

КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ТА ВІТРОВОЮ УСТАНОВКАМИ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ**О. С. Яндульський, Г. О. Труніна, Д. В. Настенко, К. М. Лисак**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056, Україна. E-mail: A_Trunina@ukr.net

Розроблено структурну модель електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з накопичувачем електроенергії, підключеної до розподільної електричної мережі. Запропоновано підхід до керування роботою гібридної електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з врахуванням наявності накопичувача електроенергії в режимах максимуму генерування відновлюваного джерела енергії при максимально заповненому накопичувачі електроенергії та мінімуму генерування відновлюваного джерела енергії при незаповненому накопичувачі електроенергії. Розроблено алгоритм роботи блоку керування електростанцією, яка поєднує в своєму складі фотоелектричну та вітрову установки з використанням накопичувача електроенергії з врахуванням значення напруги в точці приєднання електростанції та стану заряду накопичувача електроенергії (заповнений, незаповнений). Проведено дослідження роботи електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з накопичувачем електроенергії в складі розподільної електричної мережі з застосуванням запропонованого підходу до керування. Встановлено, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність роботи електричної станції на основі фотоелектричної та вітрової установок з накопичувачем електроенергії.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, вітрова установка, фотоелектрична установка, накопичувач електроенергії, регулювання активної потужності, регулювання напруги.

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ВЕТРОВОЙ УСТАНОВКАМИ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**А. С. Яндульский, А. А. Трунина, Д. В. Настенко, К. М. Лысак**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» просп. Победы, 37, г. Киев-56, 03056, Украина. E-mail: A_Trunina@ukr.net

Разработана структурная модель электростанции на основе фотоэлектрической и ветровой установок с накопителем электроэнергии, подключенной к распределительной электрической сети. Предложен подход к управлению работой гибридной электростанции на основе фотоэлектрической и ветровой установок с учетом наличия накопителя электроэнергии в режимах максимума генерирования возобновляемого источника энергии при максимально заполненном накопителе электроэнергии и минимума генерирования возобновляемого источника энергии при незаполненном накопителе электроэнергии. Разработан алгоритм работы блока управления электростанцией, которая имеет в своем составе фотоэлектрическую и ветровую установки с использованием накопителя электроэнергии с учетом значения напряжения в точке присоединения электростанции и состояния заряда накопителя электроэнергии (заполнен, не заполнен). Проведено исследование работы электростанции на основе фотоэлектрической и ветровой установок с накопителем электроэнергии в составе распределительной электрической сети с применением предложенного подхода к управлению. Установлено, что использование предложенного подхода позволяет повысить эффективность работы электростанции на основе фотоэлектрической и ветровой установок с накопителем электроэнергии.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровая установка, фотоэлектрическая установка, накопитель электроэнергии, регулирование активной мощности, регулирование напряжения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Стійка тенденція до зростання споживання електроенергії, необхідність зниження негативного впливу енергетики на навколишнє середовище, підвищення цін на енергоносії та, як наслідок, необхідність економії електричної енергії і ресурсів, що потрібні для її виробництва, зумовлюють необхідність пошуку альтернативних шляхів енергозабезпечення [1]. Одним з таких напрямків є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

На розвиток електростанцій на основі ВДЕ орієнтовано велику кількість державних програм у всьому світі, у тому числі і в Україні [2–3]. В Новій Енергетичній стратегії України на період до 2035 року [2] вказується про збільшення використання ВДЕ практично у чотири рази. При цьому найбільше зростання очікується у використанні сонячної енергії та вітрових електростанцій. Обсяг електричної енергії, що виробляється у світі на таких електростанціях, збільшується щорічно на 20%, і згідно з

прогнозами міністерства енергетики США до 2020 року на частку ВДЕ буде приходиться від 11% до 22% її світового виробництва.

Незважаючи на всі переваги, які можна отримати при підключенні ВДЕ до розподільної електричної мережі (РЕМ), важливою особливістю є їх вплив на надійність роботи мережі та на якість електроенергії, а саме, на рівень напруги в електричній мережі [4–5]. Разом з цим, серед головних проблем впровадження таких джерел слід зазначити змінний характер генерування.

Таким чином, на ряду з впровадженням ВДЕ в електричну мережу виникає необхідність у використанні засобів накопичення електроенергії, а це в свою чергу призводить до необхідності розвитку існуючих та розробки нових методів та підходів до керування електростанціями на основі ВДЕ, які працюють з накопичувачем електроенергії (НЕ).

Питання використання НЕ з ВДЕ розглянуто в роботах [6–8, 10–12], але наведені підходи до керу-

вання не враховують вплив координованої роботи ВДЕ з НЕ на зміну напруги у вузлах РЕМ.

Мета роботи – розробка підходу до керування роботою електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з накопичувачем електроенергії.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В електричній мережі за наявності ВДЕ з НЕ, окрім мінімуму та максимуму навантаження, можливе виникнення режимів: максимум генерування ВДЕ при максимально заповненому НЕ; мінімум генеру-

вання ВДЕ при незаповненому НЕ. При цьому напруга у вузлі підключення електростанції може порушувати допустимі межі. Такі режими вважаються «тяжкими» режимами [8], а їх виникнення потребує розвитку існуючих та розробки нових методів і підходів до керування ВДЕ з НЕ.

З метою розробки підходу до керування роботою ВДЕ з НЕ розроблено структурну модель електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з НЕ (рис. 1).

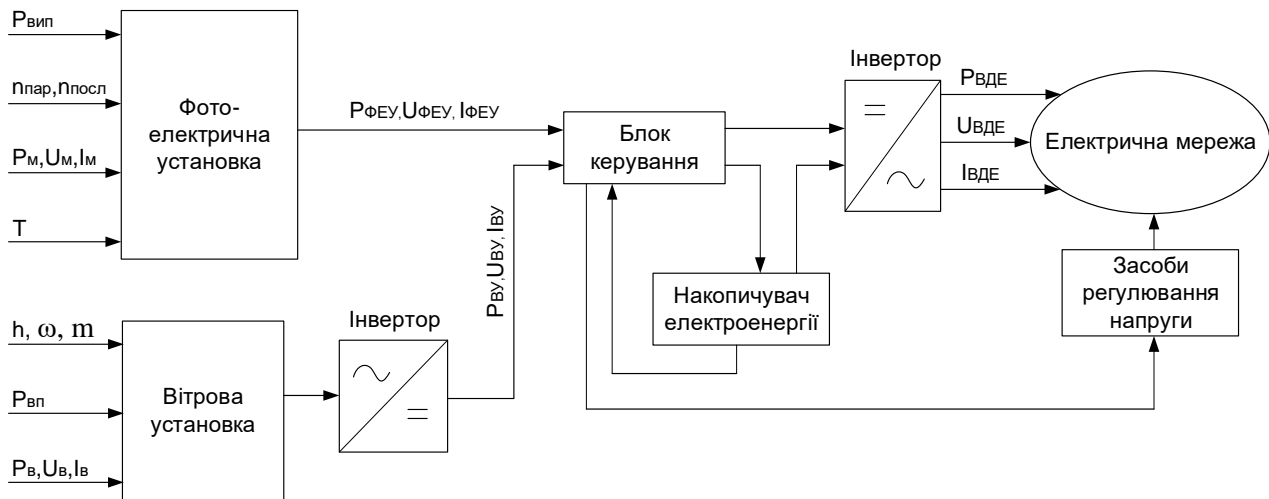


Рисунок 1 – Структурна модель електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з накопичувачем електроенергії

В структурній моделі вхідними параметрами є: $P_{вип}$ – потужність сонячного випромінювання; $n_{пар}, n_{посл}$ – кількість паралельно та послідовно з'єднаних модулів; P_M – номінальна потужність сонячного модуля; U_M – номінальна напруга сонячного модуля; I_M – номінальний струм сонячного модуля; T – температура навколишнього середовища, в якому знаходиться сонячний модуль; h – висота вітряка; ω – швидкість повітряного потоку; m – маса повітряного потоку; $P_{вп}$ – потужність вітрового потоку; P_B – номінальна потужність вітряка; U_B – номінальна напруга вітряка; I_B – номінальний струм вітряка; $P_{ФЕУ}, U_{ФЕУ}, I_{ФЕУ}$ – потужність, напруга та струм на виході фотоелектричної установки; $P_{ВУ}, U_{ВУ}, I_{ВУ}$ – потужність, напруга та струм на виході вітрової установки; $P_{ВДЕ}, U_{ВДЕ}, I_{ВДЕ}$ – потужність, напруга та струм на виході електричної станції.

Для вирішення поставленої задачі запропоновано наступний підхід до роботи електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установок з НЕ у складі РЕМ (алгоритм наведено на рис. 2):

1. В початковий момент часу на блок керування поступає сигнал на перевірку наявності порушення допустимих меж по напрузі у вузлі підключення ВДЕ. Якщо порушень не виявлено, то через час Δt перевірка повторюється. Після цього виконується п. 2 або п. 5.

2. Якщо напруга у вузлі підключення ВДЕ $U_{ВДЕ}$ порушує верхню допустиму межу $1,05U_{ном}$, тоді виконується перевірка наявності генерування ВДЕ. Якщо генерування відсутнє, то блоком керування подається сигнал на додаткові засоби регулювання напруги (наприклад, РПН трансформаторів, засоби компенсації реактивної потужності, тощо). Якщо в поточний момент часу ВДЕ генерує потужність, то поступає сигнал на перевірку стану заряду НЕ.

3. Якщо НЕ заповнений, то поступає сигнал на зменшення вихідної активної потужності ВДЕ (за рахунок інвертора, через який ВДЕ приєднано до РЕМ) на $\Delta P_{ВДЕ}$ (1), що дозволить повернути напругу в вузлі підключення ВДЕ в допустимі межі:

$$\Delta P_{ВДЕ} = \frac{\partial P_{ВДЕ}}{\partial U_{ВДЕ}} \cdot (U_{ВДЕ} - U_{ВДЕ}^{баж}), \quad (1)$$

де $\partial P_{ВДЕ} / \partial U_{ВДЕ}$ – значення, обернене коефіцієнту чутливості по напрузі вузла відносно зміни активної потужності ВДЕ [9]; $U_{ВДЕ}^{баж}$ – бажаний рівень напруги у вузлі підключення ВДЕ.

Якщо власник ВДЕ не бажає зменшувати генерування ВДЕ, тоді доцільно буде використати метод, розроблений в [10].

4. Якщо НЕ – незаповнений, то за формулою (1) розраховується потужність, на яку необхідно було б зменшити генерування ВДЕ – $\Delta P_{ВДЕ}^{баж}$ з метою повернення напруги в допустимі межі.

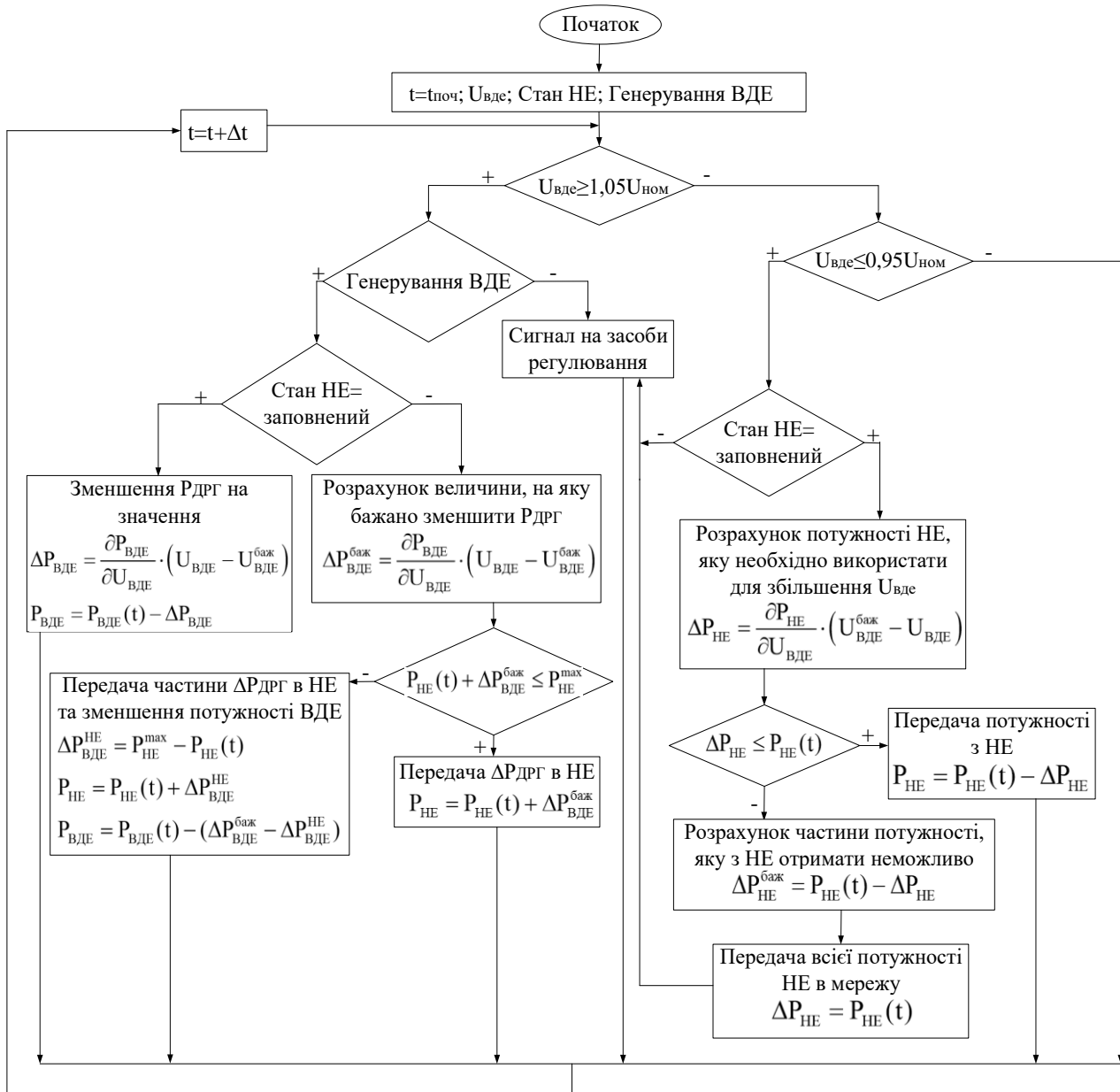


Рисунок 2 – Алгоритм керування роботою електростанції на основі фотоелектричної та вітрової установки з накопичувачем електроенергії

Після цього виконується перевірка, чи сумісна потужність $\Delta P_{ВДЕ}^{баж}$ з максимальною потужністю НЕ – $P_{НЕ}^{max}$ (2):

$$P_{НЕ}(t) + \Delta P_{ВДЕ}^{баж} \leq P_{НЕ}^{max} \quad (2)$$

Якщо (2) виконується, то потужність $\Delta P_{ВДЕ}^{баж}$ передається в НЕ, а якщо ні, то частина потужності передається в НЕ (3):

$$\Delta P_{ВДЕ}^{НЕ} = P_{НЕ}^{max} - P_{НЕ}(t) \quad (3)$$

де $P_{НЕ}(t)$ – поточна потужність НЕ.

При цьому потужність ВДЕ зменшується на (4):

$$\Delta P_{ВДЕ} = \Delta P_{ВДЕ}^{баж} - \Delta P_{ВДЕ}^{НЕ} \quad (4)$$

5. Якщо після виконання п.1 виявилось, що напруга у вузлі підключення ВДЕ – $U_{ВДЕ}$ порушує нижню допустиму межу $0,95U_{ном}$, тоді виконується

перевірка стану заряду НЕ. Якщо НЕ – незаповнений, тоді блоком керування подається сигнал на засоби регулювання напруги.

6. Якщо НЕ – заповнений, розраховується потужність НЕ $\Delta P_{НЕ}$, яку необхідно використати, щоб підвищити напругу у вузлі підключення ВДЕ (3):

$$\Delta P_{НЕ} = \frac{\partial P_{НЕ}}{\partial U_{ВДЕ}} \cdot (U_{ВДЕ}^{баж} - U_{ВДЕ}) \quad (5)$$

де $\partial P_{НЕ} / \partial U_{ВДЕ}$ – значення, обернене коефіцієнту чутливості по напрузі вузла відносно зміни активної потужності НЕ.

7. Після цього перевіряється, чи достатньо потужності НЕ, щоб забезпечити вихідне значення $\Delta P_{НЕ}$. Якщо так, то потужність $\Delta P_{НЕ}$ передається з НЕ в РЕМ. Якщо ні, то вся потужність НЕ $P_{НЕ}(t)$ передається в електричну мережу, після чого сигнал з блоку керування передається на засоби регулю-

З рис. 4 видно, що при роботі ВДЕ на основі фотоелектричної та вітрової установок з НЕ без використання запропонованого підходу, напруги у вузлах РЕМ порушують допустимі границі $1,05U_{ном}$ (вузли № 2, 4, 5). Застосовуючи розроблений підхід до керування ВДЕ – напруга у вузлах мережі перебуває в допустимих межах. В рамках даного дослідження у випадку мінімального генерування ВДЕ напруга у вузлах РЕМ перебуває в допустимих межах.

На рис. 5 наведено порівняльну діаграму зміни втрат активної потужності в РЕМ при роботі ВДЕ в режимах максимального та мінімального генерування.



Рисунок 5 – Порівняльна діаграма зміни втрат потужності в електричній мережі

З рис. 5 видно, що у випадку застосування запропонованого підходу втрати активної потужності в РЕМ при максимальному та мінімальному генеруванні ВДЕ однакові. Це пояснюється тим, що у випадку мінімального генерування ВДЕ блоком керування задіяно НЕ, частину потужності якого було передано в РЕМ. Таким чином, на виході електричної станції на основі фотоелектричної та вітрової установок з НЕ вихідна активна потужність не змінилась.

У той же час, у випадку некоординованої роботи ВДЕ та НЕ (випадок без застосування запропонованого підходу) втрати активної потужності в РЕМ більші на 42% при максимальному генеруванні ВДЕ, та на 55 % - при мінімальному генеруванні ВДЕ.

Це пояснюється тим, що у випадку без застосування запропонованого підходу частина потужності ВДЕ скорочується через вимоги [10] до власника станції підтримувати напругу у вузлі підключення в допустимих межах. При цьому стан заряду НЕ перевірявся лише за необхідності накопичення електроенергії.

ВИСНОВКИ. Розроблено підхід до керування ВДЕ з НЕ, який базується на координуванні роботи ВДЕ з НЕ та враховує їх вплив на напругу в вузлах РЕМ, а також стан заряду НЕ з визначеною періодичністю, що відповідає максимальній частоті зміни вихідної потужності генерування ВДЕ. При цьому, враховано можливість виникнення «тяжких» режимів: максимум генерування ВДЕ при максимально заповненому НЕ та мінімум генерування ВДЕ при незаповненому НЕ. В «тяжких» режимах блок керування фо-

мує та подає керуючі сигнали на додаткові засоби регулювання напруги.

Проведено дослідження роботи ВДЕ з НЕ в складі РЕМ з застосуванням запропонованого підходу до керування. Аналіз результатів дослідження показав, що застосування запропонованого підходу дозволяє утримувати напругу у вузлах РЕМ в допустимих межах та зменшити втрати активної потужності в мережі на 42-55%, навіть в режимах максимуму генерування ВДЕ при максимально заповненому НЕ та мінімуму генерування ВДЕ при незаповненому НЕ. Отже, використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність роботи ВДЕ з НЕ у складі РЕМ.

Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його у складі методів керування напругою в РЕМ за наявності ВДЕ з НЕ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лежнюк П. Д., Ковальчук О. А., Нікіторович О. В., Кулик В. В. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 204 с.
2. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605. С. 66.
3. Лапшин Ю. С., Ардашов С. А., Париков Л. Е. Перспективи розвитку нетрадиционной ветроэнергетики в Украине. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. № 4(93). С. 21–25.
4. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2011. Вип. 1. С. 46–53.
5. Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D. Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks. *Electrical Power Quality and Utilisation*. 2007. Vol. 3, No. 1. P. 1–6.
6. Yan W., Braun M., Appen J., Kdmpf E., Kraiczky M., Ma C., Stetz T., Schmidt S. Operation strategies in distribution systems with high level PV penetration. *International Solar Energy Society. 2011: ISES Solar World Congress, Kassel, Germany, 28 August - 2 September, 2011. Germany: Fraunhofer IWES, 2011. Vol. 2. P. 1368–1375.*
7. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2016. № 42. С. 69–75.
8. Івахнов А. В., Лазуренко О. П., Федорчук С. О. Моделювання системи накопичення електроенергії як високоманевреної потужності з застосуванням в різних вузлах енергосистеми. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2018. Вип. 195. С. 40–43.
9. Труніна Г. О. Зони ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з ін-

верторним приєднанням в розподільній електричній мережі. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 50–52.

10. Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О. Координоване регулювання напруги в роз-

подільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2017. № 35. С. 177–184.

CONTROL OF PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER PLANT WITH ELECTRICITY STORAGE OPERATION IN DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORK

O.Yandulskyy, H.Trunina, D.Nastenko, K.Lysak

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Peremohy avenue, 37, Kiev-56, 03056, Ukraine, E-mail: A_Trunina@ukr.net

Purpose. Development of an approach to control the operation of a power plant based on photovoltaic and wind installation (renewable energy source - RES) with energy storage (ES). **Methodology.** Methods of mathematical modeling and elements of sensitivity theory were used. Elements of the automatic control theory were used to develop the structural model with the control unit. The operating modes of the distribution electrical network were calculated on the basis of the Newton-Rafson method. **Results.** A structural model of RES with ES, connected to the distribution electrical network was developed and an approach to control the operation of such a power plant was proposed. The algorithm of the RES with ES operation control unit was developed taking into account the value of voltage at the power plant connection point and the state of ES (filled, unfilled). The RES with ES operation in the distribution electrical network was carried out using the proposed approach. Analysis of the study results showed that the application of the proposed approach allows to keep the voltage at the nodes of the electrical network within acceptable limits and to reduce the losses of active power in the electrical network by 42-55%, even in modes of maximum generation of RES at maximum filled ES and minimum generation of RES at unfilled ES. **Originality.** In contrast to the known methods and approaches to the control of RES with ES, the developed approach considers the operation of RES in modes of maximum or minimum generation at filled or unfilled ES, given the change in voltage at the power plant connection point. **Practical value.** The practical value of the obtained results is seen in increasing the efficiency of RES with ES in the electric network due to the implementation of the developed approach. **Conclusions.** The use of the proposed approach allows to increase the efficiency of the RES operation with ES in the electrical network, and the further development of the proposed approach is seen in its use as a part of voltage control methods in the electrical network in the presence of RES with ES. References 10, figures 5.

Key words: renewable energy sources, wind farm, photovoltaic, electricity storage, active power control, voltage regulation.

REFERENCES

1. Lezhnyuk, P.D., Kovalchuk, A.A., Nikitorovich, O.V., Kulyk, V.V. (2014), *Vidnovluvani dжерела енергії в розподільних електричних мережах* [Renewable sources of energy in electric distribution networks], Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, 204 p.

2. Ukraine's New Energy Strategy for 2035: «Security, energy efficiency, competitiveness»: approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine, 18.08.2017, no. 605., pp. 66.

3. Lapshin, Y.S., Ardashov, S.A., Parikov, L.E. (2015), «Development prospects of non traditional wind energetics in Ukraine», *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 93, no.4, pp.21-25.

4. Kirilenko, A.V., Pavlovskiy, V.V., Lukyanenko, L.N. (2011), «Technical aspects of implementation of the sources of distribution generation in electrical networks», *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 1, pp. 46-53.

5. Esposito, G., Golovanov, N., Lazaroiu, C., Zaninelli, D. (2007), «Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks», *Electrical Power Quality and Utilisation*, Vol. 3, No. 1. pp.1-6.

6. Yan, W., Braun, M., Appen, J., Кдмпф, E.,

Kraicz, M., Ma, C., Stetz, T., Schmidt, S. (2011), «Operation strategies in distribution systems with high level PV penetration», *International Solar Energy Society 2011: ISES Solar World Congress*, Kassel, Germany, 28 August - 2 September, 2011, Vol.2. pp. 1368-1375.

7. Lezhnyuk, P.D., Komar, V.O., Kravchuk, S.V. (2016), «Determination of optimal power reserves for carrying balance reliability of local electric system», *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, Vol.42, pp.69-75.

8. Ivakhnov, A., Lasurenko, O., Fedorchuk, S. (2018), «Modelling of energy storage systems as highly-maneuvering power by using it in various nodes of power grid», *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, Vol.195, pp.40-43.

9. Trunina, H.O. (2014), «Areas of effective voltage control by distributed generation with inverter interconnection in distribution networks», *Tekhnichna Elektrodynamika*, Vol. 5, pp. 50-52.

10. Yandulskyy, O.S., Nesterko, A.B., Trunina, H.O. (2017), «Coordinated voltage control in the electrical distribution network with a source of distributed generation», *Reporter of the Priazovskiy state technical University. Technical sciences*, vol. 35, pp. 177-184.

Стаття надійшла 29.11.2019.