

СПІВСТАВНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІЧНОГО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ ІЗ АКТИВНИМ СПОЖИВАЧАМИ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Розглянуто питання використання алгоритмічного та програмного забезпечення у контексті розвитку розумних мереж. Визначено, що системи накопичення енергії є ключовими елементами систем енергоменеджменту розумних спільнот, оскільки вони дозволяють зберігати енергію, що виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), а також компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію. Проведено порівняльний аналіз різних стратегій для систем управління енергією, що об'єднує сонячні батареї та акумуляторні батареї.

Проведено аналіз основних стратегій управління енергією та визначено переваги та недоліки, які необхідно враховувати при їх виборі. Розглянуто концепцію Smart-інверторів та їх інтеграція у системах накопичення енергії. Наведено структуру гібридних систем накопичення енергії та основні ролі накопичення енергії. Показано економічні переваги впровадження Microgrid та Smart Grid у енергетиці. Запропоновано розробку інтегрованих стратегій управління системами накопичення енергії, які враховують всі аспекти виробництва, зберігання та розподілу електроенергії в розумних мережах, сприяючи сталому та ефективному використанню ресурсів.

Розглянуто основні моделі та фреймворки, які використовуються для моделювання енергетичних систем та визначено переваги та недоліки моделей які слід враховувати при дослідженні чітких питань у контексті розвитку систем енергоменеджменту.

Ключові слова: системи накопичення енергії, Smart Grid, енергоменеджмент, відновлювальні джерела енергії, програмне забезпечення, енергетичні системи.

Вступ

Управління енергією є важливим завданням для будь-якої країни чи організації. Воно дозволяє ефективно використовувати наявні енергетичні ресурси та забезпечити надійність та стабільність енергопостачання. Акумуляторні технології відіграють все більш важливу роль у системах управління енергією. Вони дозволяють зберігати енергію, що виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), а також компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію. Сучасні стратегії управління енергією з використанням акумуляторних технологій можна розділити на кілька основних напрямків:

– використання акумуляторів для накопичення енергії ВДЕ. Це дозволяє нівелювати нерівномірність виробництва електроенергії з ВДЕ, яка є однією з їхніх основних проблем.

– використання акумуляторів для балансування енергосистеми. Це дозволяє компенсувати нерівномірність попиту на електроенергію, а також підтримувати стабільність частоти та напруги в електричній мережі.

– використання акумуляторів для забезпечення резервного електропостачання. Це дозволяє забезпечити надійність електропостачання в разі відключення основного джерела енергії.

Розвиток акумуляторних технологій та автоматизації управління енергією відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності систем управління енергією.

Створення мікромереж (Microgrid, MG) стає все ефективнішим та популярнішим рішенням для забезпечення енергії споживачів, і це стає дедалі більш вагомим альтернативою традиційному підходу до розвитку енергосистем. Традиційний підхід ґрунтується на будівництві великих централізованих генераційних установок та електричних мереж [1].

Системи силової електроніки відіграють ключову роль у регулюванні енергії від систем накопичення енергії (ESS) і підключення до електричної мережі. Використання різних видів відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) та механізмів управління попитом споживачів перекриває аспекти сторони управління попитом (Demand-Side Management, DSM) в середовищі енергетично самодостатніх систем (ESC), що базуються на технічних концепціях Microgrid або віртуальних електростанцій (VPP) [2].

MG підтримують гнучку, ефективну та безпечну електричну мережу, забезпечуючи зростаючу інтеграцію розподілених енергетичних ресурсів з інверторним інтерфейсом, включаючи диспетчеризовану генерацію, таку як мікротурбіни та паливні елементи, і недиспетчеризовану відновлювану генерацію, як-от фотоелектричні (PV) масиви та вітрові турбіни, серед інші технології.

Економічні переваги, які MG принесуть своїм учасникам, формуються на основі таких факторів [3, 4]: зниження витрат на придбання електроенергії та потужності на роздрібному ринку; зниження витрат на оплату послуг електричних мереж для транспорту електроенергії; зниження витрат на технологічне приєднання або збільшення приєднаної потужності; підвищення надійності електропостачання та зниження втрат від відключення електроенергії; поліпшення якості електроенергії та зниження втрат від впливу перепадів та стрибків напруги на чутливе обладнання.

Системи накопичення енергії – це корисні технології, які широко розроблені та застосовуються в системах електроенергії, а також у мережах розподілу електроенергії. Електророзподільні мережі часто встановлюють технології накопичення енергії малої ємності, такі як невеликі батареї. Технології зберігання зазвичай використовуються для управління енергією або покращення якості електроенергії. У додатках для управління енергією потрібні технології накопичення високої ємності та низької помірної реакції, такі як батареї та насосно-акумуляуючі пристрої. З іншого боку, для підвищення якості електроенергії часто застосовуються блоки швидкої реакції та малої ємності, такі як конденсатори та маховик.

Традиційно накопичення енергії відіграло три основні ролі [5]. По-перше, це може підвищити ефективність і зменшити витрати на електроенергію за рахунок енергетичного арбітражу, тобто шляхом зберігання енергії, отриманої в періоди непікової навантаження (коли вона дешевша), а потім її вивільнення в періоди максимального попиту на електроенергію (коли її ціна вища).

По-друге, накопичення енергії може підвищити стабільність і надійність електромережі шляхом надання критично важливих допоміжних послуг. Ці послуги зазвичай включають регулювання частоти мережі (також називається регулюванням частоти), керування напругою та резерв обертання. ESS можуть підтримувати мережу, забезпечуючи робочий (обертаний і некрутячий) резерв для регулювання короточасних випадкових коливань частоти під час нормальних умов експлуатації та швидкого реагування на надзвичайні ситуації.

По-третє, накопичення енергії може підвищити якість електроенергії в частині мережі. Якість електроенергії стала надзвичайно важливою для великої кількості чутливих галузей промисловості, користувачів складного обладнання та будівель внаслідок збільшення використання нелінійних навантажень у промисловості, комп'ютерах, що належать клієнтам, та інших електронних системах.

Метою роботи є проведення співставного аналізу використання алгоритмічного та програмного забезпечення для моделювання енергетичних систем та процесів із активним споживачем.

Матеріал і результати дослідження

Основна проблема полягає в тому, що електроенергія, вироблена сонячними або вітровими генераторами, змінюється в часі і сильно залежить від багатьох факторів, таких як місцевість і погодні умови, де встановлено джерела, характеристики генераторів енергії тощо. Спеціально для того, щоб впоратися з цією випадковою поведінкою вихідної потужності генераторів з відновлюваними джерелами енергії, системи зберігання енергії від акумуляторів (BESS) набувають все більшого значення в багатьох додатках експлуатації та управління енергетичними системами [6].

Коли енергія потрібна значною мірою, беручи до уваги час відгуку та швидкість розряду, найкращим рішенням для зберігання енергії в мікромережі є використання блоків HESS з різними характеристиками. Як перевага цього підходу, блоки зберігання можуть бути розподілені по мережі без необхідності підключення блоків до вузла. Це полегшує оновлення систем, які раніше включали ESS [7, 8].

Пропонується глобальна стратегія керування системою накопичування енергії. Вона має на меті забезпечити активні функції мережі спільноти, включаючи активну потужність і основний контроль реактивної потужності, що працює відповідно до заданих значень.

Сучасні системи накопичення є універсальними технологіями, оскільки вони дозволяють одночасне їх застосування для енергетичного арбітражу, при якому здійснюється закупівля е/е на ринку по низькій вартості та продаж її по високій; забезпечення достатності – перенесення виробленої е/е з часу піку сонячного випромінювання у час найбільших потреб ГЕН, для зниження навантаження на маневрені потужності в енергосистемі; регулювання частоти та активної потужності чи надання інших допоміжних послуг на ринку електроенергії [9].

Гнучкість великих енергосистем також буде визначатися гнучкістю електроенергетичних систем меншого рівня, або підсистем. У свою чергу, керування енергоспоживанням окремих споживачів, управління попитом мікрорайонів чи промислових вузлів має значний вплив на гнучкість електроенергетичних систем на регіональному та локальному рівнях [10]. Зокрема, гнучкість локальних електроенергетичних систем залежить від керованості розподіленою генерацією (ВДЕ), механізмів управління попитом, використання акумуляторів, впровадження механізмів гнучкості при прогнозуванні навантаження та застосування методів економічного аналізу.

Численні технології накопичення енергії, які зараз доступні на ринку для використання електроенергії та енергії, мають великий потенціал для підтримки різних додатків інтелектуальної мережі. Кожна технологія накопичення енергії здатна надавати набір серйозно важливих мережеских послуг на користь різних груп зацікавлених сторін, таких як оператори систем, комунальні підприємства та клієнти. Цінність усіх цих послуг суттєво змінюється залежно від місця розміщення ESS в електромережі та зацікавлених сторін.

Концепція 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) [11,12] надає найцілісніше уявлення про трансформацію енергетики. "Декарбонізація" передбачає перехід до екологічно чистої "безвуглецевої" економіки та енергетики, в якій збільшується роль відновлювальних джерел енергії, розширюється використання електричного транспорту, та відмова від використання вугільних палив. "Децентралізація" означає перехід до розподіленої електроенергетики з численними різнорівневими генераторами та споживачами. Це проявляється у збільшенні ролі розподільчих мереж, зокрема для невеликої та різноманітної генерації, і виникненні "активних споживачів" (професійних виробників і споживачів електроенергії), які можуть гнучко змінювати свій споживчий профіль з мережі.

Ця можливість для мікрогенерації в приватних домогосподарствах розширила діяльність споживачів електроенергії від простого придбання електроенергії у комунальних підприємств до більш активної участі у виробництві та зберіганні електроенергії [13]. Акумуляторні батареї в поєднанні з фотоелектричними установками можуть сприяти розвантаженню розподільчих мереж, якщо батареї експлуатуються з цією метою. Завдяки режиму роботи накопичувача, орієнтованому на мережу, максимальна потужність сонячної установки може бути знижена порівняно з аналогічним випадком без роботи накопичувача, орієнтованого на мережу.

Потенціал "Енергії як послуги" (EaaS) стає особливо великим у відношенні до інтелектуальної зарядки електромобілів (EV) та її інтеграції з системами керування енергією будинку (HEMS) [14]. Інтеграція даних електромобілів із тарифами за час використання та інформацією від Smart лічильників відкриває можливості для розумної зарядки, яка приносить користь як компанії та операторові електромережі, так і власнику транспортного засобу. Керуючи часом і швидкістю заряджання електромобіля з урахуванням місцевого попиту та цін на ринку електроенергії (при цьому дотримуючись мінімальних рівнів заряду, встановлених власником), компанія, яка спеціалізується на інтелектуальній зарядці, може відкривати нові джерела доходу, такі як надання послуг оператору мережі для балансування та участь у оптових арбітражних можливостях, заснованих на масових закупівлях електроенергії. Оператор мережі отримує можливість балансування локальної мережі з більшою гнучкістю, водночас як власник транспортного засобу отримує можливість дешево заряджати свій електромобіль без додаткових витрат.

Функції підтримки електроенергетичної системи від розумних інверторів, такі як компенсація реактивної потужності, утримання стабільності при збоях та підвищення якості електроенергії, разом із зрослими вимогами до надійності, є ключовими для подальшого зменшення загальних витрат на енергію.

Концепція розумних інверторів була акцентована в недавно розроблених стандартах інтерконекції децентралізованих генеруючих систем (DG) для досягнення плавної та придатної для мережі інтеграції великої кількості фотовольтаїчних систем та, взагалі, систем відновлюваної енергії. Розумні інвертори можуть надавати комплекс функцій підтримки електроенергетичної системи. Методи впровадження цих функцій досліджуються та тестуються на однофазній фотовольтаїчній системі, розроблені авторами. Експериментальні результати демонструють, що розумні інвертори із функціями підтримки електроенергетичної системи можуть надавати ресурси для зменшення проблем, створених високим проникненням фотовольтаїки в мережі.

Під час оптимізації управління енергією важливо враховувати багато обмежень. У реальних застосуваннях майже всі стратегії оптимізації для управління енергією включають ряд обмежень, які описують фізичні та економічні обмеження системи. Система повинна працювати в межах цих обмежень, щоб забезпечити економічну та стабільну експлуатацію. Наприклад, для гібридної сонячної електростанції максимальна потужність фотовольтаїчних батарей обмежена для виробництва сонячної енергії, а у батареї або інших систем зберігання енергії є обмеження ступеня розряду (SOC) та обмеження швидкості заряду/розряду. Крім того, деякі навантаження не можуть бути зміщені або зменшені, що створює обмеження щодо попиту. Експлуатаційні обмеження використовуються для обмежень швидкості наростання, балансу потужності, а також обмежень вимикання та запуску. Конвертери в гібридній сонячній системі також мають обмеження потужності, що означає, що в мережу та систему зберігання енергії може бути передано лише певну кількість енергії. При інтеграції дизель-генераторів вуглекислотні викиди також можуть бути обмеженням.

Стратегія системи управління енергією (EMS) є суттєвою в житлових застосуваннях через велику чутливість споживачів до витрат [15]. Різні стратегії EMS порівнюються з різних точок зору на основі реального комерційного продукту, що об'єднує сонячні батареї та батареї.

Стратегія 1: Максимальне власне споживання. У цьому режимі стратегія спрямована на максимізацію власного споживання hybrid PV–battery system (HPVBS). Блок-схема максимального власного споживання показана на рисунку 1, і принцип можна описати таким чином:

–Коли сонячного світла достатньо, фотоелектрична енергія спочатку покриває потребу в навантаженні, потім заряджає батарею і в останню чергу подається в мережу;

–Коли сонячного світла недостатньо, фотоелектрична енергія спочатку надходить до навантаження, а потім акумулятор розряджається. Дефіцит електроенергії (якщо такий є) означатиме, що електроенергія купується з мережі в останню чергу.

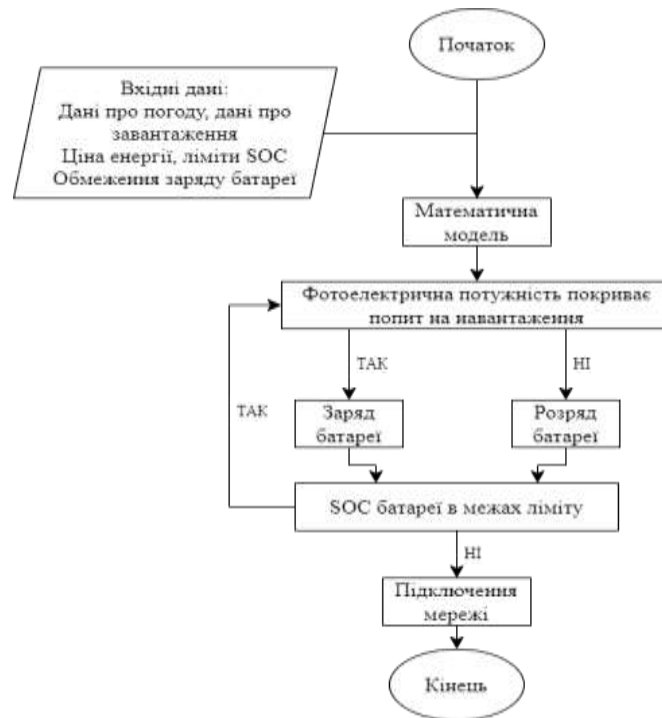


Рисунок 1 - Блок-схема стратегії максимального власного споживання.

Стратегія 2: час використання (TOU). У цьому режимі час заряду та період розряду потрібно встановити вручну або автоматично. Протягом одного дня може бути більше одного сегмента заряду/розряду, і кожен сегмент базується на годинах. Блок-схема цієї стратегії показана на рисунку 2, а принцип цього режиму описується так:

–Акумулятор не розряджається в період заряду і не заряджається в період розряду. Кожен часовий сегмент має бути встановлений як режим заряду або режим розряду;

–Протягом періоду заряду акумулятор заряджається до певного SOC. Мережа забезпечує енергію для покриття навантаження та зарядки акумулятора;

–Протягом періоду розряду фотоелектрична енергія та енергія батареї використовуються для покриття потреби навантаження. Коли фотоелектричної енергії недостатньо або батарея повністю розряджена, мережа забезпечує додаткову потужність для покриття навантаження.

Стратегія 3: Повна подача в мережу. Цей режим максимізує фотоелектричну енергію для підключення до мережі, і блок-схема показана на рисунку 3. Принцип можна коротко описати так:

–Коли генерована фотоелектрична енергія перевищує максимальну потужність інвертора, акумулятор заряджається для накопичення додаткової енергії;

–Коли генерована фотоелектрична енергія менша за максимальну потужність інвертора, батарея розряджається, щоб максимізувати вихідну енергію інвертора.

–Однак ці стратегії можуть мати досить різний економічний результат в домогосподарському випадку, що означає, що їх слід застосовувати в різних сценаріях. Зокрема, стратегія максимального споживання самої себе застосовується в областях, де ціна на електроенергію висока, і чим вища ринкова ціна, тим економічніше сценарій. Стратегія TOU застосовується в областях, де різниця між піковою та позапіковою ціною велика, оскільки в цьому режимі мережа заряджає батарею протягом позапікових періодів і розряджає під час пікових періодів, що покращує енергетичний обмін між HPVBS та мережею, і лише велика різниця в ціні може покрити витрати на заряджену енергію та знос батареї. Стратегія повного живлення мережі застосовується в сценаріях, де батарея повинна

підтримувати роботу мережі та працювати як резерв. У цьому випадку батарея працює при низькому рівні заряду.

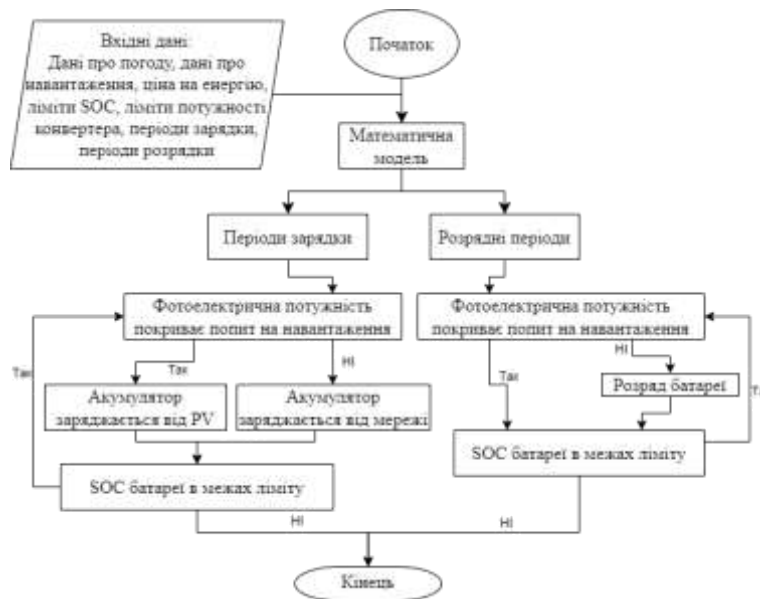


Рисунок 2 - Блок-схема стратегії часу використання.

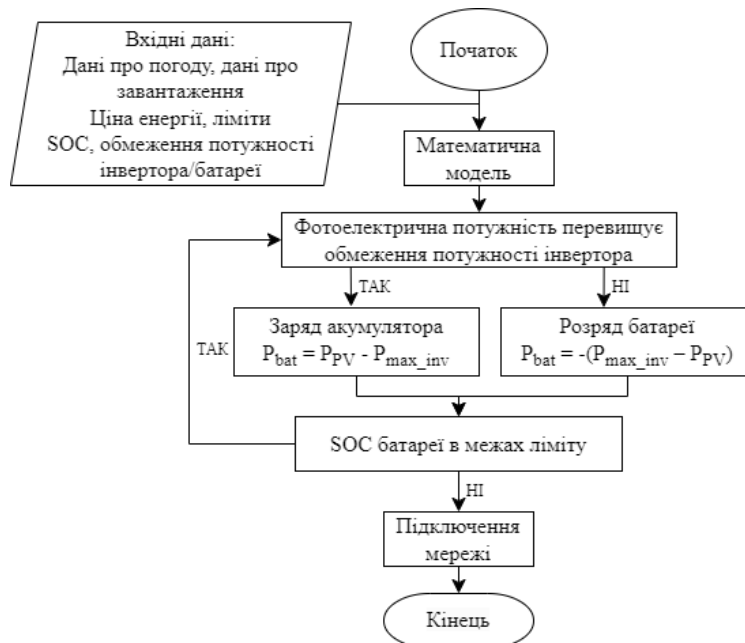


Рисунок 3 - Блок-схема стратегії повного підключення до мережі.

Система керування батареями (BMS) — це апаратно-програмне рішення, яке перевіряє правильну роботу батарей: у базовій версії вона просто заряджає батареї, коли вони розряджені, і розряджає їх, коли це необхідно. Він обмежує роботу батареї лише для їх захисту: перевищення обмежень мінімального та максимального стану заряду (SOC) і швидкі цикли заряджання/розряджання заборонені, щоб уникнути швидкого погіршення якості [16].

Система зберігання енергії, яка найбільше цікавить виробників сонячної фотоелектричної енергії, - це система зберігання енергії в батареях (Battery Energy Storage System, BESS), що вимагає ефективного керування та контролю [17]. Основні характеристики BESS включають:

1. Номінальну потужність.
2. Номінальну енергоємність.
3. Глибину розряду (Depth of Discharge, DOD).
4. Тривалість зберігання.

5. Життєвий цикл.
6. Стан заряду (State of Charge, SOC).
7. Двосторонню ефективність (відсоток електроенергії, яка поміщається в накопичувач і потім повертається).

8. Термін експлуатації.

9. Моніторинг і контроль безпеки.

Базова система керування акумулятором (BMS) дозволяє безпечно заряджати/розряджати акумулятори та живити навантаження. Батареї захищені, щоб уникнути швидкої деградації: мінімальний і максимальний рівень заряду (SOC) не перевищуються, а швидкі цикли заряджання/розряджання заборонені. Досконаліша BMS, підключена до фотоелектричного (PV) генератора, також може працювати з подвійною метою — захистити сховище та зменшити пікове споживання [16].

Фотоелектричні модулі підключені до пристрою відстеження точки максимальної потужності (MPPT), щоб працювати в точці максимальної потужності за будь-яких умов освітлення та температури. BMS вимірює постійний струм, напругу та температуру акумуляторів. SOC постійно обчислюється, щоб оцінити залишковий заряд накопичувача; таким чином BMS запобігає аномальному погіршенню якості акумуляторів через неоптимальні схеми заряджання, перезарядження, недозарядження та аномальні температури.

Генерація фотоелектричних панелей залежить від умов установки (розташування, нахил і азимут фотоелектричних модулів) і від погодних умов (сонячне випромінювання та температура). В таблиці 1 наведені основні символи які використовуються при виборі стратегій

Таблиця 1 - Основні символи які використовуються при виборі стратегій

$E_{batt,disch}$	енергія батареї, що подається на навантаження (кВт·год)
$E_{loads_1day-ahead, 6 a.m.-6 p.m.}$	Очікувані навантаження на 1 день вперед у часовому інтервалі 6:00–18:00. (кВт*год)
$E_{load,TDT}$	розрахункові навантаження при загальному часі розряду (TDT) (кВт·год)
$P_{load,max}$	максимальна потужність навантаження, яку задовольняє мережа у разі стратегії зменшення пікових навантажень (кВт)
R_{suff}	параметр тимчасової самоокупності
R_{thres}	порогове значення для параметра R_{suff}

Після визначення загального часу розряду (TDT) процедура продовжується з другою частиною; тобто визначення стратегії управління сховищем. SOC розрахований на 18:00. BESS, яка використовує відповідні моделі, починаючи з вимірювання напруги та температури навколишнього середовища акумуляторів у реальному часі. Номінальна ємність накопичувача та SOC дозволяють розрахувати енергію, яку можна забезпечити навантаженням $E_{batt,disch}$. Розрахункове виробництво енергії E_{PV_1} на день вперед є тією ж величиною, що використовувалася на попередньому кроці, тоді як споживання $E_{load,TDT}$ відповідає розрахунковим навантаженням під час TDT (рисунок 4). Ці кількості енергії порівнюються та визначається, чи є дефіцит енергії $E_{PV_1day-ahead} + E_{batt,disch} \geq E_{load,TDT}$ або надлишок $E_{PV_1day-ahead} + E_{batt,disch} < E_{load,TDT}$.

Якщо виробництво PV та зберігання можуть задовольнити навантаження $E_{PV_1day-ahead} + E_{batt,disch} \geq E_{load,TDT}$ у вибраному загальному часі розряду (TDT), розширене керування батареями не потрібне (стратегія BMS №1).

Якщо навантаження занадто високі $E_{PV_1day-ahead} + E_{batt,disch} < E_{load,TDT}$, приймається стратегія зменшення піку (стратегія BMS №2) або відповідні профілі розряду (стратегія BMS №3).

Щоб вибрати найбільш підходящий метод між стратегією BMS №2 і стратегією BMS №3, параметр попереднього самозабезпечення R_{suff} , тобто співвідношення між попереднім виробництвом фотоелектричної енергії плюс доступною енергією від батареї та тимчасовими локальними навантаженнями, є розраховано:

Коли коефіцієнт R_{suff} нижчий за визначене користувачем порогове значення R_{thres} , приймається стратегія BMS №2: місцеві генератори та накопичувачі забезпечуватимуть низьку кількість енергії для навантажень, які в основному постачатимуться з мережі. Це може призвести до високих піків поглинання. У цьому випадку низька кількість енергії, що зберігається в батареях, використовуватиметься лише тоді, коли навантаження перевищать максимальний ліміт $P_{load,max}$, такий як договірний ліміт поглинання потужності або інший поріг, визначений користувачем.

Стратегія BMS №3 приймається, коли відношення R_{suff} вище визначеного користувачем порогового значення R_{thres} і нижче одиничного значення. Цей випадок кращий, ніж попередній, тому що більша частина навантажень буде забезпечуватися фотоелектричними системами та накопичувачами, а котирування з мережі є низькими.

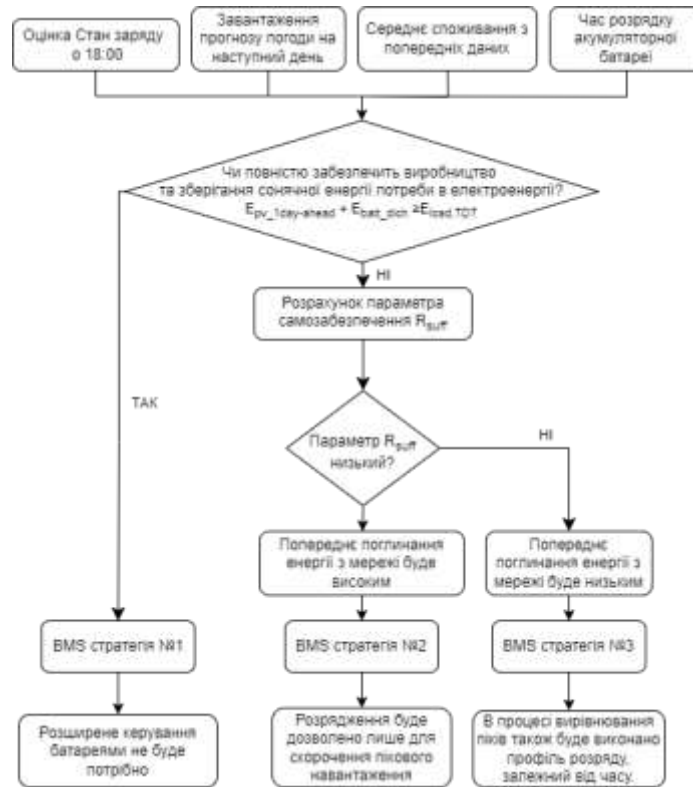


Рисунок 4 – Визначення стратегії управління сховищем.

Багато моделей і концепцій енергетичних систем перебувають у стадії постійного розвитку і змінюються в міру виникнення нових питань і викликів енергетичної політики. Тому оглядові статті можуть дати лише загальне уявлення про ландшафт моделювання на момент проведення дослідження. Для надання постійної та актуальної інформації про різні інструменти моделювання Open Energy Platform надає інформаційні бюлетені про 132 моделі та фреймворки, що використовуються для моделювання енергетичних систем [18].

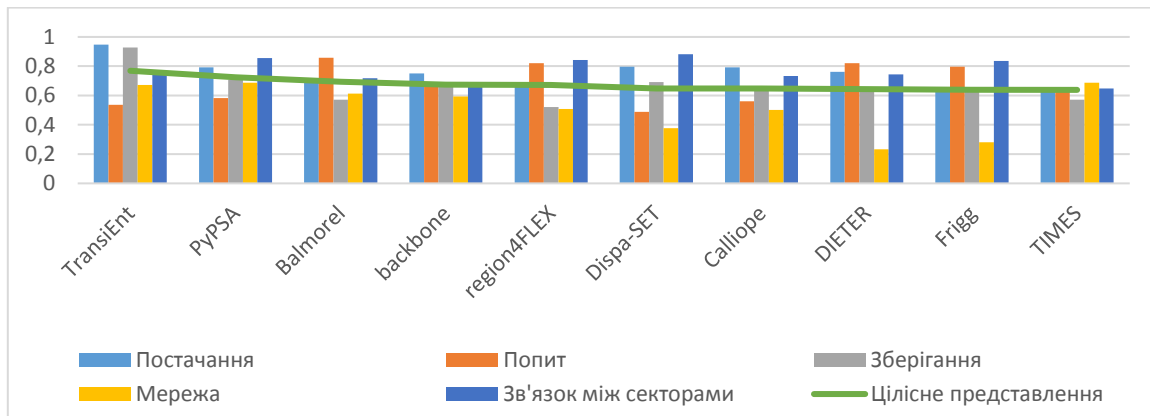


Рисунок 5 – Порівняння інструментів моделювання в енергетиці

Результати показують, що існує широкий спектр моделей, які є сильними в певних сферах і слабшими в інших, залежно від фокусу моделі. При виборі моделі для відповіді на конкретне дослідницьке питання слід враховувати сильні та слабкі сторони кожної моделі.

П'ять моделей з найвищим ступенем представленості (TransiEnt, Dispa-SET, Calliope, PyPSA, DIETER) є кращими в традиційних технологіях генерації та технологічних специфікаціях порівняно з усіма іншими моделями. Зокрема, що стосується технологічних специфікацій, всі п'ять моделей представляють нарощування потужності, мінімальне навантаження та обмежену експлуатацію ВДЕ. Однак не лише традиційні джерела енергії мають попередньо визначені класи в цих моделях; широко

використовувані ВДЕ, такі як біоенергетика, гідроенергетика, фотоелектрична та вітрова енергетика, також демонструють високий рівень представленості.

Чотири моделі, які набрали найбільшу кількість балів в області попиту за результатами оцінки (Balmorel, region4FLEX, DIETER, Frigg), здатні представляти залежні від часу і типу відкладені навантаження. Це є важливою вимогою для представлення гнучких навантажень у системі відновлюваної енергетики. Крім того, розглянуті моделі мають попередньо визначені класи або методи для побутових навантажень. Сектори послуг та промисловості також попередньо визначені в в наведених моделях. Крім того, всі п'ять моделей можуть відображати ефективність технологій попиту. Однак інші експлуатаційні характеристики, такі як нарощування, час реагування та час відновлення, реалізовані лише в трьох з п'яти моделей.

Серед моделей з найвищим рейтингом (TransiEnt, PyPSA, Dispa-SET, backbone) у категорії зберігання даних лише TransiEnt має попередньо визначені класи або методи для всіх розглянутих технологій зберігання. Технології довгострокового та середньострокового зберігання можуть бути реалізовані в інших моделях. Серед моделей найгірше представлені технології короткострокового зберігання. TransiEnt має найбільший вибір допоміжних послуг (резерв обертання, балансування енергії, скидання навантажень, управління введеними ресурсами, корекція коефіцієнта потужності та обмеження).

Моделей, що отримали найвищі бали у сфері об'єднання секторів, Dispa-SET, PyPSA та region4FLEX мають найвищий рівень деталізації моделювання у представленні технологій об'єднання секторів. Технологічні характеристики включають способи реалізації технологій. Ці характеристики, що відповідають згаданим вище характеристикам пропозиції, попиту і зберігання, включають дискретне розширення, згортання для технологій постачання, старіння для технологій зберігання та інші характеристики. Ці характеристики не досягають того рівня репрезентативності, якого досягають самі технології. Більше того, жодна модель не відповідає найвищому ступеню репрезентативності в цій сфері.

Щоб відповісти на конкретні дослідницькі питання за допомогою цілісного гнучкого підходу, різні моделі можна комбінувати, щоб забезпечити широке охоплення категорій. Таким чином, можна використовувати переважно одну модель з широким спектром, що охоплює майже всі категорії. Крім того, можна використовувати одну або дві моделі, які є сильними в конкретних категоріях, що недостатньо охоплені іншою моделлю.

Модель DIETER [19] на Python є потужним інструментом для аналізу енергетичних систем, особливо у контексті розвитку високої частки відновлюваних джерел енергії. DIETER - це відкрита система з вихідним кодом, спеціально розроблена для прогнозування майбутніх умов енергетичного сектору. Її головна мета полягає в мінімізації загальних системних витрат, які включають в себе як постійні, так і змінні витрати, що виникають у різних сценаріях генерації, виключення та з'єднання енергетичних секторів. Використання моделі DIETER на Python дозволяє детально аналізувати різні варіанти розвитку енергетичних систем, що робить її незамінним інструментом для прийняття стратегічних рішень у сфері енергетики.

Функціональні можливості, додані та вдосконалені в DIETERpy, надають нові інструменти для простішого та повнішого прогону сценаріїв, сприяють більш зручному конфігуруванню моделі та підвищують доступність для користувачів. У DIETERpy оригінальна алгебраїчна модель GAMS вбудована у фреймворк Python, або обгортку, яка відповідає за конгруентність моделі, визначення сценаріїв, що досліджуються, та попередню і подальшу обробку даних.

DIETERpy можливо легко встановити за допомогою менеджерів пакетів Python, і для перших запусків не потрібно глибоких знань GAMS. Модель можна конфігурувати або за допомогою графічного інтерфейсу користувача на основі браузеру, або за допомогою CSV-файлів. Для виконання стандартних сценаріїв користувачеві не потрібно змінювати код основної моделі на основі GAMS, але тільки для більш фундаментальних змін моделі. DIETERpy має процедуру постобробки даних, яка збирає результати декількох запусків моделі і робить їх доступними для подальшого аналізу в різних вихідних форматах, що дозволяє користувачам продовжувати роботу з обраними ними інструментами. Базові результати моделі також можна візуалізувати в інтерфейсі браузера.

Висновки

За результатами дослідження розглянуто наявне алгоритмічно-програмне забезпечення для моделювання процесів у енергетичних системах з використанням відновлювальних джерел енергії та активного споживача. На основі аналізу питання стратегії управління системами накопичення енергії (ESS), визначено ключові елементи та структуру систем накопичення енергії. Основною проблемою в тому, що електроенергія, вироблена за допомогою ВДЕ змінюється в часі і залежить від багатьох факторів. Проведено порівняльний аналіз стратегій ESS.

Найперспективнішою структурою розподільчої електромережі, яка дозволить краще використовувати розподілені енергетичні ресурси, включаючи ДГ (особливо на основі

відновлюваних джерел) і розподілене накопичення енергії, є електрична MicroGrid (МГ). Наведено переваги створення Microgrid та визначено основні переваги їх впровадження. Описано основні ролі накопичення енергії для задоволення потреб споживачів.

У данній статті проведено аналіз програмного забезпечення, яке використовується у моделюванні енергетичних систем та процесах пов'язаних з активним споживачем. Запропоновані найкращі моделі та комплекси програмних рішень для у різних сферах застосування. Таким чином, відкритий ландшафт моделювання енергетики надає широкий набір рішень для моделювання варіантів гнучкості в енергосистемах. Відповідний вибір залежить від поставленого дослідницького завдання.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Дерев'яно Д.Г., Белоха Г.С. Підвищення якості електропостачання у Energy Smart Community з джерелами розосередженої генерації // Вісник ВПІ. – 2021. – Вип. 5. – С. 64–70.
2. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 3. – С. 7–22.
3. Денисюк С.П., Бойко І.Ю. Підвищення енергоефективності microgrid з дизель-генераторами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 2. – С. 15–28.
4. Денисюк С.П., Коломійчук М.О. Оцінка фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 3(65). – С.18–39.
5. P. T. Moseley and J. Garcke, *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 1st ed. London, U.K.: Elsevier, 2014.
6. Conti S, Faraci G, Nicolosi R, Rizzo SA, Schembra G. Battery management in a green fog-computing node: a reinforcement-learning approach. *IEEE Access*. 2017;5:21126–38.
7. H.H. Eldeeb, S. Faddel, O.A. Mohammed, Multi-objective optimization technique for the operation of grid tied PV powered EV charging station, *Electr. Power Syst. Res.* 164 (2018) 201–211.
8. J. Hu, Y. Shan, Y. Xu, J.M. Guerrero, A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids with PV-wind-battery under variable generation and load conditions, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 104 (2019) 583–592.
9. Денисюк С.П., Стржелецьки Р., Богойко І.І., Стржелецька Н. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій в локальних системах енергозабезпечення // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2. С. 7–25.
10. Денисюк С.П., Лисий В.В. Аналіз процесів енергообміну при балансуванні режимів систем енергозабезпечення з розосередженою генерацією // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 3. С. 7–22
11. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 1. – С.7–28.
12. Денисюк С. П., Соколовський П. В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // Електрифікація транспорту. – 2018. – № 15. – С. 31–42
13. Heinisch V, Odenberger M, Göransson L and Johnsson F (2019) Prosumers in the Electricity System— Household vs. System Optimization of the Operation of Residential Photovoltaic Battery Systems. *Front. Energy Res.* 6:145. doi: 10.3389/fenrg.2018.00145
14. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Чернущук І.С., Лисий В.В. Техніко-економічні механізми розвитку локальних систем енергозабезпечення (microgrid) // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2021. № 4. С. 7–22.
15. Wu, X.; Tang, Z.; Stroe, D.-I.; Kerekes, T. Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage. *Batteries* 2022, 8, 279. <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>
16. F. Spertino, A. Ciocia, P. Di Leo, G. Malgaroli, and A. Russo, 'A Smart Battery Management System for Photovoltaic Plants in Households Based on Raw Production Forecast', *Green Energy Advances*. IntechOpen, Feb. 20, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80562.
17. BESS BASICS: BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR PV-SOLAR [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
18. OpenEnergy family, OpenEnergy Platform (OEP). URL <https://openenergyplatform.org>
19. C. Gaete-Morales, M. Kittel, A. Roth, W.-P. Schill, DIETERpy: A Pythonframework for the Dispatch and Investment Evaluation Tool with EndogenousRenewables, *SoftwareX* 15 (2021) 100784. doi:10.1016/j.softx.2021.100784.

I. Bohoiko¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-6816-6352

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMIC AND SOFTWARE SOFTWARE FOR MODELING PROCESSES IN SYSTEMS WITH ACTIVE CONSUMERS WITH PHOTOVOLTAIC GENERATION

The article considers the use of algorithmic and software in the context of smart grid development. It has been determined that energy storage systems are key elements of energy management systems for smart communities, as they allow storing energy generated by renewable energy sources (RES) and compensating for

the uneven demand for electricity. A comparative analysis of different EMS strategies that combine solar panels and batteries is carried out.

The main energy management strategies are analyzed and the advantages and disadvantages that should be taken into account when choosing them are identified. The concept of smart inverters and their integration into energy storage systems is considered. The structure of hybrid energy storage systems and the main roles of energy storage are presented. The economic benefits of implementing Microgrid and Smart Grid in the energy sector are shown. The development of integrated strategies for managing energy storage systems that take into account all aspects of electricity generation, storage and distribution in smart grids, promoting sustainable and efficient use of resources, is proposed.

The main models and frameworks used for modeling energy systems are considered and the advantages and disadvantages of the models that should be taken into account when researching clear issues in the context of energy management systems development are identified.

Keywords: *energy management, renewable energy sources, distributed generation, energy storage systems*

References

1. Denysiuk S.P., Derevianko D.G., Belokha G.S. Improving the quality of power supply in Energy Smart Community with sources of distributed generation // VPI Bulletin. - 2021. - Issue 5. - P. 64-70.
2. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks // Energy: Economics, Technology, Ecology. - 2019. - No. 3. - P. 7-22.
3. Denysiuk S.P., Boyko I.Y. Improving the energy efficiency of microgrid with diesel generators // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. - No. 2. - P. 15-28.
4. Denysiuk S.P., Kolomiichuk M.O. Evaluation of financial and technical indicators of Microgrid performance in dynamic modes // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. - No. 3 (65). - P. 18-39.
5. P. T. Moseley and J. Garche, Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, 1st ed. London, U.K.: Elsevier, 2014.
6. Conti S, Faraci G, Nicolosi R, Rizzo SA, Schembra G. Battery management in a green fog-computing node: a reinforcement-learning approach. IEEE Access. 2017;5:21126-38.
7. H.H. Eldeeb, S. Faddel, O.A. Mohammed, Multi-objective optimization technique for the operation of grid tied PV powered EV charging station, Electr. Power Syst. Res. 164 (2018) 201-211.
8. J. Hu, Y. Shan, Y. Xu, J.M. Guerrero, A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids with PV-wind-battery under variable generation and load conditions, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 104 (2019) 583-592.
9. Denysiuk S.P., Strzelecki R., Boiko I.I., Strzelecki N. Analysis of the features of effective implementation of solar power plants in local energy supply systems // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2023. № 2. С. 7-25.
10. Denysiuk S.P., Lysyi V.V. Analysis of energy exchange processes in balancing the modes of energy supply systems with dispersed generation // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2023. № 3. С. 7-22
11. Denysiuk S.P. Energy transition - requirements for qualitative changes in the development of energy // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2019. - No. 1. - P. 7-28.
12. Denysiuk S.P., Sokolovskyi P.V. Analysis of the functioning of flexible generation at the stage of transition to smart grids Smart Grid // Transport Electrification. - 2018. - No. 15. - P. 31-42.
13. Heinisch V, Odenberger M, Göransson L and Johnsson F (2019) Prosumers in the Electricity System-Household vs. System Optimization of the Operation of Residential Photovoltaic Battery Systems. Front. Energy Res. 6:145. doi: 10.3389/fenrg.2018.00145
14. Denysiuk S.P., Melnychuk G.V., Cherneshchuk I.S., Lysyi V.V. Technical and economic mechanisms for the development of local energy supply systems (microgrid) // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2021. № 4. С. 7-22.
15. Ву, Х., Танг, З., Строе, Д.-І., Керекес, Т. Огляд та порівняльне дослідження стратегій енергоменеджменту для побутових фотоелектричних систем з акумуляторними батареями. Batteries 2022, 8, 279. <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>
16. F. Spertino, A. Ciocia, P. Di Leo, G. Malgaroli, and A. Russo, "Розумна система управління батареями для фотоелектричних установок в домогосподарствах на основі прогнозу виробництва сировини", Green Energy Advances. IntechOpen, 20 лютого 2019 року. doi: 10.5772/intechopen.80562.
17. BESS BASICS: Акумуляторні системи зберігання енергії для фотоелектричних станцій [Електронний ресурс]. - 2021. - Режим доступу до ресурсу: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar>
18. OpenEnergy family, OpenEnergy Platform (OEP). URL <https://openenergyplatform.org>
19. C. Gaete-Morales, M. Kittel, A. Roth, W.-P. Schill, DIETERpy: Pythonframework для інструменту диспетчеризації та оцінки інвестицій в ендегенні відновлювані джерела енергії, SoftwareX 15 (2021) 100784. doi:10.1016/j.softx.2021.100784.

Надійшла: 03.04.2024

Received: 03.04.2024