

ЗАДАЧА РОЗТАШУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОЕС УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО ВПЛИВУ НА ПОТОКИ ПОТУЖНОСТІ КОНТРОЛЬОВАНИМИ ПЕРЕТИНАМИ

О.Ф. Буткевич^{1,2*}, докт. техн. наук, Н.Т. Юнєсва¹, канд. техн. наук, Т.М. Гурєєва¹,
П.І. Стецюк^{3**}, докт. фіз.-мат. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: butkevych@ied.org.ua

² НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

³ Інститут кібернетики НАН України ім. В.М. Глушкова,

пр. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна.

Показано, що під час створення в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України системи накопичувачів електроенергії (ННН) доцільно враховувати вплив розподілу (за місцем та потужністю) батарей ННН на потоки активної потужності «проблемними» контрольованими перетинами ОЕС України. Запропоновано метод визначення розподілу ННН з урахуванням зазначеного впливу. Бібл. 3, табл. 1.

Ключові слова: об'єднана енергосистема, відновлювані джерела енергії, розташування накопичувачів електроенергії

Характеристика проблеми. Широке впровадження в електричних мережах об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), інтенсифіковане економічними перевагами «зеленої» генерації, окрім практичної реалізації планів щодо розвитку безвуглецевої енергетики, з одного боку, призвело до виникнення нових та загострення існуючих проблем з іншого. Задля швидкого балансування стохастичних змін потужності ВДЕ (тут і далі під ВДЕ розумітимемо лише сонячні та вітрові електростанції) необхідно мати додаткові маневрені (маневрові) потужності, спроможні забезпечити таке балансування. Як зазначено у звіті [1], в Україні до 2025 року передбачається побудувати до 2,5 ГВт високоманеврених балансуєчих потужностей: 2 ГВт – потужність газопоршневих електростанцій та 500 МВт – потужність системи накопичувачів електроенергії (СННН), і перші 200 МВт СННН планувалося ввести внаслідок виконання відповідного пілотного проекту. Однак 12.12.2019 р. під час проведення Energy Discussion Platform [2] було повідомлено, що, на відміну від попередніх планів, викладених у звіті [1], де за пілотним проектом передбачалося 3 варіанти створення СННН, ПрАТ «НЕК «Укренерго» планує розглядати лише два варіанти реалізації цього проекту: 1-й – встановлення однієї СННН потужністю 200 МВт, 2-й – встановлення 5 СННН потужністю 40 МВт кожна. Також було повідомлено, що потреби ОЕС України у потужності СННН протягом 2021-2030 рр. зростуть до 2200 МВт.

Зупинимося на питанні впливу окремих чинників на вибір варіанту створення СННН в ОЕС України. Оскільки ПрАТ «НЕК «Укренерго» 29.10.2019 р. у Маріуполі вже підписала меморандум з Європейським банком реконструкції та розвитку про спільну реалізацію проекту Battery Energy Storage system, бюджет якого становить €122 млн. (для позначення Battery Energy Storage system використовуватимемо введену вище аббревіатуру СННН), то із завершенням першого етапу пілотного проекту зі створення СННН в ОЕС України (на якому передбачено *підготовку техніко-економічного обґрунтування для подальших робіт*) далі заплановано визначення вартості проекту та створення моделі СННН і відповідної *дорожньої карти*, тому вибір варіанту проекту стає першочерговою задачею.

Вартість створення СННН, очевидно, може суттєво відрізнитися для різних варіантів реалізації проекту. Однак їхнє оцінювання не повинно базуватися лише на прямому визначенні витрат, мають братися до уваги також впливи чинників, що оцінюються в інших шкалах. Значущість таких впливів

на показники режимів функціонування ОЕС України (не обмежуючись лише вимогами до балансування стохастичних змін потужності ВДЕ) слід попередньо оцінити, щоб з'ясувати потребу їхнього урахування під час визначення оптимального варіанту створення СНЕЕ. Один із таких чинників, який слід брати до уваги, стосується впливу розподілу батарей накопичувачів електроенергії (НЕЕ) на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України.

Мета роботи – показати, що розподіл накопичувачів електроенергії може суттєво впливати на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України внаслідок їхнього ввімкнення задля балансування стохастичного зменшення потужності ВДЕ, і запропонувати метод визначення розподілу НЕЕ задля досягнення бажаного впливу на потоки потужності «проблемними» контрольованими перетинами, запобігаючи їхньому переобтяженню.

Особливості розв'язання задачі. Зазначимо обставини, які вказують на те, що вплив варіантів такого розподілу на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України, здавалося б, можна априорі не враховувати: 1) системотвірна електрична мережа здатна «пропускати» значно більші потоки потужності ніж ті, що мають місце в період зимового максимуму електроспоживання в останні роки, і, у загальному випадку, запаси статичної аперіодичної стійкості з активної потужності у контрольованих перетинах ОЕС України наразі вищі від нормативних; 2) СНЕЕ потужністю 200 МВт (порівняна з потужністю одного із 12-ти блоків Бурштинської ТЕС) не матиме суттєвого впливу на запаси статичної аперіодичної стійкості з активної потужності у контрольованих перетинах ОЕС України. Однак, не дивлячись на це, слід брати до уваги, що і за таких режимів ОЕС України існують «проблемні» перетини, і недостатня пропускна спроможність її внутрішніх перетинів може також зумовлювати суттєві обмеження потоків потужності міждержавними перетинами, наприклад, перетином з ЕЕС Молдови. Тобто, проблема недостатньої пропускної спроможності окремих внутрішніх перетинів ОЕС України (відповідно і забезпечення нормативних запасів статичної аперіодичної стійкості з активної потужності) не зникла. На відміну від введення нових потужностей на існуючих електростанціях, створення СНЕЕ априорі не обмежено «прив'язкою» до певних об'єктів і може відбуватися з урахуванням впливу розподілу НЕЕ на потоки потужності контрольованими перетинами, щоб забезпечити *бажану* зміну потоків активної потужності *заданими* перетинами (наприклад, обраними серед «проблемних») після ввімкнення НЕЕ. Якщо не брати до уваги цю обставину, то невдалий (в аспекті зазначеного впливу) розподіл НЕЕ може призводити до додаткового навантаження «проблемних» перетинів після ввімкнення НЕЕ. Урахування впливу розподілу (за місцем та потужністю) НЕЕ в ОЕС України не перешкоджає урахуванню інших чинників під час визначення оптимального варіанту створення СНЕЕ. Тут слід зауважити, що режими ОЕС України в перспективі зазнаватимуть змін (внаслідок як структурних змін в ОЕС України, так і зміни обсягів електроспоживання), і на поточний час відповідні прогностичні оцінки значною мірою є наближеними. Тому під час розв'язання задачі розподілу НЕЕ, враховуючи «проблемні» перетини ОЕС України, доцільно, очевидно, орієнтуватися на перспективний режим максимальних навантажень та нормальну схему електричних з'єднань ОЕС України. Щоб уникнути певних термінологічних непорозумінь, далі використовуватимемо прикметник *заданий* як «маркер» для контрольованих перетинів ОЕС України, *бажаних* змін потоків активної потужності яких внаслідок ввімкнення НЕЕ потрібно досягти. Виходячи із зазначених вище мети та умов розв'язання задачі, наведемо її загальну постановку у вербальній формі.

Визначити об'єкти ОЕС України та загальну потужність НЕЕ, які слід встановити на таких об'єктах для бажаної зміни потоків активної потужності заданими перетинами ОЕС України внаслідок ввімкнення НЕЕ задля балансування стохастичних змін потужності ВДЕ. Значення режимних параметрів ОЕС України мають знаходитися в допустимих (заданих) межах.

Відразу відмітимо, що повністю *бажаної зміни потоків потужності* не завжди можна досягнути, враховуючи потужність СНЕЕ, режимні обмеження та обмеження щодо кількості об'єктів для розташування НЕЕ. Розв'язання цієї задачі пов'язано, насамперед, з аналізом чутливості потоків активної потужності *заданими* перетинами по відношенню до флуктуацій активної потужності вузлів – претендентів на розташування НЕЕ (далі – *вузлів-претендентів*), множина яких попередньо експертно визначається. Проблемі чутливості електроенергетичних систем (ЕЕС) присвячено значну кількість праць. Постановка даної задачі має свої особливості. Наприклад, на відміну від потреби визначення *сенсорних* елементів схеми електромережі (елементів, параметри режиму яких зазнають найбільших змін за випадкових флуктуацій вузлових навантажень та топологічних змін вказаної схеми) в усталених режимах [3], у даній задачі склад кожного із *заданих* перетинів априорі відомий, до того ж про «сенсорність» ЛЕП таких перетинів взагалі не йдеться. Слід також відмітити, що підхід, запропо-

нований у [3], дає змогу одержати об'єктивні оцінки лише в межах збереження лінійності між збудженнями (у вигляді флуктуацій потужності навантажень) та відповідними реакціями ЕЕС за умови помітної неоднорідності електричної мережі. Певною мірою можна вважати, що у нашому випадку спочатку маємо справу з «умовно оберненою» задачею, оскільки визначати слід не сенсорні елементи мережі, а вузли, збільшення активної потужності яких призводитиме до *бажаної* зміни потоків активної потужності *заданим* перетином. Дещо складніше забезпечити *бажану* зміну *сальдо* потоків потужності перетином, тому далі розглянемо задачу саме у такій постановці.

Формалізуємо задачу визначення розподілу НEE з метою досягнення *бажаної* зміни *сальдо* потоків активної потужності *заданим* (*i*-им) перетином у вигляді

$$F_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$F_i = |P_i(X) - P_{id}|, \quad \text{якщо } \text{sign} P_i = \text{sign} P_{id}; \quad (2)$$

$$F_i = |P_i(X) + P_{id}|, \quad \text{якщо } \text{sign} P_i \neq \text{sign} P_{id}; \quad (3)$$

$$X \supset W_{on}; \quad W = [W_{on} \quad W_{off}]^T; \quad W = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_q]^T; \quad (4)$$

$$P_j \leq P_{jlim}, \quad j = \overline{1, n_j}; \quad n_j \geq k,$$

де F_i – цільова функція, $i = \overline{1, k}$, k – кількість *заданих* перетинів; P_i, P_{id} – сальдо розрахункових потоків активної потужності *i*-м *заданим* перетином та його *бажане* значення відповідно; X – вектор параметрів режиму, до якого входить і частина потужностей НEE (W_{on}), вже розподілених за *вузлами-претендентами*; W – вектор потужностей *вузлів-претендентів*, окремі елементи якого в процесі розподілу потужностей НEE утворюють субвектор W_{on} , а інші – субвектор нульових елементів W_{off} ; q – кількість *вузлів-претендентів*; n_j – кількість контрольованих перетинів ОЕС України, сальдо потоків активної потужності яких (P_j) не мають перевищувати заданих значень P_{jlim} (одночасно з (4) подібні обмеження можуть стосуватися окремих ЛЕП перетинів).

Під час визначення оптимального розподілу НEE крім обмежень (4) контролюється також виконання умов

$$U_{smin} \leq U_s \leq U_{smax}, \quad s = \overline{1, m_s}, \quad (5)$$

$$I_r \leq I_{rmax}, \quad r = \overline{1, m_r}, \quad (6)$$

де m_s – кількість вузлів, для кожного (s -го) з яких значення напруги (U_s) має перебувати у допустимих межах; m_r – кількість ЛЕП, для кожної (r -ї) з яких розрахункова сила струму (I_r) не має перевищувати максимально допустимого значення за термічною стійкістю дротів ЛЕП (I_{rmax}).

Враховуючи проблематичність одержання аналітичних залежностей *сальдо* потоків потужності *заданих* перетинів від активної потужності *вузлів-претендентів* (передбачається потужність НEE), але маючи програмні засоби моделювання режимів ЕЕС як режимів, що самовстановлюються (частота є розрахунковим параметром), задля визначення чутливості зазначених *сальдо* до зміни активної потужності *вузлів-претендентів* використано чисельне диференціювання

$$\partial P_i(X) / \partial W = [\Delta P_i(X) / \Delta w_1 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_2 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_3 \quad \dots \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_q]^T, \quad i = \overline{1, k}.$$

Беручи до уваги призначення та умови експлуатації СНEE, вважаємо, що розташовувати її доцільно в розподільних електромережах напругою 110 (150) кВ.

Результати виконаних досліджень. Наведемо деякі результати досліджень із застосуванням запропонованого методу. Для досліджень було використано режим ОЕС України, одержаний на базі режиму максимальних навантажень 2016 р., зокрема було введено (модельовано) значні додаткові потужності ВДЕ на півдні України. Попередньо в мережі 110 (150) кВ ОЕС України було відібрано 90 *вузлів-претендентів*. Ілюстративний фрагмент даних (значний обсяг усіх даних не дає змогу їх тут навести) – коефіцієнтів чутливості *сальдо* потоків активної потужності окремими контрольованими перетинами ОЕС України до зміни активної потужності *вузлів-претендентів* наведено у таблиці (знак мінус вказує на зменшення за абсолютним значенням *сальдо* потоків потужності за збільшенням потужності НEE у відповідному *вузлі-претенденті*).

Задля досягнення *бажаної* зміни *сальдо* потоків потужності окремим *заданим* перетином використовується алгоритм, за яким покроково збільшується потужність НEE, починаючи з «найвпливовішого» вузла (такий вузол обирається на підставі визначення коефіцієнтів чутливості, приклад яких наведено у таблиці). З урахуванням потужності НEE моделюється режим ОЕС України і контролюється виконання обмежень (4)-(6) (передбачена також можливість контролювання потоків активної

потужності окремими заданими ЛЕП). Якщо заданих перетинів декілька, то розподіл потужності НEE відбувається послідовно (за пріоритетністю перетинів). Перехід до чергового перетину відбувається тоді, коли можливості бажаної зміни сальдо потоків потужності для поточного заданого перетину вичерпано. Розподілені НEE залишаються «ввімкненими» під час моделювання режимів, а нерозподілена частина потужності СНEE використовується для розподілу з переходом до чергового заданого перетину. Можлива також така постановка задачі: досягти бажаних змін сальдо потоків потужності одночасно для двох заданих перетинів, надаючи пріоритетність одному із них.

Перетини	Найменування вузлів-претендентів – електричних підстанцій номінальної напруги 110 (150) кВ									
	Чер- каси	Шев- ченко	Коно- топ	Миро- пілля	Поляна	Жито- мир	Брова- ри	Кремен- чук	Харків	Шос- тка
ОЕС Укр.– Київ	-0,59	-0,64	0,17	-0,67	-0,60	-0,49	-0,40	0,09	0,06	0,15
Дніпро – ЮУ АЕС	-0,28	-0,28	0,29	-0,10	-0,27	-0,002	-0,1	0,19	0,17	0,79
ЮУ АЕС– Дніпро	-0,03	-0,02	-0,42	0,98	-0,02	0,47	0,52	-0,26	-0,15	-0,36
Вінниця – ЮУ АЕС	-0,11	-0,11	-0,22	-0,09	-0,10	0,29	0,33	-0,15	-0,08	-0,19
ОЕС Укр.– Одеса, Мо- лдова	0,06	0,06	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02

Зауважимо, що за останньої постановки задачі досягти бажаного результату не завжди можливо, особливо у разі встановлення обмеження на кількість вузлів для розташування НEE (такі обмеження мають місце у варіантах реалізації проекту зі спорудження СНEE, які передбачає розглядати ПрАТ «НЕК «Укренерго»).

Задля ілюстрації зазначеного розглянемо два перетини: «Дніпро – Южно-Українська АЕС» (його утворюють одна ЛЕП 750 кВ Дніпровська-ЮУАЕС та 8 ЛЕП 330 кВ: Конотоп-Ніжин, КремГЕС-Черкаси, Рудна-Українка, Рудна-Кварцит, КрТЕС-Трихати, КахГПП-Херсон, Чернігів-Гомель, ЧАЕС-Мозир) та «Южно-Українська АЕС – Дніпро» (його утворюють одна ЛЕП 750 кВ ЮУАЕС-Дніпровська та 8 ЛЕП 330 кВ: Ніжин-Конотоп, ТпТЕС-Канів, ЮУАЕС-Кварцит, ЮУАЕС-Українка, Трихати-КрТЕС, Трихати-Миколаїв, Чернігів-Гомель, ЧАЕС-Мозир).

П'ять із дев'яти ЛЕП, що входять до складу цих перетинів, є спільними для обох перетинів (їх виділено курсивом). Розглянемо результати розподілу 200 МВт потужності НEE задля зменшення (за абсолютним значенням) сальдо потоків активної потужності обома цими перетинами з наданням пріоритетності одному із них (у даному випадку пріоритетність було надано перетину «Южно-Українська АЕС – Дніпро») за умови, що для розташування НEE має бути використано обмежену кількість вузлів, наприклад, не більше трьох.

У модельованому режимі ОЕС України до розподілу НEE сальдо потоків активної потужності перетинами «Дніпро – Южно-Українська АЕС» та «Южно-Українська АЕС – Дніпро» становило відповідно -824,4 МВт та -195,3 МВт. Аналіз коефіцієнтів чутливості сальдо потоків потужності до зміни активної потужності вузлів-претендентів виявив, що в аспекті поставленого завдання переважна більшість із них не придатна для розміщення НEE, оскільки останні матимуть діаметрально протилежні впливи на сальдо потоків потужності зазначеними перетинами (прикладом таких вузлів є Шостка, відповідні коефіцієнти чутливості, що мають протилежні знаки, наведено в останньому стовпчику таблиці). Серед небагатьох вузлів, що «претендували» на розміщення НEE, було обрано Черкаси, Шевченко та Знам'янку (для перших двох коефіцієнти чутливості наведено в таблиці). Внаслідок розподілу потужності СНEE (200 МВт) з урахуванням заданих обмежень та пріоритетності перетину «Южно-Українська АЕС – Дніпро» сальдо потоків активної потужності цим перетином стало рівним -40,6 МВт. Тобто бажане зменшення (за абсолютною величиною) сальдо потоків потужності склало 155 МВт. Разом з тим, сальдо потоків активної потужності перетином «Дніпро – Южно-Українська АЕС» стало рівним -834,4 МВт, тобто за абсолютною величиною сальдо не зменшилося, а трішки збільшилося (на 10 МВт). Модельований режим ОЕС України із розподіленими та ввімкненими НEE, за результатами поточкорозподілу в якому розраховано сальдо потоків активної потужності перетинами, одержано для значень потужності НEE у вузлах, «округлених» до десятків (відповідно до практи-

ки спорудження енергосховищ з використанням НЕЕ). Встановлена потужність НЕЕ у вузлах *Шевченко, Черкаси та Знам'янка* склала відповідно 100, 80 та 20 МВт.

Висновки. Під час реалізації проекту зі створення СНЕЕ (Battery Energy Storage system) в ОЕС України доцільно враховувати вплив розподілу (за місцем та потужністю) НЕЕ на потоки активної потужності «проблемними» контрольованими перетинами ОЕС України. Запропоновано метод визначення розподілу НЕЕ в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності заданими перетинами. Задля досягнення розподілом НЕЕ максимально можливого бажаного результату кількість місць для розташування НЕЕ апіорі не слід жорстко обмежувати.

Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Нова енергетика» (КПКВК 6541030).

1. 2018 Non-Financial Report “10 steps towards Europe”. State enterprise National power company Ukrenergo.

URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/07/UE_NFR_2018_Eng.pdf (accessed: 04.03.2020)

2. Energy storage Ukraine 2020: first projects, steps, and challenges. Discussion Platform 12 December 2019.

URL: <https://mim.kiev.ua/events/view/energy-storage-ukraine-2020-persh-proekti-kroki-ta-vikliki> (accessed: 09.01.2020).

3. Gamm A.Z., Golub I.I. Sensors and weaknesses in power systems. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the RAS, 1996. 96 p. (Rus.)

УДК 621.311 + 621.3.001.57

ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ОЭС УКРАИНЫ С УЧЕТОМ ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПОТОКИ МОЩНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

А.Ф. Буткевич^{1,2}, докт. техн. наук, **Н.Т. Юнеева¹**, канд. техн. наук, **Т.М. Гуреева¹**,

П.И. Стецюк³, докт. ф.-м. наук

¹Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: butkevych@ied.org.ua

²НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

³Институт кибернетики НАН Украины им. В.М. Глушкова,

пр. Академика Глушкова 40, Киев, 03187, Украина.

Показано, что при создании в объединенной энергосистеме (ОЭС) Украины системы накопителей электроэнергии (НЭЭ) целесообразно учитывать влияние распределения (по месту и мощности) батарей НЭЭ на потоки активной мощности «проблемными» контролируемыми сечениями ОЭС Украины. Предложен метод определения распределения НЭЭ с учетом указанного влияния. Библ. 3, табл. 1.

Ключевые слова: объединенная энергосистема, возобновляемые источники энергии, размещение накопителей электроэнергии

THE PROBLEM OF ELECTRIC POWER STORAGES' PLACEMENT IN THE IPS OF UKRAINE TAKING INTO ACCOUNT ITS INFLUENCE ON THE POWER FLOWS TRANSMITTED BY CONTROLLED CUTSETS

O.F. Butkevych^{1,2}, **N.T. Yunieieva¹**, **T.M. Hurieieva¹**, **P.I. Stetsyuk³**

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy avenue, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: butkevych@ied.org.ua

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

Peremohy avenue, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Glushkov avenue, 40, Kyiv, 03187

It is shown that when creating of electric energy storage system (EESS) in the Interconnected Power System (IPS) of Ukraine it is advisable to take into account the influence of the distribution (considering both location and power) of EESS batteries on the flows of active power transmitted by “problematic” controlled cutsets of the IPS of Ukraine. The method for solving the EESS distribution’s problem taking into account the specified influence is proposed. References 3, table 1.

Key words: interconnected power system, renewable energy sources, electric energy storages’ placement

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 12.05.2020