

УДК 681.5:62-83

С. М. Пересада, д-р техн. наук,
В. О. Благодір, **Т. В. Диннік**, **М. М. Желінський**

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВІ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

***Анотація.** Досліджено алгоритм векторного керування вихідною напругою автономного генератора на основі асинхронної машини з фазним ротором. Розроблений алгоритм може використовуватися при побудові систем генерування електроенергії, де необхідно стабілізувати вихідну напругу генератора на заданому рівні при змінній швидкості приводного вала. Результати експериментального тестування свідчать, що розроблений алгоритм забезпечує асимптотичне регулювання модуля вектора вихідної напруги генератора незалежно від швидкості приводного вала.*

***Ключові слова:** автономний генератор, машина подвійного живлення, асинхронний двигун, векторне керування*

S. Peresada, ScD.,
V. Blagodir, **T. Dynnik**, **M. Zhelinskyi**

SYSTEM OF VECTOR CONTROL OF AUTONOMOUS GENERATOR BASED ON WOUND-ROTOR INDUCTION MOTOR

***Abstract.** The article presents investigation of an output voltage vector control algorithm for the autonomous generators based on the wound-rotor induction machine. The algorithm can be used for electricity generation, where it is necessary to stabilize the output voltage of the generator at a given level under primary mover variable speed operation. Experimentally shown, that proposed algorithm provides asymptotic regulation of the output voltage vector module regardless of the speed variation.*

***Keywords:** autonomous generator, doubly fed induction machine, induction motor, vector control*

С. М. Пересада, д-р техн. наук,
В. О. Благодір, **Т. В. Диннік**, **Н. Н. Желинский**

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

***Аннотация.** Исследован алгоритм векторного управления выходным напряжением автономного генератора на основе асинхронной машины с фазным ротором. Разработанный алгоритм может использоваться при построении систем генерирования электроэнергии, где необходимо стабилизировать выходное напряжение генератора на заданном уровне при переменной скорости приводного вала. Результаты экспериментального тестирования свидетельствуют, что разработанный алгоритм обеспечивает асимптотическое регулирование модуля вектора выходного напряжения генератора независимо от скорости приводного вала.*

***Ключевые слова:** автономный генератор, машина двойного питания, асинхронный двигатель, векторное управление*

Вступ. Машина подвійного живлення (МПЖ) займає важливу роль в системах генерування електроенергії при змінній швидкості обертання приводного вала [1]. В режимі подвійного живлення статорні обмотки асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором підключаються до мережі або до автономного навантаження, а обмотки ротора живляться від перетворювача напруги (ПН) [2], який отримує живлення від статорних обмоток напряму або через понижуючий трансформатор [3].

Регулювання кутової швидкості підвищує аеродинамічну ефективність вітроколеса при змінній швидкості вітру або гідравлічну ефективність турбін при різному напорі води. Наприклад, в гідрогенераторах відбір потужності при змінній швидкості дозволяє збільшити ефективність перетворення енергії до 10 % [4].

Використання МПЖ дозволяє знизити номінальну потужність ПН і вхідного фільтра до потужності максимального ковзання, з яким може працювати машина, і таким чином підвищити коефіцієнт корисної дії всієї системи за рахунок зменшення втрат в ПН [5].

Векторно-керовані МПЖ широко використовуються в електрогенераторах, що працюють паралельно з мережею [3], [6], [7], [8]. Керування автономними генеруючими системами на основі МПЖ, що живлять ізольоване навантаження [3], [9], розроблено в меншій мірі.

Головною метою роботи є розробка та дослідження алгоритму керування модулем вектора вихідної напруги автономного генератора при змінній швидкості приводного вала. Запропонований алгоритм керування забезпечує асимптотичність регулювання модуля вектора вихідної напруги при роботі на активне навантаження. Експериментально підтверджено ефективність запропонованого алгоритму.

© Пересада С.М., Благодір В.О., Диннік Т.В.,
Желінський М.М., 2014

1. Математична модель і цілі керування. Рівняння динаміки автономного генератора в синхронній системі координат (d-q), що обертається з кутовою швидкістю ω_0 (задана швидкість вектора напруги), з вихідним ємнісним фільтром в умовах стандартних припущень мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_1 &= -\left(\frac{1}{CR_L}\mathbf{I} + \omega_0\mathbf{J}\right)\mathbf{u}_1 - \frac{1}{C}\mathbf{i}_1, \\ \dot{\mathbf{i}}_1 &= -\left(\frac{R_1}{\sigma}\mathbf{I} + \alpha L_m\beta + \omega_0\mathbf{J}\right)\mathbf{i}_1 + \beta(\alpha\mathbf{I} - \omega_0\mathbf{J})\boldsymbol{\psi}_2 + \\ &\quad + \frac{1}{\sigma}\mathbf{u}_1 - \beta\mathbf{u}_2, \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_2 &= -(\alpha\mathbf{I} + \omega_2\mathbf{J})\boldsymbol{\psi}_2 + \alpha L_m\mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{u}_1 = (u_{1d}, u_{1q})^T$, $\mathbf{i}_1 = (i_{1d}, i_{1q})^T$ – вектори напруги та струму статора; $\mathbf{u}_2 = (u_{2d}, u_{2q})^T$, $\boldsymbol{\psi}_2 = (\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$, – вектори напруги та потокозчеплення ротора; ω – кутова швидкість ротора; $\omega_2 = \omega_0 - \omega$.

Додатні константи в (1) визначені наступним чином: $\alpha = R_2 / L_2$, $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$, $\beta = L_m / \sigma L_2$, де R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно; L_m – індуктивність контуру намагнічування; C – ємність вихідного фільтра; R_L – активний опір навантаження; $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, –

одична матриця; $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – косиметрична матриця.

Припустимо, що для моделі (1) виконуються наступні припущення:

A1. Параметри моделі (1) відомі і постійні.

A2. Вимірюваними є вектор \mathbf{u}_1 , струм статора, кутова швидкість і кутове положення ротора.

В умовах цих припущень необхідно синтезувати нелінійний динамічний регулятор $\mathbf{u}_2 = f(\omega, \omega_0, \mathbf{u}_1)$, що гарантує досягнення наступних цілей керування:

О.1. Асимптотичність регулювання модуля вектора вихідної напруги

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\mathbf{u}}_1) = 0, \quad (2)$$

де $\tilde{\mathbf{u}}_1 = (\tilde{u}_{1d}, \tilde{u}_{1q})^T$ – помилки відпрацювання напруги, що визначені у вигляді $\tilde{u}_{1d} = u_{1d} - U^*$, $\tilde{u}_{1q} = u_{1q}$, U^* – задане значення напруги.

О.2. Обмеженість всіх внутрішніх сигналів.

2. Алгоритм регулювання напруги. Для аналізу динамічних властивостей (1) розглянемо рівняння динаміки напруги статора (перше в (1)), представивши його у системі координат, що орієнтована за вектором напруги статора

$$\begin{aligned} |\dot{\mathbf{u}}_1| &= -\frac{1}{CR_L}|\mathbf{u}_1| - C^{-1}i_{1d}, \\ \omega_0|\mathbf{u}_1| &= -C^{-1}i_{1q}. \end{aligned} \quad (3)$$

Оскільки $(CR_L)^{-1} \gg 1$, то квазіусталене рішення першого рівняння в (3) буде $|\mathbf{u}_1| = R_L i_{1d}$. Це рівняння пов'язує активну компоненту вектора струму статора i_{1d} з модулем вихідної напруги генератора. Друге рівняння визначає реактивну компоненту струму статора i_{1q} . З розглянутого аналізу, рішення (1) пониженого порядку визначається при умові $\mathbf{u}_1 = R_L \mathbf{i}_1$. Завдяки цьому при $(CR_L)^{-1} \gg 1$ можна використовувати алгоритм векторного керування [10], який синтезовано за умов відсутності фільтра.

Двомірний алгоритм керування модулем вектора напруги статора має вигляд

$$\begin{aligned} \psi_{2d}^* &= -U^*/(\beta R_L), \\ \psi_{2q}^* &= U^*(R_1 + R_L)/(\beta\omega_0 R_L \sigma), \\ u_{2d} &= \alpha\psi_{2d}^* - \omega_2\psi_{2q}^* - \alpha L_m i_{1d} + (-k_u \tilde{u}_{1d} - v_d)/\beta R_L, \\ u_{2q} &= \alpha\psi_{2q}^* + \omega_2\psi_{2d}^* - \alpha L_m i_{1q} + (-k_u \tilde{u}_{1q} - v_q)/\beta R_L, \\ \dot{v}_d &= k_{ui} \tilde{u}_{1d}, \\ \dot{v}_q &= k_{ui} \tilde{u}_{1q}, \end{aligned} \quad (4)$$

де ψ_{2d}^* , ψ_{2q}^* – задані потокозчеплення ротора; k_u , k_{ui} – коефіцієнти ПІ-регулятора напруги.

В алгоритмі (4) значення опору навантаження розраховується згідно закону Ома. Із синтезу алгоритму [10] слідує, що цілі керування О.1, О.2 досягаються.

3. Експериментальні дослідження. Експериментальне тестування алгоритму (4) виконано для АД з наступними параметрами: потужність $P = 1,0$ кВт, число пар полюсів $p = 3$, момент інерції $J = 0,2$ 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. Прийняті коефіцієнти ПІ-регулятора напруги дорівнюють $k_u = 150$, $k_{ui} = 5625$.

Експериментальне тестування проводилося в такій послідовності: за допомогою приводного двигуна машина розганялася до швидкості 80 рад/с (76% синхронної), далі починався процес збудження, при цьому завдання вектору напруги статора лінійно зростає до $U^* = -200$ В за 0,5 с. В момент часу $t = 1$ с до статорного кола підключається активне навантаження $R_L = 67$ Ом, що відповідає номінальній потужності АД. Починаючи з $t = 1,5$ с починається лінійне збільшення швидкості до 90 рад/с, а з $t = 3$ с швидкість зменшується до 70 рад/с. Графіки перехідних процесів тесту представлено на рис. 1.

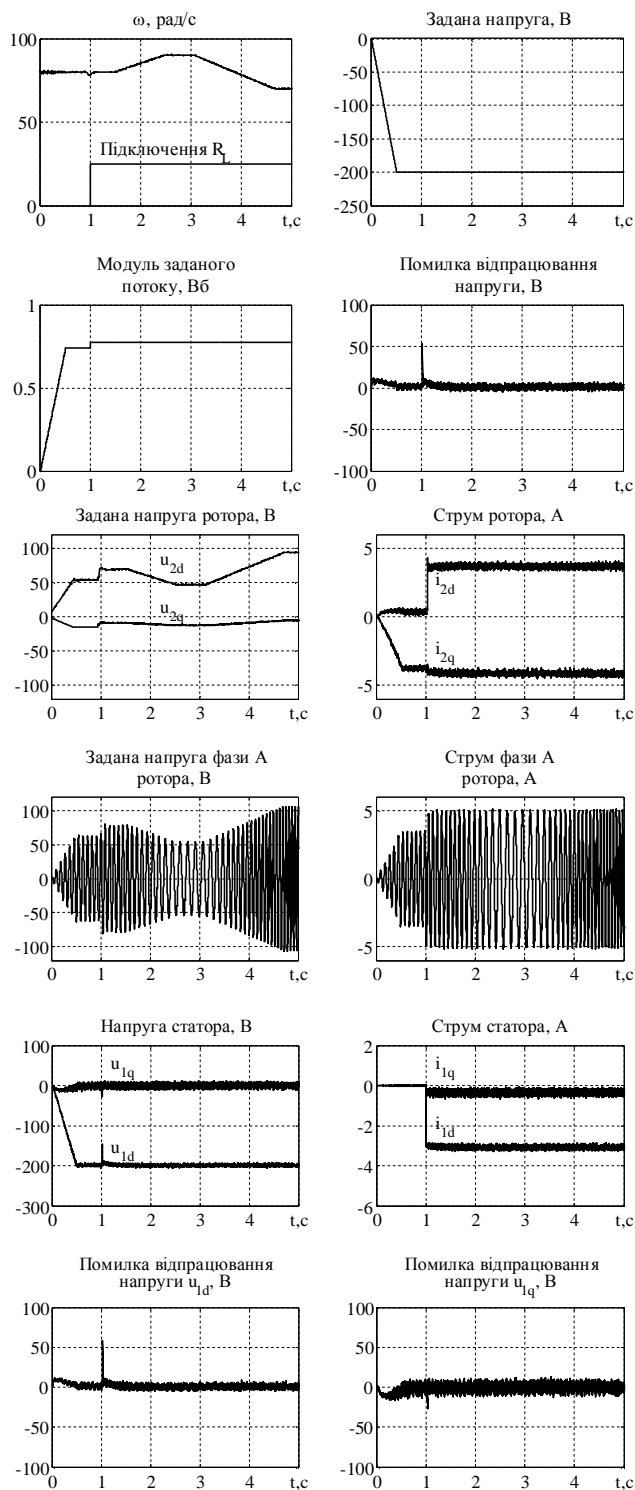


Рис. 1. Графіки перехідних процесів відпрацювання заданої напруги при варіації кутової швидкості

Висновки. В роботі досліджено алгоритм векторного керування вихідною напругою генератора на основі асинхронної машини подвійного живлення. Розроблений алгоритм може використовуватися при побудові систем генерування електроенергії, де необхідно стабілізувати вихідну напругу на заданому рівні при змінній швидкості приводного вала. Результати

експериментального тестування свідчать про те, що розроблений алгоритм забезпечує асимптотичне регулювання модуля вектора вихідної напруги генератора незалежно від швидкості приводного вала.

Список використаної літератури

1. Liserre M., Cardenas R., Molinas M., and Rodriguez J., (2011), Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1081 – 1095.
2. Leonhard W., (2001), Control of Electrical Drives, New York, USA, *Springer-Verlag*, 470 p.
3. Cardenas R., Pena R., Alepuz S., and Asher G., (2013), Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 7, pp. 2776 – 2798.
4. Johar M., Radan A., Miveh M. R., and Mirsaiedi S., (2001), Comparison of DFIG and Synchronous Machine for Storage Hydro-Power Generation, *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, Vol. 7, No. 1, pp. 48 – 58.
5. Saleh M.A.H., and Eskander M.N., (2011), Sizing of Converters Interfacing the Rotor of Wind Driven DFIG to the Power Grid, *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 300 – 304.
6. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (1998), Robust Active-Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Generator, *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 3, pp. 1621 – 1625.
7. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2003), Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of a Doubly fed Induction Machine, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 875 – 888.
8. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2004), Power Control of a Doubly fed Induction Machine via Output Feedback, *Control Engineering Practice*, No. 1, pp. 41 – 57.
9. Pena R., Clare J.C., and Asher G., (1996), A doubly fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed wind Turbine, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, Vol. 143, No. 5, pp. 380 – 387.
10. Chekhet E., Shapoval I., Mikhalsky V., Sobolev V., and Peresada S. Control of the Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator Supplied by the Matrix Converter, (2006), St.Petersburg, Russian Federation, *Proceedings of the International Workshop on Renewable Energy Based Units and Systems*, pp. 35 – 40.

Отримано 11.07.2014

References

1. Liserre M., Cardenas R., Molinas M., and Rodriguez J., (2011), Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1081 – 1095 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2010.2103910.

2. Leonhard W., (2001), *Control of Electrical Drives*, New York, USA, *Springer-Verlag*, 470 p. (In English).

3. Cardenas R., Pena R., Alepuz S., and Asher G., (2013), Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 7, pp. 2776 – 2798 (In English). DOI: 10.1109/IECON.2013.6699116.

4. Johar M., Radan A., Miveh M. R., and Mirsaeidi S., (2001), Comparison of DFIG and Synchronous Machine for Storage Hydro-Power Generation, *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, Vol. 7, No. 1, pp. 48 – 58 (In English), url: http://ijopaasat.in/yahoo_site_admin/assets/docs/5_IJPAST-192-V7N1.57224426.pdf.

5. Saleh M.A.H., and Eskander M.N., (2011), Sizing of Converters Interfacing the Rotor of Wind Driven DFIG to the Power Grid, *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 300 – 304 (In English). DOI: 10.4236/sgre.2011.23034.

6. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (1998), Robust Active-Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Generator, *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 3, pp. 1621 – 1625 (In English). DOI: 10.1109/IECON.1998.722908.

7. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2003), Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of a Doubly fed Induction Machine, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 875 – 888 (In English). DOI: 10.1109/TCST.2003.819590.

8. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2004), Power Control of a Doubly fed Induction Machine via Output Feedback, *Control Engineering Practice*, No. 1, pp. 41 – 57 (In English). DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00285-X.

9. Pena R., Clare J. C., and Asher G., (1996), A doubly fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed wind Turbine, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, Vol. 143, No. 5, pp. 380 – 387 (In English). DOI: 10.1049/ip-epa: 19960454.

10. Chekhet E., Shapoval I., Mikhalsky V., Sobolev V., and Peresada S., (2006), Control of the Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator Supplied by the Matrix Converter, St. Petersburg, Russian Federation, *Proceedings of the International Workshop on Renewable Energy Based Units and Systems*, pp. 35 – 40 (In English).



Пересада
Сергій Михайлович, д-р техн. наук, проф. зав. каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу нац. технічного ун-ту України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, (044) 236-99-30.
E-mail: sergei.peresada@gmail.com



Благодір
Віталій Олегович, аспірант каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу нац. технічного ун-ту України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, (063) 711-53-53.
E-mail: v.blagodir@kpi.ua



Диннік
Тарас Володимирович, аспірант каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу нац. технічного ун-ту України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, (050) 818-79-68.
E-mail: Taras_Dynnik@mail.ru



Желінський
Микола Миколайович, магістр, каф. автоматизації електромеханічних систем та електроприводу нац. технічного ун-ту України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, (093) 924-95-06.
E-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com