

С. М. Пересада¹
С. М. Ковбаса¹
М. М. Желінський¹
Є. О. Ніконенко¹
О. І. Райчук¹

СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

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

Проаналізовано властивості стійкості типових структур систем векторного керування асинхронними генераторами з лінійними пропорційно-інтегральними регуляторами струмів і напруги ланки постійного струму. Дослідження базується на розгляді математичної моделі асинхронної машини з урахуванням кривої намагнічування, що дало можливість модифікувати типовий алгоритм векторного керування напругою та модулем вектора потокозчеплення шляхом врахування насичення. Проблемою в доведенні стійкості системи генерування на основі асинхронного генератора є те, що його математична модель є нелінійною та немінимально-фазовою, а динаміка напруги ланки постійного струму є нелінійною навіть для постійного потокозчеплення та швидкості через наявність нелінійних компонент, які пропорційні активним втратам. З використанням теорії сингулярно-вироджених систем в роботі встановлено умови, за яких можливо розглядати систему керування напругою асинхронного генератора зниженого порядку, та доведено властивості локальної асимптотичної стійкості системи генерування у разі дії типових алгоритмів векторного керування. Показано, що локальна асимптотична стійкість забезпечується за умови розділення у часі процесів регулювання напруги і моментоутворювальної компоненти струму статора, яке досягається за рахунок спеціального, запропонованого в роботі налаштування коефіцієнтів регуляторів напруги та струму. Модифікований алгоритм векторного керування асинхронним генератором досліджено методом математичного моделювання та на експериментальній установці. На першому етапі досліджено динаміку системи, коли підсистема потокозчеплення знаходиться у стані рівноваги. В результаті підтверджено можливість розгляду системи зниженого порядку для аналізу та синтезу підсистеми регулювання напруги. На другому етапі експериментально досліджено динамічну поведінку контуру регулювання напруги для різних налаштувань регуляторів та показано, що запропоноване в роботі налаштування алгоритму керування напругою забезпечує розділення у часі процесів регулювання струму і напруги, а також їх квазірозв'язання.

Ключові слова: векторне керування, асинхронний генератор, регулятор, стійкість.

Вступ

Стандартна структура системи генерування на основі асинхронного генератора (АГ) аналогічна тій, яка використовується в системах векторного керування кутовою швидкістю асинхронних двигунів, в якій ПІ-регулятор швидкості замінено ПІ-регулятором напруги ланки постійного струму [1]. Схожість двох систем зумовлена тим, що виходи двох регуляторів формують сигнал завдання на момент електричної машини. Динаміка кутової швидкості асинхронного двигуна є лінійною за умови ідеальної полеорієнтації та постійного потокозчеплення, в той час як динаміка напруги ланки постійного струму є нелінійною навіть для постійного потокозчеплення та постійної швидкості обертання вала генератора через наявність нелінійних компонентів, які пропорційні активним втратам [2]. Математична модель системи генерування на основі АГ є нелінійною та немінимально-фазовою, тому доведення стійкості типових систем векторного керування АГ є складною задачею. В [3] авторами представлено процедуру синтезу системи керування напругою на основі

спрощених рівнянь динаміки моментного струму. Розглянуто алгоритм керування напругою з лінійними ПІ-регуляторами струмів і напруги, модифікованими для врахування насичення магнітної системи АГ. Показано, що лінійний ПІ-регулятор напруги для постійної швидкості та потокозчеплення забезпечує асимптотичність регулювання напруги, якщо активні втрати розглядати як збурення.

Метою роботи є: а) доведення локальної асимптотичної стійкості системи векторного керування напругою АГ шляхом застосування теорії сингулярно-вироджених систем;

б) встановлення умов, за яких можливо розглядати систему керування напругою АГ зниженого порядку.

Математична модель та постановка задачі

Модель системи генерування у вигляді диференціальних рівнянь механічної частини, струмів статора та потокозчеплень ротора, напруги ланки постійного струму, записується у вигляді нелінійної системи 6-го порядку [3]

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= J^{-1}(M_n + M); \quad M = \mu_{1m}(\psi_d i_q - \psi_q i_d); & \dot{\psi}_d &= -\alpha_m \psi_d + \omega_2 \psi_q + \alpha_m L_m(i_m) i_d; \\ \dot{i}_d &= -\gamma_m i_d + \omega_0 i_q + \alpha_m \beta_m \psi_d + \omega p_n \beta_m \psi_q + \sigma_m^{-1} u_d; & \dot{\psi}_q &= -\alpha_m \psi_q - \omega_2 \psi_d + \alpha_m L_m(i_m) i_q; \\ \dot{i}_q &= -\gamma_m i_q - \omega_0 i_d + \alpha_m \beta_m \psi_q - \omega p_n \beta_m \psi_d + \sigma_m^{-1} u_q; & \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0; \quad \varepsilon_0(0) = 0; \\ & & \dot{V}_{dc} &= C^{-1} \left(-(3/2) V_{dc}^{-1} (u_d i_d + u_q i_q) - i_L \right). \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{u} = (u_d, u_q)^T$, $\mathbf{i} = (i_d, i_q)^T$, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_d, \psi_q)^T$ — вектори керуючих напруг, струмів статора та потокозчеплень ротора в системі координат $(d-q)$; ω — кутова швидкість обертання ротора, ε_0 , ω_0 — кутове положення та кутова швидкість обертання синхронної системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної $(a-b)$; $\omega_2 = \omega_0 - \omega p_n$ — швидкість ковзання; M — електромагнітний момент, M_n — момент первинного рушія; J — повний момент інерції; p_n — число пар полюсів; V_{dc} , C — напруга та ємність ланки постійного струму; i_L — струм навантаження. Додатні параметри в (1) визначено таким чином: $\mu_{1m} = 3L_m(i_m) p_n / 2L_{2m}$; $\alpha_m = R_2 / L_{2m}$; $\sigma_m = L_{1m} - L_m^2(i_m) / L_{2m}$; $\beta_m = L_m(i_m) / [L_{2m} \sigma_m]$; $\gamma_m = R_1 \sigma_m^{-1} + \alpha_m \beta_m L_m(i_m)$, де R_1, R_2 — активні опори статора та ротора. Відмітимо, що значення $\alpha_m L_m(i_m) = (\alpha L_m) = \text{const}$ взято за умов припущення, що співвідношення між будь-якими парами L_{1m} , L_{2m} , $L_m(i_m)$ є постійним, де L_m — індуктивність намагнічування за номінального потокозчеплення. Індекс m в позначеннях (1) вказує на залежність коефіцієнтів від струму намагнічування.

Для розв'язання задачі керування припустимо, що: струми статора, напруга ланки постійного струму, кутова швидкість обертання ротора є доступними для вимірювання; швидкість обертання ротора (первинного рушія) $\omega > 0$ і повільно змінюється; всі параметри генератора, ємність ланки постійного струму відомі та сталі; задана напруга ланки постійного струму $V_{dc}^* > 0$ та модуль потокозчеплення ротора $\psi^* > 0$ є постійними, або такими, що повільно змінюються.

За умов виконання цих припущень в [3] синтезовано алгоритм керування, який гарантує досягнення таких цілей керування: О.1. Асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{V}_{dc} = 0$, де $\tilde{V}_{dc} = V_{dc} - V_{dc}^*$ — похибка відпрацювання напруги;

О.2. Асимптотичне відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$, де $\tilde{\psi} = |\boldsymbol{\psi}| - \psi^*$ — похибка відпрацювання потокозчеплення, $|\boldsymbol{\psi}| = \sqrt{(\psi_d^2 + \psi_q^2)}$ — модуль вектора потокозчеплення ротора;

О.3. Асимптотичне орієнтування за вектором потокозчеплення ротора $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0$. Алгоритм прямого векторного керування з лінійними ПІ-регуляторами задається такими рівняннями [3]:

– регулятор потокозчеплення

$$i_d^* = \psi^* / L_m(i_m); \quad \dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + (\alpha L_m) i_q / \psi^*; \quad (2)$$

– регулятори струму

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma_m \left(-\omega_0 i_q - k_{i1} \tilde{i}_d + x_d \right); \quad \dot{x}_d = -k_{ii} \tilde{i}_d; \\ u_q &= \sigma_m \left(\omega_0 i_d - k_{i1} \tilde{i}_q + x_q \right); \quad \dot{x}_q = -k_{ii} \tilde{i}_q; \end{aligned} \quad (3)$$

– регулятор напруги ланки постійного струму

$$i_q^* = -(-k_v \tilde{V}_{dc} + x_v); \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (4)$$

де i_d^*, i_q^* — задані компоненти струму статора по осях d та q ; $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$, $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ — похибки відпрацювання струмів; $(k_{i1}, k_{ii}) > 0$ — коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму; $(k_v, k_{vi}) > 0$ — коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора напруги.

Доведення локальної стійкості алгоритму керування напругою ланки постійного струму

Після завершення процесів регулювання струму $\tilde{i}_d = 0$ та асимптотичного полеорієнтування $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q) = 0$ ($\tilde{\psi}_d = \psi_d - \psi^*$; $\tilde{\psi}_q = \psi_q$), у разі дії регулятора (4) рівняння динаміки похибки відпрацювання напруги ланки постійного струму з (1) для $V_{dc}^* = \text{const}$; $\dot{V}_{dc}^* = 0$ набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{V}}_{dc} &= -C^{-1} \left\{ (3/2V_{dc}) \left[E + R_{\Sigma} (i_q^* + \tilde{i}_q) \right] k_v \tilde{V}_{dc} \right\} + C^{-1} \left\{ (3/2V_{dc}) \left[E + R_{\Sigma} (i_q^* + \tilde{i}_q) \right] x_v \right\} - \\ &- C^{-1} \left(i_L + (3/2V_{dc}) R_1 \psi^{*2} / L_m^2 (i_m) \right) - C^{-1} \left\{ (3/2V_{dc}) \left[E + R_{\Sigma} (i_q^* + \tilde{i}_q) \right] \right\} \tilde{i}_q; \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\tilde{i}}_q = -k_i \tilde{i}_q - \beta_m \omega p_n \psi^* - \gamma_m i_q^* + x_q - i_q^*; \quad \dot{x}_q = -k_{ii} \tilde{i}_q; \quad i_q^* = k_v \tilde{V}_{dc} + k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (6)$$

де $k_i = k_{i1} + \gamma_m$; $R_{\Sigma} = (R_1 + R_2 L_m^2 (i_m) / L_{2m}^2)$.

Визначимо $k_i = k_v / \varepsilon$, $0 < \varepsilon < 1$ як «малий» додатний параметр в (5), (6), тоді (6) набуде вигляду

$$\varepsilon \dot{\tilde{i}}_q = -k_v \tilde{i}_q - \varepsilon \beta_m \omega p_n \psi^* - \varepsilon \gamma_m i_q^* + \varepsilon x_q - \varepsilon i_q^*. \quad (7)$$

Відповідно до теорії сингулярно-вироджених систем [4], розв'язок зниженого порядку для системи (5), (6) за умови $k_i \gg 1$ ($\varepsilon \rightarrow 0$) знаходиться для $\varepsilon = 0$, тобто

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{V}}_{dc} &= -C^{-1} (3/2V_{dc}) \left[E + R_{\Sigma} i_q^* \right] k_v \tilde{V}_{dc} + C^{-1} (3/2V_{dc}) \left[E + R_{\Sigma} i_q^* \right] \bar{x}_v - C^{-1} \left(i_L + (3/2V_{dc}) R_1 \psi^{*2} / L_m^2 (i_m) \right); \\ \dot{\tilde{x}}_v &= -k_{vi} \tilde{V}_{dc}; \quad \tilde{i}_q = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

де \bar{x} — позначення змінної в системі зниженого порядку.

Різниця між розв'язками систем повного (5), (6) та зниженого порядку має порядок величини ε , а саме

$$\tilde{V}_{dc}(t) = \bar{V}_{dc} + 0(\varepsilon). \quad (9)$$

Це означає, що для достатньо малих значень ε (коли $k_i \gg k_v$) всі розв'язки (8) сходяться до нуля $\tilde{V}_{dc} = \tilde{i}_q = 0$ за умови $i_L = 0$. В той же час інтегральна складова x_v забезпечує компенсацію постійної компоненти пропорційної ψ^{*2} та струму навантаження i_L .

Рівняння динаміки напруги ланки постійного струму (8) може бути записано у такому вигляді:

$$\dot{\tilde{V}}_{dc} = -C^{-1} \varphi(t, i_q^*, V_{dc}) k_v \tilde{V}_{dc} + C^{-1} \varphi(t, i_q^*, V_{dc}) \bar{x}_v - C^{-1} F(t); \quad \dot{\tilde{x}}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (10)$$

де $\varphi(t, i_q^*, V_{dc}) = \frac{3}{2} \frac{1}{V_{dc}} \left[E + R_{\Sigma} i_q^* \right]$; $E = \frac{L_m}{L_2} \omega p_n \psi^*$; $F(t) = i_L + \frac{3}{2} \frac{1}{V_{dc}} R_1 \frac{\psi^{*2}}{L_m^2 (i_m)}$.

Як доведено в [3], нелінійна система зниженого порядку (10) є локально асимптотично стійкою

для «малих» відхилень \tilde{V}_{dc} та $\varphi(t, i_q^*, V_{dc}) \gg 0$. Тому вихідна система (5), (6) є локально стійкою. Розв'язок (4) в статиці задовольняють умови

$$\tilde{V}_{dc} = 0, \varphi(t, i_q^*, V_{dc}) x_v = F(t); i_q^* = -x_v. \quad (11)$$

Оскільки система (10) є нелінійною для $(\omega, \psi^*, V_{dc}^*) \neq \text{const}$, то типове налаштування регулятора напруги (4) здійснюється, за найгіршого випадку, тобто динамічна похибка регулювання напруги буде залежати від зміни швидкості первинного рушія, потокозчеплення та напруги V_{dc} .

Динамічна поведінка кожної ізольованої підсистеми визначається налаштуванням регулятора напруги $k_{vi} > 0$, $k_v > 0$ і регулятора струму $k_{ii} > 0$, $k_{iq} > 0$. При цьому стандартне налаштування встановлює співвідношення $k_i = k_p^2/4$ для $\zeta = 1$; $k_i = k_p^2/2$ для $\zeta = \sqrt{2}/2$, де k_p , k_i — коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії в контурі регулювання; ζ — коефіцієнт демпфування в контурі. Швидкодія контуру регулювання визначається частотою власних недемпфованих коливань $\omega_0^2 = k_i$. Підсистема регулювання напруги (5) є зовнішньою по відношенню до підсистеми регулювання струму (6), тому часове розділення встановимо умовою $\omega_{0i} > (2-3)\omega_{0v}$, де індекси i та v відносяться до підсистем регулювання струму і напруги, відповідно, що еквівалентно $\varepsilon < (0,5-0,33)$.

Результати математичного моделювання та експериментального тестування

Дослідження виконано для АГ, параметри якого подані у [3]. В умовах тесту взято $C = 1000$ мкФ; $V_{dc} = 540$ В; $\omega = 140$ рад/с; $\psi^* = 0,96$ Вб. Послідовність операцій керування зображено на рис. 1. Розділення у часі процесів регулювання напруги та струму у відповідності до (5), (6) встановлено співвідношенням $\omega_{0i} = 3\omega_{0v}$, що є еквівалентним $\varepsilon = 0,33$, для коефіцієнта демпфування $\zeta = 0,707$.

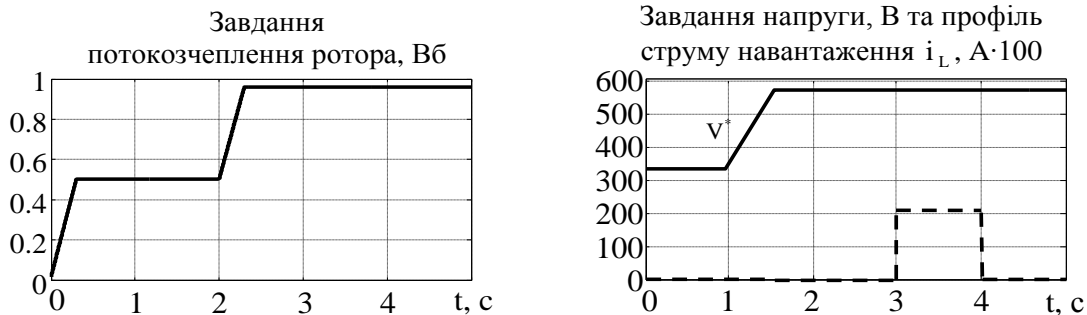


Рис. 1. Задані траєкторії потокозчеплення, напруги ланки постійного струму та профіль струму навантаження

На першому етапі досліджено динаміку системи, коли підсистема потокозчеплення знаходиться у стані рівноваги ($\tilde{i}_d, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q = 0$). Метою цього дослідження є підтвердження можливості розгляду системи зниженого порядку (5), (6) для аналізу та синтезу підсистеми регулювання напруги. Для цього в (1) прийнято $\psi_d = \psi^*$, $\psi_q = 0$, $i_d = i_d^*$. Динамічну поведінку похибки відпрацювання напруги та компоненти струму статора по осі q показано тільки в момент під'єднання навантаження. На рис. 2 цифрою 1 позначено графіки перехідних процесів в системі повного порядку (1)–(4), цифрою 2 — в системі зниженого порядку (5), (6), а цифрою 3 — графіки перехідних процесів за умови $\tilde{i}_q = 0$ в (7).

З аналізу графіків перехідних процесів на рис. 2 випливає, що з достатнім для практики ступенем точності можна вважати процеси в підсистемах напруги розв'язаними за умови розділення у часі процесів регулювання струму i_q та напруги, відповідно. Таким чином це дослідження підтверджує правомірність використання системи керування АГ зниженого порядку для синтезу алгоритмів керування підсистемою напруги ланки постійного струму.

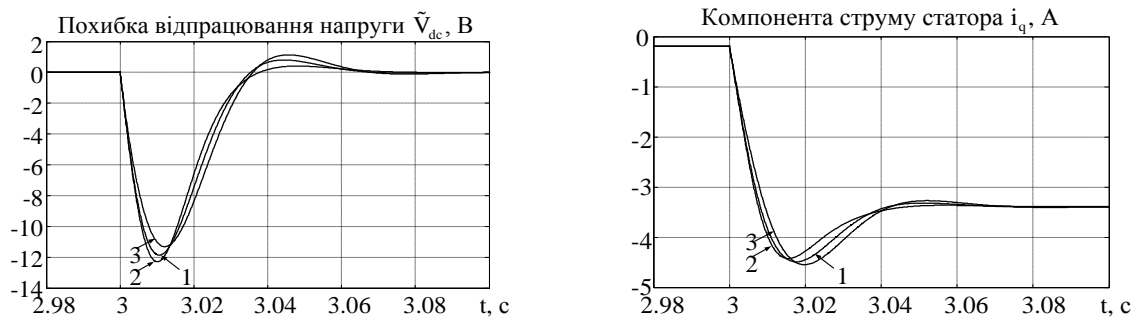


Рис. 2. Порівняння перехідних процесів в системі повного і зниженого порядку

На другому етапі експериментально досліджено динамічну поведінку контуру регулювання напруги для різних налаштувань регуляторів напруги і струму. Графіки перехідних процесів в ізольованій підсистемі напруги (8) показані на рис. 3 як графік 4 (моделювання). З ними порівнювалися експериментальні перехідні процеси за різних налаштувань коефіцієнтів регуляторів напруги та струму, які забезпечують різне часове розділення процесів керування: $\omega_{0i} = 1,5\omega_{0v}$ ($\varepsilon = 0,66$) — графік 1, $\omega_{0i} = 3\omega_{0v}$ ($\varepsilon = 0,33$) — графік 2, $\omega_{0i} = 6\omega_{0v}$ ($\varepsilon = 0,11$) — графік 3.

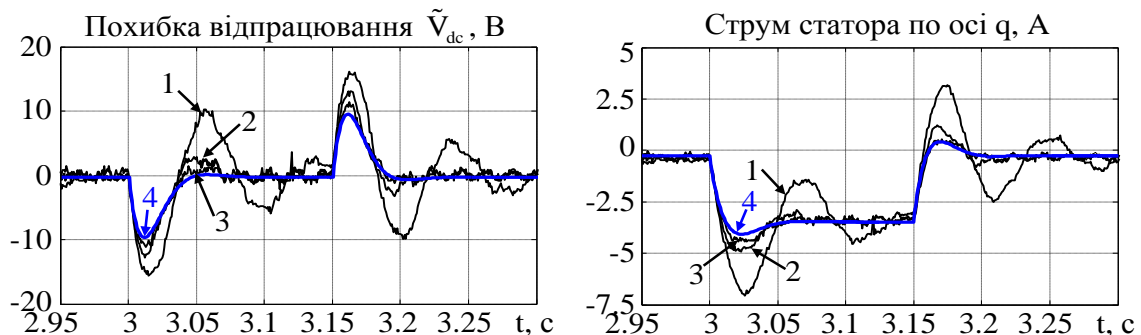


Рис. 3. Порівняння перехідних процесів в системі повного порядку та в ізольованому контурі регулювання напруги

З рис. 3 видно, що взята для розроблення алгоритму керування умова $\omega_{0i} \geq 3\omega_{0v}$ ($\varepsilon \leq 0,33$) є достатньою для розділення у часі процесів регулювання струму та напруги. При цьому процеси регулювання струму та напруги стають квазірозв'язаними і наближаються до еталонних, що і було основною ідеєю в проектуванні алгоритму керування.

Висновки

Доведено локальну стійкість системи векторного керування асинхронними генераторами з лінійними ПІ-регуляторами струмів і напруги ланки постійного струму на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Експериментально підтверджено, що часове розділення процесів регулювання напруги та моментотворювальної компоненти струму досягається, коли підсистема регулювання напруги щонайменше в 2—3 рази повільніша відносно підсистеми регулювання струму. За цієї умови можливо розглядати систему регулювання напруги зниженого порядку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] S. Peresada, S. Kovbasa, Korol S., and N. Zhelinskyi, "Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments," *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 48-56, 2017. <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.048>.
- [2] R. Leidhold, G. Garcia, and M. I Valla, "Field-oriented controlled induction generator with loss minimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 147-156, 2002. <https://doi.org/10.1109/41.982258>.
- [3] S. Peresada, M. Zhelinskyi, S. Kovbasa, and S. Korol, "Indirect field oriented control of the saturated induction generators with linear PI regulators," in *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 138-143. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764203>.
- [4] P. V. Kokotović, H. K. Khalil, and J. O'Reilly, *Singular perturbation methods in control: analysis and design*. London, Orlando: Academic Press, 1986.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Пересада Сергій Михайлович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Ковбаса Сергій Миколайович — д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Желінський Микола Миколайович — канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com ;

Ніконенко Євген Олексійович — аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Райчук Олексій Іванович — асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

S. M. Peresada¹
S. M. Kovbasa¹
M. M. Zhelinskyi¹
Ye. O. Nikonenko¹
O. I. Raichuk¹

Stability of Voltage Vector Control Systems Based on Induction Generators

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The paper presents an analysis of the stability properties of typical structures of induction generators-based vector control systems with linear proportional-integral currents and DC-link voltage controllers. The study is based on the mathematical model of an induction machine taking into account the magnetization curve. It provides the modification of the typical voltage-flux vector control algorithm by considering the saturation of the magnetic system. The stability proof problem of an induction generator-based generation system is that its model is nonlinear and nonminimal-phase, and that the dynamics of the DC-link voltage is nonlinear even for a constant flux linkage and speed due to the presence of nonlinear components which are proportional to active losses. The conditions which provide consideration of the reduced-order system dynamics are formulated and properties of local asymptotic stability of the generation system with typical vector control algorithms are proven based on the singular perturbation theory. It is shown that the local asymptotic stability is ensured when the regulation processes of the DC-link voltage and the torque-forming stator current component are decoupled, which is achieved due to the proposed special adjustment of the voltage and current controllers. A modified vector control algorithm of induction generator is studied in simulation and experimentally. At the first stage, the system dynamics is investigated when the flux subsystem is in equilibrium point. As a result, the possibility of the reduced-order system consideration for the design and analysis of the voltage regulation subsystem was confirmed. At the second stage, the dynamic behavior of the voltage control loop for different settings of the controllers was experimentally investigated. It is shown that the configuration of the voltage control algorithm proposed in the work provides the timescale separation of the current and DC-link voltage regulation processes, as well as their quasi-decoupling.

Keywords: vector control, induction generator, regulator, stability.

Peresada Serhii M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives;

Kovbasa Serhii M. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives;

Zhelinskyi Mykola M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com ;

Nikonenko Yevhen O. — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives;

Raichuk Oleksii I. — Assistant of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives