

О. О. ШАВЬОЛКІН (д-р техн. наук, проф.)
Державний вищий навчальний заклад
«Київський національний університет технологій та дизайну»
shavolkin@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ З ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ

Розглянуто перетворювальний агрегат комбінованої системи електроживлення локального об'єкту з вітрогенераторною установкою з використанням для зниження втрат енергії в силових колах активного випрямляча, який забезпечує стабілізацію напруги на вході мережевого інвертора за синусоїдального струму генератора. Запропоновано для задання амплітуди струму, що споживається від вітрогенератора, використовувати регулятор вихідного струму активного випрямляча, при цьому задання значення вихідного струму випрямляча в режимі паралельної роботи з мережею здійснюється відповідно до розрахункової залежності потужності вітрогенератора від його напруги. В автономному режимі задання вихідного струму випрямляча формується регулятором, що забезпечує стабілізацію напруги в ланці постійного струму. Розроблено: структуру системи керування перетворювачем із забезпеченням близького до одиниці коефіцієнта потужності при роботі паралельно з мережею і забезпеченням роботи в автономному режимі; визначено залежність потужності вітрогенератора від його напруги за умови забезпечення максимальної потужності; комп'ютерну модель системи «перетворювач з вітрогенератором, мережа і навантаження».

Ключові слова: *комбінована система електроживлення, перетворювальний агрегат, активний випрямляч напруги, силовий активний фільтр, система керування, робота паралельно з мережею, автономний режим, моделювання.*

Постановка проблеми. Останнім часом широкого розповсюдження для живлення локальних об'єктів (коледж, мале підприємство і тощо) набувають комбіновані системи електроживлення (КСЕ), що поряд з використанням поновлювальних джерел електроенергії (ПДЕ) мають підключення до централізованої мережі (ЦМ). Це в умовах використання перевантажених, зношених розподільчих мереж дозволяє забезпечити стабільне електроживлення споживачів локального об'єкту. Перетворення енергії ПДЕ до стандартного значення напруги змінного струму здійснює перетворювальний агрегат (ПА), що у КСЕ має певні особливості і поряд з паралельною роботою з ЦМ повинен забезпечувати автономний режим роботи у разі відключення ЦМ. Це стосується і недоцільності використання у структурі КСЕ акумуляторної батареї, хіба що для джерела безперебійного живлення. Недоліком ПДЕ є змінювання рівня енергії, що генерується, залежно від зовнішніх факторів. У разі вітрогенераторної установки (ВУ) це значна залежність її потужності від швидкості вітру. Потужність ПА обирається згідно максимальній потужності вітрогенератору (ВГ). За цього ефективність використання встановленої потужності достатньо дорогого ПА є незначною. Підвищення ефективності ПА ВУ для КСЕ пов'язано з розширенням його функцій і зменшенням втрат енергії у силових колах.

Аналіз попередніх досліджень. У вітрогенераторах (ВГ) малої потужності зазвичай використовують синхронні генератори з постійними магнітами [1, 2, 3]. За цього структура ПА містить на виході ВГ некерований випрямляч з вихідним емнісним фільтром, що спотворює форму струму ВГ [3]. Це обумовлює додаткові втрати енергії в генераторі, пульсації електромагнітного моменту на валу. Стосовно ПА автономної ВУ в [3] запропоновано використання активного випрямляча (АВН), що споживає синусоїдальний струм. Для узгодження напруги АВН, акумуляторної батареї і мережевого автономного інвертора напруги (АІН) використовуються DC/DC перетворювачі напруги. Напруга ВГ згідно швидкості вітру змінюється за значенням і частотою у широких межах, це потребує відслідковування її значення для завдання вихідної напруги АВН. Разом з цим АВН за принципом дії є підвищувальним перетворювачем, що дозволяє вирішити питання узгодження напруги без додаткових перетворювачів, а також сприятиме зменшенню втрат енергії в силових колах ПА. За цього АВН повинен забезпечувати керований відбір потужності – максимальної у разі роботи з ЦМ і потрібної для навантаження у автономному режимі за відключенням ЦМ. Щодо КСЕ з фотоелектричними сонячними батареями підвищення загальної ефективності системи пов'язують з суміщенням мережевим АІН функції силового активного фільтра (САФ) [4,5], що дозволяє забезпечити на вході локального об'єкту (або групи об'єктів) підтримання близького до одиниці коефіцієнту потужності і розвантажити ЦМ від реактивної потужності і вищих гармонік струму. Сто-

совно ВУ з АВН і суміщенням АІН функцій САФ, питання реалізації роботи паралельно з мережею і в автономному режимі є вивченими недостатньо і потребують додаткових досліджень, що є предметом розгляду даної роботи.

Мета роботи. Створення багатофункціонального перетворювального агрегату для комбінованої системи електроживлення локального об'єкта з вітрогенераторною установкою при використанні активного випрямляча напруги.

Завдання дослідження:

- розробка структури силових кіл перетворювального агрегату;
- обґрунтування структури системи керування;
- розробка математичних моделей і імітаційне моделювання отриманих рішень.

Основні матеріали досліджень. Розглянемо варіант ВУ з потужністю до 3÷6 кВт та однофазним ПА, що є достатнім для живлення, наприклад, окремого котеджу. Вітрогенератори такої потужності типу ALT-2000, EuroWind2 [1, 2] за номінальної швидкості вітру мають вихідну напругу 120÷240 В.

Запропонована структурна схема ПА з використанням АВН на виході ВГ та підключенням до ЦМ (G) і навантаження (H) наведена на рис. 1.

АВН виконано на IGBT за трифазною мостовою схемою і підключено до ВГ через реактори $L1$ і датчики струму ДС, для вимірювання напруги фаз ВГ використовуються датчики напруги ДН. Підключено АВН безпосередньо до входу мережевого однофазного мостового АІН з вихідним реакторами $L2$. ПА приєднується до ЦМ через фільтр $R\phi C\phi$, автоматичний вимикач $QF2$ і контактор $K1$ (вимикається у автономному режимі). Навантаження підключається через $QF1$.

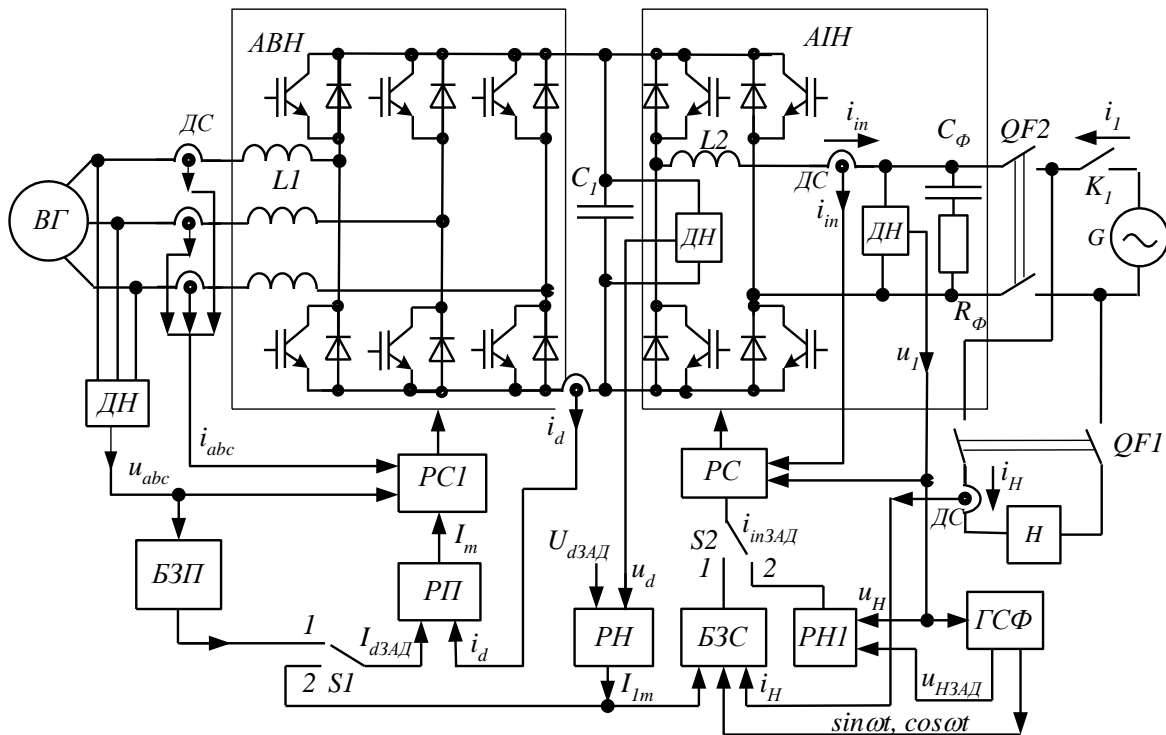


Рисунок 1 – Структурна схема ПА з ВУ

Відбір заданого значення потужності ВГ забезпечує АВН, що змінює значення струму який споживається. За роботи ПА паралельно з мережею вирішується задача відбору максимального за даної швидкості вітру значення потужності. У автономному режимі відбирається потужність, що відповідає потужності навантаження. Розглянемо визначення потужності ВГ відповідно швидкості вітротурбіни (ВТ) згідно методиці [6]. Вихідна механічна потужність ВТ визначається як

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3, \quad (1)$$

де c_p - коефіцієнт продуктивності ВТ, ρ - щільність повітря (кг/м^3), A - ометаема турбіною площа (м^2) - площа через яку проходить вітровий потік, для пропелерних вітрогенераторів, це площа кола: $S=3.14D^2/4$, де D - діаметр пропелера, для вертикальних: $S=DH$, де D - діаметр вітроколеса, H - його висота, v_{wind} - швидкість вітру

(м/с), λ - швидкісний коефіцієнт - відношення швидкості кінця лопаті до швидкості вітру, β - кут нахилу лопаті (град.).

Перейдемо до відносних одиниць (в.о.). Відносне значення механічної потужності вітротурбіни (до номінальної потужності)

$$P^*_m = \frac{P_m}{P_{mНОМ}} = (c_p \frac{\rho A}{2} v^3) \frac{1}{P_{mНОМ}} = (\frac{c_p}{c_{pMAX}}) c_{pMAX} (\frac{v^3_{wind}}{v^3_{windНОМ}}) v^3_{windНОМ} \frac{1}{P_{mНОМ}} \frac{\rho A}{2} = k_p c^*_p (v^*_{wind})^3, \quad (2)$$

де c^*_p - коефіцієнт продуктивності в в.о. щодо максимального значення c_{pMAX} , v^*_{wind} - швидкість вітру в в.о. щодо базової швидкості вітру $v^*_{windНОМ}$,

$$k_p = (c_{pMAX} v^3_{windНОМ} \frac{\rho A}{2}) \frac{1}{P_{mНОМ}} - \text{коефіцієнт потужності для } c^*_p = 1 \text{ у в.о. і } v_{wind_pu} = 1 (k_p \leq 1).$$

У роботі [6], залежність $c_p(\lambda, \beta)$ визначено як

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2 / \lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-c_5 / \lambda_i} + c_6\lambda \quad (3)$$

де

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}. \quad (4)$$

Коефіцієнти $c_1 \div c_6$: $c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ і $c_6 = 0,0068$.

Зазвичай ВТ малої потужності не передбачають регулювання кута нахилу лопаті і $\beta=0$. Тоді згідно [6]

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} - 0.035. \quad (5)$$

Максимальне значення c_p ($c_{pmax}=0.48$) досягається при $\lambda=8.1$, це значення λ визначимо як номінальне значення (λ_{nom}). Отже для швидкості вітру 12 м/с, максимальне значення потужності становить $P^*_m=0,73$ ($K_p=0,73$) для швидкості обертання ротору СГ $\omega^*_r=1.2$. Аналогічну картину маємо для інших значень швидкості вітру (див. табл.1, де наведені результати розрахунку). Момент на валу ВТ (T_m) $M=P_m/\omega_r=K_M(P^*_m/\omega^*_r)=K_M(M^*)$, де K_M - коефіцієнт пропорційності при переході від відносного значення моменту до абсолютного у Нм.

Таблиця 1 – Завдання режиму максимальної потужності ВТ

v_{wind} , М/с	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P^*_m , в.о.	0.0114	0.027	0.053	0.091	0.145	0.216	0.308	0.423	0.56	0.73	0.93	1.16
ω_r , в.о.	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4

Електрична потужність, що генерується СГ $P_E=P_m\eta$, де η - ККД вітрогенератора, що враховує механічні і електричні втрати енергії. При роботі ВГ у режимі максимальної потужності залежності $P^*_m(\omega^*_r)$ і $\eta(\omega^*_r)$ є фіксованими, що спрощує реалізацію системи регулювання потужності ВГ. Система регулювання потужності ВГ містить функціональний перетворювачі $P^*_m(\omega^*_r)$ і $\eta(\omega^*_r)$ згідно чого визначається завдання електричної потужності P_E . Оскільки для СГ з постійними магнітами вихідна напруга є пропорційною кутовій частоті обертання датчик швидкості можна виключити за використанням для функціонального перетворювача сигналу випрямленої напруги обмотки статора $P^*_m(U^*_s)$ і $\eta(U^*_s)$. Фактичне значення потужності, що віддається за постійної напруги на виході АВН, визначається згідно його вихідного струму. Отже, регулювання потужності на виході ВГ зводиться до підтримання вихідного струму АВН на заданому рівні шляхом регулювання амплітуди струму, що споживається АВН від ВГ. Оскільки момент, що створює ВТ за малої швидкості ротору СГ є незначним, розгортання ВТ і ротора СГ до швидкості $\omega^*_r=0.3 \div 0.4$ доцільно здійснювати без навантаження.

Система керування містить два канали регулювання (рис.1):

- Канал керування АІН, який є двоконтурним і містить: внутрішній підпорядкований контур формування миттєвого значення струму АІН за відхиленням від заданого значення струму з постійною частотою модуляції (реалізується за принципами розглянутими в [5]); зовнішній контур регулювання напруги U_d у ланці постійного струму з пропорційно-інтегральним (ПІ) РН, що визначає завдання амплітуди активної складової струму мережі I_m для блока завдання струму (БЗС) інвертора. БЗС формує завдання миттєвого значення струму АІН $i_{inЗад}$ згідно значенням I_m , реактивної складової струму мережі (компенсація ємнісного струму фільтру) та струму навантаження i_H у відповідності з синусоїдальними функціями, що формуються генератором синусоїдальних функцій (ГСФ), який синхронізований з напругою мережі. У регуляторі струму (РС) відхилення струму від заданого значення порівнюється з модулюючою напругою компаратору, згідно вихідним сигналам якого формуються імпульси керування АІН. У автономному режимі використовується ПІ регулятор напруги РН1, завданням для якого є синусоїдальна напруга з виходу ГСФ (від автономного генератора напруги з частотою 50 Гц). РН1 формує завдання струму АІН. Для перемикавання сигналу завдання струму АІН використовується перемикач S2, який в режимі роботи паралельно з мережею встановлюється в положення 1, в автономному режимі - в положення 2.

- Канал керування АВН, що також є двоконтурним і містить підпорядкований контур формування миттєвого значення вхідних фазних струмів і реалізується за аналогічним принципом, що і для мережевого АІН. Завдання струмів визначається згідно фазним напругам ВГ. Зовнішнім у режимі роботи ПА паралельно з ЦМ (перемикач S2 – у положенні 1) є ПІ регулятор вихідного струму АВН (виконує функції регулятора максимальної потужності РП), задане значення якого $I_d = P_{MAX} / U_d$ (P_{MAX} - максимальне значення потужності ВГ за даної швидкості вітру) формується блоком завдання потужності з функціональним перетворювачем $P_{MAX} = f(U_{BG})$ згідно напрузі ВГ U_{BG} , яка у синхронного генератора є пропорційною швидкості обертання. Вихідний сигнал РП задає амплітуду струму I_m фаз ВГ. У автономному режимі (перемикач S2 – у положенні 2) зовнішнім є РН, що задає потужність ВГ від-

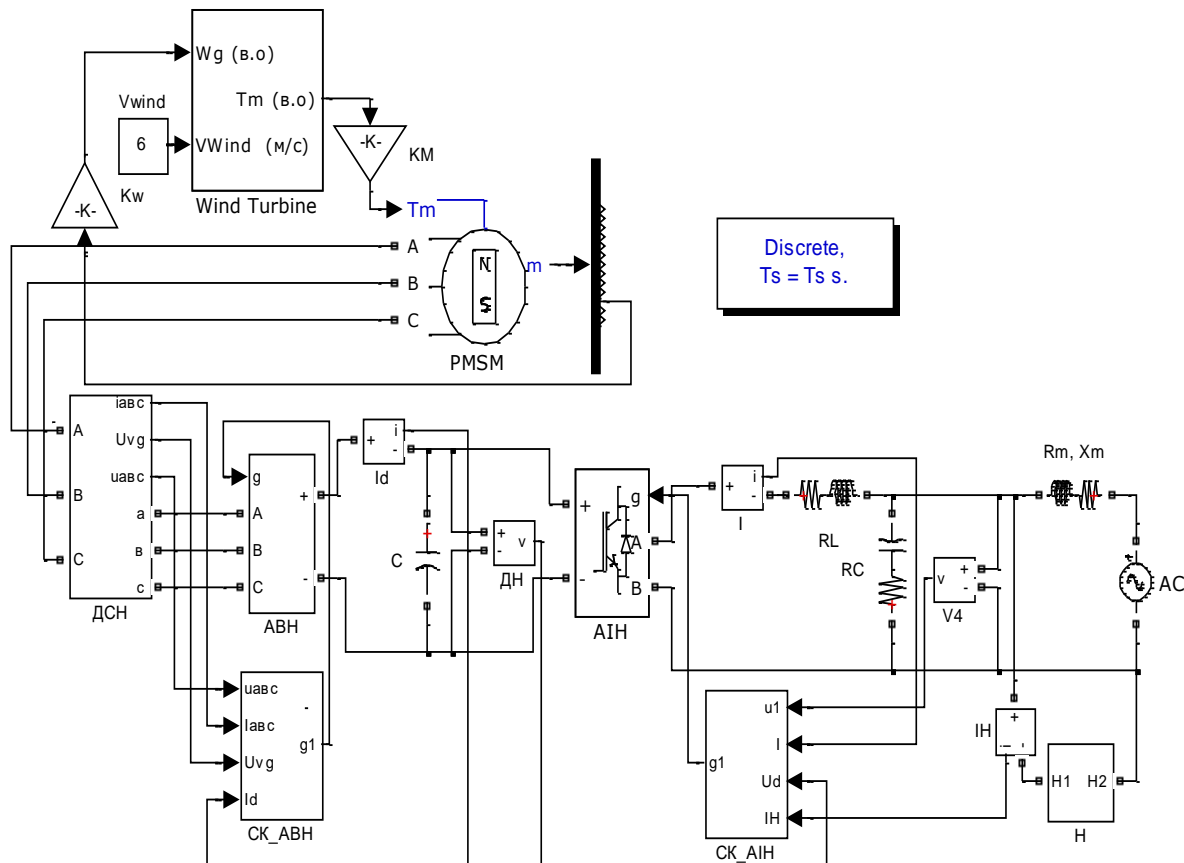


Рисунок 2 – Структура моделі «вітрогенератор – перетворювальний агрегат – навантаження – мережа»

повідно потужності навантаження.

Незалежно від наявності генерації енергії ВГ у разі роботи ПА паралельно з ЦМ, система керування забезпечує реалізацію мережевим інвертором функції САФ і заряджання конденсатору С у ланці постійного струму здійснюється АІН, стабілізація його напруги забезпечується регулятором напруги РН.

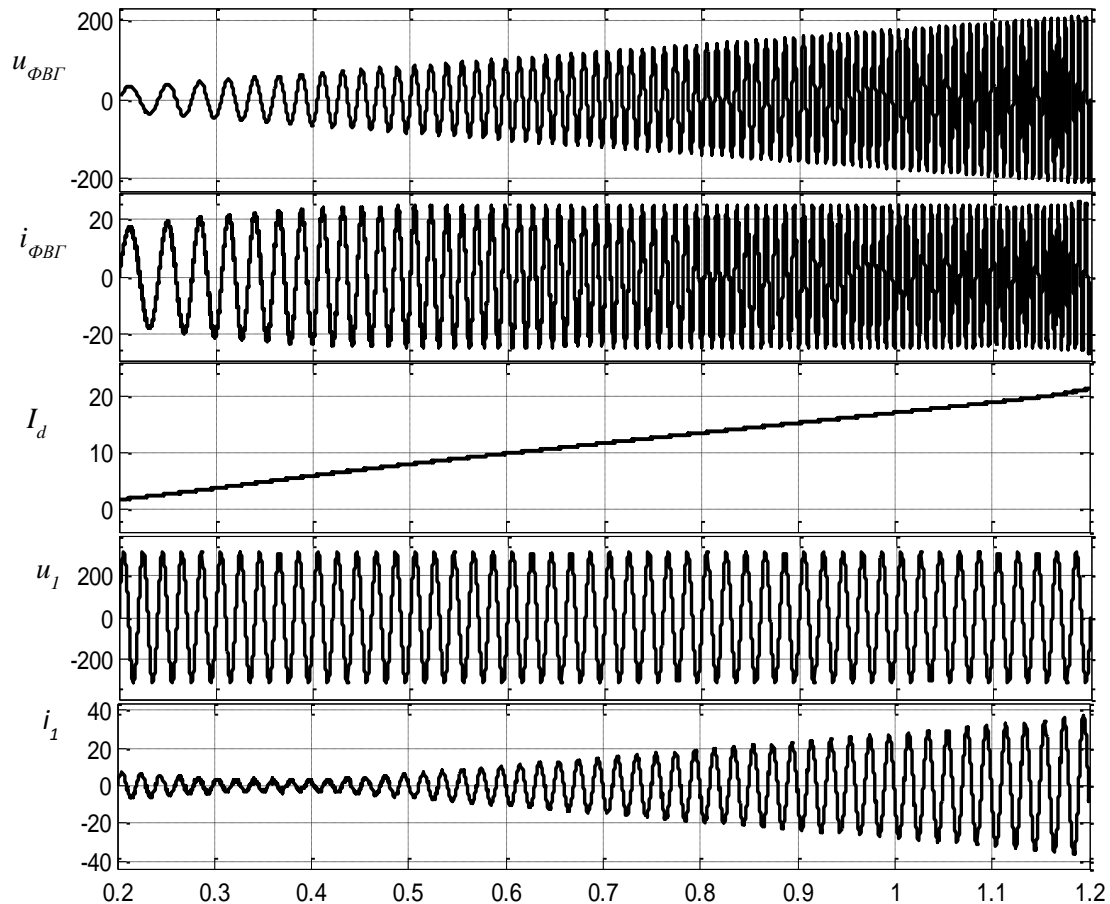


Рисунок 3 – Осцилограми напруги та струмів ПА

Результати моделювання. Для імітаційного моделювання використовувався програмний пакет Matlab. Моделювання здійснено для структури на рис.1. Структура моделі «вітрогенератор – перетворювальний агрегат – навантаження – мережа» наведена на рис.2.

Модель вітротурбіни (Wind Turbine) має входи: швидкості обертання ВГ ω_g і вітру v_{wind} та вихід моменту T_m . Для генератора використана стандартна модель синхронного генератора з постійними магнітами PMSM, з входом моменту. Перерахунок з в.о. до абсолютних значень величин (і навпаки) здійснюється введенням відповідних коефіцієнтів (Кw, КМ). АВН підключається до виходу генератора через блок датчиків струму та напруги (ДСН), що також визначає амплітуду напруги ВГ. Моделі АВН і АІН виконані з використанням стандартних блоків.

На рис.2 наведена структура системи керування ПА для режиму роботи паралельно з мережею, яка складається з системи керування АВН (СК_АВН) та системи керування АІН (СК_АІН), що виконані за розглянутими вище принципами. Модель ЦМ (220 В) містить джерело ЕРС та опори мережі $R_m=0.02$ Ом, $X_m=0.02$ Ом, параметри фільтра на вході $R=0.3$ Ом, $C=60$ мкФ, частота модуляції $f_M=20$ кГц, $\Delta I_m=0.56$ А, індуктивність реактора АІН $L=4.2$ мГн, $U_d=360$ В.

Поряд з дослідженням сталих режимів роботи ПА за постійною швидкістю вітру і вихідною напругою ВГ розглянуто роботу системи у разі прискорення вітротурбіни. За цього використана дещо спрощена модель ВГ – трифазний генератор з регульованою амплітудою і частотою, яка на відміну від реальної ВЕУ є більш динамічною. Так за час 1 с частота змінилася з 10 Гц до 60 Гц, а амплітуда з 30 В до 180 В, завдання вихідного струму АВН I_d з 3 А до 20 А.

Відповідні осцилограми фазної напруги генератора $u_{ФВГ}$, струму фази генератора $i_{ФВГ}$, вихідного струму АВН I_d , напруги u_1 і струму i_1 мережі наведені на рис.3. Заряджання конденсатора на виході АВН ($C=8000$ мкФ) здійснювалося за обмеженням струму мережевого АІН і АВН і на рис.3 не показано. З рис.3 можна побачити як на інтервалі 0.4 - 0.5 с змінюється фаза струму мережі по мірі перевищення потужності ВГ відносно потужності навантаження і від споживання енергії ПА переходить у режим генерації її у ЦМ.

Висновки. Запропонований варіант багатofункціонального перетворювального агрегату для комбінованих систем електроживлення локальних об'єктів з вітрогенератором за роботи паралельно з мережею суміщає функцію активного фільтра з підтриманням близького до одиниці коефіцієнту потужності у точці підключення до мережі, а також забезпечує роботу в автономному режимі. За цього система керування містить канали керування:

активним випрямлячем напруги на виході генератору і мережевим інвертором, що за паралельної роботи з мережею функціонують незалежно, у автономному режимі завдання потужності, що відбирається від вітрогенератору згідно потужності навантаження визначається за умови підтримання напруги на вході інвертору на заданому рівні. Результати імітаційного моделювання системи «перетворювальний агрегат з вітрогенератором, мережа, навантаження» з використанням розробленої у програмному пакеті Matlab моделі підтверджують працездатність запропонованих рішень щодо забезпечення функціонування перетворювального агрегату як у сталих, так і динамічних режимах (прискорення вітротурбіни).

Подальшим напрямком роботи є дослідження характеристик реального вітрогенератору та оцінка можливостей використання активного випрямляча без вхідних реакторів або зменшення їхньої індуктивності з урахуванням індуктивностей обмотки статора генератору, вдосконалення системи автоматичного регулювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ветрогенераторы для дома [Electronic resource]. –/greenvolt.ru/energiya-vetra/vetrogenerator-dlya-doma/
2. БЕКАР. Ветро-солнечная система. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/>
3. Шавьолкін О. О., Шчипков Р. Р. Удосконалення перетворювального агрегату для автономної вітроелектростанції малої потужності // Технології та дизайн. - 2017. - № 1. - 7с. http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_12.
4. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control // IEEE Transactions, 2006.- pp.5203-5208.
5. Шавьолкін О.О., Жила О.В. Однофазний інвертор комбінованої системи електроживлення з прямим підключенням фотоелектричної сонячної батареї // Вісник КНУТД №5(114), 2017, стор. 106-116.
6. Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons Ltd, 1998, ISBN 0-471-97143-X.

REFERENCES

1. Wind turbines for home [Electronic resource]. –/greenvolt.ru/energiya-vetra/vetrogenerator-dlya-doma/
2. БЕКАР. Wind-solar system. [Electronic resource]. – <http://www.ra-energo.ru/vetro/>
3. Shavolkin O. O., Shchypkov. R. R. (2017), "Improvement of the transformer unit for an autonomous wind power plant of low power", *Kiev: Tekhnolohiyi ta dizayn*. vol.1. – 7p. http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_12.
4. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar, (2006), "A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control", *IEEE Transactions*, pp.5203-5208.
5. Shavolkin O.O., Zhila O.V. (2017), "Single-phase inverter of combined power supply system with direct connection of photo-electric solar battery", *Kiev: Visnyk KNUVD*, vol.5(114), pp. 106-116.
6. Siegfried Heier, (1998) "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-471-97143-X.

Надійшла до редколегії

Рецензент:

A. A. SHAVELKIN

State Institution of Higher Education «Kiev National University of Technologies and Design»

Improvement of the converter unit for a combined system of power supply of a local object with a wind generator. Combined power supply systems for local objects use renewable energy sources and are connected to an alternating current grid. Autonomous wind generators contain an uncontrolled rectifier at the generator output, converters in a DC link and a grid inverter. There is promising, in the absence of a battery, to using an active rectifier providing stabilization of the voltage at the input of the inverter at the sinusoidal current of the generator, which will allow reducing energy losses in the power circuits of the converter unit. The purpose of the work: improvement of the converter unit of the combined power supply system of local objects with a wind generator with the use of an active rectifier of a voltage. It is proposed to use the regulator of the output current of the active rectifier to set the amplitude of the current consumed from the wind generator, while setting the value of the output current of the rectifier is carried out in accordance with the calculated dependence of the power of the wind generator from its voltage. In the autonomous mode, the setting of the output current of the rectifier is formed by a regulator ensuring the stabilization of the voltage in the DC link.

Developed: the structure of the converter control system with providing a power factor close to unity when working in parallel with the grid and providing work in an autonomous mode; determined the dependence of the power of the wind generator on its voltage from the condition of ensuring its maximum power; computer model of the system "converter with wind generator, grid and load". The solutions obtained are the basis for designing single-phase converters of combined power supply systems with wind generators.

Keywords: *combined power supply system, converter unit, active voltage rectifier, power active filter, control system, operation in parallel with the network, autonomous mode, simulation.*