

КІМСТАЧ ОЛЕГ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

<https://orcid.org/0000-0002-1447-8852>e-mail: oleg.kimstach@nuos.edu.ua

ЧУМАК МИКОЛА

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

e-mail: mchumak17@gmail.com

ТЕХНІЧНА ПЕРЕВАГА БІСТРУМОВОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

В роботі наведено опис комбінованих систем розподільчої генерації, які побудовано за монострумовою та біструмовою схемами. Виконано доведення технічної переваги біструмової системи розподільчої генерації над стандартною монострумовою системою на основі методу відносних порівняльних оцінок. В якості критеріїв порівняння обрані кількість ланок перетворення енергії від джерел живлення до споживачів та загальний ККД силової частини. Встановлено, що для узагальненого проектного рішення системи електропостачання домоволодіння біструмова система за зазначеними критеріями за загальною відносною оцінкою має значення приблизно на чверть більше ніж монострумова система, що свідчить про її беззаперечну технічну перевагу.

Ключові слова: розподільча генерація, монострумова система, біструмова система, силова частина, метод відносних порівняльних оцінок.

KIMSTACH OLEG, CHUMAK MYKOLA
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

TECHNICAL ADVANTAGE OF BI-CURRENT SYSTEM OF DISTRIBUTED GENERATION

The paper discusses two circuit types of a distributed generation system for supplying power energy to private households. The first of them is called a mono-current system and it is a combined distributed generation system based on solar panels and a wind generator with power supply to AC loads. The second is called a bi-current system because it has two separate power distribution systems for AC and DC. The paper provides their functional and circuit descriptions, as well as a qualitative comparative analysis. The main goal of the work is to prove the technical advantage of the bi-current system. This problem is solved using the method of relative comparative estimates. The number of transformation elements and the generalized efficiency of the power circuit were selected as comparison criteria.

As you know, for any system the cost is higher and reliability is lower, than its number of elements is more. It has been defined that during the flow of electrical power from sources to loads in a bi-current system, in general, half as many transformation elements are overcome as in a mono-current system. For any system the operating costs are lower, if the efficiency is higher. When calculating the generalized efficiency, only the power circuit was taken into account, since it is the most power-intensive circuit. The calculation was also performed for a stationary mode close to the nominal one. Such assumptions do not allow us to accurately calculate the quantitative values of efficiency, but they allow us to perform a preliminary qualitative comparative analysis. The paper presents algorithms for calculating the efficiency of both systems. An example calculation showed that the efficiency of the bi-current system is approximately 6% higher.

As a result of the research, it was found that the resulting relative estimate of the bi-current system is higher by approximately a quarter of a point, which indicates its clear advantage. Thus, the technical advantage of the bi-current system has been proven, so it is a more promising circuit solution for distributed generation systems.

Keywords: distribution generation, mono-current system, bi-current system, power circuit, method of relative comparative estimates.

Постановка проблеми

Проблема екології у всіх напрямках техніки на сьогодні виходить на передові позиції. Боротьба за зниження впливу людської діяльності на природу вимагає постійного пошуку найбільш технологічних рішень у тому числі в електроенергетиці, яка є основною рушійною силою сучасної економіки. Так європейська комісія прагне забезпечити зниження викидів парникових газів приблизно на 50 % до 2030 року [1], що головним чином повинне бути реалізоване за рахунок більш активного застосування зелених технологій в електроенергетиці.

З іншого боку, наростає дефіцит електроенергії, який ініціює пошук нових технічних рішень для електроенергетики з метою підвищення ефективності її функціонування. Переважаючим напрямком в електроенергетиці останнім часом стало застосування розподіленої генерації (РГ). В її основі лежить застосування альтернативних засобів генерації електричної енергії (ЕЕ) [2, 3], які реалізуються за рахунок застосування сонячних електричних станцій [4, 5] і вітроенергетичних установок [6, 7]. Одним з лідерів даної технології в Європі є Німеччина, РГ котрої досягає 50 % [2].

Аналіз останніх джерел

Існує величезна кількість технічних варіантів реалізації систем РГ, кожний з котрих залежить від типу джерел ЕЕ, характеристик навантаження і вимог до якості електропостачання. Останнім часом розглядається можливість застосування біструмових систем РГ, які побудовані на основі використання комбінованих електричних мереж постійного та змінного струмів, такий підхід дозволяє скоротити кількість ланок перетворення ЕЕ та підвищити енергетичну ефективність системи РГ. Подібні комбіновані системи знаходять застосування в тому числі в системах зарядки електромобілів [8]. Але найбільш перспективним напрямком використання біструмових систем РГ є електропостачання приватних домоволодінь.

Взагалі широке застосування автономних систем РГ дозволяє досягти значних переваг:

- спрощення керування режимами роботи систем електропостачання [9];
- усунення необхідності потужних систем регулювання реактивної потужності [10];
- зниження втрат ЕЕ при її доставці до споживачів [11];
- відсутність необхідності контролю спільної роботи частин складної узагальної електроенергетичної системи [12];
- зниження капітальних і експлуатаційних витрат на розподільні мережі [12].

Виходячи з вище викладеного, РГ є найбільш перспективним напрямком в області електроенергетики, а вдосконалення її технічних варіантів реалізації є актуальним завданням. Враховуючи загальну спрямованість всіх наукових досліджень на ресурсозбереження, питання підвищення енергетичної ефективності систем РГ є першочерговим.

Метою досліджень є обґрунтування на якісному рівні технічної переваги біструмової системи РГ.

Варіанти схем систем розподіленої генерації

Існує досить багато варіантів технічної реалізації систем РГ. Більшість із них використовують як джерела ЕЕ сонячні панелі або вітроенергетичну установку (ВЕУ). Найбільш вдосконаленими з них є комбіновані системи РГ, які використовують одночасно сонячні панелі і ВЕУ (рис. 1). При цьому сонячні панелі генерують постійний струм (DC generation), а ВЕУ генерує змінний струм (AC generation). ЕЕ від обох джерел перетворюється в постійний струм з певною величиною напруги, яка зазвичай визначається величиною напруги акумуляторної батареї (accumulator).

Неузгодженість за часом генерації і споживання ЕЕ викликає необхідність використання акумулятору, котрий виконує роль своєрідного енергетичного буфера.

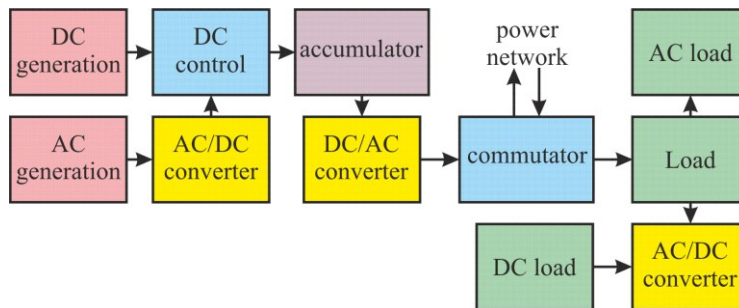


Рис. 1. Узагальнена схема монострумової системи

Для підвищення надійності електропостачання особливо в безвітряну і похмуру погоду системи РГ мають зв'язок із зовнішньою силовою мережею для перетікання ЕЕ, яка здійснюється через комутатор (commutator).

Система РГ (рис. 1) передбачає безпосереднє живлення тільки споживачів змінного струму (AC load), тому її можна назвати монострумовою. Змінний струм отримується завдяки перетворенню ЕЕ в інверторі (DC/AC converter). Споживачі постійного струму (DC load) змушені використовувати індивідуальні перетворювачі струму (AC/DC converter). Це безсумнівний недолік монострумової системи РГ, тому що ЕЕ при русі від пристрою генерації постійного струму двічі перетворюється, що викликає додаткові втрати потужності та зниження ККД. При значній загальній потужності споживачів постійного струму, коли вона порівнянна із загальною потужністю споживачів змінного струму, можна досягти істотного підвищення енергетичних показників системи РГ, якщо усунути подвійне перетворення ЕЕ завдяки використанню біструмової системи РГ (рис. 2). Співвідношення значень потужності споживачів змінного та постійного струмів суттєво залежить від об'єкта електропостачання, але для типового домоволодіння вони як правило порівнянні.

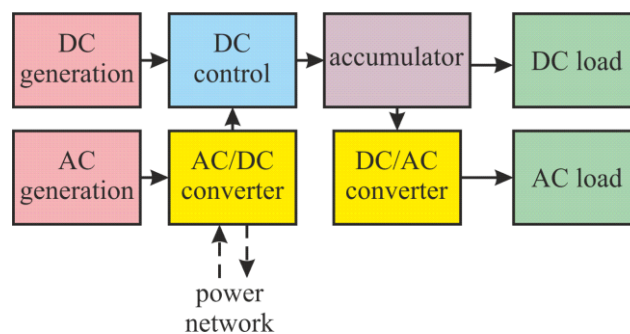


Рис. 2. Узагальнена схема біструмової системи

У біструмовій системі (рис. 2) споживачі постійного струму одержують живлення безпосередньо від акумуляторної батареї, що вимагає зведення всіх споживачів постійного струму до одного значення напруги. Проте використання двох розподільних мереж постійного та змінного струму може сприяти підвищенню енергетичної ефективності роботи системи РГ, що доводиться на основі використання методу відносних оцінок [12].

Основними перетворювачами в системі РГ є випрямлячі [13], інвертори [14] та пристрої регулювання рівня напруги постійного струму [15]. В цих елементах виникають втрати потужності на рівні до 10 % [13]. Слід враховувати можливість використання пристроїв регулювання кута нахилу сонячних панелей [16], котрі з одного боку сприяють підвищенню ефективності генерації ЕЕ, а з іншого збільшують власне споживання ЕЕ. Застосування перетворювачів ЕЕ призводить до ускладнення топології та проблемам аналізу систем РГ [17]. Тому намагання досягти зменшення кількості перетворювачів є затребуваним для систем РГ.

До 50 % причин втрати електропостачання в електричних мережах зазвичай пов'язані зі зовнішнім впливом природного характеру [18]. Для намагання максимального збереження електрообладнання систем РГ необхідно застосовувати пристрої релейного захисту, що підвищує загальну вартість системи РГ. Слід відзначити, що чим менше кількість елементів системи РГ, тим менше буде її вартість. Для виявлення переваг біструмової системи на підставі визначених акцентів виконується її порівняльний аналіз з монострумовою системою.

Фактор кількості ланок перетворення електричної енергії

Кількість ланок перетворення ЕЕ в системі РГ є вкрай важливим фактором, тому що при збільшенні кількості перетворювачів зростають капітальні витрати на її виробництво і монтаж, знижується надійність її роботи, збільшуються втрати потужності. Отже, треба прагнути використовувати мінімальну можливу кількість ланок перетворення ЕЕ.

Згідно з рис. 2 при використанні біструмової системи для споживачів постійного струму є нульове перетворення від генерації постійного струму, а для генерації змінного струму одноразове перетворення. Для споживачів змінного струму є подвійне перетворення від генерації змінного струму та одноразове перетворення від генерації постійного струму (табл. 1).

Таблиця 1

Кількість ланок перетворення монострумової та біструмової систем

Шлях проходження ЕЕ	Кількість ланок перетворення	
	Монострумова система	Біструмова система
DC-DC	2	0
AC-DC	3	1
DC-AC	1	1
AC-AC	2	2
Загалом	8	4

Таким чином, якщо порівнювати з монострумовою схемою електропостачання (рис. 1), спостерігається значне зниження ланок перетворення для споживачів постійного струму, а саме на дві від кожного виду генерації. Це означає істотне скорочення силових перетворювачів для живлення побутової техніки, що є підставою підвищення ККД системи в цілому. Загалом, згідно з табл. 1 спостерігається співвідношення ланок для монострумової та біструмової систем на рівні 8/4, що суттєво, а відповідно можна вважати, що перевага біструмової системи є безперечною за цим критерієм.

Алгоритм визначення ККД монострумової системи

Іншим важливим технічним показником, котрий може підтвердити гіпотезу переваги біструмової системи, є енергетична ефективність, яка зазвичай розраховується за допомогою визначення ККД або втрат потужності. Враховуючи, що силова частина обох систем лінійна, доцільно використати ККД в якості критерію енергетичної ефективності.

Алгоритм розрахунку ККД відповідає схемі монострумової системи РГ, яка зображена на рис. 3.

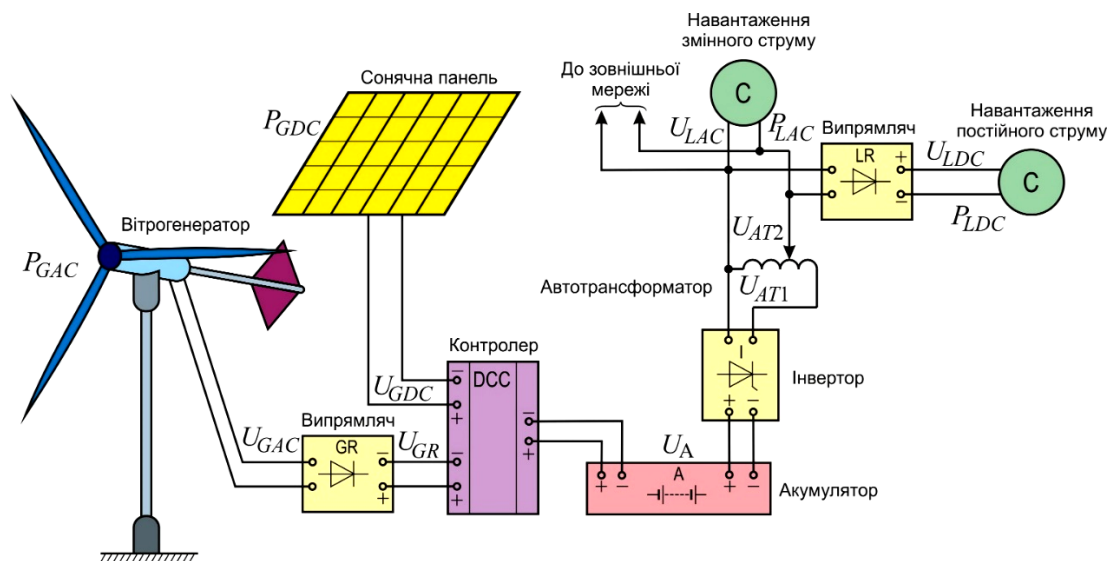


Рис. 3. Схема монострумової системи РГ

Для перетворення змінного струму, який одержується від ВЕУ, у постійний застосовується випрямляч GR. Струм від двох джерел генерації об'єднується в контролері DCC, який забезпечує зарядку акумулятора А і живлення системи споживання, котра реалізована на змінному струмі. Тому виконується перетворення постійної напруги в змінну за допомогою інвертора І. Для більш точного отримання номінального значення напруги навантаження використовується автотрансформатор. Також передбачена можливість підключення до зовнішньої електричної мережі, що підвищує надійність електропостачання та забезпечує гнучке регулювання розподілом ЕЕ.

Споживачі постійного струму мають індивідуальні перетворювачі роду струму, але для спрощення аналізу властивостей системи РГ застосовується узагальнення елемента перетворення і навантаження. Таке припущення не призводить до заниження ККД, а навпаки, небагато його завищує, але для попереднього якісного аналізу це не суттєво.

Розрахунок ККД монострумової системи виконується у порядку, котрий наведено нижче.

Струм у діодах випрямляча GR, А

$$I_{GR} = \frac{P_{GAC} \cdot 10^3}{U_{GAC} \cos \varphi_{GAC}} \approx \frac{P_{GR} \cdot 10^3}{U_A},$$

де P_{GAC} і U_{GAC} – відповідно, потужність і напруга ВЕУ; $\cos \varphi_{GAC}$ – коефіцієнт потужності ВЕУ.

За значенням струму I_{GR} за каталожним даними вибираються діоди (тиристори) та визначається їх опір у прямому напрямку r_{FGR} . Слід зазначити, що опір r_{FGR} ні є постійним і залежить від струму, який протікає через напівпровідник, але у попередніх якісних оцінках всі параметри силової частини вважаються сталими і дорівнюють номінальним значенням.

Втрати напруги на діодах (тиристорах) випрямляча GR, В

$$\Delta U_{GR} = I_{GR} r_{FGR}.$$

ККД випрямляча GR

$$\eta_{GR} = \frac{P_{2GR}}{P_{1GR}},$$

де P_{1GR} і P_{2GR} – споживана і корисна потужності випрямляча, кВт.

Але ця формула не дуже вдала для визначення ККД, тому що в першому наближенні для розрахунків фазових змінних потужності на вході та виході відповідних елементів системи РГ приймаються однаковими, таке припущення не призводить до значної похибки визначення фазових змінних, але не дозволяє визначити з високою точністю ККД. Тому корисна потужність повинна бути отримана в такий спосіб, кВт

$$P_{2GR} = P_{1GR} - 2\Delta U_{GR} I_{GR} \cdot 10^{-3}.$$

З урахуванням, що $P_{1GR} \approx P_{GAC}$ і $U_{GR} \approx U_{GAC} \approx U_A$, тоді струм, А

$$I_{GR} = \frac{P_{1GR} \cdot 10^3}{U_A \cos \varphi_{GAC}},$$

а, відповідно, корисна потужність кВт

$$P_{2GR} = P_{1GR} - 2\Delta U_{GR} \frac{P_{1GR}}{U_A \cos \varphi_{GAC}} = P_{1GR} \left(1 - \frac{2\Delta U_{GR}}{U_A \cos \varphi_{GAC}} \right).$$

Тоді ККД випрямляча

$$\eta_{GR} = \frac{P_{1GR} \left(1 - \frac{2\Delta U_{GR}}{U_A \cos \varphi_{GAC}} \right)}{P_{1GR}} = 1 - \frac{2\Delta U_{GR}}{U_A \cos \varphi_{GAC}}.$$

Якщо припустити, що потужність від сонячної панелі P_{GDC} повністю надходить у систему РГ, тоді ККД системи генерування монострумової схеми

$$\eta_G = \frac{P_{2G}}{P_{1G}} = \frac{P_{GDC} + P_{GAC} \eta_{GR}}{P_{GDC} + P_{GAC}}.$$

Струм тиристорів інвертора І, А

$$I_I = \frac{(P_{LAC} + P_{LDC}) \cdot 10^3}{U_I},$$

де P_{LAC} і P_{LDC} – відповідно, значення потужності споживачів змінного та постійного струмів, кВт; U_I – напруга інвертора, В.

По отриманому значенню струму за каталожним даними вибираються відповідні тиристори і визначається їх опір у прямому напрямку r_{FI} .

Втрата напруги на тиристорах інвертора, В

$$\Delta U_I = I_I r_{FI}.$$

ККД інвертора

$$\eta_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I}},$$

де P_{1I} і P_{2I} – споживана і корисна потужності інвертора, кВт.

Формула ККД інвертора також перетворюється. Корисна потужність, кВт

$$P_{2I} = P_{1I} - 2\Delta U_I I_I 10^{-3}.$$

Якщо прийняти, що $P_{1I} \approx P_{LAC} + P_{LDC}$ і $U_A \approx U_I$, тоді корисна потужність, кВт

$$P_{2I} = P_{1I} - 2\Delta U_I \frac{P_{1I}}{U_I} = P_{1I} \left(1 - \frac{2\Delta U_I}{U_A} \right).$$

ККД інвертора

$$\eta_I = \frac{P_{1I} \left(1 - \frac{2\Delta U_I}{U_A} \right)}{P_{1I}} = 1 - \frac{2\Delta U_I}{U_A}.$$

Для одержання загального ККД системи РГ необхідно узагальнити ККД системи споживання, яка представлена ланками постійного та змінного струмів. При цьому вважається, що потужність споживачів змінного струму P_{AL} може не дорівнювати потужності споживачів постійного струму P_{DL} .

ККД системи споживання

$$\eta_L = \frac{P_{LAC} + P_{LDC}}{P_{LAC} + P_{LDC} + \Sigma p_{LAC} + \Sigma p_{LDC}},$$

де Σp_{LAC} і Σp_{LDC} – загальні втрати потужності систем споживання змінного і постійного струмів, кВт.

Загальні втрати потужності системи споживання змінного струму, кВт

$$\Sigma p_{LAC} = \Sigma p_{AT} = P_{LAC}(1 - \eta_{AT}),$$

де Σp_{AT} – загальні втрати потужності в автотрансформаторі, кВт; η_{AT} – ККД автотрансформатора.

Загальні втрати потужності системи споживання постійного струму, кВт

$$\Sigma p_{LDC} = \Sigma p_{AT} + \Sigma p_{LR} = P_{LAC}[(1 - \eta_{AT}) + (1 - \eta_{LR})],$$

де Σp_{LR} – загальні втрати потужності в узагальненому випрямлячі споживачів постійного струму, кВт; η_{LR} – ККД узагальненого випрямляча споживачів постійного струму.

Після підстановки Σp_{LAC} і Σp_{LDC} у формулу ККД системи споживання вона здобуває вигляд:

$$\eta_L = \frac{P_{LAC} + P_{LDC}}{P_{LAC} + P_{LDC} + P_{LDC}(1 - \eta_{LR}) + P_{LDC}(1 - \eta_{AT}) + P_{LAC}(1 - \eta_{AT})},$$

або після спрощення

$$\eta_L = \frac{1}{2 - \eta_{AT} + \frac{P_{LDC}(1 - \eta_{LR})}{P_{LAC} + P_{LDC}}}.$$

Загальний ККД монострумової системи

$$\eta_{\Sigma mono} = \eta_G \eta_{DCC} \eta_A \eta_I \eta_L,$$

де η_{DCC} і η_A – відповідно ККД контролера та системи накопичення ЕЕ, значення яких визначаються обраною елементною базою системи РГ.

Алгоритм визначення ККД біструмової системи

Алгоритм розрахунку відповідає біструмовій схемі, яка зображена на рис. 4. Вона майже схожа за кількістю елементів та структурою зі схемою монострумової схеми (рис. 3), але має систему споживання, яка побудована окремо на постійному та змінному струмах.

Безпосереднє підключення споживачів постійного струму до акумулятора дозволяє усунути необхідність використання випрямлячів, що має місце у схемі (рис. 3).

Розрахунок ККД біструмової системи виконується за аналогічними порядком та припущеннями, як для монострумової системи. Аналогічно розраховується ККД випрямляча і системи генерування.

Розрахунок ККД інвертора виконується також аналогічно, але приймається до уваги, що струм інвертора відповідає лише потужності навантаження змінного струму, А

$$I_I = \frac{P_{LAC} \cdot 10^3}{U_I},$$

де P_{LAC} – значення потужності споживачів змінного струму, кВт; U_I – напруга інвертора, В.

Загальні втрати потужності системи споживання змінного струму, кВт

$$\Sigma p_{LAC} = \Sigma p_{AT} + \Sigma p_I = P_{LAC}[(1 - \eta_{AT}) + (1 - \eta_I)],$$

де Σp_{AT} і Σp_I – відповідно, загальні втрати потужності в автотрансформаторі та інверторі, кВт.

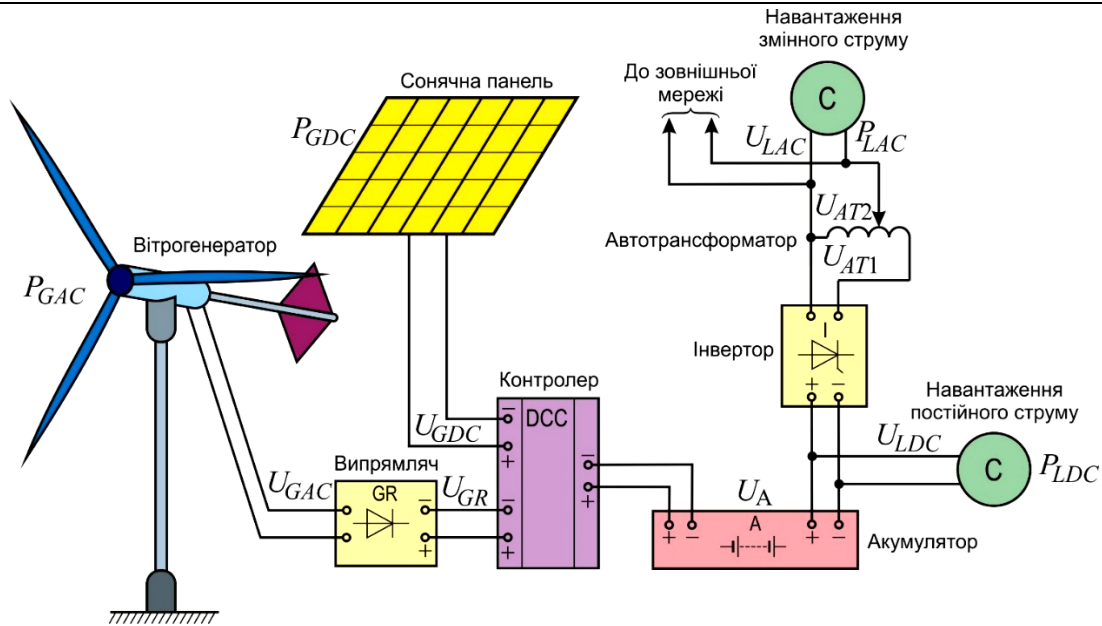


Рис. 4. Схема біструмової системи РГ

Загальні втрати потужності системи споживання постійного струму, кВт

$$\Sigma P_{LDC} \approx 0,$$

таке припущення можливо, якщо зневажити втратами потужності у дротах розподільної мережі, що для систем РГ, які мають досить короткі за довжиною лінії електропередачі, цілком можливо. Тоді ККД системи споживання

$$\eta_L = \frac{P_{LAC} + P_{LDC}}{P_{LAC} + P_{LDC} + P_{LAC}(1 - \eta_I) + P_{LAC}(1 - \eta_{AT})},$$

або після спрощення

$$\eta_L = \frac{1}{2 - \eta_{AT} + \frac{P_{LDC}(1 - \eta_{LR})}{P_{LAC} + P_{LDC}}}.$$

Загальний ККД біструмової системи РГ

$$\eta_{\Sigma bi} = \eta_G \eta_{DCC} \eta_A \eta_L.$$

Результати розрахунків ККД монострумової та біструмової систем РГ

При чисельному розрахунку приймалася максимальна подібність систем за значеннями потужності та напруги. Використовувалися наближені та узагальнені значення потрібних параметрів монострумової та біструмової систем: ККД автотрансформатора – 0,97; ККД контролера постійного струму – 0,97; ККД комутаційного пристрою акумулятора – 0,98; коефіцієнт потужності ВЕУ – 0,9; узагальнений ККД випрямлячів споживачів постійного струму – 0,88; потужність навантаження змінного струму – 3 кВт; потужність генерації змінного струму – 2,2 кВт; потужність навантаження постійного струму – 2 кВт; потужність генерації постійного струму – 8 кВт; напруга споживачів змінного струму – 220 В; напруга споживачів постійного струму і акумулятора – 110 В.

Потужність генерування більше номінальної загальної потужності споживання, що потрібно для компенсації коливання величини навантаження та забезпечення відповідного запасу потужності для підзарядки акумулятора, котрий необхідний для електропостачання в нічний час, похмуру погоду і при відсутності вітру.

Результати розрахунків ККД монострумової та біструмової систем узагальнені та наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків ККД монострумової та біструмової системи

Тип схеми	η_G	η_{DCC}	η_A	η_I	η_L	η_{Σ}
Монострумова	0,999	0,97	0,98	0,996	0,928	0,878
Біструмова	0,999	0,97	0,98	-	0,981	0,932

Згідно табл. 2 біструмова система має більш високе значення ККД. Воно перевищує значення ККД монострумової системи майже на 6 %. Але кількісна перевага біструмової системи може коливатися у деякому діапазоні у залежності від конкретних умов.

Порівняльний аналіз монострумової та біструмової систем

Для порівняння технічних показників монострумової та біструмової систем використовується метод відносних порівняльних оцінок [12] на основі двох складових: кількості ланок перетворення ЕЕ і ККД системи. Результати розрахунку відносних оцінок зведені у табл. 3.

Таблиця 3

Таблиця відносних оцінок

Тип схеми	Розрахунок для кількості ланок		Розрахунок для ККД		Загальна відносна оцінка
	Кількість ланок перетворення ЕЕ	Кількість балів	ККД	Кількість балів	
Монострумова	8	0,5	0,878	0,94	1,44
Біструмова	4	1	0,932	1	2

За даними табл. 3 біструмова система переважає монострумову систему на 0,56 бали. При загальній максимальній кількості балів у два, це становить 28 %, що свідчить про однозначну перевагу біструмової системи навіть із урахуванням окремих припущень і похибок розрахунків, які притаманні попередньому якісному розрахунку.

Висновки

Розрахунок ККД монострумової та біструмової систем за типовими узагальненими вихідними даними, які можна віднести до більшості стандартних домоволодінь, а також проведений порівняльний аналіз технічних показників систем РГ за допомогою методу відносних порівняльних оцінок, показали беззаперечну перевагу біструмової системи РГ, яка за загальною оцінкою випередила монострумову систему на 28 %.

Література

- Métayer P. L., Loeuillet Q., Wallart F., Buttay C., Dujic D., Dworakowski P. Phase-Shifted Full Bridge DC–DC Converter for Photovoltaic MVDC Power Collection Networks. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, p. 19039-19048. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3247952>.
- Adebayo Adeniyi Daavid, Chinedu James Ujam. An overview of distributed generation in power systems. *International Journal of Frontline Research in Engineering and Technology*, 2022, 01(01), 27–33. DOI: <https://doi.org/10.56355/ijfret.2022.1.1.0001>.
- Zineb El Idrissi, Faissal El Mariami, Abdelaziz Belfqih, Touria Haidi. Impact of distributed power generation on protection coordination in distribution network. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, vol. 23, No. 3, p. 1271-1280. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i3.pp1271-1280>.
- Muhammad Ahmad Baballe. A review on the impact of solar power energy. *Global Journal of Research in Engineering & Computer Sciences*, 2021, vol. 01, issue 01, p. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5701335>.
- Muhammad Babalie Ahmad, Isa Ibrahim, Umar Shehu. The need for solar power energy. *Conference ISASE*, 2021, p. 515-518.
- Tywniuk A., Skorupka Z. Storage of wind power energy. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2019, vol. 26, No. 4, p. 257-264. DOI: <https://doi.org/10.2478/kones-2019-0116>.
- Shivangee Shukla, Pooja Maurya. Generator and power converter topology for wind energy conversion system. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 2012. Vol. 3, Issue 1. p. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v3i1.1612>.
- Ashique R. H. A Review of high efficiency non-isolated DC-DC power converters for electric vehicle charging application. *GUB Journal of Science and Engineering*, 2020. 6(1), 60–74. DOI: <https://doi.org/10.3329/gubjse.v6i1.52052>.
- Yuting Pan, Yuchen Chen, Zhiqiang Yuan, Bo Liu. The real-time research of optimal power flow calculation in reduce active power loss aspects of power grid // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2015, Vol. 6, Issue 2, p. 78-82. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2015.060212>.
- Yejun Xie, Zhendong Liu, Yongchao Pan, Fei Li, Taiming Jiao, Xiaojuan Li. Minimum reactive power loss optimization of power grid systems based on improved differential evolution algorithm. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.*, 2021, vol. 675, article ID: 012159. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012159>.
- Thornton A., Rodríguez-Monroy C. Distributed power generation in the United States // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, vol. 15, issue 9, p. 4809-4817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.070>.
- Kimstach O. Yu. Definition of optimal structure of power network // *Problemele energeticii regionale*, 2019, vol. 1 (39), p. 22-33. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2650415>.
- Alam M. D., Rahman Khan M. Z., Choudhury M. A., Flyback AC-DC Rectifier with Active Power Factor Correction. *10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, Bangladesh, 2018, p. 485-488. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECE.2018.8636813>.
- Hoff E. S., Norum L. E. Inverter control for distributed generation // *12th International Power Electronics*

and Motion Control Conference, Portoroz, Slovenia, 2006, p. 544-549. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778456>.

15. Liu F., Chen Y., Shi J., Qu L., Zi Z., Yu Z. Studies of large-scale DC connected photovoltaic power system based on multi-modular cascaded DC-DC converter // IET Gener. Transm. Distrib. 2023, vol. 17, p. 3419–3428. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12867>.

16. Linares-Flores J., Hernández-Mendez A., Juárez-Abad J. A., Contreras-Ordaz M. A., García-Rodríguez C., Guerrero-Castellanos J. F. MPPT novel controller based on passivity for the PV solar panel-boost power converter combination. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3274618>.

17. Javid Z., Xue T., Karaagac U., Kocar I. Unified Power flow solver for hybrid AC/DC distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3271311>.

18. Farouk N., Elmardi O., Alzeber H., Mansir I. Effects of electric power blackouts on steam turbine power plants. Palarch's Journal Of Archaeology Of Egypt/Egyptology, 2021, vol. 17(6), p. 8174-8181.