

УДК 681.53

КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ В РЕЖИМАХ ЗБУДЖЕННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ

С.М. Пересада*, докт.техн.наук, В.О. Благодір

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Представлено результати синтезу та експериментального дослідження алгоритму збудження та синхронізації машини подвійного живлення (МПЖ) з напругою мережі. Синтезований алгоритм забезпечує синхронізацію вектора напруги статора з вектором напруги мережі по амплітуді, частоті та фазі, завдяки чому забезпечується підключення статора МПЖ до мережі живлення без виникнення перехідних процесів, що є необхідною умовою для застосувань МПЖ як в електроприводах, так і в системах генерування електроенергії. Експериментально підтверджено ефективність розробленого алгоритму синхронізації при його використанні в електромеханічних системах з МПЖ. Бібл. 4, рис. 1.

Ключові слова: машина подвійного живлення, векторне керування, збудження генератора, синхронізація.

Вступ. Машина подвійного живлення широко застосовується у системах, де цілі керування досягаються при обмеженому діапазоні зміни кутової швидкості $\pm (20-30) \%$ відносно синхронної. Використання МПЖ дозволяє знизити номінальну потужність перетворювача напруги в роторі до потужності максимального ковзання, яке визначається діапазоном зміни кутової швидкості, а отже, знизити вартість і підвищити коефіцієнт корисної дії всієї системи. Векторно-керовані МПЖ завдяки можливості стабілізувати параметри вихідної напруги генератора на заданому рівні при змінній швидкості приводного вала широко використовуються у системах генерування електроенергії, що працюють паралельно з мережею або живлять ізольоване навантаження [1]. У переважній більшості представлених у літературі робіт процес регулювання координат розглядається з моменту підключення статорних обмоток МПЖ до мережі, і тільки незначна кількість публікацій присвячена питанню м'якого підключення МПЖ до мережі [2]–[4]. Можна виділити основні методи синхронізації: розімкнені [1], замкнені зі зворотним зв'язком за струмом ротора [2], [3] та фазового автопідлаштування частоти [4]. Перелічені методи мають свої недоліки, зокрема, у випадку замкнених методів використання зворотних зв'язків зменшується завадостійкість системи. Розімкнені системи мають вищу завадостійкість, однак чутливі до параметричних збурень електричної машини.

Метою даної роботи є синтез та дослідження робастного алгоритму збудження та синхронізації, що гарантує підключення статора МПЖ до мережі без виникнення перехідних процесів та має властивості робастності до параметричних і координатних збурень.

Матеріали дослідження. Для синтезу алгоритму синхронізації розглянемо модель МПЖ з розімкненим статором, представлену в синхронній системі координат (d-q), що орієнтована за вектором напруги мережі

$$\begin{aligned} E_d &= L_m (\alpha i_{2d} + \omega i_{2q} - u_{2d}/L_2), & \dot{i}_{2d} &= -\alpha i_{2d} + (\omega_1 - \omega) i_{2q} + u_{2d}/L_2, \\ E_q &= L_m (\alpha i_{2q} - \omega i_{2d} - u_{2q}/L_2), & \dot{i}_{2q} &= -\alpha i_{2q} - (\omega_1 - \omega) i_{2d} + u_{2q}/L_2, \end{aligned} \quad (1)$$

де $i_{2d}, i_{2q}, u_{2d}, u_{2q}$ – компоненти векторів струму та напруги ротора; E_d, E_q – компоненти вектора ЕРС статора; ω – кутова швидкість ротора МПЖ; ω_1 – кутова швидкість системи координат (d-q) відносно стаціонарної; R_2, L_2 – активний опір і індуктивність ротора, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру; $\alpha = R_2 / L_2$. У моделі МПЖ прийнята одна пара полюсів, що не впливає на загальність отриманих результатів.

Задачу збудження та синхронізації сформулюємо наступним чином. Розглянемо модель МПЖ, що задана (1), прийнявши, що параметри МПЖ відомі і незмінні, напруга статора, струми ротора, кутова швидкість та кутове положення ротора доступні для вимірювання. За цих умов необхідно синтезувати алгоритм, який забезпечує синхронізацію вектора ЕРС статора МПЖ з напругою мережі по амплітуді, частоті та фазі, тобто гарантувати підключення статора МПЖ до мережі без перехідних процесів. Для синтезу алгоритму пропонується використовувати систему координат (d-q), що орієнтована за вектором напруги статора. Така система координат не залежить від параметрів машини, а кутове положення вектора напруги статора та його кутова швидкість ω_1 можуть бути виміряні з наперед заданою точністю без вимірювання статорних струмів. У системі координат (d-q), що орієнтована за вектором напруги мережі, умова синхронізації запишеться

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_d = -U, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} E_q = 0, \quad (2)$$

де $U = \text{const}$ – модуль вектора напруги мережі.

Розімкнений алгоритм синхронізації, що забезпечує досягнення цілей керування (2), представлено у [3]. Для синтезу алгоритму керування процесом синхронізації, що має властивості робастності до параметричних і координатних збурень, розроблено наступний метод.

Для організації зворотного зв'язку за модулем ЕРС введено в розгляд фільтровані значення складових вектора ЕРС x_d, x_q , що задані наступним двовимірним фільтром

$$\dot{x}_d = -kx_d + \omega_1 x_q + E_d, \quad \dot{x}_q = -kx_q - \omega_1 x_d + E_q, \quad (3)$$

де $k^{-1} = \tau_0$ – стала часу фільтра.

Задані значення для вихідних змінних фільтра (3), що отримані на основі розгляду усталеного режиму системи (3) при виконанні умов (2), запишуться у вигляді

$$x_d^* = -\frac{kU}{k^2 + \omega_1^2}, \quad x_q^* = \frac{\omega_1 U}{k^2 + \omega_1^2}. \quad (4)$$

Сконструємо наступний алгоритм керування струмами ротора та модулем ЕРС

$$u_{2d} = L_2 (\alpha i_{2d}^* - (\omega_1 - \omega) i_{2q}^* + v_d), \quad u_{2q} = L_2 (\alpha i_{2q}^* + (\omega_1 - \omega) i_{2d}^* + v_q), \quad (5)$$

де v_d, v_q – додаткові керуючі впливи, що будуть визначені далі.

Об'єднавши (1), (3) та (4), отримаємо наступні рівняння ЕРС і динаміки похибок регулювання:

$$\begin{aligned} E_d &= L_m [\alpha \tilde{i}_{2d} + \omega \tilde{i}_{2q} + \omega_1 i_{2q}^* - v_d], & E_q &= L_m [\alpha \tilde{i}_{2q} - \omega \tilde{i}_{2d} - \omega_1 i_{2d}^* - v_q], \\ \dot{\tilde{x}}_d &= -k\tilde{x}_d + \omega_1 \tilde{x}_q + L_m (\alpha \tilde{i}_{2d} + \omega \tilde{i}_{2q} - v_d), & \dot{\tilde{x}}_q &= -k\tilde{x}_q - \omega_1 \tilde{x}_d + L_m (\alpha \tilde{i}_{2q} - \omega \tilde{i}_{2d} - v_q), \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\alpha \tilde{i}_{2d} + (\omega_1 - \omega) \tilde{i}_{2q} + v_d, & \dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\alpha \tilde{i}_{2q} - (\omega_1 - \omega) \tilde{i}_{2d} + v_q, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\tilde{i}_{2d} = i_{2d} - i_{2d}^*$, $\tilde{i}_{2q} = i_{2q} - i_{2q}^*$ – похибки регулювання струмів ротора; $\tilde{x}_d = x_d - x_d^*$, $\tilde{x}_q = x_q - x_q^*$ – похибки регулювання фільтрованого модуля вектора ЕРС.

З (2), (4) та (6) задані значення компонент струму ротора запишуться у вигляді

$$i_{2d}^* = 0, \quad i_{2q}^* = -U / (L_m \omega_1). \quad (7)$$

Підставивши (7) в (6), отримаємо

$$\begin{aligned} E_d &= L_m [\alpha \tilde{i}_{2d} + \omega \tilde{i}_{2q} - U / L_m - v_d], & E_q &= L_m [\alpha \tilde{i}_{2q} - \omega \tilde{i}_{2d} - v_q], \\ \dot{\tilde{x}}_d &= -k\tilde{x}_d + \omega_1 \tilde{x}_q + L_m (\alpha \tilde{i}_{2d} + \omega \tilde{i}_{2q} - v_d), & \dot{\tilde{x}}_q &= -k\tilde{x}_q - \omega_1 \tilde{x}_d + L_m (\alpha \tilde{i}_{2q} - \omega \tilde{i}_{2d} - v_q), \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\alpha \tilde{i}_{2d} + (\omega_1 - \omega) \tilde{i}_{2q} + v_d, & \dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\alpha \tilde{i}_{2q} - (\omega_1 - \omega) \tilde{i}_{2d} + v_q. \end{aligned} \quad (8)$$

Положення рівноваги $(\tilde{x}_d, \tilde{x}_q, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q})^T = 0$ системи (8) є глобально експоненційно стійким при $(v_d, v_q)^T = 0$, тобто цілі керування (2) досягаються при використанні розімкненого керування (3)-(5), (7).

Структура рівнянь (8) така, що дозволяє доповнити (5) компонентами v_d, v_q у вигляді

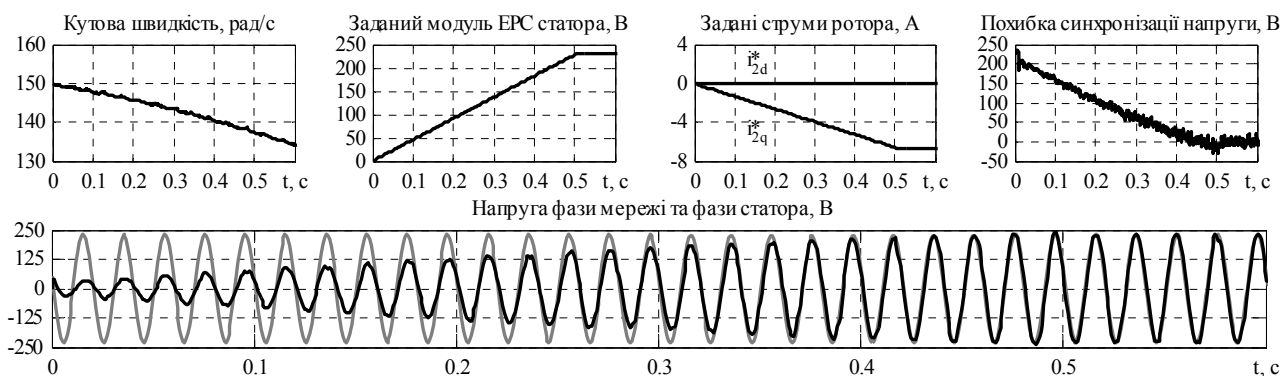
$$\begin{aligned} v_d &= k_i \tilde{i}_{2d} + (k_u \tilde{x}_d + \lambda \tilde{x}_q - y_d) / L_m, & \dot{y}_d &= -k_{ui} \tilde{x}_d - \lambda k \tilde{x}_q, \\ v_q &= k_i \tilde{i}_{2q} + (k_u \tilde{x}_q - \lambda \tilde{x}_d - y_q) / L_m, & \dot{y}_q &= -k_{ui} \tilde{x}_q + \lambda k \tilde{x}_d, \end{aligned} \quad (9)$$

де $k_i > 0$ – коефіцієнти пропорційної складової П-регулятора струму; $(k_u > 0, k_{ui} > 0)$ – коефіцієнти ПІ-регулятора ЕРС; $\lambda = k_{ui} / \omega_1 > 0$ – коефіцієнт перехресного зворотного зв'язку. Завдяки дії регулятора (9) формуються замкнені контури регулювання струмів ротора та ЕРС статора, що і гарантує системі робастність. З використанням другого методу Ляпунова доводиться асимптотична стійкість положення рівноваги системи (8), (9) $(\tilde{x}_d, \tilde{x}_q, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}, y_d, y_q)^T = 0$, яка підтверджує досягнення умов синхронізації (2).

Синтезований алгоритм збудження та синхронізації МПЖ реалізовано програмно з використанням розробленого контролера на основі цифрового сигнального процесора TMS320LF2406A. При тестуванні використовувався асинхронний двигун з наступними параметрами: потужність $P = 1,0$ кВт, число пар полюсів $p = 3$, момент інерції $J = 0,1$ кг·м², $L_1 = 0,153$ Гн, $L_2 = 0,151$ Гн, $L_m = 0,14$ Гн, $R_1 = 2,68$ Ом, $R_2 = 3,65$ Ом.

В умовах експериментального тесту швидкість валу МПЖ за допомогою приводного двигуна постійного струму змінювалася з 150 рад/с до 135 рад/с, при цьому завдання модуля ЕРС статора U за 0,5 с лінійно зростало від 0 до 230 В. Похибка синхронізації напруги визначалася як різниця модуля вектора напруги мережі (знижена через трансформатор до амплітудного значення фазної напруги 230 В) та модуля вектора ЕРС статора.

Графіки перехідних процесів при збудженні та синхронізації МПЖ представлено на рисунку. Результати експериментального дослідження підтверджують ефективність розробленого алгоритму.



Висновки. Синтезовано алгоритм збудження і синхронізації, який забезпечує формування на статорі МПЖ напруги, синхронізованої за амплітудою, частотою та фазою з напругою мережі живлення, що є необхідною умовою для забезпечення підключення статорних обмоток МПЖ до мережі живлення без виникнення перехідних процесів. Експериментально підтверджено, що розроблений алгоритм забезпечує досягнення умов синхронізації, а отже, його застосування дозволяє виконати безпечно підключення статора МПЖ до мережі, в тому числі в умовах дії обмежених параметричних і координатних збурень.

УДК 681.53

УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ И СИНХРОНИЗАЦИИ

С.М. Пересادا, докт. техн. наук, В.О. Благодир

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Представлены результаты синтеза и экспериментального исследования алгоритма возбуждения и синхронизации машины двойного питания (МДП) с напряжением сети. Синтезированный алгоритм обеспечивает синхронизацию вектора напряжения статора с вектором напряжения сети по амплитуде, частоте и фазе, благодаря чему обеспечивается подключение статора МДП к сети без возникновения переходных процессов, что является необходимым условием как для применений МДП в электроприводах, так и в системах генерирования электроэнергии. Экспериментально подтверждена эффективность разработанного алгоритма синхронизации при его использовании в электромеханических системах с МДП. Библи. 4, рис. 1.

Ключевые слова: машина двойного питания, векторное управление, возбуждение генератора, синхронизация.

CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE IN EXCITATION AND SYNCHRONIZATION MODES

S.M. Peresada, V.O. Blagodir

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Excitation and synchronization algorithm for smooth connection of doubly-fed induction machine (DFIM) to the grid is presented. Designed algorithm ensures coincidence of voltage induced in the stator with the grid voltage in amplitude, frequency, and phase. It is important for the DFIM applications in both drives and power generation systems. The efficiency of designed excitation and synchronization algorithm in electromechanical system with the DFIM is experimentally confirmed. References 4, figure 1.

Key words: doubly-fed induction machine, vector control, generator excitation, synchronization.

1. Cardenas R., Pena R., Alepuz S., Asher G. Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – No 7. – Pp. 2776–2798.

2. Iwanski G., Koczara W. PLL Grid Synchronization of the Standalone DFIG based Wind Turbine or Rotary UPS // The International Conference on Computer as a Tool EUROCON 2007. – 2007. – Pp. 2550–2555.

3. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of the Doubly-Fed Induction Machine // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2003. – Vol. 11. – No 6. – Pp. 875–888.

4. Tapia G., Santamaria G., Telleria M., Susperregui A. Methodology for Smooth Connection of Doubly Fed Induction Generators to the Grid // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2009. – Vol. 24. – No 4. – Pp. 959–971.

Надійшла 02.02.2016

Остаточний варіант 23.03.2016