

УДК 621.311.24

АЛЕКСІЄВСЬКИЙ Д.Г.
Запорізька державна інженерна академія

МОМЕНТНЕ УПРАВЛІННЯ ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ

Мета. Підтвердження можливості моментного управління ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням в режимі обмеження потужності.

Методика. У процедурах синтезу структури регулятора було використано математичний апарат розв'язання систем трансцендентних рівнянь. При математичному моделюванні поведінки електромеханічної системи було використано узагальнену математичну модель електромеханічної системи з аеродинамічним мультиплікуванням.

Результати. На основі аналізу характеристик аеромеханічної підсистеми ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням був розроблений алгоритм її управління в режимі обмеження потужності. Проведено математичне моделювання даної системи, результати якого підтверджують дієздатність даного алгоритму.

Наукова новизна. Вперше обґрунтовано можливість використання моментного управління електромеханічною системою ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням в режимі обмеження потужності.

Практична значимість. Використання моментного управління ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням без аеродинамічного обмеження потужності вітротурбіни дозволяє значно знизити витрати на виготовлення та експлуатацію ВЕУ.

Ключові слова: вітроенергетична установка, вітротурбіна, математична модель, аеродинамічне мультиплікування, моментне управління ВЕУ.

Вступ. Вітроенергетичні установки з аеродинамічним мультиплікуванням дозволяють позбавитися від механічного мультиплікатора та використовувати безпосереднє з'єднання генератора і вітротурбіни. Як і у ряді класичних схем, залежно від величини швидкості вітру, електромеханічна система такої ВЕУ може знаходитися в двох робочих режимах. Перший режим характеризується максимальною ефективністю відбору потужності від вітрового потоку. Другий режим вимагає зменшення ефективності відбору потужності, оскільки потужність вітрового потоку, з урахуванням коефіцієнта перетворення, значно перевищує можливості устаткування. Дослідженню властивостей системи з аеродинамічним мультиплікуванням були присвячені роботи [1], [2], [3]. У цих та інших роботах тих самих авторів був проведений аналіз статичних і динамічних властивостей системи з аеродинамічним мультиплікуванням. В них було розглянуто ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, режим обмеження потужності яких здійснювався аеродинамічним способом, шляхом повороту лопатей основної вітротурбіни. Наявність механізмів повороту збільшує капітальні та експлуатаційні витрати на ВЕУ. У зв'язку з цим представляється доцільним застосування способу управління такої ВЕУ без аеродинамічного регулювання за допомогою моменту генератора.

Постановка завдання. До теперішнього часу для електромеханічних систем ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням моментне обмеження потужності на практиці не використовувалося і теоретично не розвивалося. Потрібно відзначити, що здійснення цього режиму в системах з аеродинамічним мультиплікуванням має істотні відмінності від реалізації цього режиму в класичній ВЕУ, для якої теорія моментного управління

описана досить добре. На сьогодні сама можливість здійснення такого способу управління вимагає підтвердження.

Вирішення цього завдання досягається через синтез алгоритму управління і проведення модельного експерименту для підтвердження його працездатності.

Результати дослідження. Для здійснення моментного управління електромеханічною системою БЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням в роботі був розроблений алгоритм управління моментом генераторів. Структурна схема системи управління, яка його реалізує, приведена на рис. 1. Всі величини вказані у відносних одиницях.

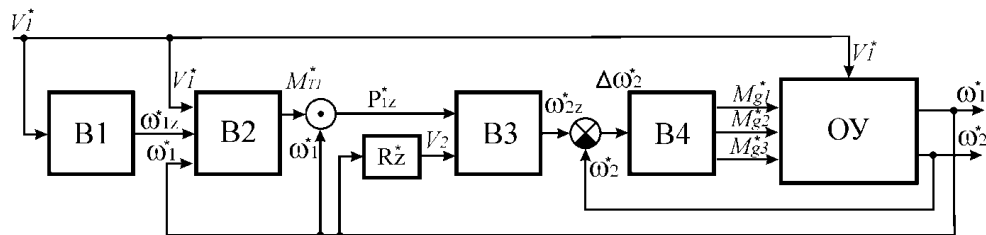


Рис. 1 Структурна схема системи управління

В1 – обчислювач координат статичної траєкторії регулювання, В2 – обчислювач координат динамічної траєкторії регулювання, В3 – обчислювач координат робочої точки вторинних аеромеханічних підсистем, В4 – регулятор моменту генераторів, ОУ – об'єкт управління (електромеханічна система БЕУ)

Обчислювач **В1** здійснює визначення заданої кутової швидкості ω_{1z}^* – відповідної координати статичної траєкторії регулювання. Фактично ω_{1z}^* є функцією швидкості первинного вітрового потоку V_1^* для статичної траєкторії регулювання.

Для забезпечення необхідної діаграми видобутку класичного типу (рис. 2) використовується наступна статична траєкторія регулювання (рис. 3) в координатах механічної характеристики вітротурбіни.

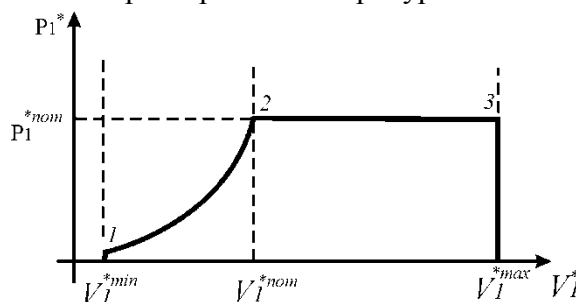


Рис. 2 Діаграма видобутку БЕУ

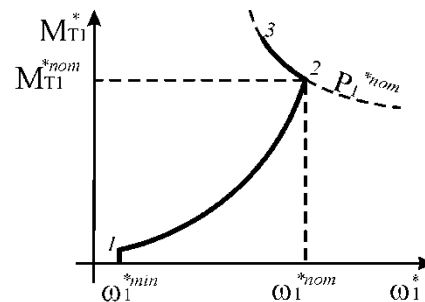


Рис. 3 Статична траєкторія регулювання

Ця траєкторія регулювання подібна до траєкторії регулювання для класичної БЕУ [4], з тією лише різницею, що замість моменту генератора для класичної схеми, в системі з аеродинамічним мультиплікуванням виступає момент гальмування M_{T1}^* , який створюється вторинною аеромеханічною підсистемою на валу первинної вітротурбіни.

Функція обчислювача визначається виразом (1) (позначення відповідно рис. 2).

$$\omega_{1z}^*(V_1^*) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < V_1^* < V_1^{*\min} \\ V_1^* & \text{при } V_1^{*\min} \leq V_1^* \leq V_1^{*\text{nom}} \\ f(V_1^*) & \text{при } V_1^{*\text{nom}} < V_1^* < V_1^{*\max} \\ 0 & \text{при } V_1^{*\max} \leq V_1^* < +\infty \end{cases} \quad (1)$$

де $V_1^{*\min}$, $V_1^{*\text{nom}}$, $V_1^{*\max}$ – мінімальне, номінальне та максимальне значення V_1^* .

У (1) функція $f(V_1^*)$ визначається шляхом вирішення трансцендентного рівняння (2) щодо кутової швидкості ω_1^* при номінальній потужності ВЕУ $P_1^{*\text{nom}}$.

$$M_{WT1}^*(\omega_1^*, V_1^*) - \frac{P_1^{*\text{nom}}}{\omega_1^*} = 0. \quad (2)$$

У виразі (2) функція $M_{WT1}^*(\omega_1^*, V_1^*)$ описує сімейство механічних характеристик первинної вітротурбіни з урахуванням втрат. Залежність $f(V_1^*)$ може бути достатньо точно апроксимована за допомогою виразу (3).

$$f(V_1^*) = a_0 + a_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot (V_1^* - V_1^{*\text{nom}})} + a_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot (V_1^* - V_1^{*\text{nom}})} + a_3 \cdot e^{-\lambda_3 \cdot (V_1^* - V_1^{*\text{nom}})}, \quad (3)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти апроксимації.

Графік функції обчислювача **V1** показаний на рис. 4. Його вигляд подібний до залежності приведеної в [4], для класичної ВЕУ.

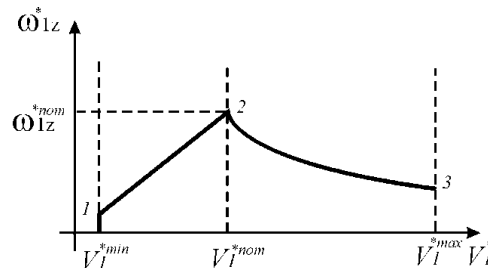


Рис. 4 Графік функції обчислювача **V1**

Обчислювач **B2** забезпечує розрахунок координати моменту гальмування первинної вітротурбіни M_{T1}^* відповідно до заданої динамічної траєкторії регулювання. Робота обчислювача описується виразом:

$$M_{T1}^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*, V_1^*) = \begin{cases} M_{WT1}^*(\omega_1^*, V_1^*) - \left(\frac{M_d^{*\max}}{\varepsilon_\omega^*}\right) \cdot |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| & \text{при } \Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*) \geq 0 \text{ у } |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| \leq \varepsilon_\omega^* \\ M_{WT1}^*(\omega_1^*, V_1^*) - M_d^{*\max} & \text{при } \Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*) \geq 0 \text{ у } |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| > \varepsilon_\omega^* \\ M_{WT1}^*(\omega_1^*, V_1^*) + \left(\frac{M_d^{*\max}}{\varepsilon_\omega^*}\right) \cdot |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| & \text{при } \Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*) < 0 \text{ у } |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| \leq \varepsilon_\omega^* \\ M_{T1}^{*\max} & \text{при } \Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*) < 0 \text{ у } |\Delta_\omega^*(\omega_1^*, \omega_{1z}^*)| > \varepsilon_\omega^* \end{cases} \quad (4)$$

де $M_d^{*\max}$ – максимальний динамічний момент первинної підсистеми;

$M_{T1}^{*\max}$ – максимальний момент гальмування первинної підсистеми;

ε_{ω}^* – ширина області навколо значення заданої кутової швидкості, в якій динамічний момент знижується по лінійному закону, для забезпечення стійкої роботи системи;

$\Delta_{\omega}^* = \omega_{1z}^* - \omega_1^*$ – похибка по кутовій швидкості первинної вітротурбіни.

Обчислювач **В3** визначає задану кутову швидкість обертання валу генератора ω_{2z}^* по поточних значеннях швидкості вторинного повітряного потоку V_2^* і заданої потужності, що відбирається від первинної підсистеми P_{1z}^* . Швидкість V_2^* доцільно обчислювати через значення кутової швидкості первинної вітротурбіни:

$$V_2^* = R_z^* \cdot \omega_1^*, \quad (5)$$

де R_z^* – радіус закріплення осі вторинних вітротурбін.

Функція обчислювача **В3** визначається в результаті вирішення, щодо кутової швидкості ω_2^* , трансцендентного рівняння:

$$M_{WT2}^*(\omega_2^*, V_2^*) - \frac{P_{1z}^*}{\omega_2^*} = 0, \quad (6)$$

де P_{1z}^* – задана поточна потужність, що відбирається у первинній підсистемі,

M_{WT2}^* – момент на валу вторинної вітротурбіни.

У виразі (6) функція $M_{WT2}^*(\omega_2^*, V_2^*)$ описує сімейство механічних характеристик вторинної вітротурбіни з урахуванням втрат. Залежність $\omega_{2z}^*(V_2^*, P_{1z}^*)$ може бути достатньо точно апроксимована за допомогою наступного виразу:

$$\omega_{2z}^*(V_2^*, P_{1z}^*) = (b_1 \cdot P_{1z}^* + b_2) \cdot V_2^* + b_3 \cdot (P_{1z}^*)^{\gamma_1} \cdot e^{-\gamma_2 \cdot V_2^*}, \quad (7)$$

де $b_1, b_2, b_3, \gamma_1, \gamma_2$ – коефіцієнти апроксимації.

Блоком **В4** являє собою ПІД-регулятор, що забезпечує регулювання за принципом зворотного зв'язку по кутовій швидкості ω_2^* за допомогою моментів генераторів.

Результати моделювання цієї системи управління у вигляді діаграми потужності $P_{1\max}^*(t^*)$ без обмеження і потужності $P_1^*(t^*)$, що забезпечується при застосуванні даного алгоритму, приведені на рис. 5.

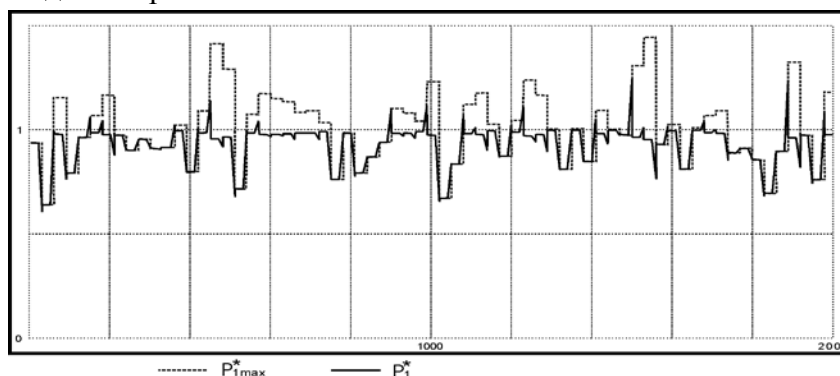


Рис. 5 Результати моделювання

На діаграмі спостерігається обмеження потужності $P_1^*(t^*)$, при перевищенні значень номінальної швидкості вітру, та її збіг з потужністю $P_{1\max}^*(t^*)$ при роботі на швидкостях вітру нижче за номінальне значення.

Висновки. В результаті математичного моделювання були підтверджені можливість моментного управління електромеханічною системою ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням та працездатність запропонованого способу управління. Розглянутий алгоритм управління даною електромеханічною системою має відчутну чутливість до точності визначення параметрів аеромеханічної підсистеми.

Список використаних джерел

1. Голубенко Н.С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н.С.Голубенко, П.Д.Андрienко, И.Ю.Немудрый, Д.Г.Алексеевский // Эл.техника и эл.энергетика. – 2011. – № 1. – С.70-73.
2. Миргород В. Ф. Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости / В. Ф. Миргород // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 67–70.
3. Алексеевский Д.Г. Динамика ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / Д.Г.Алексеевский, В.П.Метельский, И.Ю.Немудрый // Електротехніка та комп'ютерні системи. -2011.- №3(79),– С.253 – 254.
4. Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems – Towards a Global Approach / I. Munteanu, A.I. Bratcu, N.A. Cutululis, E. Ceangă. - London: Springer-Verlag, 2008.

References

1. Golubenko, N. S., Andriyenko, P. D., Nemudry, I. Yu. Alekseevskiy, D. G. (2011). Modelirovanie elektromekhanicheskoy sistemy vetroenergeticheskoy ustanovki s aerodinamicheskim multiplikatorom v rezhyme stabilizatsii skorosti vetrovyh turbin [Modeling of electromechanical system of wind power station with aerodynamic multiplier in the mode of wind turbines speed stabilization]. *El.tekhnika i el.energetika*, (1), 70-73.
2. Mirgorod, V. F. (2009). Upravleniye vetroenergeticheskoy ustanovkoy bolshoy moshchnosti po zapasam aerodinamicheskoy ustoychivosti [Control of high-power wind turbine by reserves aerodynamic stability]. *Vestnik dvigatelestroyeniya*, (3) 67-70.
3. Alekseevskiy, D. G., Metelsky, V. P., Nemudry, I. Yu. (2011). Dinamika vetroelektricheskoy ustanovki s aerodinamicheskoy multiplikatsiyey [Dynamics of a wind power plant with aerodynamic multiplication]. *Yeletekhnika ta komp'yuterni sistemi*, 3(79), 253-254.
4. Munteanu, I., Bratcu, A.I., Cutululis, N.A., Ceangă, E. (2008). Optimal Control of Wind Energy Systems – Towards a Global Approach[. *Springer-Verlag*

МОМЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ

АЛЕКСЕЕВСКИЙ Д.Г.

Запорожская государственная инженерная академия

Цель. Подтверждение возможности моментного управления ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием в режиме ограничения мощности.

Методика. В процедурах синтеза структуры регулятора использовался математический аппарат решения систем трансцендентных уравнений. При математическом моделировании поведения электромеханической системы использовалась обобщенная математическая модель электромеханической системы с аэродинамическим мультиплицированием.

Результаты. На основе анализа характеристик аэромеханической подсистемы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием был разработан алгоритм ее управления в режиме ограничения мощности. Проведено математическое моделирование данной системы, результаты которого подтверждают работоспособность данного алгоритма.

Научная новизна. Впервые обоснована возможность использования моментного управления электромеханической системой ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием в режиме ограничения мощности.

Практическая значимость. Использование моментного управления ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием без аэродинамического ограничения мощности ветротурбины позволяет значительно снизить затраты на изготовление и эксплуатацию ВЭУ.

Ключевые слова: *ветроэнергетическая установка, ветротурбина, математическая модель, аэродинамическое мультиплицирование, моментное управление ВЭУ.*

TORQUE CONTROL OF WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION

ALEKSEEVSKIY D.G.

Zaporozhe State Engineering Academy

Purpose is to confirm the torque control possibility of wind power plant with aerodynamic multiplication in the restricted power mode.

Methodology. Transcendental equations solving systems mathematical apparatus has been used for synthesis procedures of the controller structure. Generic mathematical model of electromechanical system with aerodynamic multiplication has been used for electromechanical system behavior mathematic simulation

Findings. Control algorithm in restricted power mode has been developed on the analysis basis of the aeromechanical subsystems characteristics of the wind power plant with aerodynamic multiplication. Mathematic simulation of this system has been conducted, its results confirm the algorithm operational integrity.

Originality. The torque control usage possibility of wind power plant electromechanical system with aerodynamic multiplication in restricted power mode has been demonstrated for the first time.

Practical value. Torque control usage of wind power plant with aerodynamic multiplication without wind turbine power aerodynamic restriction can significantly reduce the wind power production and exploitation cost.

Keywords: *wind power plant, wind turbine, mathematical model, aerodynamic multiplication, torque control of the wind power plant.*