

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

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

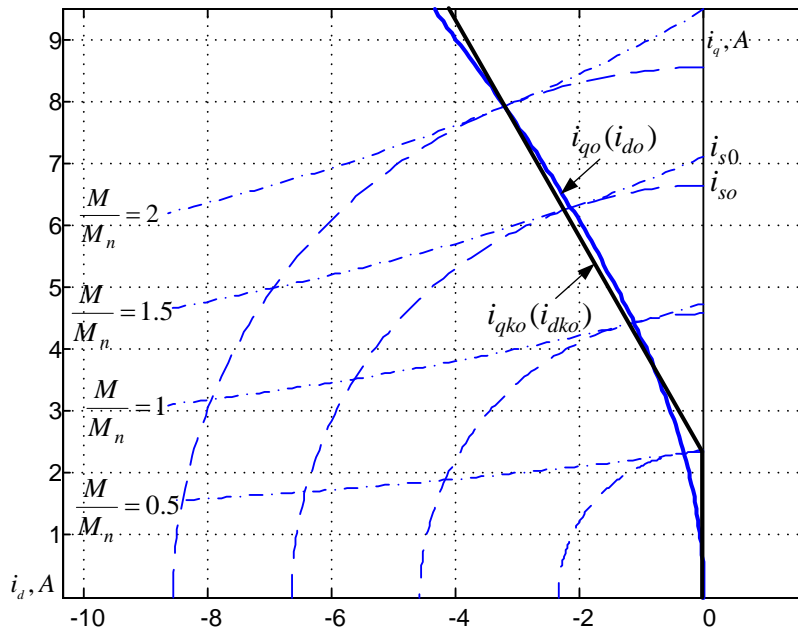


Рисунок 1

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 назвемо 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 $i_{qz} = M_z/C_m$.

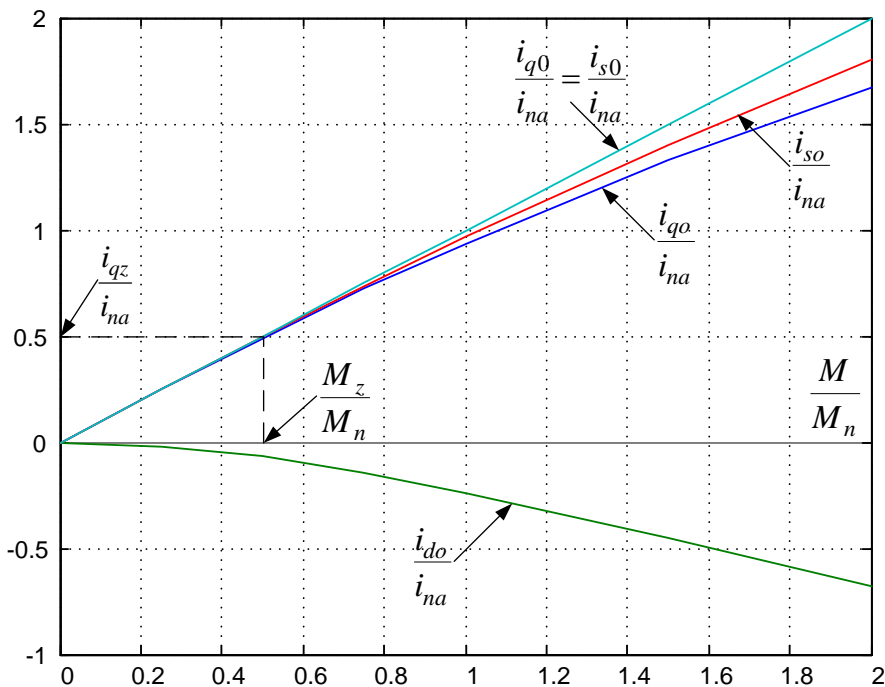


Рисунок 2

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.