

**ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ
З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ**

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

У порівнянні з домінуючим на сьогодні в автономних вітряних електростанціях синхронним генератором з постійними магнітами, асинхронний генератор (АГ) з короткозамкнутим ротором має такі істотні переваги, як вища надійність та менша вартість. Але енергетичні показники в АГ нижчі, тому їх поліпшення є актуальною задачею. Для розв'язання цієї задачі поряд з пошуковими алгоритмами інтенсивно розвиваються системи безпошукової оптимізації втрат потужності в АГ. У цих системах оптимальний магнітний потік визначається за аналітичним виразом, отриманим з моделі втрат. Недоліками відомих робіт за цією тематикою є те, що в них використовуються різними способами спрощені моделі втрат. Відповідно, це знижує точність алгоритмів оптимізації.

Метою роботи є побудова системи векторного керування АГ, у якій, завдяки оптимізації суми основних втрат потужності, досягається істотне підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) генератора.

У статті застосовано модель втрат потужності, що включає усі основні втрати в АГ електромагнітної природи. Сюди відносяться омичні втрати в опорах статора та ротора, магнітні втрати в залізі та додаткові втрати. Шляхом аналітичного дослідження моделі втрат на екстремум отримано вираз для визначення оптимального потокозчеплення ротора за критерієм мінімуму сумарних втрат в генераторі. Застосування цього виразу дозволяє підвищити точність оптимізації втрат у порівнянні з відомими аналогами. Процедура визначення оптимального потоку використовує сигнали моментної складової струму статора та швидкості ротора і є нескладною для комп'ютерної реалізації в реальному часі. Проведено числові дослідження усталених процесів в режимі роботи генератора з постійною вихідною потужністю $P_2 = \text{const}$ за її значень від 15% до 45%. Встановлено, що приріст ККД, отриманий завдяки керуванню з оптимізацією втрат, має екстремальний характер з максимумом в околі номінальної швидкості. Зі зростанням P_2 зона оптимізації втрат та приріст ККД зменшуються. Отримані у дослідженні максимальний та середній прирости ККД сягають 19% і 11%, відповідно. Це показує перспективність запропонованої системи енергоефективного векторного керування АГ.

Ключові слова: асинхронний генератор, система векторного керування, коефіцієнт корисної дії.

Вступ

Разом з синхронними генераторами з постійними магнітами, у вітряних електростанціях останнім часом почали застосовувати надійніші та дешевші асинхронні генератори (АГ) з короткозамкнутим ротором. Векторно-керовані АГ з інвертором напруги (ІН) можуть збуджуватися від батареї і забезпечувати стабільну напругу живлення автономної мережі постійного струму. Проте енергетичні показники АГ дещо нижчі, ніж у синхронних генераторах і потребують поліпшення.

На сьогодні відомо чимало робіт у сфері енергоефективного керування АГ, до прикладу, [1]—[4]. Ідеєю цих статей є аналітичне отримання виразу для визначення оптимального потоку на основі моделі втрат потужності в генераторі. При цьому використано різними способами спрощені моделі втрат. Зокрема, в [1] враховуються лише омичні втрати, в [2], [3] не беруться до уваги додаткові втрати, а в [4] опис магнітних втрат не включає гістерезисну компоненту, яка пропорційна частоті живлення статора. Внаслідок спрощення моделей втрат погіршується точність оптимізації.

Метою роботи є побудова системи векторного керування АГ, де завдяки оптимізації суми основних втрат потужності досягається істотний приріст коефіцієнта корисної дії (ККД) генератора.

Математичний опис асинхронного генератора

Ідея векторного керування АГ ґрунтується на математичному описі ідеалізованої асинхронної машини [5]. В рухомих координатах (d, q) , що обертаються зі швидкістю ω_0 , електромагнітні процеси в АГ з короткозамкненим ротором можна описати системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + d\psi_{sd}/dt - \omega_0 \psi_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + d\psi_{sq}/dt + \omega_0 \psi_{sd}; \\ 0 &= R_r I_{rd} + d\psi_{rd}/dt - (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rq}; \\ 0 &= R_r I_{rq} + d\psi_{rq}/dt + (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rd} \end{aligned} \quad (1)$$

та рівняннями

$$\psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad (2)$$

$$\psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad \psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \quad (3)$$

$$\psi_{md} = L_m I_{md}; \quad I_{md} = I_{sd} + I_{rd}; \quad (4)$$

$$\psi_{mq} = L_m I_{mq}; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq}; \quad (5)$$

$$M_e = (3z_p/2) K_r (\psi_{rd} I_{sq} - \psi_{rq} I_{sd}); \quad (6)$$

$$P_2 = -(3/2)(U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}), \quad (7)$$

де індексами d та q позначені проекції на однойменні координатні осі узагальнених векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора $\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$, струму ротора $\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$, струму намагнічування $\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$, потокозчеплення статора $\bar{\psi}_s = [\psi_{sd}, \psi_{sq}]^T$, потокозчеплення ротора $\bar{\psi}_r = [\psi_{rd}, \psi_{rq}]^T$; основного потокозчеплення $\bar{\psi}_m = [\psi_{md}, \psi_{mq}]^T$; M_e — електромагнітний момент генератора; z_p — кількість пар полюсів; ω — кутова швидкість ротора; P_2 — вихідна активна потужність генератора R_s, R_r — відповідно, активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора; L_m — індуктивність намагнічування; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ — повні індуктивності фаз статора і ротора, де $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ — індуктивності від полів розсіювання; $K_r = L_m/L_r$.

Якщо система рухомих координат зорієнтована за вектором потокозчеплення ротора, що математично виражається у вигляді умов

$$\psi_{rq} = 0; \quad d\psi_{rq}/dt = 0; \quad \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|, \quad (8)$$

то з (1) та (2)—(7) отримаємо модель АГ у вигляді системи диференціальних рівнянь

$$d\psi_r/dt = -\psi_r/T_r + I_d L_m/T_r; \quad (9)$$

$$dI_d/dt = -I_d R'_s/L' + U_d/L'_s + (\omega_0 L'_s I_q + K_r \psi_r/T_r)/L'_s; \quad (10)$$

$$dI_q/dt = -I_q R'_s/L'_s + U_q/L'_s - (\omega_0 L'_s I_d + K_r \psi_r z_p \omega)/L'_s; \quad (11)$$

$$P_2 = -(3/2)(U_d I_d + U_q I_q), \quad (12)$$

де $\psi_r \equiv \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|$; $I_d \equiv I_{sd}$, $I_q \equiv I_{sq}$, $U_d \equiv U_{sd}$, $U_q \equiv U_{sq}$ — відповідно, потокова і моментна компоненти вектора струму та компоненти вектора напруги статора АГ; $T_r = L_r/R_r$ — стала часу ротора; $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$. При цьому швидкість обертання $\bar{\psi}_r$ та момент дорівнюватимуть

$$\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \psi_r ; M_e = K_M I_q \psi_r , \quad (13)$$

де $K_M = (3/2)z_p K_r$. Інвертор напруги (ІН) може вважатися пропорційною ланкою, а ланка постійного струму на виході ІН описується диференціальним рівнянням

$$dU_{dc}/dt = I_c / C_{dc} , \quad (14)$$

де U_{dc} — напруга ланки постійного струму; C_{dc} — ємність накопичувального конденсатора у ланці постійного струму; I_c — струм заряджання конденсатора. Цей струм дорівнює $I_c = I_{dc} - I_L$, де I_{dc} — струм ланки постійного струму; I_L — струм навантаження. Нехтуючи втратами в інверторі, на основі балансу потужностей генератора та ланки постійного струму $U_{dc} I_{dc} = P_2$ отримаємо $I_{dc} = P_2 / U_{dc}$; $I_L = U_{dc} / R_L$, де R_L — опір навантаження.

Модель втрат потужності в асинхронному генераторі

Нижче магнітне коло АГ розглядатимемо як лінійне, прийнявши $L_m = \text{const} = L_{mn}$, де L_{mn} номінальна індуктивність намагнічування (індексом n у статті позначатимуться номінальні значення величин). Можна зазначити, що аналогічне припущення робиться досить часто в роботах за цією

тематикою [1]—[4] щоб уможливити аналітичне розв’язання задачі мінімізації втрат. Як відомо, основні втрати потужності в АГ включають омичні втрати в активних опорах статора та ротора, магнітні втрати або втрати в залізі (сталі), додаткові та механічні втрати. Омичні втрати та втрати в залізі враховані у показаній на рис. 1 Т-подібній схемі заміщення фази АГ, де R_m — опір, що відображає магнітні втрати в генераторі; $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$ — ковзання генератора.

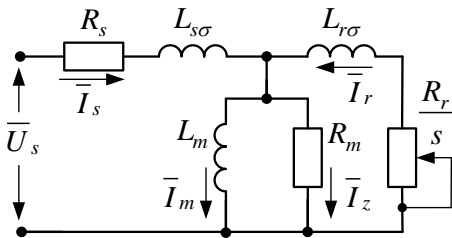


Рис. 1. Т-подібна схема заміщення фази АГ

Отримаємо вирази для втрат потужності на основі Т-подібної схеми заміщення. Розташування векторів потокозчеплень та струмів АГ у зорієнтованій за $\bar{\psi}_r$ системі координат (d, q) показано на рис. 2. У цій векторній діаграмі проекціями вектора $\bar{\psi}_m$ на осі d та q будуть величини $\psi_{md} = \psi_r$ та $\psi_{mq} = I_q K_r L_{r\sigma}$, відповідно [6]. Вектор струму \bar{I}_z , який протікає через магнітний опір R_m , визначається як $\bar{I}_z = j\omega_0 \bar{\psi}_m / R_m$, де $j = \sqrt{-1}$. На основі рис. 2 з урахуванням того, що в АГ моментна складова вектора струму статора є від’ємною $I_q < 0$, отримаємо формули для проекцій I_{zd} та I_{zq} вектора \bar{I}_z на осі d та q у вигляді

$$I_{zd} = -\omega_0 K_r L_{r\sigma} I_q R_m^{-1} ; I_{zq} = \omega_0 \psi_r R_m^{-1} . \quad (15)$$

Отже, вираз для втрат потужності в обмотці статора запишеться

$$P_s = 1,5 R_s (I_{d\Sigma}^2 + I_{q\Sigma}^2) , \quad (16)$$

де $I_{d\Sigma} = I_d + I_{zd}$; $I_{q\Sigma} = I_q + I_{zq}$. Втрати потужності у роторі

$$P_r = 1,5 (I_q K_r)^2 R_r . \quad (17)$$

Втрати потужності у залізі АГ визначаються як

$$P_{fe} = 1,5 (I_{zd}^2 + I_{zq}^2) R_m . \quad (18)$$

Рис. 2. Векторна діаграма АГ в координатах (d, q)

Магнітний опір можна обчислювати як [6]

$$R_m \approx (K_h / |\omega_0| + K_e)^{-1} , \quad (19)$$

де K_h — коефіцієнт втрат від гістерезису; K_e — коефіцієнт втрат від вихрових струмів; $|\omega_0|$ — кутова частота напруги статора АГ.

Додаткові втрати потужності в АГ, згідно з [4], приблизно можна вважати пропорційними квадрату струму ротора та квадрату частоти напруги статора. Отже, додаткові втрати визначаються як

$$P_a = 1,5K_a\omega_0^2K_r^2I_q^2, \quad (20)$$

де K_a — коефіцієнт додаткових втрат. Механічні втрати на валу генератора від в'язкого тертя можна приблизно обчислювати як

$$P_\omega = K_\omega\omega^2, \quad (21)$$

де K_ω — коефіцієнт механічних втрат. Варто зазначити, що механічні втрати (21) шляхом зміни магнітного стану АГ не оптимізуються. Тому, в задачі дослідження втрат на екстремум їх можна не враховувати, а достатньо розглядати сумарні електромагнітні втрати в АГ, що дорівнюють

$$P = P_s + P_r + P_{fe} + P_a. \quad (22)$$

Для усталених процесів з (9) та (13) матимемо

$$I_d = \psi_r/L_m; \quad I_q = 2M_e/(3z_pK_r\psi_r). \quad (23)$$

Розгортаючи (22), з урахуванням (15)—(18), (20) та (23), отримаємо модель втрат потужності в АГ у вигляді

$$P = \frac{3}{2} \left(\begin{aligned} & \left(R_s (1 + \omega_0^2 L_m^2 R_m^{-2}) + \omega_0^2 L_m^2 R_m^{-1} \right) \psi_r^2 L_m^{-2} + 2R_s K_r R_m^{-1} \omega_0 M_e / K_M + \\ & + \left(R_s (1 + \omega_0^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2 R_m^{-2}) + \omega_0^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2 R_m^{-1} + K_r^2 (R_r + K_a \omega_0^2) \right) M_e^2 \psi_r^{-2} K_M^{-2} \end{aligned} \right). \quad (24)$$

Для спрощення задачі аналітичного дослідження (24) на екстремум, у цьому виразі знехтуємо невеликими доданками, пропорційними $L_{r\sigma}^2$, та приймемо $\omega_0 \approx z_p \omega$. Запишемо рівняння

$$\frac{dP(\omega, M_e, \psi_r)}{d\psi_r} \Big|_{\omega, M_e} = 0. \quad (25)$$

Розв'язавши рівняння (25), отримаємо оптимальне потокозчеплення ротора генератора

$$\psi_{r,opt} \cong \sqrt{|M_e|} \sqrt{\frac{1}{K_M} \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + K_a z_p^2 \omega^2)}{R_s (L_m^{-2} + z_p^2 \omega^2 R_m^{-2}) + z_p^2 \omega^2 R_m^{-1}}}}. \quad (26)$$

Вираз (26) дозволяє визначати оптимальне потокозчеплення за критерієм мінімуму сумарних втрат в генераторі (24) у функції величин M_e та ω . Проте в системі векторного керування АГ сигналу M_e немає. Тому доцільно модифікувати (26) так, щоб замість M_e можна було застосувати моментну компоненту струму статора I_q , яка отримується на основі вимірюваних струмів фаз. Крім цього, підкореневу частину (26) можна дещо спростити. Проведено обчислення, які показали, що в діапазоні швидкостей $(0,2 \dots 2)\omega_n$, в охопленій дужками частині знаменника (26) перший доданок перевищує другий не менше ніж в 50 разів. Тому знехтуємо другим доданком і, враховуючи вираз для електромагнітного моменту (13), з (26) отримаємо компактнішу формулу

$$\psi_{r,opt} \cong |I_q| \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + K_a z_p^2 \omega^2)}{R_s L_m^{-2} + z_p^2 \omega^2 R_m^{-1}}}. \quad (27)$$

Отриманий вираз для визначення оптимального потокозчеплення (27) може застосовуватись у векторно-керованих АГ, де є контур регулювання ψ_r . Перевагою (27) у порівнянні з (26) є менші обчислювальні затрати, оскільки операція взяття квадратного кореня здійснюється один раз замість двох. Крім цього, вираз (27) точніший у порівнянні з описаним в [2] прототипом завдяки повнішому врахуванню втрат у генераторі внаслідок включення додаткових втрат.

Система векторного керування АГ з підвищеним коефіцієнтом корисної дії

За основу при побудові енергоефективної системи автоматичного керування (САК) АГ взято класичну систему векторного керування асинхронним двигуном [5], модифіковану шляхом введення контуру стабілізації напруги ланки постійного струму, оцінювача вектора потокозчеплення ротора та оптимізатора втрат потужності. На рис. 3 показана функціональна схема запропонованої САК АГ з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

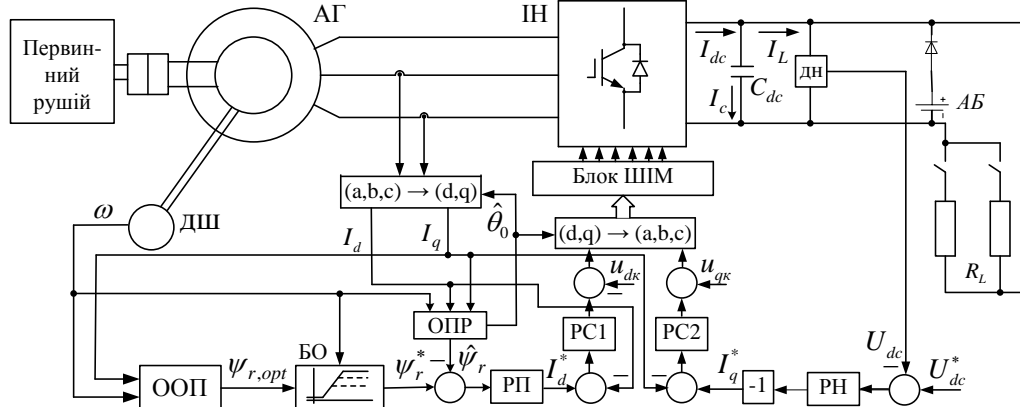


Рис. 3. Функціональна схема САК АГ з підвищеним коефіцієнтом корисної дії

Завданням системи є стабілізація напруги U_{dc} у ланці постійного струму на рівні U_{dc}^* за різних навантажень АГ в діапазоні швидкостей ротора як нижчих, так і вищих від номінальної з мінімізацією втрат потужності в усталених режимах роботи. У системі є силова частина, блоки перетворення координат, оцінювач потокозчеплення ротора ОПР, частина регулювання та частина оптимізації втрат. До силової частини відносяться АГ, ІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) та ланка постійного струму. У цій ланці розташовано накопичувальний конденсатор C_{dc} , акумуляторна батарея АБ та навантаження R_L . У блоках перетворення координат відбуваються перетворення сигналів між рухомими координатами (d,q) та трифазною системою напруг (a,b,c) .

ОПР визначає оцінки модуля $\hat{\psi}_r$ та кута повороту $\hat{\theta}_0$ вектора $\bar{\psi}_r$, де $\theta_0 = \arg(\bar{\psi}_r)$. Частина регулювання системи складають пропорційно-інтегральні регулятори напруги РН, потокозчеплення ротора РП, струмів РС1, РС2, а також давачі струмів фаз статора, давач швидкості ДШ і давач напруги ДН. Виходи регуляторів струмів підсумовуються з сигналами u_{dq} , що компенсують перехресні зв'язки в моделі АГ (компоненти (10) та (11), що в дужках).

Обчислювач оптимального потокозчеплення ООП та блок обмеження БО складають підсистему оптимізації втрат. ООП визначає оптимальне потокозчеплення $\psi_{r,opt}$, яке БО обмежується зверху на рівні $\psi_{r,lim} = \min\{\psi_{r,m}, \psi_{r,m}\omega_n/\omega\}$. Сигнал ψ_r^* є завданням для РП.

Результати числових досліджень

Для розрахунків використані дані АГ потужністю 1,3 кВт з номінальними напругою $U = 220$ В та струмом $I = 3,56$ А фази статора (діючі значення), кількістю обертів вала $N = 1452$ об/хв та значеннями параметрів $R_s = 6,46$ Ом, $R_r = 3,87$ Ом, $R_m = 1380$ Ом, $L_s = 0,389$ Гн, $L_r = 0,398$ Гн, $L_m = 0,374$ Гн. У дослідженні ставилося за мету порівняти ККД генератора в усталених процесах роботи для варіантів енергоефективного керування з оптимізацією втрат та стандартного керування без оптимізації втрат. У першому варіанті потокозчеплення дорівнювало оптимальному значенню з обмеженням $\psi_r = \psi_{ro}$, де $\psi_{ro} = \min\{\psi_{r,opt}, \psi_{r,m}, \psi_{r,m}\omega_n/\omega\}$. А в другому варіанті потокозчеплення дорівнювало $\psi_r = \psi_{rc}$, де $\psi_{rc} = \min\{\psi_{r,m}, \psi_{r,m}\omega_n/\omega\}$, електромагнітний ККД генератора визначався за формулою $\eta = P_2/(P_2 + P)$, а момент обчислювався як $M_e = -(P_2 + P)/\omega$.

Розраховано залежності ККД генератора від швидкості $\eta_c(\omega)$ та $\eta_o(\omega)$, відповідно для варіантів звичайного та енергоефективного керування за постійної потужності P_2 . Отримані результати для $P_2 = \{0,15; 0,25; 0,35; 0,45\}P_{2n}$ показані на рис. 4а, б і на рис. 5а, б, відповідно, де всі змінні пронормовані щодо своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

Аналізуючи рисунки 4, і 5 бачимо, що у зоні оптимізації втрат, яка визначається з умови $\psi_{ro}(\omega) < \psi_{rc}(\omega)$, існує приріст ККД $\Delta\eta(\omega) = \eta_o(\omega) - \eta_c(\omega) > 0$. Усі наведені графіки свідчать, що приріст ККД має екстремальний характер. На швидкостях, нижчих за ω_n , він зростає, набуває свого максимуму в околі номінальної швидкості ω_n , а в діапазоні $\omega > \omega_n$ зі збільшенням ω відбувається поступове зменшення $\Delta\eta$. Зі зростанням вихідної потужності генератора відбувається зменшення $\Delta\eta$. При цьому також звужується зона оптимізації втрат, оскільки зростає її нижня межа $\omega_{o,min}$, яка на графіках відповідає точці розгалуження кривих $\psi_{ro}(\omega)$ та $\psi_{rc}(\omega)$.

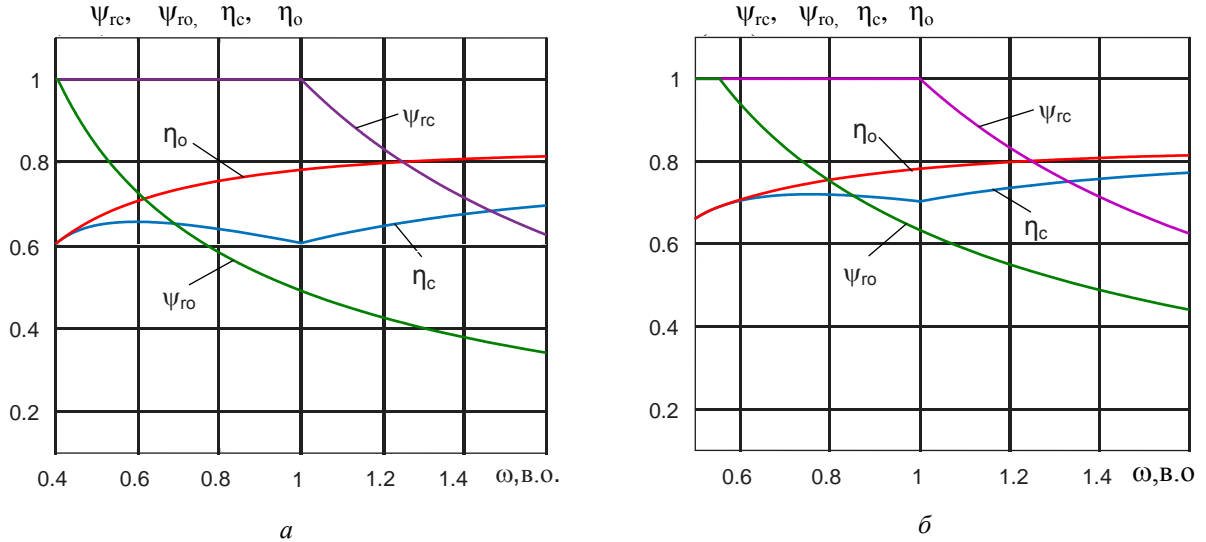


Рис. 4. Характеристики АГ у разі керування без оптимізації та з оптимізацією втрат за постійної потужності $P_2 = \text{const}$: а — $P_2 = 0,15P_{2n}$; б — $P_2 = 0,25P_{2n}$

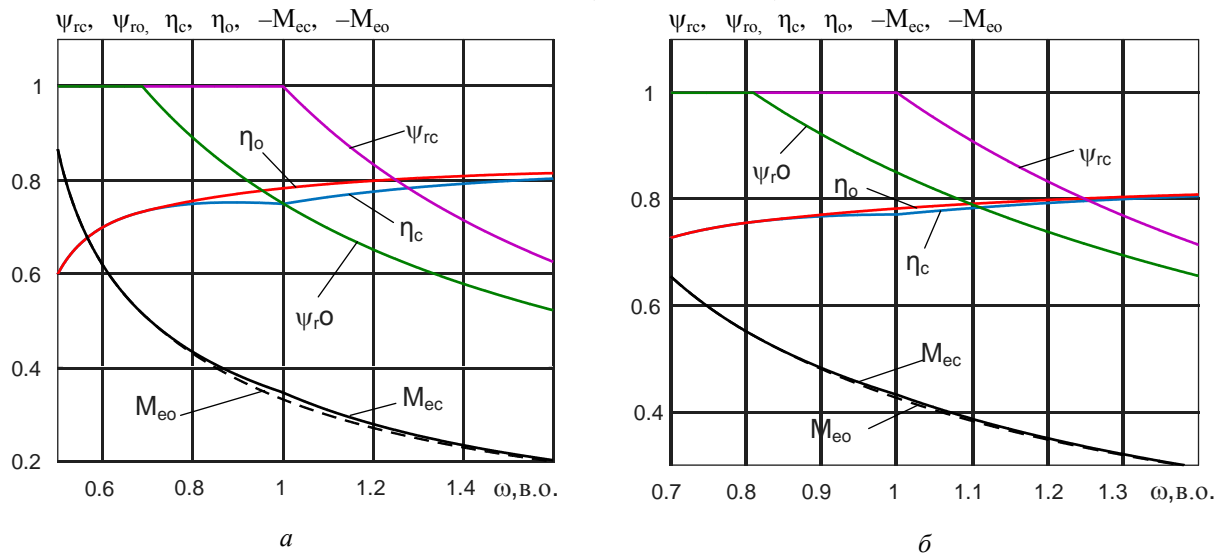


Рис. 5. Характеристики АГ у разі керування без оптимізації та з оптимізацією втрат за постійної потужності $P_2 = \text{const}$: а — $P_2 = 0,35P_{2n}$; б — $P_2 = 0,45P_{2n}$

Для кількісного оцінювання отриманого ефекту від оптимізації втрат в АГ взято до розгляду два показники. Перший з них — це максимальний приріст ККД $\Delta\eta_{\text{max}}$, що визначається як

$$\Delta\eta_{\text{max}} = \max \{ \eta_o(\omega) - \eta_c(\omega) \}, \quad \omega \in [\omega_{o,\text{min}}, \omega_{o,\text{max}}],$$

де $\omega_{o,\text{max}}$ — верхня межа зони оптимізації втрат, що дорівнює максимальній робочій швидкості генератора. Другий показник — це середній приріст ККД $\Delta\eta_{\text{av}}$, який обчислюється за формулою

Максимальні та середні значення приросту ККД генератора за керування з оптимізацією втрат

$P_2, \text{в.о.}$	0,15	0,25	0,35	0,45
$\Delta\eta_{\text{max}}, \%$	19	8	3,3	1,2
$\Delta\eta_{\text{av}}, \%$	11,3	4,71	1,82	0,54
$\omega_{o,\text{min}}, \text{в.о.}$	0,4	0,55	0,7	0,8

$$\Delta\eta_{av} = \frac{1}{\omega_{o,max} - \omega_{o,min}} \int_{\omega_{o,min}}^{\omega_{o,max}} (\eta_o(\omega) - \eta_c(\omega)) d\omega.$$

Для показаних на рисунках 4 і 5 графічних залежностей обчислені максимальний та середній прирости ККД, які подані в таблиці. При цьому верхня межа зони оптимізації втрат прийнята $\omega_{o,max} = 1,6$ в.о.

Враховуючи табличні дані, можна зробити висновок, що у разі роботи АГ з потужністю, меншою, ніж половина номінальної, завдяки запропонованому керуванню з оптимізацією втрат можливе істотне збільшення ККД генератора. У виконаному дослідженні максимальний приріст ККД складає 19 %, а його середній приріст дещо перевищує 11 %. Наведені на рис. 5а, б криві $M_{ec}(\omega)$ та $M_{eo}(\omega)$ свідчать, що у зоні оптимізації втрат $-M_{eo} < -M_{ec}$, а максимальне значення модуля моменту генератора у цій зоні складає $(0,5 \dots 0,55)M_{en}$.

Висновки

Розглянуто задачу побудови системи векторного керування АГ з підвищеним ККД. Отримано вираз для обчислення оптимального потокозчеплення ротора за критерієм мінімуму сумарних втрат потужності в генераторі, який є точнішим за відомі аналоги та нескладним для комп'ютерної реалізації в реальному часі.

Проведено числові дослідження усталених процесів під час роботи генератора з постійною вихідною потужністю $P_2 = \text{const}$ в інтервалі її змін від 15 % до 45 %. Встановлено, що приріст ККД в разі керування з оптимізацією втрат має максимум в околі номінальної швидкості. При цьому зона оптимізації втрат та приріст ККД зменшуються, якщо P_2 зростає.

Отримані у дослідженні максимальний та середній прирости ККД сягають 19 % і 11 %, відповідно. Це показує перспективність запропонованої системи економічного векторного керування АГ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Mesemanolis, C. Mademlis, and I. Kioskeridis, "High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 2, no. 4, pp. 958-967, 2012.
- [2] R. Leidhold, G. Garcia, and M. I. Valla, "Field-oriented controlled induction generator with loss minimization," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp.147-156, 2002.
- [3] M. C. Di Piazza, M. Luna, and M. Pucci, "Electrical loss minimization technique for wind generators based on a comprehensive dynamic modeling of induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3696-3706, 2017.
- [4] A. Mesemanolis, C. Mademlis, and I. Kioskeridis, "Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 4, pp. 238-246, 2013.
- [5] D. W. Novotny, and T. A. Lipo, *Vector control and dynamics of AC drives*, Oxford: Clarendon press, 2005.
- [6] Б. І. Приймак, «Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження,» *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 29-38, 2005.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.01.2021

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

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

В. І. Pryimak¹

Vector Control of Induction Generator with Increased Efficiency

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Compared to today's dominant in autonomous wind power, a synchronous generator with permanent magnets, an induction generator (IG) with a short-circuited rotor has such significant advantages as higher reliability and lower cost. But the energy performance in IG is lower, so their improvement is an actual task. To solve this problem, along with search algorithms, systems of no-search optimization of power losses in IG are intensively developed. In these systems, the optimal magnetic flux is determined by the analytical expression obtained from the loss model. The disadvantages of the known works on this topic are that they use various simplified models of losses. Accordingly, this reduces the accuracy of optimization algorithms.

The aim of the work is to build the vector control system of IG, in which, due to the optimization of the sum of major power losses, a significant increment in the efficiency of the generator is achieved. The article uses a model of power losses, which includes all the main losses in the IG of electromagnetic nature. These include ohmic losses in the stator and rotor resistances, magnetic losses in the iron and additional losses. By analytical study of the model of losses to the extremum, an expression for determining the optimal flux linking of the rotor by the criterion of minimum total losses in the generator is obtained. The application of this expression allows to increase the accuracy of loss optimization in comparison with known analogues. The procedure for determining the optimal flux uses the signals of the instantaneous component of the stator current and rotor speed and is simple for computer implementation in real time. Numerical studies of steady-state processes in the mode of operation of the generator with a constant output power $P_2 = \text{const}$ for its values from 15 % to 45 % have been conducted. It is established that the efficiency increment obtained due to control with loss optimization has an extreme character with a maximum in the vicinity of the nominal speed. As P_2 increases, the loss optimization zone and efficiency increment decrease. The maximum and average efficiency increment obtained in the study reach 19 % and 11 %, respectively. This shows the prospects of the proposed system of energy-efficient vector control of IG.

Keywords: induction generator, vector control system, efficiency.

Prymak Bohdan I. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and the Electric Drive, e-mail: bp-08@ukr.net

Б. И. Приймак¹

Векторное управление асинхронным генератором с повышенным коэффициентом полезного действия

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

Сравнительно с доминирующим на сегодня в автономных ветряных электростанциях синхронным генератором с постоянными магнитами, асинхронный генератор (АГ) с короткозамкнутым ротором имеет такие существенные преимущества как высшая надежность и низшая стоимость. Но энергетические показатели АГ хуже, поэтому их улучшение является актуальной задачей. Для решения этой задачи вместе с поисковыми алгоритмами интенсивно развиваются системы безпоисковой оптимизации потерь мощности в АГ. В этих системах оптимальный магнитный поток определяется по аналитическому выражению, полученному из модели потерь. Недостатками известных работ по этой тематике является то, в них используются разными способами упрощенные модели потерь. Соответственно это снижает точность алгоритмов оптимизации.

Целью работы является построение системы векторного управления АГ, в которой, благодаря оптимизации суммы основных потерь мощности достигается существенное приращение коэффициента полезного действия (КПД) генератора.

В статье применена модель потерь мощности, которая включает все основные потери в АГ электромагнитного происхождения. Сюда относятся омические потери в сопротивлениях статора и ротора, магнитные потери в стали и дополнительные потери. Путем аналитического исследования модели потерь на экстремум получено выражение для определения оптимального потокосцепления ротора по критерию минимума суммарных потерь в генераторе. Применение этого выражения позволяет повысить точность оптимизации потерь сравнительно с известными аналогами. Процедура определения оптимального потока использует сигналы моментной компоненты тока статора и скорости ротора, являясь несложной для компьютерной реализации в реальном времени. Проведены численные исследования установившихся процессов в режиме работы генератора с постоянной выходной мощностью $P_2 = \text{const}$ с ее значениями от 15 % до 45 %. Показано, что приращение КПД, полученное благодаря управлению с оптимизацией потерь, имеет экстремальный характер с максимумом в окрестности номинальной скорости. При увеличении P_2 зона оптимизации потерь и приращение КПД уменьшаются. Полученные в исследовании максимальное и среднее приращения КПД достигают 19 % и 11 %, соответственно. Это показывает перспективность предложенной системы энергоэффективного векторного управления АГ.

Ключевые слова: асинхронный генератор, система векторного управления, коэффициент полезного действия.

Приймак Богдан Иванович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: bp-08@ukr.net