УДК 621.311

**О. М. Кісельов**
**В. В. Кулик**

# ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ОПЕРАТОРІВ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ

Вінницький національний технічний університет

***Анотація***

*Завдяки приєднанню промислових накопичувачів енергії (ПНЕ) до розподільних електричних мереж можна досягти зменшення пікових навантажень на елементи мереж, зменшення втрат електроенергії та підвищення якості напруги. Але для цього необхідно застосовувати комплексні критерії оптимальності та враховувати активні обмеження. В доповіді розглядається формалізація задачі оптимізації режимів роботи ПНЕ у розподільних мережах та пропонується її розв'язання на основі методу ідеального струморозподілу. Показано, що задача оптимізації може бути зведена до ітераційного розрахунку струморозподілу у заступній схемі електромереж з активними опорами. А для врахування економічних чинників, пов'язаних зі змінами ціни на енергоринку, вартості експлуатації ПНЕ тощо було розглянуто застосування фіктивних (економічних) опорів. Запропонований оптимізаційний алгоритм забезпечує зменшення кількості обчислювальних операцій та підвищення надійності отримання оптимального розв'язку. Це сприяє своєчасного коригування режимів ПНЕ для досягнення максимального ефекту.*

**Ключові слова:** накопичувач електричної енергії, розподільна електрична мережа, оптимізація, втрати, якість електроенергії

***Abstract***

*By connecting industrial energy storage (IES) to distribution electric grids, it is possible to reduce peak loads on grid elements, reduce power losses, and improve voltage quality. However, this requires the application of comprehensive optimization criteria and consideration of active constraints. The paper considers the formalization of the problem of optimizing the operation modes of IESs in distribution grids and proposes its solution based on the method of ideal current distribution. It is shown that the optimization problem can be reduced to an iterative calculation of the current distribution in the substitute circuit of electric grids with active resistances. To take into account economic factors associated with changes in the price on the energy market, the cost of operating the substation, etc., the use of fictitious (economic) resistances was considered. The proposed optimization algorithm reduces the number of computational operations and increases the reliability of obtaining the optimal solution. This contributes to the timely adjustment of the IES modes to achieve the maximum effect.*

**Keywords**: industrial energy storage, distribution power grid, optimization, losses, power quality.

## Вступ

Розбудова та збільшення встановленої потужності розосереджених джерел енергії, що використовують сонячну, вітрову та гідроенергію, поява нових видів споживачів електроенергії, зокрема електротранспорту, теплових насосів тощо, призвело до істотних змін у функціонуванні та режимах роботи розподільних електричних мереж (РЕМ) [1]. З цих причин перед операторами систем розподілу (ОСР) постали нові технічні проблеми, особливо через нестабільність генерування електричних станцій на сонячній та вітровій енергії. Виявилося, що для вирішення нових проблем необхідно провадити масштабні заходи з реконструкції електромереж, зокрема з переведенням на вищі класи напруги. Однак, в умовах різко змінного навантаження ліній електропередачі та трансформаторів ефективність їх використання залишається низькою, що призводить до незадовільної окупності таких рішень. Подальше зростання встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та кількості споживачів-постачальників електроенергії збільшуватиме нестабильність потоків енергії. А це у перспективі може негативно впливати на роботу операторів систем передачі та енергетичного ринку в цілому [2].

Вирішенню проблеми планування режимів РЕМ з різко змінним навантаженням та розосередже-

ним генеруванням сприяє інтегрування установок накопичення енергії [3]. Зниження пікових навантажень позитивно впливають на якість електроенергії та її втрати, в підсумку зменшуючи витрати на розподіл електроенергії та знижуючи її ціну для споживача. Крім того, такий підхід відтерміновує необхідність впровадження заходів з посилення РЕМ до того часу, коли технічне переоснащення буде зумовлене зростанням потоків електроенергії, а не пікової потужності мереж.

Оскільки розподільні мережі є динамічними системами, ефективна експлуатація ПНЕ в них пов'язана з низкою проблем технічного характеру, які потребують вирішення. Тому дослідження, що присвячені вдосконаленню методів та засобів оптимізації режимів роботи систем накопичення енергії, є актуальними.

## Результати дослідження

Світовий досвід експлуатації сучасних розподільних електромереж показує [4], що альтернативою їх конструктивного підсилення є впровадження систем накопичення енергії. Їх переваги та економічна ефективність активно обговорюються науковою спільнотою. Зокрема, у [5] подано аналіз основних системних послуг, які можуть надавати власники ПНЕ (оператори систем накопичення), наведено варіанти реалізації послуг та проаналізовано фінансові надходження. Крім того показано, що дослідження, пов'язані з керуванням системами накопичення енергії, потребують застосування специфічних методів моделювання. У [6] та інших показано, що завдяки гнучкості та очікуваному зниженню питомої вартості перспективними для промислового використання є електрохімічні системи накопичення енергії.

У [7] наведено огляд результатів наукових досліджень з метою аналізу основних тенденцій та технічних рішень з впровадження систем накопичення електроенергії. Серед невирішених завдань зазначено напрямок формування теоретичного підґрунтя для комплексної оптимізації ємності та потужності ПНЕ, з урахуванням можливості надання різних послуг кільком зацікавленим сторонам. Причиною відсутності вирішення згаданої проблеми зазначається складність розроблення моделі оцінювання ефекту для кількох суб'єктів енергоринку. Серед невирішених проблем інтегрування ПНЕ у розподільні мережі зазначається відсутність ефективних механізмів стимулювання. Причиною зазначається відсутність теоретичного підґрунтя та нормативної бази для оцінювання й монетизації додаткових переваг, що забезпечує інтегрування ПНЕ. Зокрема, підвищення надійності електропостачання, зменшення втрат електроенергії та підвищення її якості.

У [8] наведено огляд результатів наукових досліджень, що присвячені аналізу економічних факторів та технічних обмежень на шляху розвитку систем накопичення електроенергії. Показано, що для оптимізації розвитку систем накопичення енергії малої ємності доцільно використовувати суто економічні критерії. Однак для оптимального інтегрування ПНЕ до систем розподілу електроенергії критерії мають враховувати технічні фактори. Найвживанішими методами оптимізації зазначено евристичні імітаційні алгоритми, що пояснюється їх популярністю та використанням спрощених формулювань оптимізаційної задачі. Серед невирішених завдань зазначається необхідність вдосконалення моделей для оцінювання ефективності технічних рішень з керування ПНЕ у електричних мережах.

У [9] наведено огляд результатів наукових досліджень, що присвячені вдосконаленню математичних методів та алгоритмів оптимізації керування накопичувачами енергії в електричних системах. Наведено детальний аналіз математичних моделей, що використовуються для розрахунку режимних параметрів розподільних мереж під час оптимізації розміщення ПНЕ. В якості перспективного напрямку досліджень зазначається підвищення точності моделювання потоків енергії у РЕМ. До поширених методів оптимізації автори відносять метаевристичні алгоритми оптимізації, як і в попередньому огляді. Серед напрямків вдосконалення методів вирішення задачі оптимізації систем накопичення енергії у РЕМ зазначається необхідність підвищення якості прогнозування впливових факторів. А для цього алгоритми мають забезпечувати опрацювання значних масивів ретроспективних даних щодо змін навантаження, генерування розосереджених джерел енергії тощо.

Оптимізація режимів роботи ПНЕ є складною задачею з інтегральним критерієм якості. У [10] проаналізовано низку методів її розв'язання, які можна поділити на чотири групи відповідно до методології, що використовується: аналітичні методи, методи математичного програмування, методи вичерпного пошуку (оптимізованого перебору варіантів) та евристичні методи. За результатами аналізу встановлено, що для електромереж великої розмірності задача комплексної оптимізації функціонування ПНЕ не була ефективно вирішена.

Тож у доповіді розв'язання задач дослідження було використано метод ідеального струморозподілу (за мінімумом втрат електроенергії), що отриманий на підставі принципу Гамільтона-Остроградського. Для формалізації оптимізаційних задач та побудови ітеративних процедур їх розв'язання використано узагальнювальні методи теорії моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування.

Для кожного характерного періоду заряду чи розряду ПНЕ задачу оптимізації режиму РЕМ за потужністю та напругою можна подати у такому вигляді:

$$
\begin{cases}
\Pi_{\text{р}}(\mathbf{X}) \to \max,\ \mathbf{X}_t = \left\{ P^{+}_{\text{Н}i(t)}, P^{-}_{\text{Н}i(t)},\ i \in [1...n_{\text{н}}] \right\}; \\
E_{i(t)} = E_{i(t-1)} - \left( \eta P^{+}_{\text{Н}i(t)|t\in\mathbf{T}_D} - P^{-}_{\text{Н}i(t)|t\in\mathbf{T}_C} \right); \\
\left| E_{i(t)} - E_{i(t-1)} \right| \le \Delta E_{i_\max}(E_{i(t)}),\ t \in \mathbf{T}, \\
D_t = P^{+}_{\text{Н}\Sigma(t)} - \sum_{i=1}^{n_{\text{с}}} P_{i(t)} - \Delta P(\mathbf{X});\ \ D_t \le D_{\max}, t \in \mathbf{T}_D; \\
C_t = P^{-}_{\text{Н}\Sigma(t)} + \sum_{i=1}^{n_{\text{с}}} P_{i(t)} + \Delta P(\mathbf{X});\ \ C_t \le C_{\max}, t \in \mathbf{T}_C; \\
\mathbf{T} = \mathbf{T}_C \cup \mathbf{T}_D; \\
U_{i_\min} \le U_{i(t)} \le U_{i_\max},\ i \in [1...n_n], t \in \mathbf{T}; \\
I_{i(t)} \le I_{i_\max},\ i \in [1...n_b], t \in \mathbf{T}, \\
E_{i(t)} \le E_i,\ i \in [1...n_{\text{н}}],\ \sum_{i=1}^{n_{\text{н}}} E_{i(t)} \le E_{\Sigma},\ \sum_{i=1}^{n_{\text{н}}} P_{i(t)} \le P_{\Sigma},\ t \in \mathbf{T},
\end{cases}
$$

де $\Pi_{\text{р}}(\mathbf{X})$ – поточний річний прибуток РЕМ, зумовлений зменшенням витрат на закупівлю електроенергії для постачання споживачів, зниженням втрат електроенергії, підвищенням якості напруги; $\mathbf{X}$ – множина оптимізованих змінних, що характеризують режим роботи ПНЕ; $E_{i(0)}$, $E_{i(t)}$ – енергія накопичувача, що може бути вилучена станом на початок розрахункового періоду та в момент часу $t$; $\Delta E_{i_max}$ – максимальний приріст ємності накопичувача протягом заданого періоду $\Delta t$, що характеризує швидкість заряду/розряду; $\eta$ – показник ефективності циклу заряду/розряду ПНЕ, що визначає частку накопиченої енергії, яка може бути використана; $P^{+}_{\text{Н}i(t)}$, $P^{-}_{\text{Н}i(t)}$ – потужність накопичувача, відповідно, під час розряду та заряду акумуляторів; $P_{i(t)}$ – середня потужність $i$-го вузла споживання протягом періоду $t$; $\mathbf{T}_D$, $\mathbf{T}_{\text{C}}$ – множина періодів часу $t$ заданої тривалості, що відповідають розряду та заряду акумуляторів накопичувача, відповідно; $n_{\text{с}}$, $n_{\text{н}}$, $n_{\text{п}}$, $n_b$ – відповідно, кількість вузлів споживання з контрольованими потужностями, ПНЕ, вузлів з контрольованою напругою та віток з контрольованим струмом; $D_t$, $C_t$ – небаланси потужності, що виникають у РЕМ протягом періоду $t$ розряду чи заряду акумуляторів накопичувача, відповідно; $U_{i_max}$, $U_{i_max}$, $I_{i_max}$ – гранично-допустимі значення напруг у контрольованих вузлах та струмів у контрольованих вітках заступної схеми РЕМ; $C_{max}$, $D_{max}$ – граничні значення перетоків електроенергії на межі балансової належності РЕМ у прямому та зворотному напрямках, відповідно.

Задача оптимізації режимів ПНЕ належить до задач оптимізації нелінійних неперервних функцій з обмеженнями. Для розв'язання подібних задач стосовно електричних мереж високу ефективність показав метод ідеального (економічного) струморозподілу [11]. Метод отримано на основі принципу найменшої дії у формулюванні Гамільтона-Остроградського.

Згідно методу ідеального струморозподілу оптимальні потужності джерел та споживачів електроенергії, зокрема ПНЕ, за критерієм мінімуму втрат електроенергії можуть бути визначені з результатів моделювання «ідеальних» режимів електромереж. Для цього використовуються заступні схеми мереж з активними опорами.

Перехід від мінімізації втрат електроенергії до максимізації прибутку з урахуванням економічних чинників, пов'язаних зокрема з експлуатацією ПНЕ, можуть бути враховані додаванням відповідних

фіктивних опорів до заступної схеми. Ці опори нелінійно змінюються залежно від режимних параметрів електромереж та незалежних оптимізованих змінних **X**.

Застосування такого підходу, на відміну від класичних методів нелінійного програмування, скорочує обсяг розрахунків для оптимізації параметрів режиму електромереж на певному часовому проміжку. Розв'язок виявляється максимально наближеним до глобального мінімуму цільової функції, якщо її можна «перерахувати» у еквівалентні витрати енергії.

Обчислювальна ефективність та надійність підходу забезпечується зведенням задачі оптимізації режимів ПНЕ до ітеративного розрахунку «ідеальних» режимів РЕМ за відповідними заступними схемами. Стійкість розв'язку забезпечується відсутністю накопичення похибок обчислень між ітераціями та послідовними часовими зрізами.

**Висновки**

Метод ідеального струморозподілу РЕМ забезпечує швидкий пошук оптимальних потужностей заряду та розряду для сукупності взаємопов'язаних ПНЕ за критерієм максимуму прибутку від зменшення закупівельної вартості та втрат електроенергії. Для врахування змін у цінах електроенергії та витрат на експлуатацію ПНЕ до заступної r-схеми необхідно ввести фіктивні опори. Їх значення розраховуються так, щоб вартість втрат електроенергії в них була рівна вартості отриманої електроенергії, чи експлуатаційним видаткам для окремих ПНЕ, відповідно.

За результатами досліджень розроблено оптимізаційний алгоритм, який забезпечує можливість розподілених обчислень, зменшення кількості обчислювальних операцій та підвищення надійності отримання оптимального розв'язку. Це дає змогу враховувати ширше коло впливових факторів, зокрема динаміку процесів ціноутворення, споживання та вироблення електроенергії з місцевих джерел.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. K. Clement, E. Haesen, and J. Driesen, "Stochastic analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid," in Proc. CIRED 20th Int. Conf. Exhib. Electric. Distribution - Part 2, 2009, pp. 1–4. – https://ieeexplore.ieee.org/document/5371206.

2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 44–50. – http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/61922.

3. R. Moreira, G. Strbac, P. Papadopoulos and A. Laguna, "Business case in support for reactive power services from distributed energy storage," CIRED-Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 1609-1613, Oct. 2017. – https://www.researchgate.net/publication/321205552.

4. C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 91, pp. 1205–1230, Aug. 2018. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301606.

5. M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832. – https://ieeexplore.ieee.org/document/9040552.

6. G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithiumion battery: State of the art and future perspectives," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 89, pp. 292–308, Jun. 2018. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728.

7. N. D. Hatziargyriou, D. Škrlec, T. Capuder, P. S. Georgilakis, and M. Zidar, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: Applications, methods and future research," IET Gener. Transmiss. Distrib., vol. 10, no. 3, pp. 645–652, 2016. – https://www.researchgate.net/publication/282582776.

8. Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 91, pp. 109–125, 2018. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301436.

9. H. Saboori, R. Hemmati, S. M. S. Ghiasi, and S. Dehghan, "Energy storage planning in electric power distribution networks. A state-of-the-art review," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 79(C), pp. 1108–1121, 2017. –https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308080.

10. Choton K. Das, Octavian Bass, Ganesh Kothapalli, Thair S. Mahmoud, Daryoush Habibi, “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp. 1205-1230, 2018. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068.

11. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тептя]: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 212 с. – ISBN 978-966-641-576-2.

***Кісельов Олег Миколайович*** – студент групи *ЕСМ-23мс*, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kiseliov_oleg@gmail.com

***Кулик Володимир Володимирович*** – докт. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua

***Oleg Kiseliov*** – student of group *ESM-23ms*, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kiseliov_oleg@gmail.com

***Volodymyr Kulyk*** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua