

УДК 621.314

ШАВЬОЛКІН О.О.

Київський національний університет технологій та дизайну

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИЙ АГРЕГАТ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ПОНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Мета. Удосконалення функціональних можливостей перетворювального агрегату з покращеними енергетичними показниками.

Методика. Синтез структури силових кіл і системи керування перетворювального агрегату для комбінованої системи електроживлення з двома поновлювальними джерелами за паралельною роботою з централізованою мережею на основі аналізу електромагнітних процесів у електричних колах з напівпровідниковими пристроями з використанням комп'ютерного моделювання.

Результати. Визначені можливості реалізації режимів функціонування системи, розроблено її структуру з підвищувальними перетворювачами поновлювальних джерел, виходи яких з'єднані з входом проміжного підвищувального перетворювача на вході інвертора; обґрунтовано систему керування, що підпорядкована регулятору напруги, функція якого визначається режимом роботи; розроблено комп'ютерну модель перетворювального агрегату з джерелами, мережею і навантаженням.

Наукова новизна. Запропоновано трирівневий релейний регулятор, удосконалено систему з трьома джерелами без акумуляторної батареї.

Практична значимість. Отримані рішення є основою для проектування комбінованих систем малої потужності з поновлювальними джерелами енергії.

Ключові слова: комбінована система електроживлення, поновлювані джерела енергії, інвертор напруги в режимі джерела струму, релейний регулятор струму, трирівневий релейний регулятор, регулятор напруги, автономний режим, моделювання.

Вступ. Актуальність розробки обумовлена потребами широкого впровадження локальних систем з поновлювальними джерелами енергії (ПДЕ) в умовах дії в Україні «зелених» тарифів [1] і міжнародних стандартів якості електроенергії [2], коли поряд з питанням генерування електроенергії стає питання забезпечення її якості. Удосконалення і запровадження систем з ПДЕ сприяє енергетичній безпеці України. Такі системи знаходять використання для житлових та офісних будівель, малих підприємств та інших локальних об'єктів. Питання щодо автономних систем електроживлення (АСЕ) з ПДЕ практично вирішено. Вітро-сонячні електростанції серійно випускаються багатьма виробниками [3].

Комбіновані системи електроживлення (КСЕ) [4] містять декілька різних ПДЕ, які через перетворювальний агрегат (ПА) з мережевим автономним інвертором напруги (МАІН) підключені до споживача і централізованої мережі (ЦМ). Об'єкти, зазвичай, є віддаленими від розподільчих пунктів і використовують існуючі ЦМ з обмеженою пропускнуною спроможністю. Сучасне навантаження споживає реактивну потужність, має нелінійний характер і генерує вищі гармоніки. Підвищення коефіцієнту потужності χ на затискачах ЦМ зменшить втрати енергії і суттєво підвищить пропускну спроможність мережі.

Постановка задачі. Існуючі структури КСЕ аналогічні АСЕ і використовують ведений мережею МАІН в режимі джерела синусоїдальної напруги. За наявності потужної акумуляторної батареї (АКБ) мають автономний режим (у разі відключення ЦМ), за відсутності АКБ – ні. Виключення з КСЕ потужних АКБ, які мають малий термін

експлуатації і значну вартість, дозволить зменшити вартість КСЕ і термін їх окупності. Але слід враховувати і підтримання комфортних умов споживача локального об'єкту у нештатних режимах.

В сучасних розробках основна увага приділяється суміщенню МАІН функції фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП). В [5] питання розглядається щодо установи, яка працює паралельно з ЦМ і не має автономного режиму роботи. В [6] для системи з сонячною батареєю (СБ) передбачена робота у «нічному» режимі роботи, коли МАІН використовується як ФКП для навантаження об'єкту. В [7] розглядається КСЕ, яка працює паралельно з ЦМ і в автономному режимі з використанням АКБ і без неї. Проте ряд питань декларується і вивчено недостатньо. Це стосується керування МАІН у автономному режимі, реалізації їм функції безперервного живлення. Недостатньо вивчені питання розбудови структури ПА і системи керування за можливості реалізації різних режимів функціонування ПА КСЕ.

Результати дослідження. Почнемо з розгляду режимів функціонування перетворювального агрегату КСЕ і визначення можливостей їх реалізації:

1. Робота паралельно з ЦМ з функцією ФКП. Якщо генерована активна потужність ПДЕ $P_{ПДЕ}$ перевищує потужність навантаження P_H має місце передавання енергії у ЦМ, у протилежному випадку недостатня активна потужність споживається з ЦМ. За цього на затисках ЦМ підтримується коефіцієнт потужності $\chi=1$.

2. Робота з ЦМ за $P_{ПДЕ}=0$. Підтримується $\chi=1$ і ПА не передає активну потужність.

3. Автономний режим ПА на навантаження (у разі відключення ЦМ) за $P_{ПДЕ} > 0$.

3.1. У разі використання в ПА АКБ значної ємності. Якщо $P_{ПДЕ} > P_H$ має місце заряджання АКБ. За повного заряду АКБ (100%) виникає потреба зменшення $P_{ПДЕ}$. Якщо $P_{ПДЕ} < P_H$, то недостатня потужність споживається з АКБ і має місце її розряджання.

3.2. За відсутності АКБ. Якщо $P_{ПДЕ} > P_H$ є потреба регулювання (зменшення) $P_{ПДЕ}$. Якщо $P_{ПДЕ} < P_H$ виникає питання обмеження P_H . Це можливо шляхом відключення певного навантаження і регулюванням $P_{ПДЕ}$ для підтримання балансу енергії. Можна запропонувати регулювання P_H за рахунок змінювання напруги у припустимих межах $\pm 10\%$, що дає можливість отримати потужність навантаження ($0.8 \div 1.2$) P відносно поточного значення.

3.3. У разі використання «резервної» АКБ мінімальної ємності. За цього реалізація питань п. 3.2 спрощується підключенням АКБ для скидання надлишкової енергії або відбирання недостатньої.

4. Аварійний автономний режим за відсутності живлення ЦМ і генерації ПДЕ, коли за використанням «резервної» АКБ здійснюється безперебійне живлення окремих споживачів.

Отже, повноцінне функціонування КСЕ можливо забезпечити без АКБ з ємністю, яка розрахована на максимальне навантаження, і має використовуватися лише у режимах 3 і 4. Доцільним виглядає варіант КСЕ з використанням «резервної» АКБ, що виключає потребу у додатковому джерелі безперебійного живлення.

Розглянемо ПА КСЕ, що працює на однофазну ЦМ з використанням СБ на максимальну потужність 3 кВт і вітрогенератору (ВГ) типу EuroWind 2 з максимальною потужністю 3 кВт. У ВГ застосовано трифазний синхронний генератор з постійними магнітами. ВГ працює за швидкістю вітру $2 \div 12$ м/с і за номінальною швидкістю має вихідну напругу 120 В. Напруга ВГ пропорційна швидкості і змінюється від 20 до 120 В. СБ

складається з 12 панелей потужністю 250 Вт і напругою близько 30 В за максимальної освітленості. Напруга СБ залежно від освітленості теж суттєво змінюється.

Запропонована структура силових кіл ПА наведена на рис.1,а, схема підключення МАІН до ЦМ і навантаження на рис.1,б. Маємо два кола постійного струму: спільне для ПДЕ утворюють їх імпульсні перетворювачі ІП1, ІП2 (ВГ підключено до ІП2 через трифазний випрямляч - В), що за виходом з'єднані паралельно і вхідне МАІН. Для функціонування МАІН з функцією ФКП необхідно підтримувати на його вході напругу $U_d \geq 1.1U_{1m}$ (U_{1m} - амплітуда напруги ЦМ). Для цього в схему введено підвищувальний ІП3. З урахуванням змінювання напруги ПДЕ доцільно використовувати підвищувальні перетворювачі. Для підвищення напруги СБ з'єднуємо сонячні панелі у 2 паралельні гілки по шість панелей послідовно з максимальною напругою близько 180 В. Резервна АКБ підключена через знижувальний ІП4, що забезпечує її заряджання і у разі $P_{ПДЕ} = 0$, за потреби, подає живлення на ІП3 безпосередньо. ІП1 і ІП2 мають релейні регулятори вхідного струму, що забезпечує керований відбір потрібної (максимальної) потужності від ПДЕ. ІП3 має релейний регулятор

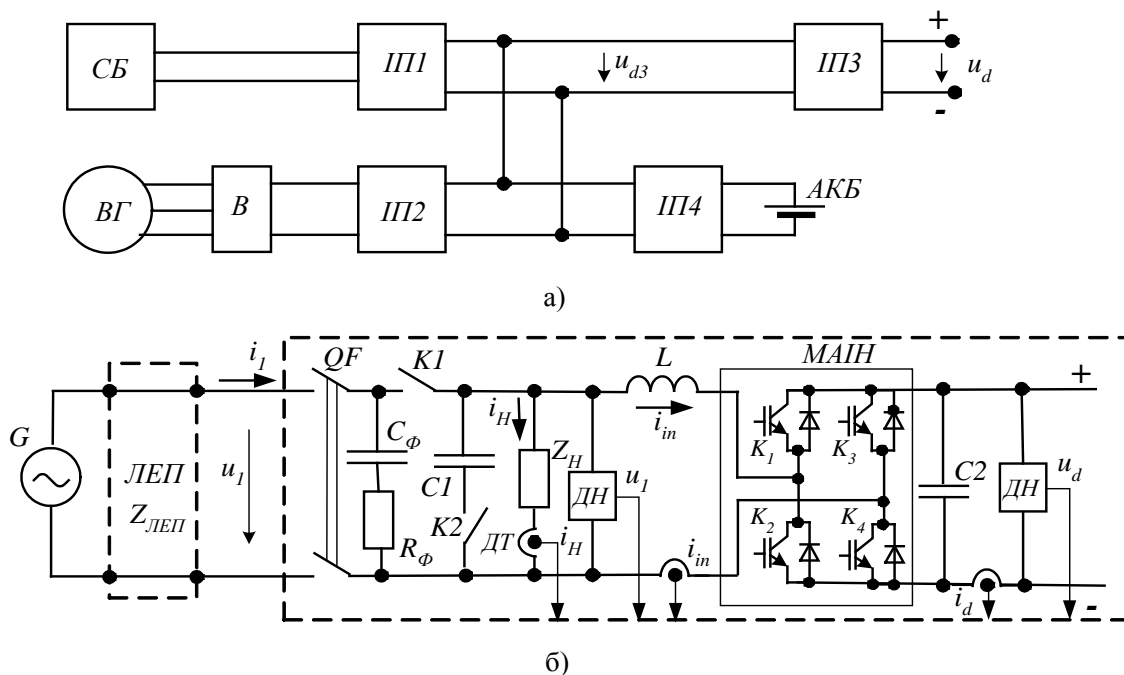


Рис. 1. Структурна схема силових кіл ПА (а),
 підключення МАІН до ЦМ і навантаження (б)

вхідного струму (РРС), завдання якого $I_{зад} \leq \frac{P_{ПДЕ}}{U_{ПДЕМАХ}}$ ($U_{ПДЕМАХ}$ - напруга ПДЕ, яка на даний момент є найбільшою) або визначається регулятором напруги (РН).

Запропонована структура кола підключення МАІН (рис.1,б) містить: ЦМ (джерело змінного струму G, лінію електропередавання (ЛЕП) з опором $Z_{ЛЕП}$), однофазний мостовий МАІН на чотирьох ключах $K_1 \div K_4$ (IGBT зі зворотним діодом), автоматичний вимикач QF, контактор K_1 для підключення до ЦМ, контактор K_2 для підключення конденсатора C_1 , навантаження Z_H , реактор L , конденсатор на вході МАІН C_2 , датчики напруги u_1, u_d , датчики

струму i_H , i_{in} , i_d . Для придушення високочастотних гармонік встановлено фільтр (R_ϕ, C_ϕ). Використання у вихідних колах МАІН конденсатору у разі роботи з ЦМ є недоречним, адже напруга ЦМ є синусоїдальною, і призводить до додаткового завантаження МАІН за струмом. До того ж, наявність ємності у колі з індуктивністю може спричинити резонанс.

МАІН використовується у режимі джерела змінного струму з РРС. Для зменшення втрат енергії на перемикання ключів МАІН запропоновано використати трирівневий РРС, який має додатковий релейний елемент (РЕ) з рівнем спрацьовування $\delta_I = (1.2 \div 1.5)\delta$ (δ - задане відхилення РРС), що забезпечує реалізацію однополярної модуляції [8].

Робота МАІН паралельно ЦМ. Задане значення струму i^*_{in} для МАІН визначається рівнянням $I_{1m} \sin \omega t = i_H + i_{in}$. За умови балансу потужності у колі, напруга U_d має бути постійною, що забезпечується пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором напруги РН, який визначає значення I_{1m} . Отже МАІН працює, як ведений мережею, за функцією $\sin \omega t$, що визначається згідно u_1 . Ця ж структура працює і у разі роботи МАІН з ЦМ за $P_{ПДЕ} = 0$, коли МАІН забезпечує лише функцію ФКП.

Автономний режим роботи. У разі зникнення напруги ЦМ контактор К1 відключається. Для забезпечення синусоїдальної форми напруги навантаження контактором К2 підключається конденсатор $C1$ і МАІН працює з LC фільтром. Для формування миттєвого значення напруги МАІН u_1 запропонована двоконтурна система регулювання з зовнішнім пропорційно-інтегральним РН і внутрішнім контуром струму з РРС. Завдання напруги формується генератором синусоїдальної напруги. Така побудова системи регулювання дозволяє виключити викривлення форми напруги у разі нелінійного навантаження, здійснити обмеження вихідного струму МАІН, що потрібно для виключення пошкодження ключів у перехідних режимах роботи. Також можливо регулювання амплітуди напруги U_{1m} і, відповідно, потужності навантаження. Підтримання напруги U_d у цьому разі забезпечує ПІ регулятор напруги, що визначає завдання $I_{Зад}$ для РРС перетворювача ПЗ.

Результати комп'ютерного моделювання. Моделювання здійснювалось для системи, що відповідає рис.1. Розглядалась робота МАІН на активно-індуктивне і нелінійне навантаження. В якості нелінійного навантаження використано випрямляч з вихідним ємнісним фільтром. ПДЕ розглядалися спрощено, як джерела напруги, що навантажені відповідними ПІ.

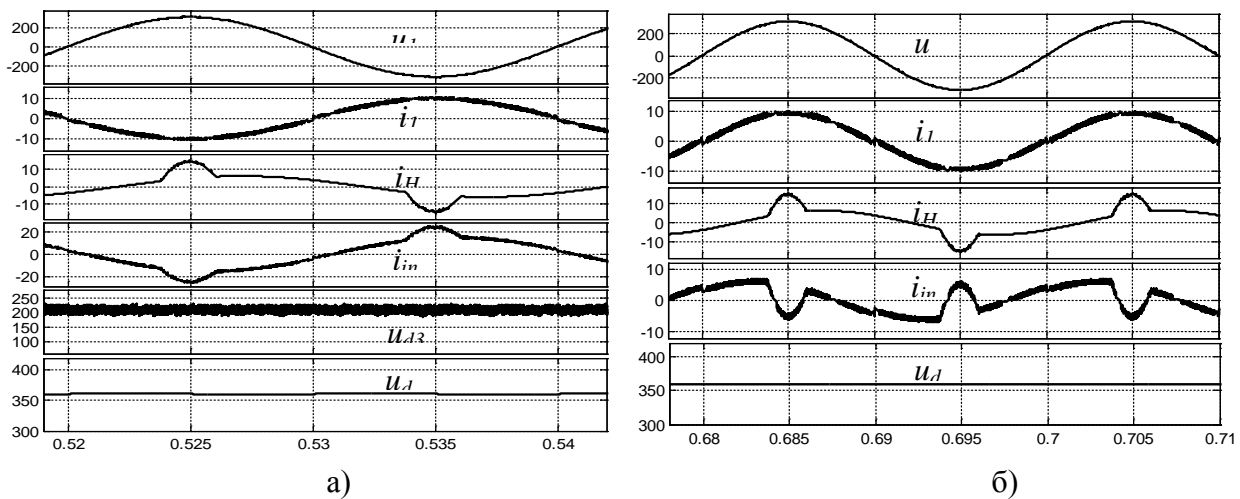


Рис. 2. Робота МАІН паралельно з ЦМ (а) і за відсутності генерації ПДЕ (б)

На рис.2,а наведені осцилограми напруги і струмів для режиму роботи МАІН паралельно з ЦМ. За цього напруга $U_1 = 220$ В, індуктивність реактору $L = 2$ мГн, постійна напруга на вході МАІН $U_d = 360$ В, $U_{CB} = 90$ В, $I_{CB} = 10$ А, $U_{BG} = 120$ В, $I_{BG} = 20$ А, $U_{d3} = 210$ В.

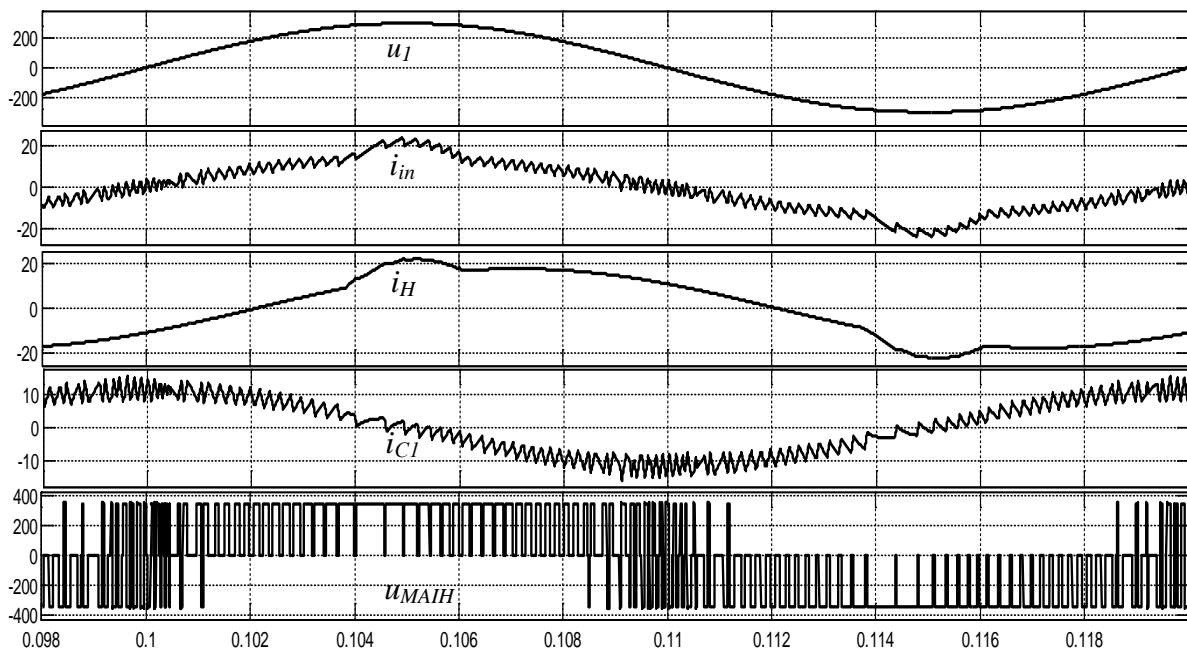


Рис. 3. Осцилограми напруги і струмів у автономному режимі роботи МАІН

Потужність $P_{ПДЕ} > P_H$ і має місце генерування енергії у ЦМ. На рис.2,б наведені осцилограми напруги і струмів за $P_{ПДЕ} = 0$. У цьому разі має місце споживання з ЦМ лише активної потужності. На (рис.3) наведені осцилограми напруги і струмів для автономного

режиму роботи МАІН за дещо завищеним значенням відхилення δ для РРС. За цього $C_I = 100$ мкФ. Високочастотні складові струму МАІН замикаються через конденсатор. Можна побачити, що МАІН здійснює однополярну модуляцію напруги.

Висновки. Запропоновані принципи керування однофазним мостовим МАІН у режимі джерела струму дозволяють забезпечити роботу КСЕ по відношенню до ЦМ з χ близьким до 1, як у разі лінійного, так і нелінійного навантаження з одночасною генерацією електроенергії у ЦМ. За цього здійснюється однополярне формування напруги і практично у два рази зменшується кількість перемикачів. Запропонована структура силових кіл і системи керування ПА дозволяє здійснити реалізацію різних режимів функціонування КСЕ за відсутності АКБ у ланці постійного струму.

Подальшим розвитком роботи є дослідження і удосконалення системи керування щодо забезпечення балансу потужності у автономному режимі.

Список використаної літератури

1. Постанова НКРЕКП. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств. № 2046 від 20.07.2015.
2. IEEE Standard 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Jun. 1992.
3. Офіційний сайт «ВЕКАР. Ветро-солнечная система» : [Електронний ресурс]. – Режим доступу - : <http://www.ra-energo.ru/vetro/>.
4. 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.
5. Tsao-Tsung Ma. Power quality enhancement in micro-grids using multifunctional DG inverters. International multiconference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, Hong Kong. 2012 - pp.996-1001.
6. Sung-Hun Ko. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control / Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar // IEEE Transactions, 2006.- pp.5203-5208.
7. Каплун В. В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії. В. В. Каплун, О. О. Шавьолкін / «Електротехнічні та комп'ютерні системи» № 22 (98), Наука і техніка, 2016.- С.165-169.
8. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЕЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

ШАВЁЛКИН А.А,

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Совершенствование функциональных возможностей преобразовательного агрегата с улучшенными энергетическими показателями.

Методика. Синтез структуры силовых цепей и системы управления преобразовательного агрегата для комбинированной системы электропитания с двумя

возобновляемыми источниками при параллельной работе с централизованной сетью на основе анализа электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми устройствами с использованием компьютерного моделирования.

Результаты. Определены возможности реализации режимов функционирования системы, разработана ее структура с повышающими преобразователями возобновляемых источников, выходы которых соединены с входом промежуточного повышающего преобразователя на входе инвертора; обоснована система управления, подчиненная регулятору напряжения, функция которого определяется режимом работы; разработана компьютерная модель преобразовательного агрегата с источниками, сетью и нагрузкой.

Научная новизна. Предложено трехуровневый релейный регулятор, усовершенствована система с тремя источниками без аккумуляторной батареи.

Практическая значимость. Полученные решения являются основой для проектирования комбинированных систем малой мощности с возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: *комбинированная система электропитания, возобновляемые источники энергии, инвертор напряжения в режиме источника тока, релейный регулятор тока, трехуровневый релейный регулятор, регулятор напряжения, автономный режим, моделирование.*

CONVERTER UNIT OF COMBINED POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

SHAVELKIN A.A.

Kiev National University of Technologies and Design

Purpose. Improving the functionality of the converter unit, which has improved energy indicators.

Methodology. Synthesis of structures of power circuits and control system of converter unit for the combined power system with two renewable sources in parallel operation of the unit with a centralized network, which is based on the analysis of electromagnetic processes in electrical circuits with semiconductor devices and using computer simulation.

Findings. Are determined possibility of realization the system operating modes, there is designed its structure with the step-up converters for renewable sources, the outputs of which are connected to the input of an intermediate step-up converter to the inverter input; It has proposed control system, which is subordinate to the voltage regulator, the function of which is determined by the mode of operation; developed a computer model of the converter unit with the sources, the network and the load.

Originality. The three-level control relay has invented, improved system with three sources without battery.

Practical value. The resulting solutions are the basis for the design of the combined low-power supply system with using renewable energy sources

Keywords: *the combined system of power supply, renewable energy, current controlled voltage source inverter, hysteresis current controller, a three-level hysteresis controller, voltage controller, autonomous mode, modeling.*