

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.316:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.005>

РОЗПОДІЛЕНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ РОЗПОДІЛЬЧОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

І.В. Блінов*, докт. техн. наук, **І.В. Трач****, канд. техн. наук, **О.Б. Рибіна***** канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: igor.trach@gmail.com

Досліджено проблеми розподіленого регулювання напруги в електричних мережах (ЕМ) із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) з інтерфейсом перетворювача. Запропоновано здійснювати регулювання напруги управлінням реактивною потужністю ВДЕ з інтерфейсом перетворювача. Як критерій цільової функції використано середньоквадратичне відхилення напруги у вузлах встановлення ВДЕ. Для вирішення задачі екстремуму за динамічних режимів зміни стану ЕМ, зокрема добових змін навантажень та активної потужності ВДЕ, запропоновано метод extremum seeking control (ESC). Наведені приклади показали покращення напруги в ЕМ з віртуальною станцією за різних рівнів обмеження генерації реактивної потужності. Розглянуто роботу тестової ЕМ IEEE33 у разі значного проникнення потужності ВДЕ згідно з нормами стандарту EN50549-1:2019 для отримання оптимального середньодобового значення середньоквадратичного відхилення напруги. Бібл. 12, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: розподілене регулювання напруги, відновлювані джерела енергії, інтерфейс перетворювача, метод extremum seeking control.

Вступ. Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вважається важливою складовою процесів декарбонізації як світової, так і української електроенергетики [1]. Невпинне збільшення кількості ВДЕ в структурі виробничих потужностей доцільно супроводжувати заходами, пов'язаними з використанням переваг впливу властивостей ВДЕ на режими електроенергетичних систем [2, 3]. Так, ВДЕ з інверторами можуть бути джерелами реактивної потужності (РП) та використовуватись для регулювання режимів у розподільчих електричних мережах (ЕМ) та зменшувати активні втрати електричної енергії. Використання джерел РП дає змогу керувати рівнями напруги у вузлах фідерів, реактивною потужністю в точці живлення ЕМ. Перераховані цілі можуть вибиратись як критерії оптимізації.

До основних проблем контролю режимів розподільчих ЕМ традиційно відносять неповноту достовірної інформації про поточний стан ЕМ в умовах добових змін електроспоживання та значних добових коливань активної потужності ВДЕ, що суттєво впливає на режими ЕМ. Тому задачі підтримки напруги розподільчих ЕМ розв'язувалися передусім на рівні проектування ліній ЕМ. Основним засобом регулювання напруги в ЕМ у такому разі виступало регулювання напруги трансформатора на підстанції в центрі живлення ЕМ. Додатково до промислових споживачів висувалася вимога компенсації реактивної складової навантаження, яка реалізується використанням пристроїв компенсації, зазвичай батарей нерегульованих конденсаторів та регульованих конденсаторних установок.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області децентралізованого управління режимами розподільчих ЕМ, впроваджені Smart-технології досі не використовують повною мірою сучасні можливості спільного залучення наявних засобів впливу на режими розподілу електричної енергії, зокрема в умовах невинного впровадження ВДЕ внаслідок недосконалої моделей вибору оптимальної архітектури систем управління та оптимальних законів



регулювання. Ефективним способом вирішення означених проблем є застосування технологій SmartGrid, орієнтованих на децентралізоване управління режимів ЕМ [4]. Концепція SmartGrid передбачає побудову гнучких автоматичних систем ситуативного управління режимами потоків енергії та регулювання рівнів напруги.

Сьогодні серед ВДЕ збільшується кількість систем з інтерфейсом перетворювача (converter interfaced generation – CIG). Генерація з інтерфейсом перетворювача CIG використовує електронні перетворювачі для взаємодії з компонентами енергосистеми, такими як генератори, накопичувачі енергії [5] та електрична мережа. Ці системи призначені для забезпечення гнучкого та ефективного контролю над вихідною потужністю генераторів, і сприяють покращенню загальної продуктивності й стабільності енергосистеми. Проводяться дослідження динамічного керування реактивною потужністю в ЕМ зі значним проникненням CIG з метою покращення напруги та зменшення втрат.

Розподілене регулювання напругою [6] передбачає централізоване контрольоване генерування реактивної потужності групи CIG та є засобом керування розподільчими мережами відповідно до конкретних змін стану ЕМ [7].

У результаті дослідження моделі регресії критерію середньоквадратичного відхилення напруги (СКВН) від змінних РП [7] встановлено, що критерій СКВН належить до класу багатопараметричної повної квадратичної форми зі складовими першого порядку, визначено властивості та оцінено параметри моделі. Це дає змогу вибрати ефективні методи багатопараметричної оптимізації СКВН у вузлах ЕМ за добових змін навантажень, де змінними є розподілені джерела РП.

Задача є складовою технічних рішень із розподіленого регулювання напругою (Distributed voltage control DVC) на основі розподіленого керування реактивною потужністю. Під терміном розподіленого регулювання напругою (DVC) мається на увазі скоординоване синхронізоване в часі вимірювання напруги в декількох вузлах ЕМ, результати якого передаються в центр обробки даних, та наступне керування реактивною потужністю розподіленими CIG для досягнення заданих значень напруги.

Критерій багатопараметричної оптимізації середньоквадратичного відхилення напруги у вузлах ЕМ. Позначимо H, k, l відповідно всі вузли, вхідний і вихідний вузли на ділянках між двома сусідніми вузлами ЕМ; M, i, j – відповідно всі вузли, вхідний і вихідний вузли на ділянках, де присутні джерела РП; E, e – відповідно всі та окремі ділянки ЕМ; N, n – загальну кількість та номери джерел РП ($k, l \in H$), ($i, j \in M$), $M \in H, n \in N$.

З урахуванням генерації РП Q_j^g у вузлах j на ділянках M , напруга на початку ділянки

$$U_k = U_l + (r_{kl}P_l + x_{kl}(Q_l + Q_l^g)/U_l + j(x_{kl}P_l - r_{kl}(Q_l + Q_l^g)/U_l). \quad (1)$$

Після перетворення з урахуванням генерації РП Q_j^g у вузлах j на ділянках M :

$$U_k = U_l + (r_{kl}P_l + x_{kl}(Q_l + Q_l^g)/U_l + j(x_{kl}P_l - r_{kl}(Q_l + Q_l^g)/U_l).$$

Після перетворення отримуємо складову джерел РП Q_j^g в напругу вузла k :

$$\Delta U_k^g = (x_{kl}Q_l^g - jr_{kl}Q_l^g)/U_l. \quad (2)$$

У дослідженні прийнято критерій СКВН, завдяки якому у вузлах встановлення джерел $i \in M$ СКВН має прагнути до нуля в кожний момент доби за відхилення напруги U_i^g вузлів від номінальної напруги U_n :

$$u = \frac{1}{M} \sum_{i \in M} (U_i^g - U_n)^2 \rightarrow 0. \quad (3)$$

Досліджуються методи оптимізації режимів ЕМ із CIG [8, 9]. Для вирішення задачі розподіленого регулювання напругою в ЕМ шляхом оптимізації протікання потоків реактивної потужності в ЕМ використовується квадратична модель напруги для формулювання оптимального протікання потужності в ЕМ [8].

Метою дослідження є вирішення задачі розподіленого регулювання напруги в ЕМ зі значним проникненням СІГ. Досліджено ефективність використання методу extremum seeking control для розподіленого регулювання напруги в ЕМ.

Задача оптимізації. Критерій I_V представляє СКВН V_d від номінальної напруги V_n у s вузлах встановлення СІГ, які генерують як активну, так і реактивну потужності:

$$I_V = \min(V_d), \quad V_d = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (V_i - V_n)^n. \quad (3)$$

Розглядається варіант розподіленого регулювання напруги з використанням СКВН лише у вузлах підключення СІГ. Така постановка задачі дає змогу розпочати регулювання напруги в розподільчій ЕМ із СІГ без додаткових капіталовкладень у засоби моніторингу всіх вузлів із боку Оператора системи розподілу.

Обмеження цільової функції I_V . Максимальна реактивна потужність СІГ $Q_{pv} < Q_{pv}^{\lim}$. У роботі розглянуто варіанти обмеження, що відповідають стандарту EN50549-1:2019. На рис. 1 подано діапазон підтримування реактивної потужності згідно зі стандартом EN50549-1:2019. Обмеженнями є задані діапазони генерування реактивної $Q_{pv}^{\lim}$ потужності СІГ. Вважається, що СІГ генерує реактивну потужність Q упродовж всієї доби відповідно до новітніх стандартів.

Математична модель залежності критерію СКВН. Змінними є реактивна потужність СІГ. СКВН має багатопараметричну квадратичну форму зі складовими першого порядку [7]. Функція суворо опукла, має один мінімум та ознаки міжфакторної залежності. Встановлені особливості математичної моделі використано під час розробки методів оптимізації СКВН.

Метод extremum seeking control. Огляд методів оптимізації режимів ЕМ з приєднаними відновлювальними джерелами представлено в [8, 9]. В дослідженні використано метод extremum seeking control, що застосовується для знаходження екстремальних значень системи [10]. Він використовується у випадках, коли характеристики системи невідомі, зокрема, змінюються в часі. Суть метода полягає в інжекції в ЕМ реактивної потужності, яку генерують ДРП, незначних синусоїдальних збурень заданою частотою, виділенні градієнту сигналу та спуску до мінімуму функції. Процес оптимізації відбувається постійно впродовж доби за добової зміни активної й реактивної потужностей навантажень. Кожне розосереджене СІГ безперервно отримує інформацію про напруги V_i у всіх місцях їхнього приєднання та самостійно корегує величину реактивної складової РП Q_{pv} до встановлення оптимального значення змінної,

яке відповідає мінімуму функції I_V у конкретний поточний момент доби. Збурення можуть відбуватися на одній частоті [11]. На рис. 2 зображено блок-схему реалізації методу ESC.

Слід відмітити важливу перевагу методу extremum seeking control. Метод використовується у випадках, коли відомо про те, що цільова функція має місце один мінімум та неможливо математично описати залежність цільової функції від змінних. У нашому випадку параметри ЕМ постійно змінюються. Зокрема, змінюються навантаження, опір гілок залежно від температури, стан перемикачів трансформаторів, реконфігурація гілок шляхом додавання або відокремлення гілок ЕМ. У всіх цих випадках критерій СКВН буде мати повну квадрати-

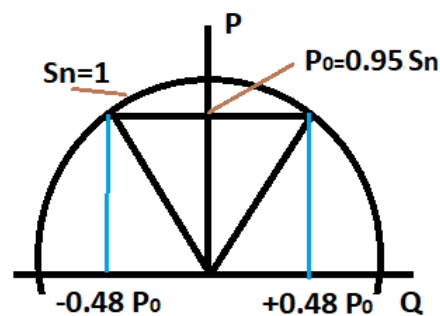


Рис. 1

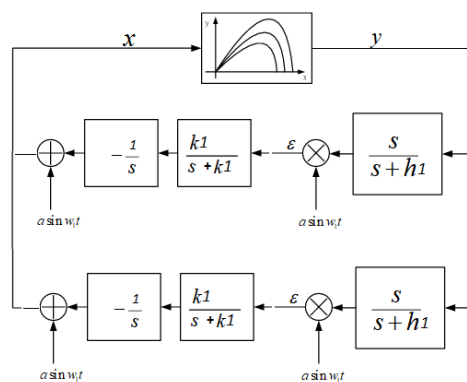


Рис. 2

чну форму, опуклу, з одним мінімумом [7]. Хоча оптимальні значення критерію СКВН та оптимальні значення змінних будуть змінюватись, метод дає змогу знаходити поточні мінімальні значення впродовж доби.

Приклади розподіленого регулювання напруги в ЕМ з СІГ. Для проведення досліджень використано стандартну тестову ЕМ IEEE 33 [12]. Для спрощення аналізу припускається, що Q_{pv} не залежать від потужності P_{pv}^{lim} . Дослідження виконано з урахуванням норми стандарту EN50549-1:2019 (розділ 4.7.2.2) щодо вимоги до обмежень реактивної потужності джерел, приєднаних до ЕМ.

Трасекторію змінних, а саме реактивної потужності СІГ, зображено на рис. 3 для випадків обмежень змінних (реактивна потужність) $Q_{pv}^{lim}=0.6$ МВАр (червоний), 0,3 МВАр (червона). На рис. 4 показана СКВН для випадків обмежень змінних (реактивна потужність) $Q_{pv}^{lim}=0.6$ МВАр (зелена), 0,3 МВАр (синя), 0 МВАр (червона). Високочастотні просадки СКВН показують інтервали генерування активної потужності СІГ в денний інтервал часу з відповідним покращенням напруги. У таблиці наведено усереднені за добу значення СКВН V_d^{ave} . Показано, що генерація РП СІГ покращує СКВН V_d^{ave} . У разі відсутності генерації РП СІГ Q_{pv}^{lim} значно погіршується підтримання напруги в ЕМ. Варіант обмежень $Q_{pv}^{lim}=0$ МВАр представляє відсутність генерування реактивної потужності СІГ і має найгірші показники СКВН. Додатково показано, що навіть за значного проникнення СІГ, що складає 46 % від суми потужностей навантажень ЕМ, СІГ має постійно генерувати максимальну РП упродовж доби.

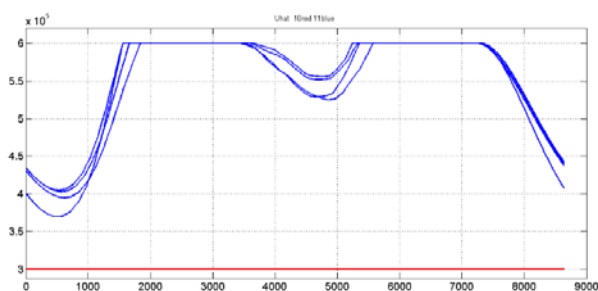


Рис. 3

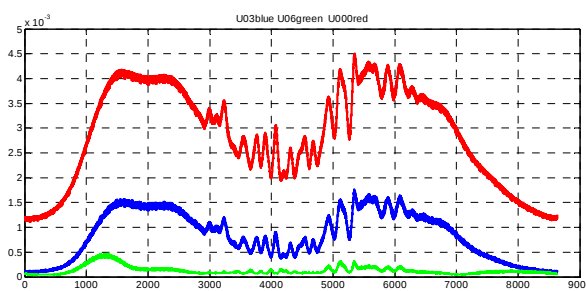


Рис. 4

Q_{pv}^{lim} , [МВАр]	V_d^{ave} , [в.о.]
0	2.91e-3
0.3	0.84279e-3
0.6	0.13023e-3

Висновки. Запропоновано метод розподіленого регулювання напруги в ЕМ у складі групи converter interfaced generation. Як критерій запропоновано використовувати СКВН у вузлах встановлення СІГ. Для вирішення задачі динамічного пошуку екстремуму багатоцільової функції багатьох змінних запропоновано метод extremum seeking control (ESC), в якому використовуються незначні синусоїдальні збурення для кожної змінної.

Наведені приклади показали покращення напруги в ЕМ у разі використання реактивної потужності СІГ, значення якої отримуються методом ESC, за різних рівнів обмеження генерації реактивної потужності.

На прикладі для тестової ЕМ IEEE33 показано, що навіть у разі значного проникнення СІГ для оптимального середньодобового значення СКВН джерела РП СІГ мають переходити в режим генерації максимальної РП упродовж усієї доби.

Фінансується за держбюджетною темою «Науково-технічні засади відновлення та керованості електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи (ENTSO-E)». Шифр: ФЕНІКС. КПКВК 6541030.

1. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>
2. Denysiuk S., Derevianko D.. Optimisation features of energy processes in energy systems with Distributed Generation. *Proceedings IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS*, 2020. Pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160212>
3. Köppe H., Martínez Fernández J., Engel B. Technical and Economical Comparison of Reactive Power Provision with Variable Renewable Energy Power Plants and Compensation Systems. *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018*, Hamburg, 20-21 September 2018.
4. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevych S.E. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 44–54.
5. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
6. Thomas F., Krahmer S., Schegner P. Robust and Optimized Voltage Droop Control considering the Voltage error. https://www.researchgate.net/publication/334491719_Robust_and_Optimized_Voltage_Droop_Control_considering_the_Voltage_Error DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13647.23208>
7. Arnold D., Negrete-Pincetic M., Callaway D. Model-Free Optimal Control of VAR Resources in Distribution Systems: An Extremum Seeking Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015. 31(5). Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2502554>
8. Summer A., Johnson J. and all. A Comparison of DER Voltage Regulation Technologies Using Real-Time Simulations. *Energies*. 2020. 13. 3562. Pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13143562>
9. Barnam J. Saharia, Honey Brahma. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. No 10. 053502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5032146>
10. Ariyur K.B., Krstić M. Analysis and design of multivariable extremum seeking. In Proc. of the American control conference. *Proceedings of the Mathematical Theory of Networks and Systems*, 2002.
11. Blinov I., Trach I. Voltage regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 1. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>
12. Baran M., Wu F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.25627>

DISTRIBUTED VOLTAGE REGULATION IN ELECTRICAL GRIDS WITH RENEWABLE SOURCES OF ELECTRIC ENERGY

I.V. Blinov, I.V. Trach, O.B. Rybina

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
blinovihor@gmail.com, igor.trach@gmail.com

The problems of distributed voltage control in electrical grids (EGs) with renewable sources of electric energy with converter-interfaced generation (CIG). It is proposed to control the EGs modes by controlling the reactive power of converter-interfaced generation. It is proposed to use the mean square deviation of the voltage in the converter interfaced generation (CIG) installation nodes as the criterion of the target function. The extremum seeking control method was used to solve the problem of dynamic optimization with daily changes in the parameters of the electric network, namely the loads and active power of renewable sources. The examples provided have shown the improvement of the voltage in the EG at different levels of reactive power generation limitation according to the norms of the standard EN50549-1:2019. The optimal values of the average daily value of the rms deviation of the voltage of the ieee33 test EM were obtained with a significant penetration of the RES power. Bibl. 12, fig. 4, table.

Keywords.: distributed voltage control, converter interfaced generation, extremum seeking control method.

1. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Basyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52–61. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>
2. Denysiuk S., Derevianko D. Optimisation features of energy processes in energy systems with Distributed Generation. *Proceedings IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS*, 2020. Pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160212>

3. Köppe H., Martínez Fernández J., Engel B. Technical and Economical Comparison of Reactive Power Provision with Variable Renewable Energy Power Plants and Compensation Systems. *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems* – NEIS 2018, Hamburg, 20–21 September 2018.
4. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevych S.E. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 44–54.
5. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 44–54. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
6. Thomas F., Krahmer S., Schegner P. Robust and Optimized Voltage Droop Control considering the Voltage Error https://www.researchgate.net/publication/334491719_Robust_and_Optimized_Voltage_Droop_Control_considering_the_Voltage_Error DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13647.23208>
7. Arnold D., Negrete-Pincetic M., Callaway D. Model-Free Optimal Control of VAR Resources in Distribution Systems: An Extremum Seeking Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015. 31(5). Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2502554>
8. Summer A., Johnson J. and all. A Comparison of DER Voltage Regulation Technologies Using Real-Time Simulations. *Energies*. 2020. 13. 3562. Pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13143562>
9. Barnam J Saharia, Honey Brahma. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. No 10. 053502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5032146>
10. Ariyur K.B., Krstić M. Analysis and design of multivariable extremum seeking. In Proc. of the American control conference. Proceedings of the Mathematical Theory of Networks and Systems, 2002.
11. Blinov I., Trach I. Voltage regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 1. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>
12. Baran M., Wu F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.25627>

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 18.09.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 18.09.2023