

МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Впровадження розосереджених джерел енергії в електричні мережі промислових підприємств та розвиток енергетики стало розв'язанням, який передбачає використання енергетичних установок невеликої потужності, вимагають й відповідних змін в структурі централізованої системи електропостачання. Використання розосередженої генерації підвищує надійність електропостачання споживачів, спрощує передачу та розподіл електроенергії між ними. Але, водночас нестабільна генерація потужності відновлюваними джерелами енергії може викликати небажані перетоки енергії та додаткові втрати потужності. В статті запропонована модель електричної мережі промислового підприємства, яка складається з трьох локальних мереж: якісної та неякісної електроенергії змінного струму та об'єднуючої їх мережі постійного струму. Для дослідження запропонованої електромережі розраховані математичною моделлю на прикладі умовного промислового підприємства. Розроблена математична модель дозволяє провести розрахунок усталених режимів роботи локальних електромереж з урахуванням можливих місць приєднання накопичувачів енергії, джерел розосередженої генерації тощо. Запропонований підхід дає можливість обрати оптимальний варіант підключення розподіленої генерації до електричних мереж підприємства, позбутися небажаних перетоків електричної енергії та зменшити втрати енергії в них.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розосереджена генерація, електрична мережа, розрахунок усталених режимів, якість електроенергії.

Вступ.

В останні роки централізована система електропостачання, яка передбачає використання достатньо потужного електрообладнання і об'єднання його в єдиний енергетичний комплекс, зазнає суттєвих змін за рахунок впровадження розосереджених джерел енергії. У зв'язку з цим у світі поширюється так звана енергетика стало розв'язання [1], що передбачає використання енергоустановок невеликої потужності. А це високоефективні газотурбінні, парогазові [2 – 4] й, звісно, відновлювані джерела енергії, такі як вітро- й фотоелектричні перетворювачі.

Очевидно, що електромережі у зазначеному випадку також зазнають суттєвих змін, через підключення до них розосереджених джерел енергії, що суттєво спрощує передачу і розподілення енергії між споживачами й підвищує надійність електропостачання. Та, на жаль, й ці мережі характеризуються деякими негативними факторами, такими як нестабільне генерування потужності ВДЕ, зміни напрямку перетоків енергії у часі й збільшення за рахунок цього втрат потужності тощо.

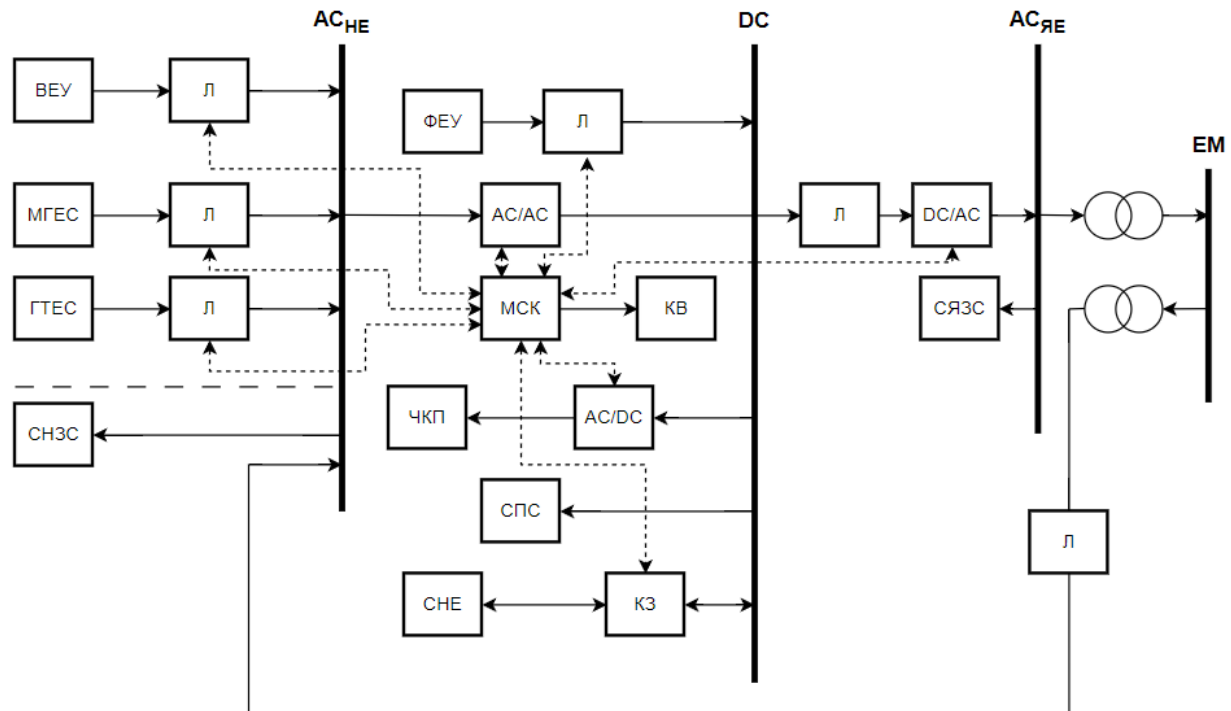
Враховуючи останнє й одночасно позитивний досвід впровадження розосередженої генерації, зараз активно обговорюється питання створення так званих локальних мікросистем (окремих модулів). Вони розглядаються як єдиний відокремлений об'єкт керування в межах конкретної електричної топології і можуть працювати як у ізолюваному від загальної мережі режимі, так і знаходячись у підключеному до неї стані [5].

Відомо, що промислові підприємства, які фактично є навантаженнями загальної енергосистеми, також намагаються впроваджувати ВДЕ у свої електромережі, перетворюючи їх у більш складні вже з розосередженою генерацією і усіма негативними факторами. Тож стає зрозуміло, що і їх необхідно розглядати натеper як локальні модулі єдиної енергосистеми й будувати на вже інших, ніж раніше, принципах. Структура таких мереж повинна відповідати загальним особливостям розосереджених систем і давати можливість позбутися негативу, який стрімко накопичується у традиційно побудованих електромережах промислових підприємств.

Метою роботи є розробка моделі енергоефективної електромережі промислового підприємства з розосередженою генерацією.

Матеріал і результати досліджень.

В роботі [6] запропонована принципова схема такої енергоефективної електромережі промислового підприємства з розосередженими джерелами енергії, яка має три взаємопов'язані локальні складові: мережі якісної і неякісної електроенергії й мережу постійного струму. На рис. 1 наведена її структурна схема.



CHZC – споживачі неякісного змінного струму; SYZC – споживачі якісного змінного струму; СПС – споживачі постійного струму; МГЕС – мікроГЕС; ГТЕС – газотурбінна установка; ВЕУ, ФЕУ – вітрова фотоелектростанції; СНЕ – системи накопичення енергії; МСК – мікропроцесорна система керування; КЗ – контролер заряду; КВ – керуючі впливи; Л – лічильник електроенергії; ЧКП – частотно-керований привод

Рисунок 1 - Загальна структура ефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації:

Така схема повністю відповідає вимогам щодо зазначених вище локальних модулів, значно спрощує інтегрування в неї ВДЕ, робить непотрібним забезпечувати якість всього обсягу споживаної електроенергії, електромагнітну сумісність навантажень і самої мережі з розподільчою, суттєво зменшує кількість і загальну потужність використаних пристроїв силової електроніки. Наведена структура електромережі дозволить створити також ефективну уніфіковану систему керування процесом споживання електроенергії на підприємстві, у яку можуть бути інтегровані сучасні комунікаційні технології Smart Grid.

Зрозуміло, що для забезпечення максимальної енергоефективності запропонованої децентралізованої локальної електромережі промислового підприємства необхідно провести розрахунок усталених режимів її роботи з урахуванням можливих місць приєднання джерел розосередженої генерації, накопичувачів електроенергії, а також перетворювачів щодо останньої через які поєднуються складові мережі між собою. Це дасть можливість не тільки мінімізувати втрати потужності в ній, а й забезпечити однонаправленість її перетоку (передачі).

Для того, щоб провести зазначені дослідження запропонованої електромережі розрахунковими методами треба мати відповідну математичну модель і синтезувати її доцільно також у вигляді поєднаних між собою складових, що відповідають локальним мережам якісної й неякісної електроенергії змінного струму і мережі постійного струму. Блок-схема такої моделі представлена на рис. 2, а послідовність дій при цьому повинна бути наступною:

1. Розрахунок струмів, втрат потужності і напруги у гілках мережі якісної енергії, загальної потужності споживачів у ній. Очевидно, що остання разом з її втратами буде в подальшому слугувати навантаженням для мережі постійного струму.

2. Розрахунки тих же величин у мережі постійного струму за двома випадками: накопичувач розглядається як її навантаження і як джерело енергії в залежності від режиму його роботи (заряджання чи розряджання). Загальна потужність споживачів вже двох розглянутих мереж і втрат останньої у їх гілках будуть слугувати навантаженням мережі неякісної електроенергії.

3. Аналогічні розрахунки для мережі неякісної електроенергії за двома раніше зазначеними випадками, які і дозволять розрахувати найменше і найбільше навантаження загальної мережі.

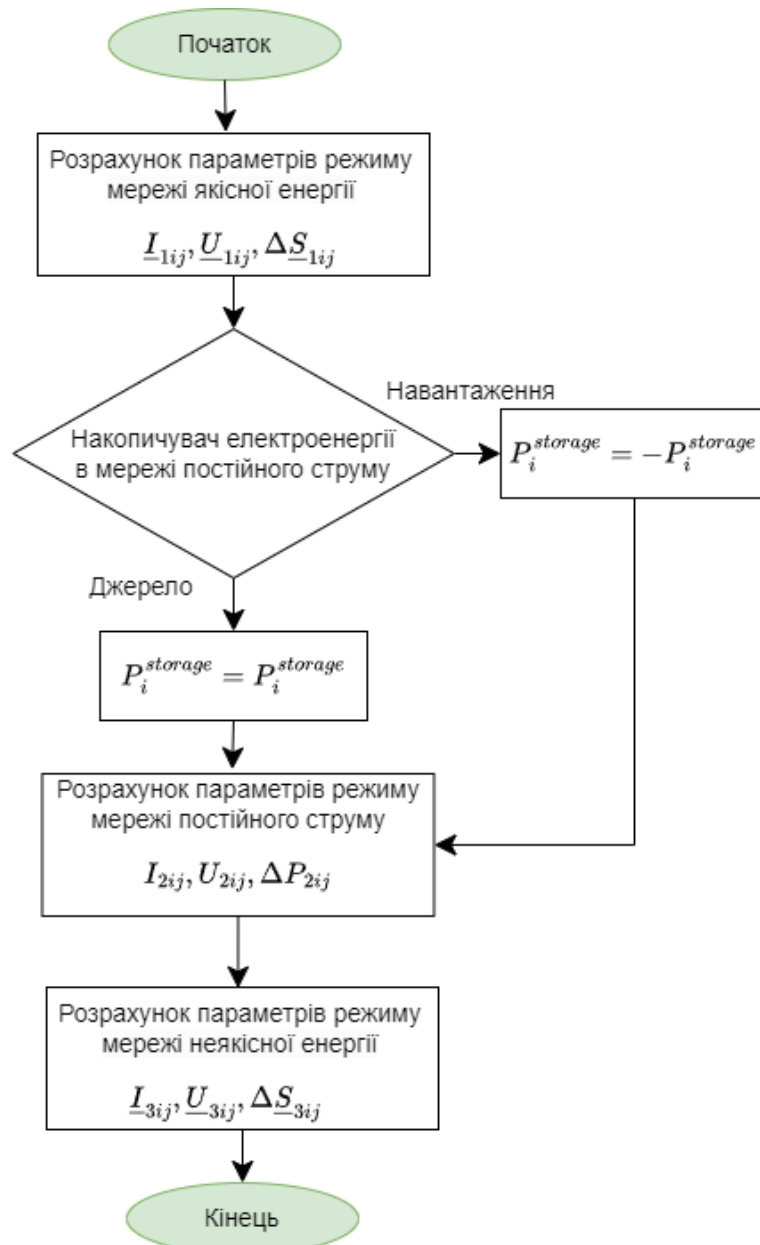


Рисунок 2 - Алгоритм розрахунку ustalених режимів ефективної електромережі промислового підприємства з трьома локальними мережами.

Тож, виконаємо таке моделювання на прикладі електромережі умовного промислового підприємства, представленої на рис. 3. Найбільш поширеним способом для розрахунку ustalених режимів роботи останньої є метод вузлових напруг, який зручніше, звісно, використовувати у матричній формі [7 – 9]. Цей метод є більш ефективним, ніж розв’язувати систему рівнянь, складених за першим та другим законами Кірхгофа, оскільки кількість гілок в схемах складних електричних мереж значно більша, ніж кількість вузлів в них.

Система рівнянь вузлових напруг для мережі, яка містить n гілок може бути записана у наступному вигляді.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де Y_{ij}, Y_{ji} – взаємні та власні провідності вузлів мережі; U_i, I_i – напруги та струми шин електричної мережі.

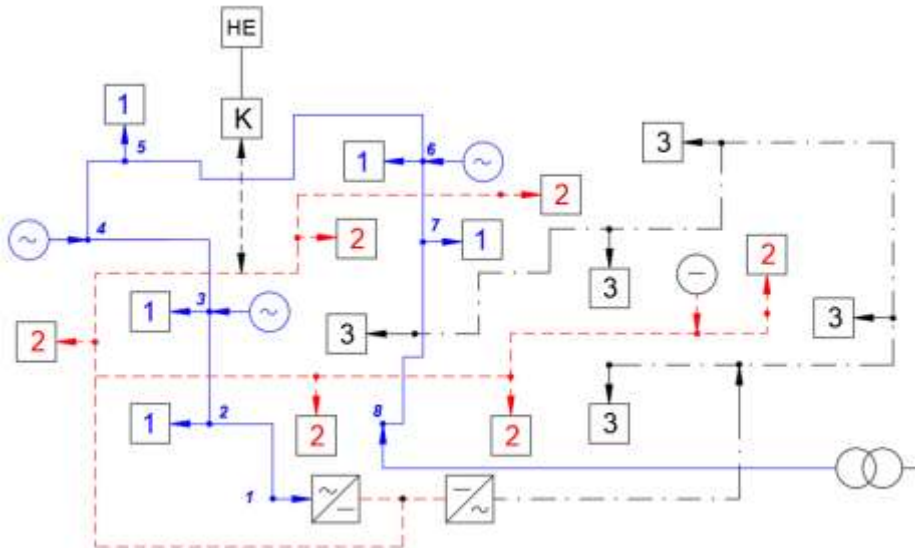


Рисунок 3 - Електрична мережа умовного промислового підприємства з трьома локальними мережами:
 1 – мережа неякісної енергії, 2 – мережа постійного струму, 3 – мережа якісної енергії.

Тут власні провідності вузлів мережі Y_{ii} дорівнюють сумі провідностей гілок, які мають з'єднання з вузлом i . Взаємна провідність вузлів i та j Y_{ij} дорівнює від'ємній сумі провідностей гілок, що з'єднують зазначені вузли.

Для визначення величин й напрямів струмів та потужностей на окремих ділянках електричної мережі використовують отримані в результаті розв'язку системи (1) значення напруг на шинах \underline{U}_j . Величину струму на ділянці електричної мережі в такому випадку можна визначити за наступним виразом:

$$I_{ij} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) \cdot Y_{ij} = \frac{U_i - U_j}{\sqrt{3} \cdot Z_{ij}}, \quad (2)$$

а повну потужність на початку та в кінці ділянки kj як:

$$S_{kj}^{begin} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_k \cdot I_{kj}^* = -Y_{kj} \underline{U}_k^2 + Y_{kj} \underline{U}_k \underline{U}_j^*, \quad (3)$$

$$S_{kj}^{end} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_j \cdot I_{kj}^* = -Y_{kj} \underline{U}_j \underline{U}_k + Y_{kj} \underline{U}_j^2. \quad (4)$$

Розглянемо застосування рівнянь (1) – (4) для локальної мережі змінного струму з підключеними джерелами розосередженої генерації, представленої на рис. 4.

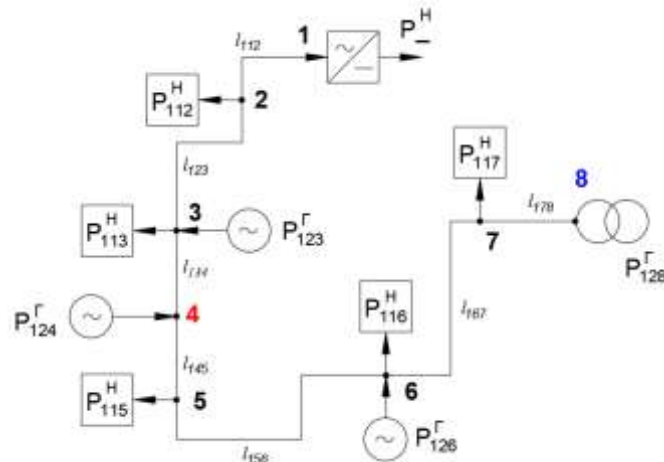


Рисунок 4 - Електрична мережа з джерелами розосередженої генерації без засобів забезпечення якості електроенергії.

Остання містить 8 вузлів з підключеними до них навантаженнями та розосередженими джерелами енергії. Навантаження та джерела енергії позначені потрійним індексом. Перша цифра відповідає типу локальної мережі, так якщо це 1 – мережа змінного струму неякісної енергії, 2 – мережа постійного струму, 3 – мережа змінного струму якісної енергії. Друга цифра приймає значення 1, 2 та 3, що відповідає навантаженню, джерелу енергії та накопичувачу останньої відповідно. Третя цифра є порядковим номером об'єкта, підключеного до вузла. Наприклад, P_{113} – потужність третього навантаження мережі неякісної енергії, P_{221} – потужність першого джерела в мережі постійного струму тощо.

Потужність для зазначеної вище мережі постійного струму розглядається як навантаження, що підключене до вузла 1 (рис. 4). Тож, система рівнянь вузлових напруг останньої може бути записана в наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{112} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{112} & Y_{22} & -Y_{123} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{123} & Y_{33} & -Y_{134} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{134} & Y_{44} & -Y_{145} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{145} & Y_{55} & -Y_{156} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{156} & Y_{66} & -Y_{167} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{167} & Y_{77} & -Y_{178} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{178} & Y_{88} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} -P_{DC}^H / U_1 \\ -S_{112}^H / U_2 \\ \left(S_{123}^G - S_{113}^H \right) / U_3 \\ S_{124}^G / U_4 \\ -S_{115}^H / U_5 \\ \left(S_{126}^G - S_{116}^H \right) / U_6 \\ -S_{117}^H / U_7 \\ S_{128}^G / U_8 \end{bmatrix},$$

де

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{112}; \quad Y_{22} = Y_{112} + Y_{123}; \quad Y_{33} = Y_{123} + Y_{134}; \\ Y_{44} &= Y_{134} + Y_{145}; \quad Y_{55} = Y_{145} + Y_{156}; \quad Y_{66} = Y_{156} + Y_{167}; \\ Y_{77} &= Y_{167} + Y_{178}; \quad Y_{88} = Y_{178}. \end{aligned}$$

В подальшому для визначення розподілу потужностей в мережі можуть бути застосовані відомі ітераційні методи розв'язку вищенаведеної системи рівнянь, такі як метод Гауса-Зейделя, Ньютона-Рапсона тощо [7, 10, 11].

Розрахунок параметрів мережі постійного струму проводиться з урахуванням режиму роботи накопичувачів електричної енергії (заряджання чи розряджання). При цьому розраховуються струми, втрати напруги та активної потужності в гілках. Рівняння, за якими виконується зазначений вище розрахунок є суто лінійними і для їх розв'язання достатньо однієї ітерації.

Для визначення параметрів мережі змінного струму якісної енергії в загальному вигляді може бути також використана система рівнянь (1) – (4). Зазначена мережа умовного підприємства, що розглядається (рис. 5), не містить джерел розосередженої генерації та замкнених кіл. Тож, для нерозгалуженої схеми розглянутого підприємства втрати активної потужності можна визначити за наступними виразами:

$$\begin{aligned} \Delta P_{3(n-1)n}^M &= I_{3(n-1)n}^2 \cdot R_{3(n-1)n}, \\ \Delta P_{3(n-2)(n-1)}^M &= I_{3(n-2)(n-1)}^2 \cdot R_{3(n-2)(n-1)}, \\ \Delta P_{3(n-3)(n-2)}^M &= I_{3(n-3)(n-2)}^2 \cdot R_{3(n-3)(n-2)}, \\ &\dots \\ \Delta P_{301}^M &= I_{301}^2 \cdot R_{301}, \end{aligned}$$

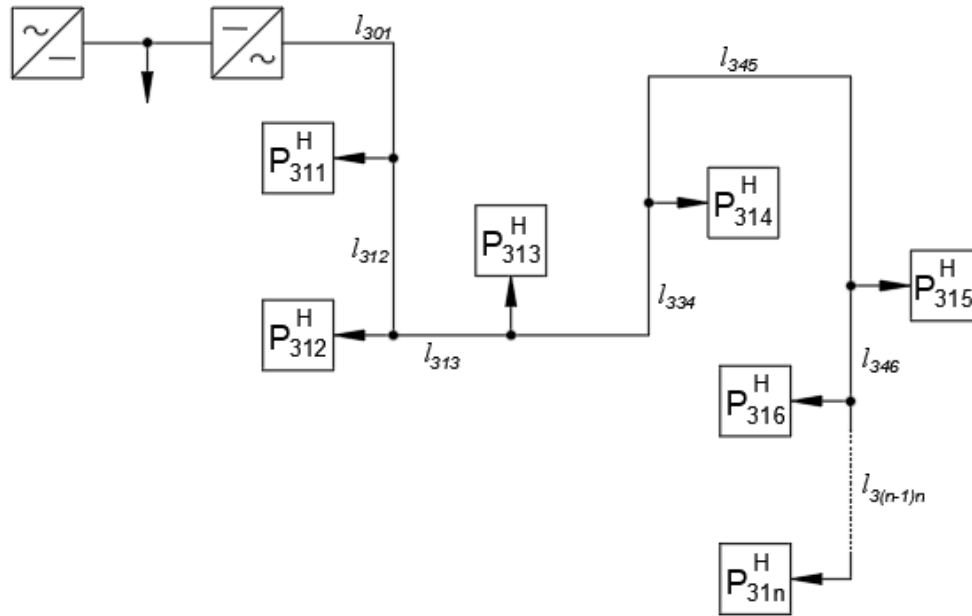


Рисунок 5 - Структурна схема мережі змінного струму якісної енергії.

Тут активна складова струмів на кожній ділянці може бути розрахована наступним чином:

$$I_{3(n-1)n} = P_{3n}^H / U,$$

$$I_{3(n-2)(n-1)} = I_{3(n-1)n} + P_{3(n-1)}^H / U,$$

$$I_{3(n-3)(n-2)} = I_{3(n-2)(n-1)} + P_{3(n-2)}^H / U,$$

...

$$I_{301} = I_{3[n-(n-1)][(n-1)(n-2)]} + P_{3(n-(n-1))}^H / U,$$

а активний опір відповідних гілок мережі дорівнює:

$$R_{3(n-1)n} = \rho_{3(n-1)n} \cdot \frac{l_{3(n-1)n}}{F_{3(n-1)n}},$$

$$R_{3(n-2)(n-1)} = \rho_{3(n-2)(n-1)} \cdot \frac{l_{3(n-2)(n-1)}}{F_{3(n-2)(n-1)}},$$

$$R_{3(n-3)(n-2)} = \rho_{3(n-3)(n-2)} \cdot \frac{l_{3(n-3)(n-2)}}{F_{3(n-3)(n-2)}},$$

...

$$R_{301} = \rho_{301} \cdot \frac{l_{301}}{F_{301}},$$

де ρ – питома провідність провідника, Ом·мм²/м;

l – довжина ділянки між вузлами, м;

F – переріз провідника, мм².

Тож загальні втрати активної потужності в мережі якісної електроенергії становлять:

$$\Delta P_{3\Sigma}^M = \sum_{i=1, j=1}^N \Delta P_{3ij}.$$

У синтезованій моделі енергоефективної електромережі промислового підприємства з розосередженими джерелами енергії, що складається з трьох локальних мереж: якісної і неякісної електроенергії змінного струму та об'єднуючої їх мережі постійного струму, у явному вигляді використані параметри, що характеризують як топологію, так і перерізи й довжини всіх її гілок. Вона передбачає також можливість змінювати місце приєднання будь-якого розосередженого джерела енергії і накопичувача чи напівпровідникових перетворювачів останньої до мережі. Тож, за допомогою цієї моделі можливо виконати всі необхідні розрахункові дослідження щодо максимізації енергоефективності запропонованої електромережі у кожному конкретному випадку її реалізації.

Висновки.

1. Промислові підприємства активно впроваджують розосереджені джерела енергії у свої електричні мережі, що може призвести до виникнення небажаних перетоків енергії та додаткових втрат потужності.

2. Зменшити негативний вплив джерел розосередженої генерації на показники якості електроенергії в мережах промислових підприємств та підвищити ефективність їх використання можливо шляхом створення локальних взаємопов'язаних мереж змінного струму з якісною та неякісною електроенергією та мережі постійного струму, яка об'єднує вищезазначені між собою.

3. Запропонована математична модель дозволяє провести розрахунок ustalених режимів роботи зазначених вище локальних електромереж з урахуванням можливих місць приєднання накопичувачів енергії, джерел розосередженої генерації тощо. Такий підхід дає можливість обрати оптимальний варіант підключення ВДЕ до електромереж промислового підприємства, позбутися небажаних перетоків потужності в них та зменшити втрати останньої.

Список використаної літератури

1. Кириленко О. В., Праховник А. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови. *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*. 2010. С. 10-16.
2. M. F. Akorede, H. Hizam, E. Pournesmaeil. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, no. 2. P. 724–734, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.025.
3. S. Mane. Advancements in gas turbine engine technology: A conceptual aspect. *International Journal of Enhanced Research Science Technology & Engineering*. 2023. Vol. 12, no. 7. P. 37-41.
4. R. De Robbio. Micro Gas Turbine Role in Distributed Generation with Renewable Energy Sources. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 704, doi: 10.3390/en16020704.
5. A. Brem, M. M. Adrita, D. T. J. O'Sullivan, K. Bruton. Industrial smart and micro grid systems – A systematic mapping study. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. P. 118828, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118828.
6. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо структури енергоефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4. С. 54-59, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59>.
7. Zhu J. OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118887004>.
8. Deepinder Kaur M., Er, Saini S. Load Flow Analysis: A Review. *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, 2016. Vol. 5. Issue 3. P. 1254-1260, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0503009.
9. Abur A, Expósito AG. Power System State Estimation Theory and Implementation. New York: Wiley-IEEE Press; 2004.
10. Arrillaga J., Watson N.R. Computer Modelling of Electrical Power Systems, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
11. Igbogidi Onyebuchi. MODERN TREND OF LOAD FLOW ANALYSIS IN POWER SYSTEM. 2024. Vol. 12. P. 53-58.

O. Shram¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4206-7716

Yu. Kachan¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof, ORCID 0000-0001-9984-3646

¹National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

MODEL OF AN ENERGY-EFFICIENT POWER GRID OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE WITH DISTRIBUTED GENERATION

The integration of distributed energy sources into the power grids of industrial enterprises and the development of sustainable energy, which involves the use of low-capacity power facilities, require corresponding changes in the structure of the centralized power supply system. The use of distributed generation increases the reliability of electricity supply to consumers, simplifies the transmission and distribution of electricity between them. However, at the same time, unstable power generation by renewable energy sources can cause unwanted energy flows and additional power losses.

The article proposes a model of an industrial enterprise power grid consisting of three local grids: high-quality and low-quality AC power and the DC grid that unites them. Such a scheme fully meets the requirements for the above-mentioned local modules, significantly simplifies the integration of renewable energy sources into it, makes it unnecessary to ensure the quality of the entire volume of consumed electricity, the electromagnetic compatibility of loads and the grid itself with the distribution one, and significantly reduces the number and total power of power electronics devices used. The described structure of the power grid will also create an effective unified system for managing the process of electricity consumption at the enterprise, into which modern communication technologies of the Smart Grid can be integrated.

To study the proposed power grid by computational methods, a mathematical model is synthesized and its use is considered on the example of a simulated industrial enterprise. The developed mathematical model allows to calculate the steady-state modes of operation of local power grids, taking into account possible places of connection of energy storage devices, sources of distributed generation, etc. The proposed approach makes it possible to choose the optimal variant of connecting distributed generation to the enterprise's power grids, to eliminate unwanted power flows and reduce energy losses in them.

Keywords: renewable energy sources, distributed generation, power grid, calculation of steady-state modes, power quality.

References

1. Kyrylenko O. V., Prakhovnik A. V. Energy for sustainable development: challenges and ways to build. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Special issue*. 2010. P. 10-16.
2. M. F. Akorede, H. Hizam, E. Pouresmaeil. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, no. 2. P. 724–734, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.025.
3. S. Mane. Advancements in gas turbine engine technology: A conceptual aspect. *International Journal of Enhanced Research Science Technology & Engineering*. 2023. Vol. 12, no. 7. P. 37-41.
4. R. De Robbio. Micro Gas Turbine Role in Distributed Generation with Renewable Energy Sources. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 704, doi: 10.3390/en16020704.
5. A. Brem, M. M. Adrita, D. T. J. O'Sullivan, K. Bruton. Industrial smart and micro grid systems – A systematic mapping study. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. P. 118828, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118828.
6. Kachan Yu., Shram O. On the Structure of an Energy-Efficient Power Grid of an Industrial Enterprise with Distributed Generation Sources. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2024. № 4. P. 54-59, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59>.
7. Zhu J. OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118887004>.
8. Deepinder Kaur M., Er, Saini S. Load Flow Analysis: A Review. *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, 2016. Vol. 5. Issue 3. P. 1254-1260, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0503009.
9. Abur A, Expósito AG. Power System State Estimation Theory and Implementation. New York: Wiley-IEEE Press; 2004.
10. Arrillaga J., Watson N.R. Computer Modelling of Electrical Power Systems, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
11. Igbogidi Onyebuchi. MODERN TREND OF LOAD FLOW ANALYSIS IN POWER SYSTEM. 2024. Vol. 12. P. 53-58.

Надійшла: 21.10.2024

Received: 21.10.2024