УДК 62-83:621.313 10.31548/energiya2021.01.026

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ ПОСЕЛЕНЬ

Б. І. Приймак, кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: bp-08@ukr.net

Анотація. *Прокладання ліній електропередачі до невеликих поселень та фермерських господарств, що віддалені від міст і сіл, не завжди економічно вигідне. Тому в таких поселеннях все частіше використовують автономні сонячні та вітряні джерела енергії. На відміну від домінуючих на сьогодні у вітряних електростанціях синхронних генераторів з постійними магнітами, асинхронні генератори (АГ) з короткозамкненим ротором мають такі істотні переваги, як вища надійність та менша вартість. Але енергетичні показники АГ нижчі, тому їх поліпшення є актуальною задачею. Для розв'язання цієї задачі інтенсивно розвиваються системи безпошукової оптимізації втрат потужності в АГ. У цих системах оптимальний магнітний потік визначається за аналітичним виразом, отриманим із моделі втрат. Недоліками відомих робіт за даною тематикою є те, що в них використовуються різним чином 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 коефіцієнту корисної дії (ККД) генератора.

У статті застосована модель втрат потужності, що включає усі основні втрати в АГ електромагнітної природи. Сюди відносяться омічні втрати в опорах статора та ротора, магнітні втрати в сталі та додаткові втрати. Шляхом аналітичного дослідження моделі втрат на екстремум отримано вираз для обчислення оптимального потокозчеплення ротора за критерієм мінімуму сумарних втрат в генераторі. Застосування цього виразу дозволяє підвищити точність оптимізації втрат порівняно з відомими аналогами. Проведено числові дослідження усталених процесів у режимі роботи генератора з постійною вихідною потужністю P_2=const за її значень від 10 % до 50 %. Встановлено, що приріст ККД, отриманий завдяки керуванню з оптимізацією втрат, має екстремальний характер з максимумом в околі номінальної швидкості. Отримані в дослідженні максимальний та середній прирости ККД сягають 26 % і 18 % відповідно. Це показує перспективність запропонованої системи енергоефективного векторного керування АГ.

Ключові слова*: асинхронний генератор, система автоматичного керування, енергоефективність, оптимізація втрат*

Актуальність. Перспективним шляхом вирішення проблеми енергозабезпечення невеликих віддалених поселень є використання енергії вітру [1-2]. Поряд із синхронними генераторами з постійними магнітами у вітряних електростанціях останнім часом застосовуються надійніші та дешевші асинхронні генератори (АГ) із короткозамкненим ротором. Векторно-керовані АГ з інвертором напруги можуть збуджуватися від акумуляторної батареї і забезпечувати стабільну напругу живлення автономної мережі постійного струму при змінах швидкості та навантаження. Проте енергетичні показники АГ дещо нижчі, ніж у синхронних генераторах, і потребують поліпшення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині відомо чимало робіт у сфері енергоефективного керування АГ [3-7]. Основною ідеєю цих статей є аналітичне отримання виразу для визначення оптимального потоку на основі моделі втрат потужності в генераторі. При цьому використовуються різною мірою спрощені моделі втрат. Зокрема, в [3] враховуються лише омічні втрати, в [4,5] не беруться до уваги додаткові втрати, а в [6,7] опис магнітних втрат не включає гістерезисну компоненту, яка пропорційна частоті живлення статора. Наслідком спрощення моделей втрат є зниження точності оптимізації.

Мета дослідження – побудова енергоефективної системи векторного керування АГ, у якій шляхом оптимізації суми основних втрат потужності, досягається істотний приріст коефіцієнту корисної дії (ККД) генератора.

Матеріали і методи дослідження. Математичний опис асинхронного генератора з векторним керуванням ґрунтується на математичному описі ідеалізованої асинхронної машини [8]. У рухомих координатах (d,q), що обертаються зі швидкістю ω_0, електромагнітні процеси в АГ із короткозамкненим ротором описуються системою диференційних рівнянь (1)

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

та рівняннями (2)-(6)

$$\psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \tag{2}$$

$$\psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad \psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \tag{3}$$

$$\psi_{md} = L_m I_{md}; \quad \psi_{mq} = L_m I_{mq}; \tag{4}$$

$$M_e = (3z_p/2) K_r (\psi_{rd} I_{sq} - \psi_{rq} I_{sd}); \tag{5}$$

$$P_2 = -(3/2)(U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}), \tag{6}$$

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

$$\psi_{rq} = 0; \quad d\psi_{rq}/dt = 0; \quad \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|, \tag{7}$$

то із (1) та (2)-(6) отримаємо модель АГ у вигляді системи рівнянь (8)-(11)

$$d\psi_r/dt = -\psi_r/T_r + I_d L_m/T_r; \tag{8}$$

$$dI_d/dt = -I_d R_s'/L' + U_d/L_s' + (\omega_0 L_s' I_q + K_r \psi_r/T_r)/L_s'; \tag{9}$$

$$dI_q/dt = -I_q R_s'/L_s' + U_q/L_s' - (\omega_0 L_s' I_d + K_r \psi_r z_p \omega)/L_s'; \tag{10}$$

$$P_2 = -(3/2)(U_d I_d + U_q I_q), \tag{11}$$

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

$$\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \psi_r ; \qquad M_e = K_M I_q \psi_r , \tag{12}$$

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

$$dU_{dc} / dt = I_c / C_{dc} , \tag{13}$$

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.

Отримуючи модель втрат потужності в АГ, магнітне коло генератора розглядатимемо як лінеаризоване, прийнявши $L_m = const = L_{mn}$, 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 даною тематикою [3-7] щоб уможливити аналітичне розв'язання задачі мінімізації втрат. Як відомо, основні втрати потужності в АГ включають омічні втрати в активних опорах статора та ротора, магнітні втрати в сталі, додаткові та механічні втрати. Омічні втрати та втрати в сталі враховані в представленій 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.

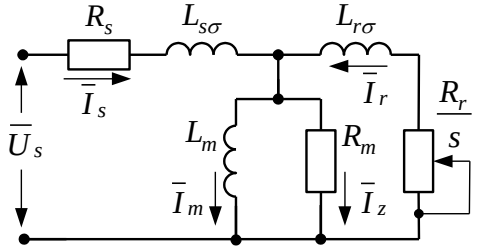

Рис. 1. Т-подібна схема заміщення фази АГ

Отримаємо вирази для втрат потужності на основі Т-подібної схеми заміщення. 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 $j = \sqrt{-1}$. За [9], із врахуванням 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

$$I_{zd} = -\omega_0 K_r L_{r\sigma} I_q R_m^{-1}; \quad I_{zq} = \omega_0 \psi_r R_m^{-1}. \tag{14}$$

Отже вираз для втрат потужності в обмотці статора запишеться як

$$P_s = 1{,}5 R_s (I_{d\Sigma}^2 + I_{q\Sigma}^2), \tag{15}$$

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

$$P_r = 1{,}5 (I_q K_r)^2 R_r. \tag{16}$$

Втрати потужності в сталі АГ визначаються як

$$P_{fe} = 1{,}5 (I_{zd}^2 + I_{zq}^2) R_m. \tag{17}$$

Магнітний опір можна обчислювати як [9]

$$R_m \approx (K_h / |\omega_0| + K_e)^{-1}, \tag{18}$$

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 за [6] приблизно можна вважати пропорційними квадрату струму ротора та квадрату частоти напруги статора. Отже додаткові втрати визначаються як

$$P_a = 1{,}5 K_a \omega_0^2 K_r^2 I_q^2, \tag{19}$$

де K_a – коефіцієнт додаткових втрат. Сумарні електромагнітні втрати потужності в АГ дорівнюють

$$P = P_s + P_r + P_{fe} + P_a. \tag{20}$$

Для усталених процесів із (8) та (12) матимемо

$$I_d = \psi_r / L_m; \quad I_q = 2M_e / (3 z_p K_r \psi_r); \quad . \tag{21}$$

Розгортаючи (20) із врахуванням (14)-(17), (19) та (21) отримаємо модель втрат потужності в АГ у вигляді

$$P=\frac{3}{2}\left(\begin{array}{l}\left(R_s\left(1+\omega_0^2L_m^2R_m^{-2}\right)+\omega_0^2L_m^2R_m^{-1}\right)\psi_r^2L_m^{-2}+2R_sK_rR_m^{-1}\omega_0M_e/K_M+\\ \quad+\left(R_s\left(1+\omega_0^2K_r^2L_{r\sigma}^2R_m^{-2}\right)+\omega_0^2K_r^2L_{r\sigma}^2R_m^{-1}+K_r^2\left(R_r+K_a\omega_0^2\right)\right)M_e^2\psi_r^{-2}K_M^{-2}\end{array}\right). \quad (22)$$

З метою спрощення задачі аналітичного дослідження (22) на екстремум, у цьому виразі знехтуємо невеликими доданками, що пропорційні $L_{r\sigma}^2$, та приймемо $\omega_0\approx z_p\omega$. Запишемо рівняння

$$\left.\frac{dP(\omega,M_e,\psi_r)}{d\psi_r}\right|_{\omega,M_e}=0. \quad (23)$$

Розв'язавши рівняння (23), отримаємо оптимальне потокозчеплення ротора генератора

$$\psi_{r,opt}\cong\sqrt{|M_e|}\sqrt{\frac{1}{K_M}\sqrt{\frac{R_s+K_r^2(R_r+K_az_p^2\omega^2)}{R_s(L_m^{-2}+z_p^2\omega^2R_m^{-2})+z_p^2\omega^2R_m^{-1}}}}, \quad (24)$$

Вираз (24) дозволяє визначати оптимальне потокозчеплення за критерієм мінімуму сумарних втрат в генераторі у функції величин M_e та ω. Проте в системі векторного керування АГ сигналу M_e немає. Тому доцільно модифікувати (24) так, щоб замість M_e можна було застосувати моментну компоненту струму статора I_q, яка отримується на основі вимірюваних струмів фаз. Крім цього, підкореневий вираз в (24) можна дещо спростити. Були проведені обчислення, які показали, що в діапазоні швидкостей (0,2…2)ω_n, в охопленій дужками частині знаменника (24) перший доданок перевищує другий не менше ніж в 50 разів. Тому знехтуємо другим доданком і, враховуючи вираз для електромагнітного момента (12), із (24) дістанемо компактнішу формулу

$$\psi_{r,opt}\cong\left|I_q\right|\sqrt{\left[R_s+K_r^2(R_r+K_az_p^2\omega^2)\right]\Big/\left[R_sL_m^{-2}+z_p^2\omega^2R_m^{-1}\right]} \quad (25)$$

Отриманий вираз для визначення оптимального потокозчеплення може застосовуватись у векторно-керованих АГ, де є контур регулювання ψ_r. Перевагою (25) у порівнянні з (24) є менші обчислювальні затрати, оскільки операція взяття

квадратного кореня здійснюється один раз замість двох. Крім цього, вираз (25) точніший порівняно з описаним в [4] прототипом завдяки врахуванню у генераторі крім інших, ще й додаткових втрат потужності.

Побудуємо функціональну схему енергоефективної САК. За основу візьмемо класичну систему векторного керування асинхронним двигуном [8], модифіковану шляхом введення контура стабілізації напруги ланки постійного струму, оцінювача вектора потокозчеплення ротора та оптимізатора втрат потужності. На рис. 2 наведена функціональна схема запропонованої САК АГ з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

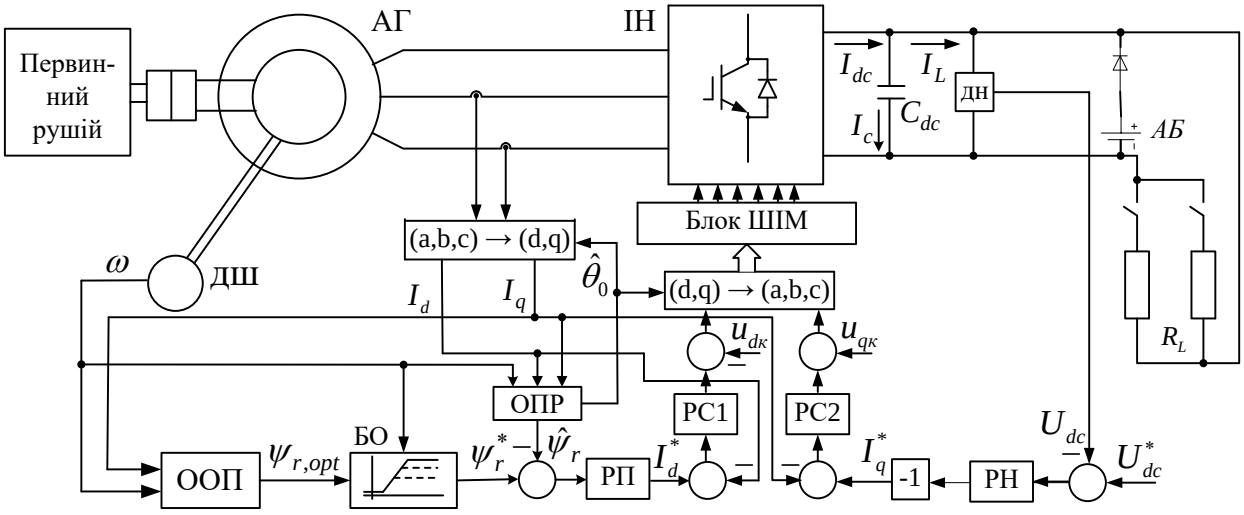

Рис. 2. Функціональна схема енергоефективної САК АГ

Завданням системи є стабілізація напруги U_{dc} в ланці постійного струму на рівні U_{dc}^* за різних навантажень АГ в діапазоні швидкостей ротора як нижчих, так і вищих від номінальної із 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. Силовою частиною є 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 $\theta_0 = \arg(\bar{\psi}_r)$. Частину регулювання системи складають пропорціонально-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 із сигналами $u_{dк}$, $u_{qк}$, що компенсують перехресні зв'язки в моделі АГ (складові (9) і (10), що в дужках).

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

Результати досліджень та їх обговорення. Для чисельних досліджень були 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 1-му варіанті потокозчеплення дорівнювало оптимальному значенню з обмеженням: $\psi_r=\psi_{ro}$, де $\psi_{ro}=\min\{\psi_{r,opt}, \psi_{rn}, \psi_{rn}\omega_n/\omega\}$. А в 2-му варіанті потокозчеплення дорівнювало: $\psi_r=\psi_{rc}$, де $\psi_{rc}=\min\{\psi_{rn}, \psi_{rn}\omega_n/\omega\}$. Електромагнітний ККД генератора визначався за формулою $\eta=P_2/(P_2+P)$, а момент обчислювався як $M_e = -(P_2+P)/\omega$.

Були зроблені розрахунки ККД генератора $\eta_c(\omega)$ та $\eta_o(\omega)$ для варіантів звичайного та енергоефективного керування відповідно в режимі роботи з постійною потужністю для її значень $P_2=(0.1–0.5)P_{2n}$. Отримані при $P_2=0.1P_{2n}$ та $P_2=0.3P_{2n}$ графіки наведені на рис. 3, *а, б* відповідно, де всі змінні вимірюються у відносних одиницях (в.о.), а за базові прийняті номінальні значення величин.

Аналізуючи рис. 3, бачимо, що у зоні оптимізації втрат, яка визначається з умови $\psi_{ro}(\omega) < \psi_{rc}(\omega)$, існує приріст ККД $\Delta\eta(\omega)=\eta_o(\omega)-\eta_c(\omega)>0$ і він має екстремальний характер. На швидкостях, нижчих за ω_n, $\Delta\eta$ зростає, набуває свого

максимуму в околі номінальної швидкості ω_n, а в діапазоні $\omega > \omega_n$ зі збільшенням ω відбувається поступове зменшення $\Delta\eta$. За зростання вихідної потужності генератора відбувається зменшення $\Delta\eta$. При цьому також звужується зона оптимізації втрат, оскільки її нижня межа – $\omega_{o,min}$, яка на графіках відповідає точці розгалуження кривих $\psi_{ro}(\omega)$ та $\psi_{rc}(\omega)$, зростає.

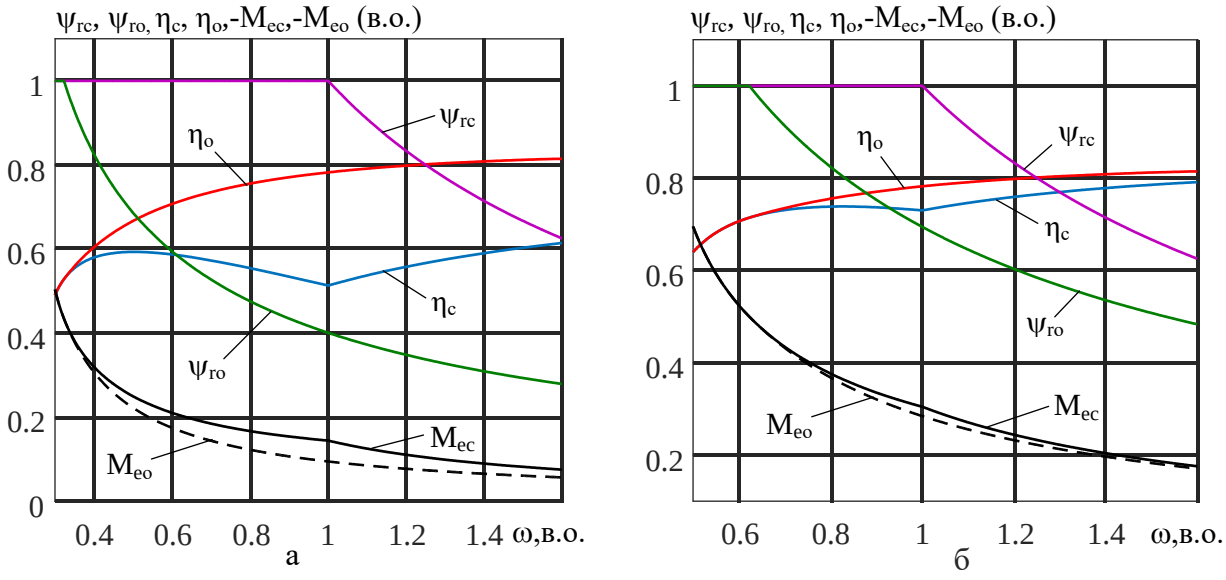

Рис. 3. Характеристики АГ при керуванні без оптимізації та з оптимізацією втрат за постійної потужності P_2=const:

а – $P_2=0.1P_{2n}$; *б* – $P_2=0.3P_{2n}$

Наведені на рис. 3 криві $M_{ec}(\omega)$ та $M_{eo}(\omega)$ засвідчують, що модуль електромагнітного моменту генератора у зоні оптимізації сягає $(0.4–0.45)M_{en}$.

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

$$\Delta\eta_{max} = \max\{\eta_o(\omega) - \eta_c(\omega)\}, \quad \omega \in \left[\omega_{o,min}, \omega_{o,max}\right], \tag{26}$$

де $\omega_{o,max}$ – верхня межа зони оптимізації втрат, що дорівнює максимальній робочій швидкості генератора. Другим показником був середній приріст ККД $\Delta\eta_{av}$, який обчислюється за формулою

$$\Delta\eta_{av} = (\omega_{o,max} - \omega_{o,min})^{-1} \int_{\omega_{o,min}}^{\omega_{o,max}} (\eta_o(\omega) - \eta_c(\omega)) d\omega. \tag{27}$$

Для діапазону значень P_2=(0.1–0.5) в.о. були обчислені максимальний та середній прирости ККД, які занесені в таблиці. Верхня межа зони оптимізації втрат була прийнята $\omega_{o,max}$=1.6 в.о.

1. Максимальні та середні прирости ККД генератора за оптимізації втрат

P_2, в.о.	0.1	0.15	0.25	0.3	0.35	0.45	0.5
$\Delta\eta_{max}$,%	26.1	19	8	5.23	3.3	1.2	0.51
$\Delta\eta_{av}$,%	18.2	11.3	4.71	3.0	1.82	0.54	0.2
$\omega_{o,min}$, в.о.	0.32	0.4	0.55	0.63	0.7	0.8	0.88

Виходячи із табличних даних, можна зробити висновок, що за потужності, меншої ніж половина номінальної, завдяки запропонованому керуванню можливе істотне збільшення ККД генератора. У виконаному дослідженні максимальний приріст ККД складає 26 %, а середній приріст дорівнює 18 %.

Висновки і перспективи. Розглянуто задачу побудови системи векторного керування АГ з підвищеним ККД. Одержано вираз для визначення оптимального потокозчеплення 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 за роботи генератора з постійною вихідною потужністю P_2=const в інтервалі її змін від 10 % до 50 %. Встановлено, що приріст ККД в разі керування з оптимізацією втрат має максимум в околі номінальної швидкості.

У дослідженні отримані максимальний та середній прирости ККД біля 26% і 18 % відповідно. Це показує перспективність запропонованої системи економічного векторного керування АГ.

Список використаних джерел

1. Peacock A., Jenkins D., Ahadzi M., Berry A., Turan S. Micro wind turbines in the UK domestic sector. Energy and Buildings. 2008. Vol. 40, No.7. P.1324–1333.

2. Мазуренко Л. І., Романенко В. І., Джура О. В. Технічна реалізація й експериментальні дослідження асинхронного генератора з вентильним збудженням та векторним керуванням. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2015. № 4. С. 34–40.

3. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2012. Vol. 27. No. 4. P. 958–967.

4. Leidhold R., Garcia G., Valla M.I. Field-oriented controlled induction generator with loss minimization. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 1. P.147–156.

5. Di Piazza M.C., Luna M., Pucci M. Electrical loss minimization technique for wind generators based on a comprehensive dynamic modeling of induction machines. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 53. No. 4. P. 3696–3706.

6. Mesemanolis A., Mademlis C., Kioskeridis I. Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2013. Vol. 1. No. 4. P. 238–246.

7. Stumper J.F., Dötlinger A., Kennel R. Loss minimization of induction machines in dynamic operation. IEEE transactions on energy conversion. 2013. Vol. 28. No. 3. P. 726–735.

8. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon press, 2005, 440 p.

9. Приймак Б.І. Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження. Технічна електродинаміка. 2005. № 1. С. 29–38.

References

1. Peacock, A. D., Jenkins, D., Ahadzi, M., Berry, A., Turan, S. (2008). Micro wind turbines in the UK domestic sector. Energy and Buildings, 40(7), 1324–1333.

2. Mazurenko L., Romanenko V., Dzura O. (2015). Tekhnichna realizatsiia y eksperymentalni doslidzhennia asynkhronnoho heneratora z ventylnym zbudzhenniam ta vektornym keruvanniam [Implementation and experimental study of the induction generator with vector control], Elektromechanical and energy systems, 4, 34–40.

3. Mesemanolis, A., Mademlis, C., Kioskeridis, I. (2012). High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2(4), 958–967.

4. Leidhold, R., Garcia G., Valla, M.I. (2002). Field-oriented controlled induction generator with loss minimization. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 49(1), 147–156.

5. Di Piazza M.C., Luna M., Pucci, M. (2017). Electrical loss minimization technique for wind generators based on a comprehensive dynamic modeling of induction machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(4), 3696–3706.

6. Mesemanolis, A., Mademlis, C., Kioskeridis, I. (2013). Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 1(4), 238–246.

7. Stumper, J. F., Dötlinger, A., Kennel, R. (2013). Loss minimization of induction machines in dynamic operation. IEEE transactions on energy conversion, 28(3), 726–735.

8. Novotny, D.W., Lipo, T.A. (2005) Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon press, 440.

9. Pryymak, B.I. (2005) Modeli vtrat potuzhnosti u kerovanii asynkhronnii mashyni dlia zadach enerhozberezhennia [Power loss models in controlled induction machine for the energy saving tasks], Tekhnichna Elektrodynamika, 1, 29–38.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ

Б. И. Приймак

Аннотация. *Прокладка линий электропередачи в небольшие поселения и фермерские хозяйства, удаленные от городов и сел, не всегда экономически выгодна. Поэтому в таких поселениях все чаще используют автономные солнечные и ветряные источники энергии. В отличие от доминирующих на сегодня в автономных ветряных электростанциях синхронных генераторов с постоянными магнитами, асинхронные генераторы (АГ) с короткозамкнутым ротором имеют такие существенные преимущества как лучшая надежность и низшая стоимость. Но энергетические показатели АГ хуже, поэтому их улучшение является актуальной задачей. Для решения этой задачи 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 данной 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 вычисления оптимального потокосцепления ротора по критерию минимума суммарных потерь в генераторе. Применение этого выражения позволяет повысить точность оптимизации потерь по сравнению с известными аналогами. Проведены численные исследования установившихся процессов в режиме работы генератора с постоянной выходной мощностью P_2=const при ее значениях от 10% до 50 %. Показано, что приращение КПД, полученное благодаря управлению с оптимизацией потерь, имеет экстремальный характер с максимумом в окрестности номинальной скорости. Полученные в исследовании максимальное и среднее приращения КПД достигают 26% и 18 % соответственно. Это показывает перспективность предложенной системы энергоэффективного векторного управления АГ.

Ключевые слова: ***асинхронный генератор, система автоматического управления, энергоэффективность, оптимизация потерь***

ENERGY EFFICIENT CONTROL SYSTEM OF STAND-ALONE INDUCTION GENERATOR FOR REMOTE SETTLEMENTS

B. Pryymak

Abstract. *Laying power lines to small settlements and farms away from towns and villages is not always cost-effective. Therefore, autonomous solar and wind energy sources are increasingly used in such settlements. In contrast to the dominant today in wind power plants synchronous generators with permanent magnets, an induction*

generator (IG) with a short-circuited rotor have such important 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, 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, a expression is obtained to calculate the optimal flux linkage of the rotor by the criterion of minimum total losses in the generator. The application of this expression allows to increase the accuracy of loss optimization in comparison with known analogues. Numerical studies of steady-state processes in the mode of operation of the generator with a constant output power P_2=const for its values from 10% to 50% 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. The maximum and average efficiency increment obtained in the study reach 26% and 18%, respectively. This shows the prospects of the proposed system of energy-efficient vector control of IG.

Key words: ***induction generator, automatic control system, energy efficiency, loss optimization***