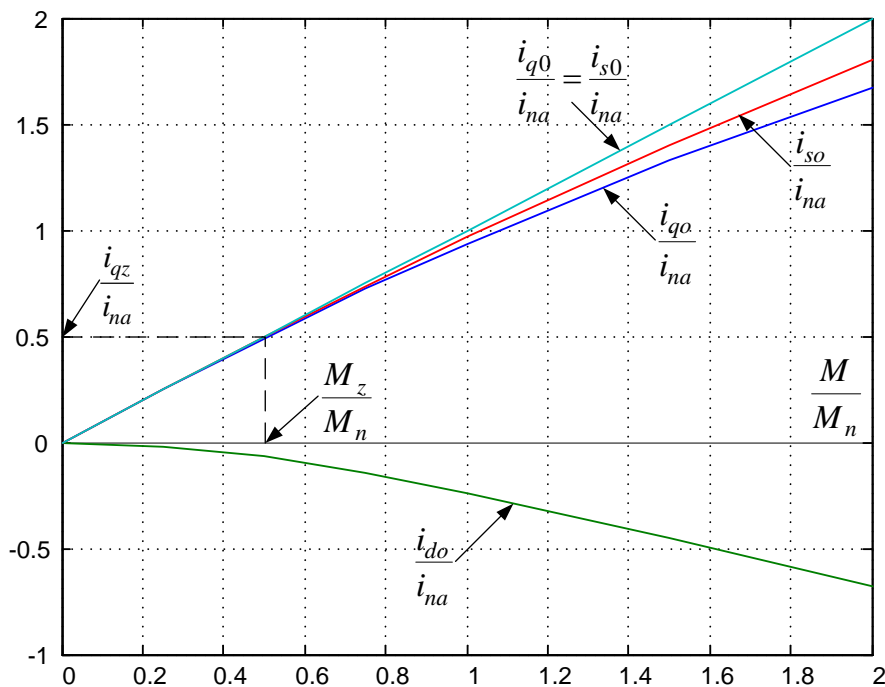


Рисунок 2

Для визначення коефіцієнту підсилення квазіоптимальної залежності на лінійній ділянці достатньо знайти рівняння прямої, що проходить через 2 точки

з координатами $[i_{qz}, 0]$ та $[i_{qo}(2M_n), i_{do}(2M_n)]$, як це показано на рис.1. У цьому разі

$$k_l = \frac{i_{do}(2M_n)}{i_{qo}(2M_n) - i_{qz}}. \quad (9)$$

Координати другої точки можна змінювати в залежності від режиму роботи конкретного двигуна і значень електромагнітного моменту, з якими він працює протягом найбільшого часу.

З рис.1 видно, що сумарний струм статора при запропонованому квазіоптимальному керуванні майже не буде відрізнятися від його оптимальних значень в широкому діапазоні зміни моменту.

Слід зазначити, що залежність (6) використовують в системах регулювання швидкості, в яких завдання на q -складову струму статора виробляє регулятор швидкості, а завдання на d -складову формується нелінійним функціональним перетворювачем (НФП) $i_{do}(i_{qo})$. При заміні оптимального керування квазіоптимальним НФП замінюється блоком «зона нечутливості».

В системах керування електромагнітним моментом, обидві складові струму статора отримують за рахунок нелінійних перетворень моменту за графіками, поданими на рис.2.

Висновки.

1. Запропонований закон квазіоптимального керування за стратегією МТРА, можна застосовувати в системах регулювання швидкості, як такий, що має більш просту реалізацію і майже не погіршує енергетичних показників електроприводу порівнянні з оптимальним.
2. Для систем без регулятора швидкості, що керуються моментом, також можна спростити залежності оптимальних струмів $i_{qo}(M), i_{do}(M)$ від моменту, що заплановано як предмет подальших досліджень.

Перелік посилань

1. Dierk Schröder. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.
2. Inoue, Yukinori. A novel control scheme for maximum power operation of synchronous reluctance motors including maximum torque per flux control / Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada // IEEE Transactions on industry applications. – 2011. – Vol. 47, №1. – P. 115-121.
3. Inoue, Y. Comparative Study of IPMSM Control Strategies for Torque Ripple Reduction / Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada // Power Electronics and Applications. – 2007. – P. 1 - 9.
4. Толочко О.І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ампер / О.І. Толочко, В.В. Божко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – 2010. – Донецк: ООО «АИР». – С. 242- 247.
5. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы / И.В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.