

С. В. Король¹
 І. В. Кривошея¹
 К. О. Гайдар¹
 С. А. Козлюк¹

ШВИДКЕ ЗАРЯДЖАННЯ КОНДЕНСАТОРА ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В АВТОНОМНІЙ СИСТЕМІ З ВЕКТОРНО КЕРОВАНИМ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

¹Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Для системи векторного керування струмами статора асинхронного генератора з непрямою орієнтацією за вектором потокосцеплення ротора запропоновано алгоритм швидкого заряджання конденсатора в ланці постійного струму. Цей алгоритм забезпечує роботу асинхронного генератора з максимальною вихідною потужністю протягом всього часу заряджання конденсатора в ланці постійного струму. Отримана залежність дозволяє визначити завдання для моментної компоненти струму асинхронного генератора, яка забезпечить мінімальний час заряджання конденсатора в ланці постійного струму не порушуючи фізику роботи асинхронного генератора.

Виконано порівняльне дослідження швидкості заряджання конденсатора в ланці постійного струму у разі використання запропонованого та стандартного алгоритмів. В стандартному алгоритмі заряджання конденсатора в ланці постійного струму здійснюється шляхом відпрацювання заданої траєкторії напруги з обмеженою першою похідною. Дослідження виконано методом математичного моделювання з використанням повної динамічної моделі асинхронного генератора за непрямого векторного керування з пропорційно-інтегральний регулятором напруги. Тестування швидкості заряджання виконано для асинхронної машини потужністю 5.5 кВт з номінальною швидкістю 1430 об/хв на двох швидкостях: синхронній швидкості (150 рад/с) і половині синхронної швидкості (75 рад/с).

Результати дослідження показали, що запропонований алгоритм підтримує оптимальне значення моментної компоненти струму асинхронного генератора під час всього процесу заряджання. Цим він забезпечує роботу асинхронного генератора з максимальною потужністю і дозволяє скоротити час заряджання більше ніж на 30 %, у порівнянні зі стандартним алгоритмом, який використовує фіксовану швидкість наростання напруги в ланці постійного струму.

Слід зазначити, що пікові максимальні значення струмів, які виникають під час всього процесу заряджання, рівні для обох алгоритмів. Впровадження запропонованого алгоритму в системах керування автономного генератора зменшить час запуску резервних енергетичних систем, який є важливою характеристикою таких систем.

Ключові слова: асинхронний генератор, полеорієнтоване векторне керування, автономні енергогенеруючі системи.

Вступ

Одним з важливих режимів роботи автономної системи на основі асинхронного генератора (АГ) показаної на рис. 1 є процес запуску. В системах резервного живлення час запуску є однією з найважливіших характеристик. Найчастіше запуск АГ здійснюється від автономного джерела постійної напруги, яке зазвичай має набагато меншу напругу, ніж робоча напруга в ланці постійного струму. Для коректного запуску системи необхідно врахувати фізичні обмеження, які визначаються низь-

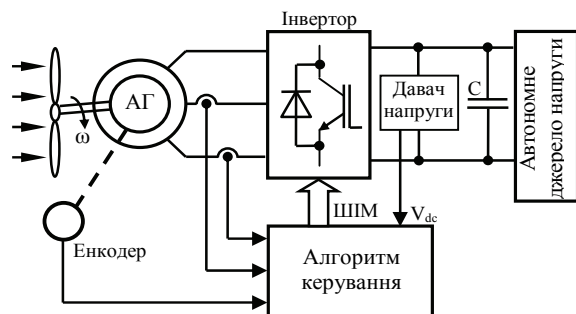


Рис. 1. Структура системи генерування

кою початковою напругою в ланці постійного струму і кутовою швидкістю обертання вала АГ. Зазвичай заряджання конденсатора в ланці постійного струму здійснюють формуванням заданої траєкторії для напруги в ланці постійного струму. Темп заряджання визначається максимально допустимим струмом генератора і вибирається з урахуванням електричних параметрів АГ, кутової швидкості обертання і рівня потокозчеплення АГ. Для уникнення режимів, які можуть порушити фізику роботи АГ, використовують визначену емпіричним шляхом чи шляхом моделювання [1] процедуру запуску, що дозволяє обійти небажані режими роботи. В [2] отримано аналітичний вираз для максимального струму АГ, який не враховує втрати в роторі та можливість роботи зі швидкостями нижче номінальної, і, виходячи з отриманого значення визначається мінімально допустимий час наростання напруги в ланці постійного струму.

Такі підходи не дозволяють мінімізувати час заряджання конденсатора незалежно від режиму роботи АГ і, таким чином, забезпечити максимальну швидкість запуску автономної системи живлення.

Метою роботи є розробка та дослідження алгоритму керування АГ під час заряджання конденсатора в ланці постійного струму, який забезпечить максимальну швидкість заряджання без порушень фізичних обмежень.

Результати дослідження

Запропонована система керування базується на алгоритмі векторного керування струмами статора АГ з непрямою орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора, за якого вихідна потужність АГ [3] визначається як

$$P_s = -3 \left(R_1 (i_d^{*2} + i_q^{*2}) + R_2 L_m^2 i_q^{*2} / L_2^2 + L_m \omega p_n \psi^* i_q^* / L_2 \right) / 2, \quad (1)$$

де i_d^* , i_q^* — задання для компонент струму статора в системі координат (d-q), орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора, ψ^* — задане потокозчеплення ротора, R_1 , L_1 , R_2 , L_2 — активні та індуктивні опори статора та ротора, відповідно, L_m — індуктивність намагнічування, ω — кутова швидкість обертання ротора, p_n — кількість пар полюсів.

Дослідження всіх обмежувальних факторів [4], які виникають під час запуску АГ від низьковольтного джерела напруги в ланці постійного струму, та під час роботи АГ на швидкостях, нижчих номінальної, стало основою для розробки алгоритму швидкого заряджання конденсатора в ланці постійного струму. В результаті дослідження встановлено, що функція залежності вихідної потужності АГ від моментної компоненти струму i_q має точку екстремуму, в якій АГ буде працювати з максимальною вихідною потужністю. Для визначення максимального значення потужності P_s , знайдемо екстремум для вихідної потужності АГ, продиференціювавши рівняння потужності (1) відносно i_q^* :

$$\frac{dP_s}{di_q^*} = -3R_1 i_q^* - 2R_2 \frac{L_m^2}{L_2^2} i_q^* - \frac{L_m}{L_2} \omega \psi^*. \quad (2)$$

Звідки отримаємо вираз для оптимального i_q^* , який забезпечує максимум вихідної потужності.

$$i_{q, \text{опт.}}^* = -L_m \omega p_n \psi^* / L_2 (2R_1 + 2R_2 L_m^2 / L_2^2) \quad (3)$$

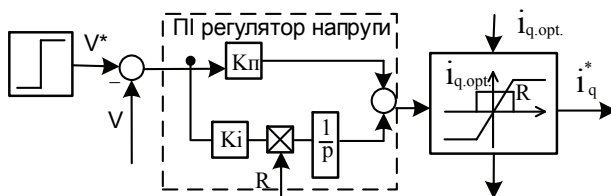


Рис. 2. Регулятор напруги в ланці постійного струму

Отримана залежність дозволяє визначити завдання для моментної компоненти струму АГ, яке забезпечить мінімальний час заряду конденсатора в ланці постійного струму, не порушуючи фізику роботи АГ. Щоб забезпечити коректну роботу системи керування напругою в режимі обмеження заданого струму, який виникає під час заряджання конденсатора,

стандартний ПІ регулятор напруги [5] модифікується, як показано на рис. 2.

Тестування розробленого алгоритму виконано методом математичного моделювання. Метою дослідження є порівняння швидкості заряджання у разі використання запропонованої системи

заряджання конденсатора в ланці постійного струму розрахованим струмом $i_{q\text{ пот}}$ і стандартної системи заряджання за траєкторією, розрахованою за методикою [2]. Дослідження виконано з використанням повної динамічної моделі АГ в (a-b) координатах з непрямым векторним керуванням з класичним ПІ регулятором напруги. Тестування проводилось для машини АІР112М4У2 потужністю 5,5 кВт з номінальною швидкістю 1430 об/хв і номінальним струмом 11,4 А. Параметри АГ: $R_1 = 1,04$ Ом; $L_1 = 0,124$ Гн; $R_2 = 0,7$ Ом; $L^2 = 0,124$ Гн; $L_m = 0,118$ Гн. Початкова напруга конденсатора в ланці постійного струму взята 150 В, ємність $C = 1000$ мкФ. Налаштувальні параметри регуляторів вибрані, $k_V = 0,7$; $k_{Vi} = 15$; $k_i = 600$; $k_{ii} = k_i^2/2$.

Тестування швидкості заряджання виконано на синхронній швидкості (150 рад/с) і половині синхронної швидкості (75 рад/с). Задане потокозчеплення розраховано відповідно до методики [4] і складає 0,25 Вб і 0,55 Вб відповідно для першого і другого тесту. На момент початку тесту машина обертається з відповідною для цього тесту швидкістю. На проміжку часу 0,1...0,4 с відбувається збудження АГ, а коли $t = 0,5$ с починається заряджання конденсатора в ланці постійного струму до 550 В.

Графіки перехідних процесів під час заряду конденсатора для запропонованого алгоритму виведено суцільною лінією, а для стандартного — пунктирною (рис. 3).

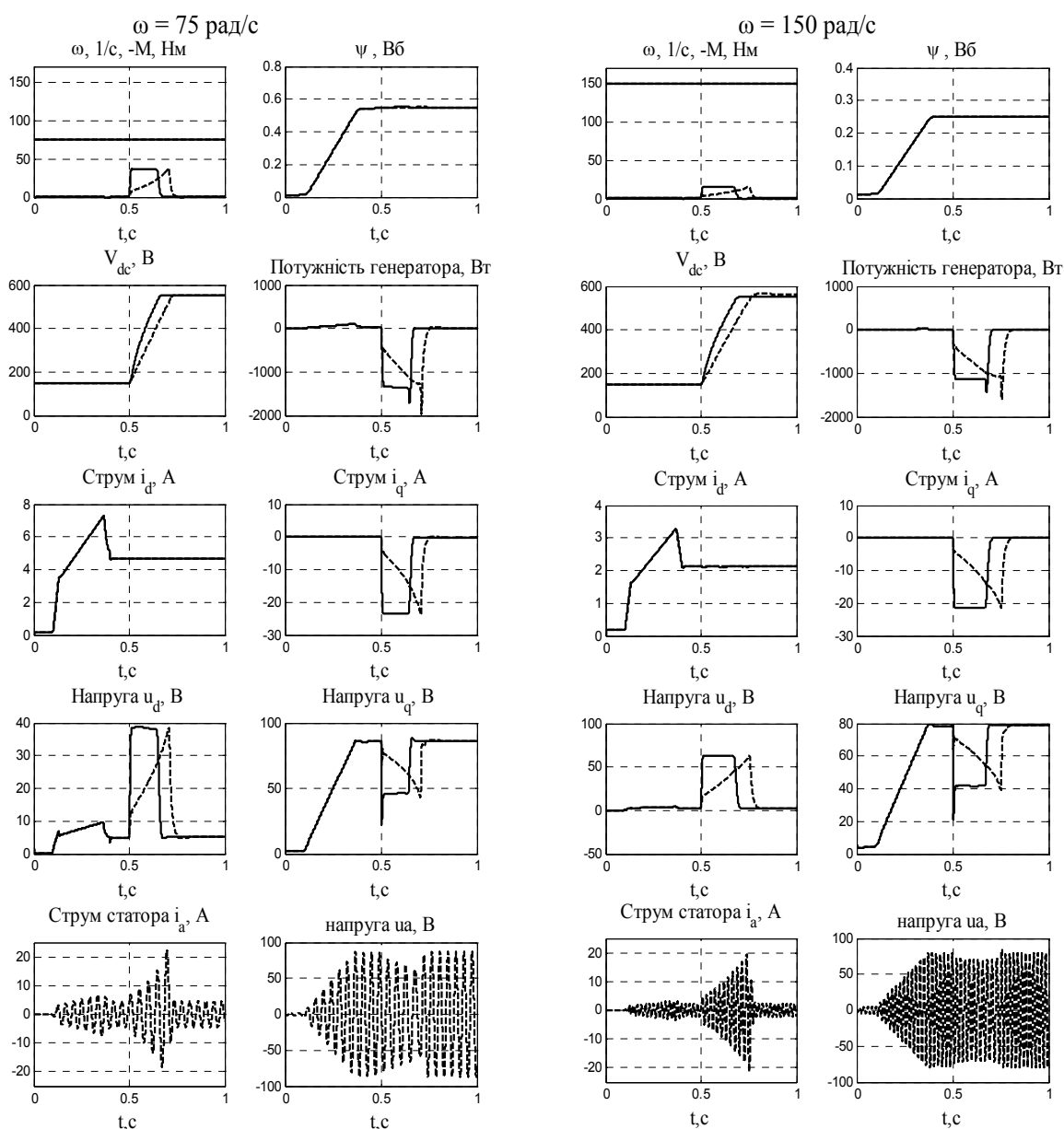


Рис. 3. Результати дослідження швидкості заряджання:
«—» — запропонований алгоритм; «- -» — стандартний алгоритм

З результатів дослідження видно, що запропонований алгоритм підтримує оптимальне значення моментної компоненти струму АГ під час всього процесу заряду, а це, в свою чергу, забезпечує роботу АГ з максимальною потужністю і дозволяє зарядити конденсатор на 30 % швидше, ніж у разі використання методики [2]. Такий ефект досягається як на синхронній швидкості обертання, так і на швидкості вдвічі меншій за синхронну.

Висновки

Під час заряджання конденсатора в ланці постійного струму запропонований алгоритм забезпечує роботу АГ з максимальною вихідною потужністю протягом всього часу заряду. Це дозволяє більше ніж на 30 % зменшити час заряджання у порівнянні зі стандартним алгоритмом заряджання за траєкторією. Використання запропонованого алгоритму дозволить скоротити час запуску автономної системи генерування, який є критичним для систем резервного живлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] R. O. C. Lyra, S. R. Silva, and P. C. Cortizo, "Direct and indirect flux control of an isolated induction generator," *IEEE Power Electronics and Drive Systems*, pp. 140-145, 1995.
- [2] S. Hazra and P. Sensarma, "Vector approach for self-excitation and control of induction machine in stand-alone wind power generation," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 5, pp. 397-405, September 2011.
- [3] S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, and N. Zhelinskyi, "Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2, pp. 48-56, 2017.
- [4] S. Korol, S. Buryan, M. Pushkar, and M. Ostroverkhov, "Investigation the Maximal Values of Flux and Stator Current of Autonomous Induction Generator," in *Proc. IEEE Int. Conf. UKRCON-2017*, pp. 560-563.
- [5] S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, and N. Zhelinskyi, "Indirect Field Oriented Output Feedback Linearized Control of Induction Generator," in *Proceedings of 2016 IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, pp. 187-191, Jun. 2016.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018

Король Сергій Вікторович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: svkorol@ukr.net ;

Кривошея Іван Володимирович — студент факультету електроенергетехніки та автоматики;

Гайдар Костянтин Олександрович — студент факультету електроенергетехніки та автоматики;

Козлюк Сергій Андрійович — студент факультету електроенергетехніки та автоматики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

S. V. Korol¹
I. V. Kryvosheia¹
K. O. Haidar¹
S. A. Kozliuk¹

Fast Charge of Dc Link Capacitor in Autonomous System with Vector-Controlled Induction Generator

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The algorithm of fast charging of a capacitor in the DC link for indirect rotor field-oriented vector control system of the induction generator is presented. This algorithm provides the operation of an induction generator with maximum output power over the entire charge time of the capacitor in the DC link. The obtained dependence allows us to determine the reference for torque component of current in the induction generator, which will provide the minimum charge time of the capacitor in the DC link without breaking the physics of induction generator.

There has been performed a comparative study of charge speed of the capacitor in the DC link with implementation of the proposed algorithm and the standard one. In the standard algorithm, the charge of the capacitor in the DC link is carried out by tracking reference voltage trajectory with limited first derivative.

The research was carried out with the method of mathematical modeling using complete dynamic model of induction generator with proportional-integral voltage regulator based on indirect vector control. Comparative tests of charge speed are

performed for induction machine with rated power of 5.5 kW and rated speed of 1430 rpm for two speeds: synchronous speed (150 rad/s) and half synchronous speed (75 rad/s).

The results of the research showed that the proposed algorithm provides optimal value of torque component of induction generator current during the entire charge process. By doing this, it provides the operation of an induction generator with maximum power and allows reducing the charge time by more than 30 % comparatively to the standard algorithm that uses voltage reference trajectory with a constant charge rate of the capacitor in the DC link. It should be noted, that the peak maximum values of currents in both algorithms are equal during the whole process of charge. Implementation of the proposed algorithm in control systems of autonomous generator will reduce the start-up time of backup power systems, which is critical for their operation.

Keywords: induction generator, field-oriented control, autonomous power generating systems.

Korol Serhii V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Automation of Electromechanics Systems and Electric Drive, e-mail: svkorol@ukr.net ;

Kryvosheia Ivan V. — Student of the Faculty of Electric Power Engineering and Automation;

Haidar Kostiantyn O. — Student of the Faculty of Electric Power Engineering and Automation;

Kozliuk Serhii A. — Student of the Faculty of Electric Power Engineering and Automation

С. В. Король¹
И. В. Кривошея¹
К. О. Гайдар¹
С. А. Козлюк¹

Быстрый заряд конденсатора звена постоянного тока в автономной системе с векторноуправляемым асинхронным генератором

¹Национальный технический университет Украины
 «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Для системы векторного управления токами статора асинхронного генератора с косвенной ориентацией по вектору потокоцепления ротора предложен алгоритм быстрой зарядки конденсатора в звене постоянного тока. Этот алгоритм обеспечивает работу асинхронного генератора с максимальной выходной мощностью в течение всего времени зарядки конденсатора в звене постоянного тока. Полученная зависимость позволяет определить задание для моментной компоненты тока асинхронного генератора, которая обеспечит минимальное время зарядки конденсатора в звене постоянного тока, не нарушая физику работы асинхронного генератора.

Выполнено сравнительное исследование скорости зарядки конденсатора в звене постоянного тока при использовании предложенного и стандартного алгоритмов. В стандартном алгоритме процесс зарядки конденсатора в звене постоянного тока осуществляется путем отработки заданной траектории напряжения с ограниченной первой производной. Исследование выполнено методом математического моделирования с использованием полной динамической модели асинхронного генератора при косвенном векторном управлении с пропорционально-интегральным регулятором напряжения. Тестирование скорости зарядки выполнено для асинхронной машины мощностью 5.5 кВт с номинальной скоростью 1430 об/мин на двух скоростях: синхронной скорости (150 рад/с) и половине от синхронной скорости (75 рад/с).

Результаты исследования показали, что предложенный алгоритм поддерживает оптимальное значение моментной компоненты тока асинхронного генератора в течение всего процесса зарядки. Этим он обеспечивает работу асинхронного генератора с максимальной мощностью и позволяет сократить время зарядки более чем на 30 % по сравнению со стандартным алгоритмом, который использует фиксированную скорость нарастания напряжения в звене постоянного тока.

Следует отметить, что пиковые максимальные значения токов, которые возникают в процессе зарядки, равны для обоих алгоритмов. Внедрение предложенного алгоритма в системах управления автономным генератором позволит уменьшить время запуска резервных энергетических систем, которое является важной характеристикой таких систем.

Ключевые слова: асинхронный генератор, полеориентированное векторное управление, автономные энергогенерирующие системы.

Король Сергей Викторович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: svkorol@ukr.net ;

Кривошея Иван Владимирович — студент факультета электроэнергетики и автоматики;

Гайдар Константин Александрович — студент факультета электроэнергетики и автоматики;

Козлюк Сергей Андреевич — студент факультета электроэнергетики и автоматики