

УДК 621.313.332

МАШИННО-ВЕНТИЛЬНЕ ДЖЕРЕЛО ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Л. І. Мазуренко, О. В. Джура, В. І. Романенко, Л. М. Диннік, О. А. Білик

Інститут електродинаміки НАН України

просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail: mlins@ied.org.ua.

Запропоновано схемне рішення машинно-вентильного джерела електричної енергії для автономних енергосистем малої потужності постійної напруги. До складу джерела входить нерегульована турбіна змінної частоти обертання, асинхронний генератор з короткозамкненим ротором і вентильним збудженням, баластне навантаження, а також регулятор струму, споживаного системою від генератора. Розроблено блок-схему алгоритму керування джерелом, яка містить блоки керування вентильним перетворювачем, регулювання струму баластного навантаження та регулювання струму, споживаного системою від генератора. Алгоритм дозволяє відібрати від генератора задану системою потужність і утримувати частоту обертання турбіни близькою до оптимальної за критерієм максимуму аеродинамічного ККД. Наведено результати чисельних розрахунків.

Ключові слова: асинхронний генератор, вентильне збудження, турбіна.

МАШИННО-ВЕНТИЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Л. И. Мазуренко, А. В. Джура, В. И. Романенко, Л. Н. Дынник, А. А. Билык

Институт электродинамики НАН Украины

просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина. E-mail: mlins@ied.org.ua.

Предложено схемное решение машинно-вентильного источника электрической энергии для автономных энергосистем малой мощности постоянного напряжения. В состав источника входит неуправляемая турбина переменной частоты вращения, асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором и вентильным возбуждением, балластная нагрузка, а также регулятор тока, потребляемого системой от генератора. Разработана блок-схема алгоритма управления источником, которая содержит блоки управления вентильным преобразователем, регулирования тока балластной нагрузки и регулирования тока, потребляемого системой от генератора. Алгоритм позволяет потреблять от генератора заданную системой мощность и удерживать частоту вращения турбины близкой к оптимальной по критерию максимума аэродинамического КПД. Приведены результаты численных расчетов.

Ключевые слова: асинхронный генератор, вентильное возбуждение, турбина.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Автономні енергосистеми (АЕ) живлення об'єктів, віддалених від централізованих мереж, можуть будуватись з джерел електроенергії, які об'єднані за колом постійного (АЕПС) чи змінного (АЕЗС) струму або ж комбіновано. За малих потужностей структура АЕПС уважається більш виправданою. Не в останню чергу це пов'язано з тим, що в них простіше вирішувати задачу розподілу навантаження між окремими джерелами енергії. АЕ будують із застосуванням дизельних, бензинових, газових (у тому числі біо), гідро- і вітрових генераторів, сонячних батарей, хімічних джерел енергії тощо. Привідні турбіни парових, гідравлічних і вітрогенераторів АЕ для зменшення вартості та збільшення міцності конструкції можуть виконуватись нерегульованими, а отже працюють при суттєво змінній частоті обертання залежно від потужності первинного джерела енергії та моменту навантаження на валу. Відповідно до під'єднання до таких приводів генератори повинні працювати при змінній частоті обертання і віддавати в енергосистему певну регульовану потужність. Якщо потужність, яка віддається генератором в АЕ, повинна бути максимально можливою, виходячи з можливостей приводу, то постає задача відслідковування максимальної потужності приводу. В англомовній літературі вона відома як задача МРРТ (maximum power point tracking). Через відомі переваги [1] асин-

хронного генератора (АГ) з вентильним збудженням (ВЗ) він є доцільним для застосування із зазначеними приводами в АЕПС, проте потребує розробки відповідних додаткових технічних рішень і систем керування.

Метою даної роботи є розробка технічного рішення джерела постійної напруги на основі АГ з ВЗ і нерегульованої турбіни, що використовує кінетичну енергію газоподібної речовини (наприклад, повітря), розробка основ побудови алгоритму керування цим джерелом з перевіркою його ефективності на математичній моделі.

Запропонована схема джерела, яка є складовим елементом АЕПС (рис. 1), містить АГ, що збуджується від напівпровідникового вентильного перетворювача (ВП) і приводиться в рух турбіною (Т). На клемі постійної напруги ВП включене баластне навантаження R_{BH} , струм якого регулюється ключем S7. Рівень потужності, що споживається від АГ до енергосистеми, регулюється ключем S8. Ключі S7 і S8 працюють за постійної частоти перемикачності. Опір R_H є еквівалентним опором навантаження, а E_e та R_e – еквівалентні ЕРС та внутрішній опір інших джерел. Блокуючий діод VD запобігає двосторонньому обміну енергією між АГ та іншими джерелами в АЕ.

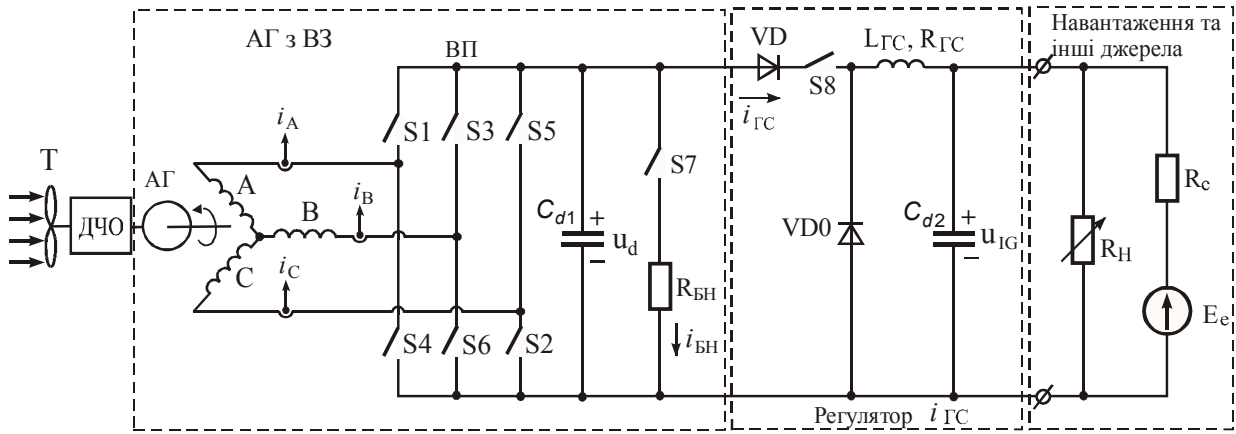


Рисунок 1 – Схема силової частини джерела постійної напруги на основі АГ з ВЗ

Комп'ютерна модель даної АЕ була реалізована в середовищі Matlab/Simulink із застосуванням SPS моделей машини, ВП та інших ключових елементів. Модель турбіни реалізовано згідно з відомим з літератури [2] підходом на основі її графічно заданого сімейства швидкісних характеристик. Ці характеристики надано у вигляді залежностей механічної (рис. 2) потужності турбіни від приведеної до генератора частоти обертання для різних швидкостей вітру. При цьому вважається, що впродовж кроку інтегрування частота обертання й аеродинамічний момент стали.

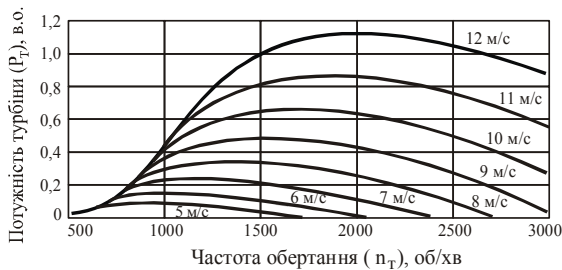


Рисунок 2 – Швидкісні характеристики турбіни

Система керування джерела має три основні блоки (рис. 3): блок керування ВП, блок керування баластним навантаженням і блок керування регулятора струму, споживаного системою від генератора i_{GC} . Перший з них реалізовано згідно з принципом векторного регулювання за потокозчепленням ротора [3]. ВП працює в режимі гістерезисної ШІМ, формуючи наближені до розрахункових струми статора i_A, i_B, i_C , реактивна складова яких постійна (визначається i_{ds}^*), а активна змінюється таким чином, щоб підтримувати випрямлену напругу наближеною до заданого значення U_d^* . Другий блок, блок регулятора струму баласту, відповідає за підтримання необхідної швидкості обертання турбіни. Алгоритм роботи блоку є пошуковим і заснований на градієнтному методі [4]. Функцію мети надано в наступному вигляді:

$$p_T = \gamma \omega_M + p_p + p_e + \frac{d\omega_M}{dt} J, \quad (1)$$

де p_T – миттєва аеродинамічна потужність турбіни; γ – коефіцієнт тертя в системі турбіна–машина; ω_M – механічна кутова частота обертання вала машини; p_p – втрати в роторі; p_e – електромагнітна потужність машини; J – результуючий момент інерції турбіни і машини, які вважаються жорстко зв'язаними.

Для того, щоб утримувати турбіну на максимумі аеродинамічного ККД (точка $dp_T/d\omega_M = 0$), блоком визначається величина похідної $dp_T/d\omega_M$, і залежно від її знаку збільшується (похідна від'ємна) чи зменшується (похідна додатна) ω_M . Частота розрахунку p_T і ω_M визначається генератором імпульсів (ГІ). Максимальний заданий струм баластного навантаження визначається згідно із залежністю:

$$i_{BH}^* = (\kappa_{зП} p_T \eta_G(\omega_M) - i_{GC} u_d) / u_d, \quad (2)$$

де $\kappa_{зП}$ – коефіцієнт збільшення потужності, який показує відношення потужності навантаження до потужності привода p_T у режимі гальмування; $\eta_G(\omega_M)$ – залежність ККД генератора від ω_M у режимі джерела постійної напруги при механічній потужності АГ $\kappa_{зП} p_T$ (втрати на тертя в системі віднесено до втрат АГ). Для спрощення розрахунків можна скористатись заданими значеннями u_d і i_{GC} . Тоді отримуємо

$$i_{BH}^* = (\kappa_{зП} p_T \eta_G(\omega_M) - i_{GC}^* U_d^*) / U_d^*. \quad (2)$$

У третьому блоці обчислюється максимальний струм, який тривало може споживатись регулятором струму i_{GC} від генератора

$$i_{GCmax} = p_T \eta_G(\omega_M) / u_d. \quad (3)$$

Аналогічно (2) для спрощення можна використати задане значення напруги u_d :

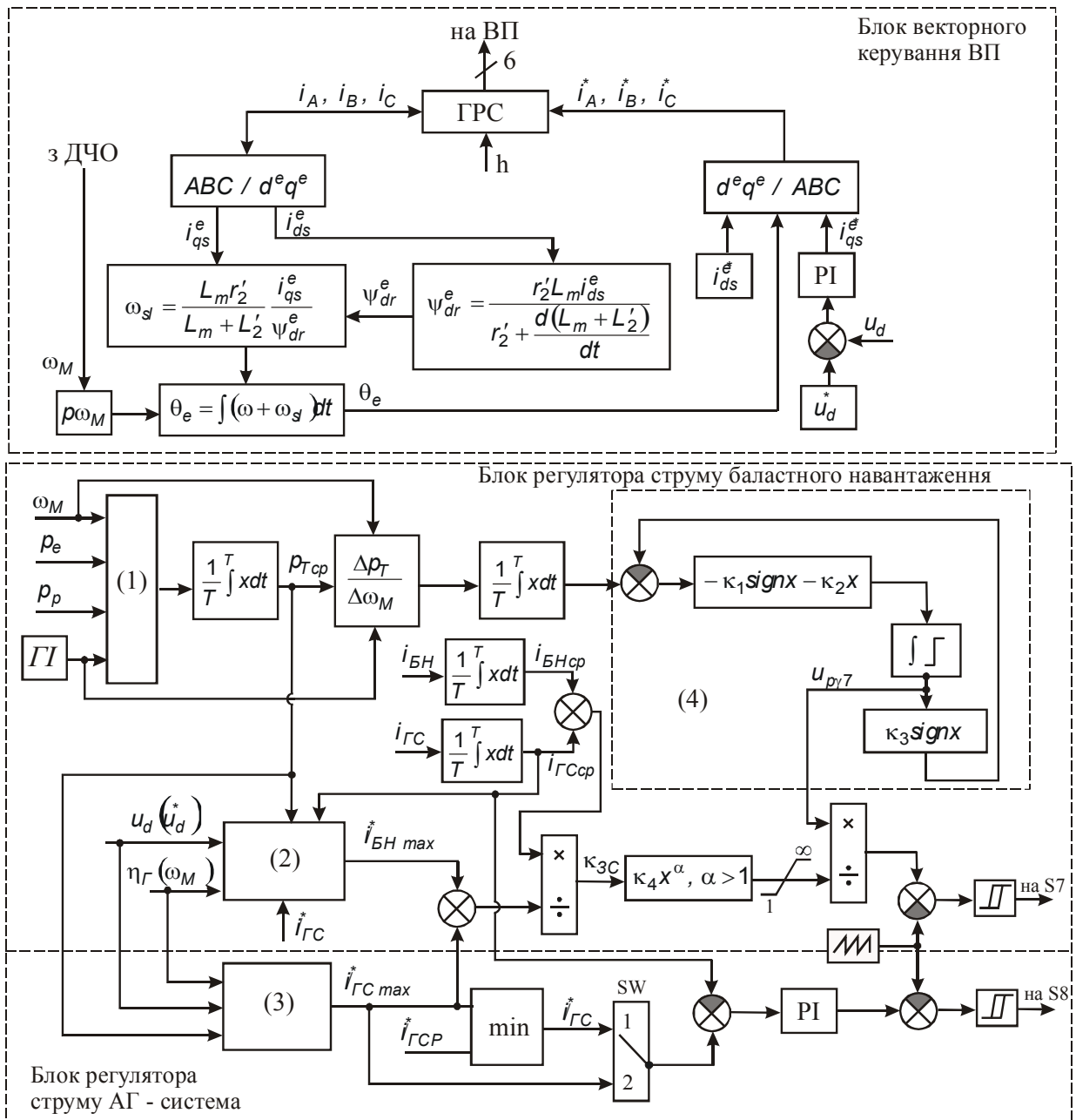


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму керування джерела

$$i_{GCmax}^* = p_T \eta_{\Gamma}(\omega_M) / U_d^* \quad (3)$$

Якщо ключ SW знаходиться в положенні 2, то струм i_{GC} підтримується на рівні i_{GCmax}^* PI-регулятором, що відпрацьовує сигнал розузгодження між усередненим значенням i_{GC} (i_{GCcp}) та i_{GCmax}^* і таким чином регулює коефіцієнт заповнення імпульсів керування ключа S8. Коли ж SW перемикається в положення 1, то i_{GC} стабілізується на рівні i_{GC}^* ($i_{GC} \leq i_{GCmax}^*$). Величина i_{GCmax}^* використовується також для обмеження струму баласту через корекцію сигналу $u_{p\gamma7}$. Відбувається це наступним чином. Розраховується відношення

$(i_{BHcp} + i_{GCcp}) / (i_{BHmax}^* + i_{GCmax}^*) = \kappa_{3C}$, де κ_{3C} – коефіцієнт збільшення фактичного сумарного струму, споживаного баластом і внутрішньою мережею від АГ з ВЗ відносно максимально дозволеного; i_{BHcp} – усереднене значення i_{BH} , i_{GCcp} – усереднене значення i_{GC} . При $\kappa_{3C} > 1$ сигнал $u_{p\gamma7}$ зменшується пропорційно величині $\kappa_4 \kappa_{3C}^\alpha$, інакше $u_{p\gamma7}$ не коректується. Залежність $u_{p\gamma7}(\Delta p_T / \Delta \omega_M)$ можна надати аналітично

$$u_{p\gamma7} = \frac{1}{T} \int (-\kappa_1 \text{sign}(\frac{1}{T} \int \frac{\Delta p_T}{\Delta \omega_M} dt - \kappa_3 \text{sign} u_{p\gamma7}) - \kappa_2 (\frac{1}{T} \int \frac{\Delta p_T}{\Delta \omega_M} dt - \kappa_3 \text{sign} u_{p\gamma7})) dt \quad (4)$$

де $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – постійні або змінні коефіцієнти.

Рівняння (1) і (4) є основою алгоритму побудови блоку регулятора струму баластного навантаження.

При проведенні розрахунків значення основних параметрів і вхідних даних у моделі були наступні.

– *Машина*: чотириполюсна, номінальна потужність/частота/напряга – 37 кВА/60 Гц/460 В; індуктивність намагнічування постійна $L_m = 34,7$ мГн; параметри розсіювання – $r_1 = 0,087$ Ом; $L_1 = 8 \cdot 10^{-4}$ Гн, $r_2' = 0,228$ Ом, $L_2' = 8 \cdot 10^{-4}$ Гн.

– *Турбіна*: номінальна потужність 31,5 кВт = 1 в.о.; швидкісні характеристики відповідають рис. 2; $J \approx 0,65$ кг·м²; тертям у турбіні та машині нехтується ($\gamma = 0$).

– *Ключові елементи*: ВП має ідеальні ключі з опором у провідному стані $4 \cdot 10^{-3}$ Ом; S7, S8 – ідеальні ключі з опором у провідному стані 10^{-3} Ом.

– *Інші елементи*: $L_{ГС} = 10^{-3}$ Гн; $R_{ГС} = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом; $R_{БН} = 20,34$ Ом; $R_H = 30,25$ Ом; $C_{d1} = C_{d2} = 3 \cdot 10^{-3}$ Ф; $E_e = 915$ В; $R_e = 1,0$ Ом.

– *Система керування*: Блок керування ВП: $-i_{ds}^* = 25$ А; $U_d^* = 915$ В; ширина гістерезису ГРС $h = 3$ А; $\kappa_4 = 1$, якщо $\kappa_{3C} \leq 1$, інакше $\kappa_4 = 1,5$; блок регулятора струму баласту: – $T = 25$ мс; $\kappa_1 = 51$; $\kappa_2 = 200,5$; $\kappa_3 = 0,005$; $\alpha = 2$; $\kappa_{3П} = 1,4$; залежність $\eta_T(\omega_M)$ задано графічно (рис. 4); блок регулятора струму генератор–система: – ключ SW у положенні 2.

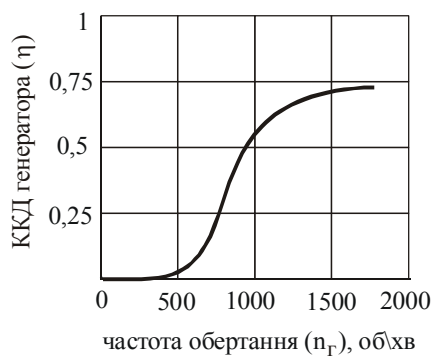


Рисунок 4 – Залежність ККД АГ з ВП від частоти обертання ротора

Графіки електромеханічних перехідних процесів в АЕ отримано при зміні швидкості вітру (рис. 5,а) від $V_W = 9$ м/с до $V_W = 7$ м/с. Генератор збуджується від попередньо зарядженого конденсатора C_{d1} і з моменту часу $t \approx 0,25$ с починає віддавати потужність у мережу АЕ. У результаті її напруга u_{IG} підвищується (рис. 5,г). Частота обертання турбіни n_T коливається в околі оптимальної n_{TOpt} (рис. 5,б), причому на інтервалах прискорення $R_{БН}$ повністю знеструмлюється ($i_{БНcp} = 0$). При зменшенні швидкості вітру відбувається зменшення механічної по-

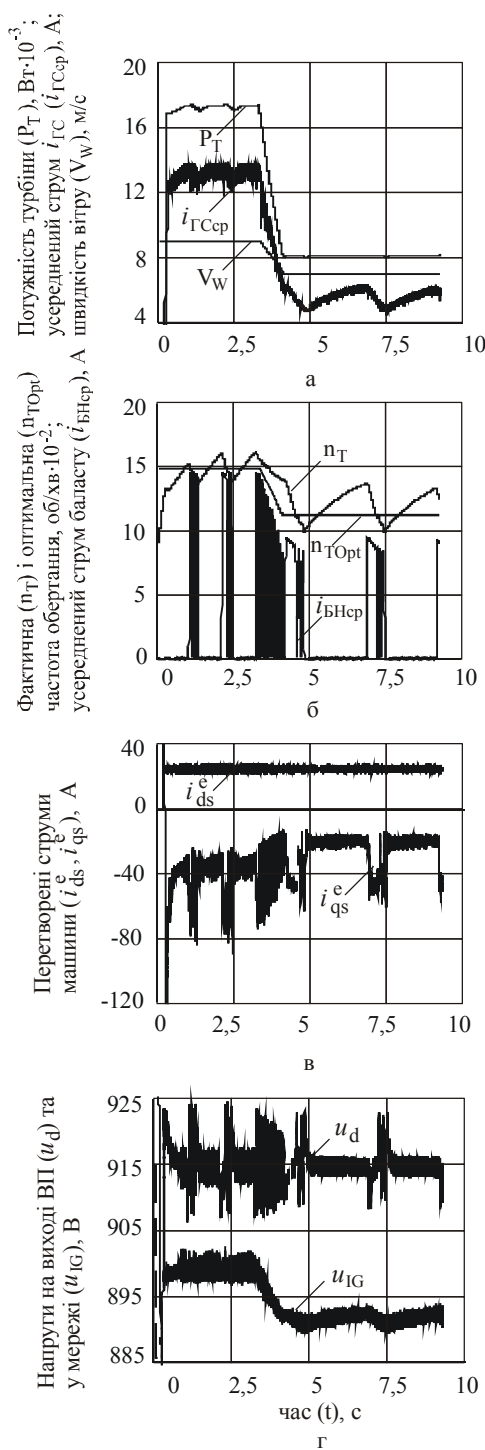


Рисунок 5 – Перехідні процеси в АЕ

тужності турбіни (рис. 5,а). Відповідно зменшується струм $i_{ГС}$ (рис. 5,а), струм баластового навантаження на інтервалах гальмування (рис. 5,б) і напруга у колі постійного струму АЕ (рис. 5,г). Перетворені струми статора (рис. 5,в) АГ змінюються відповідно до структури блока керування ВП: середнє значення i_{ds}^e залишається незмінним, а i_{qs}^e є від'ємним (генераторний режим) і змінюється пропорційно навантаженню АГ.

Необхідно відзначити, що номінальна механічна потужність АГ у розглянутій схемі повинна бути не меншою за потужність турбіни при максимальній робочій швидкості вітру. Крім того, відбір потужності від турбіни на рівні теоретичного максимуму на практиці в даному випадку є неможливим, оскільки при цьому б унеможлилювався пошуковий рух у бік збільшення частоти обертання. Тому значення $n_T(\omega_M)$, обчислені системою керування, повинні бути дещо нижчі за реальні. При цьому і струм i_{TC} буде меншим за теоретичний максимум.

ВИСНОВКИ. Розроблено технічне рішення джерела постійної напруги на основі АГ з ВЗ та турбіни змінної частоти зі швидкісними характеристиками без локальних екстремумів. Розроблено основи алгоритму керування цим джерелом. Працездатність і ефективність запропонованого рішення та алгоритму його керування підтверджено результатами моделювання.

MECHATRONIC DC VOLTAGE SOURCE FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

L. Mazurenko, A. Dzhura, V. Romanenko, L. Dynnik, A. Bilik

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine
 prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: mlins@ied.org.ua.

The scheme of a switch-controlled electric energy source for small isolated power dc supply systems is proposed. The source consists of an unregulated variable speed turbine, induction generator with squirrel-cage rotor, inverter based excitation system, dump load and generator-system current regulator. The block diagram of a controller for the source is developed. It includes inverter vector control, dump load control and generator-system current control blocks. The control algorithm enables to take from the generator to a system preset power and execute maximum power point tracking for the turbine. The simulated performance results are presented.

Key words: induction generator, inverter excitation, turbine.

REFERENCES

1. Mazurenko L.I., Lischenko A.I. *Switch and capacitor – controlled induction generators for autonomous power sets.* – К.: Naukova dumka, 2011. – 272 p. [in Russian]
2. Kuperman A., Rabinovici R. On the speed stability of wind driven induction generators connected to distribution systems // *International Journal of Energy and Environment.* – 2007. – Iss. 2. – Vol. 1. – PP. 57–67.
3. Naidu M., Walters J. A 4-kW 42 V induction-machine-based automotive power generation system with a diode bridge rectifier and a PWM inverter // *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* – Sept./Oct. 2003. – Iss. 39. – № 5. – PP. 1287–1293.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. – К.: Наукова думка, 2011. – 272 с.
2. Kuperman A., Rabinovici R. On the speed stability of wind driven induction generators connected to distribution systems // *International Journal of Energy and Environment.* – 2007. – Iss. 2. – Vol. 1. – PP. 57–67.
3. Naidu M., Walters J. A 4-kW 42 V induction – machine – based automotive power generation system with a diode bridge rectifier and a PWM inverter // *IEEE Trans. Ind. Applicat.* – Sept./Oct. 2003. – Iss. 39. – № 5. – PP. 1287–1293.
4. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. “Автоматика и телемеханика”. В 2-х ч., ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.

Стаття надійшла 8.06.2012.

Рекомендовано до друку
 к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.