

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

02.03 – МР. 324 «С» 2023.03.06.035 ПЗ

Вишневський Богдан Олександрович

2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 631.171:621.311

ПОГОДЖЕНО ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Директор ІНІ енергетики, Завідувач кафедри інженерії
автоматики і енергозбереження енергосистем

/Каплун В.В./

/Антипов Є.О./

(підпис)

(підпис)

«_____» 2023 р. «_____» 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження режимів роботи системи акумулювання
електричної енергії від сонячної генерації»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доц.

Усенко С.М.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент

Гай О.В.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Виконав Вищневський Б.О.

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
НАПРЯМОК ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інженерії
енергосистем

К.Т.Н., доцент Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)

« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Вишневський Богдан Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)

Програма підготовки освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи: «Дослідження режимів роботи системи
акумуляції електричної енергії від сонячної генерації»
затверджена наказом ректора НУБіП України від 06.03.2023 р. № 324 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 31 жовтня 2023р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: фотоелектрична батарея 1 МВт, BP Solar.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- проаналізувати стан досліджень систем акумуляції електричної енергії з літературних джерел, проаналізувати роботу системи акумуляції електричної енергії від сонячної генерації;
- дослідити режими роботи системи акумуляції електричної енергії від сонячної генерації;

Перелік графічного матеріалу: презентація у вигляді слайдів програмного забезпечення MS PowerPoint.

Дата видачі завдання: "04" лютого 2023р.

Керівник магістерської роботи _____

Гай О.В.

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

Вишневський Б.О.

(підпис)

(ПІБ)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

НУБІП України
ВДЕ – ВИДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ
СЕС – СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

ПЗ – ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
НУБІП України
ФЕС – ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ
ПК – ПЕРСОНАЛЬНИЙ КОМП'ЮТЕР
HRES – ГІБРИДНА ЕНЕРГОСИСТЕМА З ВДЕ

АКБ – АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ
НУБІП України
ЗРП – ЗАРЯДНО-РОВНЯЮЩИЙ ПРИБІР
СНЕ – СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ
PCS – СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ
BESS – АКУМУЛЯТОРНА СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

НУБІП України
FRU – СИСТЕМА БЕСПЕРЕБІЙНОЇ РОБОТИ
РОІ – ТОЧКА З'ЄДНАННЯ
МРР – ТОЧКА МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ЗМІСТ

НУБІП України	4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	9
1.1 Аналіз літературних джерел з питання акумулювання електричної енергії від сонячної генерації	9
1.2. Режими роботи систем акумулювання електричної енергії	16
1.3. Обґрунтування методики дослідження	18
Висновки до розділу 1	19
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	20
2.1 Аналіз роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації	20
2.2 Математична модель роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації	23
Висновки до розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	29
3.1 Налаштування параметрів імітаційної моделі	29
3.2 Імітаційне моделювання роботи системи акумулювання в середовищі MATLAB Simulink	31
3.3 Аналіз результатів моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії	37
3.4 Розробка програмного забезпечення системи управління акумулювання електричної енергії	37
Висновки до розділу 3	39

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ
ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ
І АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ..... 41

4.1 Математичне моделювання сонячної електричної енергії та системи
зберігання батареї..... 44

4.2 Система акумулювання енергії..... 46

4.3 Контролер для фотоелектричного перетворювача постійного струму..... 47

4.4 Контролер для перетворювача BESS AC/DC..... 49

4.5 Контролер для FRT-системи сонячної генерації з інтегрованою
енергосистемою..... 51

Висновки до розділу 4..... 57

ВИСНОВКИ..... 58

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 60

ДОДАТКИ

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

НУБІП України

Актуальність теми дослідження. Використання сонячної енергії ефективно сприяє зменшенню викидів парникових газів, відповідно сповільнює процес зміни клімату. Зі швидким розвитком відновлювальної енергетики постає декілька ключових питань, пов'язаних із залежністю від параметрів навколишнього середовища та недостатньою кількістю резервів регулюючих потужностей в деяких регіонах України. Сонячна енергія генерується лише вдень і дуже залежить від хмарності, що може призвести до недостатності постійного доступу до електроенергії. Для рішення цієї проблеми потрібні системи зберігання, які можуть накопичувати надлишкову енергію в періоди виробництва і використовувати її в періоди зменшеної генерації.

Використання сонячної енергії швидко зростає як в Україні так і в цілому у світі, особливо завдяки зниженню вартості сонячних панелей. Системи акумулювання сонячної енергії дозволяють підприємствам стати менш залежними від громадських електромереж, особливо в регіонах з нестабільним енергопостачанням. Це важливо в умовах, коли електромережі можуть піддаватися навантаженню або ризикам збоїв. Сучасні системи акумулювання електроенергії – це один зі шляхів негайного рішення існуючої проблеми відсутності достатніх потужностей для надання додаткових послуг в ОЕС України [1]. Додатковими послугами є системи акумулювання електроенергії що приймають участь у балансуванні електроенергії.

Дослідження режимів роботи систем акумулювання електричної енергії від сонячної генерації є дуже актуальною та важливою, оскільки воно сприяє розвитку ефективних та стійких систем відновлювальної енергії та зростанню енергоефективності та сталості глобальної електроенергетичної системи.

Протягом останніх років активно вдосконалюються методи та системи акумулювання електричної енергії. Вони здатні оптимально функціонувати в змінюваних умовах навколишнього середовища, мають високу стійкість та надійність. Дослідженнями систем акумулювання електроенергії займалися

українські дослідники: А. В. Івахнов, О.П. Лазуренко, С. О. Федорчук, В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк, І. М. Буратинський, П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. В. Сікорська, М.П. Кузнецов, О.А. Мельник, В.М. Смертюк та інші.

Мета дослідження – дослідження режимів роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації.

Для досягнення вказаної мети розв'язуються наступні основні задачі:

- проаналізувати стану досліджень систем акумулювання електричної енергії від сонячної генерації з літературних джерел та обґрунтувати методики дослідження;

- проаналізувати роботу системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації;

- розробити методику дослідження;

- дослідити режими роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації;

- провести моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії в середовищі MATLAB Simulink та проаналізувати результати моделювання;

- розробити рекомендації покращення роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації.

Об'єкт дослідження – система акумулювання електричної енергії

Предмет дослідження – режими роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації.

Наукова новизна роботи. У дослідженні проведено літературний огляд існуючих систем акумулювання електроенергії, визначені їх позитивні та негативні сторони, практичне застосування. Проведено моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії і за його результати розроблені рекомендації покращення роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

1.1 Аналіз літературних джерел з питання акумулювання електричної енергії від сонячної генерації

Електроенергія має свої особливості, які обумовлені її природою. Однією з цих властивостей є те, що її неможливо накопичувати у великих кількостях для подальшого використання; отже генерація та споживання електроенергії відбуваються одночасно.

Основний принцип операційної роботи будь-якої енергетичної системи полягає в постійному збалансуванні попиту та пропозиції електроенергії. Цей баланс забезпечується шляхом активного управління навантаженням і генерацією електроенергії, щоб гарантувати надійну поставку енергії до споживачів. Порушення цього балансу може призвести до змін частоти мережі та рівнів напруги, що може призвести до відключення споживачів або пошкодження обладнання.

Ефективність забезпечення різних графіків навантаження в енергетичній системі залежить від того, наскільки добре адаптовані інфраструктура та генеруючі блоки станцій до цих змін у споживанні електроенергії.

Потреби споживачів у електроенергії виникають з різних причин, таких як їхні власні робочі режими та технологічні процеси на підприємствах.

Зазвичай споживачі не відомі виробникам електроенергії, які режими вони планують використовувати, і, відповідно, які кількості електроенергії їм потрібні. Основним завданням виробників електроенергії є задоволення потреб споживачів. Для досягнення цього завдання важливо мати можливість швидко та гнучко реагувати на зміни в попиті споживачів, оскільки попит на електроенергію може бути нерівномірним і змінюватися від часу до часу.

Основними перевагами відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), в порівнянні з традиційними не відновлювальними джерелами, є:

– практично невичерпні ресурси;
 – зниження негативного впливу на довкілля, включаючи викиди різних забруднюючих речовин, парникових газів, радіоактивне і теплове забруднення тощо.

Основними факторами, що обмежують використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії, є:

– мала густина енергетичного потоку, яка складає, наприклад, для сонячної енергії на поверхні Землі $1,36 \cdot 10^{-3}$ МВт/м²;

– значна нерівномірність вироблення енергії в часі та її використання;

– відносно висока капіталоемність енергетичних установок і вартість виробленої електроенергії.

Сонячна енергія в контексті її використання є одним з ВДЕ нашої цивілізації. Сонячне світло не потребує видобутку та транспортування, воно має низьку масу, не видає шуму і, як правило, є безпечним для навколишнього середовища. Використання сонячної енергії не призводить до прямого викиду відходів та не порушує тепловий баланс планети. Таким чином, сонячна енергія суттєво відрізняється від традиційних джерел енергії за своєю властивістю бути екологічно безпечною у хімічному, тепловому та інших аспектах забруднення навколишнього середовища. Всі ці якості роблять її унікальним вибором для основної ролі в енергетичній стратегії нового тисячоліття [2].

Сонячна електростанція має обмеження в своїй роботі через неможливість функціонування вночі і дуже продуктивну роботу в ранкових та вечірніх сутінках. Це особливо критично, оскільки пік електроспоживання відзначається в самі вечірні години. Крім того, потужність електростанції може різко коливатися через зміни погоди. Для подолання цих обмежень потрібно використовувати ефективні системи акумулювання енергії.

Також актуальними є питання вирівнювання графіків навантаження в електромережі за допомогою компенсації піків споживання енергії в великих енергетичних системах, вирішення проблеми коливань потужності, стабілізації систем розподіленої генерації з низькими інерційними характеристиками, а

також інші завдання, які пов'язані з необхідністю підвищення ефективності використання енергії.

Одним із способів підвищення результативності використання електричної енергії є використання систем, які зберігають енергію і постачають її в мережу за необхідністю. До цього часу були розроблені різні системи для накопичування та перетворення енергії, для оптимізації робочих режимів обладнання та для живлення споживачів з особливими потребами. Крім того, накопичувачі електричної енергії розглядаються як ключовий компонент перспективних інтелектуальних мереж нового покоління, які вміють активно адаптуватися до змін у попиті та умовах виробництва.

В дослідженні [3] автори наголошують, що акумулювання енергії в енергосистемах, що включають відновлювані джерела енергії (ВДЕ), виконує декілька важливих завдань:

- допомагає вирівнювати загальний режим балансу потужності;
- дозволяє уникнути втрат надлишкової енергії та недопущення втрати споживання, коли енергії недостатньо.

Генераційні режими сонячних електростанцій характеризуються значними змінами в поточній потужності, і ці зміни можуть відбуватися впродовж декількох хвилин. Тому при виборі систем акумулювання необхідно враховувати наступні фактори:

- нерівномірність генерації та споживання;
- можливий обсяг надлишкової енергії;
- швидкість зміни балансу потужностей;
- ефективність реакції акумуляторів на ці зміни.

Структуру сонячної електростанції (СЕС) показано на рис. 1.1. Навантаження сонячної електростанції: споживачі змінної та постійної напруги.

Для забезпечення енергією в темний час доби або в період недостатньої генерованої енергії, необхідно використовувати акумуляторну батарею (АКБ).



Рисунок 1.1 – Структура сонячної електростанції [2]

Існують різні способи класифікації накопичувачів, але найзручнішим для порівняння є розділення їх на електрохімічні та фізичні системи.

До першого типу належать системи накопичувачів, які перетворюють електричну енергію в хімічну енергію речовин, такі як акумуляторні батареї (АКБ) і молекулярні конденсатори, також відомі як супер-конденсатори і іоністори.

До другого типу відносяться системи накопичувачів, які використовують гравітацію, електромеханічні перетворювачі енергії, які співпрацюють з інерційними механічними накопичувачами (кінетичні накопичувачі енергії), а також накопичувачі стисненого повітря і надпровідникові індукційні системи накопичувачів енергії.

Будь-які електричні акумулятори розглядаються як джерела постійного струму багаторазового використання з можливістю виконання оборотних хімічних процесів шляхом проведення багаторазових циклів заряду і розряду.

Існує кілька типів АКБ, які застосовуються з СЕС:

- свинцево-кислотні (Absorbent Glass Mat (AGM) технологія) або гелеві (GEL) акумулятори;
- літій-іонні (Li-ion) та літій-полімерні (Li-pol) акумулятори;
- нікель-кадмієві (NiCd) та нікель-металогідридні (NiMH).

До основних експлуатаційних параметрів акумулятора відносять:

- ємність;
- питому потужність;

– саморозряд,
– температурні і атмосферні режими.

Багато дослідників зазначають, що використання гібридних систем відновлюваної енергії може мати достатню надійність, економічну та екологічну ефективність, особливо для децентралізованих споживачів [3, 4, 5].

Відсутність визначеності у відношенні до режимів генерації та споживання електроенергії в обмежених гібридних енергетичних системах призводить до підвищеної необхідності в резервних або акумулюючих потужностях [6].

На сучасному етапі існує велика кількість систем акумулювання основними з яких, за принципом роботи та тривалістю зберігання, є [7]:

1) Механічні накопичувачі:
– гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС, PHS, довгострокове зберігання);

– невмоаккумулятори (CAES, довгострокове зберігання);
– супермаховики (Fly wheels, короткострокове зберігання).

2) Електрохімічні накопичувачі:
– акумуляторні батареї або системні накопичувачі електроенергії (СНБ, довгострокове зберігання);

– паливні комірки (fuel cells, довгострокове зберігання);
– проточні редокс-акумулятори (ПРА, Flow battery, довгострокове зберігання);

– суперконденсатори (super capacitors, короткострокове зберігання).

Більшість електрохімічних накопичувачів мають спільні серйозні недоліки, включаючи:

– високі витрати на будівництво та експлуатацію систем на їх основі,
– обмежений цикл заряду/розряду і необхідність дотримання регламенту зарядки/розрядки (крім суперконденсаторів);

– потребу в регулярному обслуговуванні та перевірці систем.

– неспроможність витримувати короткі сплески споживання (крім суперконденсаторів);

– спеціальні екологічні вимоги щодо їх експлуатації та утилізації.

3) Електромагнітні накопичувачі:

– індуктивні надпровідникові накопичувачі (SIES, довгострокове).

В Додатку А наведений порівняльний аналіз існуючих накопичувачів електричної енергії.

На рисунку 1.2 наведено системи накопичення електроенергії за тривалістю енергопостачання та потужності.

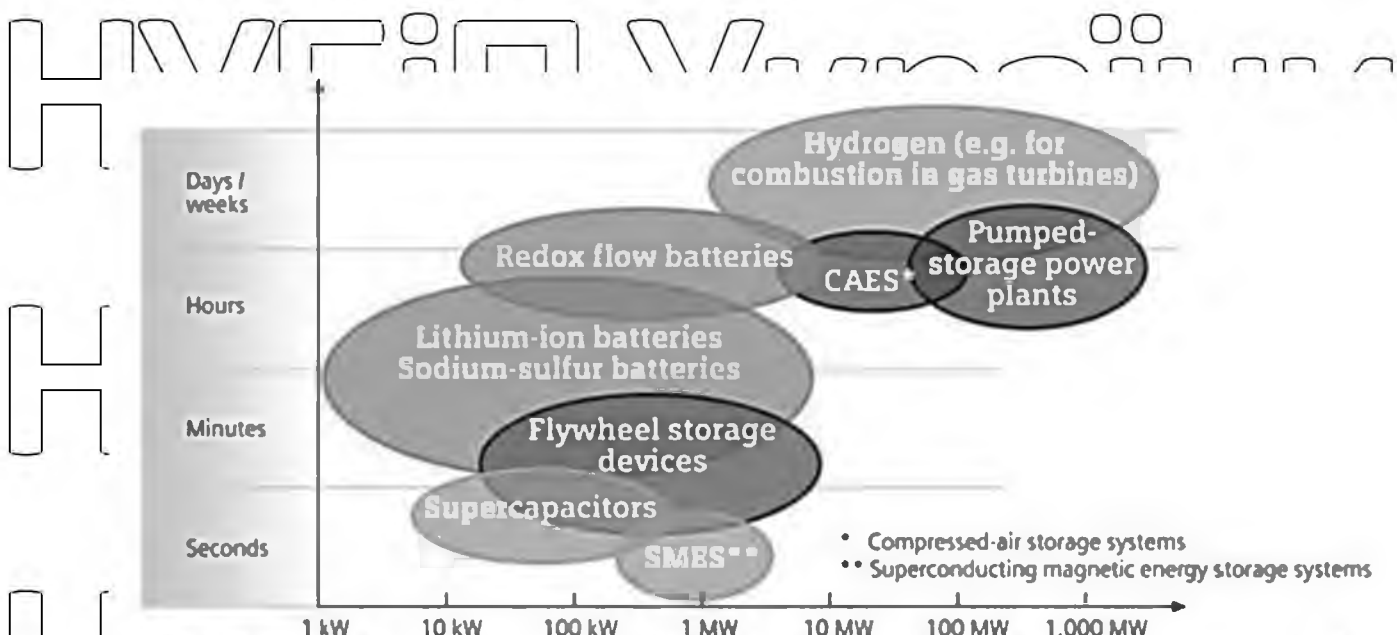


Рисунок 1.2 – Системи накопичення електроенергії за тривалістю енергопостачання та потужності [7]

В дослідженні [8] вказується, що модернізація існуючих СЕС шляхом додавання до них систем акумулювання енергії з перетворювачами, що виконують функцію зарядно-розрядного пристрою (ЗРП) є актуальною темою для дослідження.

При виборі топології ЗРП необхідно орієнтуватись на такі вимоги

– можливість двоспрямованого передавання енергії;

- відносно висока робоча напруга до 1000 В, що задається робочою напругою інверторів для сонячних електростанцій;

- потужність від одиниць до десятків кіловат.

Для зменшення рівня динамічних статичних втрат доцільно використовувати модульну топологію перетворювача з чергуванням фаз, структура якого показана на рис. 1.3.

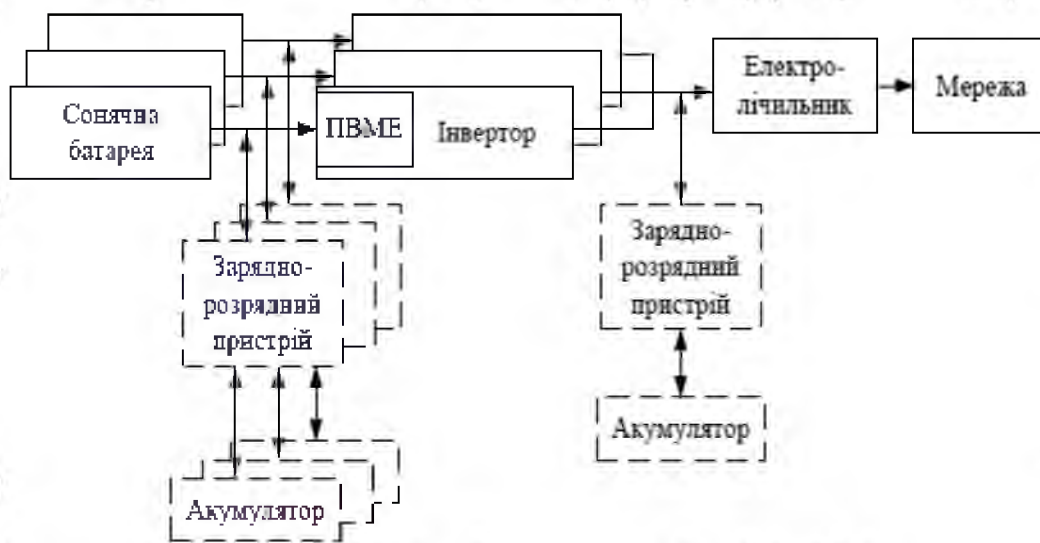


Рисунок 1.3 – Можливі точки під'єднання ЗРП [9]

В цитованих літературних джерелах розглядаються конкретні системи й типи обладнання акумулювання електричної енергії від сонячної генерації. Актуальним є створення адекватної математичної моделі, в якій режими роботи системи були б формалізованими і допускали широкий спектр можливостей для обрання найбільш оптимальних варіантів.

Акумулювання енергії можуть знаходити застосування в різних областях електроенергетики в Україні, включаючи:

- зняття перевантажень на лініях електропередачі та аварійних передач в періоди максимальних навантажень на електромережі;

- підвищення статичної та динамічної стійкості системи електропостачання;

- забезпечення аварійного резерву для енергосистем України;

– використання разом з мобільними газотурбінними електростанціями або як їх альтернатива;

– використання разом з дизель-генераторними установками або як їх альтернатива;

– об'єктах нафтогазової та хімічної промисловості для забезпечення стабільності енергопостачання;

– в регіонах України, де відсутнє централізоване електропостачання, для надійного живлення;

– для внутрішнього використання електростанцій і підстанцій, включаючи резервування та безперебійне живлення важливих систем енергоблоків та інше;

– в об'єктах з використанням відновлюваних джерел енергії для збереження та регулювання виробництва електроенергії.

1.2. Режими роботи систем акумулювання електричної енергії

Для характеристики систем акумулювання енергії, незалежно від використовуваної при цьому технології, застосовується ряд загальноприйнятих показників [10]:

– енергетична ємність $A_{ак}$ – кількість збереженої енергії, яка може бути перетворена в електричну енергію;

– номінальна або розрядна потужність P_n – максимальна потужність, яка може накопичуватися акумулюючим пристроєм або видаватися їм в мережу;

– час розряду $t_p = A_{ак}/P_n$ – час, протягом якого накопичувач може видавати в мережу номінальну потужність;

– загальна ефективність $\eta = \eta_{зар} \eta_{разр}$ – характеризує ефективність процесів заряду ($\eta_{зар}$) і розряду ($\eta_{разр}$) накопичувача, тобто, по суті, враховує втрати енергії, які відбуваються при реалізації зазначених процесів;

– життєвий цикл, що характеризує максимальне число циклів заряду-розряду за час, на який розрахована система, або номінальний термін служби пристрою.

Системи акумулювання електричної енергії можуть працювати в різних режимах. Робота пристрою акумулювання енергії відповідно до цієї стратегії може бути описана рівняннями.

1) Зарядка (заповнення): система акумулювання отримує електричну енергію з джерела, такого як сонячні панелі або інші джерела виробництва, для зберігання цієї енергії у внутрішніх акумуляторах чи батареях.

$$P_n^{IN} = \min[(F_n^L - C_{RL}), P_{ESS}^{IN}, (A_{max} - A_{n-1})/\Delta t] \quad (1.1)$$

У цьому випадку, коли виникає перевантаження лінії ($F_n^L - C_{RL} > 0$), при дотриманні обмеження задається величиною F_{ESS}^{IN} та за наявності можливості здійснюється додаткова зарядка акумулятора.

2) Розрядка: під час цього режиму система видає накопичену енергію для живлення електричних пристроїв чи навантаження.

$$P_n^{OUT} = \min[(C_{RL} - F_n^L), P_{ESS}^{OUT}, (A_{n-1} - A_{min})/\Delta t] \quad (1.2)$$

За відсутності перевантаження та обмеження рівня розрядки величиною F_{ESS}^{OUT} , а пропускну здатність значенням $(C_{RL} - F_n^L)$, щоб уникнути можливих перевантажень, здійснюється розрядка батареї.

3) Режим зберігання: в деяких випадках система може перебувати у режимі зберігання, коли немає потреби ні в зарядці, ні в розрядці. У цьому режимі енергія зберігається для майбутнього використання.

4) Автоматичний режим: деякі системи акумулювання можуть мати автоматичні режими, які включаються або вимикаються автоматично в залежності від певних умов, таких як рівень заряду чи рівень споживання.

5) Режим регулювання: деякі системи використовуються для регулювання напруги та частоти в електричній мережі, забезпечуючи стабільність системи.

Описана модель може бути застосована і для вирішення завдань підтримки необхідного режиму напруги, підвищення надійності, зниження максимуму навантаження. Після визначення режиму зарядки/розрядки відстежується та коригується відповідно до погодинного графіка зміни навантаження з метою мінімізації втрат енергії та пом'якшення впливу коливань вихідної потужності з боку відновлюваних джерел енергії.

1.3. Обґрунтування методики дослідження

Показники режиму систем електропостачання зв'язані між собою співвідношеннями, у які входять параметри окремих елементів системи з урахуванням схем їх з'єднання, параметри джерел живлення й характеристики навантажень. Параметри режиму систем електропостачання визначаються розрахунковим або експериментальним методами.

В даному дослідженні обрані наступні методики дослідження:

1) Аналіз даних: обробка та аналіз зібраних даних для виявлення патернів та встановлення взаємозв'язків між різними режимами роботи системи акумулювання та сонячної генерації.

2) Моделювання енергетичних балансів: розрахунок та аналіз енергетичних балансів для різних режимів роботи системи з метою визначення її продуктивності та ефективності.

3) Моделювання та симуляція: використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення математичних моделей системи акумулювання електроенергії та сонячної генерації, таких як MATLAB Simulink, PVSyst та інших. Це дозволяє вивчити та аналізувати різні режими роботи системи без необхідності будівництва реального прототипу.

Висновки до розділу 1

Впровадження систем акумулювання енергії слід розглядати як важливий технічний захід для підвищення загальної ефективності сучасних систем розподілу електричної енергії. Обґрунтований вибір параметрів і місць розташування пристроїв накопичення енергії сонячної генерації допомагає вирішити проблему перефазування пікових навантажень, знижує втрати електричної енергії, і в значній мірі врегульовує або принаймні пом'якшує негативні наслідки, які можуть виникнути при інтеграції нерегульованих джерел розподіленої генерації в електричні мережі. Ця ініціатива також підвищує надійність постачання електроенергії та забезпечує високу якість електричної енергії для кінцевих користувачів.

Огляд наукових джерел вказує на те, що гібридні системи для зберігання енергії є напрямком, що динамічно розвивається, особливо за наявності зростаючої потужності відновлювальних джерел енергії, яка піддана впливу багатьох факторів. Ця проблема особливо актуальна для регіонів, де існує велика залежність від традиційної великомасштабної генерації енергії, що породжує складність в забезпеченні необхідної рівноваги та може призводити до дефіциту резервних потужностей.

Обґрунтований вибір параметрів і режимів роботи систем акумулювання електричної енергії дозволяє вирішити проблему проходження пікових навантажень, знизити втрати електричної енергії, значною мірою усунути або принаймні пом'якшити негативні ефекти, які можуть виникнути при інтеграції в електричні мережі недиспетчеризованих джерел розподіленої генерації, підвищити надійність електропостачання та забезпечити належну якість електричної енергії, що постачається споживачам.

Для вирішення цих проблем важливо розробити математичні та комп'ютерні моделі, які дозволять вивчити оптимальні параметри режимів роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації і взаємодію різних типів енергетичних накопичувачів.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

2.1 Аналіз роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації

Головні тенденції у світовій енергетиці – розширення використання відновлюваних джерел енергії, розвиток інтелектуальних систем з активною адаптивною мережею та інші, зумовлені розвитком технологій виробництва та постачання електроенергії, в остаточному підсумку повинні відповідати зростаючим вимогам споживачів щодо підвищення надійності та якості електропостачання.

Система акумулювання електричної енергії може бути використана, як джерело керованої потужності, що підвищує стабільність паралельної роботи мережі та приймає надлишкову потужність під час піків генерації.

Робота установок генерації сонячної енергії залежить від погодних умов і часу доби, що є основною проблемою в галузі сонячної енергії. Використання систем акумулювання електричної енергії дозволяє узгоджувати графіки постачання енергії з графіками споживання. У періоди, коли генерація сонячної енергії перевищує потреби, системи накопичувачів заряджаються, а потім розряджаються в періоди, коли генерація енергії недостатня для задоволення потреб споживачів.

Система акумулювання електричної енергії включає в себе три основні підсистеми:

- конвертування енергії;
- акумулювання енергії;
- управління акумулятором.

Графік роботи системи накопичення електроенергії (СНЕ) в режимі обмеження максимальної споживаної потужності наведений на рис. 2.1.

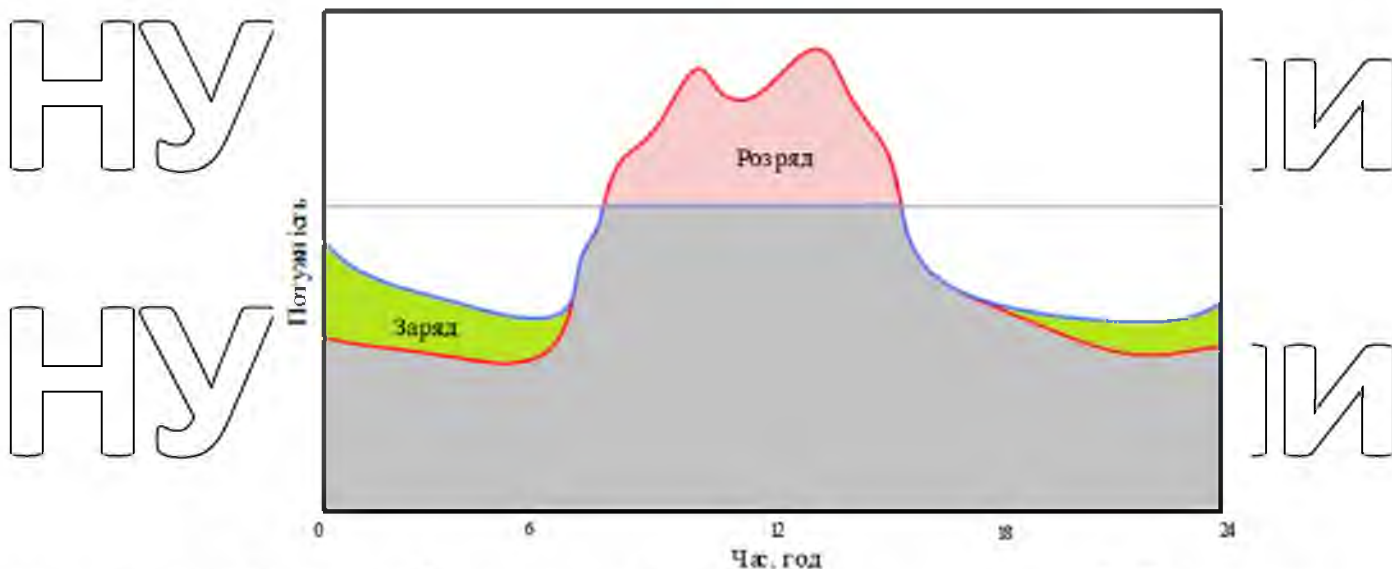


Рисунок 2.1 – Графік роботи системи накопичення електроенергії (СНЕ) в режимі обмеження максимальної споживаної потужності [11]

Підсистема конвертування енергії включає в себе трифазний мостовий перетворювач, який з'єднує акумуляторну батарею з електричною мережею. Для моніторингу та вимірювання характеристик енергетичної системи, таких як напруга, струм і температура, використовується система управління батареєю (BMS – Battery Management System).

Недоцільний рівень заряду в акумуляторній підсистемі зберігання енергії може виявитися як надмірний заряд чи перерозряд, і це може призвести до пошкодження системи, скорочення її терміну служби або, в екстремальних випадках, створити ризик пожежі чи вибуху.

Підсистема управління акумулятором буде обмінюватися інформацією з перетворювачем стосовно рівня заряду і стану системи в цілому. Якщо рівень заряду досягне 100%, то система акумуляування енергії автоматично припинить процес заряджання, щоб запобігти можливим пошкодженням акумуляторів. З іншого боку, якщо рівень заряду спаде до 0%, система акумуляування енергії також автоматично припинить процес розряджання, щоб уникнути повної розрядки акумуляторів.

Залежно від функцій і структури системи накопичення енергії (СНЕ), а також її комплектації і конструктивного виконання, можливі різні варіації. Але в усіх випадках реалізації СНЕ обов'язковим є проведення техніко-економічного обґрунтування через моделювання.

Вибір акумуляторної система накопичення енергії (BESS) залежить від розв'язуваних завдань, основні технічні вимоги до них наступні:

- функціональність (покриття пікових навантажень, забезпечення необхідної частоти, режим роботи віртуальної синхронної машини та ін.);

- параметрами підсистеми акумуляції електричної енергії (енергоємність, потужність та ін.);

- параметрам підсистеми перетворення енергії (час відгуку, контроль статизму, потужність, потужність короткого замикання та ін.);

- параметрам підсистеми захисту.

Вимог до відповідних робочих характеристик СНЕ:

- нормована вхідна та вихідна потужність;

- короткочасна вхідна і вихідна потужність;

- нормована енергоємність;

- час відгуку;

- енергоспоживання допоміжною підсистемою;

- саморозряд;

- ефективність заряду-розряду;

- ефективність заряду-розряду робочого циклу;

- час відновлення;

- значення показників робочих характеристик наприкінці терміну служби.

НУБІП України

2.2 Математична модель роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації

Математична модель за своєю суттю це алгоритмом керування СЕС із системою акумулювання електричної енергії та реалізує наступні основні принципи [12]: заряджання акумуляторних батарей протягом періоду максимального сонячного опромінювання здійснюється до максимально можливого рівня, що відповідає наявній ємності системи акумулювання, а якщо обсяг генерації електроенергії сонячною електростанцією є меншим за доступну ємність, то вся вироблена електрична енергія накопичується для подальшого розряджання; потужність розряджання акумуляторних батарей задається екзогенними коефіцієнтами для годин, які не співпадають із періодом максимального сонячного опромінювання фотоелектричних модулів, тобто здійснюється перенесення «надлишкової» потужності в інші зони добового графіка електричних навантажень.

Побудова моделі вимагає глибоких знань щодо компонентів системи, таких як контролер заряду-розряду, проектування системи перетворення енергії та характеристик акумулятора.

Обсяги виробництва електричної енергії на СЕС для однієї доби визначаються сумою потужності відпуску електричної енергії в енергосистему для кожного часового інтервалу в межах цієї доби:

$$E_n^{PV} = \sum_{t=1}^T p_{nt}^{PV} \cdot \Delta t, \quad (2.1)$$

де E_n^{PV} – обсяги виробництва електричної енергії на СЕС для n доби року,

МВт·год;

T – кількість відрізків вимірювань протягом доби;

E_{nt}^{PV} – потужність відпуску електричної енергії на СЕС для відрізка вимірювань t доби n , МВт;
 Δt – тривалість кожного відрізка вимірювань.

Ємність заряджання СЧЕ визначається для доби із максимальними обсягами виробництва електричної енергії протягом року, виходячи із заданої частки обсягів електричної енергії, які переносяться у часі.

$$C^{BESSchrg} = \max_{n=1+N} \{E_n^{PV}\} \cdot w, \quad (2.2)$$

де $C^{BESSchrg}$ – ємність заряджання САЕ, МВт·год;
 N – кількість днів року;
 w – задана частка обсягів електричної енергії, які переносяться у часі, в.о.

Ємність розряджання САЕ залежить від добових обсягів виробництва електричної енергії на СЕС та визначеної ємності її заряджання із урахуванням ефективності перетворення:

$$C_n^{BESSdisch} = \begin{cases} E_n^{PV} : E_n^{PV} \leq C^{BESSchrg} \\ C^{BESSchrg} \cdot \eta^{RTE} : E_n^{PV} > C^{BESSchrg} \end{cases}, \quad (2.3)$$

де $C_n^{BESSdisch}$ – ємність розряджання САЕ для доби n , МВт·год;
 η^{RTE} – ефективність перетворення САЕ в.о.

Алгоритм управління гібридною електростанцією передбачає, що коли кількість електроенергії, виробленої сонячною електростанцією (СЕС), перевищує доступну ємність для заряджання, частина електроенергії, що надійшла, надлишково направляється в електричну мережу, а інша частина зберігається для майбутнього використання, переносячи часовий інтервал завдяки процесу заряджання та розряджання акумуляторних батарей (АБ).

Тому година пікової потужності ГЕН для кожної доби року визначається індивідуально:

$$\tau_n = \max_{t=16+24} \{P_{nt}^{DEM}\}, \quad (2.4)$$

де τ_n – година пікової потужності ГЕН для доби n , год;
 $t = 16 - 24$ – діапазон годин пікової потужності ГЕН;
 P_{nt}^{DEM} – потужність ГЕН для години t доби n , МВт.

Розрядження САЕ в межах однієї доби відбувається протягом 5 год (початок розрядження за 2 год та завершення розрядження через 2 год після піку ГЕН). Тому із урахуванням цього часу, потужність розрядження САЕ для

кожної години доби визначається:

$$P_{nt}^{BESS} \cdot \Delta t = C_n^{BESS} \cdot k_t, \quad (2.5)$$

$$\tau = (\tau_n - 2) \div (\tau_n + 2), \quad (2.6)$$

де P_{nt}^{BESS} – потужність розрядження САЕ у годину τ із визначених годин пікової потужності ГЕН для доби n , МВт;

k_t – експоненціально заданий коефіцієнт розрядження САЕ для кожної години τ .

Заданою умовою спільної роботи СЕС та САЕ є те, що в межах однієї доби здійснюється один повний цикл зарядження/розрядження АБ, тому сума коефіцієнтів розрядження має дорівнювати «1»:

$$\sum_{t=\tau_n-2}^{\tau_n+2} k_t = 1. \quad (2.7)$$

При взаємодії сонячної електростанції (СЕС) та системи акумулювання енергії (САЕ) щоденно формуються два основних режими роботи в залежності від обсягів виробництва електроенергії.

Режим №1 передбачає, що всю електроенергію, вироблену СЕС, зберігається в акумуляторних батареях для подальшого використання після заряджання.

Режимі №2 – частина електроенергії, вироблена СЕС, переноситься в часі за допомогою процесу заряджання і розряджання акумуляторів, тоді як інша частина електроенергії безпосередньо надходить в енергосистему.

Для режиму №2 потужність відпуску електричної енергії з СЕС при спільній роботі з САЕ визначається з умови:

$$P_{nt}^{PVout} = \begin{cases} 0: E_n^{PV} \leq P_n^{CL} \\ P_n^{PV} - P_n^{CL}: P_n^{PV} > P_n^{CL} \end{cases}, \quad (2.8)$$

де P_{nt}^{PVout} – потужність відпуску електричної енергії з СЕС при спільній роботі з САЕ у годину t доби n , МВт;

P_n^{CL} – потужність обмеження відпуску електричної енергії з СЕС напряму в енергосистему для доби n , МВ.

Потужність обмеження відпуску електричної енергії з СЕС в енергосистему режиму №2 є постійною величиною в межах однієї доби, а для режиму роботи №1 вона дорівнює нулю. Умовою визначення потужності обмеження відпуску електричної енергії в енергосистему, для кожної доби, є досягнення балансу між різницею обсягів виробленої/відпущеної електричної енергії та ємністю заряджання САЕ із урахуванням ефективності перетворення:

$$\sum_{t=1}^T P_{nt}^{PV} \cdot \Delta t - \sum_{t=1}^T P_{nt}^{PVout} \cdot \Delta t = C^{BESSchrg} \cdot \eta^{RTE}, \quad (2.9)$$

Сумарна потужність відпуску електричної енергії в енергосистему при спільній роботі СЕС та САЕ P_{nt}^{PVout} для кожної години доби визначається як сума потужності відпуску електричної енергії в енергосистему із СЕС, враховуючи заряджання АБ, та потужність розряджання САЕ:

$$P_{nt}^{SYSout} = P_{nt}^{PVout} + P_{nt}^{BESS} \quad (2.10)$$

Для побудови добових профілів на основі математичної моделі було використано фактичні дані погодинної потужності виробництва електричної енергії на СЕС в ОЕС України за 2022 р.

При моделюванні враховувалась ефективність перетворення САЕ – 95% та екзогенно задані коефіцієнти розряджання АБ:

$$k_{r_{n-2}} = k_{r_{n+2}} = 0,15;$$

$$k_{r_{n-1}} = k_{r_{n+1}} = 0,22;$$

$$k_{r_n} = 0,26.$$

Отримані добові профілі режиму № 1 спільної роботи СЕС та АБ для доби з мінімальними обсягами виробництва електричної енергії протягом року (за даними для 16 лютого) та режиму №2 для доби з максимальними обсягами виробництва електричної енергії протягом року (17 жовтня).

Алгоритм управління та структурної схеми системи автоматичного управління є конкретними науково-технічними завданнями, особливо коли мова йде про САУ для акумулювання електричної енергії, яка працює в складі об'єкта сонячної енергетичної системи. Для такої САУ можна виділити наступні головні завдання:

- стабілізація активної потужності на середньо-цикловому рівні;
- забезпечення необхідних показників якості електроенергії в перехідних процесах;
- забезпечення стійкої роботи системи в перехідних та сталих режимах роботи.

Для сонячних енергетичних систем зі змінними асинхронними навантаженнями, однією з ключових задач є стабілізація напруги на шинах, наряду зі стабілізацією активної потужності на середньо-цикловому рівні.

Аналіз різних методів управління потужністю акумуляторної системи накопичення енергії (BESS) показав, що серед обраних перспективних схемних рішень, найбільш перспективним для управління як активною, так і реактивною потужністю є BESS на основі перетворювача, підключеного до мережі, спроектованого з урахуванням можливостей FRT-системи.

Висновки до розділу 2

В даному розділі було розглянуто параметри, необхідні для моделювання роботи систем акумулювання електричної енергії.

Для моделювання роботи системи акумулювання енергії необхідно враховувати різні режими роботи СЕС і параметри, що впливають на її ефективність та продуктивність. Ці параметри включають ємність, потужність, ефективність зарядки та розрядки, час зарядки та розрядки, втрати енергії та

інші. Витрати електричної енергії під час процесів зберігання та використання є значущим показником у моделюванні систем накопичення енергії. Зменшення цих втрат сприяє підвищенню продуктивності та ефективності системи.

Розробка моделі системи акумулювання електричної енергії буде зроблена у програмному середовищі MATLAB/Simulink. Для виконання моделювання використовується логіко-числовий підхід, який спрощує виконання симуляції, уникаючи складності в імплементації електронних схем, алгоритмів управління і довгих розрахунків. Це спрощує процес моделювання завдяки застосуванню простих логічних і математичних функцій.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1 Налаштування параметрів імітаційної моделі

Керування системою акумулювання електричної енергії здійснюється за допомогою контролера заряду-розряду акумуляторної батареї. Налаштування роботи контролера ведеться по параметру потужності заряду (кВт). Значення цього параметру необхідно закласти в допоміжну потужність системи BESS для

забезпечення бажаної потужності заряду або розряду

В ситуації, коли навантаження, що використовується споживачами, нижче налаштування заряду, система перетворення електричної енергії запустить режим поточного заряджання батареї від мережі.

Системою рівнянь (3.1) визначається режим ввімкнення та вимкнення акумуляторної батареї. Потужність заряду віднімається від потужності споживання навантаження, в результаті система буде працювати за такими протоколами:

- якщо результат позитивний (C_{en} увімкнено) – контролер заряду спрямовує необхідну потужність, отриману в результаті віднімання, на заряджання акумулятора через систему перетворення електроенергії;
- якщо результат віднімання від'ємний C_{en} вимикається.

$$C_{en} = \begin{cases} 0: & \text{if (установка заряду - навантаження споживання)} < 0 \\ 1: & \text{if (установка заряду - навантаження споживання)} \geq 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Налаштування уставки розряду регулює використання енергії мережі: в режимі, коли споживання навантаження перевищує уставку розряду (кВт), САЕ розряджає акумуляторну батарею в поточному режимі для живлення навантаження споживачів.

Системою рівнянь (3.2) визначається режим ввімкнення та вимкнення акумуляторної батареї в даному режимі.

$$D_{en} = \begin{cases} 0: & \text{if (установка заряду – навантаження споживання)} < 0 \\ 1: & \text{if (установка заряду – навантаження споживання)} \geq 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Сигнал контролер заряду-розряду P_{cd} на виході описаний формулою:

$$P_{cd} = [(уставка заряду – навантаження споживання) \cdot C_{en}] + P_{cd} + [(уставка заряду – навантаження споживання) \cdot D_{en}]. \quad (3.3)$$

На початку роботи $D_{en} = C_{en}$ - це показує, що заряд і розряд акумуляторної батареї не може відбуватися одночасно. Об'єднання виходу

заряду і розряду в один вихід для системи перетворення енергії відбувається у

блоку подавання. Логіка роботи блоку подавання реалізована через блок «Constant» із врахуванням потужність власних потреб САЕ.

Для формування приведеної змінної частини потужності ГЕН було використано погодинний баланс потужності ОЕС України з порталу відкритих даних Міністерства цифрової трансформації України за 2023 рік [13]. Дані погодинного балансу було нормовано та переведено у відносні одиниці через максимальну потужність ГЕН – на рівні 23,5 ГВт, яка була об 11:00 години 28 січня.

Для створення приведеної змінної частини потужності ГЕН, було використано годинний баланс потужності ОЕС України за 2023 рік, який був доступний на веб-порталі відкритих даних Міністерства цифрової трансформації України. Ці дані були нормалізовані та переведені в відносні одиниці шляхом визначення максимальної потужності ГЕН, яка становила 23,5 ГВт о 11:00 годин 28 січня.

Добовий графік потужності СЕС показано на рисунку 3.1.

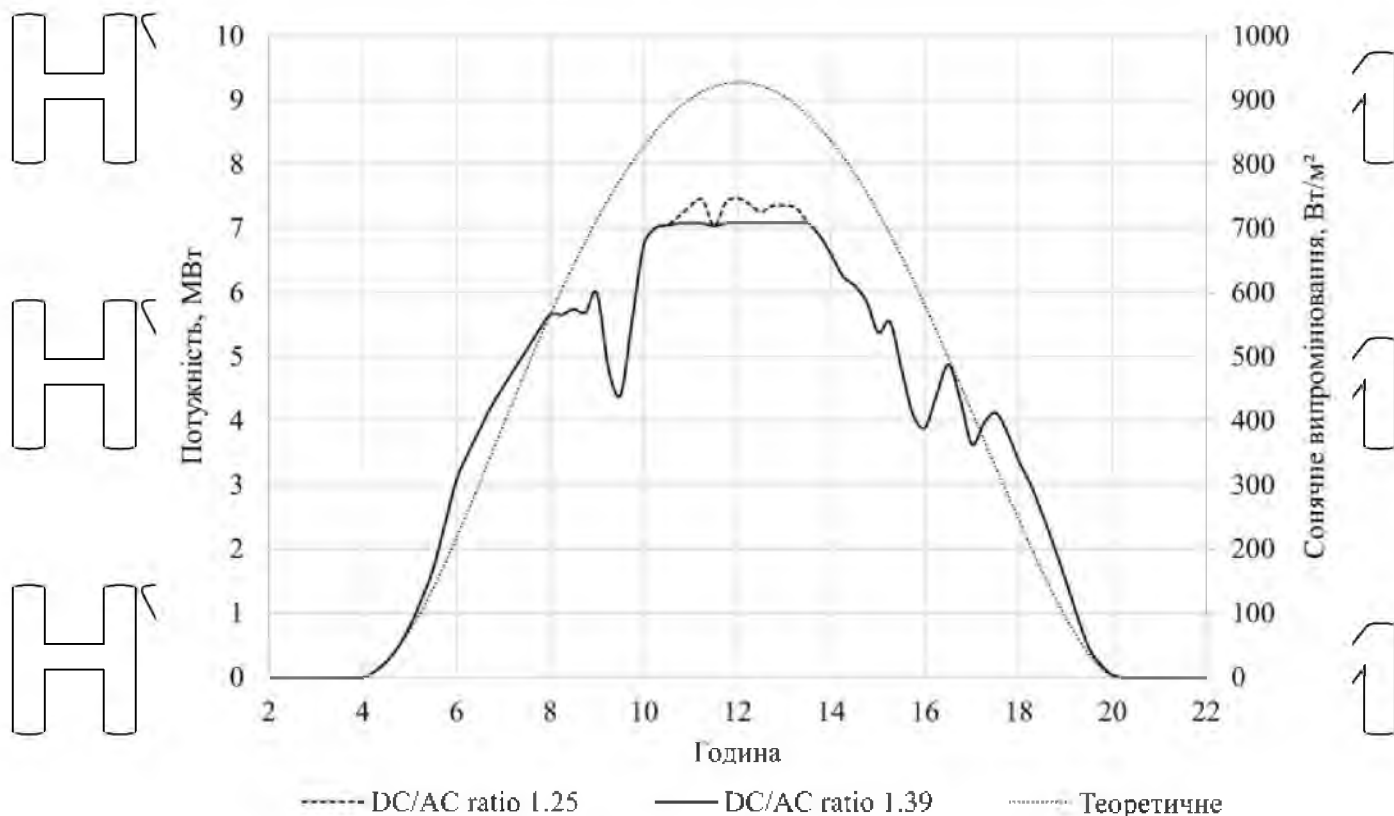


Рисунок 3.1 – Добовий графік потужності СЕС

3.2 Імітаційне моделювання роботи системи акумулювання в середовищі MATLAB Simulink

Для виконання дослідження було взято сонячну електростанцію (СЕС) із зазначеною потужністю фотоелектричних модулів на рівні 10 МВт. Також було встановлено інвертори загальною потужністю 8 МВт, при чому відношення DC/AC становило 1.25. Крім того, в дослідженні була використана сонячно-акумулююча електростанція (САЕ) з номінальним обсягом зберігання енергії 32 МВт·год та номінальною потужністю 8 МВт.

Загальна структура імітаційної моделі має три основні блоки: «Контролер заряду-розряду», «Система перетворення енергії» та «Акумулятор».

Модель контролера заряду-розряду акумуляторної батареї в загальному вигляді приведена на рис. 3.2

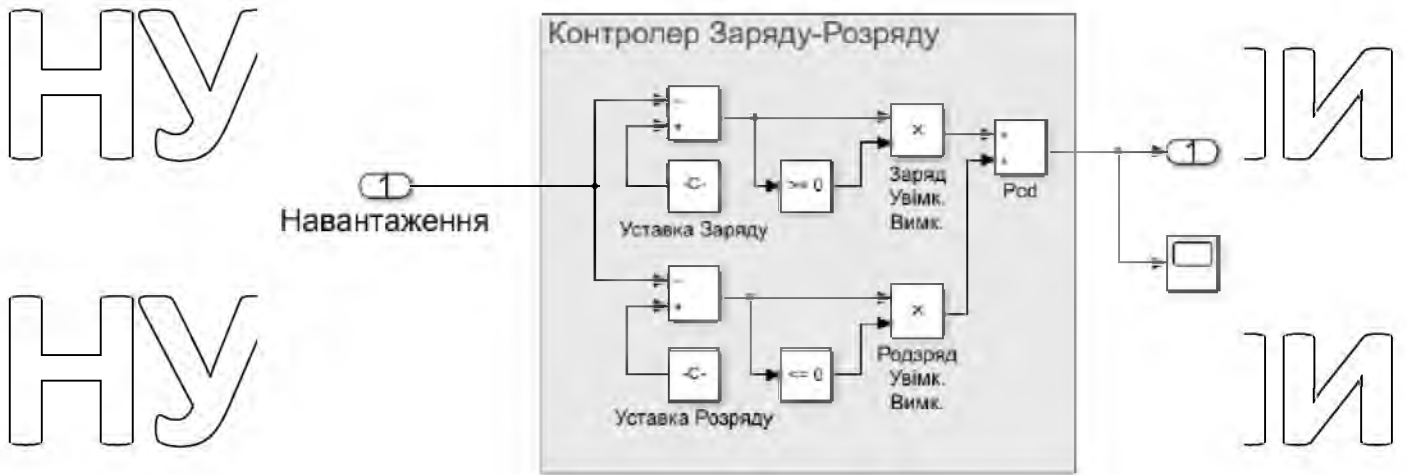


Рисунок 3.2 – Модель контролера заряду-розряду акумуляторної батареї в загальному вигляді

У якості початкових параметрів для нашого налаштування ми використовуємо режим обмеження максимальної споживаної потужності.

Встановлена потужність ФЕМ на рівні 10 МВт, встановлена потужність інверторів – 6,3 МВт (DC/AC ratio 1,59), ефективність роботи СЕС – 90 % (тобто технологічні втрати на рівні 10 %). У відповідності до цих налаштувань потужність заряду та розряду (P_{cd}) на виході з контролера показана на рисунку

3.3.

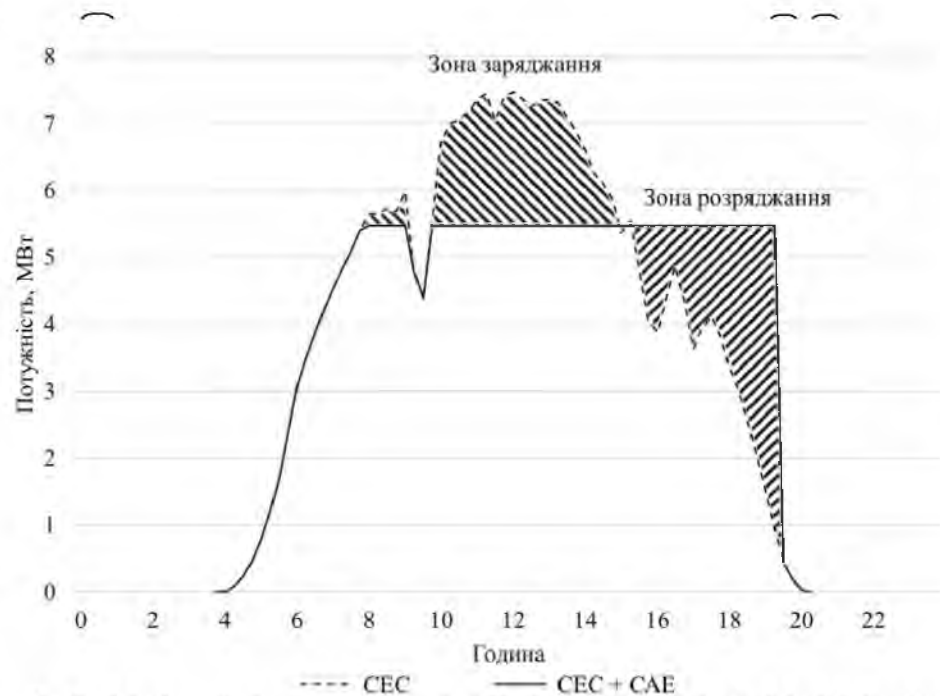


Рисунок 3.3 – Графік потужності заряду-розряду P_{cd} на виході з контролера

Модель системи акумулювання електричної енергії з врахуванням номінальної потужності перетворювача та коефіцієнтом перетворення наведена на рисунку 3.4

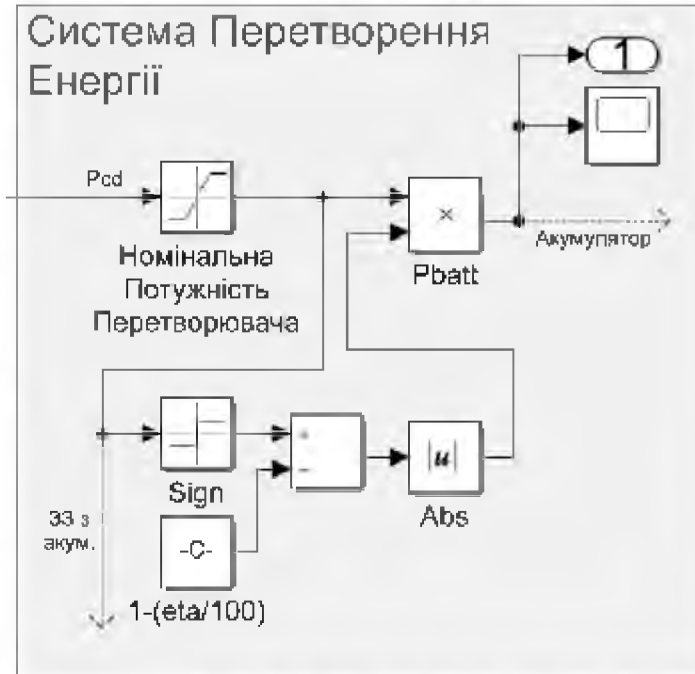


Рисунок 3.4 – Модель системи акумулювання електричної енергії

На рисунку 2.5 наведений графік стабілізації (вирівнювання) потужності СЕС с САЕ протягом одного повного циклу заряджання/розряджання акумуляторної батареї триває 24–27 годин.

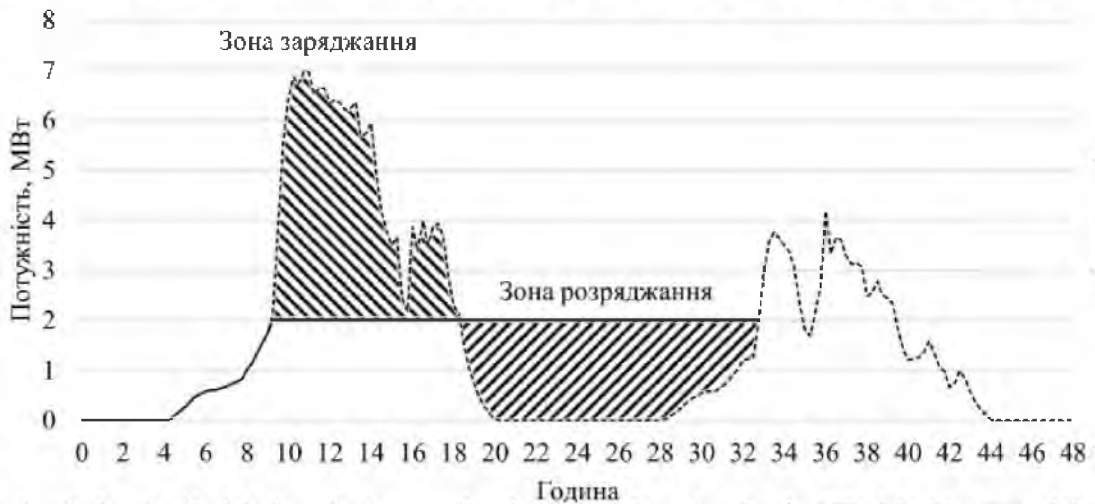


Рисунок 3.5 – Графік потужності на вході в акумулятор

Графік показує, що система перетворення енергії має недостатню потужності для покриття пікового навантаження з 18 до 32 години. У цей період потужність сягає 2 МВт, що перевищує встановлену номінальну потужність перетворювача на 10%. Це сталося через коефіцієнт ефективності перетворювача (θ), який становить 90%.

Потужність, яку генерує система акумулювання електричної електроенергії, контролюється через систему управління, яка включає та вимикає перетворювач. Ця система управління використовує зворотний зв'язок з акумулятором для регулювання потужності. Потім вихід з цього блоку підключається до точки з'єднання між навантаженням та електричною мережею за допомогою блоку додавання.

Також до системи входить допоміжний блок живлення зображений на рисунку 3.6.

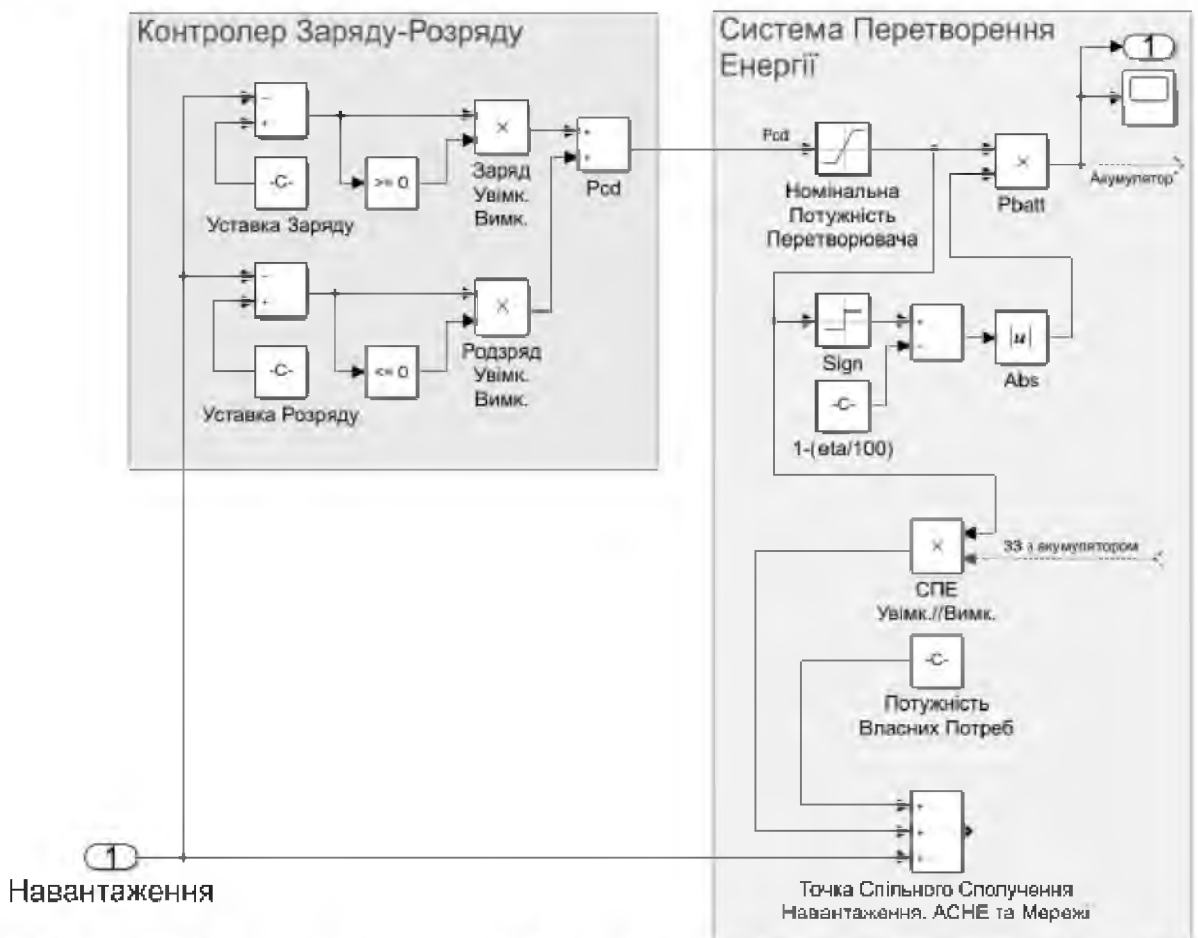
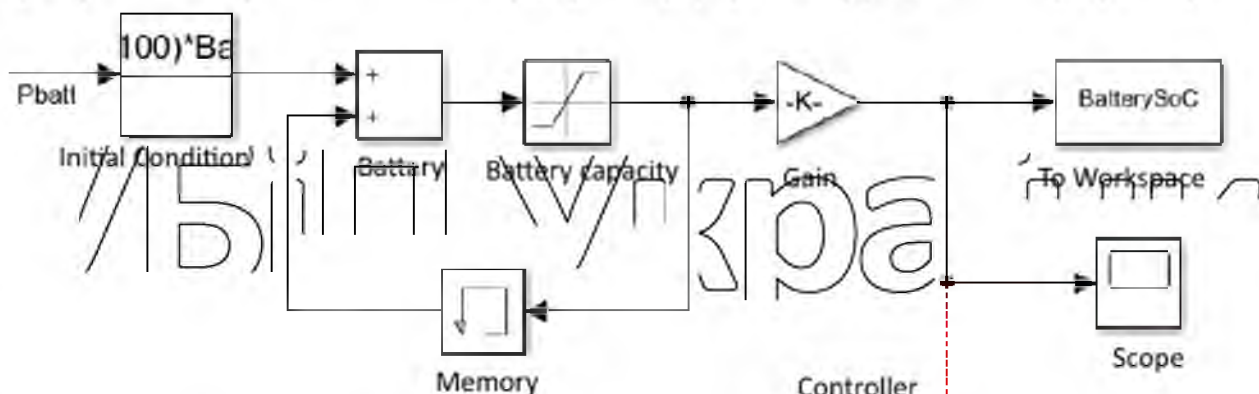


Рисунок 3.6 – Моделі перетворювача з контролером

Він забезпечує енергію, необхідну для нормальної роботи всієї системи енергозберігання CAE. Цей блок включає в себе компоненти охолодження, моніторингу, зв'язку, захисту, розподільчі прилади, освітлення та інші. Зазвичай, потужність цього блоку становить від 5% до 20% від номінальної потужності системи акумулювання енергії.

Модель акумулятора з можливістю запису даних у пам'ять наведено на рисунку 3.7.



Рисунк 3.7) – Модель акумулятора з можливістю запису даних у пам'ять

1) Initial Condition – початковий заряд акумулятора, дозволяє користувачеві встановити початковий стан заряду батареї у відсотках. Це звичайна практика перед введенням CAE в експлуатацію. Попередньо, батарею заряджають до певного рівня заряду, зазвичай до 30%.

2) Memory – блок пам'яті, використовується для введення затримки на один крок інтегрування в моделі. На виході цього блоку отримуємо попереднє вхідне значення, і в цій моделі воно використовується для зберігання поточного стану накопиченні енергії. Разом із блоком додавання, цей блок утворює акумулятор енергії батареї

3) Battery capacity – блок насичення визначає ємність акумулятора та гарантує, що рівень заряду акумулятора не опуститься нижче 0% і не перевищить 100%

4) Gain блок, що використовується для перетворення одиниць енергії акумулятора в кіловат-години у рівень заряду у відсотках.

5) To Workspace, Score – вихідні дані про стан заряду багареї надаються в робочу область для моніторингу та використання. Це дозволяє аналізувати продуктивність, будувати графіки та встановлювати зворотний зв'язок з системою перетворення енергії.

Зворотній зв'язок з CAE визначено у формулі (3.4).

$$PCS_{en} = SoC \leq 0 \cup oC \geq 100 \quad (3.4)$$

Якщо стан заряду менше 0% або більше 100%, то PCS_{en} дорівнює логічному нулю, щоб вимкнути вихід системи перетворення енергії через блок множення, це гарантує, що CAE не продовжить заряджати/розряджати батарею, коли значення не досягне 100% або 0% заряду відповідно.

На рисунку 3.8 наведено загальний вигляд моделі системи акумулявання електричної енергії із зв'язками з контролером.

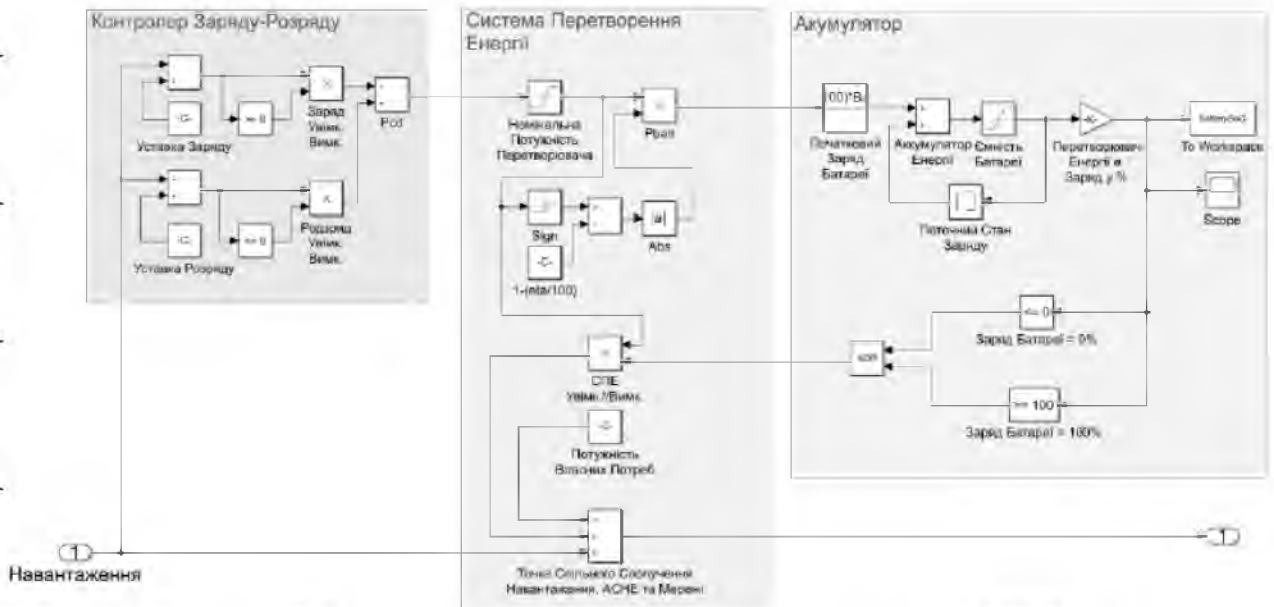


Рисунок 3.8 – Модель системи акумулявання електричної енергії

3.3 Аналіз результатів моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії

На рисунку 3.9 наведено графік повної стабілізації потужності за рахунок впровадження системи акумулювання електричної енергії.

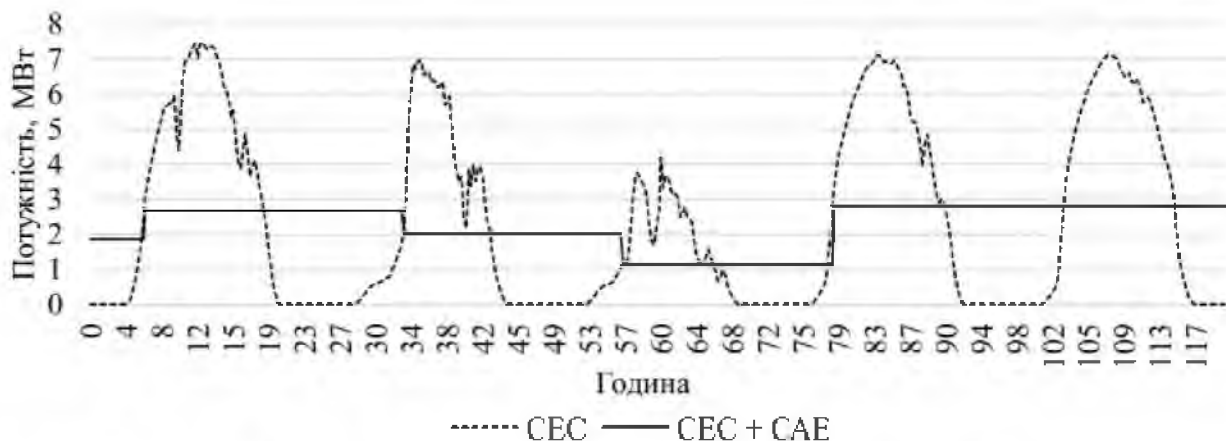


Рисунок 3.9 – Графік повної стабілізації потужності за рахунок впровадження системи акумулювання електричної енергії

З рисунку 3.9 видно, що між сусідніми циклами відбуваються зміни в потужності, яка подається в електроенергетичну систему, і ці зміни розташовуються у діапазоні від 1,14 до 2,8 МВт.

3.4 Розробка програмного забезпечення системи управління акумулювання електричної енергії

Програма моделювання системи заряду та розряду батареї на основі рівня сонячної генерації та споживаної енергії протягом дня із застосуванням класу SolarEnergySystem. Програма враховує надлишкову сонячну енергію та використовує батарею для зберігання енергії для подальшого використання.

```

class SolarEnergySystem:
    def __init__(self, battery_capacity, solar_capacity, min_threshold):
        self.battery_capacity = battery_capacity
        self.solar_capacity = solar_capacity
        self.min_threshold = min_threshold
        self.battery_level = 0

    def charge_battery(self, solar_generation):
        excess_energy = solar_generation - self.min_threshold

        if excess_energy > 0:
            if self.battery_level + excess_energy <= self.battery_capacity:
                self.battery_level += excess_energy
            else:
                self.battery_level = self.battery_capacity

    def discharge_battery(self, demand):
        if self.battery_level >= demand:
            self.battery_level -= demand

            return demand
        else:
            discharged_energy = self.battery_level
            self.battery_level = 0

            return discharged_energy

    def run_simulation(self, solar_data, load_data):
        total_energy_saved = 0

        for solar, demand in zip(solar_data, load_data):
            self.charge_battery(solar)
            energy_supplied = self.discharge_battery(demand)
            total_energy_saved += energy_supplied

```

```

return total_energy_saved
# Параметри системи
battery_capacity = 10000 # кВт-год

```

```

solar_capacity = 8000 # кВт
min_threshold = 1000 # кВт
# Створення системи

```

```

solar_system = SolarEnergySystem(battery_capacity, solar_capacity,
min_threshold)
# Симуляція роботи системи протягом дня (дані сонячної генерації та
споживаної енергії)

```

```

solar_data = [1500, 3000, 7000, 8500, 6000, 2000, 1000, 2000, 4000, 6000,
8000, 9500, 9000, 7000, 4000, 3000, 2000]
load_data = [4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 8000, 7000, 6000, 5000,
4000, 3000, 2000, 1000, 1000, 2000, 3000]

```

```

energy_saved = solar_system.run_simulation(solar_data, load_data)
print(f"За день заощаджено {energy_saved} кВт-год електроенергії.")

```

Висновки до розділу 3

В даному розділі розроблена модель системи акумулювання електричної енергії. Модель включає в себе три підсистеми – контролер, перетворювач, акумулятор.

Контролер відповідає за моніторинг та керування процесами зарядки та розрядки акумулятора. Модель контролера включає в себе врахування вхідної потужності, яку необхідно перетворити через перетворювач.

Ця система виконує функцію перетворення електричної енергії між джерелами енергії та акумулятором і включає в себе проміжні пристрої, такі як інвертори, зарядні пристрої, перетворювачі постійного та змінного струму та інші компоненти. Модель системи перетворення враховує їхню ефективність та потужність. Модель акумулятора враховує його ємність, ефективність зарядки та розрядки, а також втрати енергії під час процесів зберігання і витрати.

На основі розробленої розрахункової математичної моделі стабілізації потужності за рахунок впровадження системи акумулювання електричної енергії був встановлений взаємозв'язок між номінальними параметрами системи для зберігання надлишкової електроенергії (CAE) та встановленою потужністю CEC.

Важливо відзначити, що відповідно до розробленої моделі, спільна робота сонячно-енергетичної системи (CEC) та системи акумулювання енергії (CAE) гарантує стабілізацію потужності, тобто вирівнювання потужності, яка надходить в електроенергетичну систему. Це означає, що CEC працюватиме в режимі базового забезпечення енергії (загальної потреби) у зоні покриття.

Однак важливо враховувати, що під час переходів між сусідніми повними циклами заряджання та розряджання акумуляторної батареї можуть виникати різкі зміни в потужності. Тому управління режимами роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації за допомогою контролера, який дозволить компенсувати зміни навантаження в системі, забезпечуючи стабілізацію потужності сонячно-енергетичної системи (CEC) протягом більш тривалого часу. Проте це може призвести до тимчасового недовипуску електричної енергії та, відповідно, до зниження ефективності роботи CEC. Розроблене програмне забезпечення на мові програмування Python моделює систему зарядки та розрядки батареї на основі рівня сонячної генерації та споживаної енергії протягом дня. Програма враховує надлишкову сонячну енергію та використовує батарею для зберігання енергії для подальшого використання.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ І АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ

У існуючих стандартах для схем з'єднань силові інвертори негайно відключаються від мережі, коли напруга падає до точки приєднання (POI), наприклад, через несправності в мережі. Напруга в POI не регулюється електростанцією на відновлюваній енергії. Однак із підвищенням рівня поновлюваної генерації підключені до мережі сонячні системи змінюються від систем розподілу до систем передачі, та стандарти оновлюються (стандарт FERC 661 та 661A), щоб забезпечувати вироблення відновлюваної енергії підключеним до мережі установам, забезпечити допоміжні можливості під час несправності та після аварії.

Використання акумуляторів енергії дають можливість безперервної роботи системи, можливість управління реактивною потужністю для регулювання напруги або коефіцієнта потужності.

Деякі виробники реалізують можливість системи безперервної роботи (FRT), зменшуючи вихідну потужність генерації PV, в той же час максимізують реактивну потужність (щоб обмежити струм IGBT від перевищення його проєктного номінального значення), щоб уникнути падіння напруги в моменти ушкодження. Це можливо реалізувати шляхом зміщення робочої напруги фотоелектричної панелі від максимальної генерації точки живлення (MPPT). Цей процес зменшує вироблення електроенергії протягом часу пошкодження та знижує ефективність фотоелектричних установок.

Це особливо важливо для великих, пов'язаних між собою мереж сонячних електростанцій, які генерують від 100 МВт електричної енергії, де зменшення її вироблення в перехідних процесах стане настільки значним, що ними не можна нехтувати, як зазначено у [14]. Одним із можливих підходів до вирішення цієї проблеми є використання вихідних потужностей сонячної електростанції для зарядки системи акумуляування енергії (BESS) протягом періоду пошкодження,

без втрати сонячної генерації, в той час як вплив струму при пошкодженні зменшується або виключається. Передбачається, що модуль системи акумулювання електричної енергії встановлено на шини постійного струму силового інвертора, як показано на рис. 4.1.

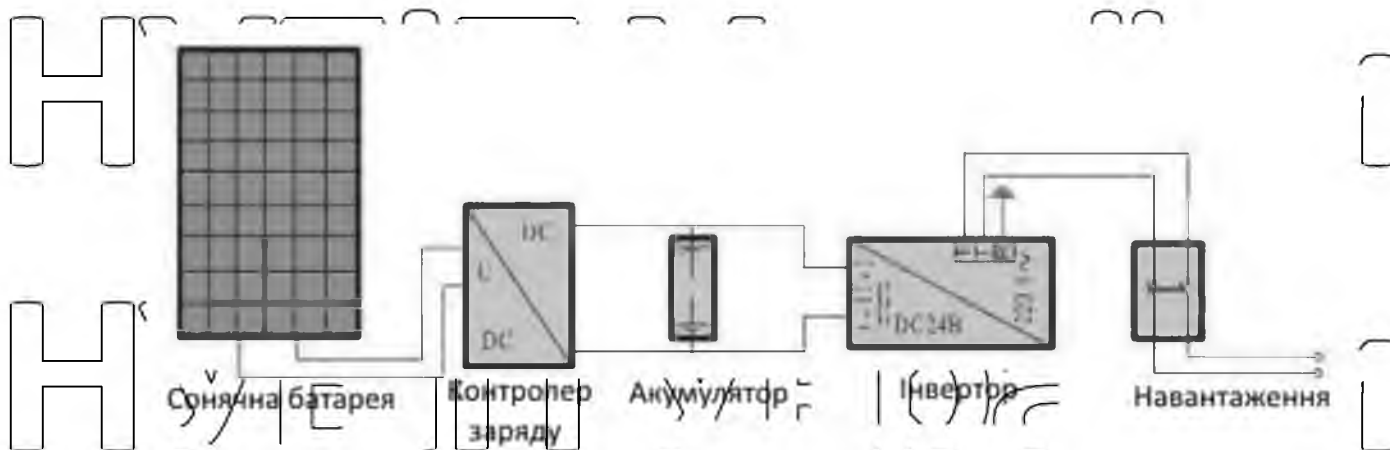


Рисунок 4.1 – Загальна системна схема PV-системи з акумуляторною системою накопичення електричної енергії

Метою використання модулю системи акумулювання електричної енергії є запобігання впливу струму короткого замикання в роботі сонячної електростанції, що дозволить підвищити ефективність роботи системи.

З розгортанням системи акумулювання електричної енергії (BESS) і належним контролем потужність, що виробляється сонячною електростанцією, може бути поставлена в мережу або систему BESS при необхідності. BEC, що розряджає, діє як генератор, а BESS, що заряджається, діє як активне навантаження. Вклад струму короткого замикання від сонячної електростанції може бути обмежений струмом сонячного інвертора, що має можливість керування струмом [8].

Перевага включення системи BESS у сонячну фотоелектричну установку полягає в тому, що завдяки зменшенню реальної потужності, що надходить до мережі, ємність інвертора PCS з боку енергосистеми може бути повністю використана для введення реактивної потужності, щоб підтримати відновлення напруги в точці з'єднання POI під час та після аварії. Ще одна перевага системи

накопичення та зберігання електроенергії полягає у зменшенні вихідних коливань, спричинених зміною сонячного випромінювання під час проходження хмар.

Система перетворення електричної енергії (PCS) використовується для сонячних електростанцій та інших типах відновлюваних джерел енергії, підключених до електричної мережі, наприклад вітроелектричних станцій. Системи PCS можуть мати різну архітектуру, наприклад, одноступінчасту (тільки для інвертора, підключеного до мережі) або двоступінчасту з системою перетворення енергії PCS (наприклад, AC/DC перетворювач та інвертор з мережевим підключенням).

Структура, яка вказана на рис. 4.1, найбільш конструктивна та обрана для сполучення фотоелектричної станції з мережею через додатковий ступінь свободи, яку вона може надати. У цій топології функція AC/DC-перетворювача, підключеного до PV-системи, полягає у відстеженні MPP сонячної установки шляхом регулювання вихідної напруги фотоелектричних модулів.

Перетворювач постійного струму в змінний струм збільшує вихідну напругу постійного струму з сонячної батареї до рівня, що перевищує значення напруги точки POI так, що підвищуючий трансформатор не потрібен для інвертора/джерела напруги при подачі електроенергії до мережі. Цей метод був запропонований у дослідженнях без трансформаторних фотоелектричних інверторів з використанням нових потужних електронних пристроїв із високою потужністю.

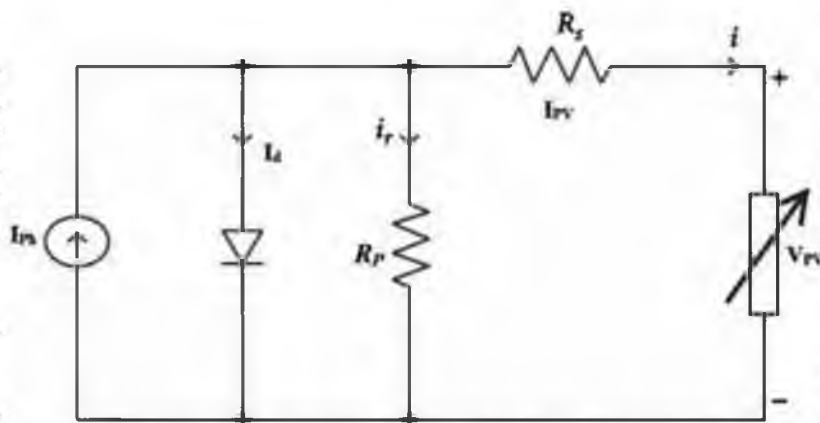


Рисунок 4.2 – Еквівалентна електрична схема сонячного елемента

У схемі на рис. 4.2 використовується інвертор з мережевим інтерфейсом, який перетворює струм з постійного на змінний і контролює активну, що надходить до мережі реактивну потужність [15]. В системі перетворення енергії (PCS), описаної вище, система накопичення та зберігання електричної енергії (BESS) підключена до лінії постійного струму сонячної електростанції.

Процеси заряджання та розрядки виконуються шляхом регулювання струму відповідного перетворювача постійного струму у системі BESS.

Це може компенсувати уривчастість вихідної потужності фотоелектричної установки в нормальних умовах, тобто мінливість сонячного випромінювання через хмари, що проходять. Інші функції підтримки мережі, такі як регулювання частоти також можуть бути надані фотоелектричною установкою за допомогою акумуляторної системи акумульованої енергії. У цих випадках BESS може передавати енергію, а також отримувати енергію від вузла постійного струму для зарядки, поки сонячна установка працює на MPP для досягнення максимально можливої ефективності.

Тому для системи BESS реалізовано двонаправлений перетворювач постійного струму на змінний струм, як показано на рисунку 4.1. Основна увага у цьому процесі приділяється функції акумуляторної системи зберігання енергії (BESS) для збереження сонячної енергії під час збою і, таким чином, інвертор, підключений до мережі, забезпечує підтримку напруги, що дозволяє працювати системі під час аварій.

4.1 Математичне моделювання сонячної електричної енергії та системи зберігання батареї

Основний етап у моделюванні сонячної установки або електростанції – це аналіз одного сонячного елемента, який може моделюватися з різними параметрами. В цьому дослідженні сонячний елемент по суті представлений еквівалентною електричною схемою.

Схема складається з джерела енергії – вхідного фотоструму (I_{ph}), паралельного діода, шунтуючого опору (R_p), а також можна знехтувати послідовного опору R_s , як показано на рисунку 4.2 де I_d – струм діода, а I_{PV} – вихідний струм та напруга клем сонячного елемента відповідно.

На рисунку 4.2 для заданої температури елемента (T) та інтенсивності випромінювання (G) вихідний струм сонячного елемента може бути виражений у вигляді:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{v_{pv} + I \cdot R_s}{R_p}, \quad (4.1)$$

де I_{ph} , I_d та R_s можуть бути розраховані за формулою:

$$I_{ph} T, G = \frac{G}{G_{ref}} I_{sc,ref} [1 + a(T - T_{ref})], \quad (4.2)$$

$$I_d T, G = \frac{I_{sc,ref}}{\frac{qV_{oc,ref}}{e^{nkT_{ref}} - 1}} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \frac{qV_{oc,ref}}{nkT} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \left(\frac{v_{pv} + I_{pv} R_s}{e^{\frac{qV_{oc,ref}}{nkT}} - 1}\right), \quad (4.3)$$

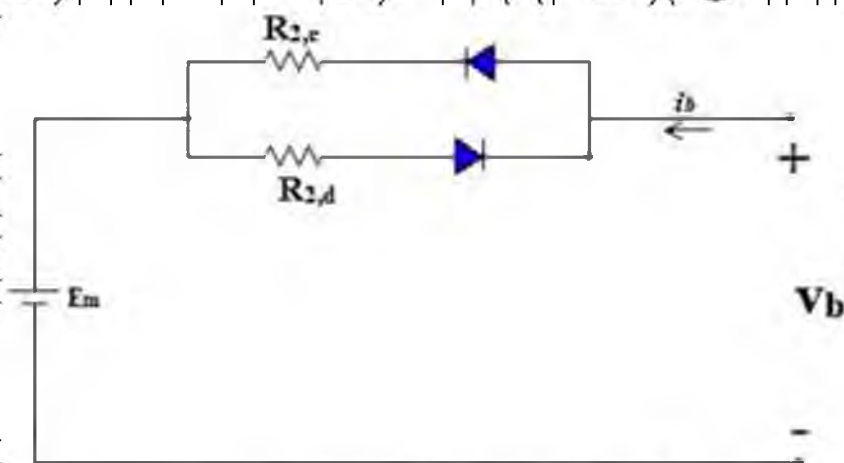
$$R_s = \frac{nkT_{ref}}{qI_{m,ref}} \ln \left[\frac{I_{sc,ref}}{I_{sc,ref}} \left(e^{\frac{qV_{oc,ref}}{nkT_{ref}}} - 1 \right) - \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}} \left(e^{\frac{v_{pv} + I_{pv} R_s}{nkT}} - 1 \right) \right] \frac{V_{m,ref}}{I_{m,ref}} \quad (4.4)$$

Константи та змінні величини в (4.2) – (4.4) задаються в такий спосіб.

$G_{ref} = 1000$ Вт/м², $T_{ref} = 298$ К, $V_{oc,ref}$, $I_{sc,ref}$, $V_{m,ref}$ та $I_{m,ref}$ – це освітленість, температура панелі, напруга розімкненого ланцюга, струм короткого замикання, напруга панелі MPP (струм на MPP за стандартних умов [14], а температурний коефіцієнт струму короткого замикання; коефіцієнт $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ С – постійна Кулон, коефіцієнт $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана, n – коефіцієнт ідеальності діода, що знаходиться між 1 – 2.

4.2 Система акумулювання енергії

У цьому дослідженні модель джерела напруги – резистора, як показано на рис. 4.3, обрана, щоб уникнути детальних розрахунків внутрішніх електрохімічних процесів. Тим не менш, внутрішні резистори працюють по-різному в процесі зарядки та розрядки, як описано в запропонованій моделі.



Рисунк 4.3 – Еквівалентна схема свинцево-кислотного акумулятора [15]

У цій моделі E_m є напругою та позначає внутрішню батарею $e_{m,f}$, яка працює у режимі холостого ходу. Внутрішній опір R_2 має два компоненти, $R_{2,e}$ і $R_{2,d}$, які сприяють втраті потужності всередині акумуляторних блоків в умовах зарядки та розрядки відповідно. Струм зарядки-розрядки позначений як I_b , а напруга на клеммах V_b на рис. 4.3 позитивні значення I_b позначають зарядні та негативні значення для розрядних струмів.

У цій моделі $e_{m,f}$, E_m та електричні параметри $R_{2,e}$ та $R_{2,d}$ є функціями стану заряду (SOC) батареї та температури її роботи, T_{temp} . Тому E_m , $R_{2,e}$ та $R_{2,d}$ у цьому дослідженні індексуються за допомогою SOC та T_{temp} через двовимірну довідкову таблицю [14]. SOC розраховується за наступним рівнянням:

$$SOC = \frac{U_{sed} Ah Capacity}{Max Ah Capacity} \quad (4.5)$$

де використовувана ємність $A \cdot год$ розраховується за формулі:

(Середня (сміність) =

$$Q_e(t_0) + \int_0^t \eta_{coulomb} i_b(t) dt, \text{ for } i_b(t) \geq 0 \text{ chg.}$$

$$Q_e(t_0) + \int_0^t i_b(t) dt, \text{ for } i_b(t) < 0 \text{ dischg.}$$

(4.6)

де $Q_e(t_0)$ – початкова ємність у початковий момент зарядки-розрядки;

$\eta_{кулонів}$ – кулонівська ефективність.

4.3 Контролер для фотоелектричного перетворювача постійного струму

Односпрямований підвищуючий перетворювач був обраний для перетворення потужності, що споживається фотоелектричною панеллю при низькому рівні напруги, більш високий рівень. Таким чином, щоб можна було використовувати низьковольтну фотоелектричну систему та знизити вартість перетворювальної системи. В системі управління, показаної на рис.4.4, зовнішній контур напруги регулює вихідну напругу PV-системи для відстеження MPP за допомогою компенсатора PI, а внутрішній контур струму регулює струм індуктора для зменшення високочастотних гармонік, що виникають у індукторі.

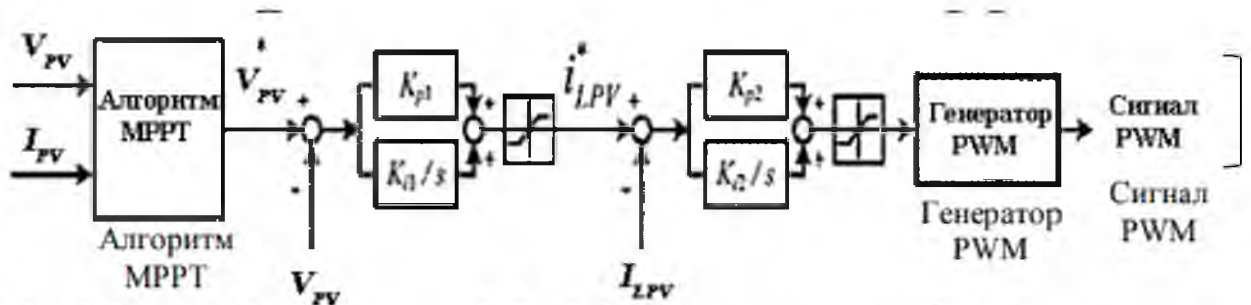


Рисунок 4.4 – Система управління підвищуючим фотоелектричним перетворювачем

А алгоритм MPPT, який використовується в цій роботі, є модифікованим алгоритмом, який може покращити ефективність перетворення системи генерації PV. Цей алгоритм реалізований і пов'язаний з PSCAD з використанням мови, яку надає EMTDC [16].

Фотоелектричний модуль складається із двох основних частин: поведінкова модель фотоелементів та обмежений за потужністю електричний драйвер для підключення ланцюга. Поведінкова модель оцінює напругу та потенціал струму панелі PV для даних умов сонячного випромінювання (G) та температури модуля (T_c). Електричний драйвер з обмеженням потужності забезпечує відповідний електричний відгук на навантаження.

На рисунку 4.5 наведено моделювання PV для навантаження постійного струму.

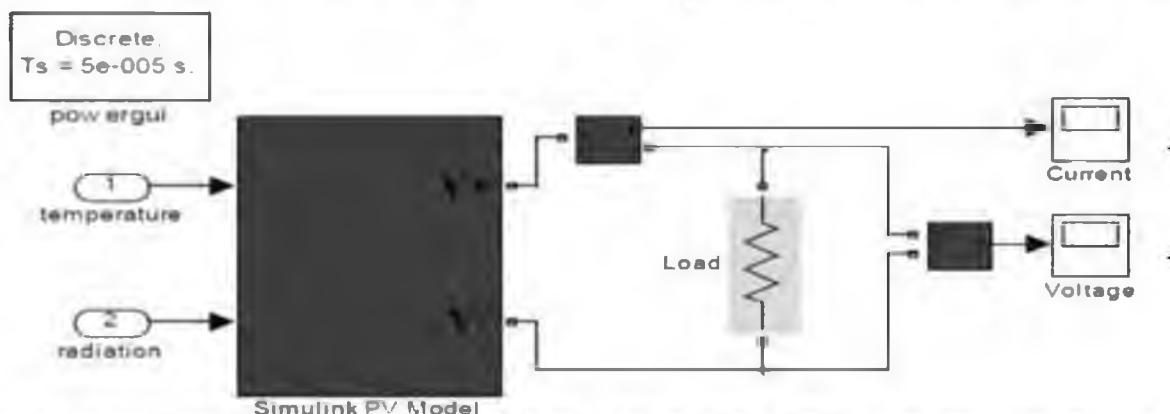


Рисунок 4.5 – Моделювання PV для навантаження постійного струму

На рисунку показано моделювання Simulink запропонованого фотоелектричного модуля, підключеного до резистивного навантаження постійного струму. Навантажувальний резистор R_L був встановлений на 4,5 Ом для роботи поруч MPP. Посилочне випромінювання (G), 1000 Вт/м^2 та модуля температури (T_c) від $25 \text{ }^\circ\text{C}$ були використані для моделювання.

Внутрішній резистор R_i та конденсатор C_i були встановлені на 1 Ом та 10^{-2} Ф відповідно. Перехідна характеристика фотоелектричного модуля, коли він підключений до резистивного навантаження, показано на рисунку 4.5 (а), (б) та (в).

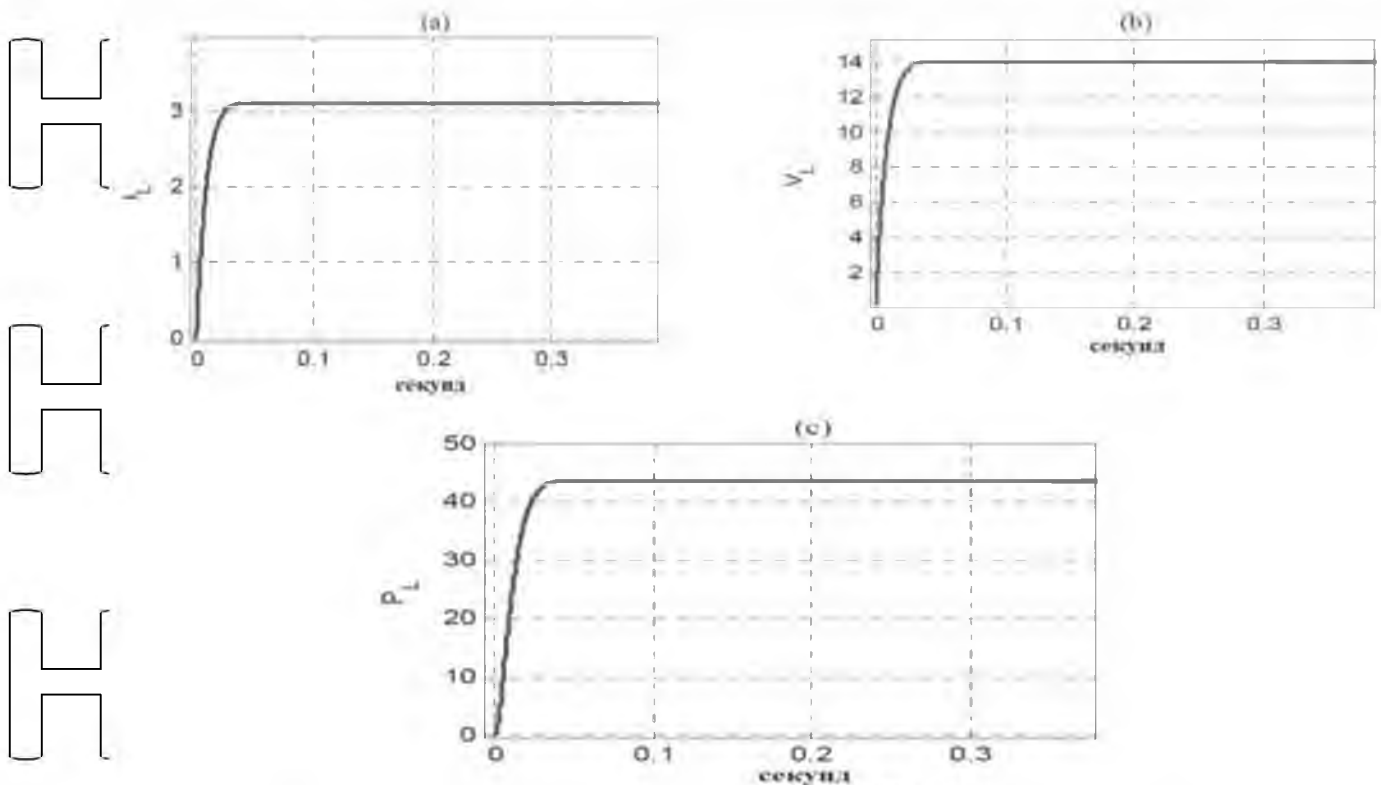


Рисунок 4.6 – Струм [A] – (a), Напруга [V] – (b) і Потужність [W] - (c)

фотоелектричного модуля для опору навантаження 4,5 Ом

Напруга та струм навантаження встановлюються на постійне значення приблизно через 0,05 секунд перехідного режиму. Розрахунковий час може бути з поправкою на C_i та R_i . Регулювання перехідного відгуку PV модуль, зокрема, корисний для аналізу напруги та стабільності потужності енергосистем, які живляться від фотоелектричних панелей. Потужність, що подається на фотоелектричне навантаження модулем, була досягнута в режимі роботи після розробки перехідного режиму. Це дозволяє реалістичніше аналізувати фотоелектричні панелі при моделюванні енергосистеми.

4.4 Контролер для перетворювача BESS AC/DC

При інтеграції BESS із фотоелектричною системою, система акумулювання може заряджати або розряджати, щоб використовувати або звільняти живлення для вузла постійного струму.

Отже, потік енергії може надходити і виходити з акумуляторної системи накопичення енергії, і для BESS потрібно двонаправлений перетворювач змінного струму на постійний. Для реалізації роботи, описаної вище схеми роботи перетворювача постійного струму, схема його системи управління наведено на рисунку 4.7.

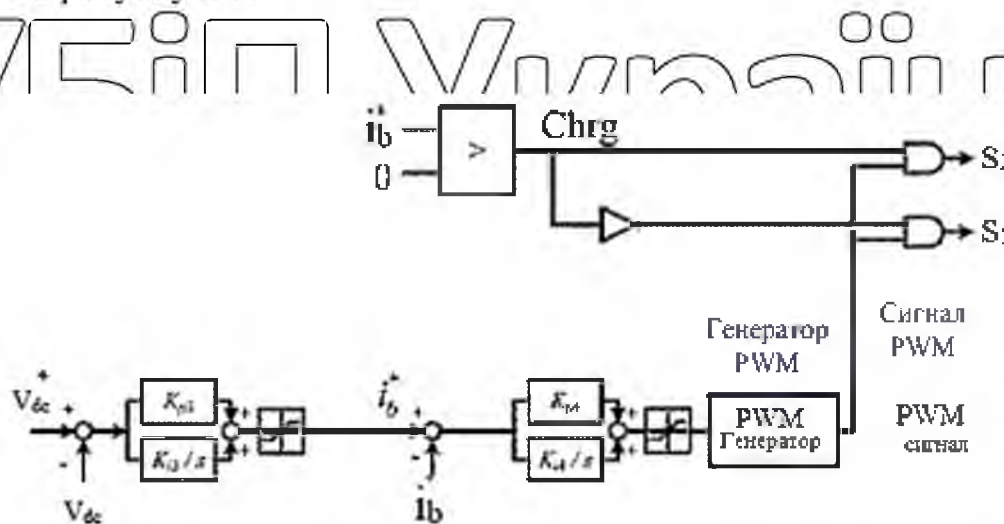


Рисунок 4.7 Система управління двонаправленим перетворювачем акумуляторна система накопичення енергії (BESS)

Внутрішній контур регулює струм від акумуляторної системи накопичення енергії та відстежує параметри заданої команди (i_b^*). Зовнішній контур напруги регулює напруга вузла постійного струму для опорного значення та генерує струм для внутрішнього контуру опорного сигналу, i_b^* .

Для покращення динамічних характеристик внутрішнього циклу використовується наступна схема залежно від оцінки напруги i_b^* , значення C_{hr} .

Стан деактивації роботи S_1 та S_2 буде визначатися значенням C_{hr} замість порівняння напруги постійного струму з його опорним значенням. Цей підхід дозволяє уникнути частих переходів напрямків потоку енергії та перемикаць у схемі назад і вперед між параметрами «вкл.» та «викл.». Це може сприяти покращенню динамічних характеристик контролера, особливо під час переходу від стану зарядки до розрядки чи навпаки.

4.5 Контролер для FRT-системи сонячної генерації з інтегрованою енергосистемою

Електрична конфігурація із пов'язаною схемою управління інвертором зв'язку мережі показано на рисунку 4.8.

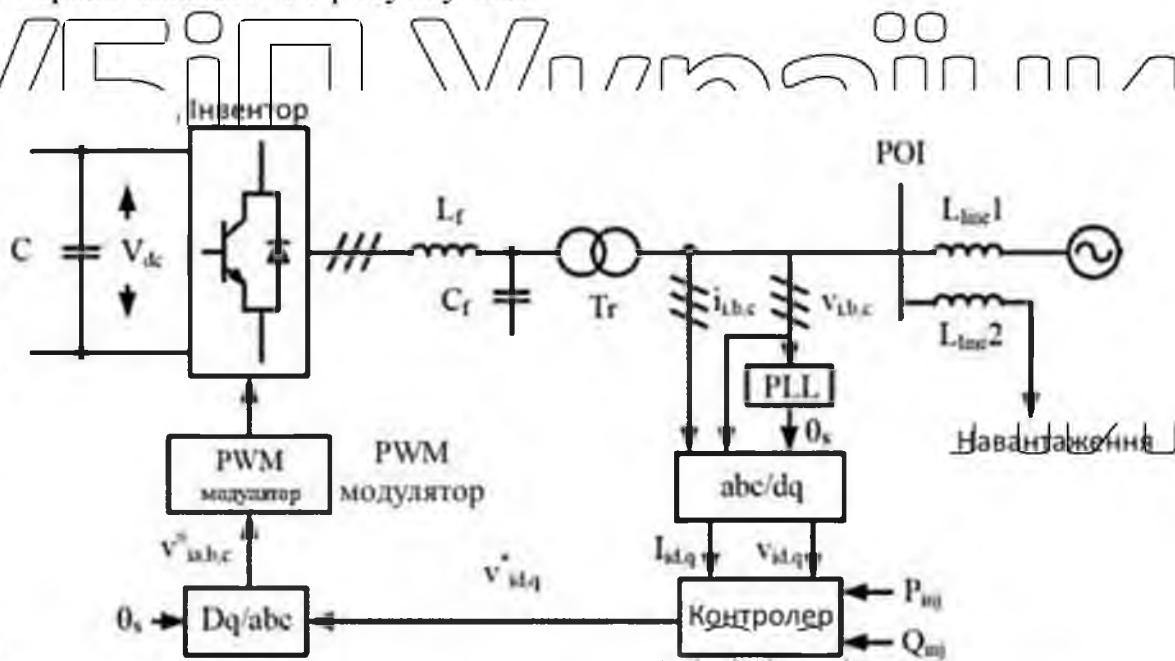


Рисунок 4.8 – Інверторна схема мережа-інвертор

Основна концепція управління D-D, щоб виконати перетворення опорного імпульсу в нерухої системи координат (a-b-скоордината) опорний імпульс, який синхронно працює з d-q імпульсом, тобто, Dq/abc перетворення.

Після перетворення реальна та реактивна потужність інвертора може керуватися роздільно, регулюючи включення струму по осі d і осі q в мережі відповідно, як показано в (4.7).

$$\begin{cases} P_{inj} = 3/2 I_{id} \cdot V_{id} \\ Q_{inj} = -\frac{3}{2 I_{id}} \cdot V_{id} \end{cases} \quad (4.7)$$

На основі цієї пов'язаної системи відліку d-q система керування для інвертора, підключеного до мережі може складатися з двох каскадних контурів.

Такий керований модуль акумуляторної система зберігання енергії (BESS) може забезпечити можливість роботи системи безперебійної роботи (FRP-системи) використовуваної для безперебійної роботи фотоелектричної системи.

Також він підвищує ефективність системи генерування електроенергії, оскільки накопичена енергія може бути належним чином поставлена до мережі після аварійного збою

4.6 Результати моделювання

Система генерації PV-BESS показана на рис. 4.1, з відповідними системами управління, була змодельована на платформі PSCAD/EMTDC.

У моделі фотоелектрична батарея потужністю 1 МВт складається з послідовно з'єднаних і паралельно підключених фотоелектричних панелей від BP Solar. З таблиці даних BP 3225T можна побачити, що номінальна напруга панелі за стандартних умов становить 29,1В.

Потужність акумуляторної системи зберігання енергії (BESS) також було визначено як 10 МВт. Відповідно до специфікацій, Hawker Genesis 12V26Ah10EP, номінальне значення елемента батареї становить 12 В. При номінальній напрузі 600В акумуляторної системи накопичення енергії (BESS) потрібно 50 елементів, з'єднаних послідовно для кожного ланцюга.

Місткість елемента батареї становить $C5 = 0,052$ А год (або $0,055/5$ А год на елемент). Тому число паралельно з'єднаних рядків в акумуляторній системі зберігання енергії (BESS) може бути обчислено як $1M / (50 \cdot 12 \cdot 0,052/5 \cdot 3600) = 44,5$ із енергетичною потужністю 1 МВт секунд. Активне локальне навантаження 10 МВт також включена до мережі та підключена до POI через іншу 7-кілометрову повітряну лінію, Line2. Константи R_L вибрані для контролерів в системі, перелічені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Константи, що використовуються під час моделювання

K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{p3}	K_{i3}	K_{p4}	K_{i4}
$4e-6$	$4e-6$	$4e-5$	$4e-6$	$4e-6$	$4e-6$	$4e-6$	$4e-6$
K_{p5}	K_{i5}	K_{p6}	K_{i6}	K_{p7}	K_{i7}		
0,2	0,01	10	0,1	10	0,4		

У першому випадку виконується моделювання, щоб дослідити продуктивність системи в час відмови. Якщо установка не оснащена системою безперебійної роботи (FRT-система), то інвертор PV-системи не працює, що означає, що генерація PV відключається відразу після виникнення збою.

Спостереження за верхньою траєкторією на рисунку 4.9 показує, що напруга в точці з'єднання (POI) падає з 1,0 до 0,7 його первісного значення під час виникнення несправності.

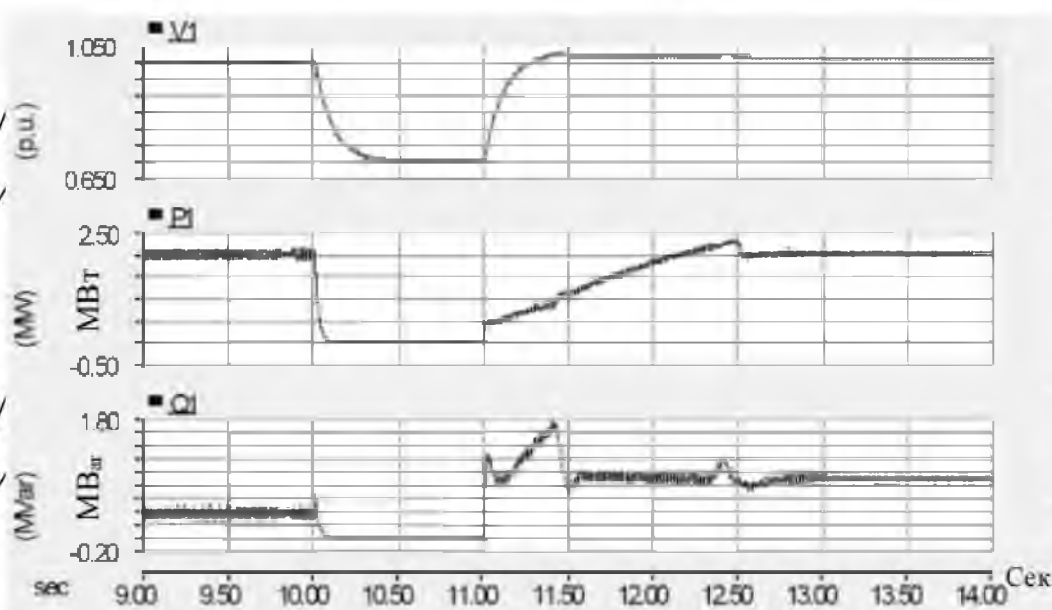


Рисунок 4.9 – Результати моделювання величини напруги POI та активної та реактивної потужності в POI (без FRT)

Подача активної та реактивної потужності до мережі показано на двох нижніх графіках на рисунку 4.9, відповідно, які зменшуються до нуля через відключення фотоелектричної системи від мережі.

Це роз'єднання викликає процес відновлення після того, як час збою триває довше, ніж у випадку з можливістю використання системи безперерійної роботи (FRT), як показано на рисунку 4.10, що є більш сприятливим з погляду роботи системи.

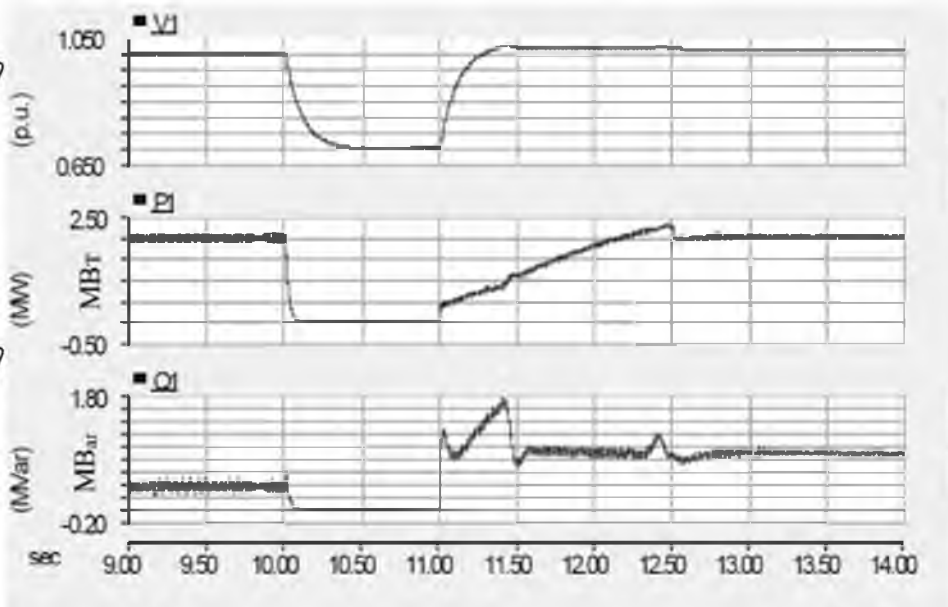


Рисунок 4.10 – Результати моделювання величини напруги РОГ та активної та реактивної потужності в РОГ (з FRT-системою)

Продуктивність акумуляторної системи накопичення (зберігання 0 енергії (BESS) під час цієї події показано на рисунку 4.11, з якого можна виявити, що зміни напруги, струму та потужності акумуляторної системи зберігання енергії (BESS) протягом часу пошкодження більше не ефективні в порівнянні з випадком, показаним на рисунку 4.12, це стосується особливо напруга постійного струму.

Як можна побачити на рисунку 4.10, величина напруга точка з'єднання (POI) падає до 0,8 пунктів, що вище, ніж наведено на рис. 4.9. Це обумовлено тим, що в цьому випадку генерація PV-системи може забезпечувати підтримку напруги.

Вироблення активної потужності зменшується відповідно, і фактична реальна потужність, що постачається в мережу, може ідеально відстежувати його опорне значення, зменшуючись із 2 MW до 1,6 MW.

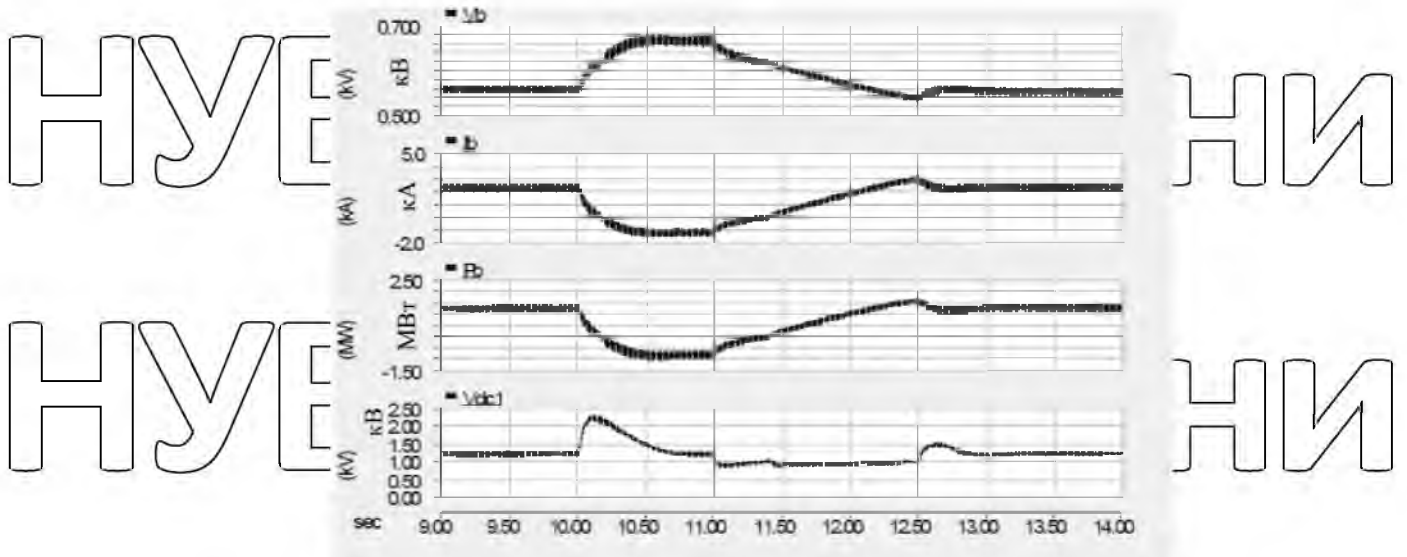


Рисунок 4.11 – Результати моделювання BESS-системи (без FRT-системи)

Це гарантує, що обмеження струму IGBT у перетворювачі не порушується. Проте ефективність підтримки напруги, що забезпечується фотоелектричною системою під час пошкодження, можна спостерігати на рис. 4.10, порівнюючи результати, наведені в верхній графік на рис. 4.9.

Результати моделювання модуля PV наведено на рис. 4.12

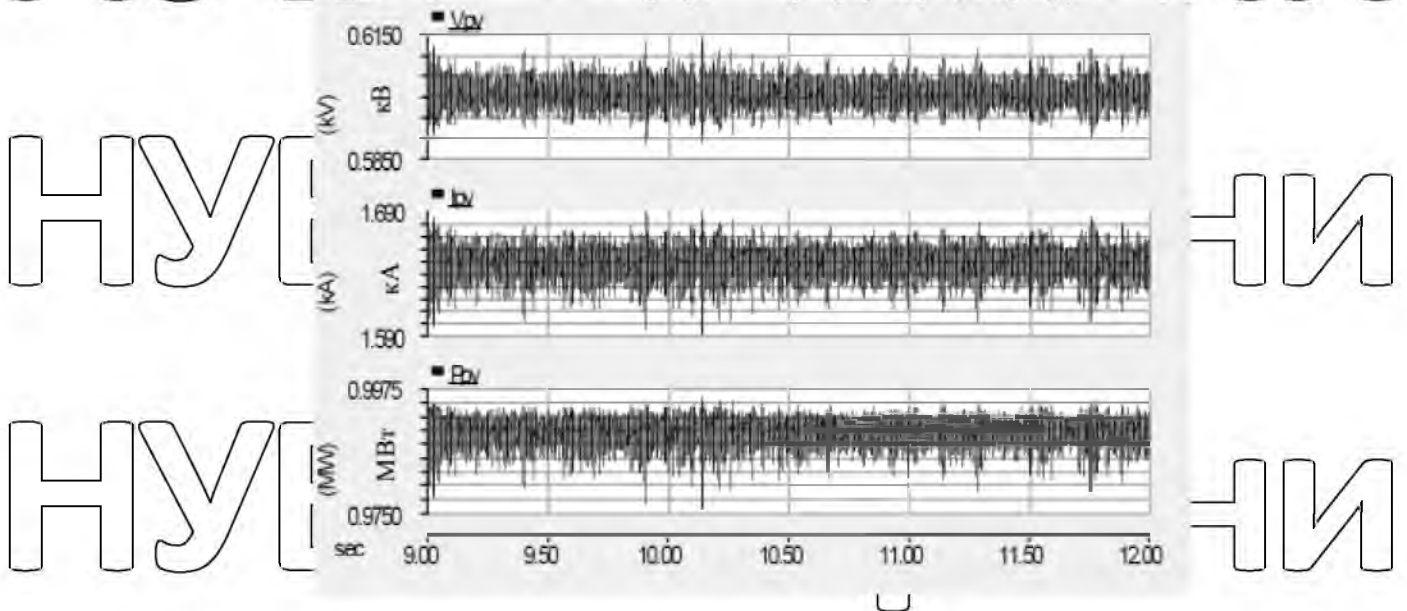


Рисунок 4.12 – Результати моделювання масиву PV (з FRT)

При моделюванні передбачається, що інтенсивність випромінювання в протягом модельованого періоду становить 1000 Вт/м^2 . А модуль PV-системи

управляється так, щоб він завжди працював на MPP. Тому напруга фотоелектричної батареї підтримується на рівні 600В за допомогою алгоритму MPPT. Загальний вихідний струм складає 1,66 кВ, а потужність, що генерується фотоелектричною батареєю, що становить 1 МВт.

На рисунок 4.13 показані результати моделювання акумуляторної системи зберігання енергії (BESS) за цей час.

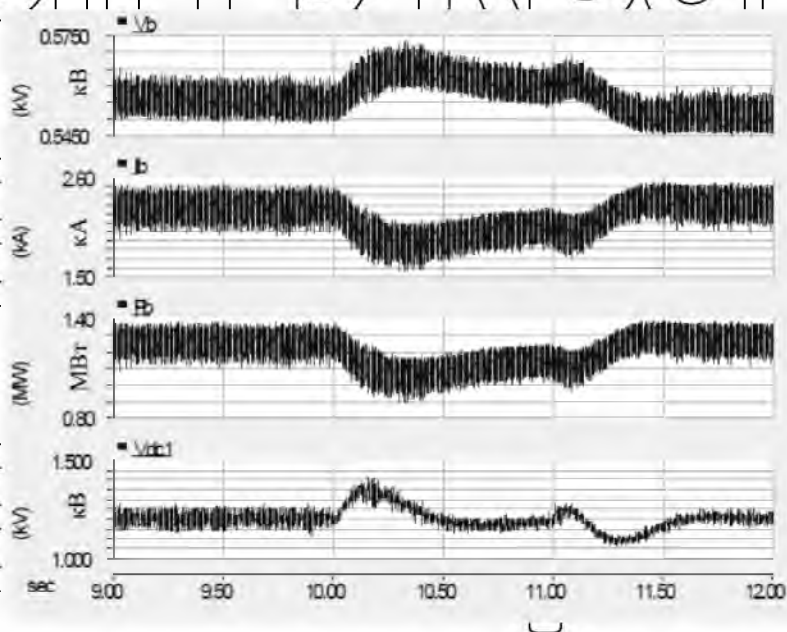


Рисунок 4.13 – Результати моделювання BESS (з FRT-системою)

За нижньою графікою можна виявити, що напруга на ланці постійного струму завжди підтримується біля його еталонного значення 12 кВ. За нормальних умов напруга на клемі BESS становить 0,555 кВ, а струм розряду – 2,25 кА. Вироблення електроенергії від BESS складає 1,25 МВт. Порівнюючи результат введення потужності у нормальному стані, центральний графік на рис. 4.10, можна побачити, що після виникнення несправності активна потужність, що подається у мережу, зменшується з 2 МВт до 1,6 МВт.

При тому, що фотоелектрична батарея все ще працює на MPP, генеруючи потужність 1 МВт (нижній графік на рис. 4.12) та що вихідна потужність акумуляторної системи накопичення енергії (BESS) знижується до 1,1 МВт (третій графік на рис. 4.13). Два верхні графіки показують напругу та струм

модуля акумуляторної системи зберігання енергії (BESS) відповідно.

НУБІП України

Висновки до розділу 4

Системи керування для регулюючого, перетворювача акумуляторної системи накопичення енергії (BESS) та перетворювача, підключеного до мережі, спроектовані з урахуванням можливостей FRT-системи.

Завдяки розробленій схемі системи безперебійної роботи (FRT), система акумулювання електричної енергії BESS зберігає енергію, що генерується сонячною станцією, що дозволяє їй продовжувати працювати в умовах MPP протягом усього часу несправності. Одночас резервна потужність інвертора з боку мережі може бути використана для підтримки роботи системи, забезпечуючи додаткове введення реактивної потужності в мережу до її максимальної струмової здібності перемикачів живлення, якщо це необхідно.

Таким чином, сонячна станція може зіграти свою роль, допомагаючи системі плавно відновлюватися після збоїв та підтримувати стабільність мережі під час пошкодження та в період відновлення після збою. Проведене під час роботи моделювання, підтвердило ефективність запропонованих систем управління.

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

НУБІП України

В першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи проведено огляд наукових джерел з теми впровадження систем акумулювання електричної, як

частини сучасної ефективної системи розподілу електричної енергії від сонячної генерації. В розділі описана робота пристрою акумулювання енергії і обрані методики проведення дослідження. Обґрунтовано використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення математичних

моделей системи акумулювання електроенергії та сонячної генерації, таких як MATLAB/Simulink, що дозволяє вивчити та аналізувати різні режими роботи системи без необхідності будівництва реального прототипу.

В другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розроблена математична модель роботи системи акумулювання електричної енергії від сонячної генерації в двох режимах:

– режим №1 передбачає, що всю електроенергію, вироблену СЕС, зберігається в акумуляторних батареях для подальшого використання після заряджання;

– режим №2 – частина електроенергії, вироблена СЕС, переносяться в часі за допомогою процесу заряджання і розряджання акумуляторів, тоді як інша частина електроенергії безпосередньо надходить в енергосистему.

Аналіз методів управління потужністю акумуляторної системи накопичення енергії (BESS), який був проведений в другому розділі, показав, що серед обраних перенективних схемних рішень, найбільш перспективним для управління як активною, так і реактивною потужністю є BESS на основі перетворювача, підключеного до мережі, спроектованого з урахуванням можливостей FRT-системи. За результатами аналізу були виділені головні завдання для САУ.

В третьому розділі магістерської кваліфікаційної роботи проведено імітаційне моделювання роботи системи акумулювання електричної енергії в середовищі MATLAB Simulink, а також розроблено програмне забезпечення

САУ із застосуванням класу SolarEnergySystem. Модель включає в себе три підсистеми – контролер, перетворювач, акумулятор. На основі розробленої розрахункової математичної моделі стабілізації потужності за рахунок впровадження системи акумулювання електричної енергії був встановлена взаємозв'язок між номінальними параметрами системи для зберігання надлишкової електроенергії (CAE) та встановленою потужністю СЕС.

На основі розробленої моделі в четвертому розділі розроблена інтегрована система сонячної генерації і акумулювання енергії PV-BESS із можливістю запобігання вплив струму короткого замикання в роботі сонячній електростанції, що дозволить підвищити ефективність роботи системи.

Системи керування для регулюючого перетворювача акумуляторної системи накопичення енергії (BESS) та перетворювача, підключеного до мережі, спроектовані з урахуванням можливостей FRT-системи. Система генерації PV-BESS з відповідними системами управління, була змодельована на платформі PSCAD/EMTDC.

Отже, розроблена схема системи безперебійної роботи (FRT) спільно з системою акумулювання електричної енергії BESS дозволяє зберігати та використовувати енергію, що генерується сонячною станцією, навіть під час несправностей. Це забезпечує неперервну роботу системи в умовах максимальної потужності точки максимальної потужності (MPP).

Додатково, резервна потужність інвертора, яка надається мережею, може використовуватися для підтримки роботи системи та надання додаткової реактивної потужності в мережу, якщо це необхідно. Це допомагає забезпечити стабільність мережі під час виникнення проблем та під час відновлення після збоїв.

Застосування цих систем управління підтверджено успішними результатами моделювання. Такий підхід дозволяє сонячній станції виконувати важливу роль у забезпеченні надійності та стабільності мережі під час негативних впливів та відновлення після них.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лазуренко О.П. Системи акумулювання електроенергії, аналіз можливостей та їх поєднання для застосування в енергосистемі // Лазуренко О.П., Івахнов А.В., Федорчук С.О./ Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ”ХПІ” – №10(1286) 2018. С.53-60.
2. Немикіна О.В. Поновлювальні та альтернативні джерела енергії / Для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: навч. посібник / О.В. Немикіна – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 188 с.
3. Кузнецов М.П., Мельник О.А., Смертюк В.М. Моделювання процесу акумулювання електроенергії в комбінованій енергосистемі / Відновлювана енергетика. 2020. № 4. С.22-30. Режим доступу: DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).22-30](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).22-30).
4. Лазуренко О.П. Моделювання системи накопичення електроенергії як високоманевреної потужності з застосуванням в різних вузлах енергосистемі / Лазуренко О.П., Івахнов А.В., Федорчук С.О. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Технічні науки. – Харків: ХДТУСД, 2018. С.40-43.
5. John A. Duffie, William A. Beckman, Nathan Blair Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / Fifth Edition – Wiley, 2020. – 919 p.
6. Івахнов А. В. Системи акумулювання електроенергії, аналіз можливостей та їх поєднання для застосування в енергосистемі / Івахнов А.В., Лазуренко О.П., Федорчук С.О. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, № 10, 2018. С. 53-59.
7. A. Andrijanovits, H. Hoimoja, D. Vinnikov. Comparative review of long-term energy storage technologies for renewable energy systems // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2012. – No. 2(118). – P. 21–26.

8. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Electronic resource] // Pictures of the Future – 2014. – Access to the website: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.

9. Лук'янов М. О., Вербицький Є. В., і Блінов А Система акумулювання сонячної/електростанції. Мікросист., Електрон. та Акуст., т. 26, вип. 2, с. 236748–1. 2021. Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.meas.236748>

10. Сонячна теплоенергетика: розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів денної форми навчання за освітньою програмою підготовки «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Вишневська Ю.П. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,15 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 27 с. – Назва з екрана. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53765>.

11. Lian X, Mui L, Peng Z, Liting T, Xiaohui Q, Ning A. Modeling and Simulation of Battery Energy Storage System (BESS) Used in Power System. Presented at: 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT).

12. Пульженко С.В., Буратинський І.М. Оптимальне завантаження генеруючих потужностей енергосистеми за умови експлуатації сонячних електростанцій із системами акумулювання. The Problems of General Energy. 2021. С. 4–12. Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2021.04.004>.

13. Погодинний баланс потужності ОЕС України. Єдиний державний веб-портал відкритих даних. Київ: Міністерство цифрової трансформації України. 2023 (дата звернення: 23.10.2023).

14. Yusupov D.T., Yusupova F.T. Modeling the operation of a photovoltaic system low power using the Simulink package // Universum: technical sciences: electron. scientific magazine 2021.7(88)/URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12122>.

15. Абд Али, Лайт Мохаммед А., Ф. М. АльРуфаї, Б.А. Якимович, В.В. Глечики / Анализ продуктивности гибридных фотовольтаэлектрических установок. Энергетичні установки та технології. 2019. Т. 5, №2. С. 61-68.

16. Abd Ali L.M., Ahmed Mohmmed H., Anssari M.O.H. Modeling and simulation of tidal energy. J. Eng. Appl. Sci., 2019, no. 14, pp. 3698-3706. doi.org/10.3923/jeasci.2019.3698.3706.

17. Разумний Ю. Т. Аспекти вирішення проблеми нерівномірності споживання електричної енергії / Юрій Тарасович Разумний. – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – 190 с.

18. Шевченко, С. В. Підвищення рівня ефективності електропостачання підприємства за рахунок використання кінетичних накопичувачів енергії : магістерська дис. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Шевченко Станіслав Володимирович. – Київ, 2018. – 128 с.

19. Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі [Текст] : дисертація кандидата технічних наук 05.13.07 / Солдатенко В.П. Кропивницький, ЦНТУ. 2019. – 220 с.

20. Стаднік М.І. Визначення рівня генерації електроенергії на сонячній електростанції відносно її встановленої потужності. / М.І. Стаднік, О.О. Рубаненко, С.В. Бондаренко // Техніка, енергетика, транспорт АПК.– Вінниця. 2016. – №3 (95). – С. 213-220.

21. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Поновлювальні та альтернативні джерела енергії» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання / Укл. О.В.Немикіна, О.І. Кузьменко – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019 – 26 с.

22. Гнатов А.В. Сонячна енергія – основні види та типи сонячних електростанцій /А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, В.О. Череватий, О.А.Ул'янець // Автомобіль и електроника. Современные технологии. – 2017. № 12. – С. 12–21.

Додаток А. Порівняння існуючих акумуляторів електричної енергії [18]

Параметри	Акумулятори				Супер-конденсатори
	Свинцево-кислотний	Нікель-кадмієвий	Натрій-сірчаний	Літій-іонний	
Принцип дії	Хімічне джерело з рідким електролітом і активною речовиною позитивних пластин – двоокисом свинцю PbO_2 , негативних пластин – губчастого свинцю Pb	Формування в лужному середовищі гідроксиду кадмію $Cd(OH)_2$ на аноді і гідроксиду нікелю $Ni(OH)_2$ на катоді	Хімічне джерело струму, який використовує натрій і сірку в рідкому стані як анод і катод, з керамічним електролітом	Перенесення заряду без участі рідкого електроліту позитивно зарядженим іоном літію, який має здатність впроваджуватися в кристалічну решітку інших матеріалів з утворенням	Імпульсний електрохімічний пристрій, процес запасання енергії в якому здійснюється за рахунок поділу заряду на двох електродах

				хімічного зв'язку: в графіт з утворенням LiC_6 , оксиди - LiMnO_2 , солі металів - LiMnOH	
Питома потужність, Вт/кг	80 – 200	150 – 500	50 – 150	50 – 180 (500*)	2 000 – 10 000
Питома масова енергоємність, Вт·ч/кг (МДж/кг)	10 – 30 (0,04 – 0,1)	45 – 65 (0,16 – 0,25)	100 – 200 (0,36 – 0,72)	100 – 250 (0,36 – 1)	1 – 30 (0,004 – 0,01)
Питома об'ємна енергоємність, Вт·ч/куб. дм (МДж/куб. дм)	30 – 150 (0,1 – 0,5)	50 – 150 (0,2 – 0,5)	100 – 300 (0,3 – 1)	250 – 400 (1 – 1,5)	15–45 (0,05 – 0,15)

<p>Питома вартість будівництва, долл. США / кВт·год</p>	<p>2 000 – 3 500</p>	<p>500 – 1 500</p>	<p>2 500</p>	<p>2 000 – 4 000</p>	<p>1450</p>
<p>Переваги</p>	<p>Широке використання, відпрацьована технологія виробництва і експлуатації. Дешевизна виробництва. Високий ККД, висока потужність. Тривалий термін зберігання</p>	<p>Більш високі параметри, ніж у свинцево-кислотних АКБ. Теоретична масова енергоемність - 237 Вт · год / кг</p>	<p>Число циклів заряд/розряд 2000 - 4000 при глибині розряду до 80 - 90%. Високе значення теоретичної масової енергоемності (925 Вт · год / кг). Відсутність дорогих матеріалів.</p>	<p>Висока енергоемність. Низький саморозряд. Глибокі цикли заряд / розряд (70 - 80%). Відсутність ефекту пам'яті</p>	<p>Висока питома потужність. Високий ККД (> 95%). Швидка розрядка. Високий ресурс (більше 100 000 циклів заряд/розряд)</p>

			<p>Нове покоління електрохімічного способу накопичення енергії</p>		
<p>Недоліки</p>	<p>Мала енергоємність. Мала кількість циклів заряд / розряд (100 - 500). Низька допустима глибина розряду. Застосування токсичних матеріалів. Високі капітальні та операційні витрати, пов'язані зі зберіганням, утилізацією та системою доставки</p>	<p>Ефект пам'яті - падіння енергоємності при неповному розряді або заряді. Критичність до точному дотримання вимог щодо правильної</p>	<p>Висока робоча температура акумулятора (290 - 360 °С). Мінімальний термін зберігання енергії, що запасється. Низька питома потужність</p>	<p>Висока ймовірність короткого замикання і вибуху літій-іонних акумуляторів великого розміру. Різка залежність ресурсу і вартості від типу електро-</p>	<p>Мала енергоємність. Значний вплив типу матеріалу на електрофізичні характеристики використовуваних електродів</p>

	електроліту	експлуатації. Застосування токсичних матеріалів, висока вартість утилізації	хімічних систем, які застосовуються на катоді і аноді, а також від температури і режимів експлуатації. Необхідна схема балансування осередків для многобаночних акумуляторів	
Область застосування	Забезпечення ефективного управління енергією, накопичення енергії для середніх енергосистем. Створення резервного запасу енергії в електромережах (в основному для вітряних і сонячних електростанцій)			Стабілізація роботи генераторів. Компенсація провалів і коливань

<h1>НУБІП України</h1>					<p>напруги (0,1-1Гц). Використання в гібридних схемах з АКБ</p>
<p>Приклади реалізованих проектів</p>	<p>BEWAG, електропостачання Західного Берліна (Німеччина, 1990 г.): потужність 8,5 МВт, час роботи 20 хв. Резервування і підтримання частоти малопотужної мережі Пуерто-Ріко (1998 г.):</p>	<p>GVEA, забезпечення безперервного електропостачання прибережних районів Аляски поблизу м Анкорідж (США, 2003р.): потужність 40 МВт, час роботи 15 хв. ПС Detroit Edison Site, (Мічиган, США, 2001 рік), для підтримки напруги і власних потреб, АКБ цинк-</p>	<p>Вітряна станція Роккачо, (Японія, 2008 р.) Всього впроваджено близько 100 об'єктів. Потужність 34 МВт, час роботи 600 хв. Накопичувачі підстанцій електромережі General Electric і NGK Інсуляторс (США, Японія): потужність 34 МВт</p>	<p>Буферний накопичувач вітрової енергоустановки компанії Алтаір-Nano (Гаваї, США): Потужність 1 МВт, уом-кістка 250 кВт · год</p>	<p>Використання в гібридних схемах для збільшення ресурсу АКБ і зниження часу відгуку системи, в електротранс кравців засобах і гібридних автомобілях (США, Японія,</p>

	<p>потужність 20 МВт, час роботи 15 хв. Чинно (Каліфорнія, США, 1986 р), різні б'єкти для дослідження можливостей регулювання навантаження, частоти, напруги та реактивної потужності: потужність 10 МВт, час роботи 240 хв</p>	<p>бром: потужність 0,4 МВт, час роботи 480 хв. Один з великих високотехнологічних заводів в Японії (2001 рік), вирівнювання графіка на грузок, АКБ Ванадіумредоксний: потужність 1,5 МВт, час роботи 60 хв</p>		<p>Корея, Франція, Німеччина, Австралія)</p>
--	---	---	--	--

НУБІП України

НУБІП України

Додаток Б. Порівняння великомасштабних та маломасштабних систем накопичення енергії

Параметри	Великомасштабні станції		Маломасштабні системи накопичення енергії	
	ГАЕС	НСП	КНЕ	НІНЕ
Принцип дії	Електростанції, що працюють на принципі перетворення електричної енергії в потенційну енергію води	Електростанції, що працюють на принципі закачування стисненого повітря в спеціальні сховища (Compressed Air Energy Storage - CAES)	Прилади, що працюють на принципі електромеханічного накопичення енергії.	Прилади, що працюють на принципі накопичення електромагнітної енергії понад провідникові індукційним накопичувачем
Питома потужність (Вт/кг)	-	-	500 – 10 000	3 000 – 50 000
Питома масова енергоємність, Вт·год/кг (МДж / кг)	-	-	15 – 300 (0,05 – 1)	1 – 30 (0,036 – 0,1)
Питома об'ємна енергоємність, Вт·год/куб. дм (МДж / куб. Дм)	-	-	60 – 550 (0,2 – 2)	1 000 – 10 000 (3,6 – 36)

<p>Питома вартість будівництва, \$/кВт·г</p> <p>од</p>	<p>Понад 2 000</p>	<p>2 000 – 10 000</p>	<p>800 – 1 200</p>	<p>-</p>
<p>Питома вартість обслуговування \$/кВт/рік</p>	<p>80 – 200</p>	<p>500</p>	<p>50 – 80</p>	<p>-</p>
<p>Переваги</p>	<p>Висока маневреність гідроенергетичного обладнання: число пусків оборотних гідроагрегатів, досягає 500 - 700 в місяць (можливо до 30 пусків на добу). Значна величина маневреної регулюючої потужності (сотні - тисячі МВт)</p>	<p>Екологічна чистота</p>	<p>Високий ККД (95%). Швидка розрядка. Екологічна безпека</p>	<p>Високий ККД (98%). Швидка розрядка. Тривалий період використання. Високе значення енергії, що запасється - до 100 МДж</p>

<p>Недоліки</p>	<p>Мала питома енергоємність. Низький ККД. Високі вимоги до місця установки, необхідність істотного втручання в екологію району. Висока питома вартість будівництва</p>	<p>Необхідність утилізації тепла, що виділяється при стисненні повітря, і підгріву закачаного повітря при його адиабатичному розширенні, що знижує ефективність системи в цілому</p>	<p>Обмеження при збільшенні потужності. Обмеження в застосуванні для стабілізації напруги</p>	<p>Необхідність використання низькотемпературних надпровідників і охолоджуючого устаткування (криогенна система)</p>
<p>Область застосування</p>	<p>Забезпечення ефективного управління енергією. Стабілізація частоти створення резервного запасу енергії в електромережах</p>	<p>Забезпечення якості електроенергії. Аварійне електроживлення</p>	<p>Забезпечення безперебійного живлення в електромережах і різних установах. Стабілізація роботи генераторів. Компенсація провалів і коливань напруги (0,1 - 1 Гц)</p>	

<p>Привади реалізованих проектів</p>	<p>Будівництво здійснюється понад 100 років. Перша ГАЕС Летте (Швейцарія, 1882 г.), потужність 100 кВт.</p> <p>В даний час в світі налічується близько 500 ГАЕС, їх сумарна потужність більше 300 000 МВт</p>	<p>Сховища типу CAES: Ханторф (Німеччина) і Макінтош (США). Їх гранична потужність становить 290 МВт і 226 МВт відповідно</p> <p>Тестована підводна установка Underwater-CAES (Торонто, Канада): пікова потужність наземної станції 660 КВт</p>	<p>Широке використання в складі стаціонарних і мобільних систем у багатьох технічно розвинених країнах</p>	<p>Babcock & Wilcox і Анкоріджской енергокомпанії Municipal Light and Power (США): енергоемність 1800 МДж, максимальна потужність 40 МВт</p> <p>Підстанція Такома (Лос-Аламоської лабораторія, США, 1983): енергоемність 30 МДж, потужність 10 МВт</p> <p>АМАС 500 (Іспанія, 1993 г.): енергоемність 1 МДж, максимальна потужність 500 кВт</p>
--	---	---	--	--