

УДК 621.311.2

Ярослав Гавриленко\*, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5411>

Володимир Дерій, канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна

\*Автор-кореспондент: yasx80@gmail.com

## ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ НА ОСНОВІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА АКУМУЛЯТОРНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** Курс на зменшення викидів парникових газів в атмосферу та відповідне законодавче поле минулих років в Україні стимулювало розвиток відновлюваних джерел енергії та активне будівництво сонячних електростанцій. У зв'язку з впровадженням в енергетичному секторі проєктів із застосуванням сонячних електростанцій, об'єднана енергосистема України потребує нових підходів щодо побудови енергетичних балансуючих комплексів, що можуть забезпечити її стабільність та гнучкість. Чим більше реалізовано та введено в експлуатацію сонячних станцій, тим з більшими системними проблемами стикається енергетика України через стохастичний характер їх генерації. Одним із можливих методів вирішення цієї проблеми є створення енергетичних комплексів, що об'єднують сонячні електростанції та акумуляторні установки збереження енергії. Використання акумуляторних систем зберігання енергії дозволяє не лише згладжувати пікові навантаження та стабілізувати мережу, але й підвищувати ефективність використання генерованої енергії. Це особливо актуально в умовах зростаючого попиту на електроенергію та необхідності зменшення залежності від традиційних енергетичних ресурсів. У статті зроблено огляд основних типів структур енергетичних комплексів на базі сонячних електростанцій та акумуляторних накопичувачів енергії, проаналізовано їх основні переваги та недоліки, а також фактори, які впливають на вибір конфігурації енергетичного комплексу залежно від призначення. Проведений огляд та аналіз показав, що для нових проєктів доцільніше використовувати приєднання акумуляторних накопичувачів енергії до сонячних електростанцій з боку постійного струму, завдяки чому може бути збережено та використано електроенергії на 1–4 % більше. Також енергетичні комплекси, що використовують приєднання акумуляторних накопичувачів з боку змінного струму, є більш універсальними, гнучкими та зручними для модернізації уже існуючих сонячних електростанцій. Впровадження інноваційних технологій у сфері акумуляції енергії та покращення методів прогнозування генерації сонячних електростанцій дозволять зробити енергосистему України більш стійкою та надійною у довгостроковій перспективі.

**Ключові слова:** сонячна електрична станція, акумуляторна система зберігання енергії, приєднання з боку змінного струму, приєднання з боку постійного струму.

### 1. Вступ

Генерація від сонячних електростанцій (СЕС) у світі збільшується щороку. У 2023 році було введено в експлуатацію 346 ГВт нових потужностей СЕС, що становило 32,2 % від загальної кількості всіх уведених ВДЕ, а її загальний обсяг становив 1419 ГВт [1]. Як повідомляє Reuters, у листопаді 2024 року глобальна потужність СЕС досягла рекордних 2000 ГВт [2]. А за даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), у 2024 році приріст потужності має досягнути 593 ГВт [3]. Тільки в Європі загальна потужність СЕС збільшилась на 66 ГВт, що відповідає загальному зростанню на 22 % [4].

Незважаючи на всі виклики, пов'язані з військовою агресією росії проти України, за словами голови Асоціації сонячної енергетики України Владислава Соколовського, у 2024 році СЕС України додала в потужності приблизно 800–850 МВт за рахунок бізнесу та домогосподарств. Він зазначив, що

у 2025 році також очікується подальше встановлення нових потужностей СЕС та систем накопичення енергії [5].

Згідно з оцінкою НЕК «Укренерго», у найближчі роки Україна потребуватиме 0,8 ГВт сховищ електроенергії (наразі відсутні), для побудови яких необхідні 1,2 млрд доларів США інвестицій [6].

Відповідно до Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 р. (розпорядження КМУ від 13.08.2024 р. №761-р.) починаючи з 2025 р. планується зростання потужності СЕС від 7327 МВт до 12200 МВт у 2030 р. [7, 8].

Сонячна енергетика має мінливий характер, і потужність, що генерується, може змінюватися дуже швидко протягом дня, години і навіть хвилини. Енергетичний комплекс СЕС у поєднанні із системами зберігання енергії допомагають отримувати більш прогнозовану енергію, використовувати згенеровану енергію саме в ті години, яких найбільше потребує енергосистема, а також зберігати електроенергію в години надлишкової генерації та технологічних обмежень оператора системи передачі.

Оскільки вартість акумуляторних установок збереження енергії (BESS) продовжує швидко зменшуватися, впровадження проєктів з використанням BESS дає нові можливості на багатьох ринках електроенергії. Крім того, BESS можуть частково вирішити потреби в гнучкості енергосистеми, а також забезпечуватимуть допоміжні послуги, такі як регулювання частоти та потужності [9].

Метою даного дослідження є визначення переваг та недоліків існуючих структур енергетичних комплексів на базі сонячних електростанцій і накопичувачів електричної енергії та випадків їх доцільного застосування.

## 2. Методи та матеріали

Бурхливий розвиток сонячних електростанцій призвів до появи низки проблем в енергосистемах світу через їх стохастичний (негарантований) режим роботи [10]. Одним із можливих варіантів вирішення цієї проблеми є застосування накопичувачів електричної енергії (EESS) [11]. Із відомих технологій EESS [12, 13] для СЕС найбільш прийнятним варіантом є акумуляторні системи накопичення та зберігання енергії, особливо для розподілених енергосистем. Популярність BESS обумовлена їх доступністю, зменшенням вартості, високою швидкодією та щільністю накопичення енергії, достатньою потужністю, що дозволяє застосовувати їх для регулювання частоти і потужності енергосистем. BESS дає змогу зберігати електроенергію, вироблену сонячними панелями під час пікових годин генерації, та використовувати її у періоди низької продуктивності або підвищеного попиту. Це робить BESS критично важливою для забезпечення стабільного й надійного електропостачання.

До основних характеристик BESS належать ємність і номінальна потужність системи, тривалість накопичення енергії та специфічні додаткові вимоги залежно від конкретного випадку застосування [14].

- **Ємність** визначає обсяг енергії, який може бути збережений BESS. Оптимальний вибір ємності для енергетичного комплексу PV + BESS залежить від потужності, що можуть генерувати сонячні панелі, і очікуваного споживання енергії в періоди, коли генерація енергії від сонця низька. Надлишкова ємність може спричинити зайві капітальні витрати, а недостатня – призвести до нестачі збереженої енергії під час роботи комплексу.

- **Номінальна потужність** показує, яку максимальну кількість енергії здатна видавати BESS у визначений момент часу. Її вибір базується на максимальній потребі в потужності та часі, необхідному для видачі заданої потужності в мережу. У випадках, коли потрібна висока потужність, таких як стабілізація мережі, необхідно обирати BESS з вищим рівнем номінальної потужності.

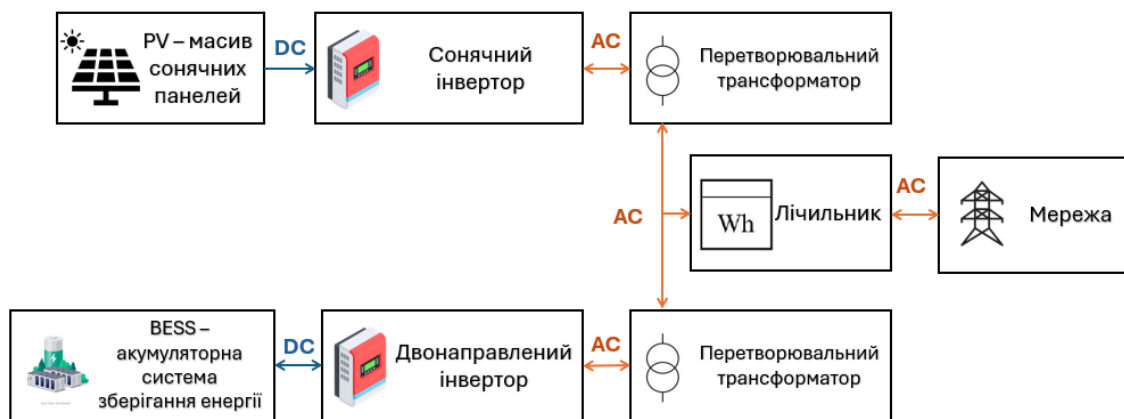
- **Тривалість** зберігання енергії визначає, як довго система може видавати електроенергію заданого рівня. Цей параметр залежить від ємності та характеру навантаження. Для автономних систем або віддалених об'єктів із нестабільною генерацією енергії, яка притаманна сонячним станціям, може знадобитися довший час зберігання.

• Крім того, слід враховувати **специфічні вимоги** щодо застосування системи, такі як безпека, вплив навколишнього середовища та відповідність нормативним стандартам. Це забезпечує надійність, безпечність і відповідність BESS умовам експлуатації.

Існує дві основні схеми приєднання BESS до гібридних енергетичних комплексів на основі сонячних електростанцій [15–17]:

1. Схема приєднання BESS до СЕС з боку змінного струму (AC Coupled) (рис. 1, 4).
2. Схема приєднання BESS до СЕС з боку постійного струму (DC Coupled) (рис. 2), яка має різновидність – реверсивну DC Coupled-система (рис. 3).

Більшість існуючих промислових сонячних станцій побудовано на мережевих інверторах потужністю від 60 до 250 кВт, які не мають можливості двонаправленого перетворення AC-DC. Отже, підключення BESS до існуючих СЕС доцільніше виконувати з боку змінного струму, оскільки це вимагає мінімальних обсягів реконструкції наявного обладнання та встановлення додаткового обладнання для їх інтеграції. Електричне приєднання BESS до СЕС здійснюється через кабельні лінії, підключені до збірних шин змінного струму розподільного устаткування високої напруги або трансформаторної підстанції.



**Рисунок 1.** Схема приєднання BESS до СЕС з боку змінного струму (AC Coupled)

Основний принцип роботи BESS та СЕС при AC Coupled-підключенні полягає в тому, що під час генерації електроенергії сонячні панелі виробляють постійний струм, який за допомогою сонячного інвертора перетворюється на змінний. У системах з AC Coupled акумулятори BESS заряджаються від систем змінного струму окремим приєднанням, яке отримує енергію від сонячної станції або мережі (енергосистеми). Для заряджання / розряджання акумуляторів використовується двонаправлений інвертор, що перетворює енергію змінного струму в постійний і навпаки [16]. Режим сумісної роботи BESS та СЕС при AC Coupled-підключенні контролює система керування енергією (EMS), що задає різноманітні сценарії для такого енергетичного комплексу залежно від призначення. Такий комплекс є найпоширенішим для великих систем завдяки своїй універсальності.

До переваг використання схеми приєднання AC Coupled відносять:

- Нижчу питому трудоемність під час монтажу порівняно із системами з постійним струмом. Оскільки це дає можливість застосування меншої кількості BESS за більшої їх номінальної потужності та ємності.
- Зниження втрат на власне споживання енергії для забезпечення роботи BESS. При AC Coupled-приєднанні є можливість використовувати BESS більшої номінальної потужності та ємності, відповідно використовується менша кількість систем опалення, вентиляції, кондиціонування повітря, пожежогасіння й систем управління та моніторингу.
- У процесі модернізації не потрібно замінювати існуючого мережевого сонячного інвертора на двонаправлений інвертор. Монтуються окреме приєднання з обладнанням для системи накопичення енергії.

– Більш зручні умови для модернізації фотоелектричної системи або BESS. Система накопичення енергії та система генерації незалежні одна від одної, отже можливо проводити ремонтні роботи або модернізацію на кожному з приєднань окремо, не відключаючи обладнання іншого приєднання.

– Більшу гнучкість для визначення місця розташування BESS при проектуванні та модернізації. На відміну від систем з приєднанням до постійного струму, що вимагають, щоб акумулятори встановлювалися якнайближче до збірок потужності постійного струму або двонаправленого інвертора.

– Зменшення трудозатрат на технічне обслуговування та експлуатацію завдяки можливості розміщення більшої кількості BESS в одному місці.

Якщо розглядати приєднання BESS з боку постійного струму на існуючих проєктах промислових СЕС, то для реалізації таких систем доцільно використовувати точки приєднання, такі як збірки потужності постійного струму (combiner box), що зазвичай встановлені безпосередньо серед конструкцій із сонячними панелями, або інвертори, що мають один MPPT (maximum power point tracking – контролер сонячного електричного заряду інвертора, що відслідковує максимальну потужність). Якщо на існуючій сонячній станції встановлено центральні інвертори для перетворення сонячної енергії, можливо розглянути приєднання до секцій збірних шин постійного струму цього інвертора. Ці точки підключення є оптимальними на підставі можливості отримання найбільшої потужності постійного струму в них. Відповідно, номінальна потужність та ємність BESS при застосуванні DC Coupled-систем розраховується залежно від потужності, що може видати точка приєднання з боку постійного струму. Тому зазвичай BESS при DC Coupled-приєднанні менші за розмірами і основними параметрами, ніж BESS, що застосовують при AC Coupled-приєднанні. Якщо СЕС збудовано на стрінгових інверторах з великою кількістю MPPT, застосування схеми приєднання BESS до СЕС DC Coupled недоцільно – потужність кожного стрінгу інвертора невисока, і, відповідно, обсяг капітальних вкладень при такому приєднанні буде дуже значним.

Основний принцип роботи BESS та СЕС при DC Coupled-підключенні полягає в тому, що під час генерації електроенергії сонячними панелями більшої за встановлену технічними умовами потужність енергетичного комплексу або у періоди часу, коли оператор мережі дає команду на обмеження видачі потужності в мережу, згенерована енергія, перетворена через оптимізатор потужності (DC-DC-перетворювач), заряджає акумуляторні батареї BESS. Коли сонячна активність спаде нижче встановленої потужності, збережена в BESS енергія буде використана і акумулятори почнуть розряджатися. Оптимізатор потужності змінить постійну напругу до необхідного рівня, а інвертор перетворить на напругу змінного струму для подальшої передачі в мережу. Заряджання і розряджання акумуляторів відбувається з боку постійного струму, перетворення напруги при заряджанні / розряджанні акумуляторів BESS з постійної на змінну в інверторі не відбувається.

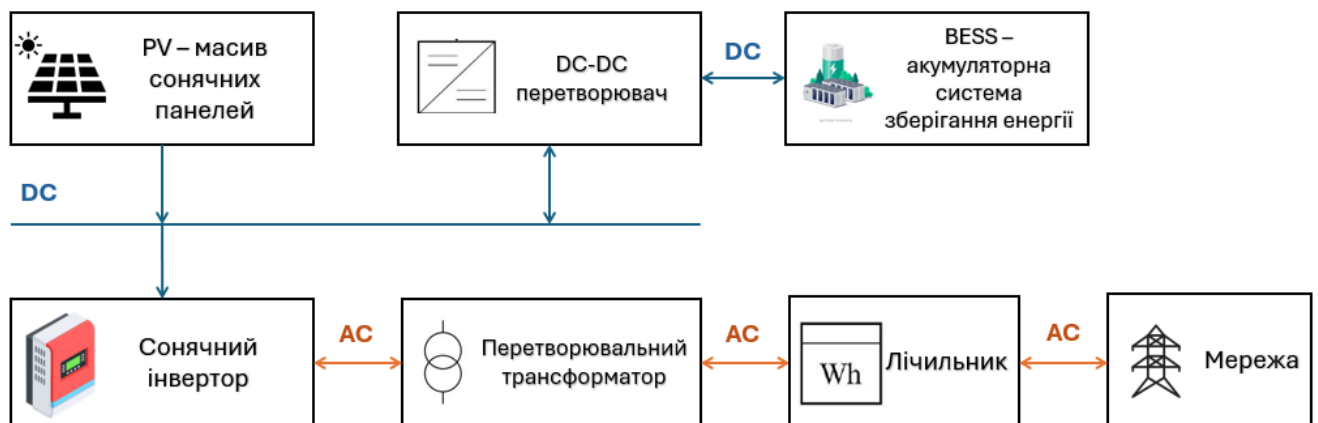


Рисунок 2.Схема приєднання BESS до СЕС з боку постійного струму (DC Coupled)

В енергетичних комплексах, що використовують DC Coupled-системи, можливе збільшення коефіцієнта перевантаження – співвідношення потужності сонячних панелей до номінальної потужності інвертора (DC/AC ratio), порівняно з енергетичними системами сонячних електростанцій без накопичувачів. Коефіцієнт перевантаження дає можливість збільшити обсяг виробленої електроенергії завдяки тривалішому часу генерації станції на максимальній потужності, більш ранньому часу початку та пізнішому закінченню генерації енергії в кінці дня. Отже, надлишкову енергію від масиву панелей при збільшенні коефіцієнта перевантаження, яку було б «зрізано» інвертором за великої сонячної активності є можливість накопичити в BESS та в подальшому відпускати у мережу.

Інвертор, який одночасно працює як із сонячними панелями, так і з накопичувачами, зазвичай називається гібридним. Гібридні інвертори можуть бути двонаправленими, що дасть змогу заряджати акумулятори від сонячних панелей або загальної мережі, утворюючи так звані реверсивні DC Coupled-системи (рис. 3). Схеми DC Coupled передбачають приєднання акумулятора через перетворювач постійного струму DC-DC (так званий *оптимізатор потужності*) [16] до масиву сонячних панелей, що дозволяє заряджання акумуляторів за низьких напруг фотоелектричної системи (PV) [17], наприклад, вранці або увечері.

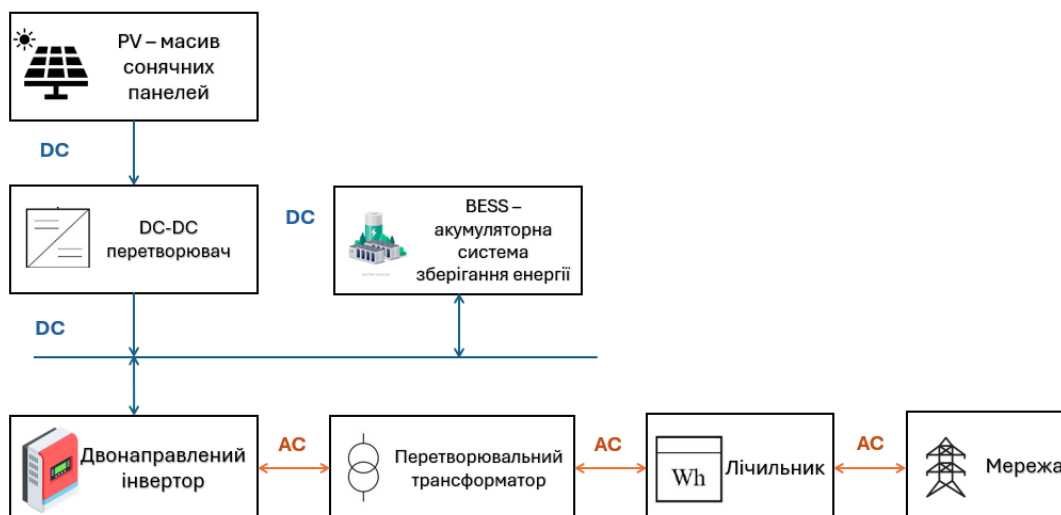


Рисунок 3. Реверсивна схема приєднання BESS до CEC з боку постійного струму (DC Coupled)

В реверсивних DC Coupled-системах (рис. 3) мережевий двонаправлений інвертор з BESS приєднаний безпосередньо до DC-шини. Застосування реверсивного DC Coupled-приєднання дозволяє працювати в автономному режимі (мікромережі) завдяки тому, що використовується сумісний з мікромережами інвертор для накопичення енергії [17].

Застосування реверсивних DC Coupled-схем приєднання BESS до CEC надає можливість зменшити капітальні витрати, отримати кращу ефективність та додаткові прибутки при приєднанні до мікромереж з резервуванням потужності в батареях, що зазвичай притаманно для AC Coupled-систем. Для мікромереж, пов'язаних із загальною мережею та ринком електроенергії, реверсивні DC Coupled-системи можуть також забезпечувати додаткові послуги, такі як регулювання частоти, арбітраж та перенесення збереженої енергії в BESS на години профіциту електроенергії в мережі або на період часу вищої ціни на ринку електроенергії.

Перевагами використання схеми приєднання DC Coupled будуть наступні:

- Зниження вартості систем зберігання енергії. Використання лише одного сонячного інвертора або двонаправленого інвертора, в реверсивних системах, та перетворювального трансформатора.
- Вища ефективність завдяки відсутності додаткового перетворення між постійним і змінним струмом. Для системи AC Coupled постійний струм в BESS необхідно перетворити у змінний для

загальної мережі, а потім знову в постійний для розрядження акумуляторів BESS. Перетворення може знизити ефективність на 1 % – 4 % залежно від інвертора, трансформатора та іншого допоміжного обладнання системи [15, 16].

– Більша кількість енергії для розрядження акумуляторів. В ранкові та вечірні періоди рівень напруги низький для роботи інвертора, але достатній для зарядження акумуляторів [17].

– Підключення BESS до CEC з боку постійного струму дозволяє здійснювати відпуск електроенергії в енергосистему за єдиним тарифом як під час генерації електроенергії від сонячних панелей, так і при розрядженні BESS.

При будівництві нових енергетичних комплексів CEC та BESS доцільніше використовувати DC Coupled-приєднання, оскільки це дозволяє відпустити в мережу від 1 до 4 % виробленої від сонця електроенергії [16].

У табл. 1 наведено порівняння факторів, що впливають на вибір схеми приєднання BESS до гібридних енергетичних комплексів на основі сонячних електростанцій [15].

**Таблиця 1.** Порівняльна таблиця підключення BESS до CEC

| <b>Фактор впливу на вибір системи</b> | <b>DC Coupled-приєднання</b>                                                                                                                                                                                                                          | <b>AC Coupled-приєднання</b>                                                                                                              |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Інвертор                              | Можливість застосування одного сонячного інвертора для комплексу або одного двонаправленого інвертора, для реверсивних систем, для зарядження / розрядження батарей                                                                                   | Необхідність застосування окремого мережевого сонячного інвертора та окремого двонаправленого інвертора для зарядження / розрядження BESS |
| Розмір батарей                        | Одинична потужність та ємність BESS менше – акумуляторні батареї приєднані безпосередньо до збірки масиву сонячних панелей, тому потужність BESS залежить від потужності точки приєднання з боку постійного струму.                                   | Можливість застосування BESS великої потужності та ємності                                                                                |
| Вартість монтажних робіт              | Більша (пов'язано з великою кількістю невеликих за потужністю та ємністю BESS, необхідних для установки)                                                                                                                                              | Менша                                                                                                                                     |
| Вартість експлуатаційних робіт        | Більша (пов'язано з великою кількістю невеликих за потужністю та ємністю BESS, розміщених на території енергетичного комплексу, відповідно необхідно більше систем охолодження, вентиляції та кондиціонування, більша кількість протипожежних систем) | Менша (можливість розташування BESS великої потужності та ємності в одному місці)                                                         |
| Надійність системи                    | Більш надійна (вихід з ладу однієї BESS не виведе з ладу всю систему зберігання енергії енергетичного комплексу)                                                                                                                                      | Менш надійна (вихід з ладу призведе до значних втрат системи зберігання енергії)                                                          |
| Застосування                          | Для сонячних станцій невеликої потужності                                                                                                                                                                                                             | Для великих промислових сонячних станцій                                                                                                  |
| Кількість виробленої енергії          | Більша (менші втрати електроенергії при генерації, перетворенні та відпуску в мережу)                                                                                                                                                                 | Менша (додаткове перетворення AC-DC може знизити ефективність на 1–4 %, залежно від інвертора)                                            |
| Доцільність при проєктуванні          | Для будівництва нових енергетичних комплексів PV+BESS                                                                                                                                                                                                 | Для модернізації існуючих сонячних електростанцій                                                                                         |

Основними нормативно-правовими актами, які регулюють діяльність із збереження електроенергії, є Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 р. № 2019-VIII та Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 р. № 555-IV.

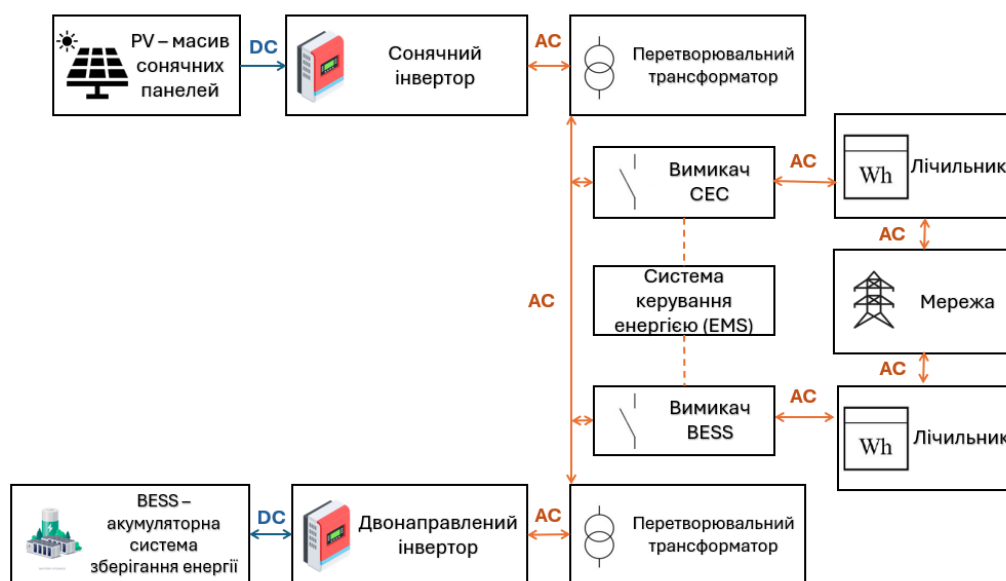
16 червня 2022 року набрав чинності Закон № 2046-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії», який вперше врегульовує питання експлуатації установок зберігання енергії на ринку електроенергії [18]. Закон № 2046-IX враховує основні принципи правового регулювання установок зберігання енергії в країнах ЄС та сприяє використанню цих систем, збалансує роботу енергосистеми та сприятиме синхронізації української енергосистеми з європейською ENTSO-E [1].

Зазначені нормативно-правові акти визначають правові, економічні та організаційні основи функціонування ринку електроенергії та розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Вони регулюють діяльність, пов'язану із зберіганням електроенергії, визначають терміни «зберігання енергії» та «установка зберігання енергії», а також встановлюють права й обов'язки операторів установок зберігання енергії (далі – УЗЕ).

Діяльність із зберігання енергії може здійснюватися без ліцензії за певних умов, залежно від статусу суб'єкта:

1. Виробники електроенергії з альтернативних джерел можуть встановлювати УЗЕ без технічних умов, ліцензії, дозволів на земельну ділянку та інших документів, якщо відбір енергії через УЗЕ здійснюється виключно від власних генеруючих установок у межах дозволеної потужності (відповідно до ліцензії на виробництво електроенергії).
2. Активні споживачі також можуть використовувати УЗЕ без ліцензії, якщо їхня потужність не перевищує договірної для споживання. Вони мають право брати участь у ринку допоміжних послуг, надавати послуги балансування та здійснювати купівлю-продаж енергії для зберігання через організовані ринки самостійно або в агрегованих групах [19].

Відповідно до Кодексу системи передачі (редакція від 31.05.2024), у разі приєднання (підключення) УЗЕ до електричних мереж внутрішнього електрозабезпечення активного споживача або споживача, який має намір набути статусу активного споживача, з метою відпуску раніше збереженої в УЗЕ електричної енергії в мережу системи передачі або в мережі інших суб'єктів господарювання, або участі у ринку допоміжних послуг, надання послуг з балансування та купівлі-продажу електричної енергії, яка використовується для зберігання енергії в УЗЕ, на організованих сегментах ринку електричної енергії самостійно або у складі агрегованих груп, такий Користувач (активний споживач) зобов'язаний забезпечити облік електричної енергії відповідно до вимог Кодексу комерційного обліку електричної енергії [20]. Отже, схема приєднання BESS до CEC з боку змінного струму має включати окремий вузол обліку для установки зберігання електроенергії (рис. 4) [21].



**Рисунок 4.** Структурна схема приєднання BESS до CEC (AC Coupled) із двома окремими обліками електричної енергії

Законодавство України дозволяє здійснювати діяльність із зберігання енергії без ліцензії для виробників електроенергії з альтернативних джерел, активних споживачів та споживачів за визначених законодавством умов [22]. Основними вимогами є використання УЗЕ лише для власних потреб або відбір електроенергії від власних генеруючих установок, дотримання встановленої потужності і забезпечення окремого комерційного обліку. Це сприяє полегшенню впровадження установок зберігання енергії серед виробників електроенергії з альтернативних джерел та активних споживачів.

Отже, енергетичні комплекси BESS та CEC можливо використовувати:

1. для функціонування на ринку електричної енергії як виробника з прогнозованою потужністю, що усуває періодичність і мінливість, притаманну сонячній генерації [13];
2. для використання BESS у складі розумних мереж для моніторингу, управління та оптимізації розподілу енергії;
3. в якості активного споживача;
4. як учасника ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку, де здійснюється купівля-продаж електроенергії;
5. для участі у балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг, де надаються послуги, пов'язані з підтриманням стабільної роботи енергосистеми, включаючи регулювання потужності та частоти, забезпечення резервів та врегулювання небалансів [18].

Для визначення оптимального відношення потужності і ємності BESS до встановленої потужності сонячної станції необхідно врахувати дуже багато факторів, такі як:

- розміщення енергетичного комплексу – ландшафт місцевості, сонячне випромінювання, температура та інші погодні фактори можуть значно впливати на вибір оптимального співвідношення [23];
- графіки споживання електроенергії – час та обсяги погодинного споживання [24];
- структура мережі та тарифи, як вартість електроенергії впливатиме на економічну життєздатність інтеграції BESS;
- економічні фактори – вартість сонячних панелей, акумуляторних батарей, монтажу, обслуговування;
- фактори політичного стимулювання – державні субсидії, пільгові тарифи, податкові кредити [1], податкові пільги та інші стимули можуть значно вплинути на техніко-економічну доцільність та вибір оптимального співвідношення обладнання системи [25].

Конфігурація енергетичного комплексу PV + BESS вибирається залежно від його призначення та може забезпечувати наступні загальні потреби:

- зменшення собівартості електроенергії. Призначені для накопичення надлишку сонячної енергії або пікової генерації і видачу накопленої енергії в періоди пікового попиту, що зменшує залежність від електромережі в години, коли енергія від мережі на ринку має найвищу ціну [26];
- забезпечення власного споживання. Призначені для збільшення споживання сонячної енергії; накопичують надлишкову вироблену енергію для використання, коли сонце не світить, зменшуючи залежність від електромережі [27];
- надання допоміжних послуг для загальної електричної мережі. Такий енергетичний комплекс може надавати послуги мережі, такі як регулювання частоти та підтримка напруги, що може бути додатковим джерелом доходу [28].

У дослідженні [29] описана методика визначення оптимальної ємності BESS для роботи CEC у базовому режимі. Методика розроблена за результатами статистичного аналізу масиву даних конкретної CEC для умов Іспанії. Весь рік поділяється на три періоди, і для кожного з них визначена оптимальна ємність. За твердженням авторів, це дало можливість на кожному із періодів забезпечити прогнозованість потужності CEC близько 95 %. Незважаючи на те, що методика розроблена для умов Іспанії, сам підхід може бути використаний й іншими країнами.

Впровадження проєктів із застосуванням енергетичних комплексів PV + BESS відбувається в усьому світі. Як зазначає профільне видання SolarQuarter [30], в січні 2025 року в ОАЕ оголосили про

запуск першого у світі масштабного проєкту, що надасть можливість цілодобового забезпечення електричною енергією. У проєкті було поєднано генерацію сонячної енергії та її зберігання у сучасних акумуляторних батареях. Зазначається, що енергетичний комплекс визначеної конфігурації дозволить розподіляти відновлювану енергію 24 години на добу сім днів на тиждень і забезпечить до 1 ГВт потужності базового навантаження щодня з відновлюваних джерел енергії. Проєкт в Абу-Дабі включатиме сонячну фотоелектричну станцію потужністю 5,2 ГВт (постійного струму) в поєднанні з BESS потужністю 19 ГВт·год.

Rahmat Khezri та інші в дослідженні [31] зазначають, що для домогосподарства в Австралії оптимальна конфігурація потужностей PV і BESS становить 10 кВт і 17 кВт·год. Згідно з графіками споживання було визначено, що максимальне споживання електроенергії в січні становило 2,6 кВт·год. При такому співвідношенні PV та BESS комплекс експортує мінімум електроенергії до основної мережі.

Національна лабораторія відновлюваної енергетики (NREL) регулярно публікує звіти з оцінки витрат, які деталізують вартість встановлення фотоелектричних і накопичувальних (акумуляторних) систем. У звіті [32], підготовленому для департаменту енергетики Сполучених Штатів, проведено оцінку ринку встановлених PV+BESS в житловому, комунальному та промисловому секторах. За даними звіту змодельована питома вартість становить:

- Для 8 кВт<sub>DC</sub> домашньої сонячної станції із системою накопичення енергії 5кВт/12,5 кВт·год – 4,70 \$/В<sub>ТDC</sub>;
- Для 3 МВ<sub>ТDC</sub> комунальної сонячної станції з фіксованим кутом сонячних панелей та системою накопичення енергії 1,8 МВт/7,2 МВт·год – 2,94 \$/В<sub>ТDC</sub>;
- Для 100 МВ<sub>ТDC</sub> промислової сонячної станції з одноосьовим трекером та системою накопичення енергії 60 МВт/240 МВт·год – 2,11 \$/В<sub>ТDC</sub>.

Проведене фінансове моделювання (NREL) [15] надає наступні результати для систем PV+BESS, що можна використовувати як проєктну вартість:

- Автономна фотоелектрична система потужністю 100 МВт з одноосьовим трекером відстеження – 111 млн доларів США;
- Автономна система накопичення енергії потужністю 60 МВт/240 МВт·год тривалістю 4 години – 91 млн доларів США;
- Фотоелектрична станція (100 МВт) з приєднанням BESS з боку постійного струму (60 МВт/240 МВт·год, 4-годинна тривалість), розташовані в одному місці – 186 млн доларів США;
- Фотоелектрична станція (100 МВт) з приєднанням BESS з боку змінного струму (60 МВт/240 МВт·год, 4-годинна тривалість), розташовані в одному місці – 188 млн доларів США;
- Фотоелектрична станція (100 МВт) та BESS (60 МВт/240 МВт·год, тривалість 4 години), розташовані в різних місцях – 202 млн доларів США.

Зі свого боку Національна лабораторія Лоуренса у Берклі в серпні 2024 року опублікувала звіт [33], що ґрунтується на даних проєктів, змонтованих до 2023 року. З наданого звіту можна відзначити, що середня питома вартість енергетичного комплексу PV+BESS становить:

- Для домашнього сектору – 5,2 \$/В<sub>ТDC</sub>;
- Для малих комплексів недомашнього призначення (до 100 кВт<sub>DC</sub>) – 5,6 \$/В<sub>ТDC</sub>;
- Для великих комплексів недомашнього призначення (понад 100 кВт<sub>DC</sub>) – 2,2 \$/В<sub>ТDC</sub>.

Міжнародна фінансова компанія Lazard зробила аналіз [34] приведеної вартості зберігання енергії (LCOS), який показує, що для BESS 100 МВт (400 МВт·год) LCOS варіюється від 170 доларів США/МВт·год до 296 доларів США/МВт·год у США без субсидування, що надається згідно з законом про зниження інфляції (Inflation Reduction Act – IRA). В зазначеному аналізі Lazard змодельовав вартість зберігання енергії у доларах США за МВт·год (US\$/MWh) та у доларах США за кВт·рік (US\$/kW·year) для системи зберігання енергії потужністю 100 МВт, з тривалістю зберігання енергії 1, 2 та 4 години, розташованих на боці мережі, а також для систем зберігання енергії, розташованих на боці споживача, для комерційних і промислових споживачів (1 МВт, 2 МВт·год) та для житлових

будинків (6 кВт, 25 кВт·год). За даними моделювання вартості зберігання енергії Lazard, можна зробити наступні висновки:

- Житловий сектор залишається найдорожчим, з діапазоном вартості від 653 до 855 доларів США за МВт·год та від 857 до 1122 доларів США за кВт на рік на субсидованій основі. На другому місці за вартістю знаходиться комерційний та промисловий сектор із діапазоном від 280 до 409 доларів США за МВт·год та від 176 до 258 доларів США за кВт на рік на субсидованій основі.

- Водночас автономні системи зберігання енергії на боці генерації з тривалістю 1 година були найдешевшими у розрахунку на кВт·рік, з діапазоном від 49 до 84 доларів США за кВт·рік. Однак системи з тривалістю 4 години були найдешевшими у розрахунку на МВт·год.

- При цьому LCOE (Levelized Cost of Energy) – приведена вартість енергії, для гібридних структур PV + BESS визначена [35] в межах від 60 \$/MWh до 210 \$/MWh.

### 3. Висновки

1. Існує дві основні схеми приєднання BESS до CEC – з боку змінного струму (AC coupled) та з боку постійного струму (DC coupled), яка має різновидність – реверсивну DC coupled:

- схема приєднання BESS до CEC AC coupled більш зручна для впровадження для існуючих сонячних станцій. Основними перевагами її є універсальність, зручність при модернізації, ремонті та обслуговуванні;

- схему DC coupled-приєднання BESS до CEC більш доцільно застосовувати при будівництві нових сонячних електростанцій з установками зберігання електроенергії. Така схема забезпечує на 1–4 % вищу ефективність, ніж AC coupled-системи, за рахунок відсутності додаткового перетворення в інверторі. Таке приєднання дозволяє збільшити коефіцієнт перевантаження (DC/AC ratio) та можливість заряджання акумуляторів за низьких напруг в ранкові та вечірні часи.

2. Енергетичний комплекс BESS та CEC можливо використовувати для забезпечення наступних потреб: функціонування на ринку ЕЕ як виробника з прогнозованою потужністю; використання BESS у складі розумних мереж для моніторингу, управління та оптимізації розподілу енергії; в якості активного споживача та для надання допоміжних послуг на ринку електроенергії.

**Внесок авторів.** Концептуалізація та методи – В. Дерій; методологія, аналіз та систематизація інформації щодо огляду енергетичних комплексів на основі CEC та BESS – Я. Гавриленко; формування результатів та висновків до статті – Я. Гавриленко, В. Дерій.

### Посилання

1. Гавриленко Я.В., Дерій В.О. Формування правових засад функціонування та розвитку «зеленої» енергетики. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. Вип. 4(80). С. 120–133. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120>
2. Twidale S. Exclusive: Global solar capacity hits 2 TW on path to climate goal, data shows. *REUTERS*. 2024, Nov. 7. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/global-solar-capacity-hits-2-tw-path-climate-goal-data-shows-2024-11-07> (Last accessed: 12.03.2025).
3. Solar Power Continues To Surge in 2024. *DS New Energy*. 2024, Sep. 29. URL: <https://www.dsnerg.com/news/solar-power-continues-to-surge-in-81213555.html> (Last accessed: 12.03.2025).
4. Solar surpasses coal in 2024, marking a record year of Renewable Energy growth in the European Union. *SOLIDA – Next Generation Renewables*. 2025, Feb. URL: <https://solida.com.es/en/solar-power-surpasses-coal-in-2024/> (Last accessed: 12.03.2025).
5. Соколовський В. Ми вистояли, ми рухаємося вперед. *Асоціація сонячної енергетики України*. 10.01.2025. URL: <https://aseu.org.ua/vladyslav-sokolovskyj-my-vystoialy-my-rukhaemosia-vpered/> (дата звернення: 12.03.2025).
6. Моїсєєв В. Яка генерація електроенергії потрібна Україні: джерела, собівартість, потужності. *PG – The page*. 03.02.2024. URL: <https://thepage.ua/ua/economy/yaka-generaciya-elektroenergiyi-potribna-ukrayini> (дата звернення: 12.03.2025).
7. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р. *Урядовий портал*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761> (дата звернення: 12.03.2025).

8. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. ACC – *American chamber of commerce Ukraine*. 27.08.2024. URL: <https://chamber.ua/ua/news/uriad-ukrainy-zatverdyv-natsionalnyy-plan-diy-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-a-takozh-ukhvalyv-rishennia-pro-provedennia-auktsionu-na-budivnytstvo-novykh-potuzhnostey-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/> (дата звернення: 12.03.2025).
9. Electricity 2025. Analysis and forecast to 2027. IEA – *International Energy Agency*. 2025, Feb. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0f028d5f-26b1-47ca-ad2a-5Aca3103d070a/Electricity2025.pdf> (Last accessed: 12.03.2025).
10. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisała P. Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 1. 27. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
11. Zgurovets O., Kulyk M. Application of Energy Storage for Automatic Load and Frequency Control. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. Vol. 220. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4)
12. Дерій В.О. Накопичувачі електричної енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. Вип. 1(72) С. 12–24. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012>
13. Zaporozhets A., Kostenko G., Zgurovets O., Deriy V. Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, R. Strzelecki, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 512. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4)
14. Why is BESS Needed to Harness the Maximum Potential of Solar Energy. *Blackridge Research & Consulting*. 2024, May 17. URL: <https://www.blackridgeresearch.com/blog/what-is-solar-battery-energy-storage-system-bess> (Last accessed: 14.03.2025).
15. Fu R., Remo T., Margolis R. 2018 U.S. Utility-Scale Photovoltaics-Plus-Energy Storage System Costs Benchmark. *NREL – National Renewable Energy Laboratory*. 2018, Nov. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf> (Last accessed: 14.03.2025).
16. Walsh D., Bradshaw D., Clamp A., Russell K. Optimizing Solar PV Plus Battery Storage. Business & Technology Surveillance: National Rural Electric Cooperative Association (NRECA). 2020, Dec. URL: <https://www.cooperative.com/programs-services/bts/Documents/TechSurveillance/Surveillance-Optimizing-Solar-Plus-Storage-Dec-2020.pdf> (Last accessed: 14.03.2025).
17. AC v. DC Coupling For Solar Plus Energy Storage Projects. *Dynapower – powering and cleaner planet*. 2018, Jan. 8. URL: <https://dynapower.com/ac-vs-dc-coupled-solar-plus-storage/> (Last accessed: 14.03.2025).
18. Закон щодо розвитку установок зберігання енергії в Україні набуде чинності 16 червня 2022 року. *EVERLEGAL*. 29.04.2022. URL: <https://everlegal.ua/zakon-schodo-rozvytku-ustanovok-zberigannya-energiyi-v-ukrayini-nabude-chynnosti-16-cherwnya-2022-roku> (дата звернення: 14.03.2025).
19. Правове регулювання діяльності із зберігання електричної енергії. *Інформаційне агентство «ЛІГА ЗАКОН»*. 08.11.2024. URL: [https://biz.ligazakon.net/analitics/231767\\_pravove-regulyuvannya-dyalnostz-zbergannya-elektrichno-energ](https://biz.ligazakon.net/analitics/231767_pravove-regulyuvannya-dyalnostz-zbergannya-elektrichno-energ) (дата звернення: 14.03.2025).
20. Про затвердження Кодексу системи передачі. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 р. № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 14.03.2025).
21. Буратинський І.М. Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляторної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі: дис. ... доктора філософії. Київ, 2023. 55 с. URL: <https://www.ienergy.kyiv.ua/vydavnycha-dialnist/navchannia-2/repository-dissertations-2.html> (дата звернення: 14.03.2025).
22. Мельник О. Запуск спеціальних аукціонів на допоміжні послуги: ключові факти. *Інформаційне агентство «ЛІГА ЗАКОН»*. 09.07.2024. URL: [https://biz.ligazakon.net/analitics/228985\\_zapusk-spetsalnikh-auktsionv-na-dopomzhn-poslugi-klyuchov-fakti](https://biz.ligazakon.net/analitics/228985_zapusk-spetsalnikh-auktsionv-na-dopomzhn-poslugi-klyuchov-fakti) (дата звернення: 14.03.2025).
23. Bel G., Bandi M. M. Geographic Dependence of the Solar Irradiance Spectrum at Intermediate to High Frequencies. *Physical Review Applied*. 2019. 12. 024032. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.024032>
24. How to size a battery energy storage system. *Ampowr B.V.* URL: <https://ampowr.com/how-to-size-battery-energy-storage-system/> (Last accessed: 14.03.2025).
25. Cai S., Li Y. Incentive Policy for Battery Energy Storage Systems Based on Economic Evaluation Considering Flexibility and Reliability Benefits. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. 634912. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.634912>
26. The Salient Advantages of Battery Energy Storage Systems. *Huawei Technologies Co., Ltd*. 2024, Apr. 23. URL: <https://solar.huawei.com/en/blog/2024/advantages-of-battery-energy-storage-system> (Last accessed: 16.03.2025).
27. Why solar power and BESS are a perfect match. *ECO STOR*. 2024, Feb. 06. URL: <https://www.eco-stor.com/en/resources/blog/why-solar-power-and-bess-are-a-perfect-match> (Last accessed: 16.03.2025).
28. Singh N., Upadhaya J. BESS Benefits: How Battery Energy Storage Systems Support the Grid. *Nor-Cal Controls ES, Inc*. 2021, Oct 21. URL: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-support-grid> (Last accessed: 16.03.2025).

29. Tejero-Gómez J. A., Bayod-Rújula Á. A. Analysis of Photovoltaic Plants with Battery Energy Storage Systems (PV-BESS) for Monthly Constant Power Operation. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 13. 4909. <https://doi.org/10.3390/en16134909>
30. UAE Launches World's First 24/7 Gigascale Renewable Energy Facility in Abu Dhabi. *SolarQuarter*. 2025, Jan. 17. URL: [https://solarquarter.com/2025/01/17/uae-launches-worlds-first-24-7-gigascale-renewable-energy-facility-in-abu-dhabi/#google\\_vignette](https://solarquarter.com/2025/01/17/uae-launches-worlds-first-24-7-gigascale-renewable-energy-facility-in-abu-dhabi/#google_vignette) (Last accessed: 16.03.2025).
31. Khezri R., Mahmoudi A., Whaley D. Optimal sizing and comparative analysis of rooftop PV and battery for grid-connected households with all-electric and gas-electricity utility. *Energy*. 2022. Vol. 251. Iss. 15. 123876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123876>
32. Ramasamy V., Zuboy J., Woodhouse M., O'Shaughnessy E., Feldman D., Desai J., Walker A., Margolis R., Basore P. U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2023. NREL/TP7A40-87303. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/87303.pdf> (Last accessed: 16.03.2025).
33. Barbose G., Darghouth N., O'Shaughnessy E., Forrester S. Pricing and Design Trends for Distributed Photovoltaic Systems in the United States 2024. *Tracking the Sun*. 2024 Edition. URL: [https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2024-10/Tracking%20the%20Sun%202024\\_Report.pdf](https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2024-10/Tracking%20the%20Sun%202024_Report.pdf) (Last accessed: 16.03.2025).
34. Colthorpe A. Lazard: IRA brings LCOS of 100MW, 4-hour standalone BESS down as low as US\$124/MWh. *Energy-Storage*. 2024, Jun. 06. URL: <https://www.energy-storage.news/lazard-ira-brings-lcos-of-100mw-4-hour-standalone-bess-down-as-low-as-us124-mwh/> (Last accessed: 16.03.2025).
35. Levelized Cost of Energy. *Lazard*. 2024, Jun. URL: [https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-\\_vf.pdf](https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf) (Last accessed: 16.03.2025).

## References

1. Havrylenko, Y.V., & Derii, V.O. (2024). Formation of legal framework for the functioning and development of green energy. *System Research in Energy*, 4(80), 120–133 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120>
2. Twidale, S. (2024, November 7). Exclusive: Global solar capacity hits 2 TW on path to climate goal, data shows. *REUTERS*. Retrieved March 12, 2025, from <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/global-solar-capacity-hits-2-tw-path-climate-goal-data-shows-2024-11-07>
3. Solar Power Continues To Surge in 2024. (2024, September 29). *DS New Energy*. Retrieved March 12, 2025, from <https://www.dsnerg.com/news/solar-power-continues-to-surge-in-81213555.html>
4. Solar surpasses coal in 2024, marking a record year of Renewable Energy growth in the European Union. (2025, February). *SOLIDA – Next Generation Renewables*. Retrieved March 12, 2025, from <https://solida.com.es/en/solar-power-surpasses-coal-in-2024/>
5. Sokolovsky, V. (2025, January 10). We persevered, we move forward. *Solar Energy Association of Ukraine*. Retrieved March 12, 2025, from <https://aseu.org.ua/vladyslav-sokolovskyj-my-vystoialy-my-rukhaemosia-vpered/> [in Ukrainian].
6. Moiseev, V. (2024, February 3). What kind of electricity generation does Ukraine need: sources, cost, capacity. *PG – The page*. Retrieved March 12, 2025, from <https://thepage.ua/ua/economy/yaka-generaciya-elektroenergiyi-potribna-ukrayini> [in Ukrainian].
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period until 2030 and the action plan for its implementation. Order of August 13, 2024, No. 761-r. *Government portal*. Retrieved March 12, 2025, from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761> [in Ukrainian].
8. National Renewable Energy Action Plan until 2030. (2024, August 27). *ACC – American chamber of commerce Ukraine*. Retrieved March 12, 2025, from <https://chamber.ua/ua/news/uriad-ukrainy-zatverdvy-natsionalnyy-plan-diy-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-a-takozh-ukhvalyv-rishennia-pro-provedennia-auksionu-na-budivnytstvo-novykh-potuzhnostey-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/> [in Ukrainian].
9. Electricity 2025. Analysis and forecast to 2027. (2025, February). IEA – International Energy Agency. Retrieved March 12, 2025, from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0f028d5f-26b1-47ca-ad2a-5ca3103d070a/Electricity2025.pdf>
10. Hotra, O., Kulyk, M., Babak, V., Kovtun, S., Zgurovets, O., Mroczka, J., & Kisała, P. (2024). Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*, 17(1), 27. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
11. Zgurovets, O., & Kulyk, M. (2022). Application of Energy Storage for Automatic Load and Frequency Control. In O. Kyrlyenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.), *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, 220. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4)
12. Derii, V. (2023). Electric energy storages. *System Research in Energy*, 1(72), 12–24 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012>

13. Zaporozhets, A., Kostenko, G., Zgurovets, O., & Deriy, V. (2024). Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, R. Strzelecki, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.), *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, 512. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4)
14. Why is BESS Needed to Harness the Maximum Potential of Solar Energy. (2024, May 17). *Blackridge Research & Consulting*. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.blackridgeresearch.com/blog/what-is-solar-battery-energy-storage-system-bess>
15. Fu, R., Remo, T., & Margolis, R. (2018, November). 2018 U.S. Utility-Scale Photovoltaics-Plus-Energy Storage System Costs Benchmark. NREL – National Renewable Energy Laboratory. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf>
16. Walsh, D., Bradshaw, D., Clamp, A., & Russell, K. (2020, December). Optimizing Solar PV Plus Battery Storage. Business & Technology Surveillance: National Rural Electric Cooperative Association (NRECA). Retrieved March 14, 2025, from <https://www.cooperative.com/programs-services/bts/Documents/TechSurveillance/Surveillance-Optimizing-Solar-Plus-Storage-Dec-2020.pdf>
17. AC v. DC Coupling For Solar Plus Energy Storage Projects. (2018, January 8). *Dynapower – powering and cleaner planet*. Retrieved March 14, 2025, from <https://dynapower.com/ac-vs-dc-coupled-solar-plus-storage/>
18. Energy Storages Law Takes Effect on 16 June 2022. (2022, April 29). *EVERLEGAL*. Retrieved March 14, 2025 from <https://everlegal.ua/zakon-schodo-rozvytku-ustanovok-zberigannya-energiyi-v-ukrayini-nabude-chynnosti-16-cherwnya-2022-roku> [in Ukrainian].
19. Legal regulation of electrical energy storage activities. (2024, November 8). *"Liga Zakon"*. Retrieved March 14, 2025, from [https://biz.ligazakon.net/analytics/231767\\_pravove-regulyuvannya-dyalnost-zberigannya-elektrichno-energ](https://biz.ligazakon.net/analytics/231767_pravove-regulyuvannya-dyalnost-zberigannya-elektrichno-energ) [in Ukrainian].
20. National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities. On approval of the Transmission System Code. Resolution of March 14, 2018, No. 309. Retrieved March 14, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> [in Ukrainian].
21. Buratynskiy, I.M. (2023). Modelling of the joint operation of a solar power plant and a battery energy storage system while increasing the stability and economic efficiency of their operation in the power system [Ph.D. dissertation]. Kyiv. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.ienergy.kyiv.ua/vydavnycha-diialnist/navchannia-2/repository-dissertations-2.html> [in Ukrainian].
22. Melnyk, O. (2024, July 09). Launch of special auctions for ancillary services: key facts. *"Liga Zakon"*. Retrieved March 14, 2025, from [https://biz.ligazakon.net/analytics/228985\\_zapusk-spetsalnikh-auktsionv-na-dopomzhn-poslugi-klyuchov-fakti](https://biz.ligazakon.net/analytics/228985_zapusk-spetsalnikh-auktsionv-na-dopomzhn-poslugi-klyuchov-fakti) [in Ukrainian].
23. Bel, G., & Bandi, M. (2019). Geographic Dependence of the Solar Irradiance Spectrum at Intermediate to High Frequencies. *Physical Review Applied*, 12, 024032. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.024032>
24. How to size a battery energy storage system. *Ampowr B.V.* Retrieved March 14, 2025, from <https://ampowr.com/how-to-size-battery-energy-storage-system/>
25. Cai, S., & Li, Y. (2021). Incentive Policy for Battery Energy Storage Systems Based on Economic Evaluation Considering Flexibility and Reliability Benefits. *Frontiers in Energy Research*, 9, 634912. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.634912>
26. The Salient Advantages of Battery Energy Storage Systems. (2024, April 23). *Huawei Technologies Co., Ltd.* Retrieved March 16, 2025, from <https://solar.huawei.com/en/blog/2024/advantages-of-battery-energy-storage-system>
27. Why solar power and BESS are a perfect match. (2024, February 06). *ECO STOR*. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.eco-stor.com/en/resources/blog/why-solar-power-and-bess-are-a-perfect-match>
28. Singh, N., & Upadhaya, J. (2021, October 21). BESS Benefits: How Battery Energy Storage Systems Support the Grid. *Nor-Cal Controls ES, Inc.* Retrieved March 16, 2025, from <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-support-grid>
29. Tejero-Gómez, J. A., & Bayod-Rújula, A. A. (2023). Analysis of Photovoltaic Plants with Battery Energy Storage Systems (PV-BESS) for Monthly Constant Power Operation. *Energies*, 16(13), 4909. <https://doi.org/10.3390/en16134909>
30. UAE Launches World's First 24/7 Gigascale Renewable Energy Facility in Abu Dhabi. (2025, January 17). *SolarQuarter*. Retrieved March 16, 2025, from [https://solarquarter.com/2025/01/17/uae-launches-worlds-first-24-7-gigascale-renewable-energy-facility-in-abu-dhabi/#google\\_vignette](https://solarquarter.com/2025/01/17/uae-launches-worlds-first-24-7-gigascale-renewable-energy-facility-in-abu-dhabi/#google_vignette)
31. Khezri, R., Mahmoudi, A., & Whaley, D. (2022). Optimal sizing and comparative analysis of rooftop PV and battery for grid-connected households with all-electric and gas-electricity utility. *Energy*, 251(15), 123876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123876>
32. Ramasamy, V., Zuboy, J., Woodhouse, M., O'Shaughnessy, E., Feldman, D., Desai, J., Walker, A., Margolis, R., & Basore, P. (2023). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP7A40-87303. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/87303.pdf>

33. Barbose, G., Darghouth, N., O'Shaughnessy, E., & Forrester, S. (2024, August). Pricing and Design Trends for Distributed Photovoltaic Systems in the United States 2024. *Tracking the Sun*. 2024 Edition. Retrieved March 16, 2025, from [https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2024-10/Tracking%20the%20Sun%202024\\_Report.pdf](https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2024-10/Tracking%20the%20Sun%202024_Report.pdf)
34. Colthorpe, A. (2024, June 06). Lazard: IRA brings LCOS of 100MW, 4-hour standalone BESS down as low as US\$124/MWh. *Energy-Storage*. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.energy-storage.news/lazard-ira-brings-lcos-of-100mw-4-hour-standalone-bess-down-as-low-as-us124-mwh/>
35. Levelized Cost of Energy. (2024, June). *Lazard*. Retrieved March 14, 2025, from [https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-\\_vf.pdf](https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf)

## THE ENERGY COMPLEXES BASED ON SOLAR POWER PLANTS AND BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS

Yaroslav Havrylenko\*, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5411>

Volodymyr Derii, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

\*Corresponding author: yasx80@gmail.com

**Abstract.** *The direction of reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere and the corresponding legislative framework in recent years in Ukraine have stimulated the development of renewable energy sources and the active installation of solar power plants. Due to the implementation of projects in the energy sector using solar power plants, the Unified Energy System of Ukraine requires new approaches to the construction of energy balancing complexes that can ensure its stability and flexibility. The more solar power plants are implemented and commissioned, the more systemic problems the Ukrainian energy sector faces due to the stochastic nature of their generation. One possible method of solving this problem is the creation of energy complexes that combine solar power plants with battery energy storage systems. The use of battery energy storage systems allows not only the smoothing of peak loads and stabilisation of the grid but also increases the efficiency of generated energy utilisation. This is particularly relevant given the growing demand for electricity and the need to reduce dependence on traditional energy resources. This article provides an overview of the main types of energy complex structures based on solar power plants and battery energy storage systems, analyzing their key advantages and disadvantages, as well as the factors influencing the choice of energy complex configuration depending on its purpose. The review and analysis show that for new projects, it is more reasonable to connect battery storage systems to solar power plants on the direct current side (DC coupled), allowing storage and utilisation of 1–4 % more electricity. On the other hand, energy complexes that use battery energy storage systems connected on the alternating current side (AC coupled) are more versatile, flexible, and convenient for upgrading existing solar power plants. Implementing cutting-edge technologies in energy storage and improving solar power generation forecasting will enable Ukraine's energy system to become more resilient and reliable in the long term.*

**Keywords:** solar power plant, battery energy storage system, AC coupled, DC coupled.

*Надійшла до редколегії: 20.03.2025*