

УДК 621.314

Каплун В. В., д-р. техн. наук

Шавьолкін О. О., д-р. техн. наук

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ПОНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Розглянуто систему електроживлення, що містить централізовану мережу змінного струму в комбінації з сонячною батареєю та вітрогенератором. Запропоновано використання мережевого інвертора в режимі джерела струму з функцією активного силового фільтра. Розроблена структура силових кіл перетворювального агрегату та системи автоматичного регулювання з регулятором потужності.

Ключові слова: централізована мережа, сонячна батарея, вітрогенератор, регулятор потужності, релейний регулятор струму, інвертор, імпульсний перетворювач постійної напруги, моделювання.

Каплун В. В., д-р. техн. наук

Шавьолкін А. А., д-р. техн. наук

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Рассмотрено систему электропитания, содержащую централизованную сеть переменного тока в комбинации с солнечной батареей и ветрогенератором. Предложено использовать сетевой инвертор в режиме источника тока с функцией активного силового фильтра. Разработана структура силовых цепей преобразовательного агрегата и системы автоматического регулирования с регулятором мощности.

Ключевые слова: централизованная сеть, солнечная батарея, ветрогенератор, регулятор мощности, релейный регулятор тока, инвертор, импульсный преобразователь постоянного напряжения, моделирование.

Kaplun V. V., Dr. techn. sciences

Shavelkin A. A., Dr. techn. sciences

IMPROVEMENT OF CONVERTING UNIT OF COMBINED POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract. The electricity supply system, which comprises a central AC network in combination with a solar panels and wind generator are considered. It is proposed to use the network inverter in current source mode with the function of the active power filter. There are developed the main circuit structure of the converter unit and the automatic control system with power regulator.

Keywords: centralized network, solar panel, wind turbine, power regulator, relay current regulator, the inverter, pulsed DC converter, modeling.

Вступ. Широке впровадження поновлюваних джерел (ПД) електроенергії у локальних системах електрозабезпечення (сонячних батарей (СБ), вітрогенераторів (ВГ)) створює можливості для їх паралельної роботи з централізованою мережею (ЦМ). Особливо це актуально в умовах дії «зелених» тарифів [1], коли споживач стає, в певній мірі, учасником регіонального енергоринку: надлишок електроенергії, який генерується ПД, віддається у ЦМ, підвищуючи цим самим ефективність функціонування таких систем. Інтегровані у єдину мікроенергетичну систему джерела електроенергії (насамперед, поновлювані) з можливістю паралельної роботи з ЦМ утворюють комбіновану систему електроживлення (КСЕ) [2]. Енергетичний зв'язок між джерелами і узгодження

їх режимів роботи забезпечує напівпровідниковий перетворювальний агрегат (ПА), основним елементом якого є мережевий автономний інвертор напруги (АІН), що забезпечує передачу енергії від СБ і ВГ.

Автономні системи електроживлення (АСЕ) з СБ і ВГ, а також КСЕ випускаються значною кількістю виробників у завершеному вигляді, також виготовляються і окремі елементи систем [3, 4, 5]. Питання підвищення ефективності функціонування АСЕ і КСЕ є предметом розгляду багатьох дослідників [2, 6, 7]. Основна увага приділяється питанням відбору максимальної потужності від джерел електроенергії – контролери МРРТ (Maximum power point tracking), контролерам заряду акумуляторної батареї (АКБ), реалізації мережевих АІН [6, 7]. Стосовно АІН звичайно

розглядається формування «чистої синусоїди» напруги, що цілком виправдано для АСЕ але не є однозначним для КСЕ.

Навантаження сучасної будівлі споживає реактивну потужність, є нелінійним і спотворює струм, що споживається з ЦМ. Щодо гармонійного складу струму споживання існують стандарти МЕК [8, 9]. В КСЕ присутні два джерела електроенергії – одне (з боку АІН) є стабілізованим за напругою, інше – ЦМ, яка у більшості локальних об'єктів, що віддалені від розподільчих пунктів в умовах їхньої перевантаженості, має коливання напруги, що можуть перевищувати припустимі значення. Отже, виникають питання забезпечення сумісності їх роботи і забезпечення коефіцієнту потужності близького до 1. Певні можливості фільтро-компенсуючого пристрою має мережевий АІН [10]. Важливим питанням у КСЕ є використання АКБ, яка є «слабкою ланкою» і має найменший термін експлуатації внаслідок значної кількості циклів заряджання – розряджання. У КСЕ використання АКБ є не обов'язковим, а у разі використання АКБ ємність її має бути мінімальною – за умов резервного живлення. Для збільшення терміну експлуатації АКБ кількість циклів «глибокого» розряду слід обмежити до мінімуму – для нештатних (аварійних) ситуацій. За відсутністю АКБ мережевий АІН повинен забезпечувати функції МРРТ – підтримувати відбір максимальної потужності від ПД.

Мега роботи — узгодження функціонування джерел електроенергії шляхом удосконалення перетворювального агрегату КСЕ і системи керування нею.

Завдання, що підлягають вирішенню:

- розробити структуру силових кіл ПА і системи керування КСЕ, що забезпечить відбір і передачу максимальної потужності від ПД у ЦМ і навантаження із забезпеченням потрібної якості струму;
- розробити математичну модель КСЕ з ПА;
- здійснити імітаційне моделювання щодо перевірки працездатності одержаних рішень.

Викладення основного матеріалу. Запропонована структура КСЕ містить наступні елементи: ЦМ, навантаження і мережевий АІН, що підключені паралельно. У вихідне коло АІН введено буферний реактор. Для

забезпечення відпрацювання заданого (довільного) значення вихідного струму АІН незалежно від значення напруги ЦМ вхідна постійна напруга АІН U_d повинна перевищувати амплітуду напруги ЦМ (U_{1m}) $U_d \geq 1.1 U_{1m}$. Задане значення $U_d = const$ формує підвищувальний імпульсний перетворювач постійної напруги (ІП) на вході АІН – ІП1. Кожне з ПД для узгодження вихідної напруги має свій ІП, виходи яких з'єднані паралельно і підключені до входу ІП1 і АКБ (якщо вона використовується). Так, для послідовно-паралельного з'єднання СБ типу LDK250PA з вихідною напругою близько 60 В і у разі використання ВГ і АКБ з номінальною напругою 48 В (напруга повністю зарядженої АКБ $14.4 \times 4 = 57,6$ В) ІП3 для ВГ підвищувальний (напруга 48 В відповідає номінальній швидкості вітру), для СБ - ІП2 знижувальний.

Щодо обраної структури ПА доцільним є використання зовнішнього регулятора потужності (РП), що забезпечує передачу потужності поновлюваних джерел АІН. За умови постійності напруги на вході АІН U_d потужність, що передається ним, визначається вхідним струмом АІН i_d (його середнім значенням I_d) $P_1 = P_d = U_d I_d$. Задане значення струму $I_{dзад}$ визначається потужністю СБ і ВГ, що в свою чергу, визначається вихідними струмами ІП2, ІП3 і напругою на вході ІП1. За коефіцієнтом потужності, що дорівнює 1 значення $P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_1 I_{1m} / \sqrt{2}$. Тобто заданому значенню потужності відповідає певне значення амплітуди струму мережі I_{1m} , яке формується пропорційно-інтегральним (ІІ) регулятором РП (рис.1).

Рівняння для миттєвих значень струмів у точці підключення ЦМ, АІН і навантаження $I_{1m} \sin \omega t = i_H + i_{АІН}$, де i_H , $i_{АІН}$ – відповідно, струми навантаження та вихідний АІН. Згідно цього визначається задане значення струму, що формується АІН, релейним регулятором струму РРС. На вході РРС подаються задане $i_{АІНзад}$ і фактичне значення струму $i_{АІНф}$, з виходу РРС - у систему керування АІН (СКАІН), що формує імпульси керування транзисторами за певним алгоритмом.

ІП1 має два контури регулювання (рис.1) внутрішній – вхідного струму з РРС і зовнішній - напруги U_d з ІІ регулятором напруги

(РН). ПП СБ і ВГ мають РРС, що забезпечують струму ЦМ i_l і i_l , струму навантаження i_H ,

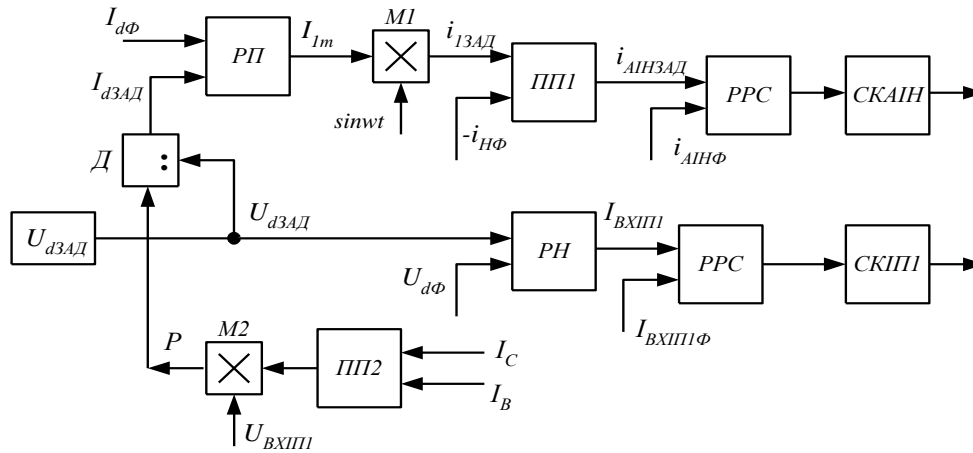


Рис.1. Структурна схема системи автоматичного регулювання ПА КСЕ

чують роботу джерел із струмом, який відповідає значенню їх максимальної потужності.

Математична модель КСЕ. Містить модель ЦМ з активним і індуктивним опорами, навантаження (активно-індуктивне або нелінійне – випрямляч з вихідним ємнісним фільтром), модель ПА з системою керування. Оскільки розглядається функціонування КСЕ у загальному випадку, використано спрощені моделі ПД у вигляді джерел напруги, від яких відбирається струм певного значення за підключенням ПП2 і ПП3. Модель АКБ також спрощена - у вигляді джерела ЕРС з опором за умови повного зарядження.

Результати імітаційного моделювання. На рис.2 наведені осцилограми напруги і

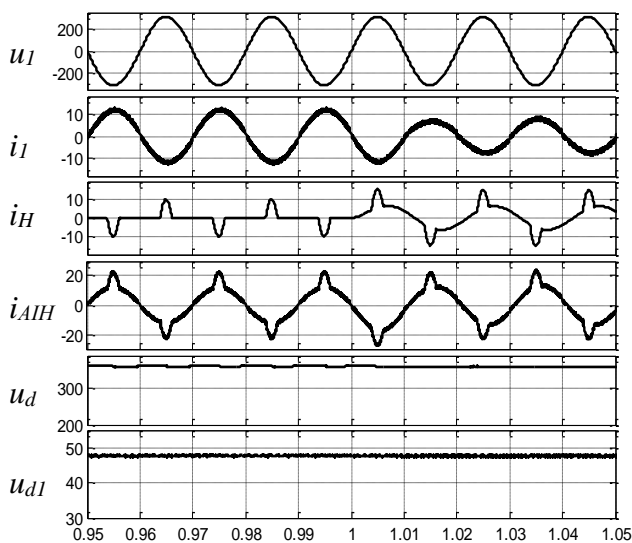


Рис.2. Осцилограми струмів і напруги в КСЕ

струму АІН i_{AIN} , напруги на вході АІН u_d , струму АКБ i_{AKB} для КСЕ без АКБ у разі нелінійного навантаження з наступним підключенням активно-індуктивного навантаження за постійної потужності, що генерується ПД. Отже, струм i_l залишається синусоїдальним і зменшується із збільшенням навантаження.

Для КСЕ з АКБ на рис.3,а наведені осцилограми при роботі з активно-індуктивним навантаженням і змінюванням потужності, що генерується ПД. Спочатку навантаження відсутнє і вся потужність передається у ЦМ – i_l максимальний. При $t=0.6$ с вмикається активно-індуктивне навантаження, потужність P_l , що передається у ЦМ, зменшується – зменшується i_l . При зростанні i_H ($t=1$ с) відбувається подальше зменшення P_l . При $t=1.2$ с потужність, що генерується ВГ, починає збільшуватись – зростає i_l і P_l . На рис.3,б наведені осцилограми для КСЕ без АКБ у аналогічних режимах роботи. У даному разі напруга на вході ПП1 u_{d1} не є постійною і при зростанні потужності ВГ збільшується.

Висновки за результатами дослідження. Використання мережевого АІН у режимі джерела струму з зовнішнім регулятором потужності забезпечує передавання енергії СБ і ВГ за максимальної їх потужності та коефіцієнті потужності (відносно ЦМ) близькому до одиниці. Розроблена структура перетворювального агрегату не потребує використання АКБ.

Подальший напрямок робіт:

- вирішення завдання коректного функціонування перетворювального агрегату КСЕ за

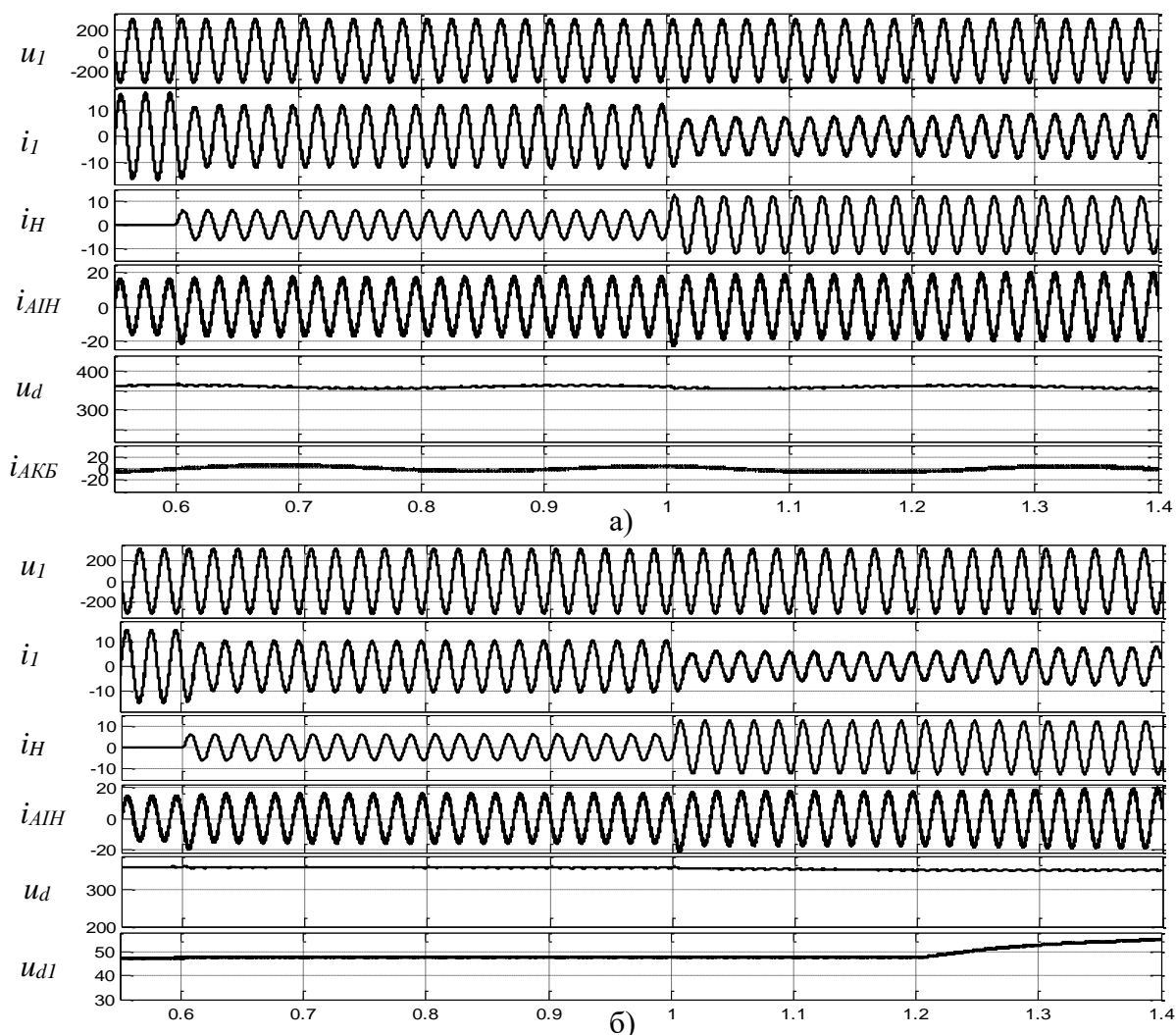


Рис. 3. Осцилограмми струмів і напруги КСЕ: а) за наявності АКБ; б) АКБ – відсутня

умови введення вольтододаткових пристроїв для стабілізації напруги локального об'єкта у разі коливань напруги ЦМ;

- дослідження функціонування КСЕ з ПА при пусках асинхронного двигуна сумірної потужності та у аварійних режимах (значному зниженні рівня генерації ПД).

Список використаної літератури

1. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств [Текст]/ Постанова НКРЕКП № 2046 від 20.07.2015 р.

2. Каплун В. В. Комбіновані системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії [Текст] / В. В. Каплун, В. В. Козирський, А. В.Петренко – К.: ЦТІ «Аграр Медіа Груп», 2011. – 330с.: іл.134.

3. ВЕКAR. Ветро-солнечная система. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/>

4. Солнечные батареи для дома. [Electronic resource]. – <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>

5. Солнечная электростанция для дома. [Electronic resource]. <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/>

6. Иванчура В.И. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания [Текст]/ В. И. Иванчура, А. В. Чубарь, С. С. Пост// Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2 (2012 5) – С.179–190

7. El-helw Н. Maximum power point tracking for irregular irradiance of a photovoltaic

array [Текст]/H. El-helw, M. Hassanien, and H. A. Ashour// In Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference, p. 52–57. IEEE, 2013.

8. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992.

9. EN 61000-3-2:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).

10. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник [Текст]/О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.

Одержано 11.05.2016.

References

1. Pro vstanovlennia – zelenyhl taryfiv na elektrychnu energiu dla pryvatnyh hospodarstv/ Postanova NKREKP 2046 vid 20.07.2015 [About establishment of "green" tariffs on electric energy for private house / Resolution NKRE №2046 from 20.07.2015]. – Available at: <http://www.zakon3.rada.gov.ua/aws/show/z0942-5> (In Ukrainian).

2. Kaplun V.V. Kombinovani sistemi elektrozhlivlennja z ponovljuvanimi dzherelami energii [Combined power systems with renewable energy]/ V.V.Kaplun, V.V.Kozirskij, A.V.Petrenko – К.: СТІ «Agrar Media Grup», 2011. – 330s.: il.134. (In Ukrainian).

3. BEKAR. Vetro-solnechnaja sistema [BEKAR.Wind-solar system]. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/> (In Russian).

4. Solnechnye batarei dlja doma. [Solar battery for house] [Electronic resource]. – <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/> (In Russian).

5. Solnechnaja jelektrostancija dlja doma. [Solar powerstation for house] [Electronic resource]. – <http://greenvolt.ru/energiya-solnca/solnechnaya-elektrostanciya-dlya-doma-batarei-i-paneli/> (In Russian).

6. Ivanchura V.I., Chubar' A. V., Post S. S. Jenergeticheskie modeli jelementov avtonomnyh sistem jelektropitanija [Energy Prototypes of Units in Autonomous Power Supply Systems]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2 (2012 5). – pp.179 -190 (In Russian).

7. H. El-helw, M. Hassanien, and H. A. Ashour. Maximum power point tracking for irregular irradiance of a photovoltaic array. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, pages 52–57. IEEE, 2013. (In English).

8. IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992. (In English).

9. EN 61000-3-2:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). (In English).

10. Shav'olkin O. O. Silovi napivprovodnikovyi peretvorjuvachi energii : navch. Posibnik [Power semiconductor converters of energy: teach. manual] / O. O. Shav'olkin; Harkiv. nac. un-t. mis'k. gosp-va im. O. M. Beketova. – Harkiv : HNUMG im. O. M. Beketova, 2015. – 403 s. (In Ukrainian).



Каплун Віктор Володимирович, д-р. техн. наук, проректор з наукової та інноваційної роботи, КНУТД, вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, 01011, тел. +38044-280-1 E-mail: kaplun.v@knutd.com.ua



Шавьолкін Олександр Олексійович, д-р. техн. наук, професор кафедри електроніки та електротехніки, КНУТД, вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, E-mail: shavelkin57@mail.ru