МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОЇ НЕРЕГУЛЬОВАНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ВЕНТИЛЬНИМ ГЕНЕРАТОРОМ**Л. І. Мазуренко, О. В. Джура**

Інститут електродинаміки НАН України

просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна. E-mail: mlins@ied.org.ua

Розроблено динамічну математичну модель електромеханічної частини автономної вітроустановки змінної частоти обертання з асинхронним вентильним генератором з короткозамкненим ротором з комутованим баластним навантаженням. В моделі враховано насичення генератора по першій гармоніці поля. Запропоновано алгоритм векторного керування асинхронним вентильним генератором вітроустановки. На систему керування асинхронним вентильним генератором покладено функції активного регулювання частоти обертання вітротурбіни, перевантажувальної здатності електричної машини та струму баластного комутованого навантаження. Запропоновано два варіанти побудови регулятора частоти обертання нерегульованої приводної турбіни: варіант, що не потребує інформації щодо поточної швидкості вітру, та варіант, що використовує залежність оптимальної за критерієм максимуму аеродинамічного ККД частоти обертання від швидкості вітру. Структурну схему регуляторів асинхронним вентильним генератором отримано з застосуванням процедури зворотного синтезу. Результати імітаційного моделювання підтверджують, що запропонований алгоритм керування асинхронним вентильним генератором забезпечує відпрацювання заданого потоку електричної машини, оптимальної частоти обертання приводної турбіни та напруги в колі навантаження постійного струму.

Ключові слова: асинхронний вентильний генератор, вітротурбіна, математична модель, векторне керування, баластне навантаження.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕТРОУСТАНОВКОЙ С АСИНХРОННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ**Л. И. Мазуренко, А. В. Джура**

Институт электродинамики НАН Украины

просп. Победы, 56, г. Киев, 03057, Украина. E-mail: mlins@ied.org.ua

Разработана динамическая математическая модель электромеханической части автономной ветроустановки переменной частоты вращения с асинхронным вентильным генератором с короткозамкнутым ротором с коммутируемой балластной нагрузкой. В модели учтено насыщение генератора на первой гармонике поля. Предложен алгоритм векторного управления асинхронным вентильным генератором ветроустановки. На системе управления асинхронным вентильным генератором лежат функции активного регулирования частоты вращения ветротурбины, перегрузочной способности электрической машины и тока балластной коммутируемой нагрузки. Предложено два варианта построения регулятора частоты вращения нерегулируемой приводной турбины: вариант, который не требует информации о текущей скорости ветра, и вариант, который использует зависимость оптимальной по критерию максимума аэродинамического КПД частоты вращения от скорости ветра. Структурная схема регуляторов асинхронным вентильным генератором получена с использованием процедуры обратного синтеза. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный алгоритм управления асинхронным вентильным генератором обеспечивает отработку заданного потока электрической машины, оптимальной частоты вращения приводной турбины и напряжения в цепи нагрузки постоянного тока.

Ключевые слова: асинхронный вентильный генератор, ветротурбина, математическая модель, векторное управление, балластная нагрузка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Асинхронні машини (АМ) з короткозамкненим ротором експлуатуються як двигуни в складі електроприводів побутового і промислового призначення зі статичним моментом навантаження [1].

В якості генератора АМ з к.з. ротором до нещодавна використовувались в мікро-ГЕС, вітроустановках “постійної частоти обертання”, що під’єднані до мережі [2] та автономних електроагрегатах [3]. Для компенсації реактивної потужності асинхронного генератора (АГ) з к.з. ротором за прямого підключення до мережі та для його збудження в автономних електроагрегатах використовують конденсатори. Покращення технічних характеристик елементів силової електроніки та мікропроцесорної техніки посприяло створенню напівпровідникових систем збудження

АГ. Асинхронний генератор з к.з. ротором і напівпровідниковою системою збудження в колах статора називають асинхронним вентильним генератором (АВГ). Такий тип генераторів може використовуватись на транспорті в якості стартер-генератора автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, як електропривод електромобілів з можливістю короткочасних інтервалів роботи в генераторному режимі під час підгальмовування, в автономних корабельних енергосистемах постійного струму, тощо. В енергетиці АВГ останнім часом почав набувати впровадження в вітроустановках (ВУ) змінної частоти обертання мегаватного класу [4], де зазвичай впроваджуються синхронні безредукторні генератори з постійними магнітами [5] та машини подвійного живлення [6]. Вітроустановки з АВГ також можуть інтегрува-

тись в різноманітні автономні системи живлення.

Для роботи ВУ з АВГ в автономному режимі за нерегульованої вітротурбіни (ВТ) і відсутності накопичувачів енергії крім основного навантаження необхідне регульоване баластне, яке забезпечує баланс активної потужності між АВГ і споживачами за умови енергоефективної роботи ВУ.

Вирішення задачі створення таких автономних ВУ з АВГ та систем на їх основі потребує розробки ефективних алгоритмів керування та комплексних математичних динамічних моделей, що дають змогу оцінити ефективність запропонованих рішень.

Основною метою роботи є розробка математичної моделі автономної ВУ з нерегульованою ВТ змінної частоти обертання і АВГ, що живить основне і комутоване навантаження, та алгоритмів керування за умови енергоефективної експлуатації ВУ.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Математична модель системи

Основними елементами автономної системи живлення, зображеної на рис. 1, є нерегульована ВТ, редуктор (Р), АВГ і баластне навантаження (R_B). АВГ складається з електромашинної частини (асинхронна машина (АМ)) і напівпровідникового вентильного перетворювача (ВП). Баластне навантаження, опір якого R_B , комутується ключем Sw . Від клем 1, 2 шин постійного струму живиться основне навантаження з опором R_H , і крім того, до цих клем можуть під'єднуватись інші джерела постійного струму, сумарний вихідний струм яких дорівнює i_{SR} .

Для початкового збудження АВГ потребує також наявності малопотужного джерела електроенергії для живлення системи керування ВП і заряду конденсатора C_d до напруги близько 12 В перед подачею імпульсів керування на ВП. Питання, що пов'язані з початковим збудженням АВГ, вже висвітлювались в літературі [7] і в рамках даної статті не розглядаються. Відповідно, необхідні додаткові елементи для початкового збудження на рис. 1 не зображені.

Модель АВГ складається з рівнянь АМ, ВП і навантаження.

Модель АМ

Математична модель двообмоткової АМ в загаль-

льному вигляді наведена в [7]. Врахувавши, що фази обмоток статора АМ з'єднані по схемі "Y" та відсутність нульового проводу, отримуємо:

$$\begin{aligned} [\dot{\psi}_A, \dot{\psi}_B, \dot{\psi}_C] &= [u_A, u_B, u_C] - r_1 [i_A, i_B, i_C]; \\ [\dot{\psi}_a, \dot{\psi}_b, \dot{\psi}_c] &= -r_2 [i_a, i_b, i_c] - \\ &\quad - \frac{\omega_1}{\sqrt{3}} [\psi_b - \psi_c, \psi_c - \psi_a, \psi_a - \psi_b]; \\ [i_A, i_B, i_C] &= L_{1\sigma}^{-1} [\psi_A - \psi_{mA}, \psi_B - \psi_{mB}, -L_{1\sigma} (i_A + i_B)]; \\ [i_a, i_b, i_c] &= L_{2\sigma}^{-1} [\psi_a - \psi_{mA}, \psi_b - \psi_{mB}, -L_{2\sigma} (i_a + i_b)]; \\ [\psi_{mA}, \psi_{mB}, \psi_{mC}] &= L_{EK} [I_{A\Sigma}, I_{B\Sigma}, I_{C\Sigma}]; \\ [I_{A\Sigma}, I_{B\Sigma}, I_{C\Sigma}] &= L_{1\sigma}^{-1} [\psi_A, \psi_B, \psi_C] + L_{2\sigma}^{-1} [\psi_a, \psi_b, \psi_c]; \\ L_{EK} &= (L_{1\sigma}^{-1} + L_{2\sigma}^{-1} + L_m^{-1})^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\psi_A, \psi_B, \psi_C, u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ – потокозчеплення, напруги, струми фаз статора АМ; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, i_a, i_b, i_c$ – потокозчеплення та струми фаз ротора АМ; $r_1, r_2, L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – активний опір фаз статора, зведений до статора опір фаз ротора, індуктивність розсіювання фаз статора і зведена до статора індуктивність розсіювання фаз ротора; L_m – індуктивність взаємодії АМ; ω_1 – електрична частота обертання ротора АМ.

Насичення машини враховує залежність $L_m = f(Y_m)$, яка розраховується з використанням її характеристики намагнічування [8].

Модель ВП

Система рівнянь, що описує процеси в ВП, має вигляд:

$$U = u_d AK; \quad i_{VP1} = K_1 i_A + K_3 i_B + K_5 i_C, \quad (2)$$

де $U = [u_A \ u_B \ u_C]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} (2/3 & -1/3 & -1/3)^T & (-1/3 & 2/3 & -1/3)^T \\ (-1/3 & -1/3 & 2/3)^T \end{bmatrix}; \quad K = [K_1 \ K_3 \ K_5]^T,$$

K_1, K_3, K_5 – комутаційні функції ключів $S1, S3, S5$, які визначають стан цих елементів (0 – розімкнено, 1 – замкнено).

Рисунок 1 – Структурна схема силової частини автономної ВУ з АВГ

Модель навантаження

Миттєві значення струмів баластного і основного навантаження визначаються наступним чином:

$$i_B = K_{Sw} u_d / R_B + \bar{K}_{Sw} u_d / (R_B + R_{off}); i_H = u_d / R_H, \quad (3)$$

де K_{Sw} – комутаційна функція ключа Sw ; $\bar{K}_{Sw}$ – інверсна комутаційна функція ключа Sw ($K_{Sw} = 1$ коли Sw замкнено, $K_{Sw} = 0$ коли Sw розімкнено). Опір Sw в замкненому стані приймається нульовим, в розімкненому дорівнює R_{off} .

Модель ВТ і редуктора

Залежність $P_T(n_M, v)$ аеродинамічної потужності ВТ від швидкості вітру v і механічної частоти обертання ротора АМ n_M задамо графічно типовим сімейством залежностей [9]. ВТ і редуктор вважатимемо жорстко зв'язаними.

Відповідно зміну в часі частоти обертання ротора АМ визначатиме наступне рівняння:

$$\dot{\omega}_M = \frac{1}{J} (M_T - M_G - M_{Tp}), \quad \text{або}$$

$$\omega_M = \frac{1}{J} \int_{t_0}^{\infty} (M_T - M_G - K_{Tp} \omega_M) dt + \omega_{M0}, \quad (4)$$

де ω_M – кутова механічна частота обертання ротора; J – сумарний момент інерції обертових мас; $M_T = P_T / \omega_M = P_T \cdot 30 / (\pi n_M)$ – приведений до вала ротора АМ обертовий момент ВТ; M_G – електромагнітний момент генератора; M_{Tp} , K_{Tp} – момент і коефіцієнт втрат в'язкого тертя в редукторі і АМ (сумарний); ω_{M0} – початкова частота обертання в момент часу t_0 .

Система керування АВГ

Система керування АВГ, що функціонує в складі енергоустановки рис. 1, повинна регулювати три змінні: потокозчеплення АМ; напругу на виході АВГ, яка повинна стабілізуватись; частоту обертання ВТ, яка повинна відповідати критерію максимуму аеродинамічної потужності турбіни.

Задачі синтезу регуляторів першої та другої з вищезазначених змінних вирішені в [10], де розглядався АВГ з регульованим приводом, частота обертання якого не залежить від навантаження (необмежена потужність). В цій роботі було викладено результати синтезу регуляторів потокозчеплення, напруги і струму векторної системи керування АВГ з застосуванням процедури «зворотного синтезу регуляторів». Оскільки ВП з векторною системою керування дозволяє регулювати лише дві змінні, то, відповідно, система керування АВГ [10] виконує тільки функції: стабілізації напруги АМ та підтримки насичення АМ на заданому рівні. З цим і пов'язана відмінність в конфігураціях системи керування за рис. 1 і системи керування в [10].

Введення регульованого баластного навантаження дозволяє покласти задачу стабілізації напруги

АВГ на регулятор баластного навантаження, а функції регулювання потокозчеплення і частоти обертання (моменту) ВТ покласти на ВП. Таким чином, в системі рис. 1 задане значення активної складової струму АМ повинен визначати регулятор частоти обертання ВТ, а навантаження АВГ – регулятор напруги, що матиме дещо іншу структуру, ніж в системі з приводом необмеженої потужності.

Рівняння регуляторів потокозчеплення, струмів i_{1d} , i_{1q} мають вигляд [10]:

$$i_{1d}^* = (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - K_{1\psi} \tilde{\psi}_{2d} + \xi_{\psi}) / (\alpha L_m);$$

$$i_{1d}^* = \sigma (\gamma i_{1d}^* + i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi_{2d} - K_{1id} \tilde{i}_{1d} + \xi_{id}); \quad (5)$$

$$i_{1q}^* = \sigma (\gamma i_{1q}^* + i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta p_n \omega_0 \psi_{2d} - K_{1iq} \tilde{i}_{1q} + \xi_{iq}),$$

де $\dot{\xi}_{\psi} = -K_{2\psi} \tilde{\psi}_{2d}$, $\dot{\xi}_{id} = K_{2id} \tilde{i}_{1d}$, $\dot{\xi}_{iq} = -K_{2iq} i_{1q}$.

Сигнал завдання потокозчеплення визначається згідно виразу:

$$\dot{\psi}^* = (-\psi^* + \psi_H \omega_{\psi H} / \omega_M) / \mu_1, \quad (6)$$

де $\omega_{\psi H}$ – механічна частота обертання, за якої $\psi = \psi_H$.

Розшифровка інших величин наведена в [10]. Величини L_m і ψ_{2d} вважатимемо такими, що визначаються системою керування без похибки.

Регулятор частоти обертання ВТ

Скористаємось так званим «Torque reference-based MPPT algorithm» [11] алгоритмом відбору механічної потужності від ВТ, що використовує задану залежність між моментом і частотою обертання ВТ. Згідно зазначеного алгоритму вихідна потужність генератора повинна змінюватись таким чином, щоб частота обертання ВТ утримувалась на рівні, який відповідає оптимальному моменту на валу за критерієм максимуму аеродинамічного ККД ВТ. Алгоритм вимагає інформації стосовно сімейства характеристик $P_T(n_M, v)$, на основі якого визначаються залежності оптимальної аеродинамічної потужності ВТ від частоти обертання $P_{TO}^*(n_M)$ і $M_{TO}^*(n_M) = P_{TO}^*(n_M) / n_M$ – залежність оптимального моменту ВТ від n_M . $P_{TO}^*(n_M)$ і $M_{TO}^*(n_M)$ є оптимальними траєкторіями руху у відповідних координатах.

Рівняння визначення електромагнітного моменту АМ має вигляд [11]:

$$M_G = -1,5 p_n L_m \psi_{2d} i_{1q} / L_2, \quad (7)$$

де p_n – число пар полюсів машини; i_{1q} – проекція вектора струму статора на вісь q системи координат dq ; L_2 – повна індуктивність ротора; ψ_{2d} – проекція вектора потокозчеплення ротора на вісь d .

Розглянемо варіанти виконання регулятора частоти обертання.

Варіант № 1. Якщо знехтувати втратами в роторі, то задана активна складова струму i_{1q}^* генератора в рухомій системі координат $(d-q)$ буде дорівнювати

$$\dot{i}_{1q}^* = M_G^* / (K_m \psi_{2d}), \quad (8)$$

де $K_m = -1,5 p_n L_m / L_2$, $M_G^* = M_T^* - M_{Tp}$.

Чисельно задана залежність $M_T^*(n_M)$ і рівняння (8) є складовими частинами варіанту № 1 регулятора частоти обертання (РЧО). Входом цього регулятора є поточне значення частоти обертання n_M , а виходом – задана складова струму статора i_{1q}^* .

Варіант № 2. Подамо рівняння руху обертових мас у наступному вигляді:

$$\dot{\omega}_M = J^{-1} M_T - J^{-1} M_G - K_{Tp} J^{-1} \omega_M. \quad (9)$$

Ввівши в (9) помилку частоти обертання $\tilde{\omega}_M = \omega_M - \omega_M^*$, де ω_M^* – задане значення частоти обертання, яке відповідає оптимальному механічному моменту ВТ, отримуємо рівняння помилок відпрацювання частоти обертання:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}}_M &= -\dot{\omega}_M^* + J^{-1} M_T - J^{-1} M_G - \\ &- K_{Tp} J^{-1} \tilde{\omega}_M - K_{Tp} J^{-1} \omega_M^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Рівняння (10) має форму $\dot{x} = -ax + f_1 + f_i + bu$, де $x = \tilde{\omega}_M$ – координата стану, $a = K_{Tp} J^{-1}$, $b = -J^{-1}$ – параметри об'єкта, $u = M_T$ – керуючий вплив, $f_1 = -\dot{\omega}_M^* - K_{Tp} J^{-1} \omega_M^*$ – вимірювана складова збурення, $f_i = J^{-1} M_T$ – невимірювана складова збурення. Величина ω_M^* може бути визначена з сімейства характеристик $P_T(n_M, v)$ і залежить виключно від поточної величини v .

Представивши керуючий вплив як $u = (-f_1 + u_1)/b$, що забезпечує $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega}_M = 0$, і подавши u_1 у вигляді $u_1 = -K_{1\omega} \tilde{\omega}_M + \xi$, $\dot{\xi} = -K_{2\omega} \tilde{\omega}_M$, отримуємо наступне рівняння:

$$M_G^* = -\left(K_{Tp} J^{-1} \omega_M^* + \dot{\omega}_M^* - K_{1\omega} \tilde{\omega}_M - \int K_{2\omega} \tilde{\omega}_M dt \right) J, \quad (11)$$

де $K_{1\omega}$, $K_{2\omega}$ – коефіцієнти підсилення пропорційної і інтегральної ланок.

Чисельно задана залежність $\omega_M^*(v)$, рівняння (11) і (8) є складовими частинами РЧО. Його апаратна реалізація на відміну від першого варіанту потребує поточної інформації щодо швидкості вітру, а отже і встановлення анемометра на гондолі (хабі) ВУ.

Регулятор напруги

Введемо нову змінну r_{ek} – опір еквівалентного до R_B за розсіюваною потужністю баластного навантаження, що може плавно безінерційно змінюватись. Якщо замінити резистивно-ключову ланку SwR_B на резистор змінного опору r_{ek} , то рівняння, згідно якого змінюється напруга u_d , приймає вигляд:

$$\dot{u}_d = (i_{VP1} + i_{SR} - u_d y_{ek} - i_H) / C_d, \quad (12)$$

де $y_{ek} = 1/r_{ek}$.

Ввівши в (12) помилку відпрацювання напруги $\tilde{u}_d = u_d - u_d^*$, отримуємо рівняння помилок відпрацювання напруги u_d :

$$\dot{\tilde{u}}_d = -\dot{u}_d^* + (i_{VP1} + i_{SR} - i_H) / C_d - y_{ek} u_d / C_d. \quad (13)$$

В рівнянні (13) змінною стану є $\tilde{u}_d$, керуючий вплив $u = y_{ek}$, вимірюване збурення $f_1 = -\dot{u}_d^*$, невимірюване збурення $f_H = (i_{VP1} + i_{SR} - i_H) / C_d$, $a = 0$, $b = -u_d / C_d$.

Для забезпечення $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{u}_d = 0$ величину y_{ek} подаємо у вигляді $y_{ek}^* = (-f_1 + u_1)/b$, де $u_1 = -K_{1y} \tilde{u}_d + \xi$, $\dot{\xi} = -K_{2y} \tilde{u}_d$. Тоді рівняння регулятора напруги, в якому керуючим впливом є y_{ek} , приймає вигляд:

$$y_{ek}^* = -C_d (\dot{u}_d^* - K_{1y} \tilde{u}_d - \int K_{2y} \tilde{u}_d dt) / u_d. \quad (14)$$

За резистивно-ключового баластного навантаження керуючим впливом є μ – відносна тривалість провідного стану ключа на періоді його перемикавання T_{SW} . Якщо за час T_{SW} на резисторі R_B резистивно-ключової ланки розсіюється така ж енергія, що і на резисторі еквівалентного баластного навантаження і $u_d = const$, то, знехтувавши втратами SwR_B ланки на інтервалах закритого стану ключа, отримуємо:

$$\int_{t_n}^{t_n + T_{SW}} u_d^2 r_{ek}^{-1} dt = \int_{t_n}^{t_n + \mu T_{SW}} u_d^2 R_B^{-1} dt, \quad (15)$$

де $\mu = (0 \dots 1)$.

Вважатимемо, що r_{ek} змінюється в межах періоду комутації лише один раз на його початку. Тоді $r_{ek}^{-1} = \mu R_B^{-1}$ і відповідно

$$\mu^* = R_B y_{ek}^*. \quad (16)$$

Рівняння (14) і (16) є рівняннями регулятора напруги, в якому керуючим впливом є μ .

Структурну схему запропонованого алгоритму керування АВГ в складі автономної ВУ наведено на рис. 2.

Результати моделювання

Модель системи рис. 1 було реалізовано в програмному пакеті Matlab/Simulink. При моделюванні було використано чотириполюсну АМ номінальної потужності 75 кВт. Її параметри наведено в [9]. Інші параметри і налаштування моделі наступні:

– силова частина: $J = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $R_B = 15,04 \text{ Ом}$, $K_{Tp} = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$, $C_d = 75 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$, номінальна потужність/номінальна частота обертання ВТ 60 кВт/1800 об/хв, $i_{SR} = 0$, $i_H = 0$ – додаткові джерела і основні споживачі відсутні, робочі характеристики ВТ відповідають [9];

– налаштування регуляторів: $u_d^* = 950 \text{ В}$, власна частота контуру потокозчеплення 40 рад/с, власна частота контурів керування струмами 500 рад/с,

власна частота керування напругою 200 рад/с; $\psi_H = 0,84$ Вб, $\omega_{\psi H} = 157$ рад/с, коефіцієнти підсилення регуляторів відповідають розподілу коренів характеристичного поліному по Батерворту [10], $K_{1\psi} = 79,06$, $K_{2\psi} = 1600$, $K_{lid} = 938,47$, $K_{2id} = 250000$, регулятор частоти обертання – задіяно варіант 1, $K_m = -2,929$, $K_{liq} = K_{lid}$, $K_{2iq} = K_{2id}$, період T_{sw} комутації ключа Sw – 0,0002 с, $K_{1y} = 400$, $K_{2y} = 40000$, частота ШІМ – 10 кГц.

Результати тестування розробленого алгоритму керування наведено на рис. 3, 4. За 1 в.о. струмів прийнято величину амплітуди номінального фазного струму $I_{Nph} = 135,8\sqrt{2}$ А, за 1 в.о. напруги –

950 В, за 1 в.о. потокозчеплення – 0,84 Вб, за 1 в.о. потужності – номінальна потужність ВТ, за 1 в.о. моменту – 318 Н·м, за 1 в.о. швидкості вітру – 10 м/с.

На рис. 3,а зображено робочі характеристики ВТ за різних значень v , оптимальні графіки залежностей аеродинамічної потужності P_{TO}^* і механічного моменту M_{TO}^* від n_M , та фактична траєкторія руху ТР (P_T, n_M) в координатах P_T, n_M . Задана в часі швидкість вітрового потоку на розрахунковому інтервалі, часові залежності фактичної P_T і заданої P_T^* аеродинамічної потужності показано на рис. 3,б. Початку руху ($t=0$) відповідає точка А, завершенню ($t=17,23$ с) – точка В.

Рисунок 2 – Структурна схема алгоритму керування АВГ

Рисунок 3 – Робочі характеристики (а) та графіки перехідних процесів в ВТ (а, б)

Графіки відпрацювання потужності і струмів статора в системі координат $(d-q)$ показано на рис. 4,а.

Часові залежності механічного моменту ВТ та усередненого (один вимір на 20 мс) електромагнітного моменту АМ M_{Gcp} наведено на рис. 4,б, а осцилограми миттєвого значення напруги на виході ВП u_d та відносної тривалості відкритого стану ключа Sw – на рис. 4,в.

Рисунок 4 – Часові залежності перехідних процесів в АВГ

Якщо порівнювати залежність $P_T^*(n_M)$ (рис. 3,а) та $TP(P_T, n_M)$, то видно, що максимальне відхилення фактичної частоти від оптимальної знаходиться в межах 293 об/хв. Тим не менш, через пологість ро-

бочих характеристик ВТ поблизу вершин максимальне розузгодження по потужності (рис. 3,б) становило лише 2,2 % від номінальної потужності ВТ.

ВИСНОВКИ. На основі моделей структурних елементів і рівнянь зв'язку розроблено математичну модель автономної системи живлення, що містить ВУ з АВГ і баластним комутуванням навантаженням. В моделі враховується насичення АВГ по першій гармоніці поля. На основі процедури зворотнього синтезу розроблено алгоритм векторного керування АВГ в складі автономної ВУ змінної частоти обертання з комутуванням баластним навантаженням. Запропоновано два варіанти структури регулятора частоти обертання ВТ, перший з яких базується на використанні залежності оптимального (за критерієм максимуму аеродинамічного ККД) аеродинамічного моменту ВТ від частоти обертання. Другий варіант потребує інформації стосовно залежності оптимальної (за зазначеним вище критерієм) частоти обертання ВТ від швидкості вітру.

Проведені чисельні дослідження електромеханічних процесів в системі при застосуванні першого з запропонованих алгоритмів керування частотою обертання ВТ засвідчили здатність запропонованої системи векторного керування відпрацьовувати задану траєкторію руху в координатах аеродинамічна потужність турбіни (момент ВТ) – частота обертання, а отже і забезпечувати роботу БЕУ в режимах з наближеними до максимальних ККД турбіни. Подальші дослідження розглянутої системи плануються в наступних роботах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shurub Y., Dudnyk A. Realization techniques of statistical optimization modes of induction drives // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk: KrNU, 2017. – PP. 68–71. doi: 10.1109/MEES.2017.8248954.
2. Ackermann T. (Ed.). Wind power in power systems. – UK: John Wiley & Sons, 2005. – 742 p.
3. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Shevchuk S.P. Transients in a transistor-switched capacitor regulator of a stand-alone induction generator supplying a single-phase load // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk: KrNU, 2017. – PP. 244–247. doi: 10.1109/MEES.2017.8248901
4. Power-generation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.industry.iemens.com/verticals/global/en/wind-turbine/power-generation/Pages/Default.aspx>.
5. Bang D.J., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A. Review of generator systems for direct-drive with turbines // European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, 31 March – 3 April, 2008.
6. Шаповал І.А., Михальський В.М., Дорошенко А.Л. Регулювання швидкості машини подвійного живлення з керованими перетворювачами в колах статора і ротора // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6. – С. 18–25.
7. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным

возбуждением для автономных энергоустановок. – Київ: Наукова думка, 2011. – 272 с.

8. Джура О.В. Гідро-дизельна автономна енергосистема з асинхронними генераторами // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3–4. – С. 40–46.

9. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І. Математична модель вітроелектричної станції та алгоритм керування веденим асинхронним генератором в режимі роботи на мережу постійного струму // Праці Інституту електродинаміки НАН України:

Київ, 2015. – Вип. 40. – С. 76–85.

10. 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. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 4/2015(32). – С. 34–40.

11. Mueen S.M. Wind Power. – InTech, 2010. – 578 p. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/wind-power>.

MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL ALGORITHM OF AN UNREGULATED WIND TURBINE AND IEIG-BASED ISOLATED ENERGY SYSTEM

L. Mazurenko, O. Dzhura

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

Purpose. To develop the mathematical model and control algorithm of a stand-alone unregulated wind turbine energy system with inverter excited induction generator, dc main load and auxiliary switched dump load. **Methodology.** We have integrated the system time domain structural element models for obtaining the complete system model, have used backstepping control design procedure for developing the control algorithm, and have performed simulation modeling to test the behavior of the system. **Results.** We have developed the mathematical model for calculation of the electromechanical transients in the stand-alone wind turbine energy system with inverter excited induction generator connected to main and switched dump load. The presented control algorithm structure have made possible for the turbine to track its maximum aerodynamic power curve. The performed simulation results confirmed tracking ability of the system under variable wind speed. **Originality.** For the first time, we have developed the dynamic model of a stand-alone wind turbine energy system with inverter excited induction generator, main and dump load taking into account machine core saturation in the abc reference frame machine model. We presented the wind turbine vector control block diagram for independent regulation of three variables: wind turbine speed, dc output voltage and machine flux with zero static error for flux and voltage. **Practical value.** The developed wind turbine power system model may be used for optimization of electromechanical processes in stand-alone wind power based energy sets with induction generators. The presented control algorithm is applicable for DSP control systems of the inverter excited induction generators employed in renewable energy systems. References 11, figures 4.

Key words: inverter excited induction generator, wind turbine, mathematical model, vector control, dump load.

REFERENCES

1. Shurub, Y. and Dudnyk, A. (2017), “Realization techniques of statistical optimization modes of induction drives”, International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, KrNU, November 15–17, 2017, pp. 68–71. doi: 10.1109/MEES.2017.8248954.

2. Ackermann, T. (2005), Wind power in power systems, UK, John Wiley & Sons.

3. Mazurenko, L.I., Dzhura, O.V. and Shevchuk, S.P. (2017), “Transients in a transistor-switched capacitor regulator of a stand-alone induction generator supplying a single-phase load”, International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, KrNU, November 15–17, 2017, pp. 244–247. doi: 10.1109/MEES.2017.8248901.

4. Power generation, available at: <http://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/wind-turbine/power-generation/Pages/Default.aspx> (accessed March 20, 2018)

5. Bang, D.J., Polinder, H., Shrestha, G. and Ferreira, J.A. (2008), “Review of generator systems for direct-drive with turbines”, *European Wind Energy Conference & Exhibition*, Belgium, 31 March – 3 April, 2008.

6. Shapoval, I.A., Mykhalskyi, V.M. and Doroshenko, A.L. (2017), “Speed control of the doubly-fed induction machine with controlled converters in the stator and

rotor circuits”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 6, pp. 18–25. (in Ukrainian)

7. Mazurenko, L.I. and Lischenko, A.I. (2011), *Asinkhronnye generatory s ventilynym i ventilyno-emkostnym vozbuзhdeniem dlya avtonomnykh energoustanovok* [Inverter excited induction generators with and without initial excitation capacitors for stand alone power sets], *Naukova dumka*, Kyiv. (in Russian)

8. Dzhura, O.V. (2013), “Hydro-diesel autonomous power system with induction generators”, *Gidroenergetika Ukraini*, no. 3–4, pp. 40–46. (in Ukrainian)

9. Mazurenko, L.I., Dzhura, O.V. and Romanenko, V.I. (2015), “Mathematical model of connected to dc grid wind electric station and induction slave-generator control technique”, *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, no. 40, pp. 76–85. (in Ukrainian)

10. Mazurenko, L.I., Romanenko, V.I. and Dzhura, O.V. (2015), “Implementation and experimental study of the induction generation with vector control”, *Electromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, Vol. 4, no. 32, pp. 34–40. (in Ukrainian)

11. Mueen, S.M. (2010), Wind Power, InTech, available at: <https://www.intechopen.com/books/wind-power> (accessed March 26, 2018)

Стаття надійшла 13.09.2018.