

УДК 62-83

О.І. ТОЛОЧКО (д-ртехн.наук, проф.), **В.В. БОЖКО**
 Донецький національний технічний університет
 vladbozhko@mail.ru

УНІФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ БЕЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Уточнено алгоритми керування синхронними двигунами без електричного збудження з урахуванням втрат у сталі. Отримано енергоефективні алгоритми керування, що дозволяють мінімізувати втрати двигуні. Вперше наведено уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження.

В даний час великий інтерес представляють електроприводи на основі синхронних машин без електричного збудження. До цього класу електричних машин відносяться синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) і реактивні синхронні двигуни (СДР). У порівнянні з двигунами постійного струму їх основною перевагою є відсутність струмоведучих частин, що обертаються. У порівнянні з асинхронним двигуном (АД) СДПМ характеризуються більш високими співвідношеннями потужності до маси, електромагнітного моменту до моменту інерції, відрізняються високою перевагуючою здатністю за моментом, низькими масогабаритними показниками. Відповідні показники СДР досить близькі до аналогічних показників асинхронних двигунів, але, завдяки більшій надійності і абсолютній жорсткості механічних характеристик, СДР можуть стати альтернативою АД. Завдяки даним особливостям електроприводи на основі синхронних двигунів без електричного збудження знаходять все більш широке застосування у всіх галузях діяльності людини.

Однією з найбільш актуальних тенденцій у розвитку електропривода в даний час є підвищення енергоефективності. З цієї точки зору система керування повинна забезпечувати найвищий ККД, чого можна домогтися за рахунок мінімізації втрат в електроприводі.

У літературі можна зустріти кілька найбільш поширених алгоритмів керування СДПМ і СДР. Так в [1] запропоновано алгоритми, що дозволяють забезпечити максимальний момент на ампер (ММА) і максимальний момент на вольт (ММВ) для СДПМ з магнітами розташованими всередині ротора. Аналогічні задачі, тільки для СДР з магнітами, розташованими на поверхні ротора, вирішені в [2]. У деяких джерелах, наприклад в [3], для СДР також запропоновані алгоритми керування, що забезпечують максимальний момент на ампер і максимальний коефіцієнт потужності. При синтезі зазначених алгоритмів керування не враховувались втрати в сталі. Підвищити енергоефективність електропривода можна шляхом застосування алгоритмів керування, що мінімізують сумарні втрати (у міді і в сталі). Один з таких способів керування для СДПМ оглядово розглянуто в [4].

Метою даної статті є отримання уніфікованого алгоритму керування синхронними двигунами без електричного збудження з урахуванням втрат, як у міді, так і в сталі.

Схеми заміщення в ортогональній системі координат, що обертається, орієнтованою за потоком ротора з урахуванням втрат у міді і в сталі наведені на рис. 1.

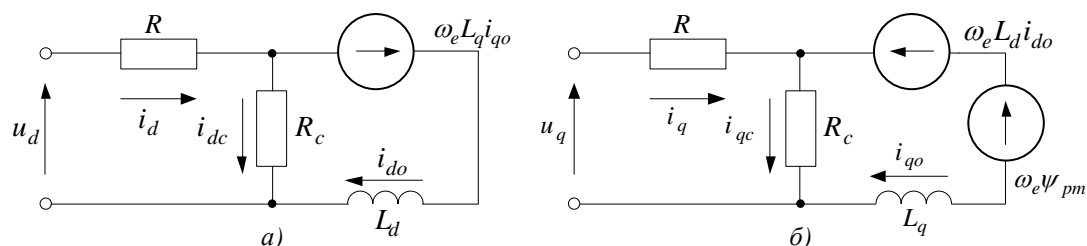


Рисунок 1 – Схеми заміщення за каналами d (а) і q (б)

На рис.1 прийняті такі позначення:

u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і повного струму статора на осі d і q ; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; R, R_c – активний опір статора і опір, що характеризує втрати в сталі; i_{do}, i_{qo} – проекції складової струму статора, яка створює магнітне поле, на осі d і q ; i_{dc}, i_{qc} – проекції складової струму статора, яка витрачається на втрати в сталі, на осі d і q ; $\omega_e = Z_p \omega$ – електрична кутова частота ротора; Z_p – кількість пар полюсів; ω – механічна кутова частота ротора; ψ_{pm} – потік постійних магнітів.

На підставі схем заміщення (рис. 1) складемо математичне опис СД, що розглядаються:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & -\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \\ \omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & R + pL_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p \frac{L_d}{R_c} & -\frac{\omega_e L_q}{R_c} \\ \frac{\omega_e L_d}{R_c} & 1 + p \frac{L_q}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \psi_{pm}}{R_c} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

У загальному випадку вираз для електромагнітного моменту має вигляд:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} + \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}. \quad (2)$$

Механічні процеси описуються рівнянням руху електроприводу:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (3)$$

де M , M_c – електромагнітний момент двигуна і момент статичного опору; J – сумарний момент інерції двигуна та механізму.

Наведений вище математичний опис є найбільш загальним і відповідає СДПМ з магнітами розташованими всередині ротора. Окремим випадком є електропривод на базі СДПМ з поверхневим розташуванням магнітів на роторі. Відмінною рисою даного типу двигунів є рівність індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями: $L_d = L_q = L_s$. Математичне опис СДР виходить з (1) при відсутності потоку постійних магнітів ($\psi_{pm} = 0$), що веде до наявності лише реактивної складової електромагнітного моменту, що створюється за рахунок магнітної асиметрії ($L_d < L_q$).

Метою алгоритмів керування ММА і ММВ є забезпечення максимального електромагнітного моменту при заданих значеннях струму і напруги статора відповідно, або мінімальних значень струму і напруги статора при необхідному електромагнітному моменті двигуна. У відповідності до другої з перерахованих вище постановок задачі, необхідно знайти мінімум повного струму (алгоритм ММА)

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c}\right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c}\right)^2} \quad (4)$$

або напруги статора (алгоритм ММВ)

$$U = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = \sqrt{\left(R i_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2 + \left(R i_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2} \quad (5)$$

при умові виконання (2).

Деяко інший підхід до синтезу алгоритму керування ґрунтується на підвищенні енергоефективності електропривода, тобто мінімізації втрат. Враховуючи, що у відповідності зі схемами заміщення (рис. 1)

$$\begin{aligned} i_d &= i_{do} + i_{dc}, & i_q &= i_{qo} + i_{qc}, \\ i_{dc} &= -\frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c}, & i_{qc} &= \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c}, \end{aligned}$$

миттєві втрати у міді і сталі можуть бути описані наступними виразами:

$$\Delta P_{Cu} = R(i_d^2 + i_q^2) = R \left(\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c}\right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c}\right)^2 \right), \quad (6)$$

$$\Delta P_{Fe} = R_c(i_{dc}^2 + i_{qc}^2) = \frac{(\omega_e L_q i_{qo})^2}{R_c} + \frac{(\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}))^2}{R_c}. \quad (7)$$

Виходячи з цього, можна виділити наступні три алгоритму керування: мінімізація втрат у міді (МВМ), мінімізація втрат у сталі (МВС) та мінімізація сумарних втрат (МВ)

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}. \quad (8)$$

Таким чином, для синтезу алгоритмів МВМ, МВС і МВ необхідно знайти мінімум функцій (6), (7) і (8), відповідно, за умови виконання (2).

Мінімізація виразів (4) – (8) з урахуванням (2) може бути виконана будь-яким зручним методом, наприклад, методом множників Лагранжа.

Аналіз результатів мінімізації показав, що всі алгоритми описуються одним і тим же рівнянням:

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \frac{L_f^2 + L_d(2L_d - L_q)}{L_f^2 + L_d^2} - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{L_f^2 + L_d L_q}{L_f^2 + L_d^2} \right)^2} + i_{qo}^2 \frac{L_f^2 + L_q^2}{L_f^2 + L_d^2}. \quad (9)$$

Відмінність полягає в значенні параметра, названого фіктивною індуктивністю.

Вирази для фіктивної індуктивності L_f в залежності від бажаного алгоритму керування, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вирази для фіктивної індуктивності L_f в формулі (9)

	ММА	ММВ	МВМ	МВС	МВ
L_f	$\frac{R_c}{\omega_e}$	$\frac{R_c}{\omega_e} \frac{R}{R + R_c}$	$\frac{R_c}{\omega_e}$	0	$\frac{R_c}{\omega_e} \sqrt{\frac{R}{R + R_c}}$

З аналізу табл. 1 видно, що алгоритми керування МВМ і ММА збігаються, тобто алгоритм ММА мінімізує втрати в міді. Цей висновок можна було б зробити виходячи з зіставлення рівнянь (4) і (6), впливає. Отже, мінімізація втрат в міді ідентична забезпеченню максимального моменту на ампер.

В [1] стверджується, що алгоритм ММВ забезпечує одночасно і мінімізацію втрат у сталі. Однак отримані результати показують, що принципово МВС відрізняється від ММВ і є окремим випадком останнього при нехтуванні втратами в міді, тобто при $R = 0$.

Розглянуті алгоритми керування застосовуються в електроприводі з СДПМ, магніти якого встановлені усередині ротора. Уніфікований алгоритм керування у разі СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора, є окремим випадком (9) і має вигляд:

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm} L_s}{L_f^2 + L_s^2}. \quad (10)$$

У (10) фіктивна індуктивність L_f може приймати значення відповідно до табл. 1. Слід зазначити, що оскільки в СДПМ з магнітами розташованими на поверхні ротора відсутня реактивна складова електромагнітного моменту, останній прямо пропорційний складовій струму i_{qo} , а алгоритм керування визначає тільки значення i_{do} .

Іншим окремим випадком є електропривод на базі СДР. Уніфікований алгоритм керування (9) в даному разі має вигляд:

$$i_{do} = -i_{qo} \sqrt{\frac{L_f^2 + L_q^2}{L_f^2 + L_d^2}}. \quad (11)$$

Аналогічно, вибір L_f залежить від необхідного алгоритму керування (табл. 1).

На рис.2 наведені залежності проєкцій струмів статора $i_q(i_d)$ для різних алгоритмів керування СДПМ з магнітами усередині ротора. Суцільними лініями показані залежності для алгоритмів керування ММА/МВМ, ММВ і МВ в разі врахування втрат, як у міді, так і в сталі. Пунктирними лініями показані окремі випадки алгоритмів керування при нехтуванні одними або усіма втратами, у тому числі і МВС. Для побудови залежностей використовувався СДПМ з наступними параметрами [4]: $N_n = 2000$ об/хв; $I_n = 5$ А; $M_n = 1,67$ Нм; $Z_p = 2$; $R = 0,57$ Ом; $R_c = 240$ Ом; $L_d = 8,72$ мГн; $L_q = 22,78$ мГн; $\psi_{pm} = 0,1077$ Вб.

Як можна спостерігати (рис. 2), врахування втрат у сталі призводить до зміни алгоритмів керування ММА і ММВ. Причому відмінність стає більш істотною зі збільшенням струму. Врахування втрат у сталі дозволяє отримати додатковий зиск від використання алгоритмів керування ММА і ММВ до 5% (залежно від поточного навантаження і швидкості двигуна). Також з рис. 2 видно, що алгоритм, який забезпечує мінімізацію втрат у сталі (МВС), в загальному випадку, відрізняється від ММВ.

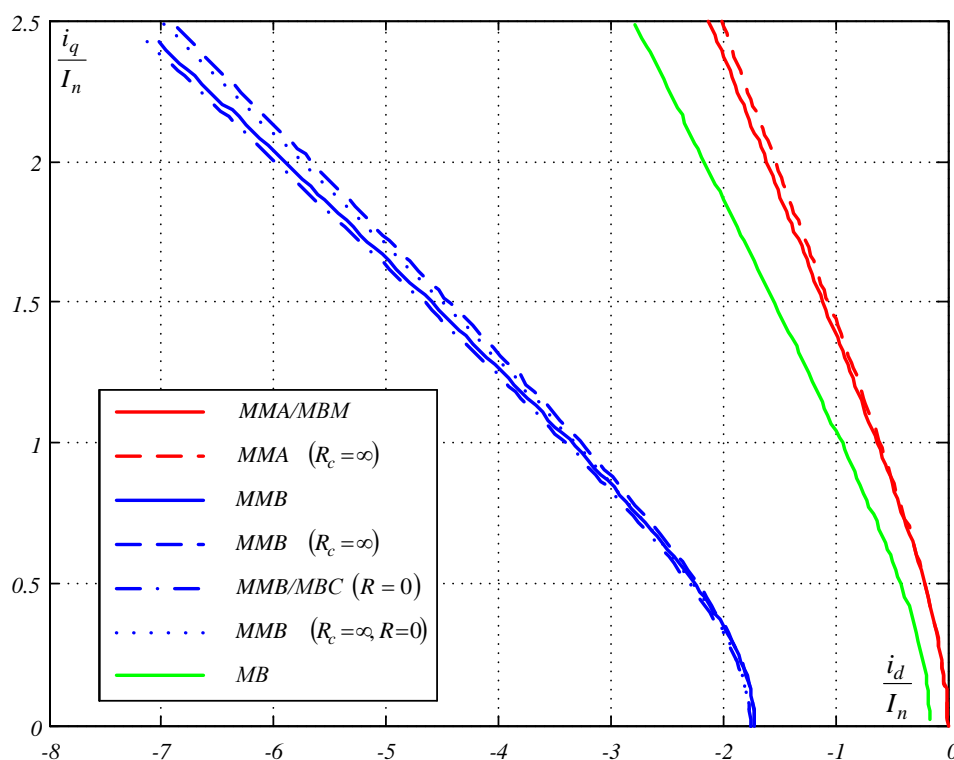


Рисунок 2 – Алгоритми керування СДПМ з магнітами всередині ротора

Таким чином, врахування втрат у сталі для алгоритмів керування MMA і MMB дозволяє збільшити зиск від використання даних алгоритмів до 5%. Отриманий уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження може використовуватись, як для СДПМ, так і для СДР. Причому, вибір бажаного алгоритму керування в даному випадку здійснюється шляхом зміни тільки одного параметра.

У подальших дослідженнях планується урахувати фізичні обмеження електроприводу, обмеження координат у динамічних режимах, а також оцінити вплив істинних значень параметрів двигуна та їх варіацій на якість регулювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Schröder, Dierk. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.
2. Толочко О.И. Анализ систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при регулировании скорости вверх от номинальной / О.И. Толочко, В.В. Божко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – №28. – С. 149-152.
3. Bose, Bimal K. Modern power electronics and AC drives / Bimal Bose. – NJ : Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
4. Morimoto, Shigeo. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives / Shigeo Morimoto, Yi Tong, Yoji Takeda, Takao Hirasu // IEEE Transactions on industrial electronics. – 1994. – Vol.41, №5. – P. 511-517.

Надійшла до редколегії 20.03.2011

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

О.И. ТОЛОЧКО, В.В. БОЖКО
Донецкий национальный технический университет

Унифицированный алгоритм управления синхронными двигателями без электрического возбуждения. Уточнено алгоритмы управления синхронными двигателями без электрического возбуждения с учетом потерь в стали. Получено энергоэффективные алгоритмы управления, позволяющие минимизировать потери в двигателе. Впервые приведен унифицированный алгоритм управления синхронными двигателями без электрического возбуждения.

О. TOLOCHKO, V. BOZHKO
Donetsk National Technical University

Unified control algorithm of synchronous motors without electrical excitation. Control algorithms of synchronous motors without electrical excitation taking account core losses are refined. Energy-efficient control algorithms that allow minimize losses in the motor are received. Unified control algorithm of synchronous motors without electrical excitation is presented for the first time.