

ОПТИМІЗАЦІЯ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА ВИСОКИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРА

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Досліджено проблему підвищення якості векторно-керованих асинхронних генераторів. Використовуючи генетичний алгоритм, чисельно отримано закон формування модуля вектора потокозчеплення ротора, який максимізує потужність асинхронного генератора за обмежень струму та напруги статора. Дослідження показали, що отриманий закон дозволяє значно підвищити потужність генератора за високих швидкостей ротора.

Ключові слова: асинхронний генератор, векторне керування, оптимізація, потужність.

Вступ

Векторно-керовані асинхронні генератори (АГ), діапазон швидкостей ротора яких є істотним (наприклад, у вітряних турбогенераторах), можуть працювати як на нижчих, так і на вищих від номінальної швидкостях. При цьому в зоні високих швидкостей, де обмежується амплітуда напруги статора АГ, потокозчеплення ротора зазвичай змінюється за стандартним законом — обернено пропорційно до швидкості ротора. Проте з позицій екстремального керування [1] цей закон є досить недосконалим.

На сьогодні відома низка робіт [2—4], в яких розглянуто варіанти задачі поліпшення характеристик векторно-керованих асинхронних машин у зоні високих швидкостей ротора. Проте в цих роботах часто використовується спрощене описання асинхронної машини без врахування таких важливих чинників, якими є насичення магнітопроводу та втрати потужності у залізі. На відміну від них, у цій статті розглядається розширена модель АГ. За допомогою генетичного алгоритму (ГА) отримано екстремальний закон формування заданого потокозчеплення, що дозволяє підвищити потужність АГ у зоні високих швидкостей ротора.

Мета роботи — отримання чисельним шляхом оптимального в сенсі максимізації потужності АГ закону формування потокозчеплення в зоні високих швидкостей ротора за умов обмеження напруги та струму статора.

Максимізація потужності АГ

Короткозамкнений АГ у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ координатах (d, q) з урахуванням втрат у залізі можна описати системою диференціальних рівнянь [5]

$$\begin{aligned} dI_{sd}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z)I_{sd} - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_{sd} \right] + \omega_0 I_{sq}; \\ dI_{sq}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z)I_{sq} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_{sq} \right] - \omega_0 I_{sd}; \\ d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \\ d\Psi_{md}/dt &= R_z \left(I_{sd} + \Psi_{rd} / L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} \right) + \omega_0 \Psi_{mq}; \\ d\Psi_{mq}/dt &= R_z \left(I_{sq} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} \right) - \omega_0 \Psi_{md}; \\ d\omega/dt &= J^{-1} (M_E - M_T), \end{aligned} \quad (1)$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора \bar{U}_s , струму статора \bar{I}_s , потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$; головного потокозчеплення $\bar{\Psi}_m$; ω_0 — швидкість обертання координат (d, q) ; z_p — кількість пар полюсів; ω — швидкість ротора; M_E — електромагнітний момент; M_T — приводний момент; R_s, R_r — активні опори фаз статора та ротора; $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$ — ек-

івалентний опір, що відображає втрати потужності у залізі машини; L_m — взаємна індуктивність; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ — індуктивності від полів розсіювання; $L_r = L_m + L_{r\sigma}, T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r, T_z = L_m/R_z$.

Враховуючи, що в зорієнтованих координатах $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$, в (1) $M_E = (3/2)z_p L_{r\sigma}^{-1}(\Psi_r \Psi_{mq})$, $\omega_0 = z_p \omega + \Psi_{mq} / (T_{r\sigma} \Psi_r)$.

Для врахування впливу насичення магнітопроводу в описі (1) використано отриману на основі кривої намагнічування машини та апроксимовану поліномом нелінійну функцію $L_m = L_m(\Psi_m)$.

Вихідна активна потужність АГ може бути визначена як

$$P_g = 1,5(U_{sq}I_{sq} + U_{sd}I_{sd}). \tag{2}$$

Систему (1) слід доповнити реально існуючими в АГ обмеженнями модулів вектора напруги статора $U_s = |\bar{U}_s|$ та вектора струму статора $I_s = |\bar{I}_s|$ на заданому максимальному рівні U_{max} та I_{max} , відповідно:

$$0 \leq U_s \leq U_{max}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{max}. \tag{3}$$

Стандартний закон формування модуля вектора потокозчеплення ротора має вигляд

$$\Psi_r = F_{st}(\omega) = \begin{cases} \Psi_n, & \text{якщо } |\omega| \leq \omega_n; \\ \Psi_n \omega_n / |\omega|, & \text{якщо } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \tag{4}$$

де Ψ_n, ω_n — номінальні значення потокозчеплення та швидкості ротора, відповідно (індексом «n» позначено номінальні значення величин).

Внаслідок істотно нелінійного опису АГ аналітична оптимізація є неможливою. Тому екстремум знаходили чисельно за допомогою ГА. Задачею ГА було визначення за описом (1)—(3) оптимального потокозчеплення ротора за критерієм $|P_g| \Rightarrow \max$ (якщо $\omega > 0; M_E < 0$). У дослідженнях використано дані трифазної чотириполюсної машини потужністю 1,5 кВт.

Результати досліджень показані на рис. 1—4, де змінні нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в. о.). На рис. 1 зображені характеристики АД за стандартного, а на рис. 2 — за оптимального закону формування потокозчеплення ротора. На рис. 3 графічно зображені стандартний та оптимальний закони формування потокозчеплення. Для оцінювання ефекту від оптимізації було обчислено показник оптимальності потужності генератора k_p , що є відношенням оптимізованої до неоптимізованої вихідних потужностей АГ (рис. 4).

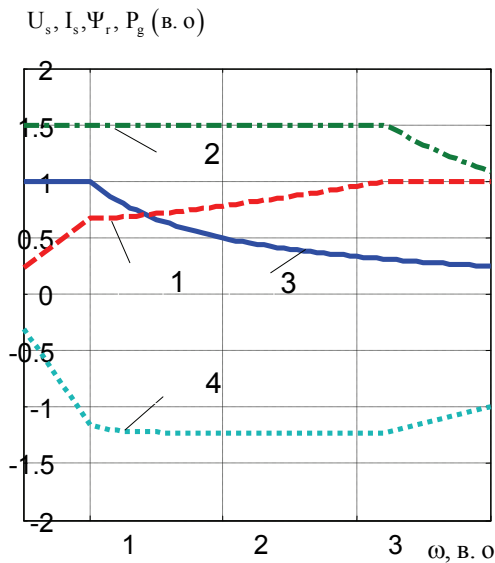


Рис. 1. Характеристики АД за стандартного закону формування потокозчеплення $\Psi_r = F_{st}(\omega)$:
1 — U_s ; 2 — I_s ; 3 — Ψ_r ; 4 — P_g

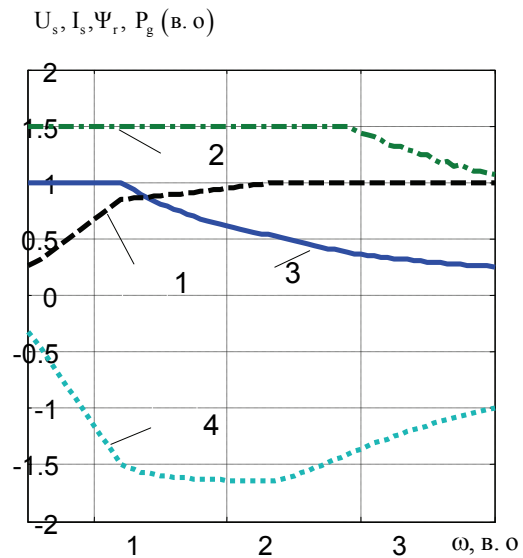


Рис. 2. Характеристики АД за оптимального закону формування потокозчеплення $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$:
1 — U_s ; 2 — I_s ; 3 — Ψ_r ; 4 — P_g

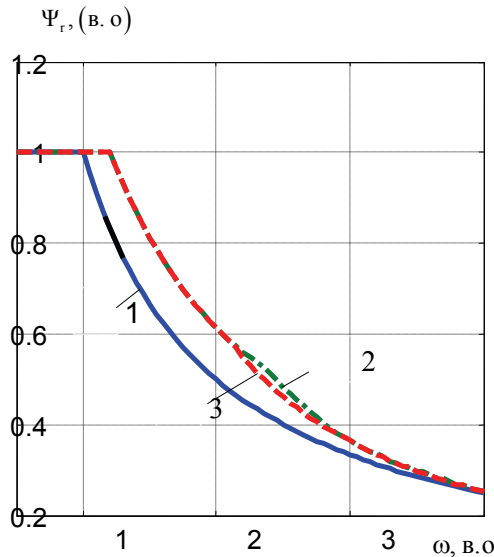


Рис. 3. Стандартний (крива 1) та оптимальні (криві 2, 3) закони формування потокозчеплення:
2 — $I_{\max} = 1,5 I_n$; 3 — $I_{\max} = 2 I_n$

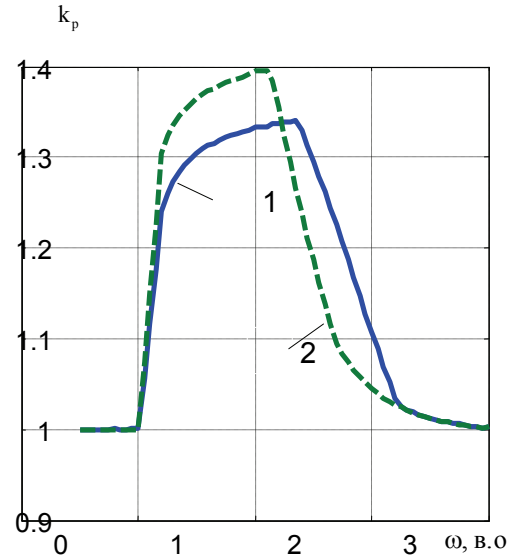


Рис. 4. Показник оптимальності потужності генератора для $I_{\max} = 1,5 I_n$ (крива 1) та $I_{\max} = 2 I_n$ (крива 2)

Аналізуючи рис. 4, бачимо, що в діапазоні швидкостей $\omega \approx (1...3)$ в.о. ефект від екстремального керування АГ є істотним. Тут зростання максимальної вихідної потужності генератора сягає 33 %, якщо I_{\max} перевищує номінальний струм в півтора рази, та 40 % — якщо вдвічі.

Здійснивши поліноміальну апроксимацію кривої 3 (див. рис. 3), отримаємо оптимальний закон формування потокозчеплення в аналітичному вигляді:

$$\Psi_r = F_{\text{opt}}(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\omega| \leq 1,2; \\ 0,023013\omega^7 - 0,41422\omega^6 + 3,1096\omega^5 - 12,587\omega^4 + \\ 29,568\omega^3 - 40,027\omega^2 + 28,217\omega - 6,8057, & \text{якщо } |\omega| > 1,2. \end{cases} \quad (5)$$

В (5) всі величини є відносними, а похибка апроксимації менша від 1 %.

Висновки

Отриманий оптимальний закон формування потокозчеплення уможливило істотне збільшення вихідної потужності АГ в зоні високих швидкостей ротора. Згідно з дослідженнями зростання потужності генератора сягає 33 %, якщо $I_{\max} = 1,5 I_n$, та 40 % — якщо $I_{\max} = 2 I_n$. Завдяки цьому закону поліпшиться компенсування АГ пікових перевантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шрейнер Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. — Кишинев : Штиинца, 1982. — 224 с.
2. Bodson M. A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors / M. Bodson, J. N. Chiasson, R. T. Novotnak // IEEE Trans. on Control Sys. Technol. — Vol. 3. — No. 4. — Dec. 1995. — P. 388—397.
3. Liao Y. W. Modelling and simulation of a stand-alone induction generator with rotor flux oriented control / Liao Y. W., Levi E. // Elect. Power Syst. Res. — Vol. 48. — 1998. — Pp. 141—152.
4. Bansal R. C. Three-Phase Self-Excited Induction generators: An Overview, IEEE Trans. Energy Convers. — Vol. 20. — No. 2. — June 2005. — Pp. 292—299.
5. Приймак Б. І. Математичні моделі асинхронної машини з врахуванням втрат у залізі / Б. І. Приймак // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — № 3 (12). — 2005. — С. 60—66.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.01.2014

Приймак Богдан Іванович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: bp-08@ukr.net.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

В. І. Приймак¹

Optimization of vector-controlled induction generator in the area of high speed of rotor

¹National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

The problem of quality improving of the vector-controlled induction generators is investigated. The law forming of the rotor flux linkage that maximizes the power of an induction generator with constraints voltage and stator current is numerically obtained using genetic algorithm. Studies have shown that the proposed law can significantly increase the generator power in the area of high speed of rotor.

Key words: induction generator, vector control, optimization, power

Przymak Bohdan I. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanic Systems and Electromechanics, e-mail: bp-08@ukr.net

Б. И. Приймак¹

Оптимизация векторно-управляемого асинхронного генератора при высоких скоростях ротора

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Исследована проблема повышения качества векторно-управляемых асинхронных генераторов. Используя генетический алгоритм, численно получен закон формирования модуля вектора потокосцепления ротора, который максимизирует мощность асинхронного генератора при ограничениях тока и напряжения статора. Исследования показали, что полученный закон позволяет значительно повысить мощность генератора при высоких скоростях ротора.

Ключевые слова: асинхронный генератор, векторное управление, оптимизация, мощность.

Приймак Богдан Іванович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: bp-08@ukr.net