

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279536

С.П. Денисюк¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

Р. Стржелецьки², д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-9437-9450

І.І. Богойко¹, магістрант, ORCID 0000-0002-6816-6352

Н. Стржелецька³, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5976-6903

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Гданський технологічний університет (Польща)

³Морський університет Гдині (Польща)

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕФЕКТИВНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Показано, що відновлені джерела енергії (ВДЕ) у багатьох країнах дедалі більше домінують на ринку електроенергії, при цьому обсяги генерації електроенергії сонячними електростанціями (СЕС) останніми роками зростають рекордними темпами. Зазначено, що хоча частка ВДЕ продовжує зростати і фотоелектрична індустрія стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема як продовжувати знижувати нормовану вартість енергії в СЕС (Levelised Cost of Energy, LCOE), покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку системи. Ефективна реалізація сонячної генерації потребує аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять СЕС, розробки механізмів та відповідного нормативно-методичного, технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть ефективному розвитку сонячної генерації, побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.

Здійснено аналіз особливостей розвитку «зеленої» генерації в Польщі та Україні, визначено позитивні фактори, які вплинули на розвиток ВДЕ в цих країнах, що дозволило сформувати техніко-економічні та організаційні умови успішного розвитку сонячної генерації, зокрема, наведено інформацію щодо нових гравців розвинутих енергетичних ринків згідно Четвертого енергетичного пакета ЄС. Аналіз показав, що при підвищенні ефективності систем з СЕС важливого значення набуває планування та керування попитом в електричній мережі, ефективне функціонування енергетичних інтелектуальних спільнот (Energy Smart Community, ESC).

Виділено базові складові ефективного функціонування електроенергетичних систем з СЕС, а саме: концепції конфігурацій фотоелектричної систем, Smart-інвертори, системи накопичення енергії (Energy Storage System, ESS), віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP) на основі СЕС. Показано, що кожна із чотирьох концепцій передбачає з'єднання серії фотоелектричних панелей або стрінгів та пристроїв силової електроніки (перетворювачів постійного струму та інверторів), які налаштовані з врахуванням особливостей функціонування різних структурних (схемотехнічних) рішень. Оцінено переваги використання Smart-інверторів, як нової технології, яка може допомогти інтегрувати сонячну енергію та інші розосереджені енергетичні ресурси в електричну мережу. Smart-інвертори використовуються з метою сприяти електричній мережі справлятися з переривчастою генерацією, допомагаючи електричній мережі залишатися стабільною та підтримувати вимоги до напруги та частоти.

Визначено, що у будь-якій фотоелектричній системі власне ESS стають центральним компонентом, що суттєво впливає на вартість, вимоги до обслуговування, надійність і дизайн СЕС, а важливими параметрами ESS, які впливають на роботу та продуктивність фотоелектричної системи, є вимоги щодо обслуговування акумулятора, термін служби акумулятора, доступна потужність і ефективність. Представлено тренди на ринку передових систем зберігання енергії для СЕС на наступне десятиліття. Функціонування віртуальних електростанцій на основі СЕС, як мережі агрегованих розосереджених енергетичних ресурсів, що дистанційно підключені та сумісно працюють поряд з гнучкими споживачами електроенергії, направлено на максимізацію вигод учасників. Представлено можливості та тенденції розвитку СЕС у найближчому майбутньому, які базуються на дослідженнях компанії Huawei.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, сонячні електростанції, конфігурація фотоелектричних систем, Smart-інвертори, системи накопичення енергії (Energy Storage System, ESS), віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP).

Вступ

Зелена енергетика є безумовним світовий тренд найближчих десятиліть [1–3]. Окремим споживачам, власникам домогосподарств та бізнесів, вона дозволяє здобути енергетичну незалежність та суттєво зменшити витрати на електроенергію, що постійно зростає в ціні. Для держави розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є запорукою стабільних інвестицій і гарантія того, що країна і надалі зможе вигідно експортувати продукцію.

За даними BNEF з майже 3000 ТВт-год виробленої електроенергії, вітер і сонячна енергія разом склали 10,5% світового виробництва 2021 року [4]. Внесок вітру в глобальний загальний обсяг генерації електроенергії зріс до 6,8%, тоді як сонячна енергія зросла до 3,7%. Десять років тому на ці дві технології разом припадало значно менше 1% загального виробництва електроенергії. Загалом у 2021 році 39% усієї електроенергії, виробленої в усьому світі, було без викидів вуглецю. Гідро- та атомні проєкти задовольняли трохи більше чверті світових потреб в електроенергії. Щороку, починаючи з 2017 року, на вітрову та сонячну енергію припадає більшість нових генеруючих потужностей, які додаються до глобальних мереж. У 2021 році вони досягли рекордних трьох чвертей з 364 ГВт нових побудованих потужностей. Включно з гідроенергетикою, генерацією на АЕС, енергетика з нульовим викидом вуглецю складала 85% усіх нових доданих потужностей. У 2021 та 2022 роках сонячна енергетика продовжувала швидко розвиватися, як з точки зору збільшення нових потужностей, так і нових ринків.

Сонячна енергія складала половину всієї глобальної доданої потужності – 182 ГВт, а генерація сонячними електростанціями (СЕС) вперше перевищив 1000 ТВт-год. Майже в половині всіх країн, які відслідковує BNEF, де було додано певну потужність, сонячна батарея (панель) була найкращим вибором з точки зору обсягів застосування [4]. Щонайменше 112 країн зараз мають встановлену принаймні 1 МВт сонячної потужності. Найпопулярніші технології виробництва електроенергії, додані у період 2012 – 2021 рр., наведено в табл. 1 [5].

Таблиця 1 – Найпопулярніші технології виробництва електроенергії, додані у період 2012 – 2021 рр.

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Україна	Вугілля	Сонце	Вугілля	Сонце	Вугілля	Сонце	Вугілля	Сонце	Сонце	Сонце
Польща	Вугілля	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Газ	Газ	Вугілля	Сонце	Сонце
Німеччина	Сонце	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце
США	Вітер	Газ	Газ	Вітер	Сонце	Сонце	Газ	Сонце	Сонце	Сонце
Туреччина	Гідро	Газ	Вугілля	Гідро	Вугілля	Газ	Сонце	Сонце	Гідро	Вітер
Франція	Газ	Сонце	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Сонце
Іспанія	Сонце	Вітер	Сонце	Гідро	Вітер	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце
Велика Британія	Вітер	Вітер	Сонце	Сонце	Сонце	Вітер	Вітер	Вітер	Газ	Вітер

Європейська зелена угода та пакет «Придатність до 55» (The European Green Deal та Fit for 55 Package) встановлюють амбітні цілі ЄС щодо впровадження великої кількості джерел відновлюваної енергії в найближчому майбутньому. Після агресії росії проти України 18 травня 2022 року Комісія схвалила план REPowerEU [6]. Ініціатива ЄС має на меті покласти край своїй залежності від російського викопного палива, яка пропонує підвищити ціль ЄС щодо відновлюваної енергії до 45% до 2030 року. Масштабне та швидке розгортання ВДЕ є основою плану REPowerEU. Опублікована в рамках плану «Стратегія сонячної енергетики ЄС» (EU Solar Energy Strategy) спрямована на розгортання понад 320 ГВт сонячних фотоелектричних установок до 2025 року, що більше ніж удвічі перевищує обсяг виробництва 2020 року, та майже 600 ГВт до 2030 року.

Згідно з дослідженням European Electricity Review 2023 аналітичного центру Ember, енергія вітру та сонця виробила рекордні 22% електроенергії в Європі у 2022 році, вперше обігнавши викопний газ і, вкотре, випередивши вугілля [7]. ВДЕ дедалі більше домінують на ринку електроенергії ЄС, при цьому вироблення сонячної енергії зросло на рекордні 39 ТВт-год у 2022 році, що на 24% більше, ніж попередній

рекорд. Зазначається, що вітер та сонячна енергія виробляють 22% електроенергії в ЄС, тоді як викопний газ – 20%, а вугілля – 16%. Таке зростання генерації ВДЕ допомогло Європі подолати безпрецедентний дефіцит у виробництві електроенергії на ГЕС та АЕС, що складав до 7% загального попиту на електроенергію в Європі у 2022 році. Європа уникла найгіршої енергетичної кризи. Агресія росії проти України викликала лише незначні коливання у вугільній енергетиці та величезну хвилю підтримки ВДЕ. Вплив дефіциту також був обмежений меншим попиту на електроенергію. Він знизився на 7,9% в останньому кварталі 2022 року порівняно з тим же періодом 2021 року. Відповідно до даних Ember, вітер, сонячна енергія та знизений попит на електроенергію разом склали покриття п'яти шостих наявного дефіциту, що запобігло росту споживання вугілля [7].

Згідно щорічного огляду ринку ЄС SolarPower Europe 2022 рік став роком, коли сонячна енергетика вперше продемонструвала свій справжній потенціал в ЄС, завдяки рекордно високим цінам на енергоносії та наслідкам розв'язання росією війни проти України [8]. Було встановлено 41,4 ГВт нових сонячних фотоелектричних потужностей, підключених до їхніх електричних мереж, що на 47% більше, ніж у 2021 році. Прогнози стверджують, що подальше щорічне зростання ринку СЕС зможе перевершити всі очікування, перевищити рівень розгортання 50 ГВт у 2023 році та більш ніж подвоїти порівняно з 2022 р. (до 85 ГВт) у 2026 році. Як і в 2021 р., у 2022 році Німеччина знову є найбільшим ринком сонячної енергії в Європі з 7,9 ГВт нових встановлених потужностей, за нею йдуть Іспанія (7,5 ГВт), Польща (4,9 ГВт), Нідерланди (4,0 ГВт) і Франція (2,7 ГВт) [8].

Подальша ефективна реалізація сонячної генерації потребує аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять СЕС, розробки механізмів та відповідного нормативно-методичного, технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть ефективному розвитку сонячної генерації, побудові сучасних локальних систем, відповідних схемотехнічних рішень.

Мета статті – здійснити аналіз розвитку зеленої генерації в Польщі та Україні, оцінити техніко-економічні та організаційні умови успішного розвитку сонячної генерації та сформувати базові складові ефективного функціонування електроенергетичних систем з СЕС.

1. Аналіз розвитку зеленої генерації в Польщі та Україні

Зміни у польському законодавстві восени 2019 року щодо джерел альтернативної енергетики перетворило Польщу в один із найбільш привабливих і перспективних ринків ЄС [9–11]. Якщо у 2018 році усі СЕС Польщі виробили всього 471,5 МВт (втричі менше, ніж Україна і в 160 разів менше, ніж Німеччина, то у вересні 2019 року Польща увійшла у так званий клуб країн «гігаватників» сонячної енергетики. *Цьому посприяли такі чинники [9]:*

1. Зниження ПДВ для міні СЕС. Польський сейм прийняв рішення про зниження ставки ПДВ з 23% до 8% для невеликих станцій загальною потужністю до 50 кВт. Паралельно було реалізовано низку інших державних програм, спрямованих на підтримку власників приватної генерації. Як наслідок, сонячні батареї стали розкуповувати в 12 разів швидше, ніж у 2018 році, а Польща стала першою державою Східної Європи, де обсяги вироблення енергії з альтернативних джерел у домашніх СЕС перевищили аналогічні показники промислових станцій.

2. Спеціальні енергетичні сертифікати. У Польщі практикують систему спеціальних «енергетичних сертифікатів» замість «зелених тарифів». Кожен сертифікат відповідає певному типу ВДЕ і оцінюється по-різному. Вони вигідні саме кількістю «чистої» електроенергії, яку виробник здатний продавати на ринку. Так, 1 МВт коштує 170 євро, або 0,17 євро за 1 кВт.

3. Система чистого вимірювання. Важливим аспектом зростання попиту на сонячну енергетику послужило розширення доступу до «системи чистого вимірювання» (Net Metering) бізнес- і енергетичних співтовариств. Раніше Net Metering був обмежений тільки житловим та державним секторами, а також користувачами житлових співтовариств.

4. Досить високі тарифи на традиційну електроенергію. У Польщі тариф на електроенергію вираховується за складним алгоритмом: базова ставка, пільгова ставка, послуги поставки, щомісячна абонентська плата. Згідно розрахунків собівартість 1 кВт коштує приблизно 0,145 євро.

5. Стимулюючі знижки на сонячні електростанції. Запроваджено низку програм, які стимулюють розвиток альтернативної енергетики: «*Energia Plus*» – для всіх видів ВДЕ потужністю до 0,5 МВт; «*Czyste Powietrze*» – для вітрових і сонячних станцій; «*Agroenergia*» – пільги для агрофермерів, що встановлюють сонячні батареї на полях і теплицях; «*Mój prąd Polska*» – гарантує знижку в 5000 злотих на СЕС, усім власникам міністанцій від 2 до 10 кВт.

Основні переваги для інвестування у польський ринок ВДЕ: прозорі аукціони продажу «чистої» енергії; висока вартість традиційної електроенергії; удосконалення технологій, які дозволяють розраховувати на все більш високий прибуток від сонячних електростанцій. Польща й далі продовжує підтримувати вугільні електростанції, що, як очікується, призведе до зростання вартості електроенергії та зростання привабливості системи Net Metering.

У лютому 2020 р. уряд Польщі прийняв Політику енергетики для Польщі до 2040 року (The Energy Policy of Poland until 2040, EPP 2040), яка визначає основу для енергетичного переходу, окреслює цілі для прогресу в енергетичному переході та стає польським внеском у Паризьку угоду та Європейський зелений курс [10, 11]. EPP 2040 ґрунтується на 3 концептуальних основах:

– справедлива трансформація: трансформація вугільних регіонів; зменшення енергетичної бідності; нові галузі, пов'язані з ВДЕ та атомною енергетикою;

– система нульових викидів енергії: альтернативна енергетика; атомна енергетика; сектор регіональної енергетики;

– висока якість повітря: трансформація теплового сектору; електрифікація транспорту; енергопасивні будинки.

Ключовими елементами EPP 2040 є [11]:

– в енергетичній системі країни має бути сформована система самозабезпечення електроенергією;
– зростання потужності альтернативної енергетики (вітрової) – у 2030 р. має складати 5,9 ГВт., а у 2040 р. – 11 ГВт.;

– зростання потужності альтернативної енергетики (сонячної) – у 2030 р. має складати 5–7 ГВт., а у 2040 р. – 10–16 ГВт.;

– збільшення частки ВДЕ: у всіх секторах та технологіях – у 2030 році частка відновлюваної енергії у валовому кінцевому споживанні енергії становитиме щонайменше 23%: не менше 32% в енергетиці (переважно вітрова та сонячна), 28% у опаленні (збільшення на 1,1 % щорічно), 14% у транспорті (за рахунок електромобільності);

– у 2030 р. частка вугілля у виробництві електроенергії має не перевищувати 56%; скорочення використання вугілля в економіці має відбуватись на основі справедливої трансформації;

– зростання енергоефективності – у 2030 році на 23% має зменшитись споживання первинної енергії, а інвестиційні програми мають бути спрямовані на розвиток відновлюваних джерел енергії та місцевому балансуванні;

– у 2033 році планується введення в експлуатацію першого блоку атомної електростанції з потужністю 1–1,6 ГВт, блоки будуть добудовуватись кожні 2–3 роки, в цілому ядерна програма передбачає будівництво 6 блоків;

– до 2040 р. планується перевести теплопостачання домогосподарств на централізовану або індивідуальні системи з нульовим або низьким рівнем забруднення;

– біогаз та водень мають стати паливом у процесі трансформації енергетичної політики;

– планується розширення інфраструктури природного газу, сирої нафти та рідкого палива, забезпечена диверсифікація напрямків постачання;

– планується зниження явища енергетичної бідності до рівня 6%;

– до 2030 р. викиди парникових газів скоротяться приблизно на 30% порівняно з 1990 р.;

– розвиток енергетичних технологій буде спрямований на технології накопичення енергії, інтелектуальні системи обліку та керування енергією, електромобільність та альтернативні види палива, водневі технології;

– система заходів, що буде спрямована на покращення якості повітря, включатиме: розвиток централізованого теплопостачання (чотирикратно зростання кількості ефективних систем опалення до 2030 року), низькоемісійний напрямок трансформації окремих джерел (теплові насоси, електричне опалення), відхід від спалення вугілля в домашніх господарствах – у містах до 2030 р., а у сільській місцевості – до 2040 р.; підвищення енергоефективності будівель; розвиток транспорту з низьким рівнем викидів, включаючи громадський транспорт з нульовими викидами до 2030 р.

У Енергетичній стратегії України на період до 2035 року передбачається, що частка ВДЕ у українському енергоміксі становитиме 12% у 2025 році, 17% – у 2030 та 25% – у 2035. В Україні у 2015 році станції, що використовують ВДЕ, а це в основному вітрові й сонячні електростанції, виробляли лише 1% від усієї електроенергії в Україні [12]. Однак вже у 2019 р. Україна увійшла у ТОП-10 країн світу за темпами розвитку відновлюваної енергетики, а у 2020 р. – у ТОП-5 європейських країн за темпами розвитку сонячної енергетики. У 2019 р. у рейтингу Climatescope [7] Україна посіла 8 місце (піднявшись з 63-го) серед 104 країн світу за інвестиційною привабливістю країни саме у питанні розвитку низьковуглецевих джерел енергії і будівництва «зеленої» економіки. У 2021 році, Україна була на 48 місці за загального інвестиційного потенціалу держави серед 136 країн світу в рейтингу BloombergNEF [8].

У 2021 р. частка електроенергії, згенерованої ВДЕ, досягла 8,1% або 12,8 ТВт·год, з яких 56% – за рахунок сонячного випромінювання, 33% – енергії вітру, практично 8% – за рахунок спалювання біомаси та біогазу і 3% прийшлося на малу гідроенергетику. За 2021 р. всіма електростанціями з ВДЕ було вироблено **12804 млн. кВт·год** електроенергії, що на 1941,9 млн. кВт·год або 17,8% перевищило показники 2020 р.:

– ВЕС України виробили 3866 млн. кВт·год або на 614,4 млн. кВт·год більше у порівнянні з 2020 роком, що становить 2,97% загального виробництва електроенергії;

– СЕС виробили 7670 млн. кВт·год або 4,8%, що на 1065,4 млн. кВт·год більше обсягу електроенергії, виробленої за аналогічний період 2020 року;
– генерація малих ГЕС зросла на 56,1 млн кВт·год, досягнувши показника в 276 млн. кВт·год або 0,17% в загальному балансі;
– біоЕС України згенерували 992 млн. кВт·год або 0,6%, що на 206 млн. кВт·год більше рівня виробництва попереднього року.

За даними НКРЕКП, станом на 31 грудня 2021 року, встановлена потужність сектору відновлюваної енергетики України досягла **9655,9 МВт**, включно з сонячними установками для приватних домогосподарств (дСЕС), або 8450,8 МВт – без дСЕС, а обсяг інвестицій у галузь сягнув 12 млрд. дол. США [13]. У березні 2022 р. для виробників електроенергії з ВДЕ було встановлено фіксований рівень виплат в розмірі 15% від середньозваженого «зеленого» тарифу за 2021 рік для СЕС, 16% – для ВЕС, 35% – для малих ГЕС, 40% та 60% – для біогазу та біомаси відповідно. Хоча 5 липня 2022 р. рівень виплат був підвищений – 18% для СЕС і ВЕС та 75% для біомаси – цього тепер вистачатиме лише на покриття операційних витрат станцій».

Однак, незважаючи на те, що за встановленими потужностями СЕС майже у 5 разів переважають ВЕС, різниця у виробництві електроенергії між ними зовсім не така значна. У 2021 р., наприклад, СЕС згенерували тільки удвічі більше електроенергії, ніж вітрові – 7670 (кВт·год) проти 3866 (кВт·год). За статистикою ДП «Оператор ринку», річні продажі електроенергії в 2022 р., згенерованої СЕС, впали майже удвічі – до 1,6 млрд. кВт·год, а згенерованої вітром – більш як удвічі, до 839 млн. кВт·год. У 2022 р. СЕС виробили 6944 млн. кВт·год електроенергії, тоді як ВЕС – лише 1676 млн. кВт·год.

Зазначимо, що станом на листопад 2022 р. 80% потужностей українських ВЕС і 30% СЕС окуповано та/або знищені росією [14]. Згідно із озвученими в Лугано планами (4–5 липня 2022 р.), український уряд розраховує на будівництво 5–10 ГВт сонячних та вітрових електростанцій до 2026 року.

2. Техніко-економічні та організаційні умови успішного розвитку сонячної генерації

Якщо Україна обрала шлях стимулювання виробництва електричної енергії з ВДЕ через «зелений» тариф, то Польща одразу обрала шлях використання аукціонів та інших механізмів стимулювання. Польща не використовує як стимулювання «зелений» тариф, а використовує аукціони, які більш подібні на аукціони «європейського зразка», коли держава не платить за всі обсяги виробленої електричної енергії, а лише за «премію». Це значно зменшує навантаження на державу та допомагає виробникам ВДЕ перейти з абсолютної підтримки держави до часткової підтримки, коли поступово виробники ВДЕ шукають ринки збуту самостійно. Ключем для успішного розвитку «зеленої» енергетики постали ринкові умови, які діють для виробників ВДЕ на тих самих засадах, що і для інших виробників електричної енергії. Приклад Польщі показує, що аукціони, які плануються в Україні, є менш ефективні.

Нові механізми підтримки української зеленої енергетики, які мали прийти на заміну «зеленому» тарифу, на кшталт зелених аукціонів та Net Metering, досі в процесі розробки [15]. В Україні ринок ВДЕ у 2022 р. зростав головним чином за рахунок домашніх та комерційних СЕС.

У 2022 р. ринок ВДЕ в Україні почав зростати поза межі «зеленого» тарифу, з'явилися нові бізнес-моделі. Почали активно розвиватись приватні договори купівлі-продажу електроенергії (Private Power Purchase Agreement, PPA) – модель, коли електростанція будується під власне споживання того чи іншого бізнесу. При цьому комерційна привабливість СЕС розглядається з двох причин. Перша – це бажання зменшити операційні витрати, адже вартість електроенергії збільшується по кілька разів на рік і буде планово зростати надалі. Друга причина пов'язана з Європейським Зеленим Курсом (European Green Course) та Механізмом трансграничного вуглецевого регулювання (Carbon Border Adjustments Mechanism, CBAM). Власне CBAM передбачає запровадження збору (мита) на товари, що ввозяться в країну від іноземних виробників (які мають менш жорсткі правила щодо викидів) з метою захисту своїх внутрішніх виробників та спонукати зовнішніх партнерів підвищити власні кліматичні амбіції і зменшити ризик витоку вуглецю. Оскільки у довоєнний час до 42% українського експорту припадало на ЄС, то введення механізму CBAM може призвести до скорочення ВВП України на 0,08% щороку у 2026–2030 роках.

Позитивні фактори, які вплинули на розвиток ВДЕ в Україні [12–15].

1. У березні 2022 р. енергосистеми України та Молдови повністю синхронізувались з енергомережею континентальної Європи ENTSO-E, що стало одним із важливих рішень, спрямованих проти країни-агресора та новим вікном можливостей для «зеленої» генерації.

2. Важливим рішенням, прийнятим під час війни, яке безпосередньо впливає на подальший розвиток ВДЕ в Україні, є затвердження Європейською Комісією в травні 2022 року плану REPowerEU, який визначив як пріоритетний розвиток ВДЕ.

3. Прийняття 15 лютого 2022 р. Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку систем накопичення енергії», який дає «зелене» світло масштабному будівництву систем накопичення і зберігання енергії в Україні, які вкрай важливі для такої негнучкої енергосистеми як українська.

4. Для підвищення ліквідності ринку ВДЕ в Україні у 2022 р. у виробників електроенергії з ВДЕ з'явилася можливість добровільно виходити з балансуєчої групи Гарантованого покупця і продавати електроенергію самостійно на різних сегментах ринку. Дане право було затверджене прийнятим 29 липня 2022 року Законом «Про особливості регулювання відносин на ринку природного газу та у сфері теплопостачання протягом дії воєнного стану та подальшого відновлення». Цей Закон відкрив шлях до розвитку ринку корпоративних РРА з ВДЕ, в першу чергу, для нових проєктів, оскільки надав можливість укладання договору на різницю між виробниками ВДЕ та покупцями електроенергії з відновлюваних джерел енергії.

Одне з найактуальніших питань для енергетичних компаній сьогодні – питання, як діяти у відповідь на суспільні, економічні та екологічні нові виклики, які формують сучасну галузь з точки зору участі кінцевих споживачів при керуванні ризиками, пов'язаними з енергетикою.

Так, у 2012 році економісти AGL Пол Сімшаузер та Тім Нельсон представили в австралійському енергетичному секторі концепцію «спіралі смерті» (Death Spiral) для електричних мереж, оскільки обсяги генерації сонячної енергії у домогосподарствах (дахових СЕС) та підвищення цін на електроенергію почали суттєво зменшувати попит на електроенергію з електромережі [16]. Чим більше клієнтів переходять на сонячну енергію та відключаються від централізованої мережі, тим швидше зростають ціни для інших клієнтів електромережі. Це призводить до зростання кількості клієнтів, які інвестують у сонячну енергію та у подальшому виходять з мережі, що призводить до пришвидшення підвищення цін для інших клієнтів. Як наслідок, така «спіраль смерті» для централізованих електромереж починає розкручуватися. У опитуванні в 2018 році лідерів енерговиробників США 71% вважають, що «спіраль смерті» є реальним і потенційним результатом, якщо не буде вжито жодних заходів.

Стимулювання розосередженої генерації в ЄС досить повно розглянуто в Четвертому енергетичному пакеті ЄС. Сучасний досвід функціонування розвинутих енергетичних ринків в ЄС вказує на те, що на ньому з'явилися цілковито нові гравці. Щодо використання ВДЕ, то ключовими директивами цього енергетичного пакета є:

– Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Директива (ЄС) 2018.2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року стосовно просування використання енергії з ВДЕ);

– Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity (Директива (ЄС) 2019/944 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року стосовно спільних правил внутрішнього ринку електроенергії).

Відповідно до положень цих директив, введено до застосування кілька нових моделей, що представляють поведінки ВДЕ на ринку (формують юридичне та організаційне підґрунтя):

1) **самоспоживачі електроенергії з ВДЕ (renewables self-consumers)** – кінцевий споживач, що працює в рамках свого місця розташування, розташованого у обмежених кордонах (або, якщо це дозволено державою-членом, в рамках інших місць розташування), що генерує електроенергію для власного споживання і хто може накопичувати або продавати самозгенеровану електроенергію з ВДЕ, за умови, що для самоспоживачів, що не є домогосподарствами, така діяльність не належить до його головної комерційної чи професійної діяльності;

2) **самоспоживачі електроенергії з ВДЕ, що діють спільно (jointly acting renewable self-consumers)** – спільно діючі самостійні споживачі відновлюваної енергії означає групу щонайменше двох спільно діючих самостійних споживачів відновлюваної енергії відповідно до функцій самоспоживачів електроенергії з ВДЕ, які розташовані в одному будинку або багатоквартирному будинку;

3) **ВДЕ-спільноти (renewable energy communities)** – юридична особа, котра: а) відповідно до застосовуваного національного законодавства, заснована на відкритій та вільній участі, є автономною та контролюється власниками акцій або членами, які знаходяться поряд з ВДЕ-проєктами, що є у власності або розвиваються такою юрособою; б) власниками їхніх часток або членами є фізичні особи, малий та середній бізнес або місцева влада, включно із муніципалітетами; с) їхньою первинною метою є надання економічних, екологічних або соціально-спільнотних благ своїм власникам часток / акцій або територіям, де вони працюють, радше ніж отримання фінансових доходів;

4) **енергетичні спільноти громадян (Citizen Energy Communities)** – юридичні особи, які: а) засновані на добровільній та відкритій участі та контролюються членами або акціонерами, до яких належать фізичні особи місцеві органи влади (включаючи муніципалітети) або малі підприємства; б) своєю головною ціллю радше ніж генерування фінансового прибутку вони мають надання вигод, пов'язаних із довкіллям, економічних або соціально-спільнотних вигод своїм членам або територіям, де вони працюють; с) можуть брати участь у генерації електроенергії (включно з ВДЕ), споживанні, агрегуванні, накопиченні енергії, сервісах з енергоефективності, зарядки електромобілів, або наданні інших енергетичних послуг своїм членам, або акціонерам;

5) **активні клієнти (active customers)** – кінцеві клієнти (або групу чи спільно діючих кінцевих клієнтів), який споживає або накопичує електроенергію, згенеровану на його території в рамках обмежених границь, або (де це дозволяється державою-членом) на інших територіях, або той клієнт, що продає самогенеровану електроенергію, або бере участь у схемах з забезпечення гнучкості або енергоефективності за умови того, що ця діяльність не є його основною комерційною чи професійною активністю.

Аналіз показав, що при підвищенні ефективності систем з СЕС важливого значення набуває планування та керування попитом в мережі набуває ефективне функціонування енергетичних інтелектуальних спільнот (Energy Smart Community, ESC), діяльність яких базується на використанні наведених моделей.

Використання різних типів ВДЕ та механізмів керування попитом споживачів перекриває попит – сторона керування (Demand-Side Management, DSM) в середовищі ESC, заснованому на технічних положеннях щодо Microgrid або Virtual Power Plant (VPP) [17]. Вони в основному зосереджені на оптимальному плануванні завантаження окремих груп споживачів щодо зміни тарифів протягом незначних відрізків часу (хвилини) та з урахуванням активності споживачів [18, 19]. Перекваліфікація споживачів електроенергії на модельних споживачих агентів при застосуванні ВДЕ диктує необхідність перегляду підходів до керування енергетичним сектором: переорієнтація з Supply Chain Management – концепції, орієнтованої на керування витратами компаній-виробників, до концепції Demand Chain Management – концепції, в якій безпосередньо споживачі мають співтворчу цінність. В електроенергетиці основою такої трансформації є формування орієнтованої на споживача моделі ринку електроенергії, що базується на інтеграції споживачів та просувань в організаційно-економічну систему відносин [20, 21].

Залучення та мотивація активних споживачів, таких як prosumer (Prosumer: «PROfessional» and «conSUMER» or PROducers + conSUMERS) і prosumage (PROducers + conSUMers + storAGE) є ключовими складовими для створення ESC. Це пріоритет на шляху до створення енергонезалежних енергетичних інтелектуальних спільнот [22 – 24].

Поява Prosumer Side Management (PSM) частково дублюється DSM, але відрізняється більш гнучкими можливостями для налаштування, встановлених у мінливих мережевих умовах. PSM керує мікроінтелектуальними мережами на набагато складнішому, мінливому та енергетичному ринку в режимі реального часу, системами керування та менеджерами, довіреними Smart Agents (SA). SA забезпечує функції контролю споживання електроенергії, керування та планування енерго- та господарської діяльності. У ролі SA можуть виступати як споживачі трьох типів, так і посередницькі компанії або керуючі компанії [25, 26].

PSM взаємодіє з енергопостачальною компанією на основі договору про партнерство та інтегрує як звичайних споживачів, так і активних споживачів, консультуючи щодо енергоефективності фізичну особу або об'єкт цього енергетичного об'єднання. Система Smart Metering дозволяє точно контролювати обсяг споживання та вироблення електроенергії. DSM та PSM повинні врахувати наявність приватних джерел розосередженої генерації та систем накопичення енергії (Energy Storage System, ESS), з обмеженою генерацією та накопиченням електроенергії через обмежене прогнозування погоди. Тому доцільно пов'язати роботу ESC з поточними децентралізованими енергосистемами Microgrid та Virtual Power Plant (VPP).

Функціональні умови застосування ESS в електроенергетичній системі спільно з ВДЕ та на стороні споживача наведено в табл. 2.

3. Базові складові ефективного функціонування електроенергетичних систем з СЕС Концепції конфігурації фотоелектричної системи

Більшість вимог, які висуваються до фотоелектричних систем (СЕС), реалізуються системами силової електроніки, тобто фотоелектричними інверторами [27]. На відміну від технологій вітроенергетики, СЕС виробляє набагато меншу потужність на 1 кВт встановленої потужності чи генеруючу одиницю (наприклад, окрему фотоелектричну панель або фотоелектричний стрінг). Тому СЕС зазвичай складається з багатьох панелей, з'єднаних паралельно та / або послідовно для отримання вихідної потужності в межах прийняттого діапазону. Згідно з сучасним розвитком технологій побудови СЕС, існує в основному чотири концепції (способи) організації та доставки фотоелектричної енергії до електричної мережі (локальної чи централізованої) [27]. На рис. 1 показано еволюцію структури СЕС залежно від сфери застосування та встановленої потужності.

Кожна із концепцій передбачає з'єднання серії фотоелектричних панелей або стрінгів та пари пристроїв силової електроніки (перетворювачів постійного струму та інверторів), які налаштовані з урахуванням особливостей функціонування різних структурних (схемотехнічних) рішень [27]. Залежно від рівня вихідної напруги стрінговим і багатострінговим (рядковим і багаторядковим) інверторам може знадобитися підвищуючий перетворювач.

Наведемо коротку характеристику особливостей побудови фотоелектричних інверторних структур.

Таблиця 2 – Функціональні умови застосування ESS в електроенергетичній системі спільно з ВДЕ та на стороні споживача

Призначення	Потужність	Розряд, термін роботи	Режими роботи
1. Накопичувач для застосування спільно з ВДЕ			
1) Підтримка лінійної зміни потужності СЕС	до декількох МВт	від 1 с до 20 хв.	згладжування різких коливань потужності, які можуть виникати в енергосистемах з високим рівнем поширення СЕС
2) Підтримка лінійної зміни потужності вітроелектростанцій	1–100 МВт	2–15 хв.; 10 тис. повних циклів	регулювання змінної вироблення ВЕС, для забезпечення необхідного рівня швидкості лінійного зміни потужності (МВт/хв.); забезпечення підтримки змін навантаження для мережі в цілому; підтримка напруги локальної системи передачі і розподілу; забезпечення регулювання частоти; забезпечення виконання ВЕС вимог по усталеній роботі при зниженні напруги в мережі (LVRT)
3) Перемикання навантаження або джерел живлення	від кВт до декількох сотень МВт	від 2 до 10 год.	накопичення енергії, що генерується в період провалу навантаження, щоб обслуговувати навантаження під час максимального споживання потужності; участь на ринках потужності в якості диспетчеризованої енергії і резерву; накопичення для надання послуг із забезпечення системної надійності
2. На боці споживача			
1) Накопичувач енергії в комерційних / промислових приміщеннях споживачів	від 10 кВт до декількох МВт	2–4 год.	обмеження навантаження; арбітраж електричної енергії; реагування на сигнали ціноутворення в режимі реального часу; керування енергопостачальною компанією в надзвичайних ситуаціях чи при необхідності; резервна потужність; спільна участь у накопиченні енергії для надання послуг із забезпечення системної надійності; швидкий заряд постійним струмом і накопичення енергії транспортного засобу; підтримка генерації (гібридні системи); підтримка керування споживанням / попитом
2) Накопичувач енергії для житлових приміщеннях споживачів	1–10 кВт	2–4 год.	реагування на сигнали ціноутворення в режимі реального часу; керування енергопостачальною компанією в надзвичайних ситуаціях або у разі необхідності; часове зрушення енергії з ВДЕ і вирівнювання графіків електроенергії; резервна потужність; спільна участь у накопиченні енергії для надання допоміжних послуг; швидкий заряд постійним струмом і накопичення енергії транспортного засобу; підтримка генерації на місці (гібридні системи); підтримка механізмів DSM

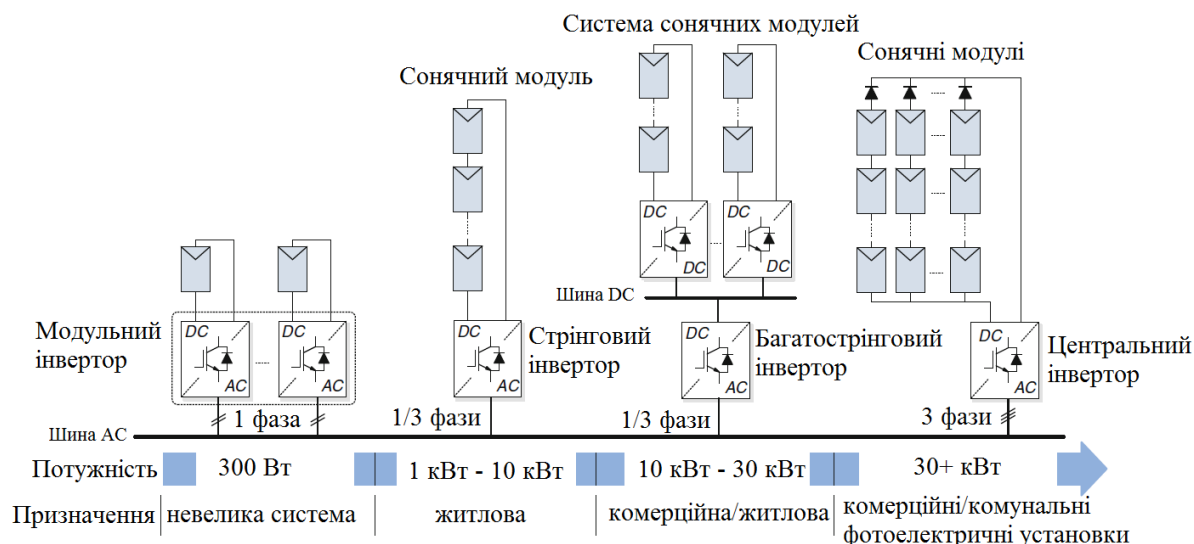


Рисунок 1 – Різні типи фотоелектричних інверторних структур, підключені до мережі: *a* – невелика система; *b* – житлова; *c* – комерційна / житлова; *d* – комерційні/комунальні фотоелектричні установки

Концепція 1. Центральний інвертор

Для цієї концепції інвертора фотоелектричні панелі розташовані в паралельних рядах і підключені до одного загального центрального інвертора, як показано на рис. 1*d*. Центральний інвертор, як правило, трифазний, є найпоширенішою альтернативою для великомасштабних або комунальних фотоелектричних електростанцій, які мають високу потужність (наприклад, центральний інвертор SMA потужністю 750 кВт [28]). Такі інвертори повинні бути оснащені допоміжними сервісними функціями, такими як перевірка несправності та введення реактивної потужності через високу номінальну потужність.

Застосування центрального інвертора є найпростішим способом побудови великої фотоелектричної установки з низькою вартістю будівництва. Однак недоліки цієї конфігурації також є суттєвими [29]:

- потреба у високій напрузі ланцюга постійного струму (550–850 В) і дуже довгих кабелів постійного струму між фотоелектричними лініями та центральним інвертором;
- втрати потужності через загальний Maximum power point tracking (MPPT), що подається на центральний інвертор;
- втрата потужності через невідповідність модулів;
- втрати в стрінгових діодах (блок-діоди);
- надійність всієї системи залежить тільки від одного інвертора.

Оскільки потужність СЕС продовжує зростати, то при цьому застосовуються різні інверторні топології для роботи з фотоелектричними системами високої потужності та високої напруги. Дворівневі інвертори джерела напруги на даний момент є найбільш оптимальним рішенням для центральних інверторів великих фотоелектричних установок. Інші багаторівневі інвертори, такі як трифазні тривірневі інвертори з нейтральною точкою, які зазвичай використовуються у вітроенергетичних системах, також можуть використовуватися на великих СЕС.

Концепція 2. Стрінговий (рядний) інвертор

Концепція стрінгового інвертора (див. рис. 1*b*) вперше була представлена на європейському ринку в 1995 році [29]. Вона заснована на модульній побудові, де фотоелектричні стрінги складаються з послідовно з'єднаних фотоелектричних панелей і підключаються до окремих стрінгових інверторів (одно- або трифазних). Потім стрінгові інвертори з'єднуються паралельно та підключаються до електричної мережі. Якщо напруга на клемі фотоелектричного ланцюга є достатньо високою, то підвищення напруги не потрібне і можна досягти покращення загальної ефективності системи.

У цій концепції побудови СЕС можна використовувати меншу кількість фотоелектричних панелей для кожного ланцюга, однак тоді в якості підвищуючого ступеня потрібно застосовувати підвищувальний перетворювач DC-DC, перетворювач на основі високочастотного трансформатора DC-AC-DC або мережевий частотний трансформатор. Переваги такого підходу, у порівнянні з використанням центрального інвертора, наступні [29]:

- відсутність втрат у стрінгових діодах (діоди не потрібні);
- індивідуальний MPPT для кожного стрінга;
- вищий рівень генеруючої потужності завдяки окремим MPPT;
- нижча ціна за рахунок масового виробництва.

Залежно від стандартів підключення до мережі, у цій концепції трансформатор може бути видалений для подальшого підвищення ефективності в деяких країнах (Німеччина та Іспанія), де гальванічна розв'язка не потрібна. Це робить стрінговий інвертор безтрансформаторною системою, і тому потрібна спеціальна конструкція безтрансформаторних інверторів pf схем модуляції, щоб усунути струми витоку на землю через паразитну ємність між фотоелектричними панелями [30–32].

Концепція 3. Багатострінговий (багаторядний) інвертор

Багаторядні інвертори є проміжним рішенням між стрінговими інверторами та центральними інверторами. Багатострінговий інвертор, представлений на рис. 1с, поєднує в собі переваги як стрінгових інверторів (високе виробництво енергії завдяки індивідуальному керуванню MPPT), так і центральних інверторів (низька вартість), завдяки наявності багатьох перетворювачів DC–DC з окремими MPPT, які подають енергію в звичайний інвертор DC–AC. Таким чином, незалежно від номінальних даних, розміру ланцюга, технології фотоелектричного модуля (наприклад, кристалічний або тонкоплівковий), орієнтації, кута нахилу або погодних умов (наприклад, часткове затінення) різних фотоелектричних стрінгів, їх можна підключити до однієї загальної мережі [29, 33].

Багатострінгова концепція є гнучким рішенням, яке має високу загальну ефективність генерації електроенергії завдяки тому, що кожна фотоелектрична ланка контролюється індивідуально. Основною особливістю багатострінгового інвертора є кілька каскадів DC–DC, підключених паралельно до ланцюга постійного струму. Таким чином, безтрансформаторна фотоелектрична інверторна технологія також може бути використана в багатострінгових інверторних системах.

Концепція 4. Модульний інвертор

Модуль змінного струму складається з окремої сонячної панелі, підключеної до мережі через власний інвертор, як показано на рис. 1а. Перевага цієї конфігурації полягає в тому, що відсутні втрати, пов'язані з неузгодженістю роботи окремих елементів. Це відбувається завдяки тому, що кожна окрема сонячна панель має власний інвертор і керування MPPT, максимізуючи таким чином виробництво електроенергії. Процес відбору потужності оптимізовано набагато краще, ніж у випадку стрінгових інверторів. Ще однією перевагою цієї концепції є модульна структура, яка спрощує модифікацію та технічне обслуговування всієї системи завдяки її характеристикам «підключи та працюй» («plug and play») [29]. Через низьку потужність фотоелектричних модулів для підключення до мережі потрібні блоки посилення напруги великої напруги, що ускладнює досягнення високої ефективності всієї системи.

Необхідно зазначити, що у багатьох випадках стрінгові інвертори можуть фактично зменшити загальні капітальні витрати завдяки лише їх меншому розміру порівняно з центральними інверторами [34, 35]. Менший «будівельний блок» дозволяє точніше визначити розмір проекту порівняно з центральним інвертором. Центральні інвертори бувають класів потужності до кількох МВт, причому часто найменший інвертор має потужність 2 МВт або вище. Стрінгові акумуляторні інвертори не потребують технічного обслуговування, і якщо вони вимикаються, значно менший відсоток загальної генерованої потужності стає недоступним.

Використання високоефективного інвертора є ще важливим фактором у системах акумулювання енергії. Це пов'язано з тим, що енергія повинна проходити через інвертор двічі – один раз, щоб зарядити акумулятор, і другий раз, коли акумулятор розряджений. Наявність системи накопичення енергії зі стрінговими інверторами під час змінних умов навантаження дозволяє або розподілити навантаження між усіма інверторами, або відключити кілька інверторів, щоб знайти найбільш ефективну робочу точку.

Для стрінгових інверторів важливе значення набуває процес «формування виходу» (Shaping Output), тобто процес контролю форми (амплітуди, частоти, фази тощо) вихідного електричного сигналу. Застосування різних методів для контролю Shaping Output дозволяє вирішувати різноманітні задачі, наприклад, підвищення якості сигналу, підвищення швидкості передачі даних, зменшення електромагнітних завад, розширення діапазону частот та інші.

Якщо до переваг використання стрінгових інверторів можна віднести простоту обслуговування та усунення несправностей, надійність технології та менші витрати, то недоліками стрінгових інверторів є єдина точка відмови (якщо інвертор виходить з ладу, вся сонячна батарея буде непрацездатною).

Smart-інвертори

Традиційно фотоелектричні інвертори до недавнього часу проектувалися для подачі стільки активної потужності P (кВт), скільки було доступно від сонячної батареї з одиничним коефіцієнтом потужності в точку загального зв'язку (Point of Common Communication, PCC) [36]. Нещодавно енергорозподільні підприємства та незалежні постачальники електроенергії виявили величезний інтерес до здатності трифазного інвертора також поглинати та передавати реактивну потужність Q (кВАр) з електричної мережі та до неї.

Межі реактивної потужності інтелектуального фотоелектричного інвертора можна використовувати як швидкодіючий статичний VAR (вольт-ампер-реактивний) компенсатор, керований або через систему диспетчерського керування та збору даних (SCADA), або як автономний регулятор напруги та діючи як шунтована котушка індуктивності або конденсатор, зменшуючи або збільшуючи

напругу змінного струму вздовж лінії [36, 37]. Великою перевагою цієї реалізації є те, що вона передбачає дуже невелику вартість додаткових компонентів. У США у 2010 році поряд із лініями електропередачі були запущені перші великі фотоелектричні системи, підключені через спеціальні колекторні підстанції, що забезпечували підтримку статичної напруги відповідно до графіка напруги, наданого комунальним підприємством.

Здатність інтелектуального фотоелектричного інвертора подавати реактивну потужність до лінії також можна використовувати для відновлення мережі після віддаленої несправності, яка спричиняє миттєве падіння напруги в мережі. Під час перехідного процесу низької напруги інтелектуальний фотоелектричний інвертор переходить у режим підвищення реактивної потужності, щоб підтримувати напругу в мережі до усунення несправності. Сьогодні такі інвертори, які в подальшому отримали назву Smart-інверторів, використовуються для коригування коефіцієнта потужності, забезпечуючи VAR поблизу місця, де вони використовуються, а не імпортують їх здалеку.

Smart-інвертор означає пристрій, який перетворює постійний струм DC у змінний струм AC, відповідає стандартам обладнання IEEE 1547-2018 та може автономно сприяти підтримці мережі під час відхилень від нормальної робочої напруги та частоти, забезпечуючи кожну з наступних дій: динамічна підтримка реактивної та реальної потужності, перемикання напруги та частоти, контроль швидкості наростання, системи зв'язку з можливістю приймати зовнішні команди та інші функції від електромережі [37–39].

Smart-інвертори можуть автономно сприяти підтримці мережі під час відхилень від умов нормальної робочої напруги та частоти, забезпечуючи кожну з наступних функцій [39]:

- динамічну підтримку реактивної та реальної потужності;
- перемикання напруги та частоти;
- керування швидкістю зміни;
- системи зв'язку з можливістю приймати зовнішні команди;
- та інші функції від електричної служби.

Smart-інвертори є новою технологією, яка може допомогти інтегрувати сонячну енергію та інші розосереджені енергетичні ресурси, у першу чергу СЕС, в електричну мережу. Подібно до традиційних інверторів, Smart-інвертори перетворюють постійний вихідний струм сонячних панелей у змінний струм, який можна використовувати споживачам у своїх будинках і на підприємствах. Ці інвертори виходять за рамки цієї базової функції, щоб забезпечити функції підтримки мережі, такі як регулювання напруги, підтримка частоти та можливості проходження. Отже, Smart-інвертор означає інвертор, здатний підвищувати надійність роботи мережі шляхом автономного сприяння підтримці мережі під час відхилень від умов нормальної робочої напруги та частоти системи; забезпечувати динамічну вольт-амперної підтримку реактивної / активної потужності, напруги та частоти, керування швидкістю зміни; прийняття зовнішніх команд та інших функцій. Smart-інвертори розробляються з метою допомогти мережі справлятися з переривчастою генерацією [37–39]. Вони зможуть допомогти мережі залишатися стабільною та мати правильну напругу та частоту.

Технологія Smart-інвертора – це новий підхід до керування інтеграцією фотоелектричних систем в електричну мережу. Він має на меті змінити роль фотоелектричної системи з пасивного постачальника електроенергії на активного учасника роботи електричної мережі. Для Smart-інвертора можна розбити на три етапи розвитку, кожен з яких має власний набір функцій:

1. Традиційний: у традиційному підході фотоелектричні системи відігравали пасивну роль у роботі електричної мережі. Вони подавали б лише активну потужність, працювали з одиничним коефіцієнтом потужності та швидко відключалися у випадку перевищення/заниження напруги/частоти у певному діапазоні. Основним занепокоєнням була боротьба з режимом «островкування», який означає, що система «відключатиметься за перших ознак проблеми».

2. Початкові кроки до реальної інтеграції: другий етап розробки включав фотоелектричні системи, які реагували на параметри системи. Це означає, що фотоелектричні системи можуть активно сприяти стабільності електричної мережі, зменшуючи активну потужність у разі надлишкової частоти, забезпечуючи можливість наскрізного відключення (Low Voltage Ride Through, LVRT) для більших блоків і забезпечуючи реактивну потужність для обмеження підвищення напруги. У критичних ситуаціях, наприклад, під час високого попиту, подачу активної потужності можна обмежити.

3. Широке застосування: остання стадія розробки включає фотоелектричні системи, які активно підтримують роботу електричної мережі. Це включає дистанційне керування заданими значеннями для активної та реактивної потужності, передачу поточного виробництва та графіку, а також інтеграцію в роботу інтелектуальної мережі. На цьому етапі фотоелектричні системи можна використовувати для балансування електричної мережі, забезпечуючи стабільне постачання електроенергії для задоволення наявного попиту.

На рис. 2 продемонстрована роль PV систем у роботі електричної мережі: система активно підтримує роботу системи (EPIA, based on SMA analysis, 2012).

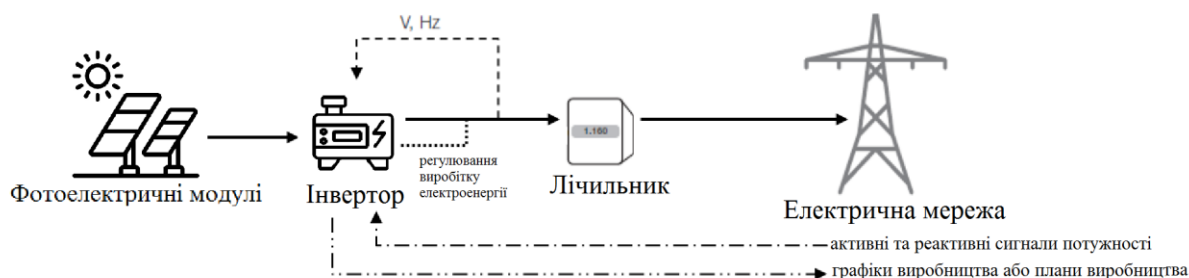


Рисунок 2 – Роль PV систем у роботі мережі – система активно підтримує роботу системи

При високому рівні проникнення фотовольтаїчних систем в електричну мережу такі системи можуть активно підтримувати роботу мережі. Це означає, що вони можуть надавати додаткові послуги для електромережі, крім простого виробництва електроенергії. Фотоелектричні системи можуть забезпечувати дистанційне керування заданими значеннями для активної та реактивної потужності, що дозволяє їм регулювати вихідну потужність відповідно до потреб електричної мережі. Вони також можуть повідомляти про своє поточне виробництво та графік в електромережу, дозволяючи мережі керувати інтеграцією фотовольтаїчної енергії в систему. Як наслідок, фотоелектричні системи можна інтегрувати в роботу Smart Grid, щоб забезпечити додаткову гнучкість і стійкість виділеної електроенергетичної системи. Вони також можуть використовуватися для надання допоміжних послуг, таких як регулювання частоти та контроль напруги, що ще більше підвищує надійність і стабільність електричної мережі.

Системи накопичення енергії (ESS)

У будь-якій фотоелектричній системі з акумуляторами батареї стають центральним компонентом загальної системи, що суттєво впливає на вартість, вимоги до обслуговування, надійність і дизайн СЕС. Важливими параметрами акумулятора, які впливають на роботу та продуктивність фотоелектричної системи, є вимоги щодо обслуговування акумулятора, термін служби акумулятора, доступна потужність і ефективність [40, 41]. На сьогодні виділяють наступні переваги поєднання акумуляування та сонячної енергії: балансування електричних навантажень; «зміцнення» («firming») сонячної генерації (короткострокове зберігання може гарантувати, що швидкі зміни генерації не сильно вплинуть на потужність СЕС); забезпечення стійкості системи.

Система накопичення енергії, яка найбільше цікавить виробників сонячної фотоелектричної енергії, – це система накопичення енергії в батареях (Battery Energy Storage System, BESS), яка потребує як керування, так і контролю [42]. До основних характеристик BESS можемо віднести: номінальну потужність; номінальну енергоємність; глибину розряду (Depth of Discharge, DOD); тривалість зберігання; життєвий цикл; стан заряду (State of Charge, SOC); двосторонню ефективність (двосторонній ККД – відсоток електроенергії, що поміщається в накопичувач, який пізніше повертається); термін експлуатації; моніторинг і контроль безпеки.

Типовий BESS включає:

- акумуляторні модулі – з'єднані послідовно та паралельно для необхідної ємності;
- корпус для зберігання з термоконтролем;
- система перетворення електроживлення (Power Conversion System, PCS) – усі кластери з акумуляторної системи підключені до загальної шини постійного струму, а подальша шина постійного струму розширена до PCS;
- система керування батареєю (Battery Management System, BMS), яка постійно контролює напругу, температуру, попередження про пожежу та стан заряду (SOC) батареї. Система регулює потужність заряджання та розряджання залежно від вхідного сигналу;
- система енергоменеджменту (Energy Management System, EMS) – логіка керування виконується в EMS. Вона забезпечує вхідний сигнал до PCS для заряду/розряду залежно від вимог логіки керування.

Системи BESS технічно надають суттєві переваги мережі: використання в системах реагування на надзвичайні ситуації або при збоях; регулювання частоти; стабільність мережі; зменшення перевантаження мережі; контроль швидкості зміни; енергетичний арбітраж; зниження піку; чорний старт (Black Start) – забезпечує швидку енергію або стабілізуючу енергію для запуску мережі з хорошою швидкістю відгуку. Фактично BESS допомагають забезпечити стабільне та безперебійне постачання енергії.

На сьогодні існують різні типи батарей, кожна з яких має різні хімічні властивості, життєвий цикл, робочу температуру, щільність накопиченої енергії та параметри щільності потужності, зокрема: свинцево-кислотні (PbA), нікель-металгідридні (NiMH), нікель-кадієві (NiCd), літій-іонні (Li-ion), натрієво-сірчані (NaS), цинк-бромні, вуглець-цинкові.

Тренди на ринку передових систем зберігання енергії для СЕС на наступне десятиліття [43]:

– розвиток твердотільних акумуляторів, які стають багатообіцяючою альтернативою літій-іонним акумуляторам, оскільки вони пропонують високу щільність енергії, підвищену безпеку та довший термін служби;

– підвищений попит на мікромережі (Microgrid), які стають популярними завдяки своїй здатності забезпечувати локальне виробництво та зберігання електроенергії, тим самим зменшуючи залежність від централізованих електромереж;

– зростаючий інтерес до акумуляторів Redox Flow, які пропонують тривалий термін служби та можливість масштабування;

– розширення бізнес-моделей «Енергія як послуга» (Energy as a Service), які набувають популярності, оскільки вони дають клієнтам доступ до рішень для зберігання енергії без попередніх витрат.

Динаміка ринку передової системи зберігання енергії обумовлена наступними факторами:

– зростаючий попит на відновлювану енергію;

– перехід до децентралізованого виробництва електроенергії;

– потреба в стабільності мережі, особливо в регіонах з переривчастими джерелами енергії, що стимулює попит на передові системи зберігання енергії для підтримки балансу між попитом і пропозицією енергії;

– розробка систем керування батареями, у першу чергу для оптимізації продуктивності батареї, підвищення безпеки та продовження терміну служби батареї.

Формування віртуальних електростанцій (VPP) на основі СЕС

Сьогодні VPP – це мережа розосереджених енергетичних ресурсів, які дистанційно підключені та працюють як одне ціле, а також гнучкі споживачі електроенергії та батареї [44, 45]. Технологія використовує розширену аналітику, комунікацію та контроль для агрегування, моніторингу та балансування попиту та постачання енергії для взаємопов'язаних активів. Роль VPP полягає в забезпеченні стабільного потоку енергії та надійності системи при мінімізації витрат і викидів.

VPP зазвичай складаються з відновлюваних і невідновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер, природний газ або накопичувачі [44, 45]. Ці джерела з'єднані через низку датчиків, лічильників і комунікаційних технологій із хмарною платформою, яка з'єднує розподілені енергетичні ресурси та надає дані в реальному часі. Використовуючи передові технології, VPP можуть створити більш гнучку та ефективну енергетичну систему, яка дозволяє краще інтегрувати ВДЕ та зменшити викиди і мінімізувати витрати.

Основна мета VPP – максимізувати вигоди учасників, щоб скористатися перевагами більшої ємності на енергетичних ринках [46]. CVPP (комерційний VPP) та TVPP (технічний VPP) – два популярні типи роботи VPP. CVPP фокусується на прибутковому агенті, який оптимізує свій робочий графік на основі оптових ринків. TVPP реалізує їх з урахуванням обмежень локальної електроенергетичної мережі. З точки зору моделювання, VPP зазвичай включає керовані електростанції, блоки зберігання і некеровані блоки генерації, такі як вітряні турбіни і фотоелектричні установки. Крім переваг від цих ВДЕ, обсяги виробництва енергії за своєю суттю залежать від стохастичної поведінки природи, такої як хмари та сонячне випромінювання, що спричиняє відповідні витрати на дисбаланс для системних операторів. Щоб зменшити вплив цих дисбалансів, різні типи відновлюваних та невідновлюваних генераторів та пристроїв зберігання об'єднуються в одну VPP.

Використання VPP надає можливість максимізувати використання ВДЕ в мікромережах при одночасному зниженні експлуатаційних витрат і викидів, приділяючи особливу увагу стабільності мережі. Для VPP головною функцією є об'єднання генерації та керування ними, щоб досягти рівноваги максимально ефективним способом, і дана функція виконується незалежно від того, яка потужність встановлена на певному об'єкті. VPP керується віддалено через відповідну EMS, яка отримує дані про стан електростанції та відправляє певні сигнали для керування ними [46].

Одним із найскладніших завдань є інтеграція VPP в існуючу енергетичну інфраструктуру. VPP призначені для заміни традиційних централізованих моделей виробництва електроенергії, що потребує суттєвих змін у існуючій енергетичній інфраструктурі та ставить перед комунальними підприємствами та операторами мереж проблеми з адаптацією до нової технології. Оскільки VPP покладаються на мережу децентралізованих енергетичних ресурсів, вони вразливі до загроз кібербезпеці або збоїв.

Отже, VPP – це хмарний центральний або розподілений центр керування, який використовує переваги інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) і пристроїв Інтернету речей (IoT) для агрегування потужності гетерогенних розосереджених енергетичних ресурсів (Distributed Energy Resources, DER), включаючи різні типи диспетчеризовані та недиспетчеризовані блоки розосередженої генерації (DG) (наприклад, ТЕЦ, поршневі двигуни, що працюють на природному газі, малі ВЕС, фотоелектричні (PV), руслові гідроелектростанції, біомаса тощо), системи накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS) і кероване або гнучке навантаження (Controllable or Flexible Loads, CL або FL) і утворюють коаліцію різномірних DER з метою торгівлі енергією на оптових ринках електроенергії та/або

надання допоміжних послуг для системних операторів від імені не - прийнятні індивідуальні DER.

Сьогодні VPP на основі СЕС розглядається як розподілена хмарна система-агрегатор, що об'єднує та перерозподіляє електроенергію різних джерел та виробників з виділенням двох поколінь VPP [47]:

1) проста VPP 1.0, що поєднує розосереджені генератори і зазвичай не може оптимально використовувати їх потужності, не враховує втрати в мережі в режимі реального часу;

2) більш досконала модель VPP 2.0, яка дозволяє керувати енергосистемою з великою кількістю розосереджених генераторів, де мережа керується координуючими алгоритмами, які враховують зміни в цінових сигналах як за місцем, так і за часом (за допомогою динамічних мультиагентних систем керування, що самоорганізуються).

Проста VPP, що поєднує розосереджених генераторів, зазвичай не може оптимально використовувати їх потужності. Вона не враховує втрати в мережі в режимі реального часу, не розглядає мережеві технічні обмеження струму та напруги, не вміє враховувати потреби домашніх господарств та не відгукується на цінові сигнали часу та місця. Досконаліша модель VPP 2.0 забезпечує балансування попиту та пропозиції потужностей за допомогою ринкового підходу [47].

Спосіб формування керованої агрегації та керування агрегацією електричних навантажень та / або джерел електричної потужності містить етапи, на яких для ієрархічного агрегованого керування об'єктами, відповідно до встановленої конфігурації, формується агрегація керована за параметрами електроспоживання в ієрархічному порядку. При цьому один з керованих об'єктів, який входить в керовану агрегацію, призначається вузлом координації, що забезпечує формування команд керування передачі нижчим по ієрархії керованим об'єктам як реального часу, виходячи з даних моніторингу регульованих параметрів централізованої електричної мережі та ресурсів керування підлеглих керованих об'єктів.

Як наслідок, моделі функціонування VPP можна розділити на такі види [46]:

1. Модель агрегатора: на ринку створено незалежну енергосервісну організацію (агрегатор), яка є оператором VPP. Агрегатори підключають споживачів до своїх VPP і сплачують учасникам за участь у так званій програмі управління споживанням, виходячи з умов системних операторів на конкретному ринку.

2. Традиційна модель / модель енергопостачальної компанії: компанія, що працює на ринку електроенергії (наприклад, енергопостачальна компанія), створює мережу, яка контролює різні об'єкти розосередженої генерації електроенергії та гнучкі можливості користувачів з виробництва електроенергії.

3. Клієнтоорієнтована модель. Споживачі встановлюють технологію VPP, щоб задовольнити власні потреби. У цьому випадку VPP використовується для контролю та керування власним споживанням.

Хоча частка відновлюваної енергії продовжує зростати, фотоелектрична індустрія стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема як продовжувати знижувати нормовану вартість енергії (LCOE), що є мірою середньої чистої поточної вартості виробництва електроенергії для генератора протягом усього терміну служби, а також як покращити ефективність експлуатації та обслуговування, як підтримувати стабільність електромережі, оскільки надходить більше відновлюваної енергії, і як забезпечити безпеку системи від кінця до кінця. Згідно досліджень компанії Huawei, на тлі швидкого зростання фотоелектричної індустрії ці виклики також створюють можливості та тенденції розвитку [48].

Тенденція 1: PV+ESS генератор

Оскільки в електромережі надходить все більше відновлюваної енергії, виникають різні складні технічні проблеми щодо стабільності системи, балансу електроенергії та якості електроенергії. Необхідним постає новий режим керування, щоб збільшити контроль активної / реактивної потужності та здатність реагувати, а також активно «пом'якшувати» коливання частоти та напруги. Завдяки інтеграції PV та ESS, а також технології «формування мережі» (Grid Forming), ми можемо створювати «Smart PV+ESS генератори», які використовують керування джерелом напруги замість керування джерелом струму, забезпечують сильну підтримку інерції, перехідну стабілізацію напруги та аварійне керування. можливості. Це забезпечить формування мережі, яка сприятиме збільшенню подачі фотоелектричної енергії.

Тенденція 2: висока щільність і надійність

Висока потужність і надійність обладнання фотоелектричних установок буде трендом. На сьогодні напруга постійного струму інверторів збільшена з 1100 В до 1500 В. Із застосуванням нових матеріалів, таких як карбід кремнію (SiC) і нітрид галію (GaN), а також повна інтеграція цифрових технологій, силової електроніки та технологій керування температурою, за оцінками, щільність потужності інверторів зросте приблизно на 50 % протягом наступних п'яти років із збереженням високої надійності.

Тенденція 3: силова електроніка модульного рівня (Modular Level Power Electronics, MLPE)

Важливим є вирішення проблем покращення використання ресурсів на даху, забезпечення високого виходу енергії та забезпечення безпеки системи PV+ESS. Тому більш деталізоване керування є обов'язковим. У фотоелектричній системі силова електроніка на рівні модуля MLPE відноситься до силового електронного обладнання, яке може здійснювати точне керування одним або кількома

фотоелектричними модулями, включаючи мікроінвертори, пристрої оптимізації потужності та роз'єднувачі. MLPE забезпечує унікальні переваги, такі як генерація електроенергії на рівні модуля, моніторинг і безпечне завершення роботи. Оскільки фотоелектричні системи стають безпечнішими та інтелектуальнішими, то очікується, що до 2027 року рівень проникнення MLPE на ринку розосереджених фотоелектричних пристроїв досягне 20–30 %.

Тренд 4: зберігання енергії на рівні стрінгів

У порівнянні з традиційними централізованими рішеннями ESS, рішення компанії Huawei під назвою «Smart String ESS» використовує розподілену архітектуру та модульний дизайн. Це рішення використовує інноваційні технології та цифрове інтелектуальне керування для оптимізації енергії на рівні акумуляторної батареї та контролю енергії на рівні стійки. Це призводить до більшої енергії розряду, оптимальних інвестицій, простої експлуатації та технічного обслуговування, а також безпеки та надійності протягом усього життєвого циклу ESS.

У 2022 році в проєкті ESS 200 МВт/200 МВт·год у Сінгапурі з метою регулювання частоти та обортового резерву, найбільшому проєкті BESS у Південно-Східній Азії, Smart String ESS реалізує вдосконалене керування зарядом і розрядом для досягнення постійної вихідної потужності протягом тривалого часу і забезпечує переваги регулювання частоти. При цьому функція автоматичного калібрування SOC на рівні акумуляторної батареї знижує витрати на оплату праці та значно підвищує ефективність експлуатації та технічного обслуговування.

Тренд 5: вдосконалене керування на рівні ланки

Подібно до фотоелектричних систем, які переходять на MLPE, літєві BESS мають розвиватися до меншого рівня керування. Лише вдосконалене керування на рівні елементів батареї може краще впоратися з проблемами ефективності та безпеки. Наразі традиційна система керування батареями (BMS) може лише узагальнювати та аналізувати обмежені дані, і майже неможливо виявити несправності та створити попередження на ранній стадії. Тому BMS має бути більш чутливою, інтелектуальною і навіть передбачуваною, що залежить від збору, обчислення та обробки великої кількості даних, а також технологій штучного інтелекту для пошуку оптимального режиму роботи та складання прогнозів.

Тренд 6: інтеграція PV+ESS+Grid

Необхідно відзначити все більше практик побудови чистих енергетичних баз PV+ESS, які постачають електроенергію до центрів навантаження через лінії електропередачі надвисокого навантаження. Що стосується енергоспоживання, VPP стають все більш популярними в багатьох країнах. VPP поєднують масивні розосереджені фотоелектричні системи, ESS і контрольоване навантаження, а також реалізують гнучке планування для блоків генерації електроенергії та накопичувачів для досягнення пікового навантаження тощо.

Побудова стабільної енергетичної системи, яка об'єднує PV+ESS+Grid для підтримки фотоелектричного електропостачання та підключення до мережі, стане ключовим заходом для забезпечення енергетичної безпеки. Доцільно інтегрувати цифрові технології, енергетичну електроніку та технології накопичення енергії. VPP можуть інтелектуально керувати, експлуатувати та обмінювати потужністю масивних розподілених систем PV+ESS за допомогою багатьох технологій, включаючи 5G, штучний інтелект та хмарні технології, які будуть застосовуватися в багатьох країнах.

Тренд 7: покращена безпека

Безпека вимагає від нас систематичного розгляду всіх сценаріїв і зв'язків, а також повної інтеграції силової електроніки, електрохімії, керування температурою та цифрових технологій для підвищення безпеки системи. У фотоелектричних установках несправності, спричинені стороною постійного струму, складають понад 70% усіх несправностей. Таким чином, інвертор повинен підтримувати інтелектуальне відключення стрінга та автоматичне виявлення точки відключення. У сценарії розосередженої фотоелектричної системи функція дугового вимикача (Arc Fault Circuit Breaker, AFCI) стане стандартною конфігурацією, а функція швидкого відключення на рівні модуля забезпечить безпеку обслуговуючого персоналу та пожежників. У сценарії ESS необхідно використовувати кілька технологій, таких як силова електроніка, хмара та штучний інтелект, щоб реалізувати вдосконалене керування ESS від батарейних елементів до всієї системи. Традиційний режим захисту, заснований на пасивному реагуванні та фізичному відокремленні, змінюється на активний автоматичний захист, реалізуючи багатовимірний дизайн безпеки від апаратного забезпечення до програмного забезпечення та від структури до алгоритму.

Тренд 8: безпека та надійність

Окрім переваг, фотоелектричні системи також мають різні ризики, включаючи безпеку обладнання та інформаційну безпеку. Ризики для безпеки обладнання в основному стосуються відключення через несправності. Ризики інформаційної безпеки стосуються зовнішніх атак на електромережі. Щоб впоратися з цими викликами та загрозами, підприємствам і організаціям необхідно створити повний набір механізмів керування «безпекою та надійністю», включаючи надійність, доступність, безпеку та стійкість систем і пристроїв. Потрібно запровадити захист для особистої безпеки та безпеки навколишнього середовища, а також конфіденційності даних.

Тренд 9: цифровізація

Звичайні фотоелектричні установки мають велику кількість обладнання та не мають каналів збору інформації та звітності. Більшість обладнання не може «спілкуватися» одне з одним, тому що дуже важко реалізувати вдосконалене керування. З впровадженням передових цифрових технологій, таких як 5G, Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення, технології зондування та великі дані, фотоелектричні установки можуть надсилати та отримувати інформацію, використовуючи «біти» (інформаційні потоки) для керування активною потужністю (потоки енергії). Весь зв'язок генерація – передача – зберігання – розподіл – споживання стає видимим, керованим та контрольованим.

Тенденція 10: застосування штучного інтелекту

Оскільки енергетична галузь рухається до ери даних, як краще збирати, використовувати та максимізувати цінність даних, стало однією з головних проблем усієї галузі. Технології штучного інтелекту можуть бути широко застосовані в сферах відновлюваної енергетики та відіграють незамінну роль у всьому життєвому циклі PV+ESS, включаючи виробництво, будівництво, експлуатацію та технічне обслуговування, оптимізацію та експлуатацію. Конвергенція штучного інтелекту та таких технологій, як хмарні обчислення та великі дані, поглиблюється, а ланцюжок інструментів, що зосереджується на обробці даних, навчанні моделей, розгортанні та експлуатації і моніторингу безпеки, буде збагачений. У сфері відновлюваної енергетики штучний інтелект, як і силова електроніка та цифрові технології, сприятиме глибокій трансформації галузі.

Висновки

1. Показано, що ВДЕ все більше домінують на ринку електроенергії, обсяги генерації електроенергії СЕС останніми роками зростають рекордними темпами. Визначено, що побудова сучасних СЕС все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати величину LCOE, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку системи. Тому ефективна реалізація сонячної генерації потребує аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять СЕС, розробки механізмів та відповідного нормативно-методичного, технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть ефективному розвитку сонячної генерації, побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.

2. Здійснено аналіз особливостей розвитку «зеленої» енергетики в Польщі та Україні, визначено позитивні фактори, які вплинули на розвиток ВДЕ в цих країнах, що дозволило сформувати техніко-економічні та організаційні умови успішного розвитку сонячної генерації, зокрема, представлені нові гравці розвинутих енергетичних ринків згідно Четвертого енергетичного пакета ЄС.

3. Виділено базові складові ефективного функціонування електроенергетичних систем з СЕС, а саме: концепції конфігурацій фотоелектричної систем, Smart-інвертори, системи накопичення енергії, віртуальні електростанції на основі СЕС. Показано, що кожна із чотирьох концепцій конфігурацій фотоелектричних систем передбачає з'єднання серії фотоелектричних панелей або стрінгів та пристроїв силової електроніки (перетворювачів постійного струму та інверторів). Оцінено переваги використання Smart-інверторів, як нової технології, яка може допомогти інтегрувати сонячну енергію та інші розосереджені енергетичні ресурси в електричну мережу з метою справлятися з переривчастою генерацією, допомагаючи електричній мережі залишатися стабільною та підтримувати вимоги до напруги та частоти.

4. Визначено, що у будь-якій фотоелектричній системі власне ESS стають центральним компонентом, що суттєво впливає на вартість, вимоги до обслуговування, надійність і дизайн СЕС, а важливими параметрами ESS, які впливають на роботу та продуктивність фотоелектричної системи, є вимоги щодо обслуговування акумулятора, термін служби акумулятора, доступна потужність і ефективність. У свою чергу, функціонування віртуальних електростанцій на основі СЕС, як мережі агрегованих розосереджених енергетичних ресурсів, що дистанційно підключені та сумісно працюють поряд з гнучкими споживачами електроенергії, направлено на максимізацію вигод всіх учасників локальних ринків електроенергії з СЕС.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинко В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями) // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 1. – С. 41–49.

2. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників Microgrid на локальних ринках електроенергії // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 3. – С. 37–48.

3. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернечук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4.

4. <https://www.bloomberg.org/press/wind-and-solar-top-10-of-global-power-generation-for-first-time/>

5. <https://global-climatescope.org/>
6. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-solar-photovoltaic-industry-alliance_en
7. <https://ember-climate.org/app/uploads/2023/01/Report-European-Electricity-Review-2023.pdf>
8. <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2022-2026-2>
9. <https://lex-consulting.ua/uk/chomu-treba-investuvaty-v-zelenu-enerhetyku-polshchi-same-zaraz/>
10. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/new_opportunities_in_energy_sector_poland_ukraine/
11. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. URL: <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski>.
12. <https://minprom.ua/articles/291806.html>
13. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3533739-zelena-energetika-20-cogo-cekati-ii-virobnikam-pisla-zakincenna-vijni.html>, 21.06.2022
14. <https://razumkov.org.ua/statti/sekto-vidnovlyuvanyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>
15. <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidnovlyuvana-energetika-v-ukrajini-pidsumki-roku-ta-prognozi-2022-vde-50203541.html>
16. Simshauser P., Nelson T. The Energy Market Death Spiral - Rethinking Customer Hardship // AGL Applied Economic and Policy Research, Working Paper No.31 – Death Spiral, 35 p.
17. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2019. – № 3. – С. 7–22.
18. Keshkar A., Arzanpour S., Keshkar F. Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. *Energy Build.* 2016, 133, 281–294.
19. Parvathy S., Patne N.R., Jadhav A.M. A Smart Demand Side Management Mechanism for Domestic Energy Consumers with Major HVAC Load. *Int. Conf. Electr. Power Energy Syst. ICEPES 2016 2017*, No. 1, 504–511.
20. Wu Y., Gao J. J., Yu L.R. Demand Chain Management – The New Source of Profit Increase. *IE EM 2009 – Proc. 2009 IEEE 16th Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.* 2009, 1483–1487. <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344391>.
21. Denysiuk S., Opryshko V., Strzelecki R. The Smart Grid Concept Implementation by Expanding the Use of Demand Side Management and Modern Power Electronic Installations // *Енергетика: Економіка, Технології, Екологія*. – 2016. – № 4. – С. 7–16.
22. Immendoerfer A., Winkelmann M., Stelzer V. *Energy Solutions for Smart Cities and Communities. Recommendations for Policy Makers*; 2014.
23. Espe E., Potdar V., Chang E. Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. *Energies* 2018, 11 (10).
24. Verschae R., Kato T., Matsuyama T. Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. *Energies* 2016, 9 (7), 562.
25. Lu H., Huang K., Azimi M., Guo L. Blockchain Technology in the Oil and Gas Industry: A Review of Applications, Opportunities, Challenges, and Risks. *IEEE Access* 2019, 7 (c), 41426–41444.
26. Ozadowicz A., Grela J. An Event-Driven Building Energy Management System Enabling Active Demand Side Management. *2016 2nd Int. Conf. Event-Based Control. Commun. Signal Process. EBCCSP 2016 - Proc.* 2016.
27. Orłowska-Kowalska T., Blaabjerg F., Rodriguez J. Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives. – Springer International Publishing Switzerland 2014. – 422 p.
28. SMA, SUNNY CENTRAL – High tech solution for solar power stations. Products Category Brochure. <http://www.sma-america.com/>
29. Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 41(5), 1292–1306 (2005) S.B. Kjaer, Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications, PhD Thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Jan 2005
30. Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P. In *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley, New York (2011)
31. Yang Y., Blaabjerg F., Wang H. Low voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters.
32. Meneses D., Blaabjerg F., Garcia O., Cobos J.A. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. *IEEE Trans. Power Electron.* 28(6), 2649–2663(2013)
33. Meinhardt M., Cramer G. Multi-string-converter: the next step in evolution of string converter technology, in *Proceedings of EPE'01*, pp. P.1–P.9 (2001)
34. <https://www.ske-solar.com/en/10-years-of-huawei-smart-pv-journey/>
35. <https://sinovoltaics.com/learning-center/inverters/string-inverters-advantages-disadvantages/>
36. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/smart-pv-inverter-benefits-for-utilities/#gref>
37. <https://www.greentechrenewables.com/article/ul-1741-rule-21-advanced-inverter-tests>
38. <https://www.irecusa.org/our-work/smart-inverters/>
39. <https://www.lawinsider.com/dictionary/smart-inverter>
40. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/storage-in-pv-systems>
41. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-solar-energy-and-storage-basics>
42. <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
43. <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/02/16/2610309/0/en/Advanced-Energy-Storage-System-Market-Size-Growing-at-9-CAGR-Set-to-Reach-USD-48-5-Billion-By-2032>
44. <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/digitalisation/virtual-power-plants-and-the-energy-transition/>
45. <https://www.next-kraftwerke.com/vpp/virtual-power-plant>
46. [virtuallnaya-elektrostantsiya-modeli-funktsionirovaniya-mirovoy-opyt-effekty-vnedreniya.pdf](https://www.virtuallnaya-elektrostantsiya-modeli-funktsionirovaniya-mirovoy-opyt-effekty-vnedreniya.pdf)
47. https://atomicexpert.com/virtual_power_station
48. <https://solar.huawei.com/eu/news/eu/2022/12/Huawei-Unveils-Top-10-Trends-of-Smart-PV-for-a-Greener-Future>

S. Denysiuk¹, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

R. Strzelecki², Prof., Dr. hab., Eng., ORCID 0000-0001-9437-9450

I. Bohoiko¹, ORCID 0000-0002-6816-6352

N. Strzelecki³, assistant professor, ORCID 0000-0002-5976-6903

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

²Gdańsk University of Technology (Poland)

³Gdynia Maritime University (Poland)

ANALYSIS OF THE FEATURES OF EFFECTIVE IMPLEMENTATION OF SOLAR POWER PLANTS IN LOCAL ENERGY SUPPLY SYSTEMS

It is shown that renewable energy sources (RES) are increasingly dominating the electricity market in many countries, while the amount of electricity generation by solar power plants (SPP) has been growing at a record pace in recent years. It is noted that although the share of RES continues to grow and the photovoltaic industry is developing rapidly, the industry still faces many challenges, in particular, how to continue to reduce the Levelized Cost of Energy (LCOE), improve the efficiency of operation and maintenance, and maintain the stability of the power grid, to ensure system security. The effective implementation of solar generation requires an analysis of the prospects for the development of local electric power systems that include SPP, the development of mechanisms and appropriate regulatory, methodological, technical and organizational support that will contribute to the effective development of solar generation, the construction of modern system (schematic) solutions.

The analysis of the features of the development of green generation in Poland and Ukraine was carried out, the positive factors that influenced the development of renewable energy sources in Ukraine were determined, which made it possible to form the technical, economic and organizational conditions for the successful development of solar generation, in particular, information was provided on new players in developed energy markets according to the Fourth Energy EU package. The analysis showed that when increasing the efficiency of SPP systems, planning and demand management in the electric network, effective functioning of Energy Smart Community (ESC) become important.

The basic components of the effective functioning of electric power systems with SPP are highlighted, namely: concepts of configurations of photovoltaic systems, Smart-inverters, Energy Storage System (ESS), formation of Virtual Power Plant (VPP) based on SPP. It is shown that each of the four concepts involves the connection of a series of photovoltaic panels or strings and power electronics devices (DC converters and inverters), which are configured taking into account the peculiarities of the functioning of various structural (schematic) solutions. The advantages of using Smart-inverters as a new technology that can help integrate solar energy and other distributed energy resources into the electrical network are evaluated. Smart inverters are used to help the electrical grid cope with intermittent generation, helping the electrical grid remain stable and maintain voltage and frequency requirements.

It was determined that in any photovoltaic system, the ESS itself becomes a central component that significantly affects the cost, maintenance requirements, reliability and design of the SPP, and the important parameters of the ESS that affect the operation and performance of the photovoltaic system are the battery maintenance requirements, battery life, available power and efficiency. Trends in the market of advanced energy storage systems for SPPs for the next decade are presented. The functioning of virtual power plants based on SPP, as a network of aggregated distributed energy resources that are remotely connected and work together with flexible electricity consumers, is aimed at maximizing the benefits of participants. The possibilities and trends of SPP development in the near future, which are based on the research of Huawei, are presented.

Keywords: *renewable energy sources, solar power plants, configuration of photovoltaic systems, Smart-inverters, energy storage systems, virtual power plant.*

References

1. Denysiuk S., Makhlin P., Shram O., Slynko V. Features of operating modes analysis of the power system in are as with alternative electric power sources (wind power plants) // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2022. – № 1. – Pp. 41–49 (Ukr).
2. Kyrylenko O., Zhuikov V., Denysiuk S. Use of dynamic tariffication for optimization microgrid technical and economic indicators in local electricity markets // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2022. – № 3. – Pp. 37–48 (Ukr).
3. Denysiuk S., Bielokha H., Cherneshchuk I., Lysy V. Global trends in implementation of renewable energy sources and features of their implementation during the recovery of Ukraine's economy // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. – 2022. – № 4. – P.7–28 (Ukr).
4. <https://www.bloomberg.org/press/wind-and-solar-top-10-of-global-power-generation-for-first-time/>
5. <https://global-climatescope.org/>
6. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-solar-photovoltaic-industry-alliance_en
7. <https://ember-climate.org/app/uploads/2023/01/Report-European-Electricity-Review-2023.pdf>
8. <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2022-2026-2>
9. <https://lex-consulting.ua/uk/chomu-treba-investuvaty-v-zelenu-enerhetyku-polshchi-same-zaraz/>
10. https://www.asterslaw.com/ua/press_center/publications/new_opportunities_in_energy_sector_poland_ukraine/

11. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. URL: <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski>.
12. <https://minprom.ua/articles/291806.html>
13. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3533739-zelena-energetika-20-cogo-cekati-ii-virobnikam-pisla-zakincenna-vijni.html>, 21.067.2022
14. <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>
15. <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidnovlyuvana-energetika-v-ukrajini-pidsumki-roku-ta-prognozi-2022-vde-50203541.html>
16. Simshauser P., Nelson T. The Energy Market Death Spiral - Rethinking Customer Hardship // AGL Applied Economic and Policy Research, Working Paper No.31 – Death Spiral, 35 p.
17. Denysiuk S., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. – 2019. – № 3. – P. 7–22 (Ukr).
18. Keshtkar A., Arzanpour S., Keshtkar F. Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. *Energy Build.* 2016, 133, 281–294.
19. Parvathy S., Patne N.R., Jadhav A.M. A Smart Demand Side Management Mechanism for Domestic Energy Consumers with Major HVAC Load. *Int. Conf. Electr. Power Energy Syst. ICEPES 2016* 2017, No. 1, 504–511.
20. Wu Y., Gao J. J., Yu L.R. Demand Chain Management – The New Source of Profit Increase. *IE EM 2009 – Proc. 2009 IEEE 16th Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.* 2009, 1483–1487. <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344391>.
21. Denysiuk S., Opryshko V., Strzelecki R. The Smart Grid Concept Implementation by Expanding the Use of Demand Side Management and Modern Power Electronic Installations // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. – 2016. – № 4. – P. 7–16 (Ukr).
22. Immendoerfer A., Winkelmann M., Stelzer V. *Energy Solutions for Smart Cities and Communities. Recommendations for Policy Makers*; 2014.
23. Espe E., Potdar V., Chang E. Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. *Energies* 2018, 11 (10).
24. Verschae R., Kato T., Matsuyama T. Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. *Energies* 2016, 9 (7), 562.
25. Lu H., Huang K., Azimi M., Guo L. Blockchain Technology in the Oil and Gas Industry: A Review of Applications, Opportunities, Challenges, and Risks. *IEEE Access* 2019, 7 (c), 41426–41444.
26. Ozadowicz A., Grela J. An Event-Driven Building Energy Management System Enabling Active Demand Side Management. *2016 2nd Int. Conf. Event-Based Control. Commun. Signal Process. EBCCSP 2016 - Proc.* 2016.
27. Orłowska-Kowalska T., Blaabjerg F., Rodríguez J. *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives*. – Springer International Publishing Switzerland 2014. – 422 p.
28. SMA, SUNNY CENTRAL – High tech solution for solar power stations. Products Category Brochure. <http://www.sma-america.com/>
29. Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 41(5), 1292–1306 (2005) S.B. Kjaer, Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications, PhD Thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Jan 2005
30. Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P. In *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley, New York (2011)
31. Yang Y., Blaabjerg F., Wang H. Low voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters.
32. Meneses D., Blaabjerg F., Garcia O., Cobos J.A. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. *IEEE Trans. Power Electron.* 28(6), 2649–2663(2013)
33. Meinhardt M., Cramer G. Multi-string-converter: the next step in evolution of string converter technology, in *Proceedings of EPE'01*, pp. P.1–P.9 (2001)
34. <https://www.ske-solar.com/en/10-years-of-huawei-smart-pv-journey/>
35. <https://sinovoltaics.com/learning-center/inverters/string-inverters-advantages-disadvantages/>
36. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/smart-pv-inverter-benefits-for-utilities/#gref>
37. <https://www.greentechrenewables.com/article/ul-1741-rule-21-advanced-inverter-tests>
38. <https://www.irecusa.org/our-work/smart-inverters/>
39. <https://www.lawinsider.com/dictionary/smart-inverter>
40. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/storage-in-pv-systems>
41. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-solar-energy-and-storage-basics>
42. <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
43. <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/02/16/2610309/0/en/Advanced-Energy-Storage-System-Market-Size-Growing-at-9-CAGR-Set-to-Reach-USD-48-5-Billion-By-2032>
44. <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/digitalisation/virtual-power-plants-and-the-energy-transition/>
45. <https://www.next-kraftwerke.com/vpp/virtual-power-plant>
46. [virtuallnaya-elektrostantsiya-modeli-funktsionirovaniya-mirovoy-opyt-effekty-vnedreniya.pdf](https://www.virtuallnaya-elektrostantsiya-modeli-funktsionirovaniya-mirovoy-opyt-effekty-vnedreniya.pdf)
47. https://atomicexpert.com/virtual_power_station
48. <https://solar.huawei.com/eu/news/eu/2022/12/Huawei-Unveils-Top-10-Trends-of-Smart-PV-for-a-Greener-Future>

Надійшла: 7.04.2023

Received: 7.04.2023