

ЩОДО СТРУКТУРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

¹Національний університет «Запорізька політехніка»

Широке використання об'єктів розосередженої генерації на основі відновлюваних джерел енергії викликає трансформацію традиційних централізованих енергетичних систем та активнішого впровадження концепцій енергетики сталого розвитку. Ефективне використання відновлюваних джерел енергії дозволяє розвантажити локальні та розподільні мережі, а також значно підвищити надійність електропостачання. Водночас, при цьому можуть виникати небажані перетоки енергії, які спричиняють додаткові втрати потужності та напруги. До того ж, об'єкти розосередженої генерації, підключені до мереж промислових підприємств, можуть негативно впливати і на якість електричної енергії в них. При цьому традиційні методи подолання негативного впливу джерел розосередженої генерації не завжди можуть забезпечити необхідну якість електричної енергії та електромагнітну сумісність споживачів з мережею. Локальні ж мікросистеми, які мають модульну структуру і можуть працювати як з підключенням до загальної електричної мережі, так і в ізольованому режимі, дають змогу ефективніше використовувати відновлювані джерела енергії в мережах окремих споживачів.

Запропоновано структуру енергоефективної електричної мережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації. Останню доцільно створити з трьох локальних взаємопов'язаних мереж: мережі змінного струму, до якої під'єднані вітроустановки змінного струму без блоків забезпечення якості згенерованої ними електроенергії та споживачі, для яких припустиме порушення окремих показників якості електроенергії; мережі змінного струму з якісною електроенергією, а також мережі постійного струму з можливістю підключення до неї фотоелектричних установок, вітрогенераторів постійного струму та споживачів постійного струму. Такий підхід суттєво спрощує інтеграцію відновлюваних джерел енергії в мережі промислових підприємств, покращує електромагнітну сумісність, і не потребує забезпечення якості всього обсягу споживаної електроенергії. До того ж, запропонована структура електричної мережі дозволяє зменшити небажані перетоки електроенергії та полегшує створення уніфікованої системи керування на основі комунікаційних технологій Smart Grid.

Ключові слова: розосереджена генерація, структура електричної мережі, відновлювані джерела енергії, вітроустановки, сонячна електростанція.

Вступ

Традиційна світова електроенергетика розвивалася як централізована система генерування завдяки впровадженню достатньо потужного енергообладнання й об'єднання його в єдині енергетичні комплекси. В результаті створено великі енергетичні системи в Європі (ENTSO-E), в Сполучених Штатах Америки (Regional Transmission Organization (RTO)), в Україні (ОЕС) та у інших країнах світу. Але в останні роки ця загальна концепція зазнає суттєвих змін. В світі почали впроваджувати так звану енергетику сталого розвитку [1].

Важливим елементом останньої є широке використання розосереджених джерел енергії (РДЕ). Зазвичай це енергетичні установки невеликої потужності, такі як вискоелефективні газотурбінні і парогазові [2]—[4], й особливо зараз — відновлювані джерела енергії. А це переважно вітрові електростанції (ВЕС) й фотоелектричні перетворювачі енергії сонця (ФЕС).

Впровадження електромереж з розосередженою генерацією, побудованих на використанні значених джерел енергії, дозволяє, як вважається, суттєво розвантажити локальні й розподільні електромережі й підвищити надійність електропостачання. Але одночасно з цим з'являються і

проблеми, пов'язані з ускладненням проектування, експлуатації і керування такими мережами.

Аналіз досліджень і публікацій

Насамперед з впровадженням розосередженої генерації (РГ) такі мережі є активними елементами загальної енергосистеми, що має як позитивні, так і негативні наслідки [5]—[7]. Так, встановлення РДЕ неподалік споживачів розвантажує, як загальну, так і розподільну мережі, що значно знижує втрати потужності і активної електроенергії в них, підвищує надійність і стійкість функціонування останніх [7]—[9]. Але тоді може змінюватися і напрямок потоків енергії, що у найгіршому випадку призведе до її транспортування у зворотний бік і, як наслідок, до виникнення додаткових втрат, оскільки переріз проводів у традиційній ЛЕП зазвичай змінюється тільки в одному основному напрямку.

Тож очевидно, що втрати потужності й активної електроенергії в останньому випадку можуть суттєво зрости. При цьому їхнє збільшення буде залежати як від місця підключення РДЕ й обсягів їхнього впровадження, так і, звісно, від топології самої мережі [10]. Що ж до впливу розосередженої генерації на якість електроенергії в мережах за рівнем напруги та спотворенням її синусоїдальності, то і він може мати як позитивний, так і негативний характер [11], [12].

Варто також зазначити, що активне впровадження розосередженої генерації призводить до необхідності отримання додаткової інформації щодо обсягів генерування, передачі та споживання електроенергії на місцевих рівнях, а отже перетворення системи управління енергетичною інфраструктурою старого типу на сучасну цифрову систему, в яку інтегруються комунікаційні технології Smart Grid. У цьому разі диспетчерське керування енергосистемою поступово передає свої функції на локальний рівень, підвищуючи цим його ефективність [13]—[16].

Враховуючи всі зазначені й деякі інші негативні фактори (наприклад, нестабільне генерування потужності ВДЕ) й одночасно наявний позитивний досвід впровадження енергосистем з розосередженою генерацією, останнім часом активно обговорюється питання створення і використання так званих локальних мікросистем (окремих модулів). Вони розглядаються як єдиний відокремлений об'єкт керування, що складається з взаємопов'язаних навантажень і різних РДЕ в межах конкретної електричної топології й може працювати як у режимі підключення до загальної мережі, так і у ізолюваному від неї режимі [17]. Такий підхід щодо зазначеної побудови електромережі з джерелами розосередженої генерації обґрунтовується тим, що всі природні системи, які мають модульну структуру набагато ефективніші ніж ті, що початково створені як одне ціле [18], [19].

Україна, на щастя, теж має значний потенціал щодо відновлюваної енергетики. А це неодмінно призведе у найближчій перспективі до необхідності перегляду всієї структури і її енергетичної галузі. Особливо з урахуванням значних пошкоджень об'єктів останньої ворожими обстрілами і необхідністю її відновлення після завершення війни.

Так, згідно з «Енергетичною стратегією України до 2050 року» та «Планом відновлення України» в кінцевому споживанні енергії, включно з побутовими потребами населення і транспорту, частка її, що генерується ВДЕ, повинна становити не менше 35 % [20], [21]. Тож виникає необхідність створення нової енергетичної системи розосередженого типу, побудовані на об'єктах локальних систем регіонального рівня з відповідними розосередженими системами керування.

Останнім часом промислові підприємства намагаються активно впроваджувати ВДЕ в свої електромережі, поступово перетворюючи останні на складніші завдяки зазначеній розосередженій генерації. З огляду на це стає зрозуміло, що і їх необхідно вже розглядати як локальні мікромережі (модулі) єдиної енергосистеми, які побудовані на інших, ніж раніше принципах. Структура таких мереж повинна відповідати як загальним особливостям розосереджених систем, так і давати можливість позбутися основних негативних факторів, притаманних традиційним електромережам промислових підприємств.

А до зазначених недоліків відноситься насамперед низька якість електроенергії і, як наслідок, електромагнітна несумісність деяких відповідальних споживачів. Остання виникає через впровадження в мережу великої кількості необхідних для цього технічних засобів, що суттєво її ускладнює. При цьому подальше збільшення в ній кількості пристроїв силової електроніки ще більше погіршує якість електроенергії, яку вимушені споживати інші навантаження, а отже й взагалі сумісність електромережі підприємства з загальною розподільною мережею.

Підключення ВДЕ, що створюються на підприємствах, до найближчої з ними трансформаторної підстанції (ТП) з урахуванням залежності обсягу згенерованих ними потужностей від метео-

умов, викликає негативні й непередбачувані перетоки енергії. Необхідність при цьому забезпечити ще і якість такої генерації викликає подорожчання останньої, що в підсумку у багатьох випадках — до її економічної недоцільності.

Структура ефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації

Щодо вирішення вищезгаданих питань, то наразі вже є деякі напрацювання. Так, в роботі [22] запропоновано на підприємствах створювати дві окремі локальні мережі, до однієї з яких підключати вітроустановки змінного струму без блоків забезпечення якості згенерованої ними електроенергії, а до іншої — СЕС та вітроустановки постійного струму. Перші з них повинні об'єднати необхідну кількість споживачів, для яких припустиме порушення окремих показників якості електроенергії. Потужність таких споживачів на підприємствах досить велика, згідно з [23] вона складає близько 40 % загальної потужності їх мереж. До другої пропонується приєднувати споживачів постійного, чи навіть змінного з частотним керуванням, струму.

Запропонована схема приєднання ВДЕ до електромережі підприємства через зазначені локальні мережі показана на рис. 1. В ній замість великої кількості засобів забезпечення якості електроенергії, якими необхідно було б укомплектувати всі наявні ВДЕ, використовуються лише два інвертори: мережевий і модифікований синусоїди. При цьому вони матимуть вже незначну потужність, оскільки, основні обсяги енергії, згенерованої ВДЕ, споживатимуться в самій локальній мережі. Очевидно, що таким чином одночасно зменшується варіативність взаємодії останньої із загальною електромережею та покращується їхня електромагнітна сумісність. До того ж суттєво дешевшає сам проєкт використання ВДЕ.



Рис. 1. Структурна схема підключення відновлюваних джерел енергії до електромережі промислового підприємства

Що ж до споживачів змінного струму, які мають засоби частотного керування, то доцільність їхнього підключення через локальну мережу постійного струму обґрунтована в роботі [24]. В ній порівнюються результати імітаційного моделювання системи живлення електродвигунів з індивідуальним частотним регулюванням й із застосуванням загального випрямляча, об'єднуючої їх лінії постійного струму та індивідуальних інверторів. Показано, що у другому випадку, завдяки зменшенню кількості напівпровідникових елементів в мережі, вдається зменшити коефіцієнт спотворення синусоїди напруги (рис. 2). Так, у випадку трьох приймачів він зменшується на 23,51 %, а з 16-ю — на 49,83 %. При цьому у спектральному складі напруги загальної мережі майже зникають всі гармонічні складові, окрім 5-ї та 7-ї.

Отже із зазначеного стає очевидним, що у разі проектування нової електромережі промислового підприємства необхідно розглядати вже зовсім іншу, ніж ту, що використовується зараз, її принципову схему. Доцільно створювати дві локальні електромережі на зразок системи водопостачання, де окремо подається технічна і очищена вода. Враховуючи ж те, що системи накопичення й забезпечення якості електроенергії передбачають наявність випрямлячів, а на підприємствах є до того ж значна кількість споживачів, які споживають постійний струм, проміжною між зазначеними системами повинна бути мережа постійного струму. На рис. 3. показана блок-схема такої мережі.

За запропонованою схемою три зазначені локальні мережі поєднуються лише одним випрямлячем і перетворювачем DC/AC, які також мають вже незначну потужність. З них і з усіх наявних джерел розосередженої генерації в мікропроцесорну систему керування (МСК) надходить інформація щодо обсягів згенерованої енергії, накопиченої в СНЕ і її перетоків з однієї локальної мережі в іншу.

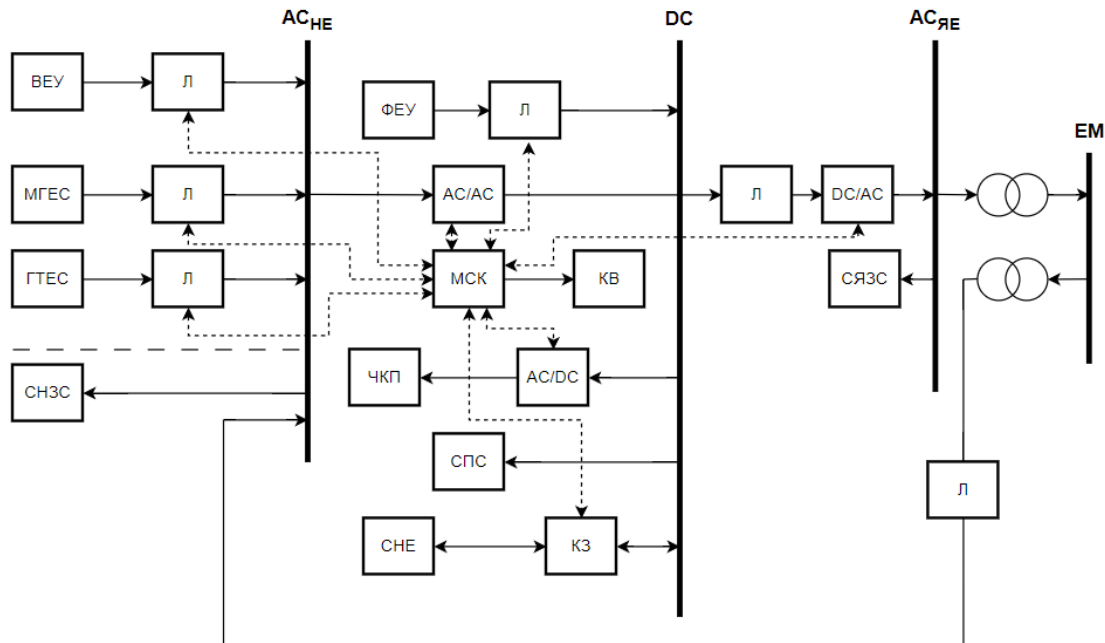


Рис. 3. Загальна структура ефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації: СНЗС — споживачі неякісного змінного струму; СЯЗС — споживачі якісного змінного струму; СПС — споживачі постійного струму; МГЕС — мікроГЕС; ГТЕС — газотурбінна установка; ВЕУ, ФЕУ — вітро- та фотоелектростанції; СНЕ — системи накопичення енергії; МСК — мікропроцесорна система керування; КЗ — контролер заряду; КВ — впливи керування; Л — лічильник електроенергії; ЧКП — частотно-керований привод

Співвідношення потужностей зазначених вище локальних мереж залежить від багатьох факторів. А саме від загальної потужності і режиму споживання підприємства, потужностей, типів та способів приєднання джерел розосередженої генерації до електричних мереж споживача, обсягів їхньої генерації тощо. Таким чином, для визначення цього співвідношення необхідно розробити відповідну модель електричної мережі, визначити оптимальні параметри та режим її роботи, а також алгоритми керування нею. Зазначені питання є предметом окремих досліджень і будуть висвітлені в подальших роботах.

В МСК формуються відповідні впливи керування на мережу, які забезпечують можливість її функціонування в режимі, який відповідає попередньо визначеному критерію. Структура цієї системи керування, алгоритми розв'язання в ній будь-яких задач і характер впливів керування є окре-

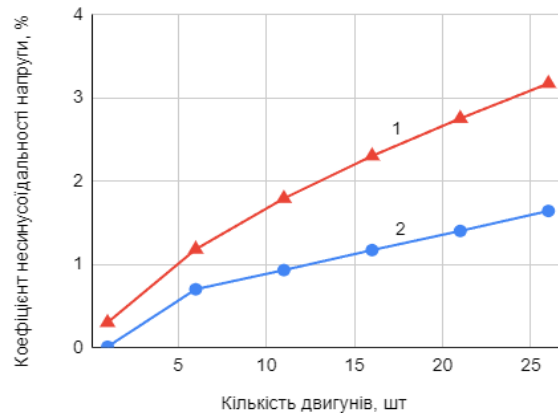


Рис. 2. Залежність коефіцієнта несинусоїдальності напруги від кількості двигунів в системі електропостачання: 1 — цеху з ЧРП; 2 — в системі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами в ній

ним питанням, яке наразі не розглядається. Можна лише зазначити, щодо останніх цікавим було б використання, до прикладу, маневрових потужностей конкретних підприємств, наявність і характер яких розглянуто в [23].

Висновки

1. У зв'язку з переходом великих електроенергетичних систем різних регіонів світу від централизованого до розосередженого генерування й створення так званої енергетики сталого розвитку з використанням вітрових і сонячних електростанцій й наявністю при цьому додаткових проблем, пов'язаних з ускладненням проектування, експлуатації і керування електромережами доцільно створювати їх у вигляді взаємопов'язаних локальних мікросистем (окремих модулів) з єдиною сучасною цифровою системою управління.

2. Традиційні методи й засоби подолання багатьох негативних факторів, щодо функціонування електромереж промислових підприємств, в які теж впроваджуються розосереджені джерела енергії на основі ВДЕ, ускладнюють забезпечення необхідної якості електроенергії, електромагнітної сумісності навантажень між собою і з мережею, а також останніх з розподільчою мережею.

3. В рамках сучасної стратегії енергетики сталого розвитку електромережі промислових підприємств необхідно також розглядати не як навантаження розподільчої мережі, а як окремі локальні складові єдиної енергосистеми, що мають власні системи керування.

4. Здійснити перехід до електромережі промислового підприємства як локальної складової єдиної енергосистеми у разі, якщо вона має традиційну структуру складно і наразі технічно й економічно недоцільно.

5. Нова енергоефективна електромережа промислового підприємства, інтегрована в єдину енергосистему, повинна також мати внутрішні взаємопов'язані локальні складові — найдоцільніше, окремі мережі якісної і неякісної електроенергії і електромережу постійного струму, яка об'єднує їх, що значно спростить інтегрування в неї розосереджених ВДЕ, не потрібно буде забезпечувати якість всього обсягу споживаної електроенергії, покращить електромагнітну сумісність навантажень зазначених складових і самої мережі з розподільчою.

6. Запропонована структура електромережі промислового підприємства дозволить суттєво зменшити кількість необхідних для її функціонування силових напівпровідникових пристроїв, обсяги перетоків електроенергії і створити уніфіковану систему керування нею, як складову сучасної цифрової системи, в яку інтегруються комунікаційні технології Smart Grid.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. В. Кириленко, і А. В. Праховник, «Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови,» *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*, с. 10-16, 2010.
- [2] M. F. Akorede, H. Hizam, and E. Pouresmaeil, "Distributed energy resources and benefits to the environment," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 724-734, Feb. 2010. <https://doi.org/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*, vol. 12, no. 7, pp. 37-41, 2023.
- [4] R. De Robbio, "Micro Gas Turbine Role in Distributed Generation with Renewable Energy Sources," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 704, Jan. 2023, <https://doi.org/10.3390/en16020704>.
- [5] О. В. Кириленко, «Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему,» *Вісник НАН України*, № 3, с. 18-23, 2022.
- [6] О. М. Довгалюк, О. П. Лазуренко, Ш. Н. Саїдов, і І. С. Яковенко, «Вплив відновлюваних джерел енергії на роботу електроенергетичної системи,» *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018)*, матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф., с. 52-54, 2018.
- [7] В. О. Комар, Н. В. Остра, О. В. Кузьмик, і С. В. Гуцол, «Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж,» *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*, № 1(13), с. 104-107, 2013.
- [8] O. Dovgalyuk, H. Omelianenko, R. Bondarenko, I. Yakovenko, S. Saidov, and I. Strilyaniy, "Analysis of operation modes of electric networks with solar power plants," *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, proceedings of 2020 IEEE 4th International Conference, pp. 196-201, 2020, <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263215>.
- [9] O. Dovgalyuk, H. Omelianenko, R. Bondarenko, I. Yakovenko, S. Saidov, and Y. Pryvalov, "Analysis of the impact of wind power plants on electric networks operation modes," *KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference*, pp. 695-700, 2021, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570008>.
- [10] О. В. Кириленко, В. В. Павловський, та Л. М. Лук'яненко, «Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах,» *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 46-53, 2011.
- [11] І. А. Козакевич, і М. Г. Котякова, «Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії,» *Вісник Криворізького національного університету*, № 52, с. 175-179, 2021.
- [12] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, та О. В. Сікорська, *Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж*, монографія, Вінниця: ВНТУ, 2023, 195 с.
- [13] С. П. Денисюк, та М. В. Рибій, «Формування складових оптимізаційних процедур в системах енергопостачання з гнучкою генерацією та активними споживачами енергії,» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*, № 2, т. 31(70), ч. 1, с. 237-242, 2020.

[14] П. Д. Лежнюк, і О. А. Буславець, «Застосування Smart Grid технологій для балансування режимів в локальних електричних системах», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*, № 195, с. 3-6, 2018.

[15] К. М. Картапалов, і В. В. Чижевський, «Розподілена генерація та Smart Grid», *International scientific e-journal АЮГОС. ONLINE*, № 16, 2020. <https://doi.org/10.36074/2663-4139.16.08>.

[16] Стогній Б. С., Кириленко О. В., та Денисюк С. П., «Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 44-50, 2010.

[17] A. Brem, M. M. Adrita, D. T. J. O'Sullivan, and K. Bruton, "Industrial smart and micro grid systems – A systematic mapping study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, p. 118828, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118828>.

[18] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making," in *Springer eBooks Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 2006, pp. 345-405. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_9.

[19] S. Shevchenko, and N. Savchenko, "Analysis of risks while connecting to the power supply system of the administrative building of the kinetic energy storage unit for the purpose of load regulation," *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, № 3(87), с. 117-126, 2017.

[20] Кабінет Міністрів України, Розпорядження № 373-р від 21.04.2023 р. «Енергетична стратегія України на період до 2050 року» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>.

[21] Національна рада з питань відновлення України від наслідків війни. «Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Енергетична безпека» затверджено 01.07.2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://recovery.gov.ua>.

[22] Ю. Г. Качан, і О. А. Шрам, «Щодо доцільної схеми прислання відновлюваних джерел енергії до промислових електромереж», *Відновлювана енергетика*, вип. 2(73), с. 11-17, 2023, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).11-17](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).11-17).

[23] Ю. Г. Качан, і О. А. Шрам, «Оцінка маневрових можливостей електроавантажень промислових підприємств», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 2(58), с. 17-23, 2022, <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.17-23>.

[24] Ю. Г. Качан, О. А. Шрам, і А. В. Свергун, «Можливості зменшення впливу ЧРП на якість електроенергії в мережах підприємств та вартості його використання», *Електротехніка та електроенергетика*, № 3, с. 26-32, 2022, <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-3-3>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.07.2024

Качан Юрій Григорович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання промислових підприємств;

Шрам Олександр Анатолійович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електропостачання промислових підприємств, e-mail: alexshrum@yahoo.com.

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

Yu. G. Kachan¹

O. A. Shram¹

On the Structure of Energy-Efficient Power Grid of an Industrial Enterprise with Distributed Generation Sources

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

The widespread usage of distributed generation units based on renewable energy sources is leading to the transformation of traditional centralized power systems and the increasingly active implementation of sustainable energy. Efficient usage of renewable energy sources enables to unload local and distribution grids and significantly improve the reliability of electricity supply. At the same time, adverse energy overflows may occur, leading to additional power and voltage losses. In addition, distributed generation units connected to industrial power grids may also have a negative impact on the quality of electricity in them. Besides, the traditional methods of mitigating the negative impact of distributed generation sources cannot always ensure the required quality of electricity and electromagnetic compatibility of consumers with the grid. Local microsystems, which have a modular structure and can operate both with a connection to the general power grid and in an isolated mode, allow for more efficient usage of renewable energy sources in the power grids of individual consumers.

The article proposes the structure of energy-efficient electrical grid of an industrial enterprise with sources of distributed generation. It is expedient to create three local interconnected grids: an alternative current grids to which AC wind turbines are connected without quality assurance units for the generated electricity and consumers who do not need high-quality electricity; AC grids with high-quality electric supply, as well as direct current grids with the possibility of connecting photovoltaic installations, DC wind turbines and DC consumers. This approach greatly simplifies the integration of renewable energy sources into the grids of industrial enterprises, improves electromagnetic compatibility, and makes it unnecessary to ensure the quality of the entire volume of electricity consumed. In addition, the proposed power grid structure reduces unwanted power overflows and facilitates the creation of a unified control system based on Smart Grid communication technologies.

Keywords: distributed generation, power grid structure, renewable energy sources, wind turbines, solar power plant.

Kachan Yuriy H. — Dr. Sc. (Tech.), Professor, Professor of the Chair of Power Supply of Industrial Enterprises;
Shram Oleksandr A. — Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Head of the Chair of Power Supply of Industrial Enterprises, e-mail: alexshrum@yahoo.com